

Volume 9 Nopember 2007

ISSN 1411 – 1349

PROSIDING
PERTEMUAN DAN PRESENTASI ILMIAH
TEKNOLOGI AKSELERATOR
DAN APLIKASINYA



Diterbitkan oleh

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL

Jl. Babarsari, Kotak Pos 6101 YK BB, Telp. (0274) 488435, Fax.: (0274) 487824
E-mail : ptapb@batan.go.id

YOGYAKARTA - INDONESIA

PROSIDING
PERTEMUAN DAN PRESENTASI ILMIAH
TEKNOLOGI AKSELERATOR
DAN APLIKASINYA



Diterbitkan oleh

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL

Jl. Babarsari, Kotak Pos 6101 YK BB, Telp. (0274) 488435, Fax.: (0274) 487824
E-mail : ptapb@batan.go.id

YOGYAKARTA - INDONESIA

2007

Tahun Terbit Pertama : 1999

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat petunjuk dan karuniaNya telah dapat diterbitkan Prosiding Pertemuan Ilmiah TEKNOLOGI AKSELERATOR DAN APLIKASINYA. Prosiding ini merupakan dokumentasi karya ilmiah para peneliti dari berbagai disiplin ilmu yang berkaitan dengan teknologi dan aplikasi akselerator dan telah dipresentasikan pada SEMINAR NASIONAL TEKNOLOGI DAN APLIKASI AKSELERATOR X pada tanggal 7 Nopember 2007 di PTAPB – BATAN.

Pertemuan dan Presentasi Ilmiah tersebut merupakan agenda rutin tiap tahun yang diselenggarakan oleh PTAPB-BATAN Yogyakarta dan untuk tahun 2007 merupakan seminar akselerator yang ke 10 dengan tujuan untuk memasyarakatkan teknologi akselerator dan aplikasinya kepada para ilmuwan, akademisi, peneliti dan pengguna teknologi berbasis akselerator serta penelitian tentang akselerator yang telah dilakukan oleh para peneliti di lingkungan Batan maupun di luar Batan. Pembukaan Seminar Nasional dilakukan oleh Deputi Bidang PDT Bapak Prof. Dr. Pramudita Anggraita dan dilanjutkan ceramah umum oleh **Dr. Andrew Fielding** (*RECENT ADVANCE IN RADIOTHERAPY*), **Abdul Waris, M.Eng., Ph. D.** (*PEMANFAATAN AKSELERATOR UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH NUKLIR : STATUS SAAT INI*). Seminar ini dihadiri peserta yang terdiri dari peneliti di lingkungan Batan maupun Dosen/ Mahasiswa Perguruan Tinggi Negeri dan Swasta.

Di dalam prosiding ini dimuat karya tulis terdiri dari 2 makalah Ceramah Umum dan hasil-hasil penelitian sebanyak 33 topik yang terdiri dari 26 makalah dari PTAPB dan 7 makalah dari luar PTAPB.

Semoga penerbitan prosiding ini dapat bermanfaat sebagai acuan untuk memacu dan mengembangkan penelitian yang akan datang khususnya bidang teknologi akselerator dan aplikasinya. Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penerbitan prosiding ini.

Editor

**PROSIDING PERTEMUAN DAN PRESENTASI ILMIAH
TEKNOLOGI AKSELERATOR DAN APLIKASINYA**

EDITOR

Ketua

Prof. Drs. Sudjatmoko, SU. (PTAPB-BATAN)

Anggota

Prof. Dr. Kusminarto (FMIPA-UGM)

Prof. Drs. Darsono, MSc, (PTAPB-BATAN)

Drs. BA. Tjipto Sujitno, MT, (PTAPB-BATAN)

Dr. Rer. Nat. Trimardji Atmono (PTAPB-BATAN)

Ir. Dwi Wahini Nurhayati, M.Eng. (BBKPP-Dept. Perindustrian)

Penerbitan Prosiding

Saminto, Sumarmo, Badi Wiyana

Penerbit : Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

Alamat Penerbit/Redaksi : Jalan Babarsari Kotak Pos 6101 YK BB Yogyakarta 55281, Indonesia,

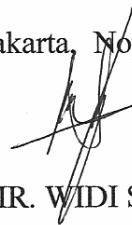
Telepon : (0274) 488435, Fax.: (0274) 487824, E-mail : ptapb@batan.go.id

Frekuensi terbit : Tahunan

**SAMBUTAN
KEPALA PUSAT TEKNOLOGI AKSELERATOR DAN
PROSES BAHAN**

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada penyunting dan semua pihak yang terlibat dalam penyelesaian prosiding ini. Kami berharap prosiding ini dapat digunakan sebagai dokumentasi karya ilmiah para peneliti yang telah dipresentasikan pada Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Akselerator X di PTAPB-Batan pada tanggal 7 Nopember 2007 dengan melibatkan para peneliti dalam bidang teknologi akselerator dan aplikasinya, baik yang berasal dari PTAPB dan beberapa Puslit dalam lingkup BATAN maupun beberapa peneliti dari perguruan tinggi. Di dalam prosiding ini disajikan ilmu pengetahuan tentang pengembangan teknologi akselerator dan aplikasinya. Akhirnya kami berharap, semoga prosiding ini dapat menjadi acuan yang bermanfaat bagi berbagai pihak sehingga lebih mendalami dan mengembangkannya untuk mendukung keberhasilan pembangunan nasional di bidang iptek nuklir untuk kesejahteraan bangsa dan negara.

Yogyakarta, Nopember 2007



DR. IR. WIDI SETIAWAN

PROSIDING PERTEMUAN DAN PRESENTASI ILMIAH TEKNOLOGI AKSELERATOR DAN APLIKASINYA

DAFTAR ISI

PENGANTAR EDITOR	i
EDITOR	ii
SAMBUTAN KEPALA PTAPB-BATAN	iii
DAFTAR ISI	iv - vi
CERAMAH UMUM	
RECENT ADVANCES IN RADIOTHERAPY	vii - viii
Dr. Andrew Fielding	
PEMANFAATAN AKSELERATOR UNTUK PENGELOLAAN LIMBAH NUKLIR: STATUS SAAT INI	ix - xi
Abdul Waris	
PENGUJIAN SUMBER ELEKTRON PADA MBE UNTUK APLIKASI INDUSTRI LATEKS	1 - 9
Djoko S. Pudjorahardjo, Suprpto	
STUDI ASPEK LINGKUNGAN DAN PRODUK SAMPING PENGOLAHAN GAS BUANG DARI PLTU DENGAN IRRADIASI ELEKTRON	10 - 19
Rill Isaris	
PERHITUNGAN TEGANGAN TERMAL DAN EVALUASI DESAIN TARGET SISTEM GENERATOR NEUTRON	20 - 26
Utaya, B. Bandriyana, Sutadi	
RANCANGAN BEJANA IRADIASI LATEKS KARET ALAM UNTUK VULKANISASI DENGAN IRADIASI BERKAS ELEKTRON	27 - 35
Suprpto, Djoko SP.	
PERHITUNGAN DAN ANALISIS SISTEM CATU DAYA LISTRIK UNTUK PENGOLAHAN GAS BUANG PLTU BATUBARA MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON (MBE)	36 - 45
Suyamto, Djasiman	
SIMULASI INTERLOCK MBE MENGGUNAKAN PLC	46 - 52
Taxwim, Ade Ali Wardana	
OPTIMASI TABUNG PLASMA LUCUTAN DISKRIT UNTUK PRODUKSI OZON MAKSIMUM	53 - 59
Agus Purwadi, Widdi Usada	

STUDI KARAKTERISTIK LISTRIK PEMBANGKIT PLASMA PADA MESIN BERKAS ELEKTRON PULSA	60 - 67
<i>Widdi Usada, Suryadi, Aminus Salam, Agus Purwadi</i>	
KAJIAN SISTEM <i>ELECTROSTATIC PRECIPITATOR</i> UNTUK PENGENDAPAN DEBU GAS BUANG	68 - 75
<i>Prayitno, Tunjung Indrati</i>	
PEMBUATAN DAN UJI COBA LAPISAN TIPIS ZnO:Al SEBAGAI PROTOTIPE SENSOR GAS DENGAN GAS UJI KARBON MONOKSIDA	76 - 84
<i>Taxwim, Tjipto Sujitno, Mei Sugiyanto</i>	
DISAIN BEJANA TEKAN SEBAGAI ISOLATOR TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA	85 - 92
<i>Sutadi, Saminto, Sukidi, Suprpto</i>	
RANCANGAN PERISAI RADIASI MESIN BERKAS ELEKTRON 300 kV/20 mA UNTUK IRRADIASI LATEKS ALAM	93 - 101
<i>Rany Septaaji, Sutadi, Setyo Atmojo</i>	
PERANCANGAN SISTEM PENGENDALI SUMBER TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA	102 - 108
<i>Taufik, Djasiman, Saminto, Sumaryadi</i>	
SPARK GAP SEBAGAI SKAKELAR TEGANGAN TINGGI	109 - 112
<i>Widdi Usada, Suryadi</i>	
KARAKTERISTIK NEUTRONIK DARI REAKSI SPALLASI PROTON-MERKURI PADA SISTEM TARGET ADS	113 - 121
<i>Silakhuddin, Slamet Santosa</i>	
KESTABILAN BERKAS RADIASI AKSELERATOR LINIER PADA RADIOTERAPI	122 - 125
<i>Putri Suryo Dinoto, Intanung Syafitri</i>	
SISTEM SEDIAAN DAN INJEKSI AMONIAK UNTUK PENGOLAHAN GAS BUANG PLTU BATUBARA MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON	126 - 133
<i>Budi Setiawan dan Muhadi AW.</i>	
UJI KARAKTERISTIK KANDUNGAN UNSUR LOGAM SUNGAI CODE DENGAN METODE ANALISIS AKTIVASI NEUTRON CEPAT (AANC)	134 - 141
<i>Agus Tri Purwanto, Sunardi</i>	
DEPOSISI LAPISAN TIPIS Mo/CuInS ₂ PADA SUBSTRAT KACA DENGAN TEKNIK <i>SPUTTERING</i>	142 - 148
<i>Bambang Siswanto, Wirjoadi, Yunanto</i>	
ANALISIS UNSUR DALAM BATUAN DI CEKUNGAN BENTARSARI KABUPATEN BREBES JAWA TENGAH MENGGUNAKAN METODE AANC	149 - 155
<i>Elin Nuraini, Agus Tri Purwanto</i>	

PEMISAHAN MOLIBDENUM DARI URANIL NITRAT DENGAN EKSTRAKSI KROMATOGRAFI <i>Endang Susiantini, Wisjachudin Faisal</i>	156 - 161
UJI COBA FORMULASI KOMPON UNTUK BAHAN CIUT PANAS SEBAGAI ISOLASI KABEL <i>Gatot Trimulyadi Rekso, Anik Sunarni</i>	162 - 166
KAJIAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DARI INDUSTRI KULIT MENGGUNAKAN IRADIASI BERKAS ELEKTRON <i>Herry Poernomo, Cahya Widiyati</i>	167 - 175
PENGARUH IMPLANTASI ION AIN TERHADAP KEKERASAN DAN KEAUSAN BAHAN BANTALAN BOLA <i>Indreswari Suroso, Mudjijana, Tjipto Sujitno</i>	176 - 184
KAJIAN PEMBUATAN PROTOTIPE KAPASITIF-RESISTIF RH MIKROSENSOR BERBAHAN DIELEKTRIK Al_2O_3 <i>Tjipto Sujitno, Iping Suhariadi, Kamsul Abraha</i>	185 - 192
KAJIAN TEKNOLOGI PEMBUATAN PUPUK ORGANIK CAIR DARI LIMBAH CAIR PRA PENYAMAKAN KULIT PASCA IRADIASI <i>Herry Poernomo</i>	193 - 202
PERAN PENAMBAHAN Y DAN Ce TERHADAP SIFAT KETAHANAN OKSIDASI MATERIAL INTERMETALIK TiAl DAN FeAl. <i>Lely Susita R.M., Suprpto, Tjipto Sujitno</i>	203 - 209
PENGARUH DOSIS IRADIASI BERKAS ELEKTRON TERHADAP BEBERAPA PARAMETER LINGKUNGAN DARI LIMBAH CAIR INDUSTRI PENYAMAKAN KULIT <i>M Yazid, Zainul Arifin</i>	210 - 216
EFEK IMPLANTASI ION TiN TERHADAP KEAUSAN DAN KEKERASAN KOMPONEN BANTALAN BOLA DALAM MEDIA KOROSIF KABUT AIR LAUT <i>Sinarep, Tjipto Suyitno, Mudjijana</i>	217 - 224
PENGARUH IMPLANTASI ELEMEN REAKTIF PADA MATERIAL FeNiCr DAN FeAl UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN OKSIDASI SUHU TINGGI <i>Sudjatmoko, Kusminarto, Utari, Anis Yuniati</i>	225 - 233
PENGERASAN PERMUKAAN PENA PISTON DENGAN TEKNIK NITRIDASI PLASMA <i>Suprpto, Lely Susita RM dan Sukidi</i>	234 - 240
DEPOSISI LAPISAN TIPIS SnO_2 UNTUK SENSOR GAS KARBON MONOKSIDA <i>Sayono, Tjipto Sujitno, Taxwim</i>	241 - 247
KARAKTERISASI STRUKTUR KRISTAL DAN STRUKTUR MIKROPADUAN BAHAN SEMIKONDUKTOR $CuIn(Se_{0,2},S_{0,8})_2$. <i>Wirjoadi, Bambang Siswanto</i>	248 - 252

RECENT ADVANCES IN RADIOTHERAPY

Dr. Andrew Fielding

School of Physical and Chemical Sciences, Queensland University of Technology, Brisbane, Queensland, Australia

Within a few years of Roentgen discovering the x-ray in 1895 the first radiotherapy treatment was performed. The goals of radiotherapy have not changed since then; to deliver a curative dose of radiation to the tumour while sparing the surrounding normal healthy tissue. These early treatments were carried out with low energy x-ray sources and as such were limited to treating mainly superficial tumours. The development of the ^{60}Co teletherapy unit and then linear accelerator provided the megavoltage clinical beams that could deliver sufficient dose uniformly to deep-seated tumours. The linear accelerator is still the workhorse machine for delivering external beam radiotherapy and while the reliability has improved dramatically the original design has not changed very much.

The development of computed tomography was one of the most significant advances that had a large impact on the treatment planning of a radiotherapy treatment. The tumour and organs at-risk could be located accurately and dose calculations could be performed using the CT number information. The development of 3D conformal radiotherapy (3DCRT) and more recently Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) has made it possible to plan and deliver dose distributions that conform closely to the shape of the tumour volume and avoid neighbouring organs-at-risk. The problems associated with locating the tumour at the time of treatment and managing the set-up errors and effects of organ motion are currently being investigated through the use of new imaging technology in the treatment room. This image guidance technology includes electronic portal imaging devices and cone beam CT mounted on the linear accelerator.

These new technologies and techniques have allowed us to move closer to achieving the original aims of a radiotherapy treatment, delivering as high a dose as is possible to the tumour volume while at the same time sparing normal tissues. The indications are that these developments will improve

the efficacy of radiotherapy as a tool in the management of cancer, improving the local control of the disease and minimising the side effects experienced by patients.

TANYA JAWAB

Lilis Susanti

- *Regulatory published by either IAEA or Australian Regulatory Agency in term of safety & security; are they still applicable, can they still accommodate the advanced development in radiotherapy?*
- *The research for aiming higher quality and lower risk (for the patients), so far can the funds for it, or the research it self in particular can be performed in collaboration with Indonesian experts?*

Andrew Fielding

- Regulatory documents published by IAEA, AAPM, IPPEM, ICAN are still valid for advanced radiotherapy in addition there are some further documents published for advanced form of radiotherapy and additional the documents are constantly being upgraded to accommodate new techniques.
- Obtaining funds for research is always difficult in any country. I don't see any reason why the expertise in Indonesia or Malaysia can't be use in International collaboration.

Rill Isaris

- *In the application of linac for stereotactic surgery (3D conformal radiotherapy), what facilities must be provided to carry out the examination? (multi leaf collimator ..., and what else?). How to achieve a high level dose assessment?*

- *What is the basic principles must fulfilled/or what conditions should be prepared for high quality radiotherapy treatment? (you have mentioned max dose to target ..., and what else?).*

Andrew Fielding

- Stereotactic radiotherapy. Extra equipment : stereotactic fumour. Mico-MLC possibly. Requirements for mechanical stability of isocetre are move straight than the conventional

treatment. Bether than 1 mm special collimator, requirement to provid the will circular fields. Also need a centre localization of the fumour volume ie. CT + MRI.

- High quality radiotherapy can only be carried out with a strong quality assurance (QA) program and well trained staff.

PEMANFAATAN AKSELERATOR UNTUK PENGELOLAAN LIMBAH NUKLIR: STATUS SAAT INI

Abdul Waris

Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika, Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung, 40132, E-mail: awaris@fi.itb.ac.id

EXTENDED ABSTRACT

Akselerator atau lebih tepatnya akselerator partikel adalah suatu peralatan yang memanfaatkan medan listrik untuk memperbesar energi kinetik dari partikel bermuatan dan mengurungnya^[1]. Akselerator dirancang untuk mempercepat elektron (partikel lepton) atau hadron, ion stabil atau radioaktif. Aspek Fisika dan Teknologi dari akselerator mencakup berbagai cabang disiplin ilmu Fisika yang lain, misalnya listrik magnet, struktur materi, fisika atom, superkonduktivitas, mekanika non-linier, fisika plasma dan mekanika kuantum.

Saat ini akselerator banyak dijumpai dalam berbagai macam aplikasi, diantaranya dalam riset nuklir dan fisika partikel, dalam aplikasi industri implantasi ion dan litografi, dalam penelitian biologi dan medis dengan siklotron, dalam riset material dan kedokteran menggunakan spalasi neutron, dalam radioterapi, sterilisasi makanan, pengelolaan limbah, dan lain-lain^[2].

Dari sekian banyak bidang aplikasi akselerator yang ada, tulisan ini lebih difokuskan pada pemanfaatan akselerator untuk mengelola atau transmudasi limbah nuklir: masalah-masalah yang dihadapi serta usaha yang telah dan sedang diupayakan untuk mengatasi beberapa problem tersebut.

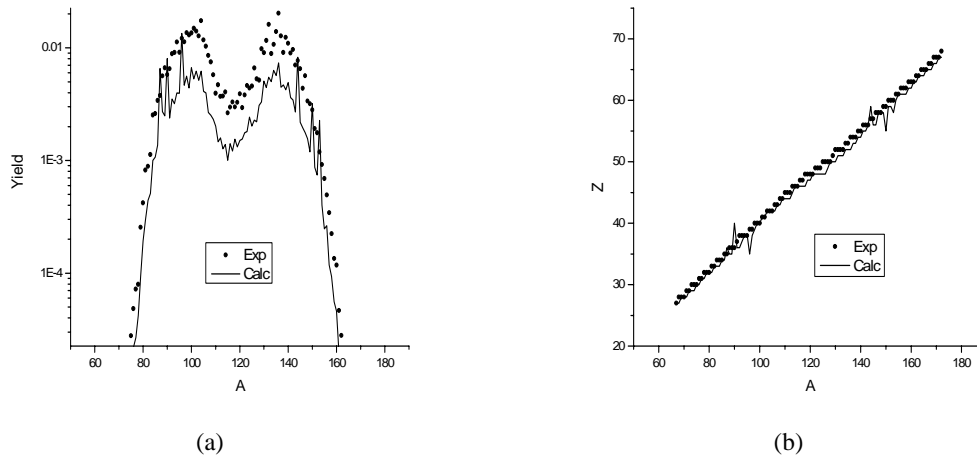
Energi nuklir merupakan salah satu dari dua sumber alam yang bisa menjamin kelangsungan hidup manusia dalam jangka panjang selain energi surya^[3]. Akan tetapi tingkat penerimaan publik terhadap energi nuklir masih rendah, yang salah satu penyebab utamanya adalah ketakutan terhadap limbah nuklir. Oleh karena itu keberhasilan dalam pengelolaan limbah nuklir merupakan kunci utama untuk mengatasi masalah di atas. Beberapa opsi telah diusulkan untuk mengelola limbah nuklir, terutama limbah nuklir tingkat tinggi (*high level wastes*, HLW), yaitu membuang ke angkasa luar, membuang ke dasar samudra, menyimpan di bawah gunung es, menyimpan di tempat penyimpanan permanen bawah tanah, dan didaur ulang atau ditransmutasikan dalam reaktor nuklir atau sistem hybrid (reaktor +akselerator, *accelerator driven system*, ADS)^[4].

Dari semua opsi ini, opsi yang terakhir merupakan pilihan yang paling menarik dan lebih realistis. Transmutasi adalah proses konversi suatu elemen atau isotop menjadi isotop lain dengan cara ditembak dengan partikel lain dalam reaktor atau akselerator. Dalam industri nuklir transmudasi dimaksudkan untuk mengkonversi isotop berumur panjang (biasanya toksisitasnya tinggi) menjadi isotop berumur pendek (biasanya toksisitasnya rendah) atau isotop stabil.

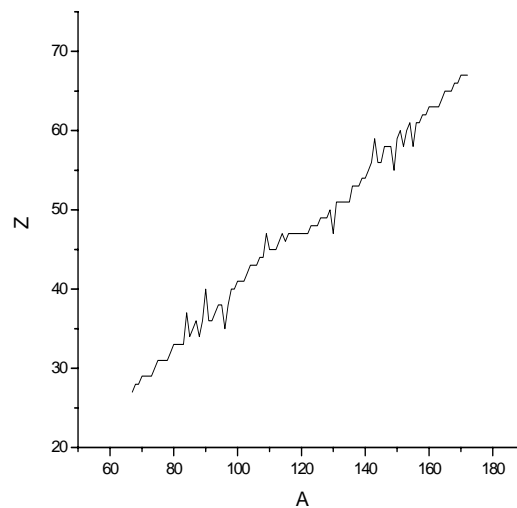
Salah satu masalah yang dihadapi dalam transmudasi limbah nuklir adalah kelengkapan perpustakaan data nuklir (*nuclear data libraries*). Sejumlah nuclear data libraries (JENDL, ENDF, JEF) yang ada tidak lengkap, terutama yang menyangkut sejumlah *higher actinides* dan produk fisi apalagi produk spalasi. Dalam perhitungan neutronik fast breeder reactor (FBR), pengaruh produk fisi diabaikan (salah satunya alasan karena datanya tidak ada atau tidak lengkap). Dalam perhitungan neutronik *light water reactor* (LWR) menggunakan SRAC hanya 66 isotop produk fisi (FP) yang ditinjau (dari >1350 isotop), sisanya dikumpulkan dalam *pseudo/lump FP*. Data tentang *isotopic fission yield* yang ada dalam JENDL hanya untuk 10 nuklida. Belum ada data *isotopic fission yield* dari fisi oleh sebagian besar aktinida minor. Demikian pula untuk reaksi spalasi dalam ADS. Belum ada data *isotopic spallation yield* dari reaksi spalasi dengan target HLW khususnya plutonium dan aktinida minor. Metode analitik dan semi-empirik yang ada untuk menghitung *fission/spallation yield* baru sampai pada perhitungan distribusi massa belum sampai pada distribusi isotop^[5].

Dalam makalah ini, kami mengusulkan suatu metode baru untuk menghitung peluang munculnya suatu isotop produk fisi atau produk spalasi (*isotopic spallation yield*) untuk spektrum energi cepat (*fast energy spectrum*) dan energi sekitar ratusan MeV^[6,7]. Beberapa hasil perhitungan dengan metode ini ditunjukkan dalam Gambar 1 dan 2^[6,7].

Katakunci: akselerator, transmudasi, limbah nuklir, produk spalasi, *spectrum* energi, *isotopic spallation yield*



Gambar 1. (a) Perhitungan *fission mass yield* dari ^{239}Pu pada energi neutron 14 MeV, (b). Distribusi produk fisi dari ^{239}Pu pada energi neutron 14 MeV.



Gambar 2. Distribusi produk spalasi dari ^{238}Pu pada energi proton 200 MeV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator
- [2] S. Y. LEE, *Accelerator Physics*, World Scientific, Singapore, 1999.
- [3] CARLO RUBBIA, *The Future of Nuclear Energy*, Sweden, 2005.
- [4] R. G. COCHRAN and N. TSOULFANIDIS, *The Nuclear Fuel Cycle, Analysis and Management*, 2nd Edition, ANS, Illinois, USA, 1999.
- [5] A. WARIS, *Peranan Partitioning & Transmutation dan Data Nuklir Dalam Industri Nuklir*, Presentasi Tamu Dalam Seminar *Partitioning & Transmutation* di PPI-BATAN, Serpong, April 2007.
- [6] A. WARIS, *Calculation of Isotopic Fission-Yield of ^{233}U and ^{232}Th for Fast Energy*

Spectrum, Proc. Intern. Conf. on Advances in Nuclear Science and Engineering 2007 (ICANSE 2007), November 13-14, Bandung, Indonesia, 2007.

- [7] A. WARIS, R. KURNIADI, Y. S. PERKASA, S. PRAMUDITYA, and SUWOTO, *Estimation of Isotopic Fission-Yield of ^{238}Pu and ^{237}Np with Neutron Energy Range of 100-200 MeV*, Proc. 2nd Asian Physics Symposium 2007 (APS 2007), November 29-30, Bandung, Indonesia, 2007.

TANYA JAWAB

Bambang Supardiyono

- Kita mengenal hukum kekekalan tenaga, massa, momentum, apakah dalam proses pengolahan limbah nuklir ada dikenal hukum kekekalan racun, dimana proses pengeluaran racun secara alami yang perlahan-lahan (*decay*) akan menjadi besar bila ditransmutasi?

A. Waris

- Istilah “racun” sebenarnya untuk membuat kita hati-hati dalam bekerja dengan limbah nuklir.

Racun yang dimaksud ada tingkat/efek radiasi α , β , γ dan neutron kalau mengenai/masuk dalam tubuh manusia. Peluruhan membuat “racun” tersebut menjadi tidak kekal, karena sudah terkonversi menjadi isotop lain.

Rill Isaris

- Secara teoritis dan praktis pengolahan limbah nuklir dengan akselerator sudah teraplikasi di beberapa Negara besar. Kita tahu bahwa bila kita membangun (membeli) PLTN, selain daur ulang bahan bakar, daur ulang limbah nuklirnya dapat (harus?) dikirim ke Negara produsen. Bagaimana pendapat Bapak, tentang mengolah limbah nuklir dengan membuat (membangun) fasilitas akselerator sendiri, versus mengolah dengan re-ekspor, dilihat dari aspek teknis-ekonomi.

A. Waris

- Untuk tahap awal limbah nuklir kita proses di Negara lain dulu sambil kita kuasai teknologinya dan menunggu harganya lebih murah. Disamping itu agar kita tidak dicurigai ingin mengembangkan senjata nuklir.

PENGUJIAN SUMBER ELEKTRON PADA MBE UNTUK APLIKASI INDUSTRI LATEKS

Djoko S. Pudjorahardjo, Suprpto

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

ABSTRAK

PENGUJIAN SUMBER ELEKTRON PADA MBE UNTUK APLIKASI INDUSTRI LATEKS. Prototip MBE 300 kV/20 mA sedang dirancang bangun untuk digunakan pada industri lateks. Diantara komponen-komponen utama yang dirancang bangun adalah sumber elektron tipe termionik. Untuk mendapatkan data karakteristik sumber elektron tersebut telah dilakukan pengujian sumber elektron sebelum diinstal dengan komponen-komponen utama lainnya. Pengujian dilakukan dengan melakukan pengukuran arus dan profil berkas elektron yang dihasilkan sumber elektron. Dari pengukuran arus berkas elektron diperoleh arus berkas elektron maksimum 55 mA pada tegangan katode-anode 3 kV dan tegangan pemercepat 12 kV. Dari pengukuran diameter berkas elektron menggunakan rotating probe diperoleh diameter minimum 16,1 mm untuk arah x dan arah y pada tegangan katode-anode antara 1 kV sampai 1,5 kV. Sedangkan dari pengukuran secara visual pada bekas tumbukan berkas elektron pada target diperoleh diameter 19 mm arah x dan 23 mm arah y. Dengan pengujian sumber elektron yang ternyata menghasilkan arus berkas elektron lebih dari 30 mA, dapat disimpulkan bahwa sumber elektron hasil rancang bangun ini memenuhi syarat untuk digunakan pada MBE untuk industri lateks.

Kata kunci: Sumber elektron, MBE, industri lateks.

ABSTRACT

TESTING OF ELECTRON GUN FOR ELECTRON BEAM MACHINE DEDICATED FOR LATEX INDUSTRY. Prototype of EBM 300 kV/20 mA is being designed and constructed for application in latex industry. Among the designed and constructed main components is the thermionic electron gun. To find out data of characteristic of the electron gun, testing of the electron gun has been performed before it installed with the other main components. The testing was done by measuring the current and profile of electron beam produced by the electron gun. From the measurement of electron beam current it is found the maximum electrons beam current of 55 mA whenever the cathode-anode voltage and the accelerating voltage were 3 kV and 12 kV respectively. From the measurement of electron beam profile using rotating probe it was found that the minimum electron beam diameter in both x and y directions were 16.1 mm at the cathode-anode voltage from 1 kV up to 1.5 kV. The visual measurement of the scratch caused by the collision between electron beam and target yields the beam diameter of 19 mm and 23 mm in x and y directions respectively. From the fact that the electron gun yields electron beam greater than 30 mA it is concluded that the electron gun can be used for EBM dedicated for latex industry.

Keywords: Electron gun, EBM, latex industry

PENDAHULUAN

Pemanfaatan mesin berkas elektron (MBE) dalam bidang industri telah banyak dilakukan, terutama dalam proses pengeringan pelapisan (*curing of coatings*) permukaan suatu bahan, proses pembentukan ikatan silang pada plastik, karet dan bahan isolasi kabel, proses pravulkanisasi karet alam, sterilisasi peralatan medis, pengawetan bahan makanan, modifikasi tekstil dan *graft polymerization*^[1,2,3,4]. Dibandingkan dengan cara konvensional baik proses termal

maupun proses kimia, proses iradiasi elektron mempunyai beberapa keunggulan antara lain: menghasilkan kualitas produk yang lebih tinggi, tidak menimbulkan polusi pada lingkungan, hemat energi, reaksi-reaksi terjadi pada suhu kamar, proses yang terjadi mudah dikontrol, biaya operasi lebih rendah untuk produksi massal. Tetapi pada proses iradiasi elektron diperlukan modal awal (investasi) yang lebih besar dibandingkan dengan metode konvensional, yaitu untuk pengadaan MBE dan fasilitas pendukungnya.

Pemanfaatan MBE pada industri lateks karet alam di Indonesia mempunyai prospek yang sangat baik, mengingat Indonesia merupakan negara penghasil karet alam terbesar nomor 2 di dunia setelah Malaysia. Radiasi elektron dalam hal ini berfungsi untuk proses pravulkanisasi pada lateks karet alam yang akan memperbaiki sifat-sifat fisika lateks karet alam. Sebagai contoh, bertambahnya ketahanan terhadap bahan pelarut (*solvent*), meningkatnya kekuatan regangan dan kekerasan, berkurangnya tingkat kemuluran dan tahan terhadap panas (*deformasi termal*)^[3,4,5]. Disamping itu bahan lateks karet alam hasil pravulkanisasi dengan elektron bersifat stabil dalam penyimpanan sehingga sangat cocok untuk industri kecil dan menengah, memiliki kadar protein, karbohidrat dan lemak yang rendah serta bebas dari *nitrosamine* dan protein alergen yang sampai saat ini belum ada cara lain untuk mengatasinya. Semua itu akibat terbentuknya ikatan silang (*crosslinking*) pada lateks karet alam selama proses iradiasi elektron.

Kajian proses pravulkanisasi lateks karet alam menggunakan berkas elektron termasuk teknoekonominya telah dilakukan di PATIR-BATAN Jakarta, bahkan kajian ini telah sampai pada tahap RUK. Menindaklanjuti hasil kajian tersebut maka sejak tahun 2005 di PTAPB-BATAN Yogyakarta telah dilakukan rancang bangun MBE kapasitas 300 keV/20 mA untuk industri lateks. Dengan merancang bangun sendiri MBE ada beberapa keuntungan yang diperoleh yaitu kandungan lokal komponen MBE yang dibuat cukup besar, perawatan lebih mudah dilakukan karena teknologi telah dikuasai, kemampuan SDM menjadi meningkat. Kegiatan rancang bangun MBE ini merupakan program strategis PTAPB dalam mendukung salah satu program *landmark* BATAN bidang manufaktur.

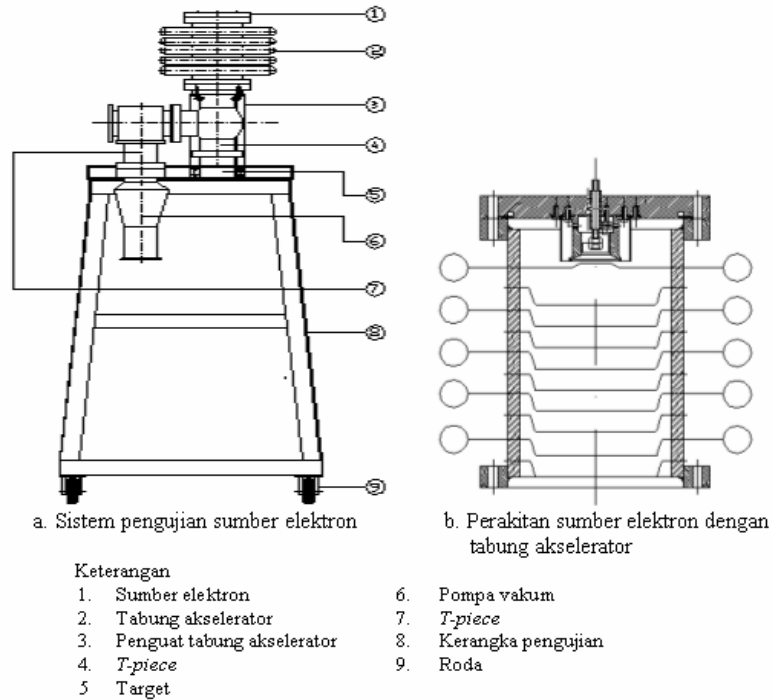
Diantara komponen-komponen MBE yang telah dirancang bangun adalah sumber elektron yang berfungsi untuk menghasilkan berkas elektron. Sumber elektron yang telah dirancang bangun adalah tipe termionik, di mana elektron dihasilkan melalui proses emisi atau pancaran termionik pada filamen panas karena dialiri arus listrik. Elektron-elektron yang dipancarkan tersebut kemudian dipercepat dengan medan elektrostatik dan dibentuk menjadi berkas elektron. Setelah keluar dari sumber

elektron selanjutnya berkas elektron dipercepat di dalam tabung akselerator, dimayarkan di dalam corong pemayar dan akhirnya dikeluarkan melalui jendela (*window*) MBE untuk iradiasi bahan lateks karet alam. Sumber elektron yang dirancang bangun diharapkan dapat menghasilkan arus berkas elektron di atas 30 mA untuk memenuhi kebutuhan radiasi bahan lateks karet alam. Dalam makalah ini dibahas hasil pengujian sumber elektron yang telah dirancang bangun pada tahun 2005 sebagai komponen utama MBE untuk industri lateks.

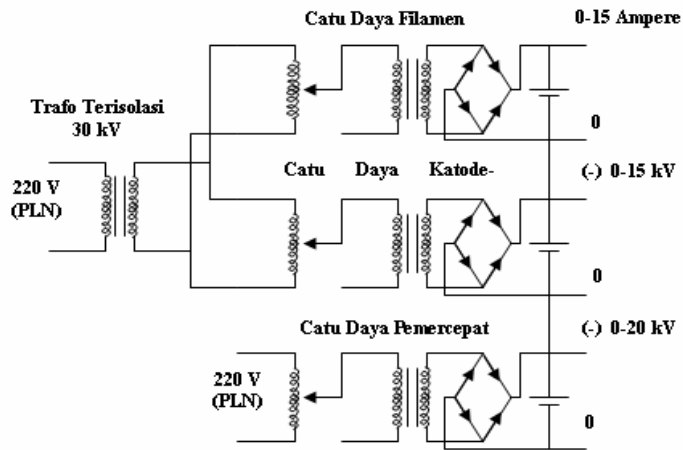
TATA KERJA

Pengujian dimaksudkan untuk memperoleh data karakteristik arus dan profil berkas elektron dari sumber elektron yang telah dirancang bangun. Pengujian sumber elektron dilakukan dengan menginstal sumber elektron pada sistem pengujian seperti ditampilkan pada Gambar 1. Dalam pengujian sumber elektron ini, sumber elektron dipasang langsung pada tabung akselerator sehingga berkas elektron yang dihasilkan langsung dipercepat di dalam tabung akselerator. Oleh karena itu *flange* dudukan elektrode pemfokus yang sekaligus sebagai *flange* sumber elektron harus sesuai dengan *flange* tabung akselerator untuk memudahkan pemasangan. Tabung akselerator yang digunakan adalah tipe 2JA004150 (NEC *Flange*) buatan NEC-USA. *Flange* pada tabung akselerator ini mendekati dengan *flange* untuk standar vakum DN 160 CF sehingga *flange* sumber elektron dibuat dengan standar *flange* DN 160 CF dan disesuaikan dengan *flange* tabung akselerator. Untuk mengoperasikan sumber elektron diperlukan 3 buah catu daya, yaitu catu daya arus filamen (0 – 15 A), catu daya tegangan katode – anode (0 – 15 kV) dan catu daya tegangan pemercepat (0 – 20 kV). Rangkaian ketiga catu daya tersebut seperti ditampilkan pada Gambar 2.

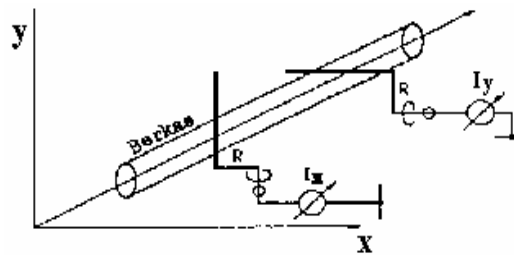
Dalam pengujian ini arus berkas elektron diukur menggunakan DC miliamper untuk beberapa variasi tegangan katode-anode dan tegangan pemercepat. Profil berkas elektron (diameter berkas) diamati menggunakan *rotating probe* dan osiloskop Trio CS-1560 A untuk menampilkan pulsa saat *rotating probe* memotong berkas elektron seperti ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 1. Sistem pengujian sumber elektron.



Gambar 2. Rangkaian catu daya pada pengujian sumber elektron.

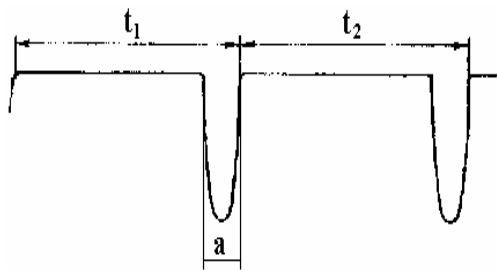


Gambar 3. Pengamatan profil berkas elektron dengan *rotating probe*^[10].

Pulsa yang tertampil pada layar osiloskop ini tidak langsung menunjukkan besar diameter berkas, tetapi masih harus dilakukan suatu perhitungan. Jika *rotating probe* berputar dengan kecepatan sudut tertentu dan memotong berkas elektron, maka arus berkas elektron $i_{(t)}$ dapat dihitung sebagai berikut.^[10]

$$i_{(t)} = 2r \sqrt{\left(\frac{R}{r}\right)^2 (\cos^2 \omega t - 1) + 1} \quad (1)$$

dengan r jari-jari berkas elektron (mm), R jari-jari lintasan *rotating probe* (21 mm), t waktu perpotongan antara *rotating probe* dengan berkas elektron (detik). Dalam satu putaran *rotating probe* memotong berkas elektron 2 kali, sehingga dihasilkan bentuk pulsa seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Bentuk pulsa *rotating probe* pada osiloskop^[10].

Jika berkas ini terfokus sepanjang sumbu, maka integral waktu perpotongan antara berkas elektron dan *rotating probe* adalah sama yaitu $t_1 = t_2$ sehingga diameter berkas elektron (d) dapat dihitung dengan persamaan^[10]

$$d = 2R \sin \frac{\pi a}{2t_1} \quad (2)$$

dengan a adalah waktu perpotongan antara berkas elektron dengan *rotating probe* (detik), t_1 waktu setengah putaran *rotating probe* (detik).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pengoperasian sumber elektron harus diperhatikan kemampuan katode, yaitu suhu pemanasannya agar elektron dapat diemisikan dan diekstraksi menjadi berkas elektron. Katode sumber elektron dibuat dari kawat tungsten berdiameter 0,5 mm dan dibentuk spiral. Suhu operasi katode diprediksi dengan menghitung emisi elektron dari katode sebagai fungsi suhu dengan persamaan Richardson-Dushman sebagai berikut.^[8]

$$j = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad (3)$$

dengan A adalah konstanta Richardson ($A/\text{cm}^2 \text{K}^2$), ϕ fungsi kerja (eV), k tetapan Boltzmann (eV/K) dan T suhu pemanasan (K). Nilai A tergantung pada jenis bahan filamen (katode).

Persamaan (3) menyatakan hubungan emisi elektron di dalam ruang sumber elektron dengan suhu operasi katode. Suhu operasi sangat berkaitan dengan sifat-sifat bahan pada saat dioperasikan. Satu diantara sifat yang paling penting berkaitan dengan suhu operasi adalah titik leleh (*melting point*). Dalam pengoperasian sumber elektron, suhu katode tidak boleh melebihi titik lelehnya. Hasil perhitungan untuk memprediksi suhu operasi dengan menggunakan persamaan (3) ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 5a menunjukkan hasil perhitungan hubungan antara rapat arus jenuh emisi elektron sebagai fungsi suhu, sedangkan Gambar 5b menunjukkan besar emisi arus elektron yang dihasilkan sebagai fungsi suhu. Persamaan (3) menunjukkan bahwa arus jenuh emisi elektron ditentukan oleh suhu katode. Makin tinggi suhu katode, makin besar arus emisi elektron.

Hal ini berkaitan dengan energi yang diberikan pada elektron untuk melepaskan dari ikatannya. Makin tinggi suhu katode, berarti makin besar energi yang diberikan kepada elektron sehingga elektron tersebut makin mudah melepaskan diri dari ikatannya dan akibatnya makin banyak elektron yang diemisikan. Dengan kata lain rapat emisi elektron makin besar. Arus emisi elektron merupakan perkalian antara rapat emisi elektron dengan luas permukaan katode. Arus jenuh emisi elektron akan makin besar jika rapat emisi elektron makin besar akibat dari makin tingginya suhu katode.

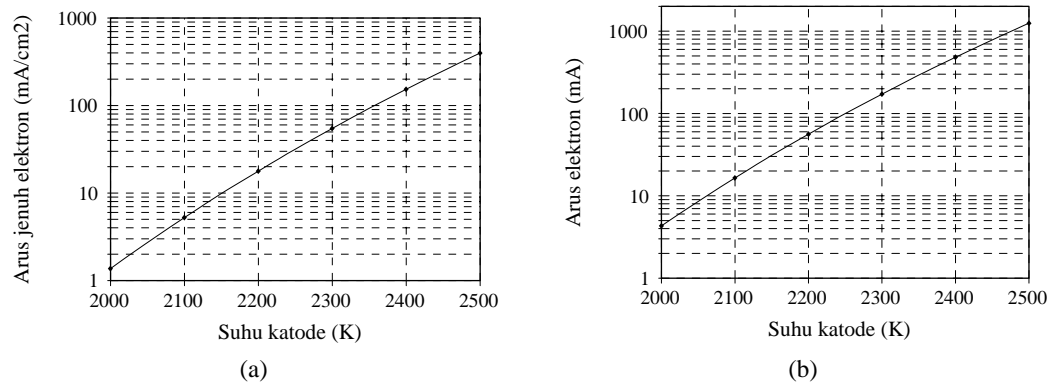
Suhu operasi katode dibatasi oleh titik leleh pada kondisi operasi, yaitu pada kondisi vakum yang cukup tinggi. Tingkat kevakuman pada MBE pada umumnya berkisar antara 10^{-2} s/d 10^{-4} Pa (10^{-4} s/d 10^{-6} mbar) atau lebih tinggi^[8]. Makin tinggi tingkat kevakumannya, makin baik untuk kondisi operasi MBE. Pada tingkat kevakuman yang makin tinggi, maka gangguan pada lintasan berkas elektron dan efek *sputtering* yang terjadi lebih kecil. Oleh karena tingkat kevakuman sumber elektron sama dengan tingkat kevakuman MBE, maka titik leleh katode ditentukan pada tingkat kevakuman ini. Titik leleh tungsten adalah 3050 K untuk kevakuman $1 \cdot 10^{-4}$ Torr dan 2700 K untuk kevakuman $1 \cdot 10^{-6}$ Torr (1 Torr sama dengan 1,33 mbar)^[11]. Berdasarkan perhitungan untuk memperkirakan

suhu operasi didapatkan bahwa pada suhu katode 2200 K dapat mengemisikan arus elektron sebesar 55,98 mA dan pada suhu katode 2300 K sebesar 171,73 mA (Gambar 5.b). Jadi dengan suhu operasi ini, katode dari bahan tungsten untuk sumber elektron dengan arus berkas sampai dengan 50 mA dapat berfungsi dengan baik. Hal ini karena suhu operasi untuk menghasilkan emisi arus elektron yang diperlukan masih jauh di bawah titik leleh pada kondisi tingkat kevakuman saat MBE beroperasi (10^{-4} s/d 10^{-6} mbar).

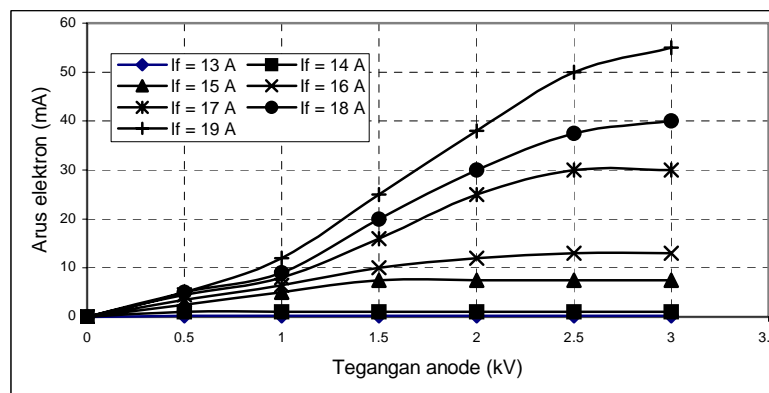
Hasil pengukuran arus dan profil berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7. Pada Gambar 6 ditunjukkan hubungan arus elektron sebagai fungsi tegangan katode-anode untuk 7 variasi arus filamen. Berdasarkan pengukuran tersebut didapatkan bahwa arus berkas elektron 0,25 mA untuk arus filamen 13 A dan arus berkas elektron 55 mA untuk arus filamen 19 A. Hasil ini menunjukkan bahwa pada

arus filamen 13 A tercapai suhu katode yang merupakan suhu awal terjadinya emisi elektron. Pada kondisi ini berkas elektron yang dapat diekstraksi terbatas hanya 0,25 mA pada variasi tegangan katode-anode mulai dari 0,5 kV sampai dengan 3 kV sebagai tegangan ekstraktor.

Pada kondisi ini arus berkas elektron tidak berubah walaupun tegangan ekstraktor (katode-anode) divariasikan, hal ini disebabkan karena keterbatasan elektron yang diemisikan oleh katode. Selanjutnya arus filamen dinaikkan hingga suhu katode naik dan menyebabkan kenaikan emisi elektron dari permukaan katode. Dengan kenaikan emisi elektron maka jumlah elektron yang diekstraksi akan naik dan menyebabkan kenaikan arus berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron. Hal ini sesuai dengan persamaan (3) yaitu dengan bertambahnya suhu katode makin besar emisi elektron yang dihasilkan per satuan luas permukaan katode.



Gambar 5. Kurva emisi elektron sebagai fungsi suhu katode. (a) Rapat arus jenuh emisi elektron sebagai fungsi suhu, (b) Emisi arus elektron sebagai fungsi suhu.



Gambar 6. Hubungan arus berkas elektron sebagai fungsi tegangan katode-anode untuk variasi arus filamen pada tegangan pemercepat 12 kV.

Besar arus berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron, disamping dipengaruhi oleh arus filamen juga dipengaruhi oleh tegangan elektrode pemfokus-anode atau tegangan katode-anode sebagaimana dinyatakan dengan persamaan^[7]:

$$V = f(x) = A x^{4/3} \quad (4)$$

dengan

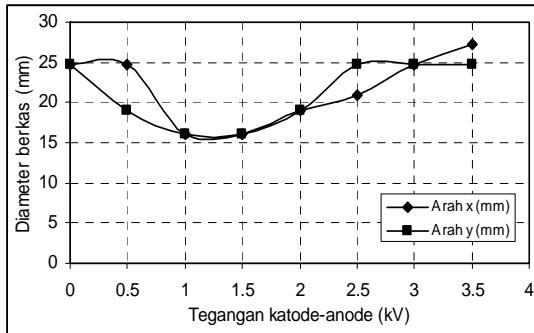
$$A = \left(\frac{9J_e}{4\varepsilon_o (2\eta)^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (5)$$

Berdasarkan pengamatan menunjukkan bahwa walaupun arus filamen dinaikkan sampai 19 A sehingga suhu katode mencapai sekitar 2230 K, tetapi jika tegangan katode-anode belum dinaikkan maka belum terbentuk arus berkas elektron (arus berkas elektron belum terukur). Hal ini disebabkan pada kondisi tegangan katode-anode nol, belum terjadi ekstraksi berkas elektron dari permukaan katode sehingga belum ada elektron yang keluar dari sumber elektron. Pada kondisi ini elektron yang diemisikan oleh katode membentuk awan elektron di sekitar permukaan katode dan membentuk muatan ruang. Dengan demikian emisi elektron oleh katode dibatasi oleh muatan ruang dari awan elektron di sekitar permukaan katode. Jika tegangan katode-anode dinaikkan maka akan terjadi ekstraksi elektron dan dibentuk menjadi berkas elektron yang dikeluarkan dari sumber elektron. Karena elektron di sekitar katode terekstraksi, maka awan elektron di sekitar katode berkurang dan terjadi emisi elektron sesuai dengan jumlah elektron yang terekstraksi. Jika tegangan katode-anode dinaikkan sampai pada batas tertentu maka semua elektron yang diemisikan oleh katode akan terekstraksi dan dibentuk menjadi berkas elektron yang dikeluarkan dari sumber elektron melalui celah anode. Pada kondisi ini emisi elektron terjadi secara maksimum sesuai dengan kondisi suhu operasi katode dan tidak terbentuk awan elektron di sekitar katode yang membatasi emisi elektron. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (4) dan persamaan (5), untuk mengekstraksi berkas elektron ini didapatkan tegangan katode-anode sebesar 2,1 kV untuk arus berkas elektron 10 mA dan 3,5 kV untuk arus berkas elektron 25 mA serta 4,6 kV untuk arus berkas elektron 40 mA. Hasil perhitungan tegangan katode-anode mendekati sama dibandingkan dengan tegangan katode-anode terpasang dalam pengujian. Namun untuk arus berkas elektron diatas 30 mA (arus filamen diatas 16 A) tegangan katode-anode tidak dapat dinaikkan

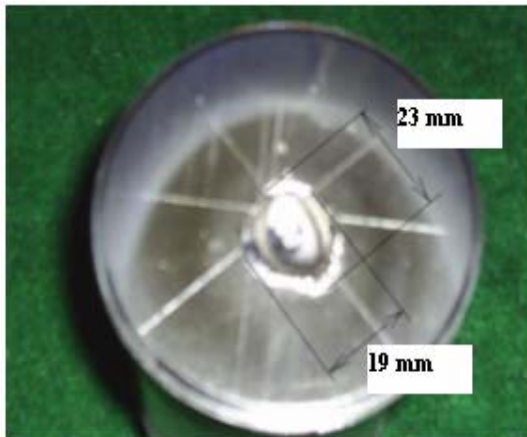
karena kemampuan catu daya katode-anode yang terbatas. Jika arus filamen dinaikkan, arus berkas elektron bertambah tetapi tegangan katode-anode tidak dapat dinaikkan yaitu maksimum 3 kV. Dengan demikian elektron yang diemisikan oleh katode belum terekstraksi secara keseluruhan, hal ini diindikasikan dengan kenaikan tegangan katode-anode belum mencapai pada kondisi mantap (*steady state*) seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Untuk arus filamen 19 A didapatkan arus berkas elektron 55 mA pada tegangan katode-anode 3 kV dan tegangan pemercepat 12 kV. Pada kondisi ini jika tegangan katode-anode dapat dinaikkan maka arus berkas elektron kemungkinan masih dapat dinaikkan, tetapi karena keterbatasan kemampuan catu daya katode-anode maka tidak dapat dilakukan.

Hasil pengamatan profil berkas elektron menggunakan *rotating probe* untuk menentukan diameter berkas sampai pada target ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil ini merupakan hasil perhitungan diameter berkas elektron menggunakan persamaan (2) dan didasarkan pada pulsa yang dibangkitkan *rotating probe* yang ditampilkan dengan osiloskop (lihat lampiran). Pulsa ini dibangkitkan karena perpotongan berkas elektron dengan *rotating probe*. Untuk menghindari kerusakan pada target akibat daya terdesipasi berkas elektron, pengamatan dilakukan pada arus berkas elektron 300 μ A sehingga daya terdesipasi yang terjadi cukup kecil. Pada tegangan katode-anode mendekati 0 kV, diameter berkas elektron baik arah x maupun arah y adalah 24,7 mm. Jika tegangan katode-anode dinaikkan, diameter berkas elektron makin kecil. Diameter berkas elektron minimum dicapai pada tegangan katode-anode antara 1 kV hingga 1,5 kV yaitu 16,1 mm baik untuk arah x maupun arah y. Hal ini disebabkan karena fungsi tegangan katode-anode disamping untuk mengekstraksi berkas elektron juga berfungsi sebagai pemfokus sehingga makin tinggi tegangan katode-anode fungsi pemfokusan makin baik sehingga diameter berkas elektron makin kecil. Tetapi setelah tegangan katode-anode mencapai diatas 1,5 kV, kenaikan tegangan katode-anode mengakibatkan makin besar diameter berkas elektron. Hal ini disebabkan karena medan listrik yang diakibatkan oleh tegangan katode-anode sebagai pemfokus terlalu kuat sehingga terjadi pemfokusan dini sebelum mencapai target (*rotating probe*) dan terjadi persilangan lintasan berkas elektron. Akibat persilangan ini diameter berkas menyebar kembali dan mencapai target dengan diameter yang lebih besar yaitu 27,3 mm untuk arah x dan 24,7 mm untuk arah y pada tegangan katode-anode 3,5 kV. Jika dibandingkan dengan peng-

ukuran secara visual pada bekas tumbukan berkas elektron pada target (lihat Gambar 8) terjadi perbedaan. Pengukuran secara visual didapatkan diameter bekas elektron 19 mm untuk arah x dan 23 mm untuk arah y. Tumbukan berkas elektron ini merupakan hasil tumbukan berkas elektron untuk variasi tegangan katode-anode dari 0 kV sampai 3,5 kV yaitu dari awal sampai akhir pengamatan.



Gambar 7. Hubungan diameter berkas elektron sebagai fungsi tegangan katode-anode untuk tegangan pemercepat 12 kV.



Gambar 8. Pengukuran bekas tumbukan berkas elektron pada target.

Perbedaan ini disebabkan karena ketidaktepatan penentuan waktu perpotongan berkas elektron dengan *rotating probe* berdasarkan pulsa yang ditampilkan oleh osiloskop serta ketidaktepatan pengukuran pelebaran target sesuai dengan profil berkas elektron sehingga menyebabkan ketidaktepatan. Dengan hasil ini diharapkan dapat digunakan pada mesin berkas elektron di industri khususnya industri lateks.

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian sumber elektron dapat disimpulkan bahwa arus berkas elektron maksimum 55 mA didapatkan pada tegangan katode-anode 3 kV dan tegangan pemercepat 12 kV. Pengukuran diameter berkas elektron menggunakan *rotating probe* diperoleh diameter minimum 16,1 mm untuk arah x maupun arah y pada tegangan katode-anode antara 1 kV sampai 1,5 kV. Jika dibandingkan pengukuran secara visual pada bekas tumbukan berkas elektron pada target didapatkan diameter 19 mm arah y dan 23 mm arah x. Dengan pengujian sumber elektron yang ternyata menghasilkan arus berkas elektron lebih dari 30 mA, dapat disimpulkan bahwa sumber elektron hasil rancang bangun ini telah memenuhi kriteria rancangan MBE untuk industri lateks berkapasitas 300 kV/20 mA.

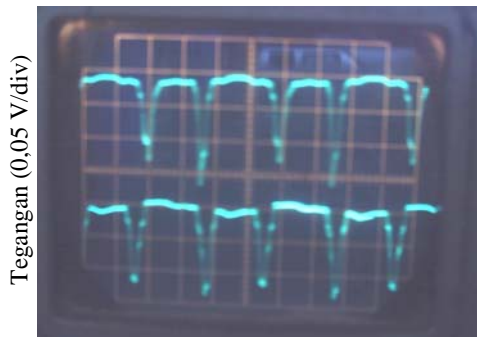
DAFTAR PUSTAKA

- [1] QIZHANG, Z., *Electron Accelerators Manufactured in China*, UNDP/IAEA/RCA Regional Training Course on EB Irradiation Technology, Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, 1991.
- [2] SUZUKI, M., *Recent Advances in High Energy Electron Beam Machine*, Nissin-High Voltage Co., Ltd., Proceedings of the Workshops on the Utilization of Electron Beams, JAERI-M, 90-194, 1990.
- [3] YAMAMOTO, S., *Crosslinking of Wire and Cables with Electron Beam*, Proceedings of the Workshops on the Utilization of Electron Beams, JAERI-M, 90-194, 1990.
- [4] MAKUUCHI, K., *Electron Beam Processing of Rubbers*, Proceedings of the Workshops on the Utilization of Electron Beams, JAERI-M, 90-194, 1990.
- [5] MERI SUHARINI, *Vulkanisasi Lateks Karet Alam Secara Batch Dengan Iradiasi Berkas Elektron*, PPI Aplikasi radiasi, P3TIR-BATAN, 2002.
- [6] SCHRAF, W., WIESZCZYCKA, W., *Particle Accelerators for Industrial Processing*, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 1999.
- [7] SUPRAPTO, DJOKO SP DAN DJASIMAN, *Peningkatan Kinerja Sumber Elektron Termionik dengan Elektrode Pierce Untuk MBE PTAPB-BATAN*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Puslitbang Teknologi Maju, BATAN, Yogyakarta, 2002.

- [8] SCHILLER, S., *et. al.*, *Electron Beam Technology*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1982.
- [9] PIERCE, J.R., *Theory and Design of Electron Beams*, D. Van Nostrand Company. Inc, New York, 1954.
- [10] SZTARICKAI, T., *et. al.*, *Manual for Trouble-shooting and Improvement of Neutron Generators and Other Low Energy Accelerators*, IAEA, Hungary, 1993.
- [11] ROTH, A., *Vacuum Technology*, North-Holland Publishing Company, New York, 1979.

LAMPIRAN

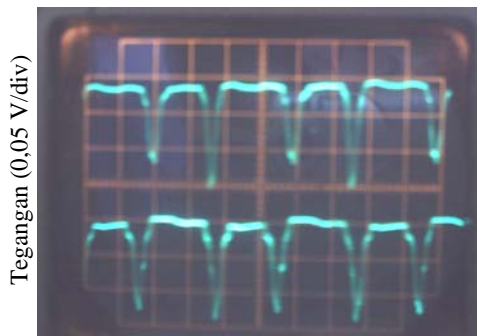
Bentuk pulsa profil berkas elektron untuk variasi V_{k-a} pada $V_p = 12$ kV.



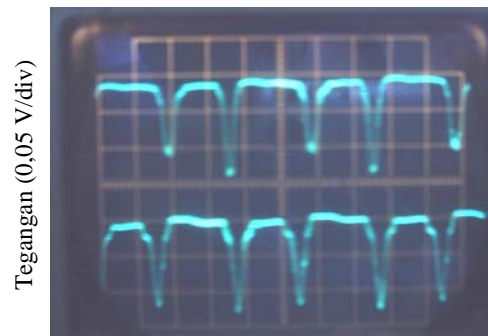
Waktu sapuan (3 ms/div)
(a) $V_{k-a} = 1$ kV



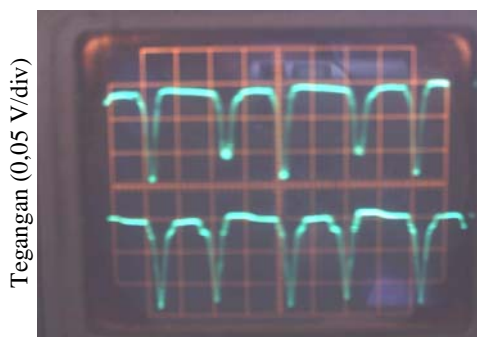
Waktu sapuan (3 ms/div)
(b) $V_{k-a} = 1,5$ kV



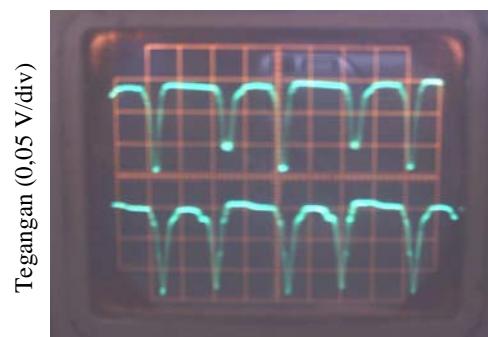
Waktu sapuan (3 ms/div)
(c) $V_{k-a} = 2$ kV



Waktu sapuan (3 ms/div)
(d) $V_{k-a} = 2,5$ kV



Waktu sapuan (3 ms/div)
(e) $V_{k-a} = 3$ kV



Waktu sapuan (3 ms/div)
(f) $V_{k-a} = 3,5$ kV

TANYA JAWAB

Tri Mardji A.

- Mengapa besarnya arus berkas elektron tidak tergantung secara eksplisit pada derajat kevakuman, padahal *mean free path* sangat tergantung dari derajat kevakuman.
- Faktor apa yang mempengaruhi perbedaan hasil antara pengamatan secara visual dengan metode *rotating probe*?
- Seberapa penting pengaruh parameter diameter berkas pada besarnya arus elektron?

Djoko SP.

- Emisi elektron dari bahan filamen (sebelum keluar dari sumber elektron) tergantung secara eksplisit pada suhu filamen dan "*work function*" bahan filamen (persamaan Richardson-Dushman). Sedangkan kevakuman mempengaruhi titik leleh bahan filamen.
- Perbedaan hasil pengamatan secara visual dengan hasil pengamatan *rotating probe*, adalah karena faktor jarak perpotongan probe dengan berkas yang berbeda dengan jarak target untuk pengamatan secara visual.
- Diameter berkas penting diketahui untuk menjaga agar berkas elektron saat masuk tabung akselerator tidak menabrak elektroda tabung pemercepat.

Nada Marnada

- Bagaimana prospek proyek Landmark yang sedang dibuat ini, karena penggagas MBE untuk lateks datang dari seseorang yang ahli dalam bidang lateks namun akan pensiun pada bulan April 2008. Sementara itu tahun selesainya direncanakan 2009.

Djoko SP.

- Sesuai dengan program landmark BATAN, MBE ini akan selesai dirancangbangun pada 2009. Walaupun penggagas program MBE untuk industri lateks akan pensiun pada 2008, diharapkan masih bersedia menjadi konsultan/narasumber hingga selesainya program ini (2009).

Silakhuddin

- Usul : agar di dalam abstrak dan kesimpulan disebutkan tentang ukuran geometri terutama jarak katoda-anoda.

Djoko SP.

- Terima kasih usulnya, akan ditindak lanjuti.

STUDI ASPEK LINGKUNGAN DAN PRODUK SAMPING PENGOLAHAN GAS BUANG DARI PLTU DENGAN IRRADIASI ELEKTRON

Rill Isaris

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN Yogyakarta

ABSTRAK

STUDI ASPEK LINGKUNGAN DAN PRODUK SAMPING PENGOLAHAN GAS BUANG PLTU DENGAN IRRADIASI ELEKTRON. Kontroversi pada PLTU batubara adalah meski dapat menghasilkan listrik dengan harga yang relatif lebih ekonomis (Rp.700,-/KWh), tetapi menimbulkan polusi gas buang yang membahayakan kesehatan dan pemanasan global. Mengatasi masalah pencemaran terhadap lingkungan harus menjadi perhatian kita semua. Teknologi irradiasi elektron untuk mengolah gas buang adalah salah satu cara yang saat ini sedang berkembang. Makalah ini mengkaji secara kualitatif tentang keuntungan yang akan didapat dari pengurangan dampak lingkungan dengan pengolahan gas emisi SO₂ dan NO_x (De-SO_x dan De-NO_x) menggunakan teknologi irradiasi elektron, dan produk samping berupa (NH₄)₂SO₄ dan NH₄NO₃ sebagai bahan pembuat pupuk anorganik. Kajian pada De-SO_x dan De-NO_x menggunakan Fasilitas Flue Gas Desulphurization (FGD) dan Selective Catalytic Reduction (SCR) pada PLTU 1000 MW dengan laju alir gas buang 5,25 juta m³/jam dapat mereduksi SO₂ dan NO_x sampai 91% dan 71% berturut turut tetapi memerlukan investasi modal yang besar dan ruang yang luas. Kajian pada rancangbangun Demo-Plant MBE 1MeV/400mA untuk mengolah 96.500 m³/jam gas alir pada PLTU 600 MW memberikan nilai reduksi pada kedua gas tersebut diatas sebesar 90% dan 80% berturut-turut dengan harga yang sangat rasional sebesar 1,5% harga PLTU. Produk samping dihasilkan dengan teknologi irradiasi elektron berupa Ammonium Sulphat 595kg/jam, Ammonium Nitrat 47kg/jam dan abu 13,5 kg/jam. Kemampuan mereduksi gas berbahaya dari gas buang dan produk samping dihasilkan oleh MBE yang terintegrasi ke PLTU cukup potensial dan bernilai ekonomi yang prospektif.

Kata kunci : Aspek lingkungan PLTU, teknologi irradiasi elektron, tekno ekonomi MBE

ABSTRACT

A STUDY OF ENVIRONMENTAL AND SIDE PRODUCT ASPECTS OF FLUE GAS TREATMENT FROM STEAM (COAL) POWER PLANT USING ELECTRON IRRADIATION TECHNIQUES. A controversial on the application of Steam Power Generation using coal is although they can produce the electricity of lower cost (US\$.7cent/KWh), but they also emit flue gases that cause a dangerous to men health and global warming. The pollution into environment problems must be a warning to all of us. The electron irradiation technology for flue gas treatment is one of the advanced technology used and being developed at the present. This paper studies quantitatively on the benefits could be obtained from the elimination of environment impact by the treatment of the emission gases SO₂ and NO_x (De-SO_x and De-NO_x) using the electron beam irradiation, and the side products yielded such as (NH₄)₂SO₄ and NH₄NO₃ as for materials for fertilization production. Study on De-SO_x and De-NO_x using FGD and SCR Facilities on 1000MW GPP with flow rate of 5.25 million m³/hour gives the reduction of SO₂ and NO_x of 91% and 71% respectively, but it needs a high capital and wide space for construction. The same study to a 1 MeV/400mA EBM Demo Plant to treat 96.500 m³/hour flowing gases in 600 MW GPP gives the reduction to these two kind of gases of 90% and 80% respectively, and with a rational budget, that is 1.5% of the GPP price. The side products by this irradiation technology are 595 kg/hour Ammonium Sulfate, 47 kg/hour Ammonium Nitrate, 13.5 kg/hour ash. Electron irradiation technology for flue gas treatment at GPP is one of a Modified. The ability of EBM Plant in removing the harmful gases from flue gas of the Steam Power Plant (coal) and producing of side product is potential and economically prospective.

Keywords : Environment aspect of GPP, electron irradiation technology, gas pollution

PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu kebutuhan pokok manusia yang harus dapat dikelola dengan sebaik-baiknya agar tidak menim-

bulkan akibat buruk atau pencemaran pada lingkungan. Tujuan pembangunan di suatu negara adalah untuk meningkatkan kesejahteraan dan kemakmuran masyarakat yang merupakan aspek positif kegiatan tersebut. Namun sering terjadi

pembangunan memberikan dampak negatif karena pemrakarsa pembangunan tidak atau belum menyadari akan timbul masalah di belakang hari. Beberapa isu kritis abad 21 yang dikemukakan di dunia saat ini antara lain krisis energi, masalah lingkungan (pemanasan global, polusi udara, hujan asam), kesehatan penduduk, transportasi, sumber daya alam dan manusia, dll. Kesemuanya ini terkait erat satu sama lain dan dapat saling mempengaruhi.

Energi dan Keselamatan lingkungan adalah 2 *interest* yang termasuk issue global abad 21. PLTU batubara Indonesia dengan kandungan sulphur 0,5 – 1,5 % akan menyemburkan sekitar 223 – 2006 mg/m³ gas SO₂, sehingga bisa melampaui baku mutu sebesar 700 mg/m³. Penurunan kualitas lingkungan juga semakin bertambah dengan terdapatnya emisi gas CO₂ yang menyumbang pada pemanasan global dan gas NO_x serta abu yang dikeluarkan dari cerobong PLTU yang semuanya menurunkan kualitas lingkungan dan kesehatan manusia.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah salah satu teknologi yang pada abad 21 ini mendapat perhatian karena menghasilkan dampak pada lingkungan berupa andil terhadap pemanasan global dan mengeluarkan gas polusi dan abu yang berdampak pada lingkungan dan kesehatan manusia. Selain menghamburkan gas CO₂, SO_x dan NO_x dan abu terbang serta endapan ke lingkungan, juga mengandung berbagai zat kimia yang rawan terhadap kesehatan manusia. Batubara sebagai bahan bakar PLTU mengandung sekitar 40 unsur kimia termasuk logam berat seperti As, Hg, Cd, Cr, Cu, Pb, serta zat radioaktif Uranium, Thorium dan turunannya seperti ²²⁰Rn dan ²²⁶Ra, yang dapat terlepas terbang ke udara bersama abu terbang. Begitu juga pada abu endapan terdapat logam-logam berat tersebut diatas dalam jumlah yang sebanding dengan besarnya volume abu endapan tersebut^[1,2,3]. PLTU di Indonesia menggunakan bahan bakar batubara yang mengandung kadar sulfur diatas 0,5 s/d 1,5 % (umumnya diatas 1,0%), sehingga ditengarai kualitas gas buang yang dihasilkan melampaui Baku Mutu Emisi tahun 2000. Nilai BME-2000 untuk SO₂ dan NO_x adalah 700 mg/m³ dan 850 mg/m³ berturut-turut. Agenda Riset Nasional telah memprogramkan mulai 2009 untuk melengkapi PLTU dengan Fasilitas Irradiasi Elektron atau Mesin Berkas Elektron untuk mengolah gas buang yang akan dikeluarkan ke lingkungan.

Dampak pembangkitan energi terhadap lingkungan juga ditimbulkan oleh penipisan

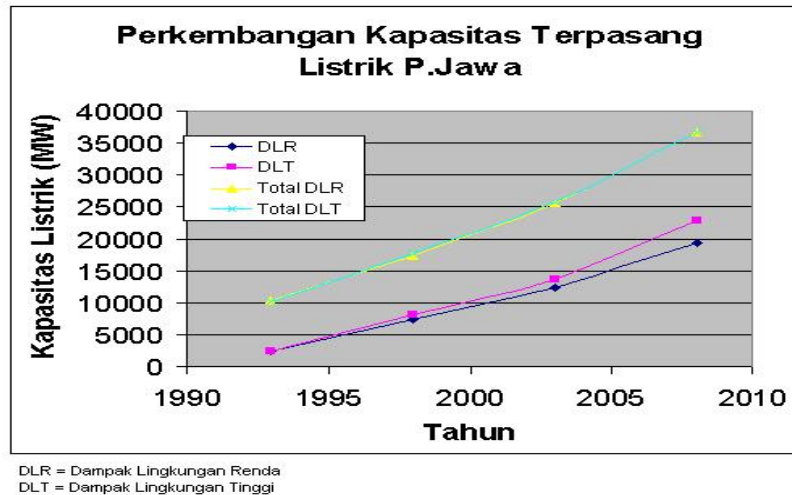
cadangan sumber daya tersebut terutama yang berasal dari sumber fosil seperti batubara, minyak dan gas alam. Dari laporan IAEA^[2,3] sebuah PLTU 1000MWe akan mengkonsumsi per tahunnya 2,7 juta ton batubara, atau 2 juta ton minyak, atau 1,8 milyar m³ gas. Pasokan energi dunia dari bahan bakar fosil dan nuklir, yaitu sekitar 62% dan 22% di negara maju dan 80% dan 4% di negara berkembang, sedangkan sisanya adalah dari energi air, panas bumi dan biomasa^[4]. Untuk membahas dampak berbagai jenis pembangkit energi pada lingkungan dan kesehatan masyarakat perlu dilakukan analisis resiko dan manfaat secara kuantitatif dan bukan hanya secara kualitatif, tetapi hal ini memerlukan metode penelitian yang kompleks, waktu yang panjang serta biaya yang besar.

Secara hipotesis dapat dikatakan integrasi teknologi irradiasi electron (MBE) untuk pengolahan gas buang pada PLTU akan layak secara ekonomi (economical feasible) jika:

1. Mampu meningkatkan koefisien kontribusi teknologi (*Technology Contribution Coefficient* = TCC) pada output dihasilkan (energi yang ramah terhadap lingkungan).
2. Rasio *Benefit to Cost* > 1, yaitu nilai sosial-ekonomi dari pengurangan gas buang ke lingkungan ditambah dengan nilai ekonomi produk samping dihasilkan.

Hasil perhitungan untuk mengetahui peningkatan TCC komponen technoware MBE pada PLTU adalah 0,078^[5] dengan asumsi nilai bobot komponen MBE terhadap PLTU = 15%, nilai ini cukup berarti untuk menaikkan nilai TCC komponen Technoware sebuah PLTU. *Benefit to Cost Ratio* (BCR) sejauh mungkin harus dapat dihitung secara kuantitatif agar hasil kajian mendekati kebenaran. Teknologi irradiasi elektron untuk pengolahan gas buang di PLTU adalah suatu bentuk *Modified Technology Push* yang memiliki prospek ekonomis dan kompetitif terhadap metoda lain untuk eliminasi pencemaran gas buang, disamping teknologi ini sudah dikembangkan di dalam negeri.

PLTU sebagai penghasil energi listrik juga menyumbang limbah (sisa pembakaran) dan polusi ke lingkungan. Perhatian terhadap kelestarian lingkungan penting dilakukan karena perkembangan jumlah PLTU dalam 2 dekade terakhir ini cukup *significant*^[6] seperti terlihat dalam Gambar 1.



Gambar 1. Perkembangan Kapasitas Terpasang Listrik P.Jawa (MW).

Terdapat kenaikan kapasitas terpasang listrik dari sumber PLTU sebesar 8 kali lebih sejak 1993 sampai 2008, dan pemakaian batubara meningkat dari 6,1 juta ton/tahun menjadi 50 juta ton/tahun. *Average cost structure* komponen modal *plant, Operation & Maintenance*, dan bahanbakar pada Plant PLTU^[7], adalah 43%, 15% dan 42% berturut-turut, sehingga beban pada bahanbakar sangat besar (bandingkan terhadap PLTN dengan struktur biayanya 75%, 16% dan 9%), sementara PLTN beban terbesar pada modal plant yaitu sekitar 75% (dengan asumsi 10% *discount rate* dan 25 tahun horizon perencanaan).

Analisis ekonomi lingkungan didasarkan pada teori ekonomi mikro yang berhubungan dengan parameter produksi, pertukaran dan konsumsi barang dan jasa. Kebijakan umum program lingkungan pada proses produksi adalah mencegah penggunaan sumber yang menghasilkan pencemaran ke lingkungan, atau bila proses itu harus dilakukan adalah melalui penanggulangan dan eliminasi kuantitas pencemaran tsb. terhadap lingkungan. Untuk dapat melakukan pengelolaan sumber daya yang efisien dan efektif dapat dilakukan analisis manfaat dan biaya (*benefit and cost analysis*). Secara umum sukar untuk menghitung segala sesuatu yang berhubungan dengan aspek lingkungan. Manfaat merupakan nilai barang atau jasa bagi konsumen dan lingkungan, dan biaya terdiri dari 1) biaya mencegah terjadi polusi dan 2) biaya polusi (biaya untuk menghindari kerusakan akibat polusi dan kerusakan kesehatan masyarakat Bagian pertama lebih mudah dihitung, sementara bagian kedua sukar untuk ditentukan secara kuantitatif. Dengan demikian analisis

manfaat dan biaya itu merupakan penilaian sistematis terhadap keuntungan dan kerugian segala perubahan dalam produksi dan konsumsi masyarakat^[8].

METODOLOGI

Aspek Lingkungan PLTU

Kajian aspek lingkungan PLTU *stand alone* dan *MBE integrated PLTU* dilakukan dengan melakukan *review* pada berbagai referensi publikasi, *technical documents* dan rancangan desain system MBE yang telah dilakukan peneliti terdahulu. Energi listrik adalah energi yang fleksibel dapat digunakan dan mudah dikonversikan ke bentuk energi yang lain, sehingga praktis untuk digunakan di berbagai keperluan di industri, transportasi, rumah tangga, penelitian, dll. Pada PLTU berbahan bakar batubara, minyak atau gas, energi kimiawi senyawa karbon yang terdapat didalam bahan tersebut dibebaskan melalui pembakaran. Energi panas yang timbul kemudian dikonversikan menjadi energi kinetik uap, lalu dengan menggunakan turbin energi tersebut dikonversikan lagi menjadi energi gerak mekanik, dan terakhir dikonversikan oleh generator menjadi energi listrik.

Secara umum sebuah PLTU mengemisikan ke udara gas SO_2 , NO_2 (pembentuk nitro-samin penyebab kanker), CO_2 (*global warming*), gas racun logam berat dan abu terbang maupun endapan dalam jumlah yang sangat besar. Terdapat

setidaknya 4 dampak PLTU-Batubara kepada alam yang telah diteliti^[9,10,11], yaitu:

1. Penurunan kualitas lingkungan dan kesehatan akibat limbah hasil pembakaran, antara lain oleh emisi gas CO₂, SO_x, NO_x, dan abu (terbang dan endapan).
2. Pemanasan global, akibat peningkatan gas CO₂ yang menimbulkan Efek Rumah Kaca yang meningkatkan suhu bumi, rata-rata 0,5%/tahun. Terjadi peningkatan CO₂ di dunia sebesar 16-20 milyar ton/tahun yang berasal dari seluruh kegiatan manusia di dunia.
3. Hujan asam atau de-posisi asam oleh oksidasi gas SO_x dan NO_x yang dapat menyebabkan penurunan populasi dan kehidupan biota air, membilas unsur hara pada tanah sehingga menurunkan kesuburan lahan pertanian dan kerusakan hutan.
4. Pengotoran udara sekitar oleh emisi partikel debu, kabut asap dan terbentuknya ozon jahat akibat reaksi fotokimia NO_x dengan senyawa karbon yang mudah menguap (*Volatile Organic Compound*), hal ini dapat membahayakan kesehatan mahluk.

Dalam perkembangannya, PLTU modern sudah dilengkapi dengan teknologi pasca pembakaran yaitu Fasilitas *Flue Gas Desulphurization* (FGD) untuk pengolahan SO_x, Fasilitas *Selective (Non)-Catalytic Reduction* (SNCR&SCR) untuk mengolah NO_x dan Fasilitas Penyaring Debu *Electrostatic Precipitator* (ESP). Satu cara untuk menurunkan kadar SO_x dan NO_x adalah menggunakan batubara rendah kadar Sulphur dan teknologi pembakaran jenis *burner* rendah emisi NO_x (*overfire-air*), jika belum memadai baru menggunakan teknologi SNCR/SCR^[12]. Teknologi SNCR/SCR mampu menurunkan kadar emisi gas

keluaran NO_x sampai 50%. Skenario perkembangan kapasitas terpasang PLTU pulau Jawa sampai 2003 adalah 12.448 MW kategori dampak lingkungan rendah atau 13.718 MW kategori dampak lingkungan tinggi yang cukup potensial menyumbang polusi baik berupa gas buang maupun debu ke lingkungan dan resiko pengurangan kesejahteraan dan kesehatan masyarakat di sekitar PLTU.

Efisiensi Pengolahan Gas NO_x dan SO_x

Kuantitas gas NO_x dan SO_x dihasilkan ditentukan oleh *removal efficiency* hasil proses pengolahannya, yang dalam hal ini ditentukan oleh besarnya dosis dan temperatur gas tsb., mengikuti formula:

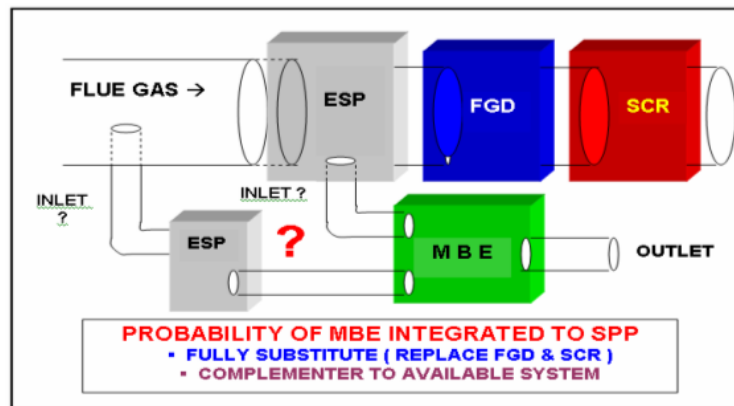
$$\eta_{NO_x} = k_1 \{ 1 - e^{-[k_2 D / (NO_x)_0]} \} \quad (1)$$

$$\eta_{SO_2} = f_1(\varphi, \alpha, T) + f_2(D, \tau, T) \quad (2)$$

dengan : *D* = dosis (kGy), *k₁*, *k₂* = konstante, *α* = ammonia stoichiometry, (NO_x)₀ = konsentrasi inlet gas NO_x (ppm), *φ* = relative humidity gas, *T* = suhu gas (°K).

Secara umum dapat dikatakan bahwa efisiensi pembuangan NO_x semakin baik dengan dosis radiasi yang semakin besar, dan efisiensi pembuangan SO₂ tergantung pada suhu gas dan kelembaban relatif.

Teknologi irradiasi berkas electron untuk pengolahan gas buang telah dikenalkan dan digunakan di berbagai negara^[13] baik dalam skala laboratorium, skala pilot maupun Industrial Plant seperti di Chubu Power Station Japan.. Secara skematis kemungkinan integrasi Fasilitas MBE pada PLTU terpasang ditunjukkan dalam Gambar 2^[14].



Gambar 2. Skema probabilitas integrasi fasilitas MBE kedalam sistem PLTU^[14].

Ada 2 skenario integrasi Fasilitas MBE pada PLTU, yaitu 1) Instalasi MBE sebagai fasilitas penuh mengolah gas buang, dan 2) Instalasi MBE sebagai Unit Komplementer terhadap Fasilitas FGD dan SCR yang telah ada.

Untuk PLTU yang belum dilengkapi dengan Fasilitas FGT model lama terutama yang tidak lagi memiliki lahan yang cukup, maka integrasi MBE dapat memilih opsi 1.

Hasil pengukuran gas buang hasil penelitian pada PLTU Suralaya 400 MW^[15] memberikan data emisi gas CO₂ dan CO sebesar 423.233 ton/tahun, gas SO₂ = 102.093 ton/tahun, gas NO₂ = 39.875 ton/tahun, dan yang terakhir ini nilainya lebih besar dari PLTU 1000 MW.

Dalam analisis manfaat dan biaya pada program penanggulangan/pencegahan polusi Gas Buang PLTU ke lingkungan, maka manfaat program adalah pengurangan biaya polusi baik itu biaya menghindari kerusakan karena polusi maupun biaya merusak kesejahteraan/kesehatan akibat polusi, dan biaya program adalah segala pengeluaran untuk melaksanakan program. Asumsi yang akan digunakan adalah:

- Setiap tambahan biaya pengeluaran program menghasilkan tambahan pengurangan hasil polusi yang setara (*Marginal Social Cost* = MSC).
- Satuan hasil polusi yang semakin besar menghasilkan manfaat sosial marginal yang semakin kecil (*Marginal Social Benefit* = MSB).

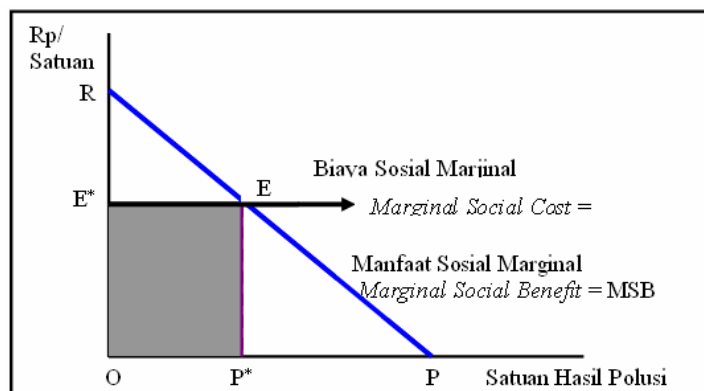
Keadaan ini dapat diilustrasikan pada Gambar 3, dimana perpotongan kedua kurva MSC dan MSB merupakan kondisi optimum, dimana tingkat satuan hasil polusi = OP^* . Pada tingkat ini biaya dikeluarkan adalah OP^*EE^* , dan keuntungan adalah OP^*ER .

Aspek Produk Samping

Tanpa Fasilitas FGT pun sebuah PLTU menghasilkan produk samping berupa debu endapan yang dapat diolah menjadi gypsum yang dapat dipakai sebagai bahan bangunan. Akan tetapi PLTU dengan FGT menggunakan MBE dapat pula memberikan produk samping lain sebagai hasil proses *removal* gas SO_x dengan umpan gas NH₃ untuk menghasilkan bahan kimia (NH₄)₂SO₄ dan hasil samping dari proses *removal* gas NO_x berupa NH₄NO₃. Kedua bahan kimia ini merupakan komponen yang dengan campuran dengan unsur hara lainnya akan menghasilkan pupuk fosfat dan nitrat. Hal ini berarti dapat memberikan nilai tambah ekonomi lebih tinggi dibanding menghasilkan produk gypsum saja.

Analisis Benefit to Cost Ratio (BCR)

Analisis BCR biasanya digunakan untuk mengetahui apakah suatu proyek industri itu layak atau tidak dilakukan. Dalam hal ini integrasi Fasilitas MBE pada system PLTU perlu dikaji nilai banding antara keuntungan dan manfaat yang diperoleh terhadap biaya yang harus dikeluarkan. Keuntungan (*profit*) umumnya berkonotasi pada nilai ekonomi, yaitu nilai tambah riil yang bisa dikalkulasi secara ekonomi, sementara manfaat (*benefit*) cenderung berkonotasi pada keuntungan yang bersifat social, dan sering tidak bisa diprediksi karena sulit menghitungnya. Damping itu peningkatan kontribusi teknologi integrasi MBE terhadap kualitas output (energi dan kualitas lingkungan) juga merupakan factor yang mesti diperhitungkan dalam menilai kelayakan secara ekonomi. Adapun komponen *benefit* dan *cost* dalam hal ini adalah :



Gambar 3. Situasi program pengurangan polusi.

Benedit : Nilai De-NO_x dan De-SO_x, selisih harga FGD + SCR dan MBE pada kapasitas sama dan nilai produk camping dihasilkan.

Cost : *Capital cost Plant MBE + Utilities, O&M cost (mainly electricity), Labour cost*

Secara umum harga akselerator ditentukan oleh koefisien menyangkut tipe akselerator dan *manufacturer prime cost* (*a*), energi elektron dihasilkan (*E*) dan tenaga berkas digunakan (*P*)^[15], yang dapat dinyatakan dalam formulasi sbb:

$$K_a = a(Ex\sqrt{P})xk US.\$ \quad (3)$$

dengan *k* = 1000, faktor *a* = 60 s/d 100 (untuk *E* = 1 s/d 5 MeV), *P* = daya MBE (KW).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil kajian *properties* pada PLTU 1000Mwe^[2,3] dan SpecTec rencana pembangunan MBE 1Mev/400kW^[15] serta dari sumber internal BATAN dapat disarikan dalam Tabel 1. Pemanasan global oleh emisi gas CO₂ merupakan resiko lingkungan dari sebuah PLTU batubara dan harus dihitung sebagai biaya sosial yang ditanggung dunia. Saat ini kadar CO₂ di alam adalah 350ppmv dengan kenaikan 0,5%/tahun, dan para ahli memperkirakan terjadi kenaikan suhu bumi antara 1,5 s/d 4,5^[1] beberapa puluh tahun ke depan, memicu perubahan iklim, mempengaruhi pertanian dan kesehatan.

Dari Tabel 1 terlihat bahwa jumlah limbah yang dihasilkan PLTU sangat besar secara kuantitas dan selain akan menjadi beban pembuangannya juga akan menimbulkan pencemaran karena mengandung gas yang menyumbang pada pemanasan global dan sebagai *stimulant factor* timbulnya penyakit kanker.

Fasilitas pengolahan gas buang (FGT) pada PLTU baik yang menggunakan teknologi ESP dengan FGD+SCR maupun ESP dengan MBE, memiliki kemampuan yang seimbang untuk mengolah gas buang tersebut, yaitu De-SO_x dan De-NO_x sebesar 91% dan 71% pada cara pertama dan 90% dan 80% pada cara kedua. Efisiensi pengolahan dengan teknologi MBE tergantung pada besarnya dosis radiasi elektron yang dihasilkan.

Dari analisis terhadap kurva *Renoval efficiency* vs dosis oleh Tim Rancangbangun MBE untuk FGT-PLTU, untuk mendapatkan efisiensi renoval gas NO_x >80% dan SO_x > 90%, diperlukan dosis berkas electron sebesar 10,5 KGy dan 7,5 KGy berturut-turut.

Hal yang menarik informasi dari PLTU Suralaya (4x400MW dan 3x600MW) adalah Plant hanya dilengkapi Fasilitas ESP dan mampu mengekstrak 95,5% debu terbang dan dapat digunakan untuk membuat blok bangunan. Flow rate pada discharge kanal sebesar 5,04 juta m³/jam, dan kompleks PLTU memiliki area seluas 239 Ha. Kemudian hasil pengukuran gas Buang pada 7 stack PLTU Surabaya oleh peneliti dari ITB^[18] dari tahun 2005 s/d 2007 sangat menarik, nilai emisi SO₂ dan NO₂ terukur seluruhnya berada pada nilai dibawah Standard Emisi Baku Mutu, yaitu <750 mg/Nm³ dan <850 mg/Nm³.

Sesuai dengan hasil kajian oleh LSDE-BPPT^[17] bahwa kebolehdian nilai rentang kadar SO₂ yang dikeluarkan dari PLTU berbahan bakar batubara Indonesia adalah antara 223 s/d 2006 mg/Nm³ (kadar sulphur dalam batubara antara 0,5 s/d 1,5%), maka dapat diperkirakan bahwa PLTU Surabaya menggunakan batubara dengan kadar sulphur <0,8%.

Emisi gas SO_x dan NO_x pada PLTU Surabaya 400 MW pada Tabel 1 adalah sebesar 102.093 ton dan 39.875 ton/tahun berturut-turut, hal ini menunjukkan emisi kedua jenis gas buang tersebut lebih besar dibanding PLTU 1000 MW hasil analisis/evaluasi oleh Badan Energi Internasional (IAEA) pada PLTU di negara maju. Hal ini bisa disebabkan oleh karena efisiensi proses pengubahan SO_x dan NO_x pada saat oksidasi terhadap produk antara berupa (H₂SO₄ dan (NH₃)₂SO₂) dan (HNO₂, NO₂ dan HO₂NO₂) berturut-turut lebih rendah di PLTU Surabaya daripada PLTU 1000 MW yang disurvei oleh IAEA.

Emisi gas CO₂ tidak tereliminasi dengan teknologi FGT baik dengan moda FGD + SCR maupun dengan MBE, tetapi emisi gas SO_x dan NO_x dapat dieliminasi oleh kedua teknologi tersebut dengan *technology advantage* yang bisa bersaing. Dengan asumsi efisiensi proses De-SO_x dan De-NO_x seperti dikemukakan oleh MBE buatan Korea yaitu 90% dan 80%, maka berarti jumlah gas SO₂ dan NO₂ yang bisa dieliminasi adalah sebesar 90% x 102.093 ton = 91.883 ton dan 31.900 ton per tahun. Dari segi *economy advantage* harga Fasilitas Akselerator Electrón lebih murah dibanding Fasilitas FGD + SCR untuk pengolahan gas buang. Harga Instalasi MBE yang dikemukakan dari Korea sebesar US\$.120,000.- (~ Rp.120 M) atau sekitar 1,5% terhadap *total investment cost* MBE. Estimasi biaya pembangunan Akselerator Elektron untuk industri di Polandia^[14] mengemukakan *sharing-cost* untuk pengolahan gas buang dengan MBE sekitar 3,9%.

Tabel 1. Properties De-polusi Gas Buang PLTU (Teknologi konvensional & MBE).

Parameter/Properties	PLTU Modern ^[2,3] (1000MWe)	PLTU + MBE ^[16] (400MWe)	Keterangan
Teknologi Flue Gas Treatment	ESP + FGD + SCR	ESP + MBE	Filter debu + De-NO _x + De-SO _x
Gas diemisikan/thn CO ₂ SO _x NO _x	6.000.000 ton 60.000 ton 7.000 ton	423.233 ton ^{*)} 102.093 ton ^{*)} 39.875 ton ^{*)}	Tanpa Fasilitas Flue Gas Treatment
Abu diemisikan Abu terbang (AT) Abu endapan (AE) Logam berat :	200.000 ton 20.000 ton Logam berat : ▪ Se 700 Kg ▪ Hg 1.300 Kg ▪ U 23,2 Kg ▪ Th 46,4 Kg	56.700 ton ^{*)} 14.162 ton ^{*)} Belum tersedia data dan tidak tereliminasi oleh MBE	Tanpa Fasilitas FGT Ikut teremisi ke lingkungan bersama abu terbang, efek biologis
Laju alir gas	5,25 juta m ³ /jam	96.500 m ³ /jam	
Kemampuan treatment ▪ De-SO ₂ ▪ De-NO _x ▪ AT ▪ AE	91% 71% 98% Abu bertambah 10 kali	(Demo Plant MBE) >90% >80% relatif sama relatif sama	Dengan Fasilitas FGT Hasil treatment ESP
Estimasi Harga Plant (PLTU)	Belum tersedia data	Rp. 5 – 6 triliun	Ref.: PLTU Tg.Jati B 600MWe: Rp.7 triliun.
Ekonomi Fasilitas: ▪ Harga Fas. FGT ▪ Ratio thd harga Plant ▪ Ruang diperlukan	Lebih mahal Lebih besar (belum ada data) Sangat luas	Rp.120 s/d 500 M (Developm-Cost) 1,5% s/d 6,25% Relatif kecil	* Termasuk harga utilitas, civil, accessories * Problem upgrading
Agen pereduksi	Anhydrous Ammonia NH ₃	Berkas Elektron Dosis 8 kGy/0,8Mrad	Harus diatur suhu NH ₃ dan Dosis Radiasi yang sesuai
Produk samping: ▪ Jenis bahan ▪ Estimasi harga	Gypsum(50% AE)	(NH ₄) ₂ SO ₄ : 595kg/j NH ₄ NO ₃ : 47kg/j Abu : 13,5kg/j ^{**)}	Bahan pembuat pupuk

Catatan: ^{*)} = data pemantauan di PLTU Surabaya oleh Rukijatmo & Munawir Z., 2002^[17]

^{**)} = data rancangan bangun MBE oleh EB Technology Co.Ltd. Rep. Korea, 2004)

Prediksi produk samping dihasilkan dalam setahun berupa (NH₄)₂SO₄ ~ 5509 ton, NH₄NO₃ ~ 395 ton sebagai komponen bahan pembuat pupuk, dan 113,5 ton abu, atau sebesar 90,8% , 7,2% dan 2% dari produk total berturut-turut.

Perkiraan *Capital cost* yang diperlukan untuk membangun Instalasi MBE kapasitas 1 MeV/400 KW menurut ketentuan pada rumus (3) adalah :

$$Ka = (a = 100) \times (E = 1 \text{ MeV}) \times \sqrt{(P = 400 \text{ KW})} \cdot 10^3 \text{ US. \$}$$

$$= \text{US. } 2,000,000.00$$

sementara dari penawaran EB-Tech nilai *Ka* = US.\$4,400,000.00. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh tipe akselerator dan tipe konstruksi oleh pabrik. Secara umum *capital cost* untuk Akselerator Elektron keperluan Industri berkisar antara US.\$0,5 s/d 5 M.

Marginal Social Cost integrasi Instalasi MBE plus *Utilities* ke PLTU meliputi semua pengeluaran untuk membangun dan memasang instalasi tsb. Sementara *Marginal Social Benefit* merupakan nilai pengurangan penderitaan kesejahteraan/kesehatan masyarakat serta nilai hasil samping yang diperoleh, yang terakhir ini belum bisa dihitung. Beberapa indikasi akibat pencemaran gas CO, SO₂, dan NO_x pada kesehatan manusia antara lain adalah gangguan pernafasan & paru-paru, penyakit emfisema, paru, pembuluh darah jantung, disfungsi pancaendera, gangguan peredaran darah, serta keracunan dan penyakit yang ditimbulkan oleh polusi logam berat yang terkandung di dalam polusi gas buang.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kuantitas gas SO_x dan NO_x yang berhasil diolah tergantung pada moda teknologi yang digunakan dan efisiensi *renoval* pada saat proses pengolahannya. Dari kajian dan bahasan tersebut diatas, dapat disarikan kesimpulan sbb:

1. Kadar emisi gas buang khususnya SO_x dan NO_x dari sebuah PLTU tergantung pada kualitas batubara digunakan, kadar sulphur < 0,8% menghasilkan gas tersebut dengan kadar dibawah nilai Standar Baku Mutu dan tidak menimbulkan dampak pencemaran pada lingkungan meski tetap ada polutan yang teremisi.
2. Eliminasi gas SO_x dan NO_x dalam gas buang menggunakan teknologi FGD pada PLTU 1000 MW dan teknologi MBE pada PLTU 400 MW menunjukkan kemampuan yang setara, yaitu sebesar 91% dan 71%, dan 90% dan 80% berturut-turut. *Cost sharing* Fasilitas MBE terhadap nilai PLTU dapat berkisar antara 1,5% s/d 3,9% yang sangat kompetitif terhadap nilai besaran yang sama pada FGD+SCR.
3. Dengan asumsi efisiensi sistem De-SO_x dan De-NO_x sebesar 90% dan 80% berturut-turut, dapat dieliminasi gas SO_x dan NO_x dari sebuah PLTU 400 MW sebesar 91.883 ton dan 31.900 ton per tahun berturut-turut.
4. Dengan kapasitas tersebut diatas dan dengan dosis radiasi sebesar 8 kGy (0,8 Mrad) dapat dihasilkan bahan komponen pupuk (NH₄)₂SO₄ dan NH₄NO₃ sebanyak 5509 ton dan 395 ton per tahun.
5. FGT menggunakan teknologi MBE mampu melakukan pengolahan gas buang dengan efisiensi yang setara dengan bila menggunakan FGD+SCR, tetapi dengan *capital cost* yang lebih ekonomis.
6. Analisis Manfaat dan Biaya belum dapat dihitung secara kuantitatif karena data konkrit belum diperoleh dan perhitungan *Marginal Social Benefit* sebagai dampak integrasi MBE untuk mengurangi polusi gas SO_x dan NO_x perlu penelitian dan data survei lebih jauh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SOFYAN YATIM, *Keselamatan Lingkungan Pemanfaatan Iptek Nuklir untuk Pembangunan Energi Listrik*, Pidato Pengukuhan APU BATAN, LIPI-BATAN, Jakarta, 2004.
- [2] Anonim, *Sustainable Development and Nuclear Power*, IAEA Publication, International Atomic Energy Agency, Vienna Austria, 1997.
- [3] Anonim, *Assessment and Comparison of Waste Management System Cost for Nuclear and Other Energy Sources*, IAEA Technical Document No.366, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1994.
- [4] VICTOR M. MOUROGOV, *Energy Outlook and Role of Nuclear Energy*, Public Acceptance Seminar, Seoul, Korea, 1999.
- [5] RILL ISARIS, LELY SUSITA R.M., *Kajian Awal Teknologi dan Ekonomi Aplikasi MBE Untuk Flue Gas Treatment pada PLTU di Indonesia*, Prosiding PPI Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, 2006.
- [6] HANS-HOLGER ROGNER, *Nuclear Power and Sustainable Energy Development*, Proceeding of Public Information Seminar pp 49-69, The Application of Nuclear Science for Human Welfare, Jakarta, 2001.
- [7] ZUHAL, *Pengambilan Keputusan Multi-objektif untuk Pengembangan Tenaga Listrik Kebijakan Diversifikasi Energi*, Majalah Elektro No.6, Tahun II, 1995.
- [8] SUKANTO REKSOHADIPROJO, *Pengantar Ekonomi Lingkungan*, Penerbit Badan Pembina Fakultas Ekonomi UGM, Yogyakarta, 1992.
- [9] STANLEY E. MANAHAN, *Environment Chemistry*, 6-th Edition, Lewis Publisher, 1994.

- [10] NIEHAUS F. , IANSTLE., *Impact of Energy Production on Atmosphere Concentration on Greenhouse Gas*, Buletin IAEA Vo.31 No.2, Vienna, 1989.
- [11] GEORGE K., THOMAS R.K., *Nighttime Warming and The Greenhouse Effects*, Environment Science Technology, Vol.2, No.8, 1993.
- [12] DJATI, H.S., *Pengendalian Emisi NO_x*, *Terjemahan dari The Internarional Journal on Power Generation*, July, 1993, Majalah Elektro No.6, Tahun II, 1995.
- [13] Anonim, *Pilot Plant Instalasi Pengolahan Gas Buang dengan MBE UBP Suralaya*, Dokumen Teknis BATAN, 2004.
- [14] RILL ISARIS, *Kajian Tekno Ekonomi Aplikasi MBE untuk FGT pada PLTU Batubara; Aspek Lingkungan dan Side Product*, Laporan Triwulan II Penelitian PTAPB-BATAN, 2007.
- [15] ZBIGNIEW ZIMEK, *Electron Accelerators for Environmental Protection*, Publication of Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warsawa, 1998. pp 34-39.
- [16] Anonim, *Electron Beam Flue Gas Treatment System 1 MeV/400kW*, Technical Spec and Economy Analysis Proposal, Daejon 305-500, Rep. of Korea, pp 8-15.
- [17] RUKIJATMO dan MUNAWIR.Z., *Perancangan Sistem Pengolahan Gas Buang SO_x dan NO_x dengan MBE pada PLTU Surabaya*, Prosiding Seminar Pengembangan Teknologi dan Perekayasaan Instrumentasi Nuklir, BATAN Serpong, 2003.
- [18] Anonim (Sumber PLTU Suralaya), *Hasil Pemantauan Lingkungan*, BML berdasarkan Kep.Men LH No.13/95, Sumber Data Primer 07.

TANYA JAWAB

Prayitno

- Mohon kajian aspek ekonomi teknologi lingkungan dapat dihitung dibandingkan dengan sistem MBE dibanding FGD+SCR.

Rill Isaris

- Ya seharusnya kajian ekonomi teknologi lingkungan tersebut dimasukkan didalam perhitungan, baik yang dengan teknologi MBE dan FGD+SCR. Namun saat ini belum dapat dilakukan karena disamping belum tersedia data, juga sukar menghitungnya. Salah satu cara adalah dengan mengasumsikan model. Kalau nilai Marginal Social Cost (MSC) yang harus dikeluarkan industri/pemerintah untuk mencegah polusi ke lingkungan/masyarakat adalah sama dengan nilai investasi instalasi MBE + utilitas, tetapi untuk nilai Marginal Social Benefit (MSB), nilai kesejahteraan bila tidak dihasilkan polusi, belum dapat diperkirakan. Perhitungan kurva MSC dan kurva indifferent MSB merupakan titik optimum.

Muhadi

- Dalam menghitung BCR, untuk komponen masuk tidak hanya nilai jual produk samping saja, karena ini unit pengolahan limbah maka harus dimasukkan berapa biaya yang disepakati bersama PLTU setiap Nm³/jam nya.

Rill Isaris

- Ya setuju, seharusnya dalam kalkulasi BCR (*Benefit to Cost Ratio*) nilai ekonomi sosial limbah yang dihasilkan oleh PLTU yang seharusnya dibayarkan pihak PLTU sebagai resiko yang diterima masyarakat dimasukkan dalam kalkulasi total. Jadi harus dicari/ditetapkan beberapa tingkat optimal pengurangan polusi (polusi yang sekecil mungkin) disepakati, sehingga manfaat sosial ekonomi buat masyarakat bertambah besar (MSB yang menghasilkan Rp. makin besar).

Nada Marnada

- Bagaimana studi ekonomi dan kehandalan teknologi FGT dengan MBE, karena setahu saya (info yang diperoleh) di Nagoya sebahagian MBE untuk tujuan itu ditutup karena tidak ekonomis dan tidak handal dibandingkan teknologi konvensional yang ditemukan (yang ada).
- FGT dengan MBE di Polandia hanya digunakan pada musim dingin. Bagaimana menurut bapak efisiensinya.

Rill Isaris

– Ya studi kehandalan teknologi FGT-MBE, seharusnya dilakukan, dan ini masuk dalam kajian aspek teknologi MBE untuk FGT, yaitu termasuk dalam aspek teknoware, yaitu pengaruh teknologi terhadap perbaikan pada out put (elektrik + environtmen). Data kehandalan MBE (untuk industri) di dunia belum ada, karena

sebagian besar masih skala demo plant dan laboratorium.

– Tentang FGT-MBE di Jepang dan Polandia, ya mestinya begitu kalau tidak layak ekonomis tentu dihentikan. Tapi kita baru dalam tahap belajar memahami kelayakan MBE yang direkayasa sendiri.

PERHITUNGAN TEGANGAN TERMAL DAN EVALUASI DESAIN TARGET SISTEM GENERATOR NEUTRON

Utaya

PRPN - BATAN

B.Bandriyana

PTBIN - BATAN

Sutadi

PTAPB-BATAN

ABSTRAK

PERHITUNGAN TEGANGAN TERMAL DAN EVALUASI DESAIN TARGET SISTEM GENERATOR NEUTRON. Telah dilakukan perhitungan tegangan termal untuk evaluasi desain target sistem generator neutron yang digunakan pada reaktor SAMOP. Perhitungan dilakukan dengan berdasarkan beban termal dari panas reaksi deuterium dan tritium pada target serta panas dissipasi energi deuterium. Sistem target adalah keping tembaga yang di implant tritium padat berbentuk lingkaran dengan diameter 2,54 cm dan tebal 2 mm. Analisis perpindahan panas dilakukan dengan metode elemen hingga 2 dimensi menggunakan program ASE 2.1 dan ATE 2.1. Fluks panas mengalir dari target tritium ke sistem pendingin dan tutup target secara konduksi dan konveksi. Sistem pendingin menggunakan air suhu 20 °C yang mengalir dengan kecepatan 10 liter/menit, tutup target dari bahan aluminium. Hasil perhitungan menunjukkan nilai temperatur maksimum sebesar 45 °C dengan tegangan lokal maksimum 37 N/mm². Evaluasi bahan dan struktur menunjukkan sistem target aman dari kerusakan mekanik akibat tegangan termal dan tidak terdegradasi akibat suhu dan tegangan maksimum target.

Kata kunci : target, generator neutron, tegangan termal

ABSTRACT

CALCULATION OF THERMAL STRESS AND DESIGN EVALUATION OF TARGET ON NEUTRON GENERATOR SYSTEM. Calculation and evaluation of the thermal stress on the neutron generator target for SAMOP reactor system were already performed. The calculation was carried out based on the thermal load from the reaction of tritium and deuterium in target and also the energy of deuterium dissipation. The target system was made from tritium implanted on the Cu plate with 2,54 cm of diameter and 2 mm of thick. Heat transfer analysis was carried out by the finite element method using the ASE 2.1 and ATE 2.1 program. The heat flux flows from the Cu- tritium target to the cooling system and target cup by the conduction and convection flow system. The cooling system used a water with 20 °C of temperature and 10 liters/ minute of flow while the cup was made from aluminum. Results of calculation showed the maximum temperature of 47 °C and the local stress maximum of 37 N/mm². Evaluation of structure showed that there was not a material degradation and mechanical damage on the target system due to the maximum temperature and thermal stress.

Key words : target, neutron generator, thermal stress

PENDAHULUAN

Salah satu pengembangan sistem neutron generator saat ini adalah untuk mendukung operasi sistem reaktor sub kritik untuk memproduksi isotop molibdenum (Mo) yang dikenal dengan system reaktor SAMOP (Subcritical Assembly for Molybdenum-99 Production). Desain dan realisasi konstruksi reaktor SAMOP dengan

menggunakan neutron generator ini akan bermanfaat untuk pengembangan dan penggunaan neutron generator yang telah beroperasi di PTAPB-BATAN. Untuk menjamin keselamatan operasi dan konstruksi reaktor SAMOP perlu dilakukan analisis secara lengkap baik yang berkaitan dengan keselamatan maupun keandalan komponen pendukungnya.

Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah target tritium yang merupakan komponen pokok untuk pembangkitan neutron. Target harus didesain dengan konstruksi untuk menjamin keandalan struktur sehingga sifat dan karakteristiknya tidak mengalami degradasi dan terjadi reaksi yang sempurna dalam pembangkitan neutron. Masalah yang perlu diperhatikan dalam desain target ini adalah bahwa target akan mengalami panas akibat reaksi fusi ataupun akibat disipasi energi. Jika panas yang dihasilkan tidak dialirkan dengan baik akan terjadi kerusakan akibat tegangan termal ataupun kerusakan karakter target akibat suhu target yang tinggi. Masalah pendinginan harus didesain dengan baik sehingga dapat menurunkan temperatur target dengan merata. Untuk mendukung analisis dan evaluasi dalam desain target ini dilakukan perhitungan untuk menentukan distribusi temperatur dan distribusi regangan dan tegangan termal pada target.

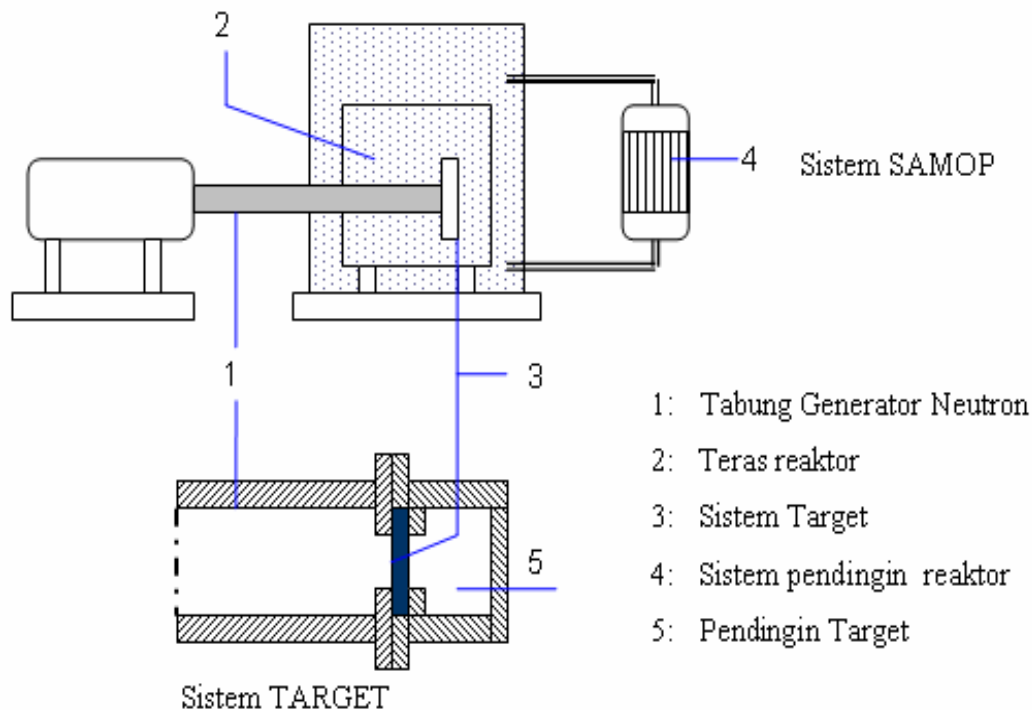
Dalam makalah ini evaluasi dan analisis desain target dilakukan dengan menentukan pola distribusi suhu dan tegangan termal yang menjadi masukan penting untuk mengetahui keandalan dan kekuatan dari target. Analisis dilakukan dengan perhitungan menggunakan metoda elemen hingga

untuk menghitung perpindahan panas dalam target. Lingkup perhitungan meliputi penentuan distribusi suhu dan tegangan akibat beban termal dari panas yang timbul pada perletakan serta geometri dari material target. Diskusi pengaruh tegangan termal dilakukan untuk evaluasi kekuatan bahan dan ketahanan struktur dari target implant tritium pada tembaga. Dengan analisis dan evaluasi ini diharapkan dapat meningkatkan desain target dan sistem reaktor SAMOP.

DASAR TEORI

Target Neutron Generator Untuk Sistem SAMOP

Secara garis besar desain dasar sistem SAMOP terdiri dari: sistem pembangkit neutron, sistem teras, sistem pendukung mekanik, elektrik, instrumentasi dan pengolahan limbah. Sistem target merupakan bagian penting dari sistem pembangkit neutron untuk operasi reaktor SAMOP. Konstruksi sistem SAMOP dan garis besar desain target ditunjukkan secara skematis dalam Gambar 1.^[1]



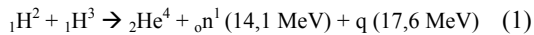
Gambar 1. Sistem SAMOP dan Target.

Target berupa keping tembaga yang diimplant dengan tritium berbentuk lempeng silinder tipis dengan diameter 2,54 cm dan tebal 2 mm.^[1,2] Target diletakkan pada teras reaktor untuk membangkitkan neutron melalui reaksi deuterium-tritium. Neutron yang dihasilkan digunakan untuk reaksi bahan bakar yang selanjutnya menghasilkan reaksi fisi dengan bahan bakar uranium nitrat untuk pembentukan isotop Mo-99. Dalam operasi pembangkitan neutron target mengalami panas akibat tumbukan yang terjadi dalam target dan akan menimbulkan tegangan termal yang bisa merusak integritas target. Target dipegang dalam sistem pemegang target dengan dilengkapi dengan ring viton dan didinginkan menggunakan sistem pendingin dengan aliran air.

Sumber Panas Dalam Target

a. Panas akibat reaksi fusi

Pada operasi generator neutron akan terjadi reaksi fusi antara atom deuterium dengan atom tritium sehingga menghasilkan neutron dan energi dengan reaksi sebagai berikut:^[3]



Energi sebesar 17,6 MeV akan ditransformasikan ke permukaan target sehingga menimbulkan panas dan kenaikan suhu pada target. Panas termal yang terbangkit pada unit energi akibat reaksi fusi pada generator neutron ini dapat diestimasi dengan persamaan sebagai berikut:^[3]

$$q = c \cdot N \cdot \sigma_f \cdot \phi \quad (2)$$

dengan:

q = pembangkitan panas thermal akibat reaksi fusi D-T pada target (Watt)

c = energi fusi (17,6 MeV/ fusi = $2,816 \times 10^{12}$ Joule/ fusi)

N = jumlah ion tritium pada Ti-D target ($1,2256 \times 10^{20}$ ion)

σ_f = tampang lintang reaksi fusi D-T (5 barn $\times 10^{24}$ cm²)

ϕ = fluks deuterium berdasarkan operasi generator neutron dengan arus 1 mA diameter berkas 2,54 cm, ($1,2341 \times 10^{15}$ deuterium/cm² detik).

Berdasarkan persamaan (2) dapat diestimasi besar panas pembangkitan akibat reaksi fusi pada target adalah sebesar $q = 2,13$ Watt.

b. Pembangkitan panas akibat disipasi energi deuterium

Besarnya pembangkitan panas pada unit target ditentukan oleh energi kinetik dan arus berkas deuterium pada operasi generator neutron. Dengan asumsi bahwa seluruh energi dan arus deuterium menumbuk unit target maka besar pembangkitan panas yang timbul dapat diperkirakan dengan rumusan sebagai berikut:^[3]

$$Q = E \cdot I \quad (3)$$

dengan:

Q = panas yang timbul pada target akibat disipasi energi deuterium (Watt)

E = energi kinetik optimum dari atom deuterium (110 keV)

I = arus berkas optimum dari atom deuterium (1 mA)

Berdasarkan persamaan (3) besarnya pembangkitan panas akibat disipasi energi deuterium pada operasi generator neutron adalah sebesar $Q = 110$ Watt. Jadi total panas pembangkitan pada target adalah : $Q_{\text{target}} = q + Q = 112,13$ Watt. Besarnya fluks panas ini akan mengakibatkan kenaikan temperatur dan tegangan termal yang terdistribusi dalam target. Distribusi temperatur dan tegangan termal perlu dihitung untuk menganalisis kekuatan dan ketahanan struktur dari target.

c. Rumusan tegangan termal dalam metoda elemen hingga

Untuk pembebanan termal rumus tegangan didasarkan pada besarnya perbedaan regangan pada setiap titik dan elemen akibat terjadinya distribusi temperatur yang tidak merata. Secara umum bentuk rumusan tegangan termal dapat disusun dalam persamaan matrik dan transpose matrik sebagai berikut :^[4]

$$\sigma = D \varepsilon = D [\alpha \Delta T \quad \alpha \Delta T \quad \theta]^T \quad (4)$$

dengan:

E = modulus elastisitas bahan

α = angka muai bahan

ΔT = beda suhu,

ε = matrik regangan akibat suhu

D = matrik konstanta bergantung pada bahan, (angka Poisson: ν)

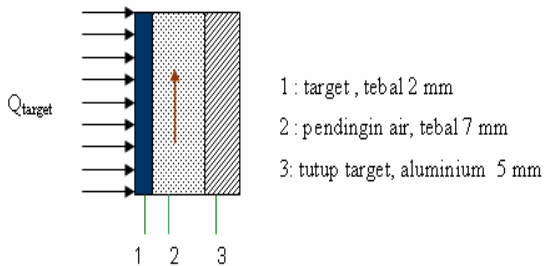
$$D = E/(1-\nu^2) \begin{vmatrix} l & \nu & 0 \\ \nu & l & 0 \\ 0 & 0 & (l-\nu)/2 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Dengan menyelesaikan persamaan matrik yang terbentuk dalam persamaan dapat diperoleh hasil berupa distribusi tegangan termal pada sistem. Berdasarkan bentuk persamaan matrik untuk tiap elemen dapat disusun bentuk persamaan matrik untuk gabungan yang kemudian memberikan hasil tegangan pada setiap titik dan elemen. Penyelesaian metode elemen hingga dapat diselesaikan dengan perhitungan menggunakan program ASE 2.1 dan ATE 2.1 untuk memperoleh hasil akhir berupa nilai dan distribusi tegangan pada seluruh titik elemen pada target dengan metoda dekomposisi matrik.^[5]

TATA KERJA

Asumsi dan Pemodelan

Untuk perhitungan tegangan termal pada sistem target dengan menggunakan metode elemen hingga dilakukan pemodelan 2 dimensi dengan data dan diagram seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Model perhitungan.

Panas yang dibangkitkan sebesar Q_{target} yang dihitung dari rumus (1) dan (2) adalah fluks termal yang merupakan beban yang masuk target dari sisi permukaan dalam ruang hampa dengan suhu ruang. Selanjutnya terjadi perpindahan panas konduksi melalui lapisan target tembaga 2 mm yang diimplant tritium (1). Aliran panas konduksi dan konveksi terjadi dari plat tembaga menuju lapisan pendingin (2) berupa air mengalir, suhu 20 °C, kecepatan alir = 10 liter/ menit dalam ruang setebal 7 mm. Dari sistem pendingin terjadi aliran panas konduksi pada tutup target (3) berupa aluminium tebal 2 mm, kemudian dipindahkan ke sekeliling secara konveksi dalam suhu ruangan 25 °C.

Langkah Perhitungan

Analisis dari model perpindahan panas akan menghasilkan distribusi temperatur pada target. Selanjutnya untuk perhitungan tegangan dilakukan dengan memberikan data masukan distribusi temperatur untuk menghitung distribusi tegangan mengikuti rumus (3). Berdasarkan analisis metode elemen hingga dengan program ATE 2.1 dan ASE 2.1 dilakukan perhitungan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

Data arial dan geometri

Data material untuk perhitungan meliputi data sifat mekanis dan termal untuk target, air dan aluminium seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.^[6]

Tabel 1. Data material.

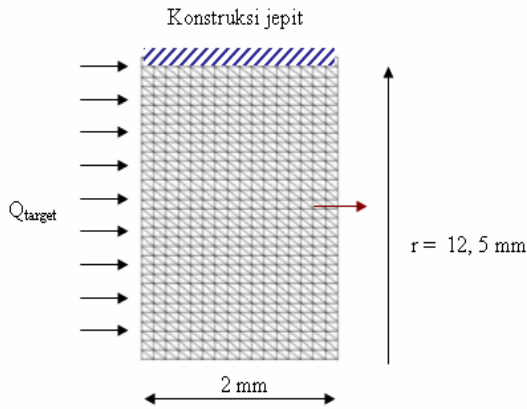
Masa jenis tembaga, ρ	9000 Kg /m ³
Modulus Elastisitas, E	1,25. 10 ⁵ N/mm ²
Angka Poison	0,33
Tegangan tarik maksimum, St	220 N/mm ²
Angka konduksi, k	330 Kcal/ m °C
Koefisien muai panas	1,7 × 10 ⁻⁵
Masa jenis air	1000 kg/ m ³
Masa jenis aluminium	4000 kg/m ³

Geometri dari ukuran masing-masing elemen perpindahan panas ini dinyatakan dengan ketebalan seperti ditunjukkan dalam Gambar 3, untuk target (1), air (2) dan aluminium (3) masing-masing adalah 2 mm, 7 mm dan 5 mm dan panjang masing-masing sama yaitu 5 cm. Untuk perhitungan diambil model geometri 2 dimensi pada potongan melintang di tengah-tengah keping.

Meshing syarat batas dan pembebanan

Elemen yang digunakan dipilih elemen segi tiga *axy simetri* untuk perhitungan termal, diskretisasi model dilakukan dengan *meshing* secara otomatis dengan besar dan kerapatan elemen yang sama.^[7] Pemberian syarat batas dengan perletakan pada sisi luar keping, berupa konstruksi jepit pada seluruh tepi keping dalam bentuk klem lingkaran. Dalam irisan 2 dimensi klem berupa sambungan jepit berada pada ujung dari lempeng segi empat dengan panjang sama dengan diameter keping dan lebar sama dengan tebal keping.

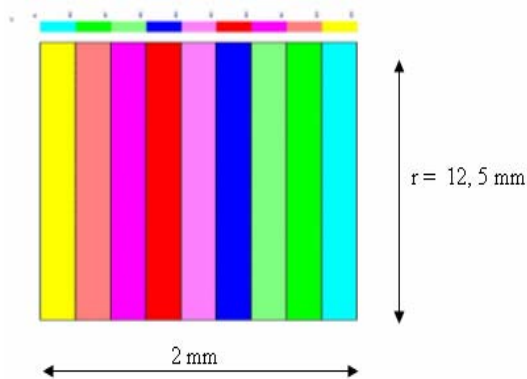
Beban termal berupa fluks panas sebesar $Q_{target} = 112,13$ Watt pada sisi target dibagian pipa neutron generator, bagian pendingin air dengan suhu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sedangkan suhu lingkungan sebesar $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Model geometri dengan setengah panjang dan hasil *meshing* pada target serta syarat batas dalam perhitungan ditunjukkan dalam Gambar 3 dengan tidak menggunakan skala sebenarnya.



Gambar 3. Geometri, *meshing* dan beban termal pada target.

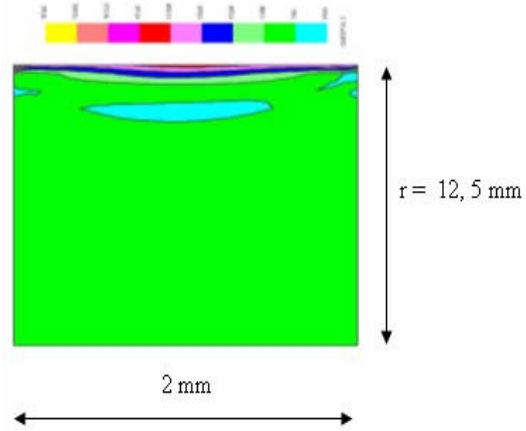
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan distribusi temperatur dan tegangan lokal ditunjukkan dalam Gambar 4 dan 5. Gambar 4 menunjukkan distribusi temperatur pada target untuk posisi potongan melintang pada pertengahan keping. Temperatur maksimum sebesar $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ yang terjadi disisi aliran berkas panas sampai pada kedalaman sekitar $0,2$ mm. Untuk posisi paling luar dari keping yang berhubungan langsung dengan pendingin temperatur sekitar $27\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4. Distribusi temperatur.

Dengan menggunakan distribusi temperatur sebagai beban termal untuk perhitungan struktur diperoleh pola distribusi tegangan termal seperti ditunjukkan dalam Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 diperoleh besarnya tegangan tegangan yang terjadi dalam target bervariasi dari $20 - 47\text{ N/mm}^2$.



Gambar 5. Distribusi tegangan lokal.

Nilai tegangan semakin besar pada daerah dekat perletakan jepit akibat regangan termal yang semakin besar pada kondisi ketat seperti terjadi karena adanya penambahan penyangga. Tegangan maksimum 37 N/mm^2 terjadi disekitar 2 mm pada daerah pertengahan didalam keping dengan kedalaman sekitar 1 mm. Dari data kekuatan bahan diperoleh besarnya tegangan maksimum untuk bahan tembaga pada suhu sekitar $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ sebesar 220 N/mm^2 , sehingga tegangan termal lokal yang terjadi masih dibawah batas aman kerusakan mekanik. Untuk analisis dengan memperhitungkan pengaruh momen dan gaya jika terjadi beban termal, berdasar rumusan ASME untuk kekuatan plat dengan klem, hasil analisis menunjukkan batas aman dengan rasio keamanan tegangan sebesar $0,23$. Pada kondisi suhu $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ juga belum terjadi perubahan sifat yang menyebabkan penurunan kekuatan yang signifikan dan struktur masih dalam keadaan tidak terdegradasi.

Masalah yang perlu mendapat perhatian dari target ini adalah kondisi pelapisan tritium yang dilakukan dengan cara implantasi pada target. Dengan analisis secara pendekatan untuk bahan implant tritium yang berbeda dengan bahan tembaga, batas lapisan tipis antara tritium dan tembaga bisa mengalami pengelupasan akibat tegangan tarik atau tekan yang menyebabkan cepat berkurangnya atom tritium. Untuk pendekatan

secara global dengan menganggap nilai tegangan maksimal 37 N/mm^2 yang terjadi pada batas lapisan kemungkinan pengelupasan diprediksi cukup kecil mengingat tegangan maksimum sebagian besar terjadi pada daerah kedalaman sekitar 0,2 mm. Analisis lebih teliti bisa dikembangkan dengan menghitung tegangan termal secara lebih teliti dengan pemodelan kondisi pelapisan atom tritium. dan membandingkan kemampuan daya lekat tritium pada tembaga dengan eksperimen.^[8]

Masalah perhitungan dengan pemodelan adalah tingkat ketelitian dalam membuat asumsi, pemilihan elemen dan syarat batas serta pengambilan data material. Untuk model perhitungan ini belum dilakukan validasi secara eksak, validasi yang sudah dilakukan adalah validasi program ATE 2.1, ASE 2.1 dengan program ANSYS yang menunjukkan kesesuaian cukup baik.^[9] Pengembangan dan pemilihan variasi beberapa parameter pemodelan perlu dilakukan untuk meningkatkan ketelitian dari hasil perhitungan.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisis kekuatan target dapat disimpulkan bahwa perhitungan tegangan termal dengan metode elemen hingga dapat menunjukkan besar dan lokasi tegangan maksimal yang terjadi pada target. Hasil perhitungan menunjukkan suhu maksimum sebesar $47 \text{ }^\circ\text{C}$, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 37 N/mm^2 terutama terjadi pada daerah kedalaman 0,2 mm dari target dan berada disekitar 2 mm dari lokasi klem. Tegangan lokal maksimum 37 N/mm^2 masih berada dibawah batas aman dari kekuatan bahan dengan tegangan ijin 220 N/mm^2 sehingga konstruksi target aman terhadap beban termal. Ketelitian perhitungan perlu ditingkatkan dengan variasi para meter dan validasi program khususnya untuk menguji keamanan target pada lapisan implantasi tritium pada tembaga.

DAFTAR ACUAN

- [1] SYARIP, *Penyusunan Desain Dasar Perangkat Subkritik SAMOP* Laporan Teknik Litbang ADS Produksi Isotop Mo-99 P3TM-BATAN, P3TM BATAN, Yogyakarta, 2005.
- [2] LELY SUSITA, *Pembuatan TiT Target dengan Teknik Implantasi Ion untuk Generator Neutron sebagai Sumber Neutron Reaktor SAMOP*, Laporan Teknik Litbang ADS Produksi Isotop

Mo-99 P3TM-BATAN, P3TM BATAN, Yogyakarta, 2005.

- [3] SUTADI, *Kajian Aspek Keselamatan Sistem Reaktor SAMOP Menggunakan Neutron Generator*, Laporan Teknik Litbang ADS Produksi Isotop Mo-99 P3TM-BATAN, P3TM BATAN, Yogyakarta, 2005.
- [4] FRANK STASSA, *Applied Finite Element Analysis for Engineers*, CBS Collage Publishing, USA., 1987
- [5] UTAJA, *Program Elemen Hingga Untuk Menyelesaikan Distribusi Suhu Dua Dimensi*, Prosiding Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir, PPI- BATAN, 1995
- [6] SHACKELFORD, J. F, WILLIAM ALEXANDER, *Materials Science and Engineering Hand Book*, CRC Press, Inc., 1994.
- [7] ANONIM, *Manual User ANSYS 5.4*, ANSYS Incorporated, Pittsburgh, 1998.
- [8] SUNARDI, *Finite Element Modelling of Thermal Stresses in Alumina Scales Formed during High Temperature Oxidation of FeCrAl Alloys*, Report on Institute for Materials and Processes, 2000.
- [9] ANONIM, *ANSYS Structural Analysis Guide*, ANSYS, Inc., 1994.

TANYA JAWAB

Tri Mardji A.

- Mengapa suhu terdistribusi secara diskrit, tidak kontinu? Apa alasannya?
- Apakah artinya matrik D pada persamaan $\sigma = D \epsilon$. Apa bukan suatu tensor, apa bedanya tensor dengan matrik D tersebut?
- Apa artinya kata *messing*?

Utaja

- Sebenarnya distribusinya kontinyu, tetapi karena ditampilkan hanya pada 9 kelompok, bentuknya seperti diskrit.
- D berupa matrik 3×3 (untuk elemen segi tiga linier), yaitu matrik elastisitas bahan.
- *Messing* diartikan sebagai diskritisasi bentuk atau pembagian (mesh).

Silakhuddin

- Dalam abstrak disebutkan "sistem target adalah keping tembaga yang diimplantasi tritium ...". Kalau memang teknologi pembuatan targetnya dengan cara difusi, maka kata-kata "implant" diganti dengan kata "difusi".
- Dalam abstrak tidak/belum disebutkan berapa daya input/datang pada sistem target.

Utaja

- Terima kasih atas saran, istilah implantasi akan diganti dengan difusi.
- Daya yang mengenai target sebesar 112 watt, yang diambil dari data laporan SAMOP.

RANCANGAN BEJANA IRADIASI LATEKS KARET ALAM UNTUK VULKANISASI DENGAN IRADIASI BERKAS ELEKTRON

Suprpto, Djoko SP.

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN

ABSTRAK

RANCANGAN BEJANA IRADIASI LATEKS KARET ALAM UNTUK VULKANISASI DENGAN IRADIASI BERKAS ELEKTRON. Telah dilakukan rancangan bejana iradiasi lateks karet alam untuk vulkanisasi dengan iradiasi berkas elektron. Dalam vulkanisasi dengan iradiasi berkas elektron dilakukan dengan mengiradiasi lateks karet alam dengan berkas elektron pada dosis tertentu hingga terjadi ikatan silang antar molekul-molekulnya. Pada saat vulkanisasi terjadi disipasi panas akibat energi elektron yang diserap oleh lateks dan perlu pengadukan untuk menghomogenkan dosis. Perancangan dilakukan dengan menentukan bentuk bejana, perhitungan pendinginan bejana iradiasi dan sistem pengaduk. Hasil rancangan menunjukkan bahwa: dimensi luar bejana iradiasi adalah panjang 790 cm, lebar 20 cm, tinggi 32 cm dan volume bejana 28,8 liter. Perhitungan pendinginan didapatkan suhu lateks maksimum saat diiradiasi tidak melebihi batas yang dipersyaratkan yaitu 60 °C untuk dosis maksimum 50 kGy dengan suhu air pendingin 20 °C. Pengaduk direncanakan menggunakan baling-baling yang diputar dengan mechanical overhead stirrer jenis RW 20n. Bentuk dan dimensi bejana iradiasi telah diungkapkan dalam gambar teknis sehingga dapat digunakan sebagai pedoman konstruksinya.

Kata kunci: vulkanisasi, lateks, iradiasi, berkas elektron, akselerator

ABSTRACT

DESIGN OF IRRADIATION VESSEL FOR VULCANIZATION OF NATURAL RUBBER LATEX USING ELECTRON BEAM IRRADIATION. The design of irradiation vessel for vulcanization of natural rubber latex has been done. The vulcanization of natural rubber latex can be carried out by conventional method (sulfur vulcanization) and irradiation method. In the irradiation vulcanization, natural rubber latex is irradiated using electron beam or γ -ray at a certain dose to cross link the molecules of latex. In the vulcanization using electron beam, heat is generated from electron beam energy dissipation, and stirring is needed for homogeneous irradiation dose. The design is carried out by determining vessel and stirring shape, cooling calculation related to vulcanization process. The design yields the following outside dimension of irradiation vessel, 790 cm length, 20 cm wide, 32 cm high and 28.8 liters vessel volume. The cooling calculation shows that the temperature of irradiated latex must be lower than 60 °C for maximum dose 50 kGy and cooling water temperature 20 °C. The stirring is designed using propeller that connected by mechanical overhead stirrer type RW 20n. The shape and dimension of irradiation vessel presented in the technical drawing so can be used as the construction guide.

Key words: vulcanization, latex, irradiation, electron beam, accelerator.

PENDAHULUAN

Proses vulkanisasi lateks karet alam dapat dilakukan dengan cara konvensional dan dengan cara iradiasi. Vulkanisasi konvensional dilakukan dengan cara menggunakan belerang sehingga masih menghasilkan lateks dengan kandungan protein alergen dan nitrosamine yang merupakan racun penyebab kanker^[1]. Untuk proses vulkanisasi dengan cara iradiasi, kandungan protein alergen dan nitrosamine dapat dihindari dan masih mempunyai keuntungan-keuntungan lain,

misalnya bahan lateks transparan dan lebih halus serta hemat dalam pemakaian energi^[1]. Pada proses vulkanisasi dengan cara iradiasi digunakan radiasi agar terjadi ikatan silang antar molekul-molekul lateks karet alam sehingga meningkatkan sifat-sifat mekanisnya. Jenis radiasi yang digunakan untuk proses vulkanisasi dapat berupa berkas elektron atau sinar γ . Jika dibandingkan dengan iradiasi sinar γ , iradiasi berkas elektron mempunyai keuntungan yaitu laju dosis sangat tinggi (± 1 Mrad/detik) dan dapat dihidupkan/dimatikan sesuai kebutuhan^[2].

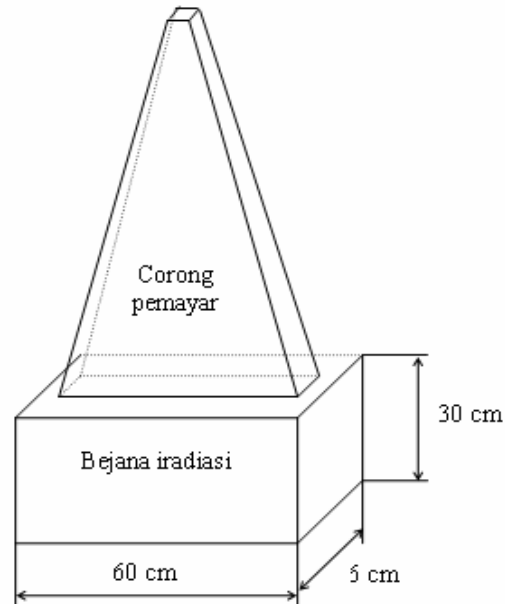
Pada saat lateks karet alam diiradiasi dengan berkas elektron akan terjadi kenaikan suhu akibat energi berkas elektron yang terdisipasi. Kenaikan suhu tidak boleh melebihi batas suhu yang diijinkan yaitu 60 °C^[1]. Permasalahan yang dihadapi pada iradiasi lateks karet alam adalah bagaimana agar suhu lateks saat vulkanisasi tidak mengalami kenaikan yang signifikan sehingga suhu maksimum saat diiradiasi tidak mencapai 60 °C dan cara pengadukan agar dosis iradiasi homogen. Untuk menjaga agar suhu lateks karet alam tidak mengalami kenaikan yang signifikan maka harus dilakukan pendinginan. Pendinginan dapat dilakukan dengan mendinginkan bejana iradiasi menggunakan air pendingin yaitu dengan mengalirkan air ke dalam bejana iradiasi. Pengadukan dapat dilakukan dengan baling-baling untuk mensirkulasikan lateks di dalam bejana iradiasi agar dosis yang diterima homogen. Pada pengadukan tidak boleh timbul buih-buih di dalam bejana proses sehingga kecepatan pengadukan harus dapat diatur dan dibatasi. Untuk memenuhi kebutuhan ini, maka dilakukan rancangan bejana iradiasi untuk vulkanisasi lateks karet alam dengan iradiasi berkas elektron. Rancangan dilakukan dengan menentukan geometri, perhitungan pendinginan dan cara pengadukan yang berkaitan dengan proses vulkanisasi serta pembuatan gambar teknis sehingga dapat digunakan sebagai acuan pembuatan dan konstruksi bejana iradiasi dalam rancang bangun mesin berkas elektron untuk industri lateks.

METODOLOGI

Penentuan Geometri Bejana Iradiasi

Pada penentuan geometri bejana iradiasi harus diperhatikan bentuk corong pemayar dan celah *window* untuk keluarnya berkas elektron menuju target (bejana iradiasi). Hal ini disebabkan agar semua berkas elektron dari mesin berkas elektron yang keluar melalui corong pemayar dan celah *window* dapat mengiradiasi lateks di dalam bejana iradiasi secara optimal. Disamping itu bejana iradiasi harus berfungsi dengan baik untuk tempat iradiasi lateks karet alam dengan berkas elektron. Pada umumnya bejana iradiasi berbentuk silinder dengan volume sekitar 20 liter dan didinginkan dengan air diseluruh dinding silinder tersebut^[1], namun bentuk ini tidak dapat diterapkan pada bentuk corong pemayar dan *window* dari mesin berkas elektron yang akan digunakan untuk mengiradiasi lateks karet alam. Celah *window* dari mesin berkas elektron ini mempunyai ukuran lebar 6 cm dan panjang 60 cm. Dengan demikian bentuk bejana iradiasi harus disesuaikan sehingga

geometrinya minimal sama dengan geometri celah *window*. Berdasarkan uraian tersebut ditentukan geometri bejana iradiasi pada bagian dalam adalah lebar 16 cm, panjang 60 cm dan tinggi 30 cm. Dengan geometri ini maka bejana iradiasi mempunyai kapasitas lateks yang diiradiasi maksimum 28,8 liter dengan skema ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema bejana iradiasi untuk vulkanisasi lateks.

Perhitungan Pendinginan Bejana Iradiasi

Perhitungan pendinginan bejana iradiasi didasarkan pada jumlah panas yang dibangkitkan akibat daya berkas elektron yang terdisipasi, konstruksi dan geometri bejana, fluida pendingin dan persyaratan saat iradiasi yang berkaitan dengan lateks karet alam. Besar daya berkas elektron yang terdisipasi (P) merupakan perkalian antara energi (tegangan pemercepat) dengan arus berkas elektron yang digunakan untuk iradiasi yaitu^[1]

$$P = E \cdot I_e \quad (1)$$

dengan P adalah daya terdisipasi (W), E tegangan pemercepat (V) dan I_e arus berkas elektron (A). Jika fluida pendingin menggunakan air yang didinginkan dengan *chiller* dan air pendingin mendinginkan bejana iradiasi, maka laju perpindahan panasnya adalah^[3]

$$q = U A \Delta T_m \quad (2)$$

dengan q adalah laju perpindahan panas (W), U koefisien perpindahan panas menyeluruh ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$), A luas perpindahan panas (m^2) dan ΔT_m beda suhu rata-rata fluida pendingin dengan bahan yang didinginkan (K). Besar koefisien perpindahan panas menyeluruh sangat tergantung dari besar koefisien konveksi di sisi fluida pendingin dan di sisi lateks yang sedang diiradiasi serta konduktivitas bahan bejana. Besar koefisien perpindahan panas ini dapat dihitung dengan persamaan^[3]

$$U = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_f} + R_{f,f} + \frac{t}{k_b} + R_{f,t} + \frac{1}{h_t} \right]} \quad (3)$$

dengan h_f adalah koefisien konveksi di sisi fluida pendingin ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$), $R_{f,f}$ tahanan pengotor di sisi fluida pendingin ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$), t tebal bahan bejana (m), k_b konduktansi bahan bejana ($\text{W}/\text{m K}$), $R_{f,t}$ tahanan pengotor di sisi lateks yang sedang diiradiasi ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$) dan h_t koefisien konveksi di sisi lateks yang sedang diiradiasi ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$). Besar koefisien konveksi sangat tergantung pada jenis fluida (berkaitan dengan sifat-sifat fisik fluida yaitu lateks dan fluida pendingin) dan konstruksi bejana iradiasi. Konstruksi ini akan menentukan laju kecepatan aliran fluida pendingin (air) yang digunakan untuk menentukan besar koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi. Untuk aliran paksa, maka terjadi perpindahan panas secara konveksi paksa dan besar koefisien perpindahan panas konveksi paksa ditentukan dengan persamaan^[3]

$$N_{u,D} = 0,023 R_{e,D}^{4/5} P_r^{2/3} \quad (4)$$

dan

$$N_{u,D} = \frac{h D_h}{k} \text{ atau } h = \frac{k N_{u,D}}{D_h} \quad (5)$$

dengan $N_{u,D}$ adalah bilangan Nusselt untuk konveksi paksa, $R_{e,D}$ bilangan Reynolds, h koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$), P_r bilangan Prandtl, k koefisien konduksi fluida ($\text{W}/\text{m K}$) dan D_h diameter hidrolis (m). Untuk kondisi fluida diam atau kecepatan aliran sangat rendah, perpindahan panas terjadi secara konveksi bebas. Besarnya koefisien perpindahan panas secara konveksi bebas ditentukan dengan persamaan^[3]

$$N_{u,L} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 R_{a,L}^{1/6}}{\left[1 + (0,492 / P_r)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\} \quad (6)$$

dan

$$N_{u,L} = \frac{hL}{k} \text{ atau } h = \frac{k N_{u,L}}{L} \quad (7)$$

dengan $N_{u,L}$ adalah bilangan Nusselt untuk konveksi bebas, $R_{a,L}$ bilangan Rayleigh dan L panjang karakteristik (m). Jenis perpindahan panas yang terjadi dapat ditentukan dengan persamaan^[3]

$$G_r / R_e^2 \gg 1 \text{ adalah perpindahan panas secara konveksi bebas} \quad (8a)$$

$$G_r / R_e^2 \ll 1 \text{ adalah perpindahan panas secara konveksi paksa} \quad (8b)$$

$$G_r / R_e^2 \approx 1 \text{ adalah perpindahan panas secara gandingan} \quad (8c)$$

dengan Gr adalah bilangan Grashof. Besarnya dosis iradiasi yang diterima oleh lateks ditentukan dengan persamaan^[1]

$$D = \frac{P \cdot t}{m} \quad (9)$$

dengan D adalah dosis iradiasi (Gy), P daya berkas elektron (W), t waktu iradiasi (detik) dan m massa lateks yang diiradiasi (kg). Daya terdisipasi ini menyebabkan kenaikan suhu dan dapat ditentukan dengan persamaan^[3]

$$Q_{in} - Q_{out} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

dengan Q_{in} adalah jumlah panas yang masuk (W), Q_{out} jumlah panas yang keluar (W), ρ massa jenis lateks (kg/m^3), C_p kalor jenis lateks ($\text{J}/\text{kg K}$), dT perubahan suhu (K) dan dt perubahan waktu/lama waktu iradiasi (detik).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk perhitungan didasarkan pada sifat-sifat fisik lateks karet alam, air pendingin dan kebutuhan pada proses vulkanisasi serta persyaratan-per-

syaratannya seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan persyaratan (Tabel 1) dan geometri bejana (Gambar 1), maka dilakukan perhitungan. Perhitungan ditekankan pada perhitungan pendinginan karena pada iradiasi saat vulkanisasi terjadi disipasi panas yang cukup besar oleh berkas elektron. Untuk perhitungan kekuatan mekanis tidak dilakukan karena bejana iradiasi bekerja pada tekanan atmosfer sehingga beban mekanis yang terjadi sangat kecil.

Data-data sifat fisik lateks karet alam dan air pendingin yang digunakan untuk perhitungan

ditunjukkan pada Tabel 2. dan hasil perhitungan korelasi konstanta perpindahan panas untuk pendinginan ditunjukkan pada Tabel 3. Perhitungan korelasi konstanta ini dilakukan dengan persamaan (3) sampai dengan persamaan (8) dan data-data pada Tabel 1. Untuk mengetahui laju perpindahan panas secara konveksi paksa atau secara konveksi bebas ditentukan dengan persamaan 8. Pada kasus ini didapatkan $G_r/R_e^2 \gg 1$ yaitu 263,2 sehingga perpindahan panas untuk pendinginan terjadi secara konveksi bebas.

Tabel 1. Persyaratan bejana iradiasi untuk proses vulkanisasi lateks karet alam.

Parameter operasi	Keterangan
Dosis iradiasi ^[1]	50 kGy
Suhu maksimum lateks saat diiradiasi	60 °C
Kecepatan pengaduk bervariasi ^[1]	100 rpm s/d. 300 rpm
Dimensi	600 mm × 350 mm × 150 mm

Tabel 2. Sifat-sifat fisik lateks karet alam dan air pendingin^[3,4].

No.	Konstanta	Lateks	Air	Satuan
1	Viskositas	$48,6 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	N.s/m ²
2	Rapat jenis	913	997	kg/m ³
3	Konduktivitas termal	0,134	0,64	W/m K
4	Difusivitas termal	$7 \cdot 10^{-8}$	0,3	m/detik ²
5	Kapasitas panas	1905	4180	J/kg K

Tabel 3. Hasil perhitungan korelasi konstanta perpindahan panas untuk pendinginan.

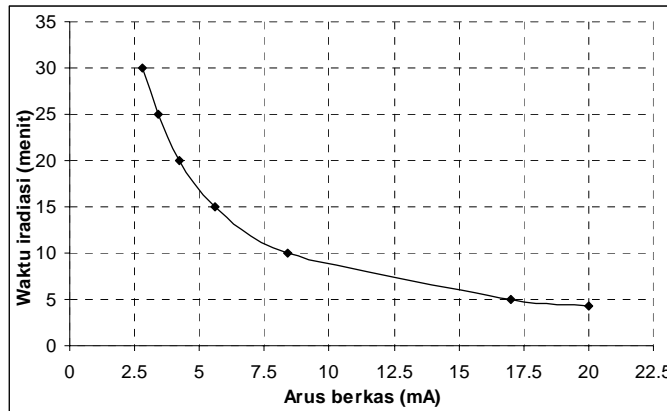
No.	Korelasi konstanta	Hasil perhitungan	Satuan
	Di daerah lateks		
1	Bilangan Reynolds (Re) ^[1]	1.200	
2	Bilangan Nusselt (Nu)	47,5	
3	Koefisien konveksi (h)	21,22	W/m ² K
	Di daerah air pendingin		
4	Bilangan Grashof	29.878	
5	Bilangan Rayleigh (Ra)	17,93	
6	Bilangan Reynolds (Re)	41	
7	Bilangan Nusselt (Nu)	14,5	
8	Koefisien konveksi (h)	29,37	W/m ² K
	Gabungan (konveksi bebas)		
7	Koefisien perpindahan panas keseluruhan (U)	11,92	W/m ² K

Dari perhitungan korelasi konstanta perpindahan panas dilanjutkan perhitungan-perhitungan yang berkaitan dengan laju pembangkitan panas dan laju pendinginan sampai pada perubahan suhu lateks saat diiradiasi. Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada Gambar 2 sampai dengan Gambar 5.

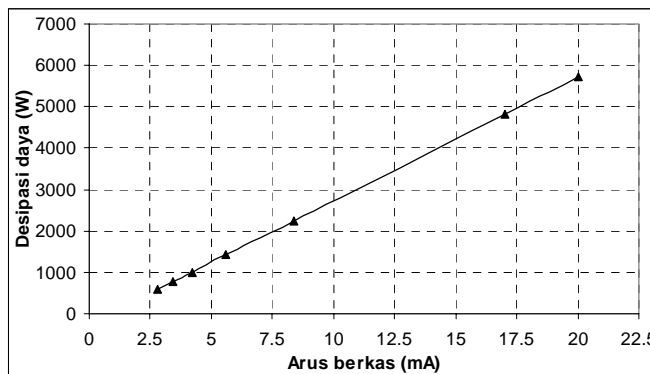
Pada Gambar 2 ditunjukkan hasil perhitungan hubungan arus berkas elektron dengan waktu iradiasi untuk dosis 50 kGy. Perhitungan ini dilakukan dengan persamaan (9). Pada mesin berkas elektron dengan tegangan tinggi DC sebagai tegangan pemercepat, besar energi berkas elektron yang dihasilkan adalah besar tegangan pemercepat dikalikan dengan muatan elektron. Jadi untuk menentukan tegangan pemercepat yang digunakan adalah didasarkan energi berkas elektron yang dihasilkan. Untuk energi elektron yang akan digunakan untuk vulkanisasi ini adalah 300 keV maka tegangan pemercepatnya adalah 300 kV. Perhitungan arus berkas elektron ini dilakukan untuk kapasitas bejana iradiasi 28,8 liter dan dosis

iradiasi 50 kGy serta waktu iradiasi 5 menit sampai 30 menit dengan interval 5 menit dan untuk arus berkas elektron 20 mA. Besar arus berkas elektron 20 mA ditentukan berdasarkan kemampuan mesin berkas elektron yang direncanakan. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan (9) dan persamaan (1) sehingga diperlukan besar arus berkas elektron 2,8 mA untuk waktu iradiasi 30 menit dan 17 mA untuk waktu iradiasi 5 menit. Untuk arus berkas elektron 20 mA hanya diperlukan waktu iradiasi 4,2 menit. Makin besar arus berkas elektron yang digunakan untuk iradiasi maka makin kecil waktu yang diperlukan sehingga lebih efisien dan dapat meningkatkan jumlah lateks yang divulkanisasi.

Namun makin besar arus berkas elektron makin besar daya terdisipasi yang terjadi. Hasil perhitungan hubungan besar arus berkas elektron dengan daya terdisipasi yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Hubungan arus berkas elektron dengan waktu iradiasi untuk dosis 50 kGy.

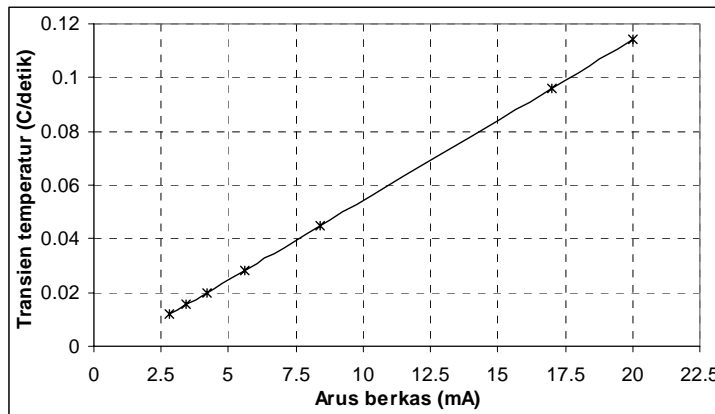


Gambar 3. Hubungan arus berkas elektron dengan disipasi daya untuk dosis 50 kGy.

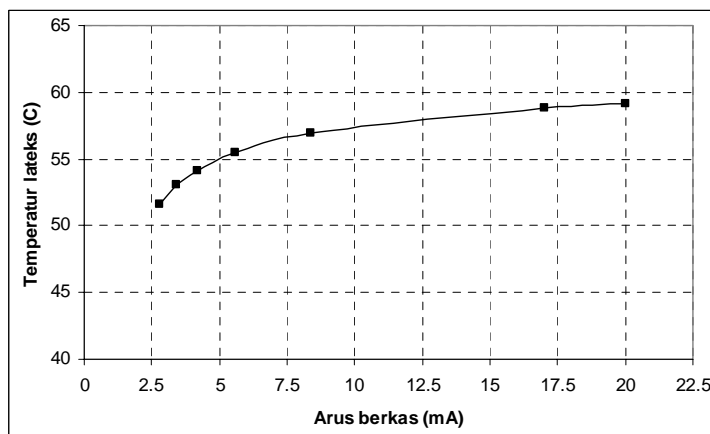
Daya terdisipasi adalah jumlah panas yang masuk (Q_{in}) dikurangi jumlah panas yang keluar (Q_{out}). Jumlah panas yang masuk adalah daya berkas elektron yang digunakan untuk iradiasi, sedangkan jumlah panas yang keluar adalah laju pendinginan bejana iradiasi. Perhitungan daya terdisipasi dilakukan berdasarkan hasil perhitungan korelasi konstanta perpindahan panas dan dengan persamaan (1) dan persamaan (2). Daya terdisipasi ini menyebabkan kenaikan suhu lateks karena merupakan daya berkas elektron yang diubah menjadi panas dan tersimpan di dalam lateks saat diiradiasi. Besar kenaikan suhu lateks dipengaruhi oleh laju kenaikan suhu (transien suhu) dan hasil perhitungannya ditunjukkan pada Gambar 4. Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan (1) sampai dengan persamaan (10). Dari hasil

perhitungan menunjukkan bahwa makin besar daya terdisipasi makin besar transien suhu yang terjadi. Transien suhu merupakan kenaikan suhu lateks per satuan waktu. Kenaikan suhu lateks saat diiradiasi adalah besar transien suhu yang terjadi dikalikan dengan waktu iradiasi, sedangkan suhu lateks saat diiradiasi adalah suhu awal ditambah dengan kenaikan suhu.

Pada Gambar 5 ditunjukkan hasil perhitungan suhu lateks saat diiradiasi. Suhu lateks saat diiradiasi dihitung dari suhu lateks sebelum diiradiasi ditambah dengan transient suhu dikalikan waktu iradiasi. Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa kenaikan arus berkas elektron saat iradiasi memberikan dampak kenaikan suhu lateks secara tidak linier seperti pada kenaikan daya terdisipasi dan transien suhu.



Gambar 4. Hubungan arus berkas elektron dengan transien suhu untuk dosis 50 kGy.



Gambar 5. Hubungan arus berkas elektron dengan suhu lateks untuk dosis 50 kGy.

Hal ini disebabkan pada dosis yang sama yaitu 50 kGy, untuk iradiasi dengan arus berkas elektron yang besar diperlukan waktu iradiasi yang singkat. Dari perhitungan menunjukkan bahwa untuk waktu iradiasi 5 menit diperlukan arus berkas elektron 17 mA pada energi 300 keV dan diperoleh suhu lateks 58,9 °C saat diiradiasi. Untuk waktu iradiasi 30 menit diperlukan arus berkas elektron 2,8 mA pada energi 300 keV dan diperoleh suhu lateks 51,6 °C saat diiradiasi. Jika kapasitas mesin berkas elektron maksimum yaitu pada arus berkas elektron 20 mA diperlukan waktu iradiasi 4,2 menit dan diperoleh suhu lateks 59,2 °C saat diiradiasi. Dengan demikian, walaupun trasien suhu cukup besar pada iradiasi dengan arus berkas elektron yang besar tetapi karena waktu iradiasi cukup singkat maka suhu lateks saat diiradiasi masih di bawah suhu yang dipersyaratkan.

Dari hasil perhitungan pendinginan dilanjutkan pembuatan gambar teknis bentuk bejana iradiasi dan cara pengadukannya. Untuk mengaduk lateks saat proses iradiasi direncanakan menggunakan baling-baling yang diputar dengan *mechanical overhead stirrer* jenis RW 20n buatan IKA World-Wide Group-Germany. *Mechanical overhead stirrer* ini mempunyai jangkauan putaran operasi 60 rpm s/d. 2.000 rpm dan torsi 300 Ncm pada 60 rpm, sedangkan persyaratan operasi pengadukan adalah 100 rpm s/d. 300 rpm (Tabel 1). Pengaturan putaran harus dilakukan saat mesin berkas elektron belum dioperasikan karena pengaturannya secara manual (mekanik). Putaran pengadukan tidak boleh mencapai kondisi lateks mengeluarkan gelembung-gelembung uap, karena akan mengakibatkan pengkristalan/pembekuan^[1]. Gambar teknis bejana iradiasi hasil rancangan secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 6 (Lampiran 1). Penggambaran dilakukan dengan memperhatikan fungsi dan konstruksinya, faktor kesulitan dalam pengerjaan serta estetika sehingga dihasilkan dimensi luar bejana dengan ukuran panjang 790 cm, lebar 20 cm dan tinggi 32 cm serta volume lateks 28,8 liter. Dengan hasil ini

diharapkan dapat digunakan sebagai pedoman pembuatan bejana iradiasi untuk vulkanisasi lateks karet alam dengan iradiasi berkas elektron serta dapat digunakan sebagai pedoman konstruksinya.

KESIMPULAN

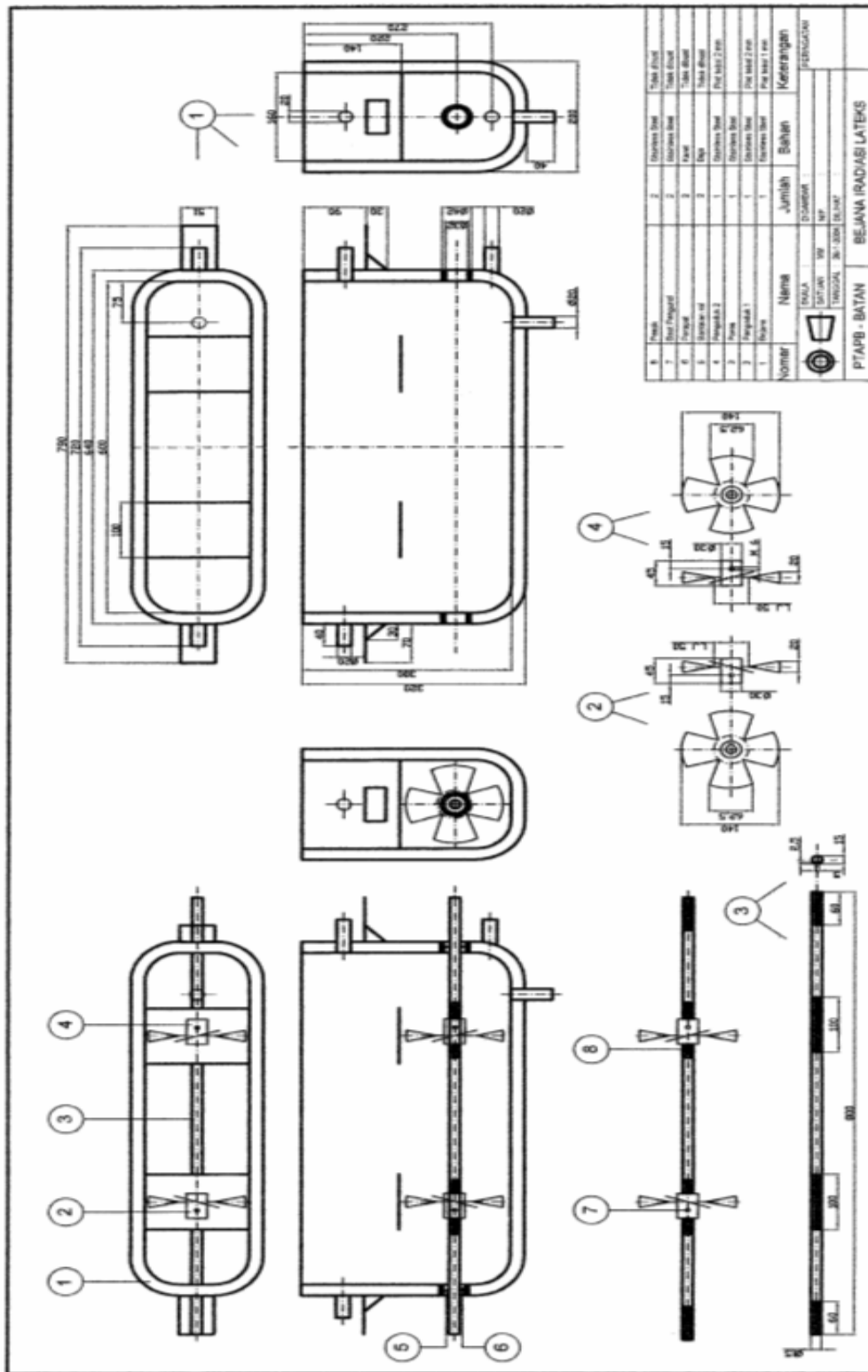
Dari hasil rancangan bejana iradiasi untuk proses vulkanisasi lateks karet alam dengan iradiasi berkas elektron dapat disimpulkan bahwa:

1. Dimensi luar bejana iradiasi adalah panjang 790 cm, lebar 20 cm dan tinggi 32 cm serta volume lateks 28,8 liter.
2. Suhu lateks maksimum saat diiradiasi tidak melebihi batas yang dipersyaratkan yaitu 60 °C untuk dosis maksimum 50 kGy dengan suhu air pendingin 20 °C.
3. Bentuk dan dimensi bejana iradiasi telah diungkapkan dalam gambar teknis sehingga dapat digunakan sebagai pedoman pembuatan dan konstruksinya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] MAKUUCHI, K., *An Introduction to Radiation Vulkanization of Natural Rubber Latex*, T.R.I. Global Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 2003.
- [2] SUNIL SUBHARWAL, *Development of Applications of Electron Beam Based Technology*, BATAN Accelerator School, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, 2006.
- [3] INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., *Fundamental of Heat Transfer*, John Wiley & Son, New York, 1981.
- [4] WOOD, L.A., *Physical Constants of Different Rubbers*, Polymers Division, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland, 1985.

Lampiran 1.



Gambar 6. Gambar teknis bentuk dan dimensi bejana iradiasi.

TANYA JAWAB

Rill Isaris

- Dalam abstrak tercantum hasil dimensi bejana, yang belum terlihat perhitungannya didalam makalah. Apakah hal tersebut berasal dari *Spec Requirement* yang belum dinyatakan secara eksplisit? Apakah bisa dibuat opsi lain dimensi tersebut?

Suprpto

- Dimensi bejana ditentukan berdasarkan kebutuhan yang disesuaikan dengan bentuk corong pemayar dan window, kemudian dilakukan perhitungan pendinginan dan penggambaran secara detil sehingga didapatkan dimensi sesungguhnya.
- Opsi lain sangat sulit karena harus menyesuaikan bentuk corong pemayar dan windows.

Nada Marnada

- Apakah desain bejana yang dibuat sudah memperhitungkan faktor waktu (lama) masa transportasi (termasuk jinak) yang pada kondisi tertentu akan merubah viskositas lateks yang menjadi parameter perhitungan?

Suprpto

- Perhitungan belum mempertimbangkan faktor waktu transportasi atau penyimpanan yang dapat merubah viskositas lateks. Viskositas diambil pada kondisi standar (acuan) dari lateks.

Utaja

- Bagaimana menetralsir muatan yang ada di dalam lateks.

Suprpto

- Saat vulkanisasi, lateks diaduk dan disirkulasikan sehingga terjadi kontak antara molekul-molekul lateks dengan bejana. Dengan demikian terjadi perubahan muatan walaupun tidak seluruhnya (100%) karena lateks merupakan isolator listrik.

PERHITUNGAN DAN ANALISIS SISTEM CATU DAYA LISTRIK UNTUK PENGOLAHAN GAS BUANG PLTU BATUBARA MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON (MBE)

Suyamto

Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir

Djasiman

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Yogyakarta

ABSTRAK

PERHITUNGAN DAN ANALISIS SISTEM CATU DAYA LISTRIK UNTUK PENGOLAHAN GAS BUANG PLTU BATUBARA MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON (MBE). Telah dilakukan perhitungan dan analisis sistem catu daya listrik untuk keperluan pengolahan gas buang PLTU batubara menggunakan mesin berkas electron (MBE). Tujuannya adalah untuk mempersiapkan kebutuhan catu daya listrik seluruh sistem agar dalam pengoperasiannya tidak terjadi gangguan yang diakibatkan oleh gagalnya sistem catu daya. Analisis meliputi perhitungan daya, pengaman dan penghantar untuk seluruh sistem yang terdiri dari komponen utama seperti Blower, Spray Cooler, Mesin Berkas Elektron (MBE), Electrostatic Precipitator (ESP) dan sistem pendukungnya, yaitu Unit Utilitas, Silo, Ruang Staf dan Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK). Untuk pendistribusian daya listrik dari gardu ke tiap peralatan digunakan kabel jenis NYY, sedangkan untuk pengaman hubung singkat digunakan sekering jenis NTF. Dari perhitungan diketahui bahwa daya maksimum yang diperlukan untuk pengoperasian seluruh sistem adalah 405,6 kW atau 507 KVA dengan $\cos \phi$ sama dengan 0,8 yang dicatu dari transformator 690 KVA, 20 KV/380 V, 50 Hz. Sedangkan dengan memperhatikan faktor serempak pembebanan (demand factor), diketahui besarnya faktor pembebanan (load factor) dari transformator adalah 61,98 % dan besarnya daya cadangan adalah 38,02 % atau 262,37 KVA.*

ABSTRACT

THE CALCULATION AND ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM FOR FLUE GAS TREATMENT OF COAL ELECTRIC POWER STATION USING ELECTRON BEAM MACHINE (EBM). The calculation and analysis of electric power supply for flue gas treatment of coal electric power station using electron beam machine (EBM) has been carried out. The purpose of analysis is to prepare the electrical energy which will be used for all system in order to the failure caused by the the power supply problem is not occur. The analysis includes of power calculation, safety device and the conductor which will be used for all system, which consists of main component of Blower, Spray Cooler, Electron Beam Machine (EBM), Electrostatic Precipitator (ESP) and its auxiliary system like Utilities unit, Silo, Staff Room and Instrumentation and Control System. The power distribution line from power building to each device is used NYY type cable, while short circuit protection system is used NTF type. From the analysis it is known that the maximum power for all system is 405,6 KW or 507n KVA at $\cos \phi$ 0,8, and the capacity of transformer is 690 KVA, 20 KV/380 V, 50 Hz. While by implementation of demand factor, it is known that the transformer's load factor is 61,98 % and the power reserve is 38,02 % which is equal to 262,37 KVA.

PENDAHULUAN

Kualitas udara buang dari industri pada saat ini masih terus menjadi perhatian, khususnya bagi negara industri. Demikian juga halnya gas buang yang dikeluarkan oleh PLTU yang menggunakan bahan bakar batubara, adalah merupakan hal yang sangat penting untuk dibahas, diteliti dan diolah. Hal ini karena di samping gas tersebut menimbulkan polusi sehingga melampaui nilai Batas Mutu Emisi (BME) yang telah

ditentukan untuk SO_2 dan NO_x , juga masih dapat dimanfaatkan misalnya untuk penyediaan bahan dasar pupuk organik seperti $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dan $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ ^[1].

Salah satu teknik untuk pengolahan gas buang dari PLTU batu bara adalah dengan menggunakan berkas elektron (*Electron Beam for Flue Gas Treatment*). Plant tersebut terdiri dari peralatan utama yang terdiri dari Blower, *Spray Cooler*, Mesin Berkas Elektron (MBE) dan

Electrostatic Precipitator (ESP). Di samping peralatan utama juga terdapat peralatan penunjang yang terdiri dari Unit Utilitas, Silo, dan Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK). Besarnya kebutuhan daya dari masing-masing peralatan telah dihitung atau ditentukan dan terdapat dalam dokumen “Desain Teknis Sistem Pengolahan Gas Buang PLTU Suralaya Menggunakan Mesin Berkas Elektron^[3]. Untuk pencatutan daya ke masing-masing peralatan dilakukan perhitungan dan analisis dengan tujuan antara lain untuk :

1. Menentukan besar pengaman dan kabel penghantar yang akan dipakai
2. Menentukan kebutuhan daya dari pencatu daya
3. Menghitung besarnya daya cadangan dalam rangka mengantisipasi adanya perkembangan beban (*load forecasting*)

Jadi tujuan akhir dari perhitungan dan analisis sistem catu daya listrik ini adalah untuk menjamin ketersediaan daya seluruh peralatan agar kegagalan operasi yang mungkin terjadi yang diakibatkan sistem catu daya listrik dapat dihindari.

DASAR TEORI

Pada setiap perancangan sistem catu daya selalu diperhitungkan penyediaan daya dan penyalurannya ke beban serta pemasangan dari peralatan pengaman untuk menjamin ketersediaan daya listrik yang cukup, aman dan efisien. Catu daya yang terlalu besar akan berdampak pada biaya yang besar, sedangkan pemakaian peralatan pengaman yang terlalu besar akan mengakibatkan responnya lambat.

Untuk menjamin agar penyaluran energi listrik dari sumber ke beban dapat berlangsung secara aman maka di dalamnya dipakai penghantar dan beberapa. pengaman yang sesuai. Penghantar harus dipilih sesuai dengan jenis peruntukannya misalnya dari jenis NYY, NYM dan NYFGbY. Sedangkan pengaman terdiri dari pengaman terhadap beban lebih berupa *over load* (O/L), pengaman terhadap arus berlebihan atau arus hubung singkat berupa sekering atau MCB (*Magnetic/Miniature Circuit Breaker*) dan pengaman untuk perawatan berupa saklar. Berdasarkan dayanya, instalasi listrik dibagi 2 (dua) yaitu instalasi penerangan dan instalasi tenaga.

Faktor-faktor yang menentukan besarnya ukuran penghantar dan pengaman yang akan dipakai pada ke dua instalasi tersebut didasarkan pada hal-hal berikut.

1. Kuat arus yang dibutuhkan oleh beban yang mengalir pada penghantar, yang dinyatakan sebagai arus nominal I_n .
2. Tergantung dari jenisnya, kemampuan hantar arus (*Current Carrying Capacity*) dari penghantar diperhitungkan terhadap arus nominal dari beban.
3. Pengaman lebur atau sekering dan saklar yang digunakan diperhitungkan terhadap besarnya nominal untuk instalasi penerangan dan terhadap arus *start* atau asut untuk instalasi tenaga.

Besarnya arus nominal I_n untuk beban penerangan adalah

$$I_n = \frac{P}{V \cos \varphi} \quad \text{untuk sistem 1 fasa}$$

$$I_n = \frac{P}{V(\sqrt{3}) \cos \varphi} \quad \text{untuk sistem 3 fasa} \quad (1)$$

Besarnya arus nominal untuk beban motor pada instalasi tenaga adalah

$$I_n = \frac{P}{\eta V \cos \varphi} \quad \text{untuk sistem 1 fasa}$$

$$I_n = \frac{P}{\eta V(\sqrt{3}) \cos \varphi} \quad \text{untuk sistem 3 fasa} \quad (2)$$

dimana, P : daya beban (watt)
 V : tegangan sumber (volt)
 $\cos \varphi$: faktor daya beban
 η : efisiensi beban

Rating atau ukuran dari pengaman pada instalasi penerangan ditentukan berdasarkan besarnya arus nominal sebagai berikut^[4,5].

$$I_s \text{ dan } I_{sk} \geq I_n$$

Sedangkan rating arus sekering dan saklar untuk beban kelompok adalah

$$I_s \text{ dan } I_{sk} \geq K \times I_n$$

dimana, I_s : arus sekering

I_{sk} : Arus saklar

$K \leq 1$: faktor serempak (*demand factor*)

Rating atau ukuran dari pengaman pada instalasi tenaga didasarkan pada besarnya arus asut dan arus nominal dari motor dengan ketentuan-ketentuan sebagai berikut^[4,5].

1. Saklar

Saklar yang akan dipakai harus mempunyai tegangan minimum sama dengan tegangan dari sistem, sedangkan arusnya

$$I_{sk} = 1,15 I_n \quad (\text{untuk saklar manual})$$

$$I_{sk} = 1,25 I_n \quad (\text{untuk saklar magnetik})$$

2. Sekering

Selain syarat-syarat mekanik yaitu kuat dan tertutup rapat, sekering yang dipakai juga dibedakan berdasarkan jenis kerja dari motor.

$$I_s \geq I_a/2,5 \quad \text{untuk motor yang bekerja secara kontinyu}$$

$$I_s \geq I_a/1,5 \quad \text{untuk motor yang bekerja tidak kontinyu}$$

Besarnya arus asut dari motor listrik tergantung dari jenis alat asutnya. Untuk yang tanpa alat asut maka arus I_a diambil $6 \times I_n$. Sedangkan untuk motor yang diasut dengan unit asut Wey-Delta (Y- Δ) I_a sama dengan $1,7 \times I_n$.

3. Penghantar

Penghantar yang dipakai harus memenuhi beberapa persyaratan umum yaitu murah, mempunyai kekuatan mekanik yang baik, mempunyai konduktivitas atau daya hantar listrik yang besar dan mempunyai daya hantar panas yang baik. Sedangkan syarat khususnya bagi penghantar yang akan dipakai adalah harus mempunyai *Current Carrying Capacity* (CCC) yang cukup. Besarnya CCC suatu penghantar tersebut dinyatakan dalam bentuk luas penampang penghantar yang besarnya adalah

$$A = \frac{L I_n \rho \sqrt{3}}{V} \quad (3)$$

dengan :

A : adalah luas penampang dari penghantar (mm^2)

L : panjang saluran penghantar (m)

I_n : arus nominal yang melewati penghantar (ampere)

ρ : tahanan jenis dari penghantar ($\Omega\text{-mm}^2/\text{m}$)

V : tegangan di ujung kabel (volt)

Untuk menentukan ukuran kabel penghantar yang akan dipakai, biasanya digunakan tabel kemampuan hantar arus dari masing-masing penghantar karena lebih praktis.^[3,4]

Besarnya kapasitas catu daya yang harus disediakan merupakan jumlahan daya dari seluruh peralatan dikalikan dengan faktor serempak

pembebanan (*demand factor*). Di dalam sistem arus bolak-balik kebutuhan daya dinyatakan dalam Volt-Amper (VA) atau Kilo Volt Amper (KVA). Jadi besarnya daya yang harus disediakan oleh sebuah catu daya adalah^[3,4],

$$S = \frac{\sum (P \times DF)}{\cos \phi} \quad (4)$$

dengan :

S : besarnya daya yang harus disediakan oleh catu daya (KVA)

P : besar daya dari tiap peralatan (KW)

DF : *Demand Factor*

$\cos \phi$: faktor daya

RANCANGAN DAN PERHITUNGAN

Pada umumnya suatu rancangan didasarkan pada kebutuhan dasar atau *basic requirement*. Perencanaan sistem catu daya ini didasarkan pada *power requirement* dari peralatan-peralatan utama yang terdapat dalam sistem pengolahan gas buang dengan menggunakan MBE. Disamping itu karena ketersediaan lahan yang sangat terbatas yaitu 20 x 25 m maka perancangan dan perhitungannya juga harus memperhatikan hal tersebut. Dalam pengoperasian sistem pengolahan gas buang ini direncanakan memakai sistem 3 fase 50 Hz, 380/220 VAC. Daya listrik diperoleh dari suatu transformator daya 3 fase, 20KV/380V, 50 Hz, yang didistribusikan melalui suatu panel distribusi. Transformator daya dan panel distribusi tersebut dipasang di dalam suatu gedung tersendiri dan pengoperasiannya dilakukan melalui suatu pintu yang disediakan. Daya dari panel distribusi diteruskan ke masing-masing beban atau peralatan melalui saluran (*duck*) di bawah tanah dengan diberi tutup. Untuk sistem tenaga digunakan kabel tanah termoplastik tanpa perisai NYY sedangkan untuk sistem penerangan digunakan kabel jenis NYM. Pemilihan ini didasarkan pada 3 (dua) keadaan yaitu :^[4]

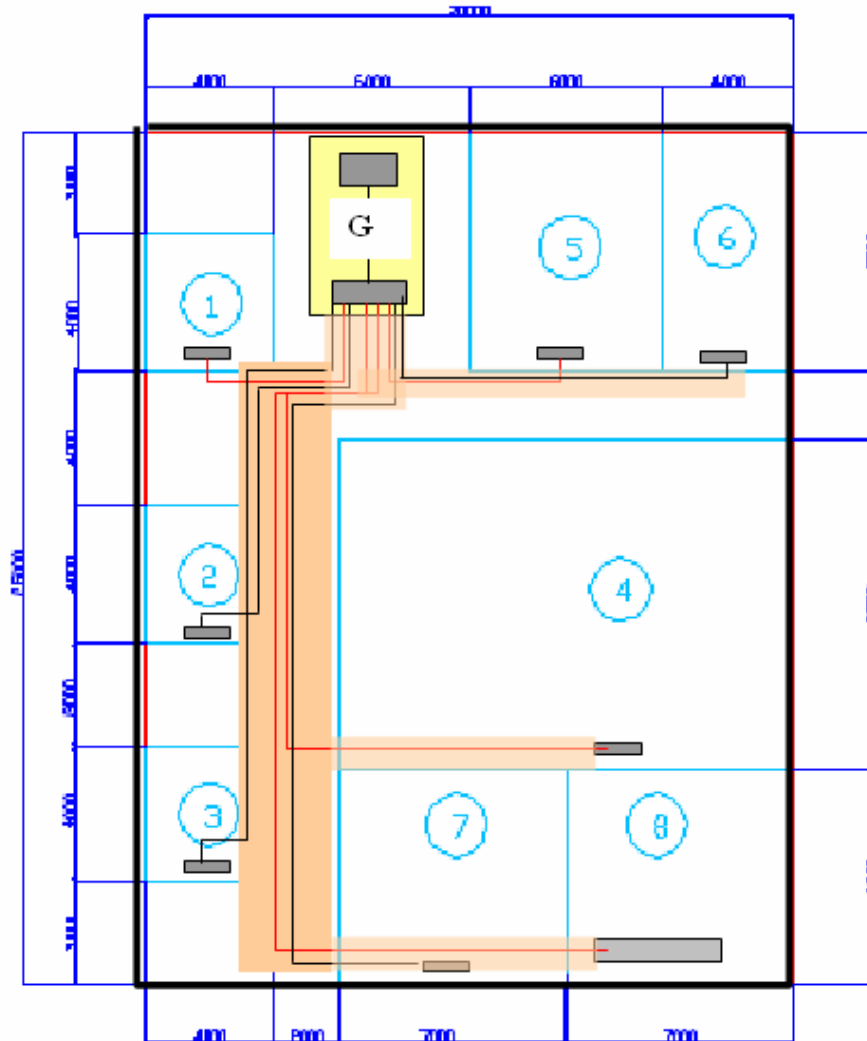
1. Saluran distribusi dirancang terletak di bawah tanah, tapi tidak mengalami beban mekanik.
2. Dari sisi ekonomi, bila dipakai kabel NYFGbY harganya sangat mahal.
3. Kabel jenis NYY mempunyai daya isolasi yang lebih baik dari pada jenis NYM.

Beban dan peralatan listrik yang harus dicatu terdiri dari :

1. Blower (*Induced draught fan*)
2. *Spray Cooler*
3. Utilitas
4. Mesin Berkas Elektron (MBE)
5. *Electrostatic precipitator* (ESP)
6. Silo
7. Ruang Staf
8. Ruang Instrumentasi dan Kendali (SIK)

Penyaluran daya listrik ke titik-titik beban diatur melalui komponen-komponen hubung antara

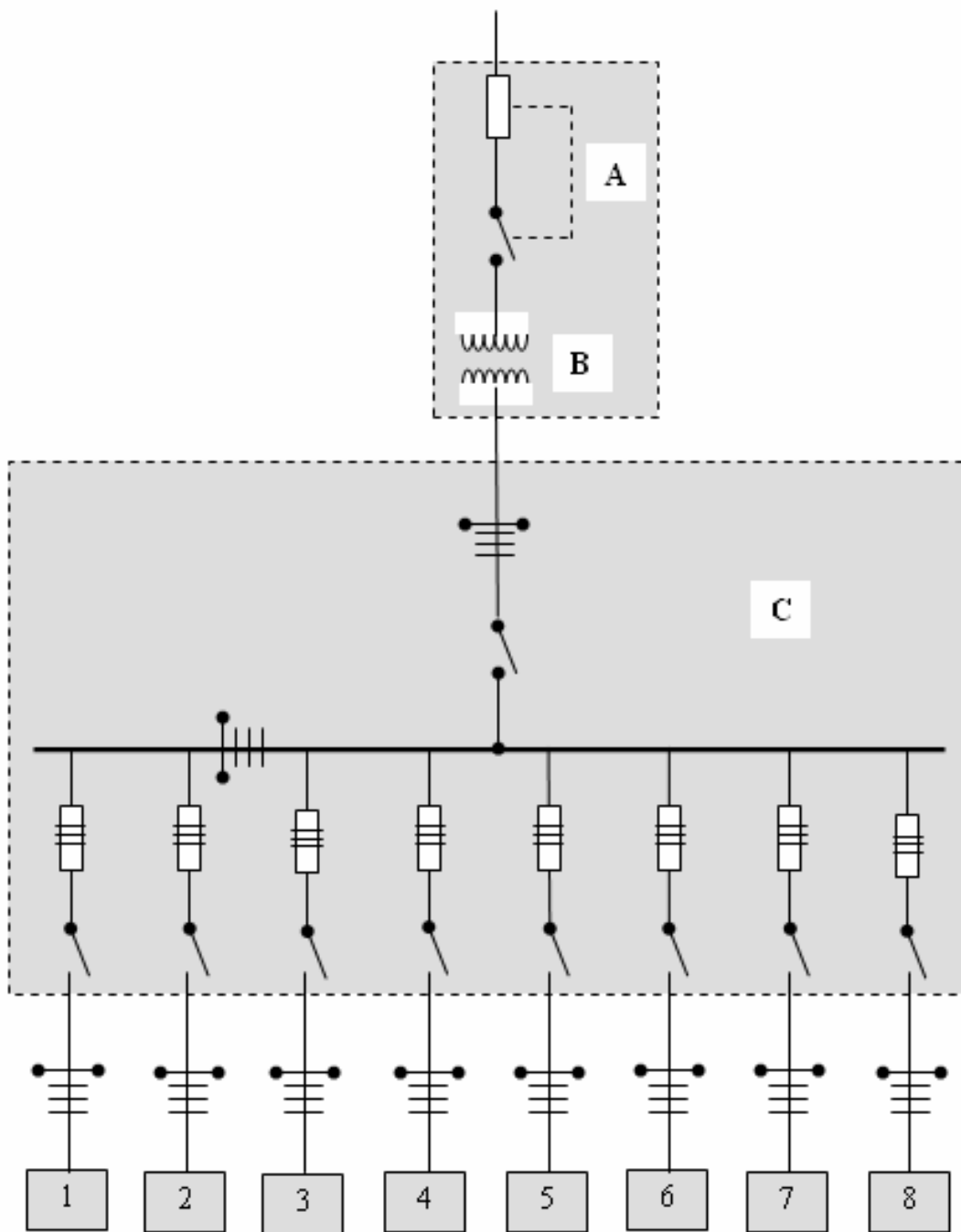
lain: saklar, sekering pengaman, kontaktor magnet, pengaman arus lebih, relai dan sebagainya. Panel distribusi dipasang di dalam ruang kontrol FGT yang merupakan partisi ruang di gedung MBE. Khusus panel listrik pada sistem utilitas yang berada di Gedung 3, direncanakan untuk melayani beberapa beban antar lain *Gas Handling System (GHS)*, penerangan, sistem isnjeksi amoniak, suplai air dan untuk cadangan yang dapat dipakai menurut kebutuhan. Perencanaan tersebut ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Rencana pendistribusian daya listrik ke tiap peralatan atau Gedung.

Keterangan :

- | | | |
|------------------------|--|------------------|
| G. Gardu Listrik | 3. Utilitas | 6. Silo |
| 1. <i>Blower</i> | 4. MBE | 7. Ruang Staf |
| 2. <i>Spray Cooler</i> | 5. <i>Electrostatic Precipitator</i> (ESP) | 8. Ruang Kendali |



Gambar 2. Distribusi listrik ke tiap peralatan utama.

Keterangan :

- | | | |
|------------------|-----------------|-------------------------------------|
| A. Breaker | 1. Blower | 5. Electrostatic Precipitator (ESP) |
| B. Transformator | 2. Spray Cooler | 6. Silo |
| C. Bus Bar | 3. Utilitas | 7. Ruang Staf |
| | 4. MBE | 8. Ruang Kendali |

PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Kebutuhan daya atau beban listrik tiap peralatan dalam sistem FGT serta pemilihan pengaman dan penghantar ditentukan dari besarnya arus nominal I_n . Arus nominal tersebut dihitung dari rumus 2 baik untuk beban 1 fase maupun 3 fase. Tegangan fase –netral adalah 220 V, sedangkan tegangan antar fase adalah 380 V. Semua peralatan diasumsikan mempunyai efisiensi yang sama yaitu 0,8 dan faktor daya $\cos \varphi$ 0,75. Perhitungan arus untuk pengaman dan penghantar dari masing-masing beban adalah sebagai berikut.

Blower

Beban listrik pada sistem *ducting* adalah 108 kW dipakai untuk motor penggerak blower atau *Induced Drought Fan*. Blower tersebut dapat terdiri dari 2 buah dengan daya masing-masing 54 kW yang diletakkan di bagian ujung depan *ducting* di dekat boiler dan di ujung belakang *ducting*, dekat *stack* atau cerobong.

a. Arus nominal I_n

$$I_n = P / (\eta \times 380 \times 3 \times \cos \varphi) = 108.000 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,75) = 273,49 \text{ A}$$

b. Arus asut I_a

Bila blower terdiri dari 2 unit, maka, arus nominal per unit adalah $273/2 = 136,74 \text{ A}$. Karena arus nominalnya besar maka arus *start*-nya juga akan besar sehingga pengoperasiannya harus menggunakan unit starter *Wey-Delta* (Y- Δ), sehingga arus asut adalah

$$I_a = 1,7 I_n = 1,7 (136,74) = 232,47 \text{ A.}$$

c. Arus sekering I_s

Kalau untuk motor blower ditentukan dari jenis motor induksi sangkar tupai (*Squirrel Cage Induction Motor*) dengan jenis kerja kontinyu, maka besarnya arus sekering adalah

$$I_s = I_a / 2,5 = 232,47 / 2,5 = 92,99 \text{ A.}$$

d. Arus saklar I_{sk}

Saklar jenis manual sebagai penghubung dan pemutus yang dipakai harus mempunyai kapasitas $1,15 I_n$, maka

$$I_{sk} = 1,15 \times 136,74 = 157,25 \text{ A.}$$

e. Penghantar

Jenis dan besarnya penghantar yang dipakai didasarkan pada peletakkannya dan besarnya arus nominal. Dengan arus nominal sebesar 136,74 A dan penghantar diletakkan di dalam duck bawah tanah maka dipakai kabel penghantar NYY 4 x 70 mm².

Spray Cooler

Beban listrik dalam sistem *Spray Cooler* adalah 4 kW yang terdiri dari pompa air 2 kW, 2 buah. Dengan beban yang cukup kecil tersebut, maka untuk pengoperasiannya tidak diperlukan unit starter *Wey-Delta* (Y- Δ). Perhitungan arus untuk pengaman dan penghantar sama seperti perhitungan blower yaitu sebagai berikut.

a. Arus nominal I_n

$$I_n = P / (\eta \times 380 \times 3 \times \cos \varphi) = 4.000 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,75) = 10,13 \text{ A}$$

b. Arus asut I_a

Karena arus nominalnya kecil maka motor pompa dihidupkan langsung menggunakan magnetik kontaktor. Besarnya arus asut untuk motor induksi yang dioperasikan tanpa alat asut adalah $I_a = 6 \times I_n$, sehingga

$$I_a = 6 \times 10,13 = 60,78 \text{ A}$$

c. Arus sekering I_s

$$I_s = I_a / 2,5 = 60,78 / 2,5 = 24,31 \text{ A.}$$

d. Arus saklar I_{sk}

$$I_{sk} = 1,15 \times 10,13 = 11,65 \text{ A.}$$

e. Penghantar

Jenis dan besarnya penghantar yang dipakai sama dengan yang dipakai untuk motor blower yaitu NYY 4 x 2,5 mm².

Utilitas

Beban listrik dalam sistem Utilitas direncanakan terdiri dari 3 komponen yaitu Kompresor untuk Pneumatik dan *Gas Hadling System* 3 kW, Pompa Air Sumur 2 kW dan Pencahayaan 3 kW, sehingga total daya untuk sistem utilitas adalah 8 kW. Karena sistem utilitas merupakan sistem yang paling banyak mengalami penambahan peralatan bantu maka untuk sistem utilitas direncanakan disediakan daya sebesar 10 kW. Perhitungan arus pengaman dan penghantar untuk saluran utama dari Gardu ke panel utilitas di ruang 3 pada Gambar 1 dan distribusinya pada Gambar 2 dilakukan seperti motor. Hasilnya sebagai berikut.

a. Arus nominal $I_n = P / (\eta \times 380 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi) = 10.000 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,75) = 25,32 \text{ A}$

b. Arus asut $I_a = (I_n \times 6) = 25,32 \times 6 = 151,92 \text{ A}$

c. Arus sekering $I_s = I_a / 2,5 = 151,92 / 2,5 = 60,77 \text{ A.}$

- d. Arus saklar $I_{sk} = 1,15 I_n = 1,15 \times 25,32 = 29,12$ A
 e. Kabel: NYY 4×6 mm²

Mesin Berkas Elektron

Beban listrik total untuk sistem MBE 177 kW terdiri atas Akselerator 150 kW, Blower pendingin *window* 7 kW, Chiller 15 kW dan Crane 5 kW. Karena beban pada saluran ini terlalu besar maka untuk akselerator dibuat tersendiri, sedangkan untuk blower, *chiller* dan *crane* dijadikan satu yaitu sebesar 27 kW. Sehingga perhitungan arus pengaman dan penghantar dari Gardu ke panel MBE di ruang 4 pada Gambar 1 dan distribusinya pada Gambar 2 adalah sebagai berikut.

Untuk akselerator: 150 kW, 3 fase, 380V, 50 Hz.

- Arus nominal $I_n = P / (\eta \times 380 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi) = 150.000 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,75) = 356$ A
- Arus sekering $I_s \geq I_n \geq 356$ A
- Arus saklar $I_{sk} = 1,15 I_n = 1,15 \times 356 = 409,4$ A
- Kabel penghantar NYY 4×185 mm²

Untuk kelompok Blower, Chiller dan Crane 27 kW, 3 fase, 380V, 50 Hz, dihitung seperti perhitungan blower utama dan hasilnya adalah

- Arus nom. $I_n = P / (\eta \times 380 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi) = 27.000 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,8) = 68,37$ A
- Arus asut $I_a = (I_n \times 6) = (68,37) (6) = 410,22$ A
- Arus sekering $I_s = I_a / 2,5 = 410,22 / 2,5 = 164,09$ A
- Arus saklar $I_{sk} = 1,15 I_n = 1,15 \times 68,37 = 78,63$ A
- Kabel penghantar NYY 4×16 mm²

Electrostatic Precipitator (ESP)

Beban listrik dalam sistem *Electrostatic Precipitator* sebesar 35,6 kW terdiri dari sumber tegangan tinggi DC 33,6 kW dan motor penggerak mekanik 2 kW. Perhitungan dilakukan seperti perhitungan untuk motor dan hasilnya adalah sebagai berikut.

- Arus nom. $I_n = P / (\eta \times 380 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi) = 35.600 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,75) = 96,57$ A
- Arus asut $I_a = (6 \times I_n) = 6 \times 96,57 = 579,43$ A
- Arus sekering $I_s = I_a / 2,5 = 579,43 / 2,5 = 231,77$ A
- Arus saklar $I_{sk} = 1,15 I_n = 1,15 \times 96,57 = 111,06$ A
- Kabel penghantar NYY 4×25 mm²

Silo

Silo adalah tempat untuk penyimpanan hasil produksi sehingga di dalamnya hanya diperlukan satu daya cadangan. Besarnya adalah 5 kW, 3 fase, 380 V, 50 Hz, sehingga perhitungan untuk pengaman dan penghantarnya seperti perhitungan untuk pencahayaan. Hasilnya sebagai berikut

- Arus nom. $I_n = P / (\eta \times 380 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi) = 5.000 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,75) = 12,66$ A
- Arus sekering: $I_s \geq I_n \geq 12,66$ A
- Arus saklar $I_{sk} = 1,15 I_n = 1,15 \times 12,66 = 14,56$ A
- Kabel penghantar NYY $4 \times 2,5$ mm²

Ruang Staf

Beban listrik dalam sistem VAC adalah 57 kW terdiri atas Air Conditioning 4 buah masing-masing 10 kW, blower saluran udara Ventilasi 15 kW, AC-Window 2 kW. Perhitungan arus pengaman dan penghantarnya sama dengan perhitungan untuk motor. Sehingga perhitungan arus pengaman dan penghantar untuk saluran utama dari Gardu ke panel di ruang staf atau ruang 7 pada Gambar 1 dan distribusinya pada Gambar 2 adalah sebagai berikut.

- Arus nominal $I_n = P / (\eta \times 380 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi) = 57.000 / (0,8 \times 380 \times \sqrt{3} \times 0,75) = 144,34$ A
- Arus asut $I_a = (I_n \times 6) = 144,34 \times 6 = 866,04$ A
- Arus sekering $I_s = I_a / 2,5 = 866,04 / 2,5 = 346,42$ A.
- Arus saklar $I_{sk} = 1,15 I_n = 1,15 \times 144,34 = 165,99$ A
- Kabel: NYY 4×35 mm²

Ruang Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK)

Beban listrik dalam Sistem Instrumentasi dan Kendali (SIK) adalah beban 1 fase sebesar 4 kW, terdiri atas Transformator control 2 kW dan Komputer 2 kW. Perhitungan untuk pengaman dan penghantarnya sama seperti perhitungan untuk pencahayaan. Hasilnya sebagai berikut

- Arus nom. $I_n = P / (\eta \times 380 \times \sqrt{3} \times \cos \varphi) = 4.000 / (220 \times 0,75) = 24,24$ A
- Arus sekering: $I_s \geq I_n \geq 24,24$ A
- Arus saklar $I_{sk} = 1,15 I_n = 1,15 \times 24,24 = 27,88$ A
- Kabel penghantar NYY $2 \times 2,5$ mm²

Catatan : Untuk mengantisipasi pemakaian peralatan dan perkembangan beban, dalam ruang SIK disediakan catu daya 3 fase.

HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISA

Seperti telah diterangkan bahwa selain syarat-syarat mekanik yaitu kuat dan tertutup rapat, sekering yang dipakai juga dibedakan berdasarkan jenis kerja dari motor, sedangkan tegangannya minimal harus sama dengan tegangan sumber. Untuk itu maka sekering yang dipakai adalah jenis NT fuse dengan tegangan 380 VAC.

Dalam penentuan ukuran penghantar, tidak diperhitungkan besarnya faktor koreksi terhadap suhu lingkungan dan penempatannya karena besarnya faktor koreksi tersebut kecil. Dalam hal ini ukuran penghantar harus lebih besar dari ketentuan minimum yang diperkenankan menurut PUIL (Peraturan Umum Instalasi Listrik) tahun 1977. Di samping itu untuk penghantar pada *feeder* atau kelompok pengisi, luas penampang minimum adalah 4 mm² dan untuk beban yang dayanya lebih besar dari 250 VA dipakai penghantar dengan luas penampang minimum 2,5 mm.

Dari ketentuan-ketentuan tersebut di atas maka besarnya penghantar dan pengamanan untuk

masing-masing peralatan ditunjukkan pada Tabel 1, dimana untuk sistem 1 (satu) fase dipakai penghantar berurat 2 (dua) dan untuk sistem 3 fase dipakai kabel berurat 4 (empat).

Dari perhitungan dan rekapitulasi daya pada Tabel 1 dapat ditentukan kapasitas transformator yang harus disediakan dan tersedia di pasaran yaitu 690 KVA, 20 kV/380V. Bila diasumsikan bahwa untuk jenis beban tertentu besarnya faktor serempak (*demand factor*) adalah 50 % (Tabel 2) dan *power factor* transformator 0,8, maka dapat dihitung besarnya sisa daya dan faktor pembebanan (*load factor*) dari pencatu daya transformator sebagai berikut.

1. Besarnya daya yang harus disediakan oleh catu daya $S = [342,1/0,8] = 427,63$ KVA.
2. Besarnya faktor pembebanan transformator = $427,63/609 = 61,98$ %.
3. Sisa daya tersisa sebagai daya cadangan adalah 38,02 % atau 262,37 KVA.

Hasil perhitungan tersebut dapat diyakini kebenarannya dengan asumsi bahwa kebutuhan daya tiap peralatan pada Tabel 1 benar. Di samping itu asumsi besarnya *demand factor* sebesar 50 % dilakukan hanya untuk mempermudah dalam perencanaan, sedangkan kenyataannya adalah sangat variatif dan tergantung pada jenis peralatan

Tabel 1. Daftar kabel penghantar dan pengamanan yang dipakai pada distribusi listrik tiap peralatan.

URAIAN BEBAN	P (kW)	I_n (A)	Sekering		Saklar		Kabel (mm ²)
			I_s (A)	Jenis	I_{sk}	Jenis	
1. BLOWER	108						
Induced Drought Fan (2 buah)	2 x 54	136,74	92,99	NTF 125	157,25	SK 200	NY 4 x 70
2. SPRAY COOLER	4	10,13	24,31	NTF 25	11,65	SK 25	NY 4 x 2,5
3. UTILITAS	10	25,32	60,77	NTF 100	29,12	SK 35A	NY 4 x 6
4. MBE	177						
a. Akselerator	150	356	500	NTF 500	409,4	SK 500	NY 4 x 185
b. Blower, Chiller dan Crane	27	68,37	164,09	NTF 200	78,63	SK 100	4 x 16
5. ESP	35,6	231,77	250	NTF 250	111,06	SK 150	NY 4 x 25
6. SILO	5	12,66	12,66	NTF 25	14,56	SK 25	NY 4 x 2,5
7. RUANG STAF	57	144,34	346,42	NTF 500	165,99	SK 200	NY 4 x 35
8. RUANG INSTR & KENDALI	4	24,24	24,24	NTF 35	27,88	SK 35A	NY 4 x 4
JUMLAH	405,6						

Catatan : sekering dan saklar harus mempunyai spesifikasi tegangan 380/220V

Tabel 2. Besarnya daya beban S dengan *demand factor* (DF)

Beban	P (kW)	DF (%)	P x DF (kW)	Keterangan
1. BLOWER	108	100	108	Pemakaian serempak
2. SPRAY COOLER	4	50	2	Pemakaian tidak serempak
3. UTILITAS	10	50	5	Pemakaian tidak serempak
4. MBE				
a. Akselerator	150	100	150	Pemakaian serempak
b. Blower, Chiller dan Crane	27	50	13,5	Pemakaian tidak serempak
5. ESP	35,6	100	35,6	Pemakaian serempak
6. SILO	5	50	2,5	Pemakaian tidak serempak
7. RUANG STAF	57	50	23,5	Pemakaian tidak serempak
8. RUANG INSTR & KENDALI	4	50	2	Pemakaian tidak serempak
JUMLAH	405,6		342,1	

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk pencatutan daya yang diperlukan pada sistem pengolahan gas buang dengan kapasitas sebesar 20.000 Nm³/jam, diperlukan daya listrik yang cukup besar yaitu sebesar 405,6 kW atau 507 KVA yang harus dilayani oleh transformator 3 fase, 690 KVA, 20 kV/380V, 50 Hz.
2. Dengan memperhatikan besarnya faktor serempak dari beban maka besarnya faktor beban dari transformator adalah 61,98 %, sehingga daya cadangan yang tersedia dari transformator adalah 38,02 % atau 262,37 KVA.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BUMSOO HAN, *Proposal for Electron Beam Flue Gas Treatment System*, Daejeon, Korea, 2005.
- [2] P. van. HARTEN, Ir. E. SETIAWAN, *Instalasi Listrik Arus Kuat 3*, cetakan ke 1 dan 3, 1992, Binacipta Bandung.
- [3] *Desain Teknis Sistem Pengolahan Gas Buang PLTU Suralaya 20.000 Nm³/Jam Menggunakan Mesin Berkas Elektron*, Badan Tenaga Nuklir Nasional Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju, Juli 2005.

- [4] Ir. A. RIDA ISMU W, IR. SOEPARTONO; *Instalasi Cahaya dan Tenaga I*, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, edisi pertama 1979.
- [5] A. J. WATKINS, R. K. PARTON; *Perhitungan Instalasi Listrik*, Volume 3, Penerbit Erlangga, 2004.
- [6] GUSWANTO, *Listrik Arus Kuat*, Panduan Praktikum, Akademi Perindustrian Yogyakarta. 1984.

TANYA JAWAB

Tri Mardji A.

- Mengapa harus ada perhitungan dan analisa catu daya, tinggal masukan ke 220 saja kan sudah "beres", apabila kita boleh mengambil arus listrik yang tidak terbatas.
- Sebaiknya ditindak lanjuti dengan pembuatan rangkaian stabilizer agar tidak terjadi kerusakan peralatan. Apa mungkin?
- Bagaimana pengaruh fluktuasi frekuensi terhadap keamanan peralatan (blower, spray cooler, dll.).

Suyamto

- Untuk daya yang besar harus ada perhitungan yang akurat, disamping itu juga harus menyangkut masalah ekonomi/biaya.

- Tidak perlu, karena pembahasan hanya untuk catu daya pada panel listrik.
- Untuk fluktuasi frekuensi tidak dibicarakan, karena yang dibahas adalah catu daya PLN 50 Hz.

Utaja

- Mengapa faktor daya untuk spray cooler diambil 50%?

Suyamto

- Ya, karena spray cooler 4 kW tersebut sebetulnya terdiri dari 2 buah @ 2 kW, sehingga sekali operasi hanya diperlukan 1 buah 2 kW atau 50%.

Rill Isaris

- Penjabaran kebutuhan catu daya ke pemakai pada unit-unit alat memang harus memperhitungkan pengadaan "Power Conditioning" yang memuat stabilizer dan drop out relay.

- Pada jenis komponen yang dicantumkan tidak menunjuk pabrik pembuat tapi cukup spec atau jenis komponen saja.

Suyamto

- Ya, yang dibahas dalam makalah ini adalah catu daya pada panel, bukan tiap peralatan.
- Ya, terima kasih.

Nada Marnada

- Bagaimana menurut pendapat Bapak jika spare-parts yang digunakan buka dari produk yang Bapak rekomendasikan (misalnya sekering dan saklar) tetapi dari produk lain namun memiliki label SNI.

Suyamto

- Boleh, tapi yang ditampilkan adalah spare-part yang sudah teruji keandalannya.

SIMULASI INTERLOCK MBE MENGGUNAKAN PLC

Taxwim

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

Ade Ali Wardana

Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, Yogyakarta

ABSTRAK

SIMULASI INTERLOCK MBE MENGGUNAKAN PLC, Telah dilakukan simulasi sistim interlock Mesin Berkas Eelektron (MBE) menggunakan PLC (Programable Logic Controller). Simulasi ini menampilkan beberapa parameter keselamatan baik untuk manusia maupun mesin itu sendiri yang digunakan sebagai sistim keselamatan operasi MBE. Sinyal masukan parameter interlock diambil dari data sistim interlock MBE yang telah dibuat sebelumnya, sedangkan sinyal keluaran parameter interlock berupa nyala lampu indikator (LED), aktifasi electromagnetic relay dan suara dari buzzer. Jika terjadi interlock atau kegagalan salah satu sistim maka lampu LED akan menyala merah sesuai dengan penunjukan parameter kegagalannya. Rangkaian sistim ini dikendalikan oleh PLC sebagai sistim kendali yang terprogram dengan bahasa pemrograman menggunakan diagram Ladder. Sistim ini baik digunakan sebagai sistim kendali on off dan telah banyak digunakan dalam aplikasi sistim kendali. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistim interlock dengan PLC tersebut telah beroperasi dengan baik.

Kata kunci : *simulasi, interlock MBE, PLC*

ABSTRACT

SIMULATION OF MBE INTERLOCK USING PLC, The simulation system of interlock of Electron Beam Machine (EBM) using PLC (Programmable Logic Controller) has been done. This simulation presents some safety parameters for human and machine itself used as safety system for operation of EBM. The parameter input signal of interlock is taken from interlock data system of EBM which have been made previously, while output signal of interlock parameter is the form of blazing indicator lamp (LED), relay electromagnetic activation and voice are from buzzer. If there is an interlock or failure one of the parameter system and the lamp of LED will blaze according to the parameter failure. This circuit system network is controlled by PLC which is programmed by diagram ladder language. This system is good to be used as on off control system and it has been used widely in control system application. The result of simulation indicates that system of interlock with the PLC has operated successfully.

Key word : *simulation, EBM interlock, PLC*

PENDAHULUAN

Sistim *Interlock* atau dapat diartikan sistim saling kunci merupakan salah satu sistim keselamatan yang diterapkan pada suatu peralatan yang memerlukan perhatian khusus dalam arti untuk memperkecil kesalahan yang mungkin ditimbulkannya. Dalam penelitian ini dirancang suatu sistim *interlock* dengan menggunakan PLC yang diterapkan pada Mesin Berkas Elektron dengan parameter masukan secara simulasi yang diharapkan akan memenuhi aspek-aspek keselamatan^[1]. Sistim ini memonitor parameter masukan yang dikategori-kan dalam 3 kelompok yaitu:

- Sinyal yang mengijinkan sistim beroperasi (*operation permission*).
- Sinyal yang mengijinkan untuk irradiasi operasi (*irradiation permission*).

- Sinyal TRIP, yaitu sinyal keselamatan untuk men-*shutdown* MBE.

Parameter keselamatan dalam sistim interlock secara umum berupa parameter yang dapat dilihat (*visible*: misalnya lampu), parameter yang dapat didengar (*audible*: misalnya bel alarm atau *voice*), parameter fisika dan parameter listrik⁽¹⁾. Sistim keselamatan dan pengamanan perlu dilakukan secara mutlak pada suatu peralatan yang mengandung unsur berbahaya, baik itu terhadap manusia maupun terhadap peralatan itu sendiri. Salah satu sistim keselamatan dan pengaman yang sering digunakan adalah sistim *interlock*.

Untuk mengetahui gambaran umum sistim interlock dengan PLC yang terkait dengan MBE PTAPB BATAN dimulai dari pengertian Mesin Berkas Elektron secara menyeluruh. Mesin Berkas

Elektron (MBE) adalah suatu alat pemercepat elektron yang dihasilkan dari sumber elektron. Komponen utama sebuah Mesin Berkas Elektron antara lain: sumber tegangan tinggi, sumber elektron, tabung pemercepat, sistim optik dan sistim vakum^[2]. Sumber tegangan tinggi berfungsi sebagai pembangkit tegangan untuk sistim pemercepat berkas elektron. Salah satu jenis sumber tegangan tinggi yang digunakan pada MBE tersebut adalah generator Coccoft Walton. Sumber elektron merupakan salah satu unit penghasil elektron dalam hal ini menggunakan metoda filament panas^[3]. Untuk mengarahkan elektron bebas dari katoda ke celah digunakan elektroda pendorong yang berpotensi negatif. Dalam perjalanannya menuju anoda, berkas elektron cenderung menyebar (*divergen*) akibat adanya gaya tolak menolak antara muatan sejenis yang dimiliki oleh masing-masing elektron. Oleh karena itu elektroda pemfokus sangat berperan untuk memfokuskan agar berkas elektron menjadi terfokus dan selanjutnya dapat melewati celah sumber elektron. Anoda yang juga berfungsi sebagai celah keluaran sumber elektron harus dapat menarik elektron sebanyak-banyaknya dari ruang sumber elektron. Oleh karena itu anoda diberi tegangan positif, sedangkan sistim optik merupakan peralatan yang digunakan untuk memfokuskan, mengarahkan dan sebagai sistim pemayar berkas^[3].

Parameter parameter tersebut diatas perlu dikendalikan agar sesuai dengan parameter yang dikehendaki dan masing-masing tergantung satu sama lain sehingga perlu adanya sistim *interlock* dengan PLC yang akan mengatur atau memonitor suatu sistim agar operasi dari MBE akan berjalan dengan baik sebagai sistim keselamatan operasinya.

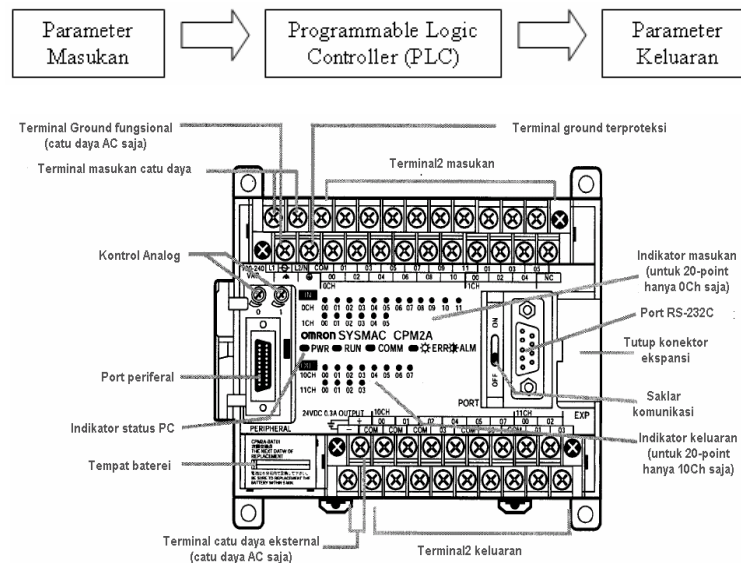
TATA KERJA

Sistim *Interlock* Mesin Berkas Elektron

Sistim *Interlock* dengan sistim kendali PLC tersebut didisain sebagai peralatan kendali dan kontrol dari parameter masukan, jika terjadi *interlock* pada salah satu parameter operasi mesin berkas elektron. Oleh karena itu sistim ini merupakan salah satu sistim keselamatan yang dapat diterapkan pada suatu peralatan sistim operasi MBE dengan harapan dapat beroperasi secara baik sebagai sistim keselamatan operasi. Pada perancangan MBE ini telah direncanakan beberapa parameter sebagai sistim *interlock* seperti ditunjukkan pada Tabel 1, parameter *interlock* inilah yang digunakan sebagai masukan simulasi.

Tabel 1. Daftar parameter interlock mesin berkas elektron.

No	Parameter	No	Parameter
1.	Sistim Vakum	9.	Isi latex
2.	<i>Kunci operasi</i>	10.	Over beam current
3.	<i>Sistim pemfokus</i>	11.	Emergency
4.	Sistim pemayar	12.	Over voltage
5.	Blower window	13.	Over heat
6.	Monitor ozon	14.	<i>Detektor asap</i>
7.	<i>Bejana tekan</i>	15.	Monitor radiasi
8.	Pintu lateks	16.	RESET

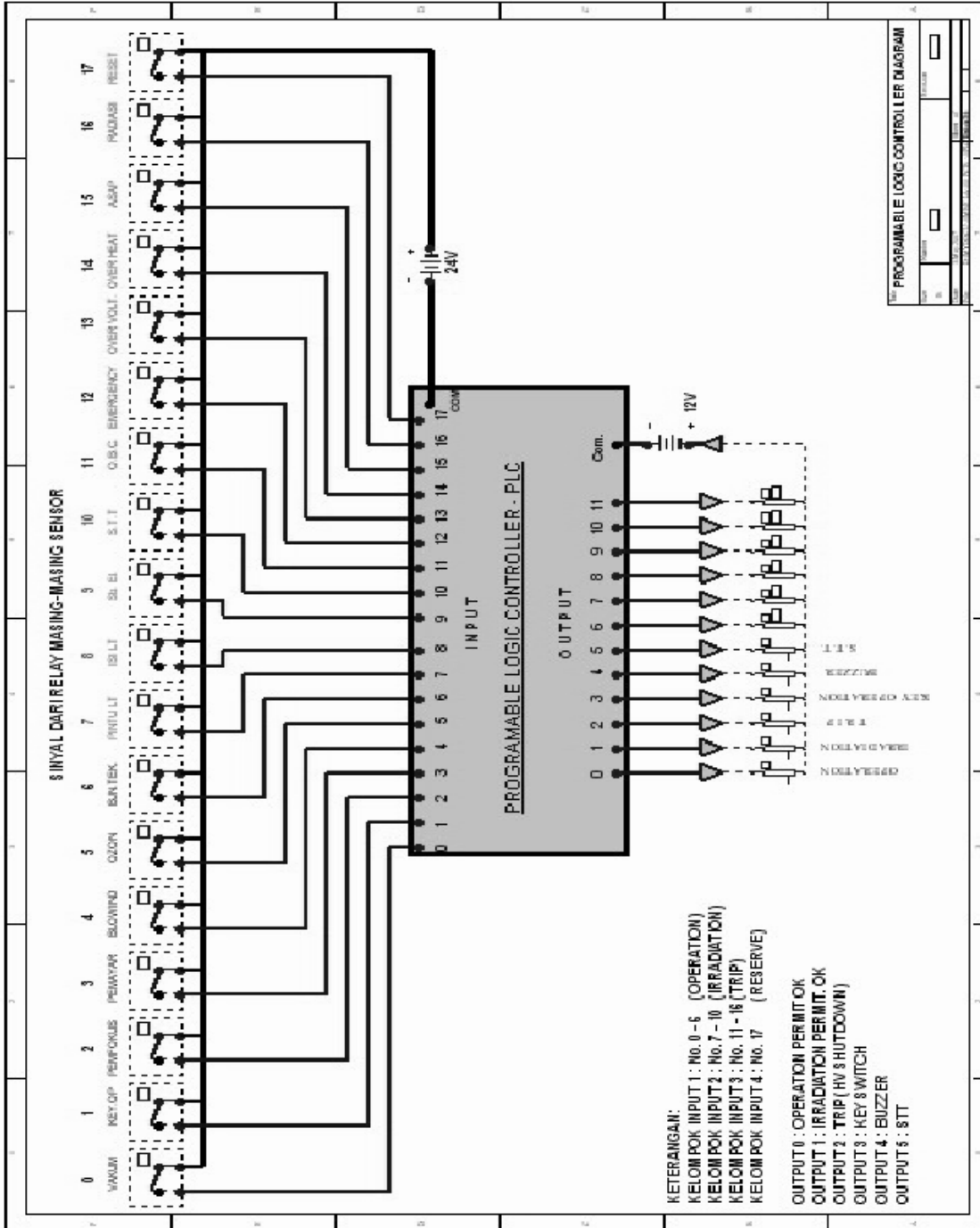


Gambar 1. Skema Programmable Logic Controller^[5].

Perancangan sistim kendali dengan PLC

Sistim kendali *Interlock* MBE dibangun dengan menggunakan perangkat keras keras dan lunak yang ada dalam PLC dengan bantuan *electromagnetic relay* agar dapat beroperasi se-

bagaimana kita kehendaki. Parameter input interlock dari MBE digunakan sebagai masukan dari PLC yang kemudian dikendalikan oleh program yang ada pada PLC untuk mengendalikan proses operasi MBE, seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 2. Diagram Input dan ouput PLC.

Tahapan pemrograman dilakukan dengan pengelompokan fungsi dari masing-masing parameter input yaitu:

- I. Sinyal yang mengizinkan sistim beroperasi (*operation permission*).
- II. Sinyal yang mengizinkan untuk irradiasi operasi (*irradiation permission*).
- III. Sinyal TRIP, yaitu sinyal keselamatan untuk men-*shutdown* MBE.

Kelompok I yaitu kelompok operasi (*permission operation*) terdiri dari parameter:

1. Vakum
2. Key operation (Operator)
3. Pemfokus
4. Pemayar
5. Blower Window
6. Ozon
7. Bejana Tekan

Kelompok II yaitu kelompok Iradiasi (*Irradiation Permission*) terdiri dari parameter:

1. Pintu latex (pintu Irradiasi)
2. Isi latex (wadah)
3. Sumber elektron
4. Sumber Tegangan Tinggi

Kelompok III yaitu kelompok TRIP terdiri dari parameter:

1. Over Beam Curent
2. Emergency (darurat dari operator)
3. Tegangan STT melebihi batas (over voltage)
4. Panas tinggi (over heating)
5. Asap
6. Radiasi tinggi

Apabila kelompok I terpenuhi maka akan mengeluarkan sinyal untuk mengizinkan pengoperasian selanjutnya yaitu akan melihat sinyal kelompok II. Apabila kelompok II terpenuhi maka MBE siap dioperasikan dengan catatan bahwa kelompok III tak terjadi TRIP yang berarti semua jalan sesuai dengan fungsinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian program dilakukan dengan cara mencoba program PLC yang telah dibuat yaitu berdasarkan atau disesuaikan dengan perancangan sistimnya. Setelah menentukan parameter *input/output* dari sistim simulasi *interlock* MBE maka dibuat tahapan-tahapan pemrograman PLC dengan piranti pemrograman, maka dapat dilihat hasilnya dengan langsung mengaplikasikan melalui *hardware* yang telah dibuat pada rangkaian simulasi. Parameter yang dapat dilihat secara langsung berupa nyala lampu LED sedangkan parameter yang dapat didengar berupa suara buzzer.

Tabel 2. Kelompok I yaitu kelompok operasi (*permission operation*) terdiri dari parameter.

No.	Parameter Kelp.I	Kondisi	Terpenuhi	Tak terpenuhi
1.	Vakum	terpenuhi	1	0
2.	<i>Key operation</i> (Operator)	on	1	0
3.	Pemfokus	beroperasi	1	0
4.	Pemayar	beroperasi	1	0
5.	<i>Blower Window</i>	beroperasi	1	0
6.	Ozon	terpenuhi	1	0
7.	Bejana Tekan	terpenuhi	1	0

Tabel 3. Kelompok II yaitu kelompok Iradiasi (*Irradiation Permission*) terdiri dari parameter.

No.	Parameter Kelp.II	Kondisi	Terpenuhi	Tak terpenuhi
1.	Pintu latex (pintu Irradiasi)	Tertutup	1	0
2.	Isi latex (wadah)	Terisi	1	0
3.	Sumber elektron	siap	1	0
4.	Sumber Tegangan Tinggi	siap	1	0

Tabel 4. Kelompok III yaitu kelompok TRIP terdiri dari parameter.

No.	Parameter Kelp.III	Kondisi	TRIP	Normal
1.	<i>Over Beam Curent</i>	on	1	0
2.	Emergency (<i>darurat</i>)	beroperasi	1	0
3.	Tegangan STT melebihi batas (<i>over voltage</i>)	beropersi	1	0
4.	Panas tinggi (<i>over heating</i>)	beroperasi	1	0
5.	Asap	terpenuhi	1	0
6.	Radiasi tinggi	terpenuhi	1	0

Dari Tabel 2. Kelompok I yaitu kelompok operasi (*permission operation*), kelompok ini dihubungkan secara seri atau seperti gerbang *AND* sehingga apabila memberikan sinyal 1 yang artinya bahwa kelompok I telah siap dan sebaliknya apabila belum siap akan meneluarkan sinyal 0

Khusus untuk *key operation* ditambahkan buzzer yang akan berbunyi selama 5 detik jika kunci operasi ON. Tabel 3. Kelompok II yaitu kelompok Iradiasi (*Irradiation Permission*) perlakuannya sama dengan kelompok I, sedangkan Tabel 4. Kelompok III yaitu kelompok TRIP dihubungkan secara parallel atau seperti gerbang OR, apabila salah satu on maka akan terjadi TRIP yang mengisyaratkan bahwa Sumber Tegangan Tinggi akan turun (*shutdown*) begitu juga Sumber Elektron

KESIMPULAN

1. Perancangan sistim simulasi *interlock* MBE dengan menggunakan kendali PLC dapat beroperasi sesuai dengan yang dikehendaki.
2. Sinyal *Operation Permission* hanya bisa dilakukan apabila *input* kelompok I telah siap semua, apabila salah satu parameter belum siap maka *Operation Permission* tidak mengeluarkan sinyal.
3. Sinyal *Irradiation permission*/pengaktifan sumber elektron dan sumber tegangan tinggi hanya bisa dilakukan apabila input kelompok II telah siap semua.
4. Apabila salah satu parameter TRIP bekerja maka *warning light* dan *buzzer* akan menyala.

5. Jika *Reset* diaktifkan, maka sistim simulasi MBE akan *shutdown*.
6. Sistim interlock dengan PLC tersebut dapat dirubah-rubah sesuai dengan keperluan hanya dengan merubah program untuk penyempurnaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] TAXWIM, SAMINTO, *Simulasi dan Monitoring Sistim Interlock Pada Mesin Berkas Elektron PTAPB BATAN Dengan Mikrokontroler*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Akselerator, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, Nopember 2006.
- [2] SAMINTO, dkk., *Model Simulasi System Interlock Mesin Berkas Elektron PTAPB-BATAN Berbasis Labview*, PPIPDIPN, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, Juli 2006.
- [3] *Kumpulan Makalah Seminar Sehari Perancangan Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA*, PPNY-BATAN, Yogyakarta, 1996.
- [4] TAXWIM, dkk., *Aplikasi Remote Control Infra Merah Untuk Sistim Kendali Aktuator Catu Daya Sumber Elektron Pada MBE 350 keV/10 mA*, Prosiding PPIPDIPN, P3TM-BATAN, Yogyakarta, Juli 2003.
- [5] PUTRA, AGFIANTO EKO, *PLC, Konsep, Pemrograman dan Aplikasi (Omron CPM1A/CPM2A dan ZEN Programmable Relay)*, Yogyakarta, 2004.

TANYA JAWAB

Agus Purwadi

– *Menggunakan PLC, tidak menggunakan mikrokontroler?*

Taxwim

– Karena ini untuk dipasangkan ke mesin langsung maka kami memilih PLC yang sudah standar dengan fasilitas I/O yang cukup, serta mudah digunakan, menggunakan mikrokontroler juga bisa tetapi dikhawatirkan tidak standar dan kami juga akan mencoba membuat dengan mikrokontroler.

OPTIMASI TABUNG PLASMA LUCUTAN DISKRIT UNTUK PRODUKSI OZON MAKSIMUM

Agus Purwadi, Widdi Usada.

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN

ABSTRAK

OPTIMASI TABUNG PLASMA LUCUTAN DISKRIT UNTUK PRODUKSI OZON MAKSIMUM. Telah dibuat tabung plasma lucutan diskrit optimum untuk produksi ozon maksimum. Tabung plasma lucutan diskrit optimum terdiri dari tabung-tabung: katoda, dielektrik dan anoda. Tabung katoda terbuat dari bahan stainless steel (SS) dengan panjang 180 mm, tebal 1 mm dan diameter 25,4 mm. Tabung dielektrik terbuat dari bahan gelas pyrex dengan panjang 220 mm, tebal 1 mm dan diameter 21 mm. Produk ozon maksimum diperoleh dengan metoda pemvariasian jenis bahan dan bentuk geometri dari tabung anodanya. Tabung anoda divariasasi dari jenis bahan: stainless steel (SS), aluminium (Al) dan seng (Zn) sedang variasi dari bentuk geometri dengan cara merubah luas permukaan lucut anoda. Pada hasil percobaan awal ditunjukkan bahwa produk ozon maksimum diperoleh dengan menggunakan anoda SS, selanjutnya anoda SS divariasasi luasan permukaan anodanya (dengan bentuk ulir sejumlah 21, 31, 81 buah dan tanpa ulir). Dari hasil percobaan dihasilkan bahwa laju produk ozon maksimum sebesar $v = 0,1190$ mg/s diperoleh dari tabung plasma lucutan diskrit dengan anoda SS tanpa ulir.

Kata kunci: lucutan diskrit, plasma, ozon.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF THE DISCRETE DISCHARGE PLASMA TUBE TO PRODUCE THE MAXIMUM OZONE. It has been constructed the optimum dielectric discharge plasma tube to produce the maximum ozone. The optimum discrete discharge plasma tube consist of : cathode tube, dielectric tube and anode tube. Cathode tube is made of stainless steel (SS) 180 mm length, 1 mm thick and 25,4 mm diameter. Dielectric tube is made of pyrex glass 220 mm length, 1 mm thick and 21 mm diameter. The maximum ozone product obtained with the method of variation of substance type and the geometry form of anode tube. The anode tube is varied by material type of stainless steel (SS), aluminium (Al) and zinc (Zn) while the variation of geometry form is done by changing of the discharge surface area of anode. On the early experiment result it is shown that the maximum ozone product obtained by using SS anode and then the surface area of the SS anode is varied (with the screw form to the amount of 21, 31, 81 unit and anode without screw). From the experiment result it is shown that the maximum ozone production rate is $v = 0,1190$ mg/s obtained from the discrete discharge plasma tube by using SS anode without screw.

Key words : discrete discharge, plasma, ozone.

PENDAHULUAN

Gas ozon (O_3) merupakan bahan desinfektan yang mampu membunuh mikro organisme patogen seperti bakteri, virus dan jamur. Berbeda dengan bahan desinfektan lainnya, aplikasi ozon tidak meninggalkan residu kimia yang membahayakan tetapi malah menghasilkan oksigen sehingga teknologi ozon sangat ramah lingkungan^[1]. Kerena sifatnya di alam yang tak stabil mengakibatkan ozon tidak dapat dipaketkan untuk dibawa ke suatu tempat, sehingga ozon harus dibuat di tempat yang memerlukan.

Ozon dapat dibuat dengan metode lucutan plasma terhalang dielektrik. Pada plasma lucutan diskrit terdiri dari berbagai filamen arus yang

berlangsung selama dalam selang waktu periode tegangan. Dengan menggunakan gas masukan udara pada tekanan atmosfer telah didemonstrasikan oleh MARODE bahwa arus mengalir dalam jumlah besar dari lucutan-lucutan individu^[2]. Lucutan diskrit ini dalam udara atau oksigen (pada tekanan atmosfer) dibuat dalam jumlah sangat besar dengan cara memperluas permukaan lucut dimana lucutan-lucutan mikro terdistribusi secara acak dengan masing-masing lucutan mikro berlangsung hanya beberapa nano sekon dan bisa mencapai rapat arus 100-1000 A/cm² dalam filamen berbentuk hampir silinder berjejari sekitar 100 mikro meter (μ m).

Pada generator ozon dengan tabung reaktor bentuk silinder, untuk setiap luasan elektroda 1 m² akan diperlukan daya antara 1- 5 kilowatt (kW) atau

0,1-0,5 W/cm² [3]. Oleh karenanya dengan diameter dielektrik atau luasan dielektrik serta jarak celah yang telah tertentu maka dapat dipilih diameter untuk katoda dan anoda yang selanjutnya divariasi jenis bahan dan bentuk geometri permukaannya untuk memperoleh produk ozon maksimum. Jenis bahan anoda akan sangat menentukan besarnya produk ozon mengingat untuk masing-masing jenis bahan akan mempunyai tenaga ikat partikel di permukaannya yang saling berlainan. Demikian pula bentuk geometri anodanya karena luasan permukaan anoda yang efektif akan sangat menentukan jumlah elektron yang untuk mendisosiasi molekul oksigen pada proses pembentukan gas ozon dalam tabung plasma lucutan.

Pada percobaan, agar dapat diperoleh produksi gas ozon maksimum digunakan variasi jenis bahan anoda yang murah dan mudah didapat di pasaran berupa stainless steel (SS), aluminium (Al) dan seng (Zn), sedang bentuk geometri anoda dibuat dengan variasi luasan permukaan anoda efektif yang direalisasi dengan pembuatan anoda bentuk ulir (jumlah ulir divariasi pada permukaan anoda dengan panjang yang sama). dari salah satu bahan anoda optimum) pada tabung plasma lucutan diskritnya.

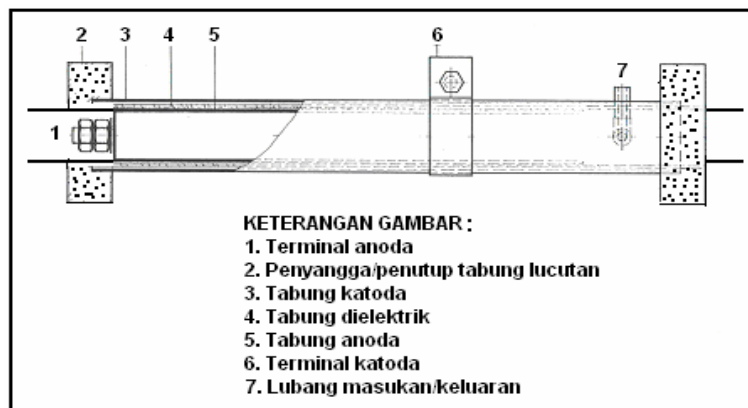
Diharapkan dengan cara memvariasi jenis bahan anoda (pada ukuran volum tabung plasma lucutan yang sama) serta variasi bentuk geometri permukaan anodanya dapat diperoleh konstruksi tabung plasma lucutan diskrit optimum dengan harga laju produk ozon yang maksimum.

TATAKERJA

Generator ozon terdiri dari 2 (dua) komponen penting yakni berupa tabung plasma lucutan diskrit dan komponen pendukung yang berupa sumber

daya tegangan tinggi bolak-balik beserta bahan mekanik lainnya. Tabung plasma lucutan diskrit yang merupakan tempat ozon terbentuk dirancang-bangun dengan bentuk silinder yang tersusun dari tabung-tabung katoda, dielektrik dan anoda dalam satu sumbu aksial. Ilustrasi tabung lucutan penghasil gas ozon tersebut adalah ditunjukkan pada Gambar 1, sedang masing-masing spesifikasinya (jenis material dan geometri ukuran) ditunjukkan pada Tabel 1.

Pada Gambar 1 ditunjukkan bahwa terminal anoda (1) yakni tempat untuk memasok tegangan tinggi kutub positif diletakkan pada salah satu ujung tabung anoda. Untuk penyangga sekaligus berfungsi sebagai penutup tabung (2) pada kedua ujung-ujungnya dibuat alur lingkaran dengan diameter sama dengan diameter tabung katoda. Pada tabung katoda (3) disamping ada terminal katoda juga dilengkapi dengan dua buah lubang masukan dan keluaran yakni tempat untuk masuknya udara dan atau keluarnya ozon. Tabung dielektrik (4) terbuat dari bahan gelas pyrex bentuk silinder. Tabung anoda (5) terbuat dari 3 macam jenis bahan : stainless steel (SS), aluminium (Al) dan seng (Zn). Tabung anoda dilengkapi dengan terminal anoda yakni tempat untuk memasok tegangan tinggi kutub positif. Terminal katoda (6) yakni tempat untuk kutub listrik negatif adalah berupa klem logam yang dililitkan pada badan tabung katoda. Ruang antara tabung dielektrik dengan tabung katoda dinamakan celah lucutan dengan jarak radial sebesar 1,60 mm yakni sebagai tempat aliran gas udara atau oksigen dari lubang masukan (dilucut dengan tegangan tinggi bolak-balik 25 kV) yang selanjutnya menjadi gas ozon keluar melalui lubang keluaran tabung lucutan (7). Lubang masukan/keluaran adalah sebagai tempat masuknya udara dan keluarnya gas ozon yang diproduksi dalam tabung lucutan.



Gambar 1. Ilustrasi tabung plasma lucutan diskrit penghasil gas ozon.

Tabel 1. Spesifikasi komponen tabung plasma lucutan diskrit.

No	Komponen	Material	Panjang (mm)	Diameter luar (mm)	Tebal (mm)
1	Terminal anoda	SS	5	5	-
2	Penyangga/penutup	Nylon	10	4,50	1,00
3	Tabung katoda	SS	180	25,40	1,10
4	Tabung dielektrik	Gelas lunak	220	18,10	1,60
5	Tabung anoda	SS/Al/Zn	160	14,50	1,00
6	Terminal katoda	SS	5	27,50	1,00
7	Lubang masukan/keluaran	Plastik	15	2	0,50

Laju produk ozon yang sebanding dengan konsentrasi ozon dapat ditentukan menggunakan bantuan larutan standar yodida (I_2), kalium yodida (KI) dan sinar UV pada panjang gelombang $\lambda = 345$ nm. Lama waktu paparan sinar UV terhadap larutan standar I_2 divariasikan sedemikian sehingga diperoleh persamaan garis linear standar hubungan antara konsentrasi dan absorbansi^[4]. Karena dalam persamaan reaksi kimia: pembebasan molekul I_2 dari larutan KI akibat adanya molekul O_3 adalah mempunyai angka valensi yang sama maka jumlah 1 mol I_2 adalah identik dengan 1 mol O_3 sehingga untuk menentukan berat ozon yang diproduksi selama waktu tertentu tersebut adalah merupakan perkalian konsentrasi I_2 dengan berat molekul ozon (48 mg/mol). Akhirnya dari masing-masing laju produk ozon (mg/det) yang diperoleh atas dasar lama paparan yang saling berbeda dapat diperoleh harga laju produk ozon rerata.

Setelah dari ketiga jenis bahan anoda SS, Al dan Zn diketahui masing-masing besar harga laju produk ozonnya (mg/det) selanjutnya dipilih salah satu jenis bahan anoda (mempunyai laju produk ozon terbesar) untuk divariasikan bentuk geometri permukaan lucutannya untuk perolehan laju produk ozon yang tertinggi. Variasi bentuk geometri permukaan lucutan dapat direalisasi dengan pembuatan jumlah ulir yang berbeda-beda (21 ulir, 31 ulir, 81 ulir dan tanpa ulir) pada permukaan anoda dengan ukuran panjang anoda (silinder) yang sama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dibuat tabung plasma lucutan diskrit dengan menggunakan 3 (tiga) buah macam bahan (material) anoda yang terdiri dari stainless steel (SS), aluminium (Al) dan seng (Zn). Hasil pembuatan tabung lucutan plasma beserta komponen-komponennya adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2 ditunjukkan bahwa pada bagian A adalah tabung lucut plasma beserta komponen pendukungnya yang diantaranya komponen pendukung anoda (no.4) menggunakan bahan SS bentuk silinder dengan permukaan lucut halus (tanpa ulir), pada bagian B ditunjukkan komponen anoda dari bahan Al sedang pada bagian C komponen anoda digunakan bahan Zn. Masing-masing anoda dari berbagai jenis bahan pada bagian A, B dan C tersebut dirangkai dijadikan satu unit tabung lucut plasma (bagian D) sebagai penghasil gas ozon yang telah siap untuk dilucut dengan tegangan tinggi 25 kV.

Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon (absorbansi, konsentrasi, berat dan laju produk) dengan metoda absorbansi dari masing-masing tabung plasma lucutan diskrit menggunakan anoda SS, Al dan Zn atas dasar lama paparan sinar ultraviolet (UV) berpanjang gelombang $\lambda = 345$ nm terhadap larutan standar I_2 adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4.

Hasil pengukuran dan perhitungan telah ditunjukkan bahwa dari ketiga jenis bahan anoda SS, Al dan Zn diperoleh laju produk ozon maksimum sebesar $v = 0,119$ mg/det dari anoda SS^[5].



Gambar 2. Tabung lucutan plasma diskrit dengan anoda dari bahan SS, Al dan Zn.

Tabel 2. Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon dari tabung plasma lucutan diskrit menggunakan anoda SS (larutan standar I_2 disinari UV dengan $\lambda = 345$ nm).

No	Paparan (detik)	Absorbansi	Konsentrasi (mmol)	Berat O_3 (mg)	Laju Produk O_3 (mg/s)
1	2,95	0,150	0,0075	0,3595	0,1219
2	2,53	0,130	0,0060	0,2870	0,1134
3	2,78	0,145	0,0071	0,3417	0,1229

Tabel 3. Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon dari tabung plasma lucutan diskrit menggunakan anoda Al (larutan standar I_2 disinari UV dengan $\lambda = 345$ nm).

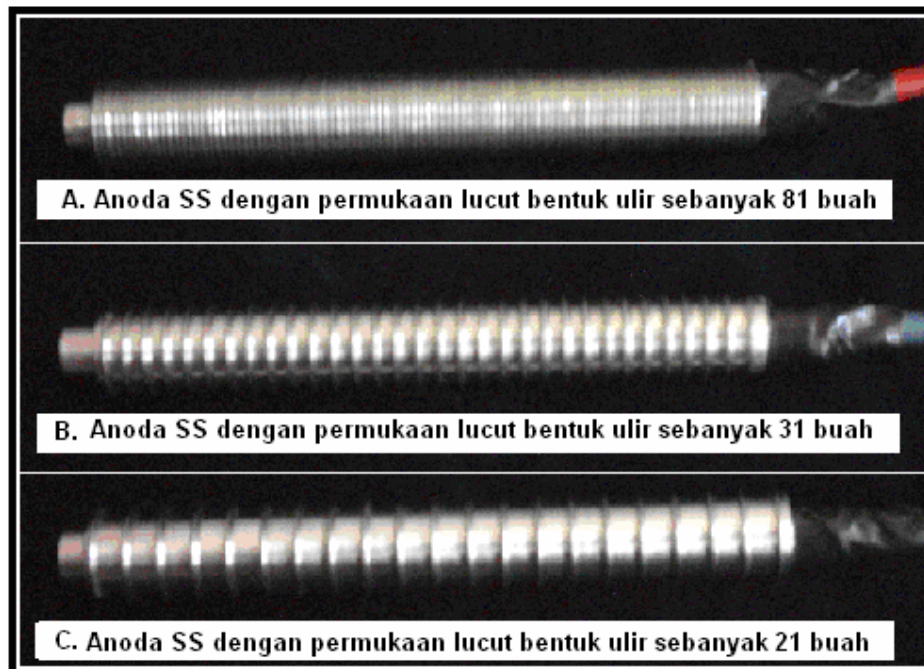
No	Paparan (detik)	Absorbansi	Konsentrasi (mmol)	Berat O_3 (mg)	Laju Produk O_3 (mg/s)
1	3,75	0,165	0,0086	0,4147	0,1106
2	2,75	0,110	0,0045	0,2141	0,0778
3	2,93	0,105	0,0041	0,1958	0,0668

Tabel 4. Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon dari tabung plasma lucutan diskrit menggunakan anoda Zn (larutan standar I₂ disinari UV dengan $\lambda = 345$ nm).

No	Paparan (detik)	Absorbansi	Konsentrasi (mmol)	Berat O ₃ (mg)	Laju Produk O ₃ (mg/s)
1	5,31	0,112	0,0046	0,2217	0,0418
2	5,99	0,104	0,0040	0,1924	0,0321
3	4,97	0,075	0,0018	0,0868	0,0175

Pada Gambar 3 bagian A, B dan C ditunjukkan hasil pembuatan anoda bahan SS dengan berbagai permukaan lucut bentuk ulir yang berbeda mewakili pemvariasian bentuk geometri dari besaran luasan permukaan anoda SS. Pada bagian A adalah anoda SS dengan permukaan lucut bentuk ulir sejumlah 81 buah, bagian B adalah anoda SS dengan permukaan lucut bentuk ulir sejumlah 31 buah dan bagian C adalah anoda SS dengan permukaan lucut bentuk ulir sejumlah 21 buah, sedang anoda SS dengan permukaan lucut tanpa ulir (halus) adalah seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 2 bagian A di atas.

Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon (absorbansi, konsentrasi, berat dan laju produk) dengan metoda absorbansi dari masing-masing tabung plasma lucutan diskrit anoda SS untuk berbagai permukaan lucut bentuk ulir (sejumlah 81, 31 dan 21 buah) masing-masing adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 5, Tabel 6 dan Tabel 7. Sedang hasil pengukuran dan perhitungan dari tabung plasma lucutan diskrit anoda SS dengan tanpa ulir adalah seperti telah ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 3. Anoda SS dengan berbagai permukaan lucut bentuk ulir yang berbeda.

Tabel 5. Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon dari tabung plasma lucutan diskrit anoda SS dengan permukaan lucut bentuk ulir sejumlah 81 buah. (larutan standar I_2 disinari UV dengan $\lambda = 345$ nm).

No	Paparan (detik)	Absorbansi	Konsentrasi (mmol)	Berat O_3 (mg)	Laju Produk O_3 (mg/s)
1	9,44	0,220	0,0128	0,6114	0,0651
2	9,35	0,270	0,0166	0,7968	0,0852
3	9,38	0,250	0,0157	0,7248	0,0773

Tabel 6. Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon dari tabung plasma lucutan diskrit anoda SS dengan permukaan lucut bentuk ulir sejumlah 31 buah. (larutan standar I_2 disinari UV dengan $\lambda = 345$ nm).

No	Paparan (detik)	Absorbansi	Konsentrasi (mmol)	Berat O_3 (mg)	Laju Produk O_3 (mg/s)
1	30,51	0,110	0,0045	0,2160	0,0071
2	30,19	0,140	0,0067	0,3216	0,0106
3	30,15	0,134	0,0063	0,3024	0,0099

Tabel 7. Hasil pengukuran dan perhitungan besaran fisis ozon dari tabung plasma lucutan diskrit anoda SS dengan permukaan lucut bentuk ulir sejumlah 21 buah. (larutan standar I_2 disinari UV dengan $\lambda = 345$ nm).

No	Paparan (detik)	Absorbansi	Konsentrasi (mmol)	Berat O_3 (mg)	Laju Produk O_3 (mg/s)
1	90,57	0,040	0,0008	0,0384	0,0004
2	90,25	0,035	0,0012	0,0576	0,0006
3	90,10	0,034	0,0013	0,0624	0,0007

Dari Tabel 5, Tabel 6 dan Tabel 7 dapat ditunjukkan bahwa besar masing-masing laju produk ozon rerata dari tabung plasma lucutan diskrit untuk anoda SS dengan ulir sejumlah 81 buah adalah sebesar $v = 0,0758$ mg/det, untuk anoda SS dengan ulir sejumlah 31 buah adalah sebesar $v = 0,0092$ mg/det dan untuk anoda SS dengan ulir sejumlah 21 buah adalah sebesar $v = 0,0006$ mg/det. Sedang untuk anoda SS yang tanpa ulir seperti ditunjukkan pada Tabel 2, besar laju produk ozon reratanya adalah sebesar $v = 0,1190$ mg/det.

Ternyata laju produk ozon maksimum adalah terjadi pada tabung plasma lucutan diskrit anoda SS dengan tanpa ulir yakni sebesar $v = 0,1190$ mg/det. Disini juga ditunjukkan bahwa pada anoda yang semakin banyak jumlah ulir (semakin besar luasan

permukaan lucut anoda), maka akan makin bertambah pula laju produk ozonnya. Hal ini bisa terjadi karena luas bidang lucutan anoda yang lebih besar (jumlah ulir pada anoda banyak) maka jumlah dan penyebaran lucutan mikro (diskrit) pada tabung tersebut akan lebih besar pula sehingga efisiensi proses terjadinya rekombinasi atom oksigen menjadi molekul ozon akan lebih besar dan laju produksi ozon pada ozonizer menjadi bertambah.

KESIMPULAN

Dari hasil percobaan optimasi tabung plasma lucutan diskrit untuk produksi ozon maksimum dapat disimpulkan bahwa penggunaan anoda SS

adalah yang paling baik bila dibandingkan dengan penggunaan bahan anoda Al dan Zn. Menggunakan anoda SS pada berbagai jumlah ulir ditunjukkan bahwa laju produk ozon maksimum terjadi pada tabung plasma lucutan diskrit anoda SS dengan tanpa ulir (permukaan lucut halus) yakni sebesar $v = 0,1190$ mg/s.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penelitian ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada rekan-rekan di kelompok TAFN dan Bengkel Gelas & Mekanik PTAPB-BATAN, khususnya kepada Drs. Suryadi, SU. dan Ir. Isyuniarto atas diskusi ilmiahnya serta Ir. Setyo Atmodjo, Mintolo A.Md., Isak Ansori, A. Zaenuri dan Djoko Purwanto yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan teknis pembuatan dan eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *A Service From The Canadian Center For Occupational Health & Safety (CCOHS)*, Basis Information on Ozone, February 19, 1999.
- [2] E. MARODE, *The Mechanism of the Spark Breakdown in Air at Atmospheric Pressure Between A Positive and A Plane*, Journal Applied Physics, 46(1975) ; pg 2005-2020.
- [3] ULRICH KOGELSCHATZ, *Industrial Ozone Production*, International Ozone Symposium, Basel, Switzerland, October 21-22, 1999, 200th Anniversary of Christian Frieddrich Schonbein, The Discoverer of Ozone.
- [4] AGUS PURWADI, WIDDI USADA, *Modified Ozone (O₃) Reactor Tube and Determination of O₃ Product By Absorbition Method*, Submitted 23 Januari 2007 untuk dapat diterbitkan pada Jurnal of Chemistry FMIPA-UGM 2007, Sekip, Yogyakarta.

- [5] AGUS PURWADI, *Pemilihan Jenis Bahan Anoda Tabung Lucutan Plasma Untuk Peningkatan Produk Ozon*, KTI Hasil Litbang Dipresentasikan pada Forum Pertemuan Ilmiah Litbang “Teknologi Akselerator dan Proses Bahan”, Yogyakarta, 11 Sept. 2007.

TANYA JAWAB

Taxwim

- *Batas ambang konsentrasi ozon di udara yang aman untuk kesehatan?*

Agus Purwadi

- *Batas ambang konsentrasi ozon di udara (yang aman) adalah 100 ppm asal tidak terhirup lebih dari 60 menit (untuk 10 ppm tidak lebih dari 600 menit).*

Saminto

- *Kenapa tabung reaktor ozon yang dibuat sering mengalami kerusakan/kebakar pada bagian isolator? Mohon dijelaskan.*

Agus Purwadi

- *Ya, karena pada bagian tutup tabung lucut (isolator/teflon) saat itu masih dapat dilewati lucutan arus dari anoda-katoda (tegangan ± 25 kV) yang seharusnya lucutan arus tersebut menembus penghalang/dielektrik (gelas pyrex). Problem ini telah dapat diatasi dengan konstruksi tabung dielektrik yang dibuat jauh lebih panjang dari pada tabung katoda dan anodanya (isolator teflon menjadi awet/tidak mudah rusak).*

STUDI KARAKTERISTIK LISTRIK PEMBANGKIT PLASMA PADA MESIN BERKAS ELEKTRON PULSA

Widdi Usada, Suryadi, Aminus Salam, Agus Purwadi
PTAPB - BATAN

ABSTRAK

STUDI KARAKTERISTIK LISTRIK PEMBANGKIT PLASMA PADA MESIN BERKAS ELEKTRON PULSA. Mesin berkas elektron pulsa pada umumnya mempunyai arus yang besar, maka tidaklah mungkin menyediakan sumber elektron berarus besar dengan teknologi termoelektrik. Untuk itu digunakan plasma sebagai sumber elektron. Plasma dengan kerapatan besar dapat diperoleh dengan melucutkan kapasitor bank seperti yang dipelajari dalam makalah ini.

Kata kunci : plasma, mesin berkas elektron pulsa

ABSTRACT

ELECTRICAL CHARACTERISTIC STUDY OF PLASMA GENERATOR FOR PULSE ELECTRON BEAM MACHINE. In general, pulse electron beam machine has a very high current, so it is not possible to provide high current electron beam by thermoelectric technology. For this purpose, plasma should be generated as electron source. High density plasma can be achieved by discharging capacitor bank as being studied in this paper.

Key words : plasma, pulse electron beam machine

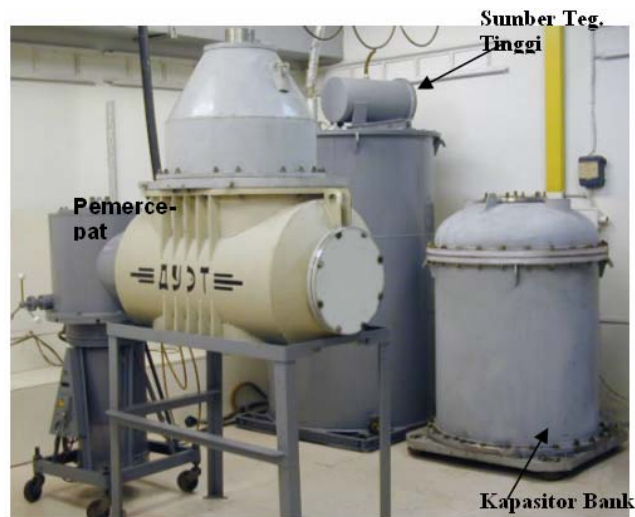
PENDAHULUAN

Peranan Mesin Berkas Elektron (MBE) di berbagai bidang seperti industri, kesehatan dan lingkungan, serta pangan tidak dapat diragukan lagi. Sebagai contoh untuk industri kayu, ban otomotif, perlakuan MBE dipermukaan bahan industri tersebut memperkuat ketahanan permukaan kayu dan ban, serta mempercantik permukaan tersebut. Di bidang kesehatan dan pangan, dengan MBE maka berbagai jenis produk makanan dan minuman dapat diperpanjang umur simpannya. Limbah cair dari rumah sakit maupun industri, dengan MBE ini, nilai BOD dan COD dapat direduksi sedemikian rupa sehingga limbah yang sudah mengalami perlakuan, layak untuk dibuang di badan sungai. Kandungan SO_x dan NO_x hasil gas buang industri PLTB (*Pusat Listrik Tenaga Batu Bara*) dapat ditekan dengan memanfaatkan MBE sehingga pencemaran udara disekitar PLTB tersebut terhindarkan. Meskipun mempunyai peranan yang sangat besar dengan jangkauan yang luas, pemakaian MBE terkendala dengan modalitas awal, sebagai contoh untuk industri PLTB, maka sekitar 10 % modal diperuntukan untuk menyediakan fasilitas piranti tersebut. Kendala lain adalah kerumitan sistem MBE yang terdiri dari modul sumber elektron, modul pemokus berkas elektron, modul pemercepat, modul pemayar dan modul vakum. Khususnya modul sumber elektron, sampai sejauh ini hanya teknologi termolistrik yang digunakan dalam MBE, sehingga membatasi besarnya arus elektron.

Untuk mengatasi masalah di atas khususnya untuk memperkecil biaya modalitas dan ukuran besarnya, maka usaha yang dilakukan adalah bagaimana memperoleh arus elektron cukup besar, yang langsung dapat dipercepat tanpa melalui tabung pemercepat maupun sistem pengendali berkas elektron. Tentu saja dengan pengurangan ukuran tabung pemercepat, maka tegangan atau energi luaran berkas elektron luaran juga kecil (dalam orde puluhan sampai sekitar 200 keV) sehingga kemampuan mesin tersebut terbatas. Keterbatasan piranti ini adalah bahwa mode operasinya tidak lagi kontinyu, namun dalam bentuk pulsa-pulsa, oleh karena itu piranti tersebut dapat disebut pula sebagai mesin berkas elektron pulsa.

Dengan teknologi di atas, perusahaan Nagata Seiki Cop., Ltd, yang salah satu usahanya dalam industri lateks,^[1] menggunakan piranti tersebut untuk perlakuan karet. Penggunaan pulsa-pulsa listrik saat ini banyak digunakan untuk memper-lama umur simpan beras dan produk makanan.^[2-4] Gambar 1. memperlihatkan piranti tersebut. Dari Gambar 1, maka mesin berkas elektron pulsa tersebut dapat diperinci menjadi beberapa modul, yaitu modul sumber daya penghasil plasma, modul sumber daya pemercepat, modul tabung plasma, dan modul sistem vakum. Modul tabung plasma terinci menjadi dua bagian yaitu ruang pembentuk plasma, dan sistem penyaring elektron atau grid.

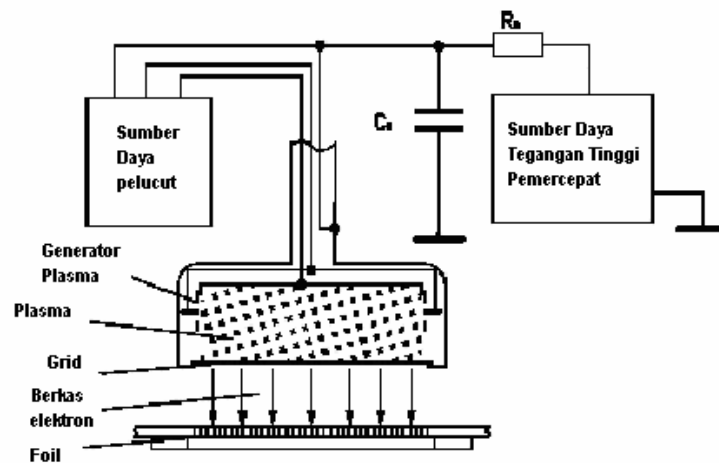
Parameter alat tersebut ditunjukkan pada Tabel 1. Gambar 2. memperlihatkan skema piranti mesin berkas elektron pulsa.



Gambar 1. Mesin berkas elektron pulsa yang di perusahaan Nagata Seiki Co., Ltd.

Tabel 1. Parameter Mesin Berkas Elektron Pulsa.

No.	Parameter	Nilai
1.	Tenaga Elektron dipercepat	100 – 200 keV
2.	Arus berkas	di atas 100 A
3.	Panjang pulsa	40 μ detik
4.	Frekuensi ulangan pulsa	0.1 – 50 Hz
5.	Luasan iradiasi berkas	150 x 650 mm ²
6.	Konsumsi daya	Maks 10 kW
7.	Parameter independen	Tegangan pemercepat, arus berkas, panjang pulsa, dan frekuensi
8.	Pemeliharaan	Bebas pemeliharaan sumber berkas karena tanpa filamen
9.	Keuntungan	Kemungkinan luasan iradiasi diperluas



Gambar 2. Skema mesin berkas elektron pulsa.

Modul sumber daya pelucut terdiri dari kapasitor bank C_B yang terlebih dahulu diberi muatan oleh sumber tegangan tinggi. Aliran muatan ke tabung plasma dikendalikan oleh sistem saklar terkendali. Bila tegangan cukup memadai untuk melucutkan tabung plasma, maka plasma akan dibentuk dalam tabung plasma setelah saklar menutup sehingga terjadi aliran muatan dari kapasitor C_B . Kemudian tegangan tinggi pemercepat dengan kutub positif akan mempercepat elektron dan sekaligus menolak partikel plasma bermuatan positif.

Untuk tahun 2008, di PTAPB-BATAN diharapkan dapat dibuat sistem sumber elektron pulsa sebagai salah satu pemercepat energi rendah berarus besar, dan kelompok teknologi plasma ditugaskan untuk mewujudkan program tersebut di atas. Menyongsong program tersebut, dalam makalah ini akan dipelajari karakteristik rangkaian ekuivalen sistem sumber plasma sebelum mengalami percepatan.

RANGKAIAN EKIVALEN PLASMA SUMBER ELEKTRON

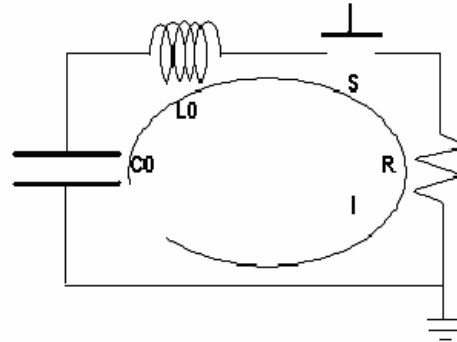
Dari prinsip kerja piranti mesin berkas elektron pulsa seperti ditunjukkan di Gambar 1 dan 2, maka dapat disusun rangkaian ekuivalen sistem pelucutan plasmanya seperti pada Gambar 3.

Bila saklar S ditutup, maka muatan di kapasitor C_0 akan mengalir ke tabung plasma yang diwakili beban R. Persamaan perpindahan muatan adalah sebagai berikut^[5]

$$V_0 = L_0 \frac{dI}{dt} + IR + \int Idt \tag{1}$$

dengan periode osilasi T , impedansi Z serta besarnya arus maksimum I_{maks} memenuhi persamaan berikut ini,

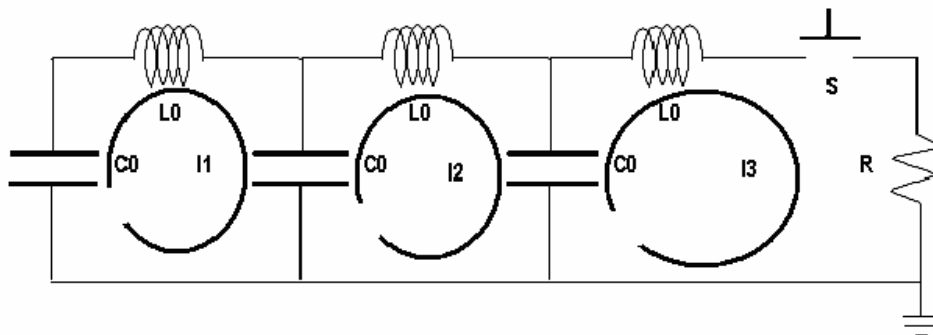
$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{L_0 C_0} \\ Z &= \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \\ I_{maks} &= \frac{V_0}{Z} \end{aligned} \tag{2}$$



Gambar 3. Rangkaian ekuivalen lucutan plasma.

RANGKAIAN EKIVALEN PLASMA SUMBER ELEKTRON DENGAN 3 KAPASITOR

Pada umumnya untuk memperpanjang umur peluruhan lucutan untuk setiap lucutan maka rangkaian RLC tidak hanya memuat 1 kapasitor bank C_0 saja tetapi beberapa kapasitor yang dirangkai secara paralel seperti ditunjukkan Gambar 4. Gambar 4 memperlihatkan rangkaian ekuivalen lucutan plasma dengan tiga buah kapasitor yang dipasang paralel.



Gambar 4. Rangkaian lucutan dengan 3 kapasitor dipasang secara paralel.

Dengan cara yang sama, dapat disusun persamaan di masing-masing untai (*loop*) sebagai berikut

Untai 1

$$V_0 - L_0 \frac{dI_1}{dt} - \frac{\int I_1 dt}{C_0} + V_0 - \frac{\int I_1 dt}{C_0} + \frac{\int I_2 dt}{C_0} = 0 \quad (3)$$

Untai 2

$$V_0 - L_0 \frac{dI_2}{dt} - \frac{\int I_2 dt}{C_0} + V_0 - \frac{\int I_2 dt}{C_0} + \frac{\int I_3 dt}{C_0} + \frac{\int I_1 dt}{C_0} = 0 \quad (4)$$

Untai 3

$$V_0 - L_0 \frac{dI_3}{dt} - \frac{\int I_3 dt}{C_0} - I_3 R + \frac{\int I_2 dt}{C_0} = 0 \quad (5)$$

PENYELESAIAN

Untuk mengetahui karakteristik rangkaian tersebut di atas maka perlu menyelesaikan persamaan (3) sampai dengan (5). Salah satu metode penyelesaian adalah secara komputasi. Untuk keperluan komputasi, persamaan (3), (4) dan (5) disederhanakan dalam bentuk persamaan ternormalisasi, dengan faktor normalisasinya adalah

$$i_{1,2,3} = \frac{I_{1,2,3}}{I_0}, I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{t}{t_0}, t_0 = \sqrt{L_0 C_0}, \alpha = \frac{R}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}}$$

dengan faktor-faktor tersebut di atas persamaan (3), (4) dan (5) berubah menjadi

$$2 - \frac{di_1}{d\tau} - 2 \int i_1 d\tau + \int i_2 d\tau = 0 \quad (7)$$

$$2 - \frac{di_2}{d\tau} - 2 \int i_2 d\tau + \int i_3 d\tau + \int i_1 d\tau = 0 \quad (8)$$

$$1 - \frac{di_3}{d\tau} - \int i_3 d\tau - \alpha i_3 + \int i_2 d\tau = 0 \quad (9)$$

Persamaan rangkaian ekuivalen plasma sumber elektron dengan 3 kapasitor ternormalisasi yang diwakili oleh persamaan (7), (8), dan (9) dapat diselesaikan dengan menggunakan banyak perangkat lunak salah satunya digunakan perangkat lunak WATFOR77.

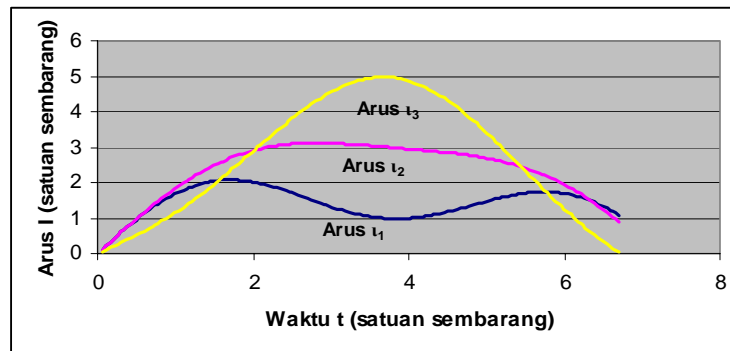
Syarat batas untuk $\tau = 0$ adalah

$$i_{1,2,3} = 0, \frac{di_1}{d\tau} = \frac{di_2}{d\tau} = 2, \frac{di_3}{d\tau} = 1 \quad (10)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagai variabel bebas adalah waktu ternormalisasi τ dan variabel terikatnya adalah arus ternormalisasi $i_{1,2,3}$, indeks 1,2,3 mewakili untainya. Program dijalankan dengan variasi α yang mewakili hambatan plasma ternormalisasi.

Gambar 5 menunjukkan arus di masing-masing untai dengan hambatan $\alpha = 0$. Tampak bahwa arus i_3 paling besar di antara i_2 dan i_1 namun mempunyai lebar pulsa yang lebih besar ($3.5 \tau_0$) dibanding dengan lebar pulsa arus di untai 1 ($2 \tau_0$ untuk untai1) tetapi lebih kecil dibanding untai 2 ($4.5 \tau_0$ untuk untai 2). Disini tampak bahwa efek penambahan kapasitor secara paralel adalah memperpanjang lebar pulsa arus.



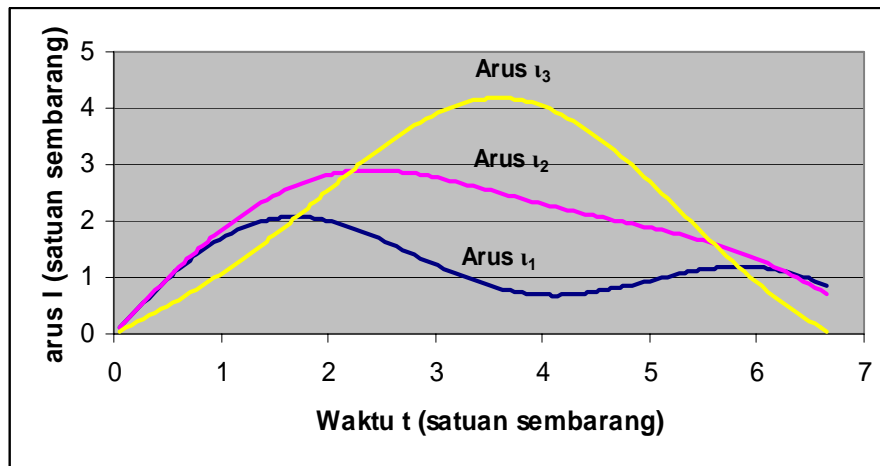
Gambar 5. Karakteristik arus i_3 , i_2 dan i_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 0$.

Gambar 6 menunjukkan karakteristik arus di masing-masing untai dengan $\alpha = 0.2$. Dengan adanya hambatan kecil arus di untai 3 t_3 memang masih cukup besar dibanding kedua untai lainnya namun sudah mengalami penurunan, dan lebar pulsanya sedikit membesar dibanding bila tanpa beban.

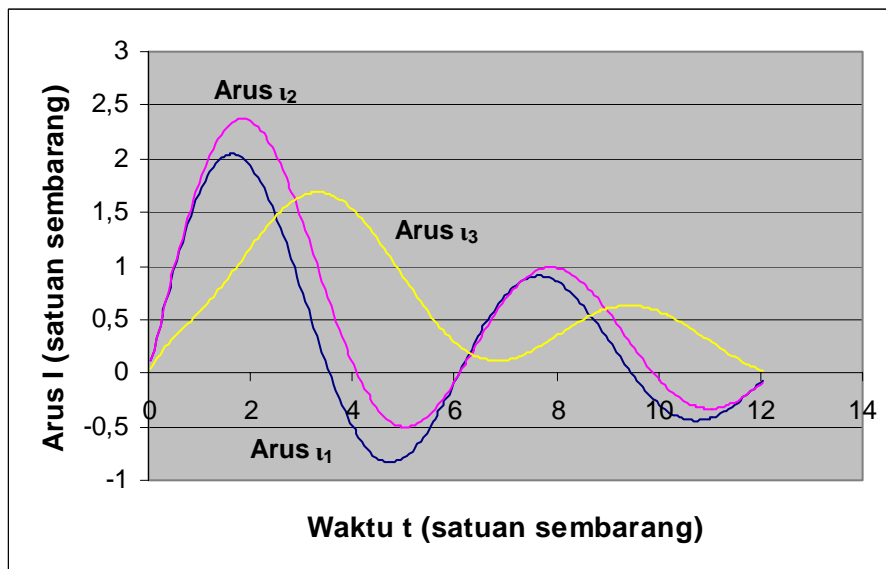
Gambar 7 menunjukkan arus di masing-masing untai dengan hambatan $\alpha = 2$. Tampak

bahwa arus t_3 paling kecil di antara t_2 dan t_1 namun mempunyai lebar pulsa yang lebih besar ($3.6 \tau_0$) dibanding dengan lebar pulsa arus di untai lainnya ($2.3 \tau_0$ untuk untai 1 dan $2.6 \tau_0$ untuk untai 2).

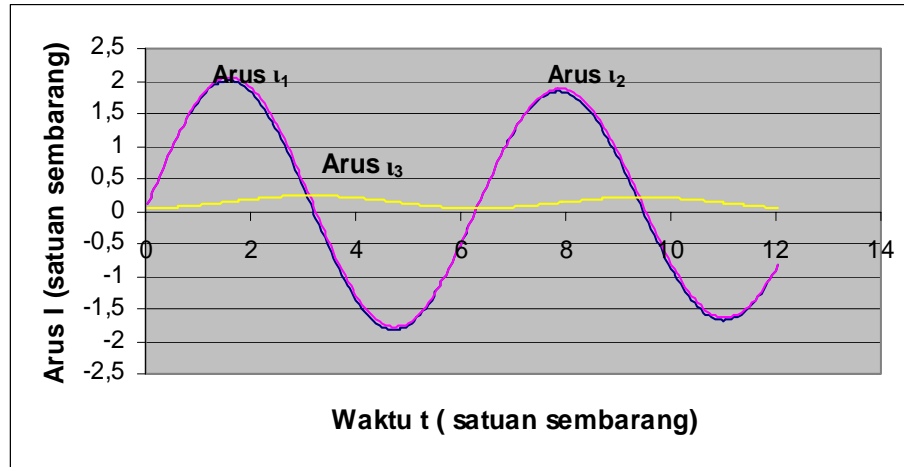
Untuk $\alpha = 20$ karakteristik arus di masing-masing untai diperlihatkan Gambar 8. Tampak bahwa arus di untai 1 dan 2 beresilasi biasa tanpa terasa ada beban, sedangkan di untai 3, arus t_3 nilainya sangat kecil namun pulsanya lebar.



Gambar 6. Karakteristik arus t_3 , t_2 dan t_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 0.2$.



Gambar 7. Karakteristik arus t_3 , t_2 dan t_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 2$.



Gambar 8. Karakteristik arus i_3 , i_2 dan i_1 sebagai fungsi waktu τ untuk $\alpha = 20$.

Dari data tertampil pada gambar-gambar di atas maka bila bebannya makin besar, tampak bahwa lebar pulsa untai ke tiga juga melebar, namun arusnya semakin mengecil. Demikian pula untuk beban yang semakin besar maka laju kenaikan arus di untai ke tiga juga semakin lambat.

Untuk lebih mudah dalam menggambarkan karakteristik listrik dari rangkaian ekuivalen tersebut maka ingin diketahui berapa besar waktu dan arus serta tegangan senyatanya dalam suatu eksperimen, untuk itu disini akan diberikan contohnya. Bila $C_0 = 9 \mu\text{F}$ dan $L_0 = 9 \mu\text{H}$ dan tegangan $V_0 = 5 \text{ kV}$, maka selanjutnya dapat dihitung besarnya lebar pulsa, arus, dari rangkaian yang telah dirancang, yaitu sebagai berikut :

$$t_0 = \sqrt{L_0 C_0} = \sqrt{9 \times 9} = 9 \mu\text{detik}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 1 \Omega$$

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_0} = 5 \text{ kA}$$

KESIMPULAN

Dengan teknologi plasma maka dapat diperoleh mesin berkas elektron pulsa yang

mempunyai arus besar. Karakteristik listrik plasma yang dibangkitkan oleh lucutan kapasitor dianalisis dengan rangkaian ekuivalennya. Jadi analisis rangkaian ekuivalen ini dapat dimanfaatkan dalam merancang lucutan plasma pada mesin berkas elektron pulsa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PURWADI, R., *Application of Plasma-Cathode Electron Beam for Large Area Treatment of Natural Rubber*, Nagata Seiki, Co, October 2006.
- [2] ELLIN DOYLE, M., *Use of Pulsed Electric Fields and Electrolyzed Oxidizing Water to Control Listeria*, Food Research Institute, UW-Madison, October 1999.
- [3] IRENE E. POL, ET AL, *Pulsed-Electric Field Treatment Enhances the Bactericidal Action of Nisin Against Bacillus Cereus*, APPLIED AND ENVIRONMENTAL, vol 66, no. 1, Jan. 2000.
- [4] DADANG SUHENDAR ET AL., *Security System of Stable Food Supply in Japanese Agriculture*, PROCEEDINGS OF THE 9TH SCIENTIFIC MEETING, TEMU ILMIAH TI-IX PPI 2000, ISSN 0918-7685.
- [5] LEE, S., *Pulsed Electronic Modular Devices*, ASPEN-UNESCO, ISBN 967-99993, 1986.

LAMPIRAN

WATFOR-77 V1.4 (c) 1986 - WATCOM Systems Inc. 07/09/19 11:57:35

Options: xtype,list,extensions,warnings,terminal,check

```

C      PROGRAM LUCUTAN KAPASITOR DENGAN MATRIKS
C      N JUMLAH UNTAI RANGKAIAN R,L,C
C      UNTAI 1 SAMPAI N-1 TERDIRI RANGKAIAN CLC
C      SEDANGKAN UNTAI N TERDIRI RANGKAIAN R,L,C
C      R ADALAH TAHANAN BEBAN
1      DIMENSION ARUS(10),RI(10),V(10),Q(10)
2      NWR1=1
3      OPEN(UNIT=NWR1,FILE='D:C300.PRN')
4      N=3
5      T=0
6 5    DO 100 N=1,3
7      ARUS(N)=0
8      Q(N)=0
9      IF (N.EQ.3) GOTO 40
10     RI(N)=2
11 40   RI(4)=1
12     WRITE(*,20) N,ARUS(N),RI(N)
13 20   FORMAT(3X,I5,3X,F5.3,3X,F5.3)
14 100  CONTINUE
15     RES=0.0
16     DT=0.005
17 50   DO 60 K=0,10
18     T=T+DT
19 70   DO 80 N=1,3
20     ARUS(N)=ARUS(N)+RI(N)*DT
21     Q(N)=Q(N)+ARUS(N)*DT+0.5*RI(N)*DT*DT
22     IF (N.EQ.1) GOTO 95
23     IF (N.EQ.3) GOTO 90
24     RI(N)=2-2*Q(N)+Q(N+1)+Q(N-1)
25 90   RI(3)=1-RES*ARUS(3)-Q(3)+Q(2)
26 95   RI(1)=2-2*Q(1)+Q(2)
27 80   CONTINUE
28 60   CONTINUE
29     WRITE(*,110)T,ARUS(1),ARUS(2),ARUS(3),ARUS(4)
30     WRITE(NWR1,110)T,ARUS(1),ARUS(2),ARUS(3),ARUS(4)
31 110  FORMAT(3X,F8.3,3X,F8.3,3X,F8.3,3X,F8.3,3X,F8.3)
32     IF (T.GT.12) GOTO 120
33     GOTO 50
34 120  CLOSE(NWR1)
35     STOP
36     END

```

```

Compile time:          00.00  Execution time:          01.37
Size of object code:   988    Number of extensions:    0
Size of local data area(s): 297  Number of warnings:      0
Size of global data area: 160  Number of errors:        0
Object/Dynamic bytes  free:359819/44253  Statements Executed:
46891

```

TANYA JAWAB

Utaya

- Kalau 5 kV saya kira terlalu rendah untuk dianggap sebagai akselerator.
- Bagaimana membuang panas yang timbul?

Widdi Usada

- Memang benar 5 kV bukan sebagai tegangan pemercepat. Tegangan 5 kV disini untuk membangkitkan plasma pulsa, jadi bukan tegangan pemercepatnya.
- Saya belum tahu cara membuang panasnya. Perlu kami sampaikan bahwa memang daya besar namun energi per pulsanya tidak terlalu besar karena lebar pulsa dalam MBE ini dalam orde mikrodetik

Tri Marji Atmono

- Apa kelebihan MBE pulsa dibandingkan MBE kontinyu, apakah juga bisa diaplikasikan untuk iradiasi lateks dan menetralsir SO_x dan NO_x .
- Apakah ada semacam inovasi membuat atau menjadikan MBE pulsa menjadi kontinyu.

Widdi Usada

- Kelebihan MBE pulsa dibandingkan MBE kontinyu adalah arus yang dihasilkan jauh lebih besar daripada MBE kontinyu, bandingkan untuk MBE kontinyu kisaran dalam orde puluhan mA sedangkan untuk MBE pulsa dapat dalam orde ratusan A. Juga teknologi MBE pulsa lebih sederhana dibandingkan teknologi MBE kontinyu. Memang benar MBE pulsa ini dapat diaplikasikan untuk industri lateks, tetapi untuk menetralsir SO_x dan NO_x maaf kami belum tahu.
- Maaf kami belum tahu perkembangan inovasi teknologi dari pulsa dijadikan kontinyu.

Suyamto

- Apakah dasar pengambilan asumsi $C = 9\mu F$ dan $L = 9\mu H$, sebab rasanya terlalu kecil dibandingkan dengan 9 μ kalau dijadikan reaktansi.

Widdi Usada

- Contoh diatas hanyalah pengambilan sembarang, bukan dalam usaha untuk merancang MBE pulsa. Dalam plasma pulsa yang kami jumpai sehari-hari kami terbiasa berbicara dalam orde μF dan μH , dan memang kita menghendaki reaktansinya kecil dalam orde Ohm saja. Maaf pengambilan angka mengganggu Bapak.

Apri Susanto

- Kenapa pada pembuatan MBE pulsa dengan plasma biaya lebih ringan?

Widdi Usada

- Memang kami memperkirakan biaya lebih ringan bahwa karena teknologi relatif sederhana yaitu teknologi pembangkitan plasma kemudian pemercepatan, kami melihat MBE kontinyu mempunyai teknologi yang lebih rumit. Biasanya teknologi yang rumit akan memberikan harga yang tinggi.

Rill Isaris

- Jika sumber yang saudara acu adalah desain MBE pulsa Nagata, apakah tidak bisa dikemukakan SPECT yang bisa dipakai sebagai dasar untuk pertimbangan studi untuk merancang alat tersebut.
- Mungkin juga perlu dipikirkan aspek lain dari perencanaan alat dengan daya cukup besar ini (MW) disipasi panasnya.

Widdi Usada

- Memang kami sudah menanyakan kepada Bapak Dr. Purwadi yang kebetulan beliau presentasi beberapa waktu yang lalu di PTAPB, tetapi beliau belum tahu SPECT dari gambar yang ditayangkan. Saran Bapak kami ucapkan terima kasih.
- Terima kasih atas saran Bapak, memang kami belum sampai memikirkan sejauh itu khususnya aspek mereduksi panas.

KAJIAN SISTEM *ELECTROSTATIC PRECIPITATOR* UNTUK PENGENDAPAN DEBU GAS BUANG

Prayitno, Tunjung Indrati

Pustek Akselerator & Proses Bahan, BATAN, Yogyakarta

ABSTRAK

KAJIAN SISTEM ELECTROSTATIC PRECIPITATOR UNTUK PENGENDAPAN DEBU GAS BUANG. Emisi debu gas buang ke udara dari suatu aktivitas industri besi, baja, pulp dan kertas, semen, pupuk dan pembangkit listrik menggunakan bahan bakar fosil seperti batubara merupakan sumber utama polusi udara ke lingkungan. Untuk mengurangi kadar debu yang keluar bersama gas, maka debu tersebut harus ditangkap terlebih dahulu sebelum gas dilepas ke udara. Seiring dengan perkembangan teknologi dan kesadaran manusia akan kesehatan lingkungannya, maka teknologi pemeliharaan lingkungan semakin dikembangkan, misalnya dengan menciptakan alat penangkap debu pada gas emisi industri. Sebagai langkah tersebut oleh industri harus merancang dan mempergunakan sistem penangkap debu yaitu electrostatic precipitator. Prinsip kerja electrostatic precipitator dibagi dalam tiga langkah, yaitu proses pelepasan elektron, proses pemuatan partikel debu, proses pengumpulan partikel debu. Electrostatic precipitator diharapkan sebagai alat penangkap debu dari aliran gas sebelum dibuang ke lingkungan sehingga dapat mengurangi polusi udara.

ABSTRACT

STUDY ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FOR PRECIPITATION OF FLUE GAS PARTICLES.. The flue gas particles concentration on air from iron, steel, pulp and paper, cement, fertilizer and electricity based on fosil fuel industries activities is ultimate resources of pollution. For reducing particles concentration of flue gas stream so the particles must be trapped before release on air. By doing the technology development and people awarness of environment healthy so the technology of environment keeping more be developed are making equipment for particle precipitation especially electrostatic precipitator. There are tree steps for operating : electron escaping, dust particles charging and dust particles collecting. By operating electrostatic precipitator, the dust particles can be trapped on that equipment so air pollution can be reduced.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri yang semakin pesat menyebabkan tuntutan, terhadap pengelolaan lingkungan yang lebih serius. Kemajuan dunia industri harus memberikan dampak sekecil mungkin terhadap lingkungan^[1], dalam arti tidak boleh menimbulkan kerusakan dan pencemaran lingkungan yang pada akhirnya dapat membahayakan kehidupan manusia dan makhluk hidup disekitarnya. Industri semen merupakan salah satu contoh industri yang berpotensi besar terhadap pencemaran lingkungan terutama disebabkan oleh emisi debu yang dikeluarkan. Hal ini dapat dipahami karena produk dari industri ini dalam bentuk debu dan sebagian pemrosesan materialnya pun dalam bentuk tepung.

Oleh karena itu untuk mengatasi permasalahan ini, pemerintah telah mengeluarkan peraturan mengenai baku mutu lingkungan.

Peraturan pemerintah yang mengatur hal ini adalah Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No.13/MENLH/3/1995^[2] yang didalamnya mengatur mengenai baku mutu untuk sumber tidak bergerak untuk berbagai jenis industri besi dan baja, industri pulp dan kertas, industri semen dan juga untuk pembangkit tenaga listrik tenaga uap berbahan bakar batubara. Hasil pembangunan nasional telah dapat dinikmati oleh masyarakat, diantaranya adalah perkembangan yang demikian pesat di bidang industri. Kawasan industri banyak tumbuh dimanamana dan telah membuka lapangan kerja baru. Namun bukan berarti bahwa kemajuan di bidang industri tidak menimbulkan dampak terhadap lingkungan. Adanya slogan industri berwawasan lingkungan atau industri yang ramah lingkungan merupakan suatu peringatan bahwa industri harus memperhatikan dampak yang ditimbulkan terhadap lingkungannya. Pencemaran udara merupakan salah satu dampak industri terhadap lingkungan. Diantara

industri yang menimbulkan terhadap pencemaran udara adalah industri listrik. Kebijakan pengelolaan lingkungan hidup pada kegiatan industri listrik ditetapkan melalui Undang-Undang RI No. 23 tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.27 Tahun 1999 tentang Analisis Mengenai Dampak Lingkungan dan Pedoman tentang pelaksanaannya yang dikeluarkan oleh Menteri Negara Lingkungan Hidup^[3] serta peraturan-peraturan lain yang berkenaan dengan kebijakannya pengelolaan lingkungan hidup. Salah satu adalah peraturan baku emisi tahun 2000 atau BME 2000. Debu yang emisinya melebihi ambang batas yang telah ditetapkan dapat mengakibatkan berlebihnya polusi udara disekitar areal pabrik. Untuk mengurangi kadar debu yang keluar bersama gas, maka debu tersebut harus ditangkap/diendapkan terlebih dahulu sebelum gas dilepaskan ke udara. Masalah ini tidak terhenti sampai bagaimana mengendapkan debu dalam gas buang, tetapi juga merawat seluruh peralatan penangkap debu dalam proses pembuatan semen. Seiring dengan perkembangan teknologi dan kesadaran manusia akan kesehatan lingkungannya, maka teknologi pemeliharaan lingkungan semakin dikembangkan, misalnya dengan menciptakan alat penangkap debu pada gas emisi pabrik. Contoh industri dalam kemajuan tersebut juga dialami oleh industri semen, yang menggunakan dua macam sistem penangkap debu yaitu *electrostatic precipitator* dan *bag filter*. *Electrostatic precipitator* digunakan untuk kapasitas yang besar dan suhu *dust* yang tinggi, sedangkan *bag filter* digunakan untuk kapasitas yang lebih kecil dan suhu yang lebih rendah. Pada industri semen biasanya menggunakan, *electrostatic precipitator* yang digunakan pada alat *Rotary Dryer*, *Raw Mill*, *Rotary Kiln*, dan *Finish Mill*.^[4]

Prinsip kerja *electrostatic precipitator* didasarkan atas partikel bermuatan listrik yang dilewatkan dalam suatu medan elektrostatis. Sistem filter terdiri dari dua buah elektroda yaitu *discharge electrode* (-) yang berupa *steel wire* dan *collecting plate electrode* (+) yang berupa *steel plate*. *Discharge electrode* berfungsi untuk memberi muatan pada partikel debu sehingga terbentuk ion debu negatif. *Collecting plate* berfungsi untuk menarik partikel bermuatan dan mengumpulkannya, sehingga partikel debu dalam gas akan terakumulasi pada elektroda ini. Bersamaan proses akumulasi ini partikel debu akan mengalami netralisasi di *plate* elektroda. Prinsip kerja *electrostatic precipitator* dibagi dalam tiga langkah, yaitu proses pelepasan elektron (*electron discharge*), proses pemuatan partikel debu (*particle charging*), proses pengumpulan partikel debu (*precipitating*).

Collecting plate dipasang sejajar dengan arah aliran gas, sedangkan *discharge electrode* dipasang ditengah-tengah *collecting plate* secara berselang-seling. Debu yang terbawa bersama gas dilewatkan melalui ruangan antar elektroda. Sepanjang aliran gas, sedikit demi sedikit partikel debu akan tertarik menuju *plate*, sehingga pada *plate* akhir (dekat *outlet*) jumlah debu dalam gas tinggal sedikit.

Dengan perhitungan bahwa pada radius yang kecil disekitar permukaan *discharge electrode* yang bertegangan tinggi dihasilkan medan elektrostatis yang kuat. Pengaturan tegangan DC yang disupplykan ke elektroda diatur sedemikian rupa sehingga secara periodik akan dicapai tegangan tembus (Udis) pada permukaan elektroda. Pada saat yang sama akan dihasilkan arus filter atau *discharge current* (Id). Saat itu di *wire* akan terjadi fenomena berupa bintik cahaya kebiru-biruan seperti kabut dan bersuara berisik, yang selanjutnya disebut sebagai *corona*. Melalui fenomena *corona* ini *discharge electrode* (*wire*) melepaskan elektron dalam jumlah besar yang sangat efektif untuk memberi muatan negatif (*charging*) pada partikel debu.

Elektron yang dilepaskan bergerak dalam kecepatan tinggi dari *negative electrode* menuju ke *positive collecting electrode*. Sementara itu dalam arah yang sejajar dengan *collecting plate* dan tegak lurus dengan arah gerakan elektron, partikel debu dilewatkan bersama dengan aliran gas. Sehingga akan terjadi proses benturan antara elektron dengan partikel debu yang cukup efektif. Akibatnya partikel debu akan dilingkupi elektron sehingga bermuatan negatif (ion debu negatif).

Di dalam lingkungan medan elektrostatis yang kuat, ion debu negatif akan mengalami interaksi gaya listrik. Ion debu negatif yang bergerak bersama gas akan tertarik menuju ke *positive collecting electrode*, selanjutnya mengalami proses netralisasi dengan muatan pada permukaan *plate*. Sebagai akibat samping, selama terjadinya proses benturan antar partikel debu dalam gas dengan elektron yang dilepas oleh *wire* dihasilkan juga ion debu positif. Ion ini merupakan bagian minoritas, yang akan tertarik dan terkumpul pada *discharge electrode* (*wire*).

Untuk menjatuhkan material yang terakumulasi pada *plate* ataupun *wire*, secara periodik elektroda digetarkan oleh pukulan *impact hammer* pada unit *rapping gear* (pada *collecting & discharge system*). Sehingga secara periodik material rontok dan tertampung pada *bottom hopper*. Material akan terkumpul dan siap diangkut sebagai produk atau *return material* melalui *dust transport*.

Pemuatan partikel debu (*particle charging*) sebanding dengan kuat medan listrik yang dibentuk pada saat harga puncak (Ep) dan kuadrat partikelnya (θ)^[5,6,7]

$$q = k_1 \cdot Ea \cdot \theta^2 \quad (1)$$

Adapun gaya elektronik yang bekerja pada partikel sebanding dengan muatan partikel (q) dan harga rata-rata kuat medan listriknya (Ea).

$$F = k_2 \cdot q \cdot Ea \quad \text{atau} \quad F = K \cdot Ep \cdot Ea \cdot \theta^2 \quad (2)$$

Menurut hukum *Stokes*, kecepatan migrasi partikel dalam arah tegak lurus dengan gerakan gas dirumuskan:

$$\omega = k \cdot Ea \cdot Ep \cdot \theta \quad (3)$$

Kecepatan migrasi dipengaruhi oleh harga rata-rata dan harga puncak medan listrik dan diameter partikel. Dari rumus diatas menunjukkan bahwa tegangan berkaitan dengan kuat arus medan listrik mempunyai pengaruh yang besar terhadap proses "*precipitation*". Efisiensi dari *electrostatic precipitator* jika dikaitkan dengan luasan *precipitator* dan kuantitas gas dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta = 1 - e^{\omega(A/Q)} \quad (4)$$

dimana:

η = Efisiensi *precipitator*

ω = Kecepatan migrasi (m/s)

A = Luas *collecting electrode* (m²)

Q = Volume gas tiap satuan waktu (m³/s)

Selain dengan persamaan (4), efisiensi penangkapan debu oleh *electrostatic precipitator* juga dapat dihitung dengan neraca massa yang didasarkan pada debu yang masuk dan keluar dari *electrostatic precipitator*.

Electrostatic precipitation dipasang untuk pengelolaan debu gas buang sistem pengendapan untuk aliran gas pada arah horisontal. Tergantung dari kondisi operasinya, desain *electrostatic precipitation* disesuaikan untuk kondisi temperatur tinggi, *under/over pressure*, lingkungan bersalju, berangin ataupun getaran tanah (gempa). Karena suhu kerja yang tinggi *electrostatic precipitator* dipasang pada *supporting frame* dengan maksud untuk menjamin tekanan pada *casing* dan *support* minimum selama terjadinya kontraksi dan ekspansi termal. Secara garis besar sistem instalasi dari unit *electrostatic precipitator* dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. *Filter housing* terdiri dari :
 - Sebuah *filter compartment*,
 - *Bottom hopper* (dua atau lebih),
 - Atap sebagai tempat pemasangan isolator kubik,
 - *Column* sebagai penopang *filter housing* yang salah satunya diletakkan pada *fixed foot* dan bagian lain pada *roller bearing* yang berhubungan dengan *fixed foot*.
2. *Discharge system*, terdiri dari sistem elektroda yang terhubung pada *rectifier* tegangan tinggi, yaitu:
 - *Frame structure* yang tergantung pada insulator porselin/*quartz* (atap dari filter).
 - *Discharge electrode* diregangkan pada *frame*.
3. *Collecting system*, terdiri dari *lamelle plate* yang berbentuk khusus, *collecting electrode* dan tergantung pada *carrying irons* yang mudah bergerak, dan dilas pada sisi bawah *roof beams*. Elektroda dihubungkan dengan metal dengan *roof*, selanjutnya dihubungkan dengan tanah. Elektroda ini disusun dalam baris paralel yang searah dengan aliran gas, pada bagian tengah terpasang *discharge elektroda*.
4. *Rapping gear* untuk *discharge system*, terdiri dari *drop hammer* yang digerakkan oleh *gear motor* melalui *shaft*, *insulator shaft*, dan *chain*. *Drop hammer* mengenai *impact beam* yang dipasang pada struktur *frame*, dan bekerja menurut interval yang teratur dengan rotasi kontinyu pada *shaft*.
5. *Rapping gear* untuk *collecting system*, terdiri dari *drop hammer* pada *shaft* yang dikendalikan oleh *gear motor* melalui suatu *chain drive*. *Hammer* mengenai *impact rod*, dimana *collecting electrodes* dipasang dan bekerja secara diskontinyu karena waktu rotasi dan *shaft* dikendalikan oleh programmer, *collecting electrode* digetarkan ketika debu yang menempel sudah terkumpul.
6. *Gas distribution screen*, terdiri dari suatu *system baffle* yang terpasang pada bagian *inlet filter* (bagian vertical dan horizontal serta bagian *outlet filter* (hanya bagian vertical). Pada kondisi normal *baffle* akan digoyangkan oleh *drop hammer* melalui *shaft* pada *rapping gear collecting electrodes*.
7. *Thermoswitch*, berfungsi mengatur kerja dari heater dalam *insulator cubicles*, secara otomatis pengurangan suhu gas iradiator dapat diantisipasi oleh kerja heater.

8. *Supply* tegangan tinggi, terdiri dari : *dry plate rectifier*, *hightension transformer*, *transducer* dan unit panel kontrol yang berisi peralatan instrument, relay dan switch-switch untuk pengoperasian dan kontrol *electrostatic precipitator*.
9. *Rectifier*, merupakan pengatur arus konstan dimana harga keluaran arus dijaga secara otomatis pada suatu harga tertentu dengan variasi harga beban. Keluaran arus dapat diatur mulai beban 25 % sampai 100 % melalui suatu *transductor*, *rectifier* menggunakan standar tegangan 380 volt.
10. Bagian tegangan tinggi, terdiri dari :
 - *Transformer* tegangan tinggi 1 fase, tegangan sekunder sekitar 45 – 55 kV
 - *Dry plate rectifier* dengan hubungan bridge satu fase, sehingga tegangan maksimum DC yang dihasilkan sekitar 6 - 70 kV.
11. *Transductor*, dihubungkan seri dengan lilitan primer dari trafo tegangan tinggi dan terdiri dari dua elemen yang terpasang paralel, yaitu *exitation rectifier* dan *exititation transformer*.
12. Kontrol panel, terdiri dari
 - mA-meter (Ema) untuk mengukur DC.
 - Voltmeter (EV) untuk mengukur tegangan primer trafo tegangan tinggi.
 - Ampermeter (EA) untuk mengukur arus primer dari *transductor* dan trafo tegangan tinggi.

- Saklar untuk pengoperasian dan peralatan alarm.
- *Regulating transformer* (Ereg) yang berfungsi untuk mengatur tegangan primer trafo eksitasi pada *transductor*.

PERHITUNGAN NERACA MASSA PADA PENGENDAPAN DEBU

Perhitungan neraca massa sistem *electrostatic precipitator* dilakukan dengan asumsi-asumsi dalam perhitungan ini adalah :

1. Reaksi berlangsung stoikiometris.
2. Medan listrik stabil.
3. Data : *electrostatic precipitator* : Q (aliran gas buang)= 20.000 m³/ jam, temperatur gas buang = 65 °C, waktu tinggal = 2 – 10 detik, laju presipitasi = 0,1 – 0,7 ft/ detik, kecepatan gas= 2 – 8 ft/ detik, tegangan listrik = 30 – 75 kV, jarak antar plat = 8 – 11 inchi, tinggi plat = 12 – 45 ft, panjang plat = (0,5 – 2,0). tinggi plat, efisiensi = 90 – 99%, nilai $\beta = 0,90$, $C_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ C²/N.m², gravitasi spesifik = 0,6 dan arus corona = 2 A.
4. Perhitungan Neraca Massa ⁽⁸⁾: Gas Buang Masuk = Gas Buang Keluar
(partikel + SO₂ + NO_x + N₂ + O₂ + CO₂ + uap air + NH₃ + (NH₄)₂SO₄ + NH₄NO₃) masuk = (partikel + SO₂ + NO_x + N₂ + O₂ + CO₂ + uap air + NH₃ + *By Product*) keluar

Tabel 1. Hasil perhitungan kesetimbangan neraca massa unit *electrostatic precipitator*.

Komponen	Arus	
	Masuk (kg/ jam)	Keluar (kg/ jam)
SO ₂	3	3
NO ₂	2,4	2,4
Partikel debu	60	0,6
N ₂	18.131,4	18.131,4
O ₂	1.295,1	1.295,1
CO ₂	2.590,2	2.590,2
Uap air	4.607,2	4.607,2
NH ₃	0,5	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄	145,72	1,457
NH ₄ NO ₃	56,48	0,564
<i>By Product</i>	-	259,7
TOTAL	26.892	26.892

5. Perhitungan :

- Tinggi plat (W) diambil 4 m sehingga dapat diketahui pula panjang platnya (L), yaitu

$$\text{Panjang plat } (L) = 0,5 \times \text{tinggi plat} = 0,5 \cdot (4 \text{ m}) = 2 \text{ m}$$

- $\frac{A}{Q} = -\frac{1}{W} \ln(1-\eta) \ggggg A = -\frac{Q}{W} \ln(1-\eta)$ (5)

- $A = -\frac{5,6 \text{ m}^3 / \text{det}}{0,15 \text{ m} / \text{det}} \ln(1-0,95) \ggggg$. Luas plat total = 108,2 m²

- Jika plat mempunyai 2 sisi pada setiap bagian, maka jumlah plat keseluruhan, adalah : $A_p = 2 \times \text{sisi area plat} = 2 \times (p \times t) = 2 \times (2 \times 4) = 16 \text{ m}^2$

$$n = \frac{A}{A_p} + 1 = \frac{108,2 \text{ m}^2}{16 \text{ m}^2} + 1 \gggggg \text{ Jumlah}$$

$$\text{plat} = 7,7 \text{ plat} \approx 8 \text{ plat}$$

- $d = 1,24 \cdot \beta^{0,333} \cdot d_p$ (6)

- $d = \frac{3\mu}{\epsilon_0} \frac{Q}{E^2 \cdot L \cdot W}$ (7)

- $d_p = \left(\frac{1}{1,24 (0,90^{0,333})} \right) \left(\frac{3\mu}{\epsilon_0} \frac{Q}{E^2 \cdot L \cdot W} \right)$
 $= 0,835 \left(\frac{3\mu}{\epsilon_0} \frac{Q}{E^2 \cdot L \cdot W} \right)$ (8)

Dari grafik hubungan antara densitas dan viskositas dinamik udara, didapatkan

$$\mu = 3,7 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s dan } \rho = 0,5 \text{ kg/m}^3.$$

$$Q = \frac{5,6 \text{ m}^3 / \text{det}}{8(2)} = 0,35 \text{ m}^3 / \text{det}, E = \frac{50.000 \text{ V}}{0,3 \text{ m} / 2}$$

$$= 3,4 \times 10^5 \text{ V/m}$$

$$d_p = 0,835 \left(\frac{3\mu}{\epsilon_0} \frac{Q}{E^2 \cdot L \cdot W} \right)$$

$$= 0,835 \left(\frac{3(3,7 \times 10^{-5})(0,35)}{(8,85 \times 10^{-12})[(3,4 \times 10^5)]^2 (2)(4)} \right)$$

$$= 0,835 \left(\frac{3,8 \times 10^{-5}}{8,2} \right) \gggggg d_p = 3,8 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$v_0 = v_0 = \frac{Q}{L \cdot W} = \frac{0,35 \text{ m}^3 / \text{det}}{(2 \text{ m})(4 \text{ m})} = 0,044 \text{ m/det}$$

- $g = \frac{6 \cdot \epsilon_0 \cdot E^2}{d \cdot \rho_p} = \frac{6(8,85 \times 10^{-12})[(3,4 \times 10^5)]^2}{[1,24(0,9^{0,333})] \cdot d_p (0,6)(1000)}$
 $= \frac{6,14}{741,5 \cdot d_p} = \frac{8,2 \times 10^{-3}}{d_p}$ (9)

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{\rho_p \cdot d}{C_D \cdot \rho_a}}$$

$$= \sqrt{\frac{4}{3} \frac{8,2 \times 10^{-3} \cdot 0,6(1000)}{d_p \cdot C_D(0,5)}}$$

$$= \frac{3,96}{\sqrt{C_D}}$$
 (10)

$$\text{Re} = \frac{\rho_a \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{(0,5) \cdot v \cdot [1,24(0,9^{0,333}) \cdot d_p]}{3,7 \times 10^{-5}}$$

$$= 1,62 \times 10^4 \cdot d_p \cdot v$$

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24}{1,62 \times 10^4 \cdot d_p \cdot v} = \frac{1,5 \times 10^{-3}}{d_p \cdot v}$$

$$v = \frac{3,96}{\sqrt{C_D}} = \frac{3,96}{\sqrt{\frac{1,5 \times 10^{-3}}{d_p \cdot v}}}$$

$$v^2 = \frac{3,96}{\frac{1,5 \times 10^{-3}}{d_p \cdot v}} \ggggg v = 15,7 \times \frac{d_p \cdot v}{1,5 \times 10^{-3}}$$

$$\gggggg v = 1,05 \times 10^4 d_p$$

Tabel 2. Hasil perhitungan hubungan ukuran partikel prosen berat dan diameter partikel.

Ukuran Partikel (μm)	Wt (%)	d_{pi} (10^{-6} m)	v_i (m/s)
0 – 10	8	5	0,0525
10 – 20	10	15	0,1575
20 – 30	12	25	0,2625
30 – 40	15	35	0,3675
40 – 50	19	45	0,4725
50 – 60	14	55	0,5775
60 – 70	13	65	0,6825
70 – 80	9	75	0,7875

$$R = 1 - x_0 + \int_0^{x_0} \frac{v_p}{v_0} dx \quad (11)$$

Penyelesaian untuk x_0 :

$$x_1 = 8 \quad x_2 = 8 + 10 = 18$$

$$x_0 = 0,044 \quad \frac{x_0 - 8}{8 - 18} = \frac{0,044 - 0,0525}{0,0525 - \dots 0,1575}$$

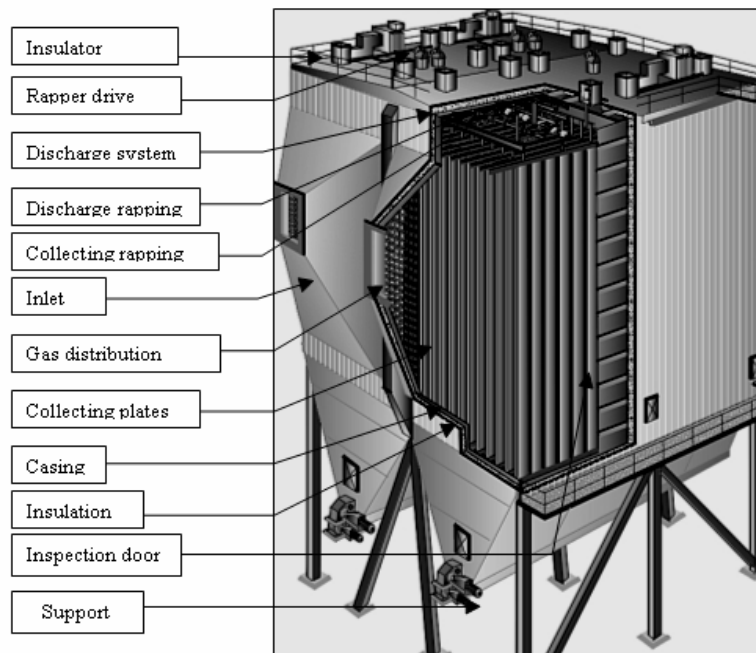
$$= 0,0525 >>>>>> 18 = 0,1575 \quad x_0 = 7,19$$

Tabel 3. Hasil perhitungan hubungan ukuran partikel prosen berat, diameter partikel dan jumlah prosen berat.

Ukuran Partikel (μm)	Wt (%)	d_{pi} (10^{-6} m)	v_i (m/ s)	Σ Wt (%)
0 – 10	8	5	0,044	7,19
10 – 20	10	15	0,0525	8
20 – 30	12	25	0,1575	18
30 – 40	15	35	0,2625	30
40 – 50	19	45	0,3675	
50 – 60	14	55	0,4725	
60 – 70	13	65	0,5775	
70 – 80	9	75	0,6825	
			0,7875	

$$R = 1 - 0,0719 + \frac{1}{0,044} [0,044 (7,19 - 0)] \left(\frac{1}{100} \right) \approx 1,0 \text{ atau } 100\% \text{ atau } 100\%$$

$$P_c = I_c \cdot V = 2 \cdot (70.000) = 140.000 \text{ W atau } 140 \text{ kW}$$

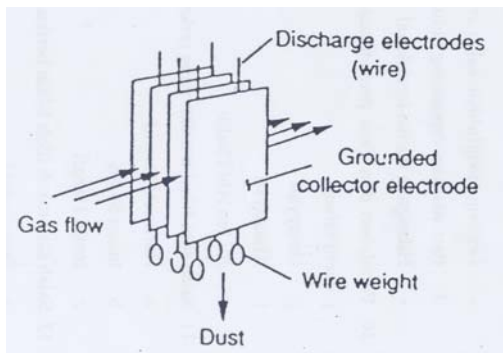


Gambar 1. Electrostatic Precipitator^[9].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan dari dasar teori dan hasil perhitungan dalam sistem pengendapan gas buang dapat dijelaskan bahwa *electrostatic precipitator* terdiri dari :

1. *Discharge electrode* : berupa *steel wire* yang berfungsi untuk menghasilkan elektron yang bebas digunakan untuk *charging* (pemuatan) dari partikel debu.
2. *Colecting plate* berupa *steel plate* yang berfungsi untuk menarik partikel bermuatan negatif dan mengumpulkan, sehingga partikel debu dalam gas akan terakumulasi pada bagian ini. Partikel debu akan mengalami netralisasi di *plate electrode*.
3. Hasil perhitungan neraca massa *electrostatic precipitator* (ESP): dikaitkan dengan ukuran dan bentuk alat berupa tangki segi empat tegak bagian bawah kerucut, panjang plat elektroda = 2 m, tinggi plat elektroda = 4 m, kawat elektroda = menyesuaikan, jumlah plat = 8 plat, tegangan listrik = 70.000 V, energi listrik = 140 kW.



Gambar 2. Sistem plat elektroda ESP.

Faktor –faktor yang mempengaruhi kinerja *electrostatic precipitator* dalam sistem pengendapan debu gas buang adalah sebagai berikut ;

- Kecepatan gas masuk; dalam separating area sangat berpengaruh terhadap efisiensi kerja alat tersebut. Jika kecepatan gas masuk terlalu tinggi maka *collecting plate* akan mengalami kesulitan dalam penangkapan partikel debu. Jika dihubungkan dengan persamaan $\eta = 1 - e^{-\omega (A/Q)}$, maka untuk Q yang lebih besar, $\omega (A/Q)$ menjadi kecil. Akibatnya harga $e^{-\omega (A/Q)}$ lebih besar, sehingga efisiensi akan turun. Oleh karena itu kecepatan gas masuk harus dibatasi, dan ini tergantung pada kecepatan bahan bakar masuk gas dari reaktor pengolahan.

- Kadar air gas masuk EP harus diperhatikan. Kandungan air cukup tinggi akan mengakibatkan penumpukan material karena menempel pada *plate baffle*. Kadar air sangat erat hubungannya dengan suhu dan tekanan, sehingga perlu diperhatikan berapa kadar air untuk suhu dan tekanan tertentu agar tidak terjadi akumulasi material pada inlet EP.
- Suhu dan tekanan operasi dari gas harus dibatasi tidak boleh terlalu rendah atau terlalu tinggi. Suhu yang tinggi akan menyebabkan *viscositas* gas turun sehingga mobilitasnya menjadi tinggi, sehingga efisiensi akan turun. Sebaliknya suhu harus dijaga tidak boleh turun sampai titik embun air karena dapat mengakibatkan *coating* material, korosi, dan *flash over* pada line tegangan tinggi. Suhu yang tinggi juga dapat mengakibatkan deformasi *collecting plate* sehingga menurunkan kinerja EP, Untuk kondisi tekanan atmosferis, suhu dijaga antara 100 – 120 °C, dimana kondisi paling baik dicapai pada suhu 110 °C^[4,8]. Apabila tekanan gas bertambah maka efisiensi akan bertambah, karena dapat mengurangi mobilitas ion sehingga proses pemisahan material dapat lebih baik.

- Jarak antar elektroda juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi EP. Jarak yang terlalu jauh akan menurunkan efisiensi, sedangkan jarak yang terlalu dekat bisa menimbulkan *spark* yang tinggi dan berakibat pada deformasi *collecting plate*. Pada persamaan $\eta = 1 - e^{-\omega (A/Q)}$ dapat dituliskan $\eta = 1 - e^{-\omega (L u d)}$,

dengan : d = jarak antar elektroda, L = panjang medan listrik, u = kecepatan linear gas dalam medan elektrostatis.

Persamaan diatas menunjukkan bahwa apabila $d \gg$ maka η akan turun. Oleh karena itu harga d juga ditentukan optimumnya agar efisiensi pemisahan tinggi. Nilai d besarnya sangat tergantung pada tegangan dan arus yang digunakan. Untuk tegangan sebesar 70 kV dan arus 1 A, maka jarak yang paling baik adalah 110 mm. Pemasangan *wire* dan *collecting plate* dilakukan berselang-seling dimana *wire* diletakkan ditengah-tengah. Apabila jaraknya tidak sama atau *wire* lebih dekat ke salah satu plate maka penangkapan partikel debu lebih kecil (efisiensi turun).

- Tegangan dan arus yang diberikan akan mempengaruhi kuat medan elektrostatis dalam *separating area*. Apabila tegangan rendah maka kuat medan elektrostatis (E) juga akan turun dan akibatnya lebih banyak debu yang akan lewat begitu saja, tidak bisa tertangkap oleh *collecting*

electrode. Tegangan kerja yang baik adalah antara 40 sampai 100 kV dan arus 5 sampai 2000 mA.

- Luas bidang penangkapan/pengendapan sangat berpengaruh terhadap efisiensi. Dari persamaan $\eta = 1 - e^{-\omega(A/Q)}$, apabila A diperbesar untuk variabel yang lain tetap, maka efisiensi akan menjadi tinggi.

KESIMPULAN

1. *Electrostatic precipitator* berfungsi sebagai alat penangkap/pengendap debu gas dari aliran gas sebelum dibuang ke lingkungan sehingga dapat mengurangi polusi udara.
2. Kinerja *electrostatic precipitator*, sangat tergantung pada kecepatan dan kadar air masuk, suhu dan tekanan operasi, jarak antar elektroda, tegangan dan arus listrik masuk, serta luas bidang penangkapan/pengendapan.
3. 3. Dimensi alat *electrostatic precipitator* (ESP): berbentuk tangki segi empat tegak bagian bawah kerucut, panjang plat elektroda = 2 m, tinggi plat elektroda = 4 m, kawat elektroda = menyesuaikan, jumlah plat = 8 plat, tegangan listrik = 70.000 V, energi listrik = 140 kW.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] WARDHANA WISNU A, *Dampak Pencemaran Lingkungan*, Andi Offset, Yogyakarta, 1995.
- [2] ANONIM, Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 13/MENLH/3/1995, *Tentang : Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak*.
- [3] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.27 Tahun 1999 *Tentang Analisis Mengenai Dampak Lingkungan dan Pedoman tentang Pelaksanaannya yang Dikeluarkan Oleh Menteri Negara Lingkungan Hidup*.
- [4] ANONIM, *Laporan Kerja Praktek di PT. Semen Cibinong Tbk.*, Pabrik Cilacap - *Electrostatic Precipitator*, UPN, Yogyakarta.
- [5] KIELY G, *Environmental Engineering*, McGraw Hill Co, Berkshire, 1997.
- [6] PERRY and GREEN, *Perry's Chemical Engineers Handbook 7th edition*, McGraw Hill Co. Inc, New York, 1997.
- [7] SINNOT R.K, *Chemical Engineering, vol.6*, Pergamon Press Ltd., 1983.

- [8] PRAYITNO dkk, *Penentuan dan Analisis Spesifikasi Teknis Sistem Pengolahan "By Product" Pada Pengelolaan Gas Buang Menggunakan Mesin Berkas Elektron*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya vol. 7, BATAN, Yogyakarta, 2005.

- [9] F.L.SMIDTH, *Airtech, Supplies Air Pollution Control Equipment*, <http://www.flsairtech.com>

TANYA JAWAB

Utaja

- Bagaimana menentukan waktu tinggal?

Prayitno

- Menentukan waktu tinggal berdasarkan kriteria perancangan antara (2 -10) detik, kemudian dilakukan perhitungan untuk menentukan kondisi yang terbaik dan untuk menentukan ukuran dari alat elektrostatik dan elektrodanya.

Budi Santosa

- Bagaimana cara menentukan nilai ω ?

Prayitno

- Menentukan nilai $\omega = k E_a E_p \theta$, yaitu kecepatan migrasi dipengaruhi oleh harga rata-rata dan harga puncak medan listrik dan diameter partikel.

Rill Isaris

- Efisiensi penangkapan (removal) debu gas buang tergantung pada tegangan, arus yang dikenakan pada elektroda. Apakah juga tergantung pada jenis bahan elektroda dan kelembaban relatif, serta temperatur (T) gas buang yang lewat.

Prayitno

- Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi penangkapan
 - Kecepatan gas masuk
 - Kadar air gas masuk
 - Suhu dan tekanan operasi harus dibatasi
 - Tegangan dan arus yang diberikan
 - Luas bidang penangkapan
 - Jarak antar elektroda

Mengenai jenis elektroda tidak berpengaruh pada efisiensi penangkapan, tidak terlalu signifikan.

PEMBUATAN DAN UJI COBA LAPISAN TIPIS ZnO:Al SEBAGAI PROTOTIPE SENSOR GAS DENGAN GAS UJI KARBON MONOKSIDA

Taxwim, Tjipto Sujitno

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

Mei Sugiyanto

FMIPA, Universitas Gadjahmada, Yogyakarta

ABSTRAK

PEMBUATAN DAN UJI COBA LAPISAN TIPIS ZnO:Al SEBAGAI PROTOTIPE SENSOR GAS DENGAN GAS UJI KARBON MONOKSIDA. Telah dibuat suatu prototip sensor gas dengan menggunakan bahan ZnO:Al di atas substrat alumina dengan menggunakan metode dc-reactive sputtering dan evaporasi. Pembentukan pola lapisan elektroda emas dilakukan menggunakan metode lithografi. Karakterisasi sensor telah dilakukan untuk menguji sifat tanggap gas CO. Karakterisasi sensor terhadap sifat tanggap gas CO menunjukkan bahwa sensor dengan lapisan tipis semikonduktor ZnO:Al dapat mendeteksi adanya gas CO. Sensor yang dibuat dapat beroperasi pada suhu sekitar 250°C. Sensitivitas sensor menunjukkan nilai tertinggi sebesar 64,706%. Sensor memiliki waktu tanggap antara 90 – 180 detik.

Kata kunci : *sensor gas karbon monoksida, lapisan tipis ZnO:Al, metode dc-reactive sputtering dan evaporasi.*

ABSTRACT

THE FABRICATION AND TESTING OF ZNO:AL THIN FILM AS A PROTOTYPE OF CARBON MONO OXIDE GAS SENSOR. A prototype of CO gas sensor made of ZnO:Al thin film deposited on alumina substrate has been carried out using dc-reactive sputtering and evaporator methods. Pattern of gold thin film electrode has been formed using lithography technique. The sensor has been tested for detecting of carbon mono oxide gas. It was found that the respond time of the sensor is in order of 90-180 second, while the highest sensitivity is in order of 64.706 %. It was also found that the working suhue of the sensor is in order of 250⁰ C.

Key words: *Carbon mono oxide gas sensor, ZnO:Al thin film, dc-reactive evaporation and sputtering methods*

PENDAHULUAN

Kemajuan transportasi seiring perkembangan teknologi terus berkembang. Di kota pemandangan berbagai macam jenis transportasi darat dapat disaksikan setiap harinya. Namun kemajuan alat transportasi juga membawa efek negatif, terutama yang berkaitan langsung dengan lingkungan dan kesehatan, yaitu polusi udara. Kendaraan bermotor mengeluarkan zat-zat berbahaya yang dapat menimbulkan dampak negatif, baik terhadap kesehatan manusia maupun terhadap lingkungan, seperti timbal/timah hitam (Pb), *suspended particulate matter* (SPM), oksida nitrogen (NOx), hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), maupun oksida fotokimia (Ox).

Kendaraan bermotor menyumbang hampir 100% timbal, 13-44% *suspended particulate matter* (SPM), 71-89% hidrokarbon, 34-73% NOx, dan hampir seluruh karbon monoksida (CO) ke udara Jakarta. Sumber utama debu berasal dari pembakaran sampah rumah tangga, di mana mencakup 41% dari sumber debu di Jakarta. Sektor industri merupakan sumber utama dari sulfur dioksida. Di tempat-tempat padat di Jakarta konsentrasi timbal bisa 100 kali dari ambang batas. Dampak terhadap kesehatan yang disebabkan oleh pencemaran udara akan terakumulasi dari hari ke hari. Pemaparan dalam jangka waktu lama akan berakibat pada berbagai gangguan kesehatan, seperti bronchitis, emphysema, dan kanker paru-paru. Dampak kesehatan yang diakibatkan oleh

pencemaran udara berbeda-beda antar individu. Populasi yang paling rentan adalah kelompok individu berusia lanjut dan balita. Menurut penelitian di Amerika Serikat tahun 2001, kelompok balita mempunyai kerentanan enam kali lebih besar dibandingkan orang dewasa. Kelompok balita lebih rentan karena mereka lebih aktif dan dengan demikian menghirup udara lebih banyak, sehingga mereka lebih banyak menghirup zat-zat pencemar^[1].

Keadaan ini mendorong usaha untuk mengadakan penelitian mengenai detektor gas (sensor gas) khususnya yang peka terhadap gas CO yang semakin mendapat perhatian terutama sejak ditemukan teknologi lapisan tipis (*thin film*) untuk mendeteksi adanya gas-gas berbau dan beracun. Teknologi lapisan tipis nampaknya menjadi metode yang disukai untuk fabrikasi sensor karena difusi gas yang cepat serta waktu tanggap yang relatif cepat.

Keuntungan menggunakan teknologi lapisan tipis diantaranya adalah ketebalan, struktur dan sifat kelistrikan lapisan dapat dikontrol serta biaya yang dikeluarkan relatif murah. Teknologi lapisan tipis sebagai *nanotechnology* menjadi hal yang menarik untuk diteliti serta telah banyak menjangkau hampir semua bidang kehidupan.

Banyak teknik yang dapat digunakan dalam membuat lapisan tipis, diantaranya, yaitu: penguapan (*evaporation*), implantasi ion, dan percikan (*sputtering*). Penelitian ini akan menggunakan teknik evaporasi dan DC-*sputtering* untuk membuat lapisan tipis. Beberapa sistem *sputtering* untuk tujuan deposisi lapisan tipis, antara lain DC-*sputtering*, RF-*Sputtering* dan *Sputtering Magnetron*. Untuk mendeposisikan bahan semikonduktor biasanya digunakan DC-*Sputtering*. *Sputtering* juga dapat menghasilkan bahan yang seragam (*homogen*) dan padat, selain itu bahan tersebut juga mempunyai sifat mekanik dan listrik yang sama dengan sifat dasarnya.

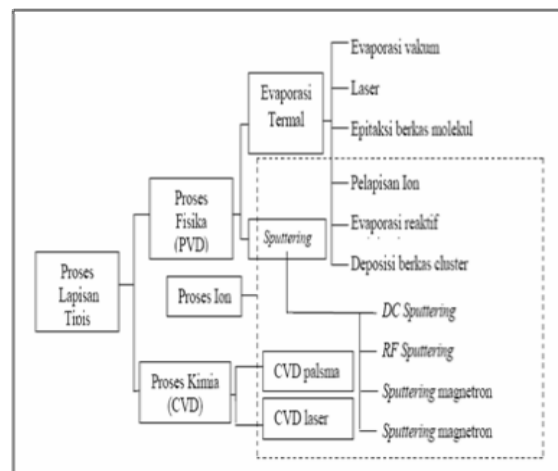
Selama ini teknologi lapisan tipis sebagai elemen dasar gas mengarah kepada bahan MOS (*Metal Oxide Semiconductor*). Penelitian tentang sifat MOS sebagai sensor gas dapat menggunakan lapisan tipis ZnO, CeO, SnO₂, maupun TiO₂. Hasil penelitian terhadap MOS sebagai sensor gas beroperasi pada suhu yang tinggi. Dalam penelitian ini akan mengkaji suatu bahan semikonduktor ZnO:Al untuk keperluan ini. Fungsi penggunaan Al sebagai doping pada lapisan tipis sehingga daya serap terhadap gas-gas lingkungan semakin meningkat. Bahan ZnO:Al tersebut di deposisikan pada substrat keramik alumina Al₂O₃.

Berbagai penelitian dilakukan serupa tetapi dengan metode yang berbeda, menunjukkan bahwa lapisan tipis ZnO:Al dapat diaplikasikan sebagai sensor gas CO.

TATA KERJA

Metode Deposisi

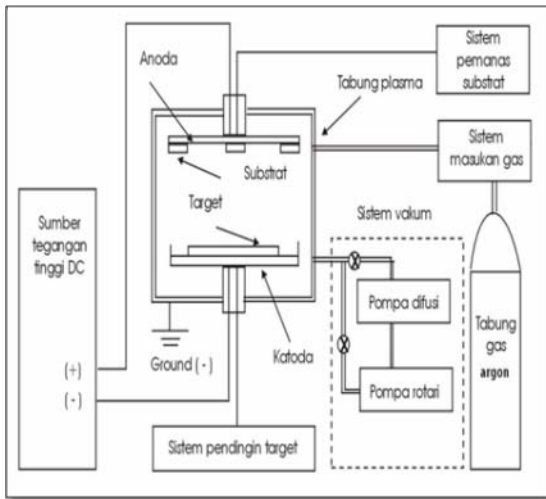
Deposisi merupakan proses masuknya atau terdepositnya suatu zat pada suatu bahan. Deposisi dapat juga diartikan sebagai proses pelapisan. Lapisan tipis adalah lapisan yang memiliki ketebalan di bawah 1µm. Lapisan ini memiliki karakteristik yang sangat unik dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi mikro elektronika misalnya sebagai sensor gas dan sel surya. Metode deposisi lapisan tipis secara garis besar dapat dibagi menjadi 2 proses, yaitu : PVD (*Physical Vapour Deposition*) dan proses CVD (*Chemical Vapour Deposition*). Proses PVD terdiri dari Evaporasi termal dan *Sputtering*. Skema proses deposisi lapisan tipis ditunjukkan pada Gambar 1.



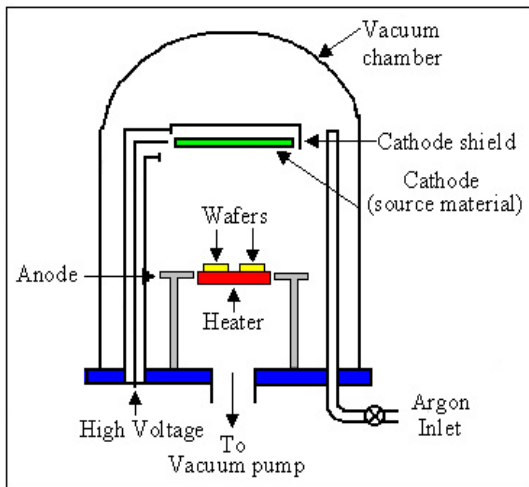
Gambar 1. Skema proses deposisi lapisan tipis^[2].

Metode Sputtering

Sputtering adalah proses dimana pada permukaan bahan ditumbuki partikel berenergi, sehingga atom-atom bahan (target) terpercik keluar dan kemudian terdepositasi pada permukaan substrat (media yang dilapisi) membentuk lapisan tipis^[3].



Gambar 2. Skema sistem DC- Sputtering.



Gambar 3. Skema sistem vacuum evaporator.

Preparasi Substrat

Proses pembuatan substrat sensor yang berupa keping keramik alumina hingga akhirnya siap diberi lapisan tipis (*thin film*) semikonduktor ZnO:Al terdiri dari beberapa tahap.

1. Preparasi substrat setelah dipotong sesuai ukurannya.
2. Pembentukan pola pemanas (*heater*) dan elektroda dari lapisan emas.

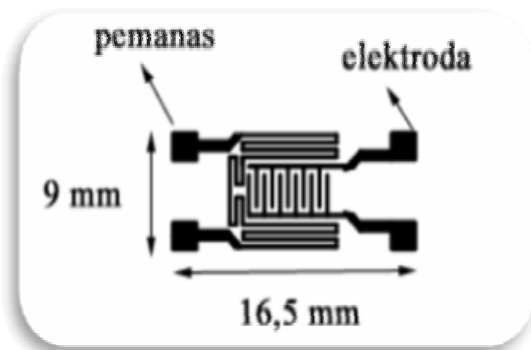
Dalam penelitian kali ini, mencoba dua jenis lapisan emas yang di deposisi menggunakan metode yang berbeda, PVD (*Physical Vapour Deposition*)

dan DC *Sputtering*. Keping substrat dengan lapisan emas yang telah berhasil dibentuk melalui proses deposisi menggunakan PVD (*Physical Vapour Deposition*) dibentuk pola *heater*/pemanas dan elektroda yang diinginkan menggunakan metode *Lithografi*. Sedangkan pembentukan lapisan emas yang dideposisi menggunakan DC *Sputtering*, menggunakan substrat yang telah dibentuk polanya dengan metode yang sama (*lithography*) hasil dari penelitian sebelumnya di PPET LIPI Bandung. Hal ini disebabkan karena untuk melakukan deposisi emas menggunakan metode DC *Sputtering* memerlukan biaya yang tidak sedikit, karena diperlukan target emas yang dibuat dari pelelehan emas murni dengan jumlah yang tidak sedikit (± 40 gram).

Tahapan pembuatan substrat sensor yang berupa keping keramik alumina pertama tama adalah preparasi substrat yang meliputi pemotongan bahan alumina sesuai ukuran, pembentukan pola pemanas (*heater*) dan elektroda sensor dari lapisan emas. Preparasi substrat ini dimaksudkan agar substrat yang digunakan bersih dari noda, minyak maupun debu yang dapat mengganggu proses deposisi lapisan elektroda emas (Au). Tahapan preparasi ini memerlukan alat berupa *Ultrasonic Cleaner* yang berguna untuk menghilangkan kotoran-kotoran pada substrat Al_2O_3 . Substrat yang akan digunakan dicuci dengan *acetone*, deterjen, *acetone*, dan *etanol* selama masing-masing 30 menit kemudian substrat dikeringkan selama 1 jam. Jika tahapan preparasi selesai, maka sampel disimpan dalam plastik klip dan disimpan ke tempat penyimpanan yang bebas debu.

Tahapan berikutnya adalah deposisi lapisan tipis dengan bahan sensor gas ZnO:Al dilakukan menggunakan metode DC *Sputtering*. Substrat yang digunakan adalah alumina yang memiliki lapisan emas dengan pola pemanas dan elektroda dengan konduktansi yang relatif baik. Target ZnO:Al dipasang pada katoda sedangkan substrat alumina dipasang pada anoda pemegang (*holder*), di dalam tabung reaktor *sputtering* selanjutnya pemanas substrat dan kabel kontrol suhu dihubungkan ke catu daya. Reaktor *sputtering* dihampakan (vakum) dengan pompa rotary torr selama 30 menit hingga diperoleh kevakuman tabung *sputtering* mencapai orde 10^{-2} Torr, kemudian *chiller termocirculator* dihidupkan untuk mendinginkan sistem pemanas selama 15 menit. Setelah tekanan mencapai 10^{-5} Torr, gas argon dialirkan ke dalam tabung *sputtering* hingga diperoleh tekanan kerja 3×10^{-2} Torr. Bahan target dipanaskan pada suhu $250^{\circ}C$ dengan sistem pemanas yang dipasang pada anoda. Sistem tegangan tinggi DC dihidupkan dan diatur

pada nilai yang diinginkan yaitu sebesar 2,5 kV dan arus 50 mA. Selanjutnya deposisi lapisan tipis ZnO:Al dilakukan dengan waktu yang bervariasi.



Gambar 4. Pola sensor gas.

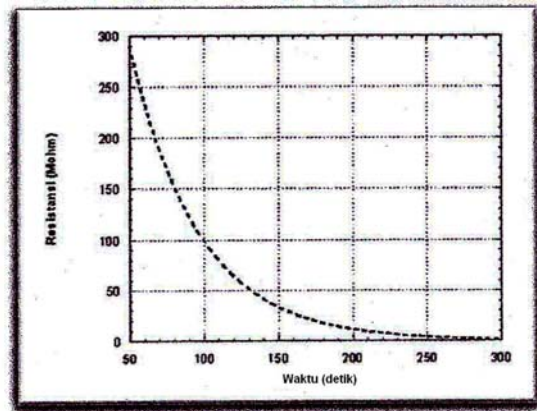
Gambar 4. Pola sensor gas di atas merupakan pola pembuatan sensor gas hasil dari penelitian sebelumnya di PPET LIPI Bandung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

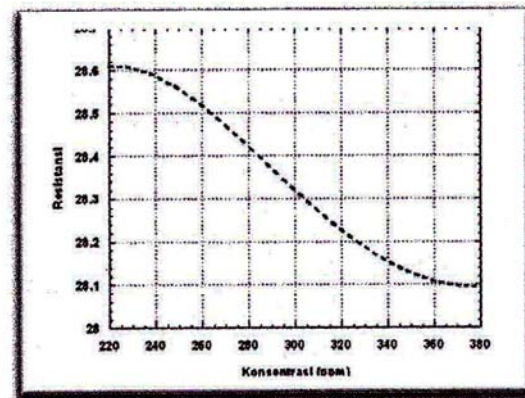
Respons Gas

Penentuan suhu kerja sensor sangat diperlukan karena pada rentang suhu tertentu, lapisan tipis ZnO:Al dapat berfungsi sebagai sensor gas. Hasil pengamatan tentang penentuan suhu kerja sensor ditunjukkan seperti pada Gambar 5. Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin suhunya naik maka resistansi cenderung menurun dan mulai stabil pada kondisi suhu di atas 250 °C. Ini berarti bahwa, nilai resistansi pada kondisi tertentu sudah tidak terpengaruh (pengaruhnya sangat kecil) oleh kenaikan suhu. Pada kondisi rentang suhu 250 °C, bahan ZnO:Al dapat berfungsi sebagai sensor gas. Rentang suhu itu dikenal sebagai suhu kerja sensor ZnO:Al. Pada suhu kerja tersebut, perubahan sensitivitas dari sensor gas tidak dipengaruhi (diakibatkan) oleh panas tetapi disebabkan adanya proses serapan gas yang mengenai permukaan bahan sensor. Pada saat melaksanakan pengujian, suhu kerja yang digunakan adalah 250 °C.

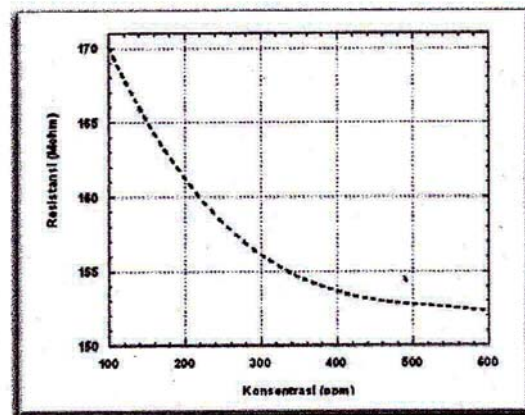
Karakteristik dinamis dari respons gas untuk waktu sputtering 1; 1,5; dan 2 jam ditampilkan pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.



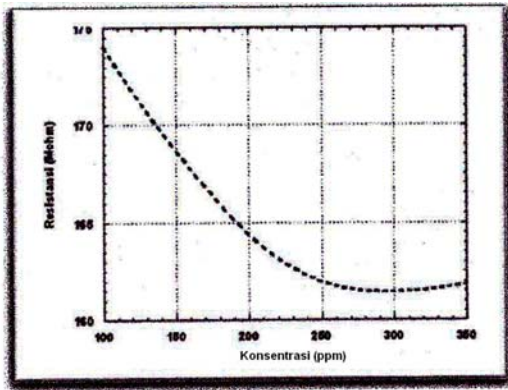
Gambar 5. Respon Sensor gas terhadap waktu.



Gambar 6. Respon sensor deposisi 1 jam dengan variasi konsentrasi.



Gambar 7. Respon sensor deposisi 1,5 jam dengan variasi konsentrasi.



Gambar 8. Respon sensor deposisi 2 jam dengan variasi konsentrasi.

Respons sensor pada variasi konsentrasi deposisi 1 jam, optimum pada detik ke 140, sedangkan pada deposisi 1,5 jam respons tanggap pada detik ke 180. Pada deposisi 2 jam gas memberi respon dengan baik pada detik ke 90.

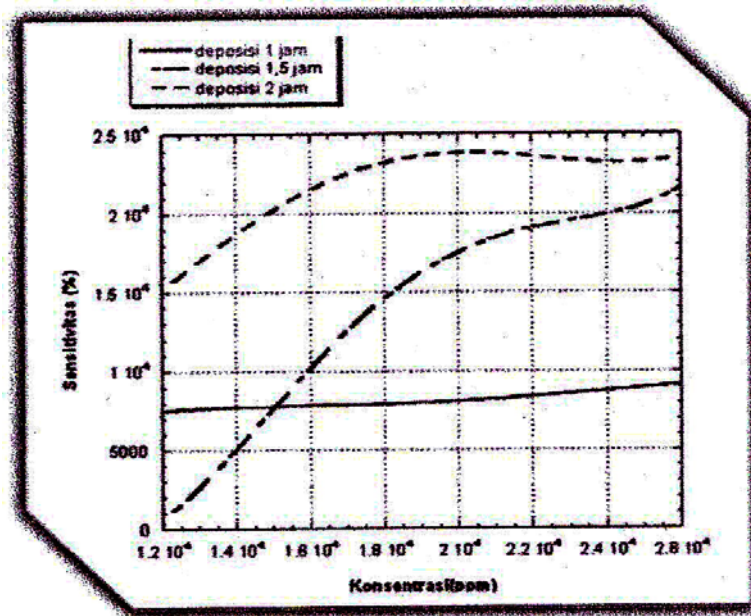
Sensitivitas

Sensitivitas sensor gas didefinisikan sebagai kemampuan dari sensor untuk merespon kehadiran gas yang berhubungan dengan besarnya/banyaknya

pemberian zat. Masing-masing sensor memiliki nilai sensitivitas yang berbeda, untuk itu masing-masing sensor harus diamati dengan cermat. Hasil perhitungan dari penelitian sensitivitas sensor ZnO:Al terhadap konsentrasi gas etanol pada berbagai variasi waktu deposisi dapat dilihat pada lampiran. Nilai sensitivitas tertinggi dicapai pada deposisi 2 jam, yaitu 64,706 %.

Sensitivitas sensor dapat ditentukan dari respon terbaik sensor pada konsentrasi tertentu. Respon sensor paling baik ada pada substrat dengan deposisi lapisan tipis selama 2 jam. Hal ini dapat ditampilkan pada grafik Gambar 9.

Jika nilai sensitivitas sensor dibandingkan, maka hasil yang didapat sudah cukup besar. artinya sensor dengan bahan aktif ZnO:Al masih memiliki sensitivitas di atas 10%. Hal yang mungkin mempengaruhi nilai sensitivitas ini antara lain kualitas gas uji, termasuk perlakuan gas uji dan metode yang digunakan untuk pengenceran masih belum sempurna, sehingga nilai yang dihasilkan belum optimal. Grafik pada kedua sensor yang diujikan masih memperlihatkan nilai penurunan yang terlalu tajam di beberapa konsentrasi, misalnya pada konsentrasi uji 200-300 ppm, pada sensor ZnO:Al yang dideposisi selama 2 jam dan pada konsentrasi uji 500 ppm pada sensor ZnO:Al hasil deposisi selama 1 jam.

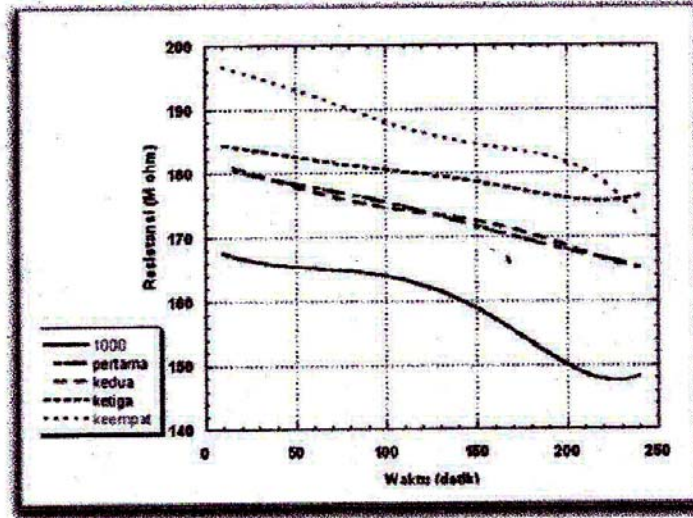


Gambar 9. Sensitivitas sensor pada proses deposisi 1;1,5; dan 2 jam.

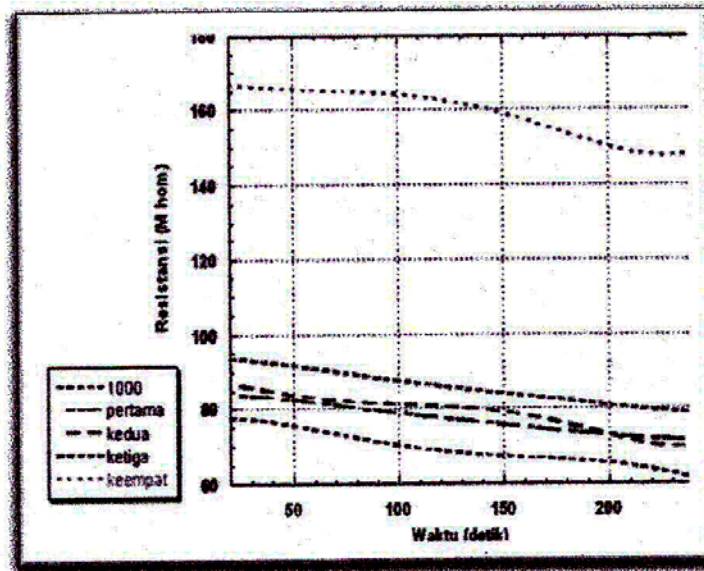
Respon Sensor Gas pada Pengujian Berulang

Pengujian ini dilakukan dengan memasukkan gas uji dengan konsentrasi yang sama secara berulang sebanyak lima kali. Dari hasil pengujian berulang, dapat dilihat bahwa kedua sensor memiliki sensitivitas yang semakin menurun. Hal ini terlihat dari grafik respon resistansi sensor yang

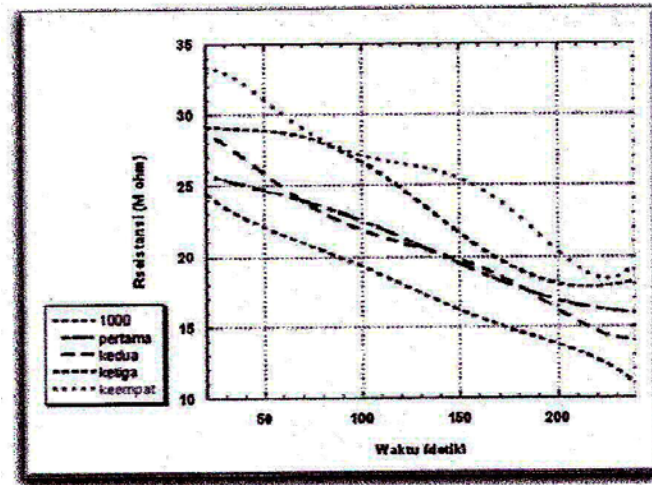
pada pengujian kedua hingga kelima selalu bergerak naik kembali, dengan waktu kestabilan yang pendek (Gambar 10, 11, 12), bahkan pada sensor dengan deposisi 1,5 jam pengulangan terakhir memiliki jarak yang berbeda jauh dengan pengulangan sebelumnya. Fenomena ini membuktikan bahwa sensor gas memiliki kemampuan terbaik dalam deteksi gas pada pengujian awal^[5].



Gambar 10. Respon sensor ZnO:Al hasil Deposisi 1 jam pada pengujian berulang.



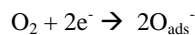
Gambar 11. Respon sensor ZnO:Al hasil Deposisi 1,5 jam pada pengujian berulang.



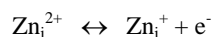
Gambar 12. Respon sensor ZnO:Al hasil Deposisi 2 jam pada pengujian berulang.

Mekanisme Penyerapan Gas

Berdasarkan pada penjelasan Dayan^[4], terdapat dua langkah untuk menjelaskan perubahan konduktansi listrik pada sebuah lapisan semikonduktor yang memiliki daya adsorpsi tinggi saat gas beracun seperti karbon monoksida mengenai permukaan film. Pertama, molekul oksigen di atmosfer teradsorpsi secara fisik pada permukaan pada saat bergerak pada satu bagian lapisan ke bagian lain. Molekul-molekul terionisasi dengan membawa sebuah elektron dari pita konduksi dan terionisasi pada permukaan sebagai O_{ads}^- . Hal ini dapat diilustrasikan dalam persamaan sebagai berikut.



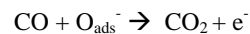
Selain itu, karena lapisan yang digunakan adalah ZnO, elektron-elektron juga terekstrasi dari *interstisi* atom-atom *zinc* Zn_i^{2+} (yang disebut sebagai suatu electron pendonor). Atom-atom *zinc interstisi* kemudian terionisasi lewat reaksi reversibel (hukum kekekalan muatan) berikut ini.



Pada langkah kedua, karbon monoksida sebagai gas pereduksi yang terdapat di udara lalu bereaksi dengan oksigen yang teradsorpsi, kemudian melepas sebuah electron kembali ke pita konduksi dan meningkatkan konduktansi semikonduktor atau mengurangi nilai resistivitas.

Dan ini mengurangi resistansi sensor, yang diakibatkan karena menurunnya pita penghalang di daerah sambungan, misalnya terdapat adanya gas

CO sebagai gas reduktor, yang terdeteksi maka persamaannya adalah sebagai berikut:



Bila suhu operasi mencapai 200 °C, CO_2 yang diproduksi tidak akan diserap kembali, hal ini mencegah permukaan untuk adsorpsi oksigen lebih lanjut. Pada sisi lain, jika suhu operasi terlalu tinggi (600 °C), maka oksigen secara fisik akan tidak teradsorpsi, akhirnya sensor bekerja hanya pada suhu yang spesifik.

KESIMPULAN

Dengan deposisi material ZnO:Al menggunakan metode DC-Sputtering telah dipreparasi lapisan tipis (*thin-film*). Berdasarkan pada respons gas hasil dari lapisan sensor, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Suhu operasi sensor diperoleh pada 250 °C.
2. Respons sensor pada variasi konsentrasi deposisi 1 jam optimum pada detik ke 140, sedangkan pada deposisi 1,5 jam respons tanggap pada detik ke 180. Pada deposisi 2 jam gas merespon dengan baik pada detik ke 90.
3. Hasil perhitungan dari penelitian sensitivitas sensor ZnO:Al terhadap konsentrasi gas etanol pada berbagai variasi waktu deposisi diperoleh nilai sensitivitas tertinggi pada deposisi 2 jam, yaitu 64,706 %.
4. Dari hasil pengujian berulang, dapat dilihat bahwa sensor memiliki sensitivitas yang semakin menurun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.fkui.or.id>, Anonim, *Standar Emisi Gas Buang Baru Ditetapkan*, 2003, Diakses Pada Tanggal 23 September 2006.
- [2] WASA. K., HAYAKAWA, S., *Handbook of Sputter Deposition Technology and Application*, Noyes Publication, New Jersey, 1992.
- [3] STUART. VR, *Vacum Tecnology*, Thin Film, Academic Press Inc, New York, 1983.
- [4] N.J. DAYAN, S.R. SAINKAR, R.N. KAREKAR, R.C. AIYER, *Formulation and Characterization of ZnO:Sb Thick Film Gas Sensors*, Thin Solid Films, p. 254-258, 1998.
- [5] PETER, T.I., *Design, Fabrication and Characterization of Thick-Film Gas Sensors*, Doctoral Thesis, Universitat Rovira iVirgili, Department d'Enginyeria Electronica, Tarragona, Spain, 2004.

Lampiran

Sensitivitas Sensor ZnO:Al terhadap Gas CO pada Berbagai Variasi Waktu Deposisi

konsentrasi (ppm)	Sensitivitas (%)		
	deposisi 1 jam	deposisi 1,5 jam	deposisi 2 jam
2,6	-	-	-
5,2	3,371	-	5,882
7,799	5,618	3,125	8,823
10,399	6,742	6,25	11,764
12,999	7,865	6,25	17,647
15,599	7,865	9,375	20,588
18,198	7,865	15,625	23,529
20,798	7,865	18,75	23,529
23,398	8,989	18,75	23,529
25,998	8,989	21,875	23,529

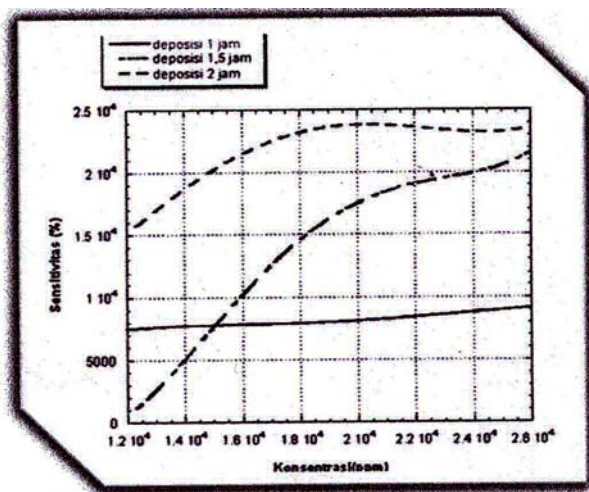
Penentuan nilai sensitivitas ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$S = (R_n - R_g) / R_n \times 100\%$$

Dengan R_n : resistansi sensor pada suhu kerja sebelum ada gas

R_g : resistansi sensor pada suhu kerja setelah ada gas

Grafik :



Daftar Sensitifitas untuk Menentukan Nilai Sensitifitas Tertinggi pada Deposisi 1Jam

R awal (M ohm)	158	160	167	178	172	172	196	161	167	181	192	156	167
R akhir (M ohm)	182	141	151	162	154	150	177	141	147	160	170	138	147
sensitivitas (%)	-	11,875	9,581	8,989	10,465	12,791	9,694	12,422	11,976	11,602	11,458	11,538	11,976

Daftar Sensitifitas untuk Menentukan Nilai Sensitifitas Tertinggi pada Deposisi 1,5 Jam

R awal (M ohm)	85	86	83	96	89	98	84	86	82	88	86	94	167
R akhir (M ohm)	90	70	70	77	70	88	68	75	69	75	68	80	147
sensitivitas (%)	-	18,605	15,663	19,792	21,348	10,204	19,048	12,791	15,854	14,773	20,930	14,894	11,976

Daftar Sensitifitas untuk Menentukan Nilai Sensitifitas Tertinggi pada Deposisi 2Jam

R awal (M ohm)	26	31	34	32	35	36	38	34	29	42	32	24	29
R akhir (M ohm)	28	16	12	15	24	24	27	21	17	32	17	19	18
sensitivitas (%)	-	48,387	64,706	53,125	31,429	33,333	28,947	38,235	41,379	23,810	46,875	20,833	37,931

Nilai sensitivitas tertinggi pada deposisi **2 jam**, yaitu : **64,706**

DISAIN BEJANA TEKAN SEBAGAI ISOLATOR TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA

Sutadi, Saminto, Sukidi, Suprpto

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Badan Tenaga Nuklir Nasional

ABSTRAK

DISAIN BEJANA TEKAN SEBAGAI ISOLATOR TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA. Telah dilakukan pembuatan disain bejana tekan sebagai isolator tegangan tinggi pada MBE 300 keV/20 mA. Disain memuat analisis perhitungan untuk menentukan spesifikasi teknis serta gambar detil dari hasil rancangan bejana tekan, berdasarkan energi optimum berkas elektron serta material bejana dan gas isian yang digunakan. Berdasarkan pertimbangan teknis dipilih bahan bejana tekan dari material SS-304 dan sebagai medium isolator dipilih gas isian berupa campuran gas N₂ (50 %) dengan gas CO₂ (50 %). Sesuai hasil perhitungan maka untuk mengisolasi tegangan tinggi pada tabung pemercepat elektron, dibutuhkan ukuran diameter dalam bejana tekan 75 cm, tebal dinding 5 mm, serta tebal flange 3 cm. Berdasarkan jenis gas isian yang akan digunakan, untuk menghasilkan gradien tegangan dadal yang optimum dibutuhkan tekanan minimum 7 kg/cm² dan tekanan maksimum dibatasi 14 kg/cm² agar dinding bejana masih mampu menahan beban tekanan gas isian yang ada pada saat MBE dioperasikan. Disain bejana tekan ini berguna sebagai referensi pada tahap konstruksi bejana tekan untuk menunjang program rancangbangun MBE 300 keV/20 mA untuk industri lateks di PTAPB-BATAN.

Kata kunci : bejana tekan, isolasi tegangan tinggi, mesin berkas elektron

ABSTRACT

DESIGN OF PRESSURE TANK AS HIGH VOLTAGE INSULATOR FOR THE 300 keV/20 mA ELECTRON BEAM MACHINE (EBM). Design of pressure tank as a high voltage insulator for EBM 300 keV/20 mA has been done. The design enclosed the calculation analysis to obtain the technical specification and its engineering drawing was, based on the optimum energy, tank material and filled gas properties. Based on the technique consideration, it has been chosen the SS-304 as the material of pressure tank and the mixture of N₂ (50 %) + CO₂ (50 %) as the insulator media. According to the calculation result, for insulating the high voltage at accelerator tube, it is needed the inlet diameter of pressure tank about 75 cm, the wall thickness about 5 mm, and the flange thickness is about 3 cm. Based on the filled gase, for obtaining the optimum voltage gradient prevent the breakdown voltage it was needed 7 atm of minimum pressure and the maximum pressure about 14 atm in such way that the tank wall is still capable to cover the gas pressure when the EBM is operated. This design is useful as the reference for construction the pressure tank for support the 300 keV/20 mA EBM engineering at PTAPB-BATAN.

Keyword : pressure tank, high voltage insulation, electron beam machine.

PENDAHULUAN

Dalam rangka menunjang program rancang bangun mesin berkas elektron (MBE) 300 keV/20 mA untuk industri lateks di PTAPB-BATAN, dibutuhkan sistem penyungkup tegangan tinggi pemercepat pada lokasi tabung pemercepat, untuk mencegah kemungkinan terjadinya dadal listrik (*breakdown voltage*) pada saat MBE dioperasikan.

Sesuai dengan hasil rancangan dasar (*basic design*) telah dapat ditentukan spesifikasi dasar dari penyungkup tegangan tinggi pemercepat berupa suatu bejana tekan dari bahan SS-304 dengan

ukuran diameter dalam 75 cm dan tebal dinding minimal 4 mm, dan sebagai medium isolator digunakan campuran gas N₂ (50 %) dengan gas CO₂ (50 %) dengan tekanan 7 atm sampai dengan 14 atm.^[1]

Untuk merencanakan bejana tekan lebih lanjut perlu dilakukan analisis perhitungan termasuk penentuan flange, baut pengikat, gasket perapat sambungan, serta pembuatan gambar teknis.

Berdasarkan hasil disain akan diperoleh dokumen yang berisi spesifikasi teknis bejana tekan yang berguna sebagai referensi pada tahap konstruksi bejana tekan, yang dapat dipahami dan dikerjakan oleh pihak bengkel pembuat.

DASAR TEORI

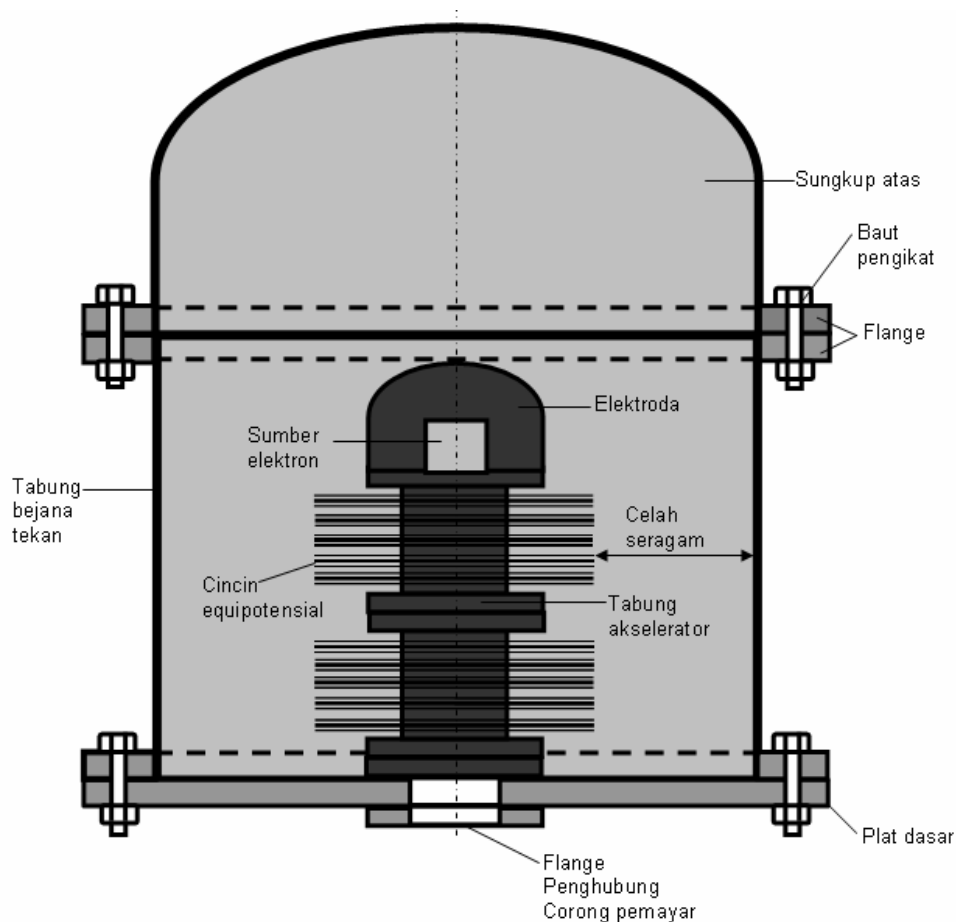
Pada operasi mesin berkas elektron (MBE) akan timbul medan listrik tegangan tinggi pada lokasi sekitar tabung pemercepat dan sumber elektron, sehingga dibutuhkan suatu sistem yang berfungsi sebagai medium isolator. Hal ini berguna untuk mencegah terjadinya *breakdown voltage* yang dapat mengganggu keamanan dan keselamatan pada saat MBE dioperasikan.^[2]

Salah satu teknik untuk mengisolasi tegangan tinggi pada MBE adalah dengan mengungkus tabung akselerator dalam suatu bejana tekan berisi gas yang bersifat sebagai medium isolator dengan tekanan tertentu sesuai dengan tingkat energi berkas elektron.^[3] Untuk memperoleh konstruksi bejana tekan yang handal, perlu dilakukan perencanaan yang mendalam meliputi : ukuran tebal dinding,

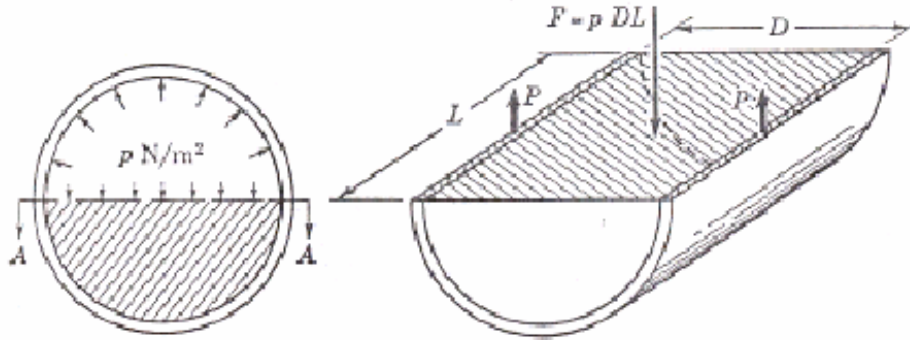
baut pengikat sambungan, flange, gasket, serta pembuatan gambar teknis detail dari bejana tekan yang dimaksud.

Adapun skema konstruksi bejana tekan sebagai penyungkup tabung akselerator untuk mengisolasi tegangan tinggi pada MBE 300 keV/20 mA dapat dilukiskan seperti Gambar 1 berikut :^[1]

Berdasarkan literatur tentang bejana tekan terdapat korelasi erat antara tekanan gas isian, ukuran diameter bejana, kekuatan tarik bahan, serta ukuran tebal dinding bejana. Pada bejana tekan gas isian akan menimbulkan gaya pecah yang bekerja di setiap titik dinding silinder baik arah melintang maupun longitudinal, di mana gaya pecah yang timbul akan mengakibatkan tegangan pada bahan bejana. Adapun penampang bejana tekan ini dapat dilukiskan seperti pada Gambar 2 berikut :^[4]



Gambar 1. Skema konstruksi bejana tekan sebagai isolator tegangan tinggi pada MBE 300 keV/20 mA.



Gambar 2. Ilustrasi gaya pecah pada penampang longitudinal bejana tekan.

Gaya pecah F akan menimbulkan tegangan pada penampang longitudinal dari luas kedua potong permukaan bejana. Besarnya tegangan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut :^[4]

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{p \cdot D \cdot L}{2 \cdot t \cdot L} \quad (1)$$

dengan :

- σ = Tegangan yang timbul pada penampang longi-tudinal akibat gaya pecah F (kg/cm²)
- F = Gaya pecah akibat tekanan gas isian (kg)
- A = Luas penampang longitudinal dinding bejana tekan (cm²)
- P = Tekanan gas isian yang berada dalam bejana tekan (kg/cm²)
- D = Diameter bejana tekan (cm)
- L = Panjang / tinggi bejana tekan (cm)
- t = Tebal dinding bejana tekan (cm)

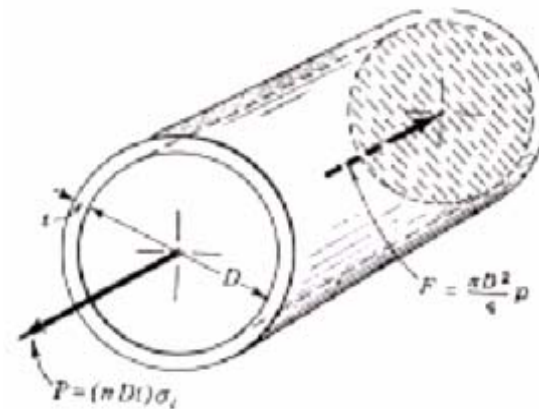
Secara empiris dapat ditentukan ukuran tebal dinding bejana tekan berdasarkan tekanan gas isian dan ukuran diameter bejana serta tegangan yang bekerja sesuai dengan persamaan :^[4]

$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot t}, \text{ atau } t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_t} \quad (2)$$

dengan :

- σ_t = Tegangan tarik pada penampang longitudinal bejana tekan (kg/cm²)
- P = Tekanan gas isian yang berada dalam bejana tekan (kg/cm²)
- D = Diameter bejana tekan (cm)
- t = Tebal dinding bejana tekan (cm)

Pada penampang transversal, terlihat bahwa gaya pecah F yang bekerja pada ujung silinder ditahan oleh resultante gaya sobekan P yang bekerja pada penampang melintang, seperti dilukiskan pada Gambar 3^[4].



Gambar 3. Ilustrasi gaya pecah pada penampang transversal bejana tekan.

Luas penampang melintang adalah tebal dinding dikalikan keliling rerata, atau $\pi(D + t)$. Apabila t relatif kecil dibanding D , maka besarnya = $\pi \cdot D \cdot t$. Dengan demikian dapat ditentukan persamaan gaya pecah pada penampang transversal sebagai berikut :^[4]

$$P = F, \text{ atau } \pi \cdot D \cdot t \cdot \sigma_t = \pi/4 \cdot D^2 \cdot p \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{4 \cdot t} \quad (4)$$

Besarnya tegangan pada penampang transversal akan bernilai setengah dari tegangan pada penampang longitudinal, sehingga untuk tekanan kerja yang direncanakan kekuatan sambungan pada penampang longitudinal harus dinaikkan dua kali lipat.

TATA KERJA

Perhitungan Tebal Dinding

Berdasarkan literatur dan hasil kajian teknis telah diperoleh data kemampuan dari bahan bejana tekan dan gas isian yang dipilih untuk digunakan sebagai berikut :^[1]

1. Baja tahan karat (*stainless steel*) type 304 mempunyai harga batas tegangan tarik sebesar 510 MPa (5033,31 kg/cm²).
2. Gas isian campuran N₂ (50 %) + CO₂ (50 %) pada tekanan 100 Psi (7 kg/cm²) mampu menghasilkan gradien tegangan dadal sebesar 620 kV/inchi.

Sesuai dengan ukuran diameter cincin equipotensial dari tabung akselerator yang akan digunakan sebesar 35 cm^[6], dan asumsi lebar celah masing masing 20 cm, maka dapat ditentukan ukuran diameter dalam dari bejana tekan sebagai pengungkung tabung akselerator yang direncanakan adalah sebesar 35 cm + (2 × 20 cm) = 75 cm.

Untuk memberikan jaminan keselamatan diambil konstanta faktor keamanan. Adapun untuk bahan bejana diambil angka keamanan $f_b = 4$ dan untuk gas isian diambil harga angka keamanan $f_g = 2$.

Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan ukuran tebal dinding bejana tekan, di mana berdasarkan persamaan (2) dengan gas isian berupa campuran antara N₂ (50 %) + CO₂ (50 %), dapat ditentukan besaran yang ada sebagai berikut :

- Tekanan P dari gas isian (N₂ (50 %) + CO₂ (50 %)) = $P_{gas} \times f_g = 7 \text{ kg/cm}^2 \times 2 = 14 \text{ kg/cm}^2$.
- Batas tegangan tarik ijin bahan SS-304 (σ_{ti}) = $\sigma_t : f_b = 5033,31 \text{ kg/cm}^2 : 4 = 1258,33 \text{ kg/cm}^2$.
- Diameter dalam bejana tekan $D = 75 \text{ cm}$.

Sehingga berdasarkan persamaan (2) dan besaran yang telah dapat ditentukan, diperoleh ukuran tebal dinding bejana minimum sebesar $t = 0,417 \text{ cm} = 4 \text{ mm}$. Namun demikian untuk

meningkatkan faktor keselamatan, ditetapkan $t = 5 \text{ mm}$.

Perhitungan Flange, Gasket, dan Baut

Untuk menentukan ukuran *Flange*, gasket (perapat) dan baut didasarkan pada tekanan gas dalam bejana, diameter dalam bejana dan diameter luar bejana yaitu :

1. Tekanan maksimum dalam bejana yang direncanakan (P) = 200 Psi (14 atm).
2. Diameter dalam bejana (ID) = 75 cm = 29,53 inch.
3. Tebal bejana = 5 mm = 0,20 inch.
4. Diameter luar bejana (OD) = 29,53 + (2 × 0,20) inch = 29,93 inch.
5. Temperatur maksimum yang diijinkan = 300 °F

Parameter yang diperlukan untuk *flange*, gasket, dan baut adalah :

a. Flange :

- Bahan flange : SS-304.
- Tegangan maksimum yang diijinkan (σ_b) : 18742,54 psi^[4].

b. Gasket :

- Bahan : Karet Viton
- Faktor Gasket (m) : 2,75
- Tegangan tekan minimum (y) : 3700 psi^[1]

c. Baut :

- Bahan : SS-304
- Tegangan maksimum yang diijinkan (σ_b) : 18742,54 psi^[4].

Penentuan Diameter Gasket

Dengan asumsi tebal gasket = 0.236 inch (6 mm), maka diameter gasket ditentukan dengan persamaan :^[5]

$$\frac{d_o}{d_i} = \left[\frac{Y - P \cdot m}{Y - P(m+1)} \right]^{0,5} \quad (5)$$

dengan, d_o diameter luar gasket (inchi), d_i diameter dalam gasket (inchi), P tekanan gas yaitu 200 Psi, m faktor gasket (2,75) dan y tegangan dukung minimum yaitu 3700 psi.^[5]

Dari persamaan (5) diperoleh : $\frac{d_o}{d_i} = 1,01$

dengan asumsi diameter dalam gasket $d_i >$ diameter luar bejana ($\geq 0,5$ inchi)^[5], diperoleh :

$$d_i = 0,5 + OD = 0,5 + 29,93 = 30,43 \text{ inchi}$$

$$d_o = 1,01 \times d_i = 30,73 \text{ inchi}$$

sehingga diperoleh :

a. Diameter penampang gasket minimum

$$N = \frac{d_o - d_i}{2} = 0,15 \text{ inchi} = 4 \text{ mm, ditetapkan}$$

$$N = 6 \text{ mm} = 0,236 \text{ inchi.}$$

b. Lebar dudukan gasket

$$b = N = 0,236 \text{ inch} = 6 \text{ mm}$$

c. Diameter luar gasket

$$G = 2N + d_i = (2 \times 0,236) \text{ inchi} + 30,43 \text{ inchi} = 30,90 \text{ inchi}$$

Perhitungan Ukuran Baut

a. Beban tekanan dari dalam

$$H = \frac{\pi \cdot G^2}{4} P = 0,785 \times (30,90)^2 \times 200 \text{ lb/inchi}^2 = 149905,17 \text{ lb}$$

b. Beban sambungan saat tidak operasi

$$H_p = \pi \cdot G \cdot b \cdot m \cdot P = 3,14 \times 30,90 \times 0,236 \times 2,75 \times 200 = 12593,98 \text{ lb}$$

c. Beban operasi total

$$W_m = H + H_p = 149905,17 + 12593,98 = 162499,15 \text{ lb}$$

d. Luas baut minimum

$$Am = \frac{W_m}{\sigma_b} = \frac{162499,15 \text{ lb}}{18742,54 \text{ Psi}} = 8,67 \text{ inchi}^2$$

e. Jumlah baut minimum

$$N_{min.} = \frac{Am}{Root \ area} = 23,86 \text{ biji, ditetapkan}$$

jumlah baut flange $N = 24$ biji

Adapun spesifikasi baut flange berdasarkan ASME ditunjukkan pada Tabel 1.^[5]

f. Diameter luar flange

$$A = C + 2E = 32,74 + (2 \times 0,9375) = 34,62 \text{ inchi} = 87,93 \text{ cm.}$$

Penentuan tebal flange

Untuk menentukan tebal flange mengacu pada persamaan berikut :

$$t = \sqrt{\frac{y \cdot M_{maks}}{\sigma_f \cdot B}} \quad (6)$$

M_{maks} adalah momen maksimum pada kondisi operasi, yang besarnya ini merupakan penjumlahan momen-momen yang terjadi yaitu :

$$M_{maks} = M_D + M_G + M_T \quad (7)$$

a. Momen pada kondisi operasi (M_D)

- Gaya hidrostatik pada luas bagian dalam flange

$$H_D = 0,785 \cdot B^2 \cdot P = 0,785 \cdot (29,92)^2 \cdot 200 = 140547,40 \text{ lb}$$

- Jarak radius lingkaran baut ke lingkaran di mana H_D bekerja

$$h_D = (C - B) / 2 = (32,74 - 29,92) / 2 = 1,41 \text{ inchi}$$

- Momen akibat gaya hidrostatik terhadap jarak lingkaran baut flange

$$M_D = H_D \cdot h_D = 140547,4 \text{ lb} \times 1,41 \text{ inchi} = 198171,83 \text{ lb-inchi}$$

Tabel 1. Spesifikasi baut flange untuk bejana tekan.

Ukuran baut (inchi)	Root area	$N_{min.}$	$N_{act.}$	$B_s.$	R	$N \cdot B_s/\pi$	C	E
5/8	0,419	20,86	24	3	1,25	21,8	32,7	0,9375

Keterangan :

N_{act} = jumlah baut sesungguhnya

C = diameter lingkaran baut, inchi

= $ID + 2(1,415 go + R) = 32,74$ inchi

ID = diameter dalam bejana, inchi.

B_s = Jarak baut, inchi.

go = tebal standar = 0,25 inchi.

R = Minimum radial distance, inchi

E = jarak tepi, inchi.

b. Momen akibat perbedaan beban baut flange dan tekanan dalam bejana (M_G)

- Perbedaan beban baut flange dan tekanan dalam bejana

$$H_G = W_m - H = 162499,15 \text{ lb} - 149905,17 \text{ lb} = 1253,98 \text{ lb}$$

- Jarak radius reaksi beban gasket ke lingkaran baut

$$h_G = (C - G) / 2 = (32,74 - 30,90) / 2 = 0,92 \text{ inchi}$$

- Momen akibat gaya hidrostatis terhadap jarak lingkaran baut flange

$$M_G = H_G \cdot h_G = 1253,98 \text{ lb} \times 0,92 \text{ inchi} = 11586,46 \text{ lb-inchi}$$

c. Momen akibat perbedaan gaya hidrostatis total dan gaya hidrostatis pada luas bagian dalam flange (M_G)

- Perbedaan gaya hidrostatis total dan gaya hidrostatis luasan bagian dalam flange

$$H_T = H - H_D = 149905,17 \text{ lb} - 140547,4 \text{ lb} = 9357,77 \text{ lb}$$

- Jarak radius dari lingkaran baut ke lingkaran H_T

$$h_T = (h_D + h_G) / 2 = (1,41 + 0,92) / 2 = 1,165 \text{ inchi}$$

- Momen akibat perbedaan gaya hidrostatis terhadap jarak radius lingkaran baut

$$M_T = H_T \cdot h_T = 9357,77 \text{ lb} \times 1,165 \text{ inchi} = 10901,80 \text{ lb-inchi}$$

Jadi

$$\begin{aligned} M_{maks} &= M_D + M_G + M_T \\ &= (198171,83 + 11586,46 + 10901,80) \text{ lb-inchi} \\ &= 220660,09 \text{ lb-inchi} \end{aligned}$$

Tegangan ijin flange (σ_f) = 66717 Psi, diameter luar bejana (B) = 29,93 inch, y adalah tergantung nilai $K = A/B = 34,62/29,93 = 1,16$ dari grafik (Gambar 12.22)⁽⁵⁾ diperoleh harga $y = 12$

Jadi berdasarkan hasil perhitungan diperoleh tebal flange (t) = 1,15 inch = 29,21mm.

Pengelasan

- Jenis las melintang : Las tumpul
- Alur sambungan : Bentuk V

- Las flange dengan bejana : Las sudut
- Jenis elektrode las : Titania kapur
- Tegangan tarik maksimum elektrode : 61114,27 Psi (421,3 Mpa)
- Angka faktor keamanan : 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Disain bejana tekan ini memuat analisis perhitungan tentang suatu bejana tekan berisi gas isian yang diimplementasikan sebagai penyungkup tegangan tinggi pemercepat pada MBE dengan energi tertentu, guna mencegah terjadinya dadal listrik.

Untuk memberikan jaminan keselamatan pada perancangan bejana tekan ini, dalam analisis perhitungan ditetapkan angka faktor keamanan yang antara lain meliputi :

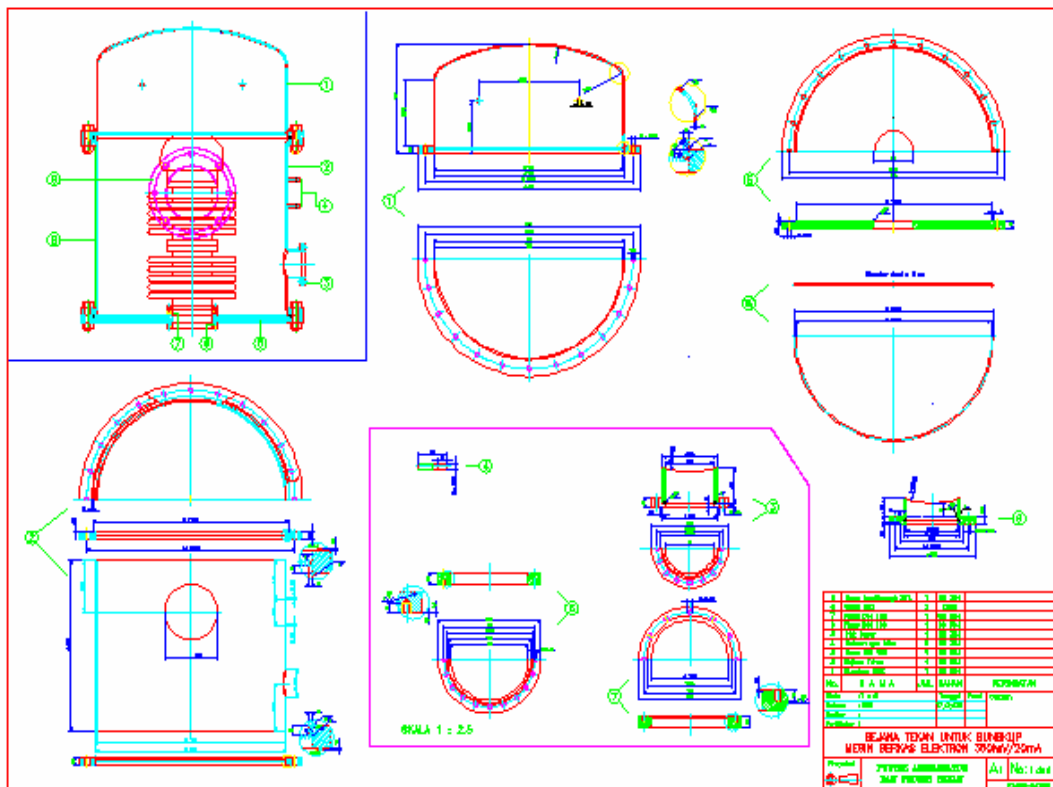
- Angka faktor keamanan dari bahan bejana tekan terhadap batas tegangan maksimal yang diijinkan, berdasarkan pertimbangan teknis ditetapkan sebesar 4 kali, dengan tujuan untuk mengantisipasi efek penuaan (*aging*) dan ketidakseragaman struktur dari material bejana ditinjau dari kekuatan mekanis.
- Angka faktor keamanan dari bahan gas isian terhadap karakteristik isolasinya yang berdasarkan pertimbangan teknis ditetapkan sebesar 2 kali. Hal ini dibutuhkan untuk mengantisipasi efek ketidakmurnian dari gas isian yang akan dimasukkan dalam bejana tekan, sehingga dapat mempertahankan unjuk kerja isolasinya.

Berdasarkan hasil rancangan telah dapat ditentukan spesifikasi teknis dari bejana tekan sebagai penyungkup tegangan tinggi pada MBE dengan bahan SS-304 dan tekanan maksimum gas isian 14 Atm, di mana berdasarkan hasil analisis perhitungan diharapkan sudah memenuhi syarat keselamatan untuk mengisolasi tegangan tinggi pada tabung pemercepat untuk MBE 300 keV/20 mA. Adapun spesifikasi teknis bejana tekan dari hasil disain ditampilkan pada Tabel 2.

Sesuai dengan hasil disain selanjutnya dapat dibuat gambar teknis detil dari bejana tekan, sebagai dokumen dan referensi pada tahap konstruksi. Adapun gambar teknis detil dari rancangan bejana tekan disajikan pada Gambar 4.

Tabel 2. Spesifikasi bejana tekan untuk MBE 300 keV/20 mA.

Komponen Bejana	Spesifikasi
Dinding bejana	Silinder berdiameter dalam 75 cm, tebal 5 mm
Flange	Diameter 89 cm, tebal 3 cm (SS-304)
Gasket	Oring seal ukuran diameter 6 mm (karet viton)
Sungkup atas	Silinder bertutup parabola, tinggi 42 cm, diameter 75 cm
Baut pengikat	Ukuran M 16 × panjang 8 cm (SS-304)
Nipel	Diameter ½ inchi, tebal 3 mm, panjang 5 cm (SS-304)
Tekanan operasi maksimum	14 atm.
Material bejana	SS-304



Gambar 4. Disain teknis bejana tekan untuk MBE 300 keV/20 mA.

Dalam gambar teknis rancangan detail bejana tekan ini dilengkapi dengan tambahan fasilitas flange untuk sumber tegangan tinggi dan sistem instrumentasi kendali, serta nepel-nepel untuk fasilitas valve isian gas, manometer tekanan, dan sensor tekanan gas isian.

KESIMPULAN

Dari hasil disain bejana tekan untuk MBE 300 keV/20 mA ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis dan pertimbangan teknis dipilih bahan bejana tekan dari material *Stainless Steel* type 304, dengan alasan : kuat dan lentur, tahan terhadap korosi dan suhu tinggi, relatif mudah dalam pengerjaan, serta mudah diperoleh di pasaran lokal.
2. Ukuran tebal dinding bejana tekan untuk mengisolasi tegangan tinggi pada MBE ditentukan oleh beberapa faktor antara lain : tekanan gas isian, diameter bejana, serta jenis bahan bejana yang digunakan, sesuai dengan energi optimum berkas elektron dan jenis gas isian yang akan dipergunakan.
3. Sesuai dengan bahan bejana dan gas isian yang akan digunakan, maka untuk mengisolasi tegangan tinggi pemercepat pada MBE 300 keV/20 mA, dibutuhkan ukuran diameter bejana 75 cm, tebal dinding bejana 5 mm, dan tebal flange 3 cm guna mencegah dadal listrik namun dinding bejana masih mampu menahan beban tekanan gas isian pada saat MBE dioperasikan.
4. Berdasarkan hasil disain telah diperoleh spesifikasi teknis dari bejana tekan yang berguna sebagai acuan pada tahap konstruksi lebih lanjut, dalam rangka menunjang program rancang bangun MBE 300 keV/20 mA di PTAPB-BATAN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Prof. Drs. Darsono, M.Sc. dan Ir. Djasiman atas segala masukan dan sarannya, serta bantuan dari rekan-rekan staf BTAFN sehingga dapat terselesaikan penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dokumen No. C7 B2/03/RD-7/05, *Rancangan Dasar Bejana Tekan Untuk MBE 300 keV/20 mA*, P3TM-BATAN, 2005.
- [2] J.D. CRAGGS, *High Voltage Laboratory Technique*, Butter worths Scientific, 1954.
- [3] M.S. LIVINGSTONE, *Particle Accelerator*, Mc. Graw Hill, 1962.
- [4] S. DARWIN, *Kekuatan Material*, Erlangga, Jakarta, 1985.

- [5] L.E. BROWNELL, *Vessel Design*, Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1979.

TANYA JAWAB

Sudaryadi

- Mengingat tekanannya 14 atm, apakah sudah diperhitungkan faktor keselamatannya?

Sutadi

- Pada disain bejana tekan ini sudah diperhitungkan faktor keselamatannya dimana dengan memberikan faktor keamanan 4× untuk kekuatan material bejana yang dipilih maka untuk tekanan kerja 14 atm bejana tekan sudah mempunyai faktor keselamatan sebesar 4× sehingga dijamin aman.

Apri Susanto

- Apakah mungkin bejana tekan ini bisa menggunakan MBE yang sudah ada?
- Kapasitas yang dihasilkan dari bejana tekan sampai seberapa besar?
- Bisakah MBE ini dikembangkan dengan tenaga yang lebih tinggi?
- Bisakah MBE ini dapat diaplikasikan oleh industri dengan harga ekonomis? Terjangkau oleh masyarakat umum.

Sutadi

- Secara teknis bisa karena tingkat energinya masih sama.
- Kapasitas berdasarkan tekanan mampu untuk menumpu tekanan s/d 15 atm. Kapasitas berdasarkan gradien tegangan dadal mampu untuk mengkaver tegangan tinggi s/d 400 kV.
- Bisa, tergantung kapasitas tabung akselerator dan tegangan tinggi, serta sumber elektron yang akan digunakan.
- Secara masal bisa, tergantung jenis aplikasinya.

RANCANGAN PERISAI RADIASI MESIN BERKAS ELEKTRON 300 kV/20 mA UNTUK IRRADIASI LATEKS ALAM

Rany Saptaja, Sutadi, Setyo Atmojo

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Badan Tenaga Nuklir Nasional

ABSTRAK

RANCANGAN PERISAI RADIASI MESIN BERKAS ELEKTRON 300 kV/20 mA UNTUK IRRADIASI LATEKS ALAM. Telah dibuat rancangan perisai radiasi mesin berkas elektron (MBE) 300 kV/20 mA pada daerah terkontrol. Dengan beroperasinya mesin berkas elektron, maka timbul sinar X yang dapat membahayakan keselamatan dan kesehatan manusia apabila dosisnya berlebihan. Oleh karena itu antara MBE dengan daerah kerja (daerah terkontrol) perlu diberi perisai radiasi demi keselamatan pekerja dari bahaya radiasi. Perisai radiasi berfungsi untuk menahan/mengurangi sinar X yang diterima pekerja radiasi. Rancangan perisai radiasi ini meliputi penentuan bentuk, dimensi, bahan, dan gambar kerja, dengan mempertimbangkan besarnya sumber radiasi sinar X dan bahan perisai yang digunakan. Perisai radiasi antara MBE dengan daerah kerja dibuat dari bahan timbal (Pb) dengan tebal 2,5 cm, dengan ketentuan laju dosis paparan radiasi $\leq 2,5$ mrem/jam.

Kata kunci: sinar X, perisai radiasi, mesin berkas elektron

ABSTRACT

DESIGN OF RADIATION SHIELDING OF 300 kV/20 mA ELECTRON BEAM MACHINE (EBM) FOR NATURAL LATEX IRRADIATION. Design of the radiation shielding for controlled area of 300 kV/20 mA electron beam machine has been done. When electron beam machine is in operation, the X rays will be produced. It is a dangerous for healthy and personal safety, when the radiation dose greater than the permissible dose. Therefore between the EBM and working area are necessary to be constructed a radiation shielding for safety personel from radiation hazard. The function of radiation shielding is to shield or to reduce X rays. The design of radiation shielding consists of determination of model, dimension, material, and drawing of radiation shielding, and then considerate of X ray source and the type of shielding material. The radiation shielding between EBM and working area were made from Plumbum (Pb) with thickness of 2.5 cm, with the permissible exposure dose rate of 2.5 mrem/hour.

Key words: X ray, radiation shielding, electron beam machine

PENDAHULUAN

Salah satu program BATAN adalah membangun mesin berkas elektron (MBE) 300 kV/20 mA untuk irradiasi lateks alam, yang pelaksanaannya dikerjakan di Bidang Teknologi Akselerator dan Fisika Nuklir PTAPB Yogyakarta. Dalam pengoperasian mesin berkas elektron harus diikuti dengan pelaksanaan kegiatan yang berpedoman kepada perundangan yang berlaku. Pelaksanaan kegiatan ini dimulai sejak perancangan sampai tingkat komisiuning dan berlaku pula ketika MBE dioperasikan. Salah satu bagian yang menjadi perhatian adalah keselamatan personil dari bahaya radiasi yang ditimbulkan MBE ketika beroperasi. Peraturan proteksi radiasi dan ketentuan keselamatan kerja terhadap radiasi

didasarkan pada prinsip bahwa, bekerja dengan menggunakan sumber radiasi pengion dapat dan boleh dilakukan dengan cara membatasi dosis radiasi yang diterima oleh seseorang (pekerja radiasi) sampai serendah mungkin.

Dalam mesin berkas elektron, partikel elektron yang dipercepat di dalam tabung pemercepat akan menghasilkan berkas elektron dengan energi yang cukup tinggi dengan arus berkas tertentu. Berkas elektron energi tinggi akan ditembakkan/dikenakan pada bahan target. Akan tetapi sebelum mengenai target, berkas elektron mengenai material sepanjang lintasannya. Akibat interaksi antara berkas elektron dengan material sepanjang lintasannya, akan menghasilkan sinar X. Secara teori sinar X berenergi tinggi cukup berbahaya bagi kesehatan dan keselamatan manusia.

Semakin besar tegangan pemercepat MBE, maka semakin tinggi energi sinar X yang dibangkitkan. Demikian pula semakin besar arus berkas elektron yang digunakan, maka semakin besar intensitas radiasi sinar X yang dibangkitkan. Kondisi ini akan menyebabkan besar kecilnya laju dosis paparan pada suatu tempat. Oleh karena itu, fungsi perisai radiasi menjadi sangat penting dalam memberikan keselamatan bagi operator maupun lingkungan dari bahaya sinar X. Perhitungan ketebalan perisai radiasi akan menentukan kemampuannya dalam menyerap radiasi sinar X. Fungsi perisai radiasi harus memenuhi ketentuan keselamatan yang dikeluarkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), yang intinya adalah ruang penyinaran harus didesain sedemikian rupa sehingga paparan radiasi pada ruang terkontrol (*control area*) tidak melebihi 25 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ (2,5 mrem/jam).

Berdasarkan hal tersebut maka perlu dirancang perisai radiasi antara MBE dengan daerah kerja sebagai pengaman radiasi pada saat MBE beroperasi. Perisai radiasi ini direncanakan menggunakan bahan-bahan yang cukup efektif untuk menyerap sinar X, seperti timbal atau besi. Perisai radiasi yang dirancang sebagian besar merupakan konstruksi mekanik yang berfungsi untuk menahan/mengurangi radiasi sinar X yang timbul akibat beroperasinya MBE, sehingga tidak membahayakan bagi orang yang bekerja di sekitar MBE. Ketebalan perisai radiasi dirancang berdasarkan pada besarnya energi dan arus berkas elektron maksimum yang dihasilkan oleh MBE. Berikut ini disampaikan rancangan perisai radiasi sinar X untuk MBE 300 kV 20 mA dengan menggunakan bahan timbal dan besi.

TEORI

Sinar X akan terbentuk apabila zarah ringan bermuatan, misalnya elektron oleh pengaruh gaya inti atom bahan mengalami perlambatan. Sinar X yang merupakan gelombang elektromagnet yang terbentuk melalui proses ini disebut sinar X *bremstrahlung*. Sinar X yang terbentuk dengan cara demikian mempunyai energi paling tinggi sama dengan energi kinetik zarah bermuatan pada waktu terjadinya perlambatan. Pada proses *bremstrahlung* sinar X mempunyai kemungkinan dipancarkan ke segala arah.

Jenis radiasi yang mempunyai potensi bahaya bila berada di luar tubuh (eksternal) adalah radiasi neutron, sinar gamma maupun sinar X, sebab mempunyai jangkauan yang panjang, daya tembus

besar dan bersifat pengion. Radiasi pengion adalah radiasi yang apabila melintasi bahan atau jaringan biologi dapat mengionisasi bahan atau sel jaringan. Proses ionisasi selalu mengubah atom atau molekul, sehingga dapat mengubah struktur molekul yang mengandung atom itu. Jika molekul yang terpengaruh ada dalam sel yang hidup, kadang-kadang sel itu dapat rusak, baik secara langsung, yaitu jika molekul memegang peran menentukan bagi sel; maupun secara tidak langsung melalui perubahan kimia yang terjadi dalam molekul di dekatnya, misalnya melalui terbentuknya radikal bebas.

Manusia menerima paparan radiasi yang berasal dari alam (sinar kosmik), sumber radiasi untuk medik (kedokteran), industri dan pekerjaan yang melibatkan pemakaian zat radioaktif dan atau sumber radiasi. Dosis radiasi sekecil apapun sudah dianggap mempunyai efek terhadap jaringan tubuh, meskipun efek tersebut baru terlihat bila dosisnya melebihi dosis ambang. Untuk sumber radiasi yang mempunyai potensi bahaya eksternal, penerimaan radiasi dapat dikurangi dengan pengendalian sebagai berikut: pembatasan jangka waktu kerja pada daerah medan radiasi, pembatasan jarak terhadap sumber radiasi, dan penggunaan perisai radiasi.

Dalam kaitannya dengan bahan perisai untuk radiasi sinar X, umumnya dipakai bahan yang mempunyai densitas tinggi seperti beton, besi dan timbal, karena bahan tersebut cukup efektif untuk menyerap radiasi gamma dan sinar X^[1]. Perisai radiasi yang dipakai disini harus mampu menahan radiasi sinar X yang timbul akibat beroperasinya MBE, sehingga tidak membahayakan bagi pekerja yang berada di luar ruang MBE. Syarat agar pekerja radiasi tidak menerima dosis melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nasional, yaitu 50 mSv/tahun, maka laju dosis di luar MBE harus $\leq 25 \mu\text{Sv}/\text{jam}$ (2,5 mrem/jam).

Pada umumnya, setiap radiasi nuklir yang melewati suatu bahan akan berinteraksi dengan unsur penyusun bahan, yang berakibat terpindahnya energi radiasi kepada unsur tersebut. Perpindahan energi akan menyebabkan radiasi terserap dalam bahan tersebut, dimana besar kecilnya jumlah berkas radiasi yang lolos akan tergantung pada besarnya nilai koefisien serapan linier bahan dan tebal bahan. Jika bahan perisai terdiri dari unsur yang murni, maka hubungan antara intensitas radiasi sebelum dan sesudah melewati bahan perisai dapat dinyatakan dengan persamaan 1^[2].

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

dengan:

I_0 = intensitas radiasi sebelum melewati bahan

I = intensitas radiasi setelah melewati bahan

μ = koefisien serapan linier bahan (cm^{-1})

x = tebal bahan perisai (cm)

Jika I_0 dapat diukur, x diketahui, maka I dapat dihitung atau diukur. Apabila bahan perisai terdiri dari beberapa unsur, maka μ bahan perisai dihitung terlebih dahulu berdasar μ dan fraksi berat masing-masing unsur pembentuk bahan perisai^[3] Pernyataan ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 2.

$$(\mu/\rho)_b = \sum w_i (\mu/\rho)_i \quad (2)$$

dengan:

$(\mu/\rho)_b$ = koefisien serapan massa bahan (cm^2/gram)

$(\mu/\rho)_i$ = koefisien serapan massa unsur penyusun bahan (cm^2/gram)

w_i = fraksi berat unsur penyusun bahan

Dalam pembuatan rancangan ini besarnya I_0 belum diketahui, sehingga digunakan metode lain untuk memperoleh ketebalan perisai, yaitu dengan persamaan umum perhitungan laju indeks dosis ekivalen, seperti ditunjukkan dalam persamaan 3 berikut^[4]:

$$B_x \geq (1,67 \times 10^{-5}) \left[\frac{H_m d^2}{D_0 T} \right] \quad (3)$$

dengan:

B_x = rasio transmisi perisai untuk sinar X

H_m = batas laju dosis maksimum yang digunakan (mrem jam^{-1})

d = jarak antara sumber sinar X dengan titik yang ditinjau

D_0 = indeks laju dosis terserap pada jarak acuan standar 1 m dari sumber sinar X ($\text{rads m}^2 \text{ menit}^{-1}$)

T = faktor penempatan

Untuk menghitung tebal perisai, harus dihitung terlebih dahulu banyaknya *tenth value layer* (TVL) dengan persamaan 4^[4].

$$n = \log (1/B_x) \quad (4)$$

dengan:

n = banyaknya TVL

Tebal perisai radiasi dapat dihitung menggunakan persamaan 5 berikut^[4]:

$$S = T_i + (n - 1) T_e \quad (5)$$

dengan:

T_i = TVL pertama yang langsung berhadapan dengan sumber

T_e = TVL berikutnya (setelah T_i)

S = tebal perisai

Untuk lebih amannya tebal perisai radiasi (S) direkomendasikan untuk ditambah 1 *half value layer* (HVL)^[5]. Sedangkan harga D_0 , T_i , T_e dan HVL dapat diperoleh dengan cara melihat/membaca kurva pada Gambar 1, 2, 3 dan Tabel 4 terlampir. D_0 dapat dihitung dengan membaca kurva pada Gambar 1. T_i dan T_e dapat dihitung dengan membaca kurva pada Gambar 2 dan 3. Sedangkan HVL dapat dilihat pada Tabel 4. Dari beberapa rumusan diatas diharapkan dapat memberikan pertimbangan rancangan yang lebih terinci serta pembuatan perisai radiasi yang lebih baik.

METODA PERHITUNGAN

Perhitungan Tebal Perisai

Untuk menentukan tebal perisai dari bahan timbal agar mampu menahan radiasi sinar X sehingga paparan radiasi menjadi $\leq 2,5$ mrem/jam, diperlukan perhitungan menggunakan persamaan 3, 4 dan 5 serta data teknis sebagai berikut:

MBE 300 keV/20 mA

E = 300 keV

I = 20 mA

d (90°) = 0,5 m

T = 1

H_m = 2,5 mrem/jam

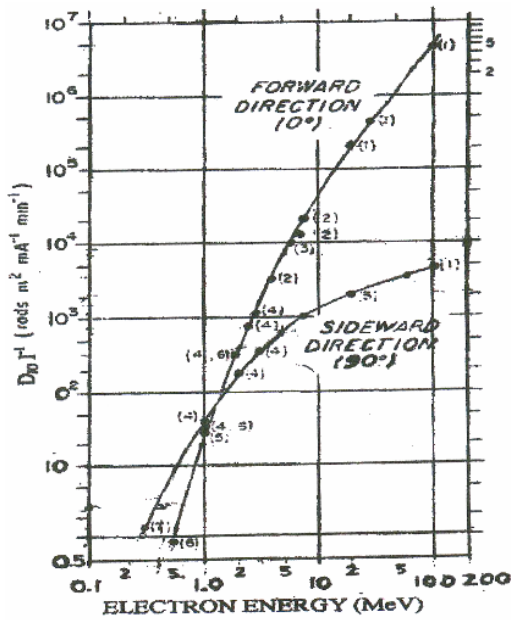
Perhitungan indeks laju dosis serap (D_0) pada arah 90° terhadap arah berkas elektron, pada jarak 1 meter dari sumber radiasi sinar X sebagai berikut:

Lihat kurva pada Gambar 1, dimana berkas elektron berinteraksi dengan bahan tungsten (W) dengan arah berkas 90° terhadap arah sinar X.

$$D_0(90^\circ, W) = 1,5 \text{ rad m}^2 \text{ mA}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

Untuk arus berkas = 20 mA, maka:

$$\begin{aligned} D_0(90^\circ, W) &= 20 \times 1,5 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \\ &= 30 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$



Gambar 1. X-ray emission rates from high-Z targets^[4].

Menghitung B_x pada arah 90° terhadap arah berkas elektron menggunakan persamaan 3

$$B_x = (1,67 \times 10^{-5}) \left[\frac{H_m d^2}{D_0 T} \right]$$

$$B_x = (1,67 \times 10^{-5}) \left[\frac{2,5 \times (0,5)^2}{30 \times 1} \right]$$

$$B_x = 3,479 \times 10^{-7}$$

$$n = \log(1/B_x)$$

$$= \log(1/3,479 \cdot 10^{-7}) = 6,4585$$

Dari kurva pada Gambar 2 diperoleh:

$$T_i = 0 \text{ cm}$$

$$T_e = 0,4 \text{ cm}$$

Dengan menggunakan persamaan 5, dapat dihitung besarnya tebal perisai radiasi (S) sebagai berikut:

$$S = T_i + (n - 1) T_e$$

$$= 0 + (6,458 - 1) 0,4$$

$$= 2,1834 \text{ cm}$$

Untuk lebih amannya direkomendasikan tebal perisai ditambah 1 HVL , sehingga:

$$S' = S + HVL$$

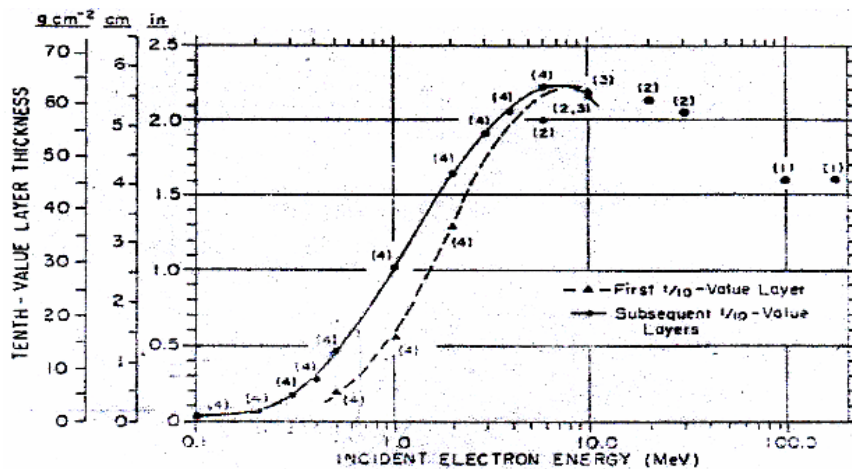
Pada Tabel 4 (terlampir) dapat dilihat besarnya HVL untuk timbal (*lead*) pada tegangan pemercepat elektron = 300 keV adalah 0,147 cm

$$S' = 2,1834 + 0,147$$

$$= 2,3304 \text{ cm}$$

Jadi tebal perisai radiasi pada jarak 0,5 m dari sumber adalah 2,3304 cm, dengan bahan dari timbal $\rho = 11,34 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

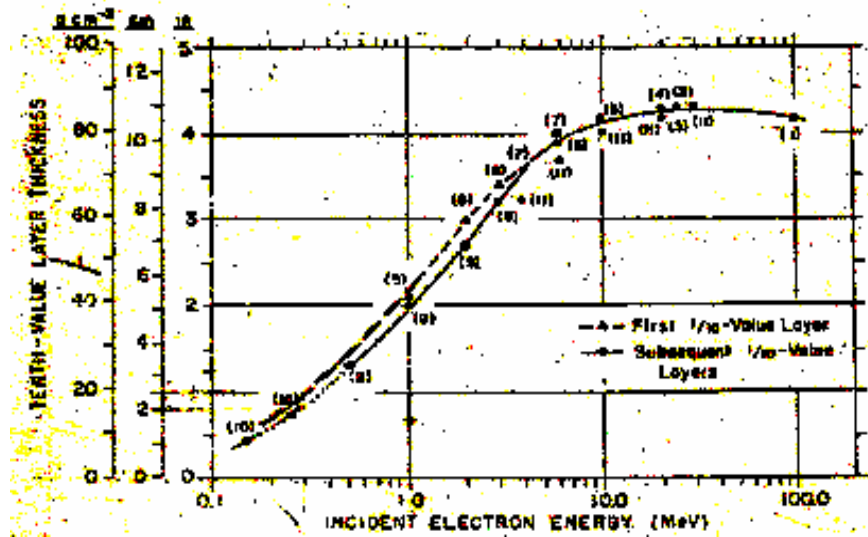
Untuk perhitungan tebal perisai menggunakan bahan besi, harga D_0 dikalikan dengan faktor pengali sebesar 0,5. Faktor pengali diambil dari Tabel 1.



Gambar 2. Dose equivalent index tenth value layers for broad beam X-rays in lead^[4].

Tabel 1. Laju emisi sinar X dari elektron yang mengenai target dengan Z rendah^[4].

No.	Target	Z	Faktor pengali
1.	Besi atau tembaga	26 atau 29	0,5
2.	Alumunium atau beton	13	0,3



Gambar 3. Dose equivalent index tenth value layers for broad beam X-rays in iron^[4].

Dengan cara yang sama untuk menghitung tebal perisai dari bahan timbal, diperoleh tebal perisai dari bahan besi sebesar 12,815 cm. Berdasarkan hasil perhitungan tebal perisai ini, maka dibuat rancangan konstruksi perisai radiasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4, 5, 6, 7 dan 8 (terlampir).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan perisai radiasi yang ditempatkan di antara sumber radiasi dan orang, adalah suatu cara untuk menekan penerimaan dosis agar tidak melebihi ketentuan yang telah ditetapkan oleh BAPETEN yaitu yang biasa disebut Nilai Batas Dosis (NBD). Pemakaian perisai radiasi di sekitar MBE merupakan salah satu syarat mutlak dalam pengopersaian MBE, guna melindungi pekerja dari bahaya radiasi sinar X. Prinsip perisai radiasi adalah mengurangi fluks radiasi di balik perisai, pengurangan ini dapat terjadi karena adanya interaksi antara radiasi dengan bahan perisai.

Di dalam perancangan perisai radiasi ada beberapa hal yang menjadi pertimbangan agar perisai radiasi dapat berfungsi dengan baik, antara lain:

1. Perisai radiasi harus mampu menahan radiasi sinar X yang ditimbulkan oleh MBE, sehingga orang yang bekerja di sekitar MBE tetap aman selama mesin beroperasi.
2. Perisai radiasi dibuat dari bahan yang cukup efektif untuk menyerap radiasi sinar X.
3. Perisai radiasi dibuat ringkas agar lebih kompak dan mudah dipindahkan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut di atas, maka dihitung tebal perisai radiasi dari bahan timbal dan besi, karena bahan tersebut cukup efektif untuk menyerap radiasi gamma dan sinar X, sehingga mampu menahan sinar X yang timbul akibat beroperasinya MBE. Perhitungan tebal perisai radiasi didasarkan pada kebolehjadian terbesar timbulnya radiasi sinar X, yaitu saat MBE beroperasi pada daya maksimal (tegangan 300 kV dan arus berkas 20 mA). Hasil perhitungan tebal perisai radiasi dari bahan timbal dan besi, dengan ketentuan pekerja radiasi tidak menerima dosis melebihi batas laju dosis yang diijinkan yaitu 2,5 mrem/jam, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan tebal perisai radiasi.

No	Jenis bahan perisai	Massa jenis bahan (gr/cm ³)	Energi elektron (keV)	Arus berkas (mA)	Jarak perisai dengan sumber (m)	Tebal perisai radiasi (pada laju dosis maksimal 2,5 mrem/jam)
1.	Timbal (Pb)	11,34	300	20	0,5	2,3304 cm
2.	Besi (Fe)	7,86	300	20	0,5	12,815 cm

Tabel 3. Spesifikasi teknik perisai radiasi.

1.	Bahan perisai	:	Timbal (Pb)
2.	Densitas bahan (ρ)	:	11,34 .10 ³ kg/m ³
3.	Tebal perisai	:	2,5 cm = 25 mm
4.	Jarak sumber radiasi dengan perisai	:	0,5 m

Dari kedua bahan tersebut dipilih bahan perisai dari timbal, karena perisai dari bahan timbal dimensinya lebih ringkas/tipis dari pada besi. Hasil perhitungan diperoleh ketebalan perisai radiasi dari bahan timbal adalah 2,3304 cm, akan tetapi dalam konstruksinya dibuat 2,5 cm. Pada sambungan antar lempeng timbal dibuat miring berlekuk dengan sudut 45°, dengan tujuan apabila disusun bertumpuk berkas sinar X yang menabrak perisai radiasi tidak dapat langsung melewati sela-sela sambungan antara lempengan timbal, seperti ditunjukkan pada Gambar 8 terlampir.

Perisai radiasi dibuat dalam bentuk potongan-potongan lempeng timbal dengan ukuran maksimum 135 cm x 25 cm x 2,5 cm, berat sekitar 100 kg dengan tujuan agar lebih ringan, sehingga memudahkan dalam pencetakan maupun pemasangan dalam kerangka, serta mudah untuk dipindahkan. Pemasangan pada kerangka menggunakan baut dimana kepala baut mempunyai ketebalan tertentu sehingga dapat menahan radiasi yang lewat lubang baut. Pintu untuk keluar masuknya lateks diberi seal karet pada permukaan pintu dan kerangka yang bersentuhan agar rapat, dengan tujuan agar gas ozon yang timbul dari proses irradiasi tidak keluar, walaupun dalam proses irradiasi gas ozon di sekitar MBE dihisap dengan blower. Hasil rancangan perisai radiasi ini merupakan acuan untuk pembuatan perisai radiasi MBE 300 keV / 20 mA. Dari hasil perhitungan rancangan detil perisai radiasi tersebut, dapat dibuat spesifikasi teknik seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

KESIMPULAN

Rancangan perisai radiasi ini meliputi penentuan bentuk, dimensi, bahan, dan gambar konstruksi. Perisai radiasi pengaman MBE dibuat dari bahan timbal (Pb) dengan tebal 2,5 cm. Ketebalan perisai radiasi hasil rancangan ini sudah memenuhi syarat sebagai perisai radiasi dengan ketentuan batas laju dosis yang diijinkan 2,5 mrem/jam. Rancangan perisai radiasi ini merupakan acuan untuk pembuatan perisai radiasi MBE 300 keV/20 mA.

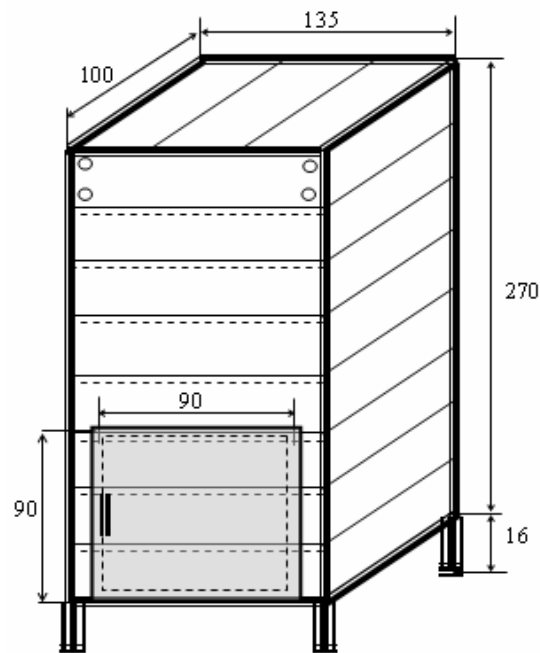
DAFTAR PUSTAKA

- [1] SUWARNO WIRYOSIMIN, *Mengenal Asas Proteksi Radiasi*, Penerbit ITB Bandung, 1995.
- [2] R.M. SINGRU, *Introduction to Nuclear Physics*, Virendra J, Majmudar for Wiley Eastern Private Limited, New Delhi, 1972.
- [3] R.G. JAEGER dkk., *Shielding Fundamentals and Methods Volume 1*, Engineering Compendium on Radiation Shielding, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1968.
- [4] NCRP Report No. 51, *Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 – 100 MeV Particle Accelerator Facilities*, Issued, March 1977.
- [5] BATAN-JAERI, *Radiation Shielding Design For X-Ray Room*, Training Course on Radiation Protection, Jakarta,

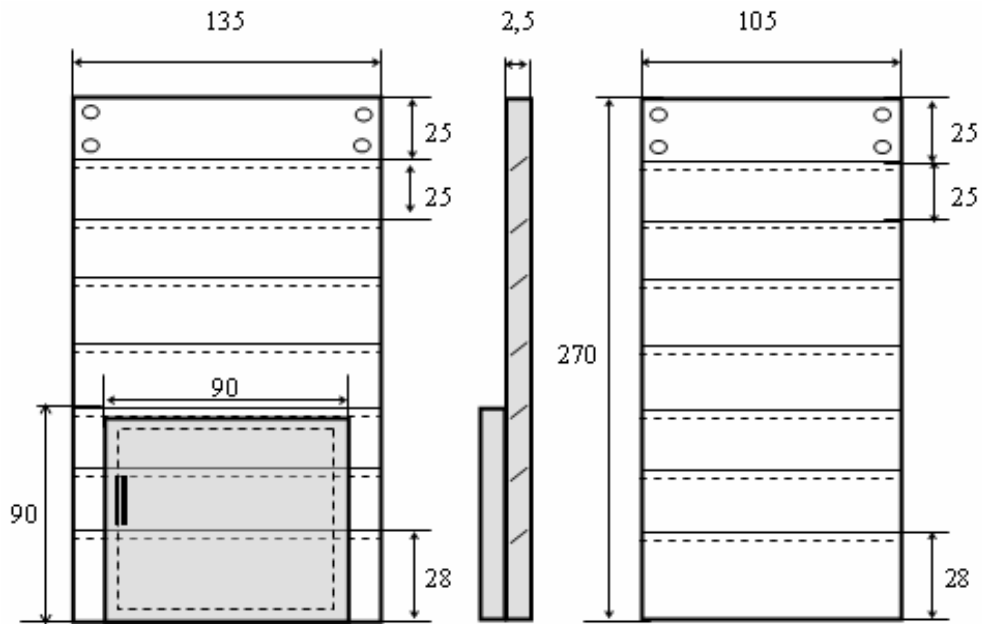
LAMPIRAN

Tabel 4. Half-Value and Tenth-Value Layers^[5].

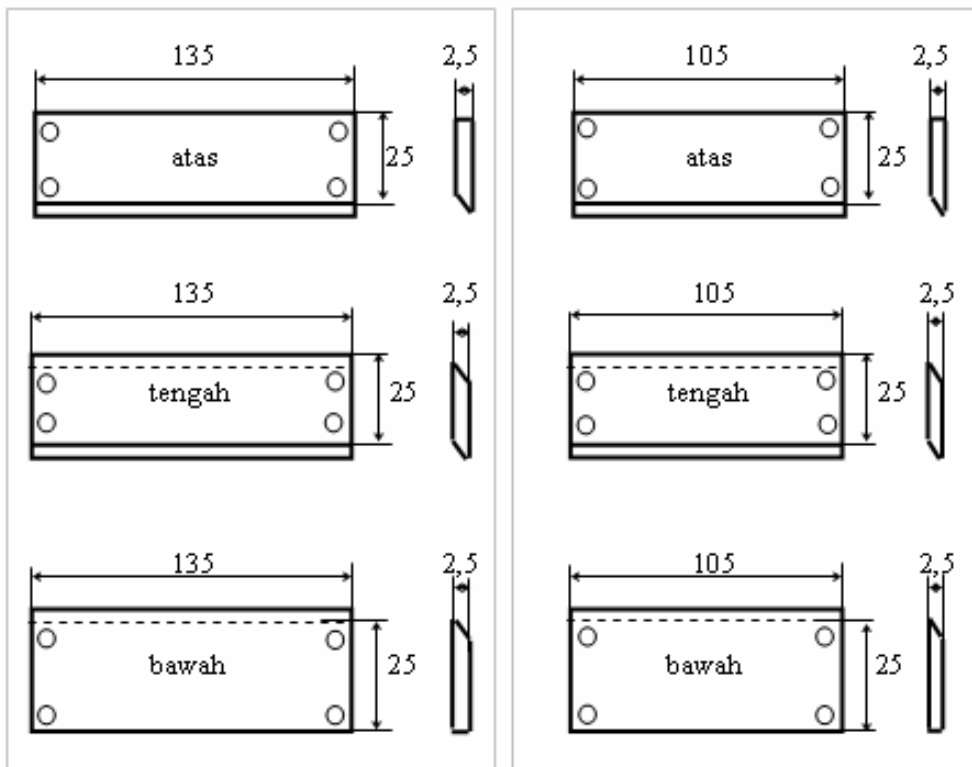
Peak Voltage (kV)	Attenuation material					
	Lead (mm)		Concrete (cm)		Iron (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL
70	0.17	0.52	0.84	2.8		
100	0.27	0.88	1.6	5.3		
125	0.28	0.93	2.0	6.6		
150	0.30	0.99	2.24	7.4		
200	0.52	1.7	2.5	6.4		
250	0.88	2.9	2.8	9.4		
300	1.47	4.8	3.1	10.4		
400	2.5	8.3	3.3	10.9		
500	3.6	11.9	3.6	11.7		
1000	7.9	26	4.4	14.7		
2000	12.5	42	6.4	21		
3000	14.5	48.5	7.4	24.5		
4000	16	53	8.8	29.2	2.7	9.1
6000	16.9	56	10.4	34.5	3.0	9.9
8000	16.9	56	11.4	37.8	3.1	10.3
10000	16.6	55	11.9	39.6	3.2	10.5
Cs-137	6.5	31.6	4.8	15.7	1.6	5.3
Co-60	12	40	6.2	20.6	2.1	6.9



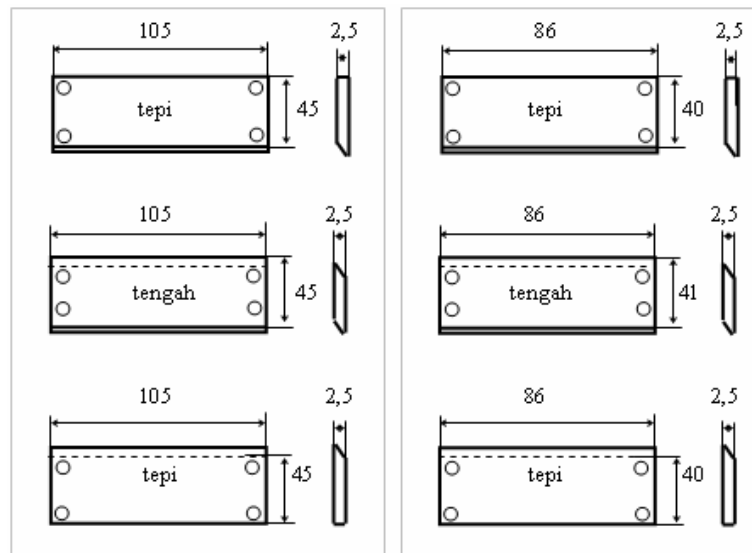
Gambar 4. Skema perisai radiasi.



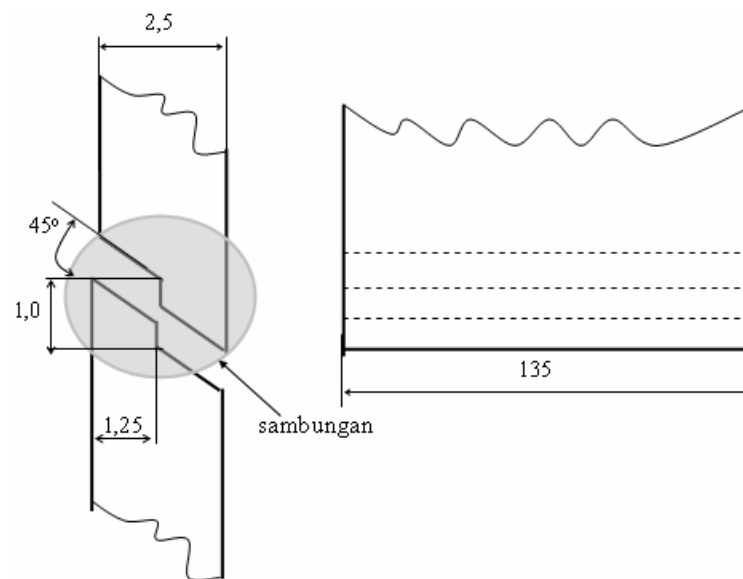
Gambar 5. Perisai depan dan samping.



Gambar 6. Potongan perisai depan-belakang dan perisai samping kanan-kiri.



Gambar 7. Potongan perisai atas dan perisai bawah.



Gambar 8. Bentuk sambungan antar potongan perisai timbal.

TANYA JAWAB

Herry Poernomo

- Rancangbangun MBE untuk irradiasi lateks alam dibutuhkan waktu sekitar 5 tahun, apakah kegiatan ini ada didalam ARN?

- Bagaimana kalau setelah selesai, lebih difokuskan ke rancangbangun MBE untuk flue gas treatment yang sudah jelas diagendakan dalam ARN.

Rany Saptaji

- Tidak ada di ARN.
- Ya, sedang direncanakan.

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALI SUMBER TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA

Taufik, Djasiman, Saminto, Sumaryadi

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALI SUMBER TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA. Dalam rancang bangun MBE diperlukan sistem pengendali STT (Sumber Tegangan Tinggi) yang merupakan salah satu komponen pendukung yang berfungsi untuk mengatur dan menstabilkan STT. Tahapan kegiatan yang dilakukan meliputi pengkajian tipe STT yang digunakan, pengkajian prosedur pengoperasian STT dan perancangan sistem pengendali. Dari perancangan diperoleh sistem kendali STT dibuat dalam dua pilihan otomatis dan manual. Kendali otomatis dirancang memiliki toleransi sebesar $\pm 2\%$ dari tegangan yang diset.

ABSTRACT

DESIGNING OF HIGH VOLTAGE CONTROL SYSTEM OF 300 keV/20 mA ELECTRON BEAM MACHINE. In designing and construction of EBM (Electron Beam Machine), it is needed a high voltage control system that is one of supporting component to arrange and to stabilize high voltage. The Activity steps to be done consist of learning the type of high voltage, operation procedure and designing of control system. From the designing, it was found that the high voltage control system have been designed with two optional control system such as manual and automatic. The automatic control is designed to have 2% of tolerance from the setting voltage.

PENDAHULUAN

Mesin Berkas Elektron (MBE) telah banyak dimanfaatkan di berbagai bidang, diantaranya adalah bidang industri, bidang pengobatan, bidang lingkungan dan bidang-bidang lainnya. Dalam bidang industri salah satu aplikasinya adalah untuk vulkanisasi karet alam. Teknik vulkanisasi menggunakan MBE lebih ramah lingkungan dan menghasilkan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan teknik vulkanisasi konvensional secara kimia.^[1]

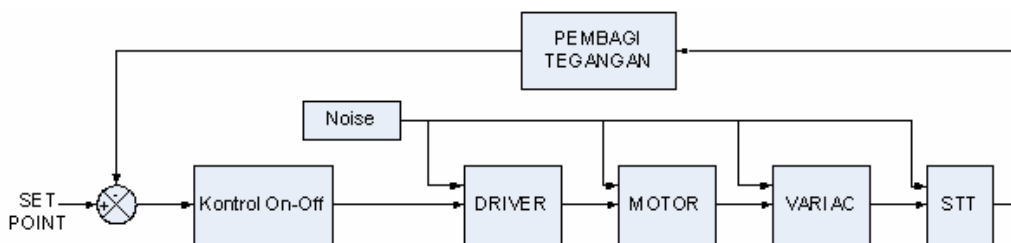
Dalam rangka menunjang program BATAN khususnya tentang rancang bangun mesin berkas elektron berbasis industri yaitu MBE 300 keV/20mA untuk industri lateks, telah dilakukan kegiatan rancang bangun Sumber Tegangan Tinggi (STT) 300 kV/50 mA. STT merupakan salah satu komponen utama dalam MBE yang berfungsi untuk

meningkatkan energi berkas elektron. Untuk mengoperasikan STT pada mesin MBE diperlukan sistem pengendali untuk mengatur dan mengendalikan tegangan yang dibebankan pada tabung pemercepat. Oleh karena itu dalam kegiatan penelitian ini dilakukan perancangan sistem pengendali STT.

Lingkup kegiatan rancang bangun sistem pengendali sumber tegangan tinggi ini meliputi pengkajian tipe STT yang digunakan, pengkajian prosedur pengoperasian STT dan perancangan sistem pengendali.

TATA KERJA

Tata kerja dari sistem pengendali sumber tegangan tinggi dapat digambarkan dalam bentuk diagram blok seperti pada Gambar 1.



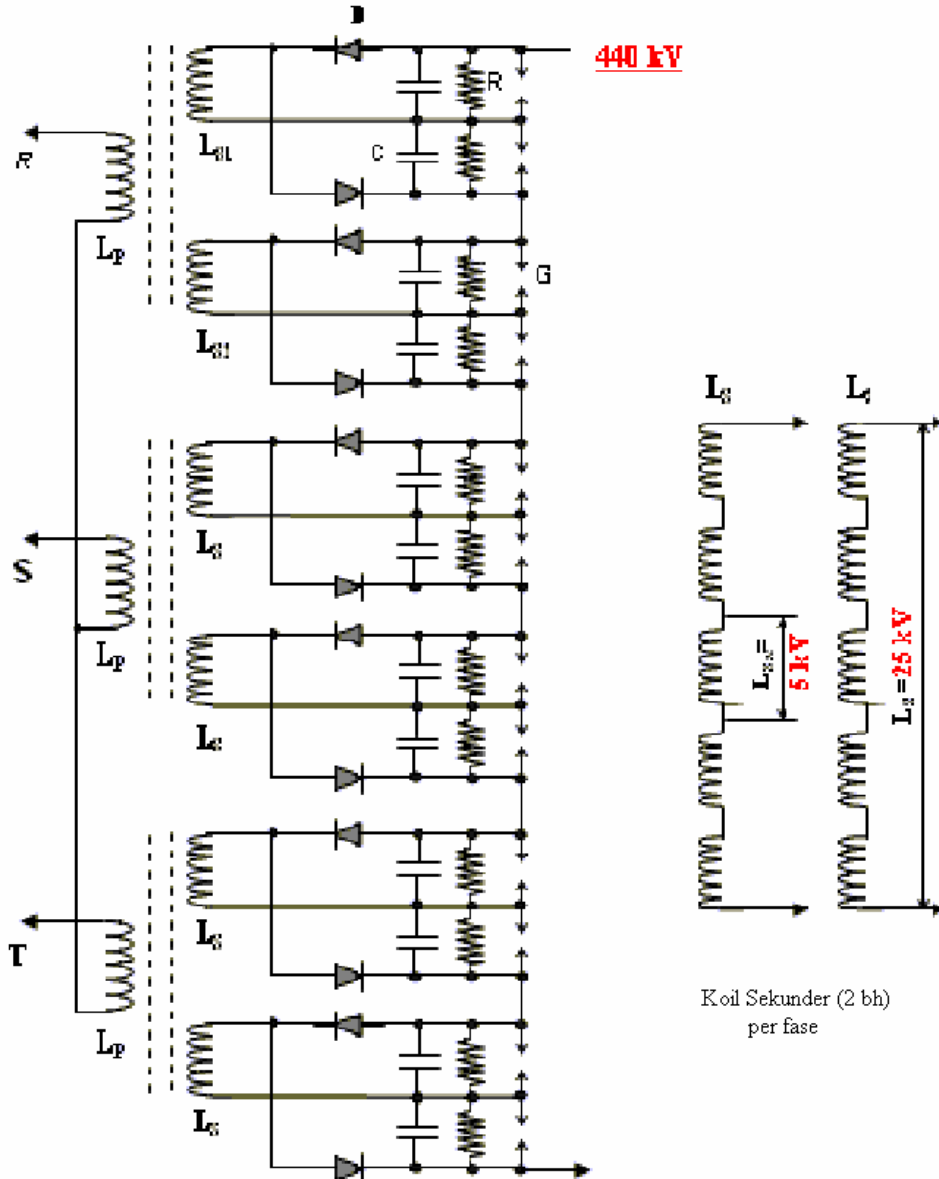
Gambar 1. Diagram blok sistem pengendali STT.

Sumber Tegangan Tinggi

Penggunaan MBE dalam vulkanisasi lateks tidak memerlukan energi yang sangat tinggi, akan tetapi memerlukan arus berkas yang besar. Program rancang bangun MBE untuk industri lateks ini direncanakan memiliki kapasitas 300 kV/20 mA atau 6 kW, daya tersebut seluruhnya akan menjadi beban utama bagi STT disamping bentuk beban-beban lain yang harus disangganya seperti daya untuk sumber elektron dan rugi-rugi daya lainnya. Disamping beban yang harus disangga tersebut,

dalam perancangan juga harus mempertimbangkan perlunya keandalan unjuk kerja dan stabilitas serta faktor-faktor lain sesuai yang dikehendaki. Untuk memenuhi kapasitas MBE tersebut telah ditentukan sebagai sumber tegangan pemercepatnya adalah STT jenis transformator inti terbumikan (*grounded core transformer type* atau GCT).^[2]

Dalam STT tipe GCT kumparan primer dan sekunder terisolasi langsung terhadap tegangan tinggi DC. Diagram prinsip STT yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. STT tipe GCT 3-phase.

Spesifikasi teknis STT sebagai berikut:^[3]

- Kapasitas daya STT: 350 kV/50 mA.
- Sumber daya masukan: 3 fase; 28,5 kVA; 380 V; 50 Hz.
- Tegangan/arus primer trafo per fase: 220 V/43 A.
- Tegangan/arus sekunder trafo per fase: 2 x 25 kV/100 mA.
- Jumlah tingkat pengganda tegangan: 6 tingkat.
- Komponen pengganda tegangan: penyearah: 50 kV/1 A; kapastor: 0,22 μ F/50 kV.
- Faktor riak tegangan pada kondisi beban penuh: 1 %.

Sistem Kendali Otomatis

Sistem pengendali STT dirancang dalam dua pilihan, yaitu dengan kendali otomatis dan kendali manual. Sistem kendali manual digunakan apabila sistem otomatis tidak dapat digunakan. Sistem kendali otomatis dirancang menggunakan sistem kendali on-off. Dalam sistem kendali otomatis tegangan tinggi yang dihasilkan dari sumber tegangan tinggi dicuplik menggunakan pembagi tegangan. Tegangan cuplikan yang dihasilkan digunakan sebagai *feedback* dibandingkan dengan tegangan set point sehingga diperoleh beda tegangan antara set point dengan *feedback*. Beda tegangan yang dihasilkan digunakan untuk mengoreksi tegangan keluaran yang dihasilkan dari STT agar sesuai dengan tegangan yang diharapkan.

Dalam membuat suatu sistem pengendali, perlu diperhatikan sistem keselamatan alat maupun keselamatan pekerja. Untuk itu diperlukan sistem

interlock yang akan menghentikan STT saat kondisi yang dapat merusak alat dan membahayakan personil. Sistem *interlock* ini dapat bekerja pada kedua pilihan sistem kendali tersebut. Beberapa kondisi yang di *interlock* ditunjukkan pada Tabel 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

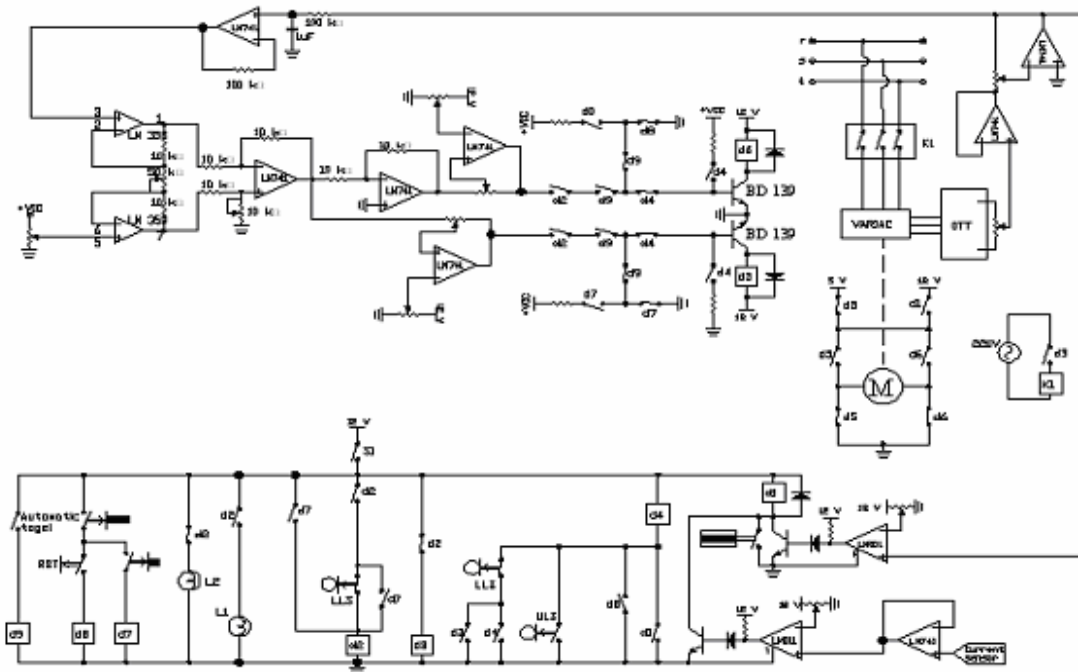
Bedasarkan diagram blok dari sistem pengendali STT pada Gambar 1 dapat dirancang skematik rangkaian pengendali STT pada Gambar 3. Dari skematik rangkaian tersebut dapat dibuat rancangan detail dari masing-masing fungsi dan rangkaian interlocknya.

Pengukur Tegangan STT

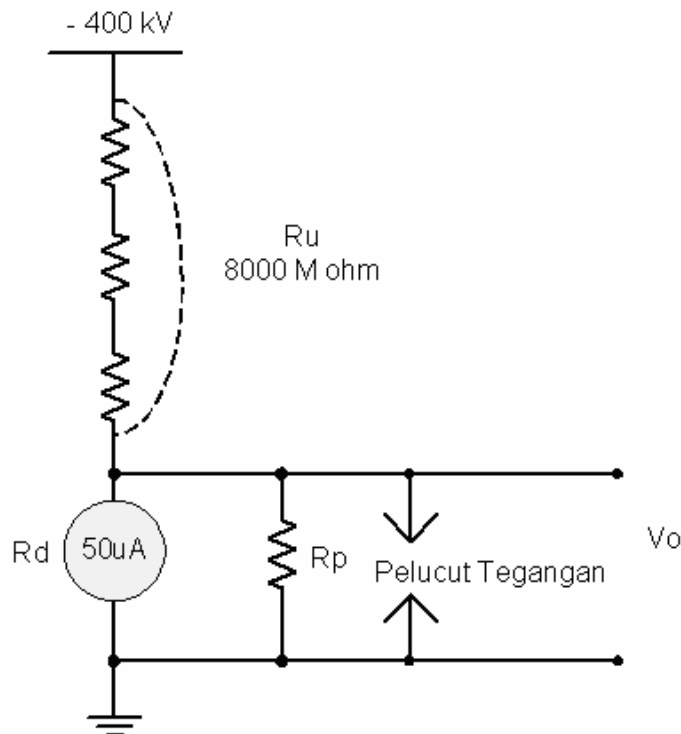
Tegangan keluaran dari STT terlalu besar untuk digunakan sebagai *feedback* sehingga perlu diperlemah dengan menggunakan rangkaian pembagi tegangan. Skematik rangkaian pengukur tegangan disajikan pada Gambar 4. Tegangan maksimal yang dapat diukur ditentukan sebesar -400 kV, sehingga agar dapat diukur menggunakan ampermeter dengan skala penuh 50 μ A maka tahanan ukur (R_u) yang dibutuhkan sebesar 8000 M Ω . Nilai tahanan dalam amper meter 50 μ A berkisar (3 s/d 4) k Ω , sehingga beda tegangan antara terminal ampermeter (V_o) maksimal adalah (-0,15 s/d -0,2) Volt. Beda tegangan ini dapat digunakan sebagai *feedback* setelah melalui rangkaian inverting dan rangkaian penguat sehingga pada tegangan maksimal -400 kV, tegangan *feedback* menunjukkan 6 V. Pelucut tegangan digunakan sebagai pengaman dari tegangan tinggi. Sedangkan R_p digunakan sebagai pengaman ampermeter.

Tabel 1. Kondisi Interlock.

No.	Kondisi	Aksi	Tujuan
1	Posisi awal variak tidak dalam keadaan nol	STT masih mati, posisi variak di-nol-kan	Untuk menghindari STT mendapatkan masukan yang besar secara tiba-tiba.
2	Tegangan keluaran melebihi batas yang dibolehkan.	STT akan mati secara perlahan.	Untuk menghindari tegangan berlebih yang dapat merusak komponen.
3	Posisi variak dalam keadaan maksimum.	STT akan mati secara perlahan.	Untuk menghindari kerusakan mekanik dari variak.
4	Terjadi kelebihan beban	STT akan mati secara perlahan.	Untuk menghindari kerusakan komponen MBE.
5	Panas berlebih	STT akan mati secara perlahan.	Untuk menghindari kerusakan komponen STT.



Gambar 3. Skematik rangkaian pengendali STT.



Gambar 4. Rangkaian pembagi tegangan.

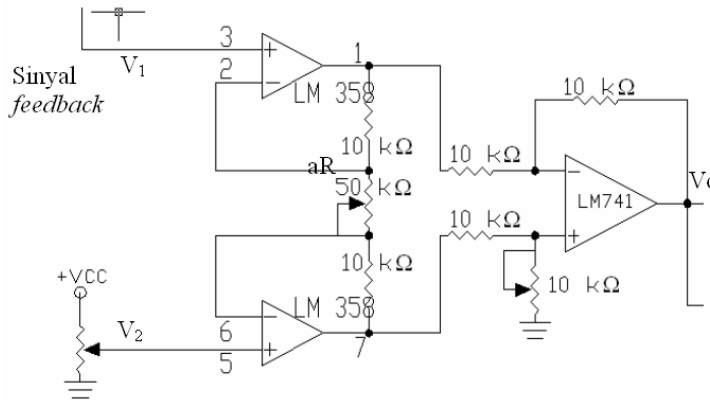
Penguat Instrumentasi.

Penguat instrumentasi dalam sistem pengendali ini digunakan untuk untuk menghasilkan sinyal koreksi.^[4] Sinyal koreksi merupakan selisih dari sinyal *feedback* dengan sinyal *set point* yang digunakan sebagai sinyal masukan rangkaian kontrol. Pada skematik rangkaian instrumentasi pada Gambar 5 penguatan diatur dengan mengatur potensio aR menjadi 20 kΩ sehingga penguatannya adalah :

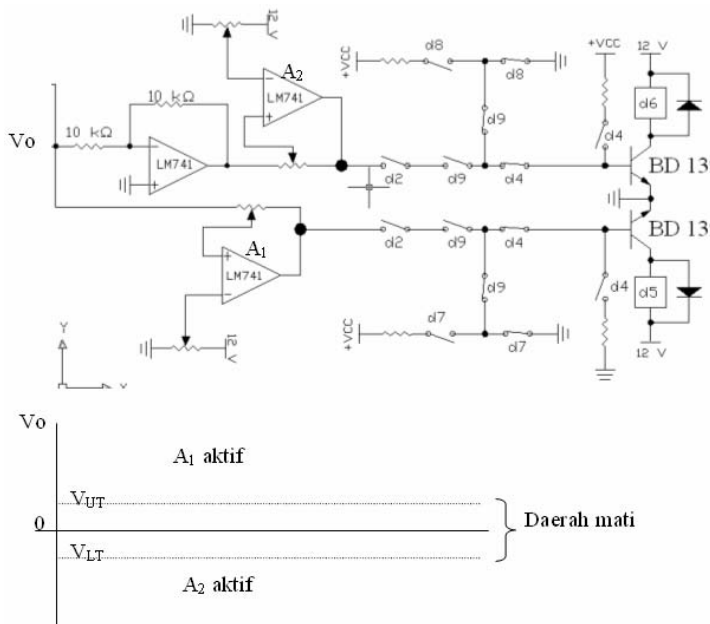
$$\frac{V_o}{(V_2 - V_1)} = A = 1 + \left(\frac{2}{a}\right) = 1 + \frac{2}{2} = 2$$

Pengendali motor Otomatis

Sistem kontrol yang digunakan dalam sistem kendali STT ini adalah menggunakan sistem On-Off. Sistem kontrol ini berupa suatu rangkaian pembanding dengan histerisis yang akan menghasilkan sinyal untuk menggerakkan motor kekiri ataupun kekanan sesuai dengan sinyal koreksi yang diberikan. Gambar skematik dan respon sinyal rangkaian kontrolnya disajikan pada Gambar 6.



Gambar 5. Penguat Instrumentasi.



Gambar 6. Skematik dan respon sinyal rangkaian kontrol.

Pada rangkaian kontrol keluaran dari op-amp A₁ akan memutar motor untuk menaikkan tegangan variak dengan mengaktifkan relai d5. Begitupun sebaliknya op-amp A₂ akan memutar motor untuk menurunkan tegangan variak dengan mengaktifkan relai d6. Apabila sinyal masukan V_o di bawah V_{UT} dan diatas V_{LT}, maka op-amp A₁ dan A₂ tidak aktif atau sinyal keluarannya nol dalam hal ini motor tidak akan bergerak. Sedangkan apabila V_o lebih besar dari V_{UT}, A₁ aktif dan bila V_o lebih kecil dari V_{LT}, A₂ aktif.

Motor

Seperti pada Gambar 2 pengatur daya STT dilakukan dengan mengatur masukannya dengan menggunakan variak. Pengaturan variak ini dilakukan dengan mengkopel tuas variak dengan motor wipper 12 V menggunakan roda gigi sehingga posisi tuas variak dapat diatur secara elektronik dari rangkaian pengendali.

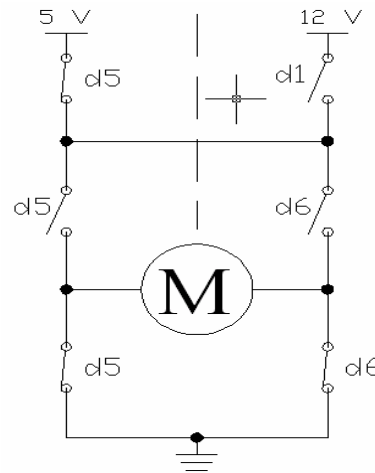
Perbandingan roda gigi yang digunakan = 1 : 8.

Kecepatan motor yang digunakan = 60 rpm

Kecepatan perpindahan tuas variak = 60 rpm × 1/8 = 7,5 rpm.

Kecepatan motor berpengaruh pada respon perubahan tegangan keluaran. Jika dalam kendali otomatis respon tegangan STT lebih lambat dari putaran motor maka motor akan bergerak naik turun terus menerus. Sedangkan dalam kendali manual akan mengakibatkan pengaturan tegangan kurang presisi. Kecepatan motor 7,5 rpm masih dirasa cepat dalam pengoperasian akan tetapi sudah cukup apabila terjadi trip yang harus memutar motor lebih cepat. Oleh karena itu motor disupply dengan

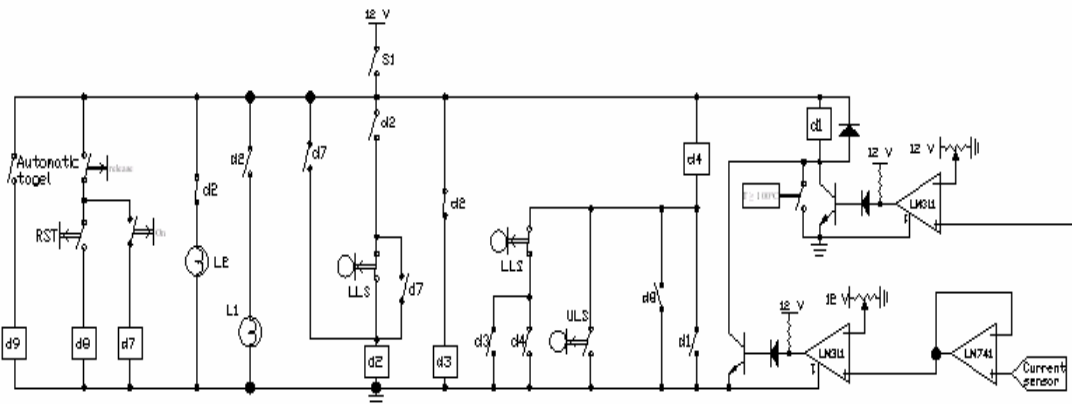
menggunakan dua tegangan yang digunakan secara bergantian seperti pada Gambar 7. Pada saat operasi normal tegangan yang digunakan adalah 5 V dan saat terjadi trip tegangan 12 V yang digunakan.



Gambar 7. Driver Motor.

Rangkaian Interlock

Rangkaian interlock dirancang untuk memenuhi persyaratan pengoperasian STT yang memenuhi kriteria seperti pada Tabel 1. Dalam rancangan interlock ini parameter-parameter interlock pengoperasian MBE belum di ikut sertakan, akan tetapi parameter-parameter tersebut dapat ditambahkan tanpa merubah rangkaian interlock STT. Adapun skematik rangkaian STT disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Skematik rangkaian interlock.

Pada Gambar 8 togel otomatis digunakan untuk memilih apakah pengoperasian STT dilakukan dengan manual atau otomatis. Tombol operasi yang digunakan terdiri dari 3 buah tombol, yaitu tombol release, tombol on/naik dan tombol reset/turun. Tombol release dirangkai seri dengan tombol lainnya yang berfungsi untuk pengaman agar tombol on dan tombol reset tidak aktif apabila penekanan tidak disengaja. Dua tombol lainnya mempunyai fungsi ganda, yaitu apabila togel diset otomatis maka aksi yang berfungsi adalah "on" dan "reset". Begitu pula sebaliknya jika togel diset manual maka aksi yang berfungsi adalah "naik" dan "turun".

KESIMPULAN

Dari hasil kegiatan Perancangan sistem pengendali sumber tegangan tinggi MBE 300 keV/20 mA dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Sistem kendali STT dibuat dalam dua pilihan, yaitu secara manual maupun otomatis.
- Sistem kendali otomatis dengan histerisis sebesar 4 % dapat bekerja dengan toleransi kestabilan ± 2 % dari tegangan set point.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan telah diperoleh hasil perancangan sistem pengendali STT MBE 300 keV/20 mA ini, penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya kepada rekan-rekan Staf di kelompok Teknologi Rancangbangun Akselerator : Bapak Heri Sudarmanto, Untung Margono dan Suhartono, A.Md. serta pihak pihak yang telah menyumbangkan tenaga dan pikirannya pada kegiatan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] MAKUUCHI, K., *Electron Beam Processing of Rubbers*, Proceedings of the Workshops on the Utilization of Electron Beam, JAERI, T.R.I. Global C., Ltd., 2003.
- [2] M. KASHIWAGI, Nissin High Voltage Co. Ltd. Kyoto, Japan.
- [3] DJASIMAN dkk, *Perancangan Sumber Tegangan Tinggi Untuk MBE 300 keV/20 mA Untuk Industri Lateks*, Laporan teknik P3TM, Yogyakarta, 2005.
- [4] ROBERT F. COUGHLIN, FREDERICK F.DRISCOLL, *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linier*, ERLANGGA, Jakarta, 1983.

TANYA JAWAB

Budi Santosa

- Berapa besar lebar differensial gap dari kendali on off?
- Berapa kesalahan keadaan tunak (steady state) dari sistem kendali yang dirancang?

Taufik

- Besar lebar differensial gap dari rancangan yang dibuat disesuaikan dengan sinyal eror yang dihasilkan rangkaian penguat instrumentasi karena STT mempunyai riak 1% maka untuk amannya lebar differensial gapnya ditentukan 4% dari tegangan STT?
- Kesalahan steady state belum dikaji secara mendalam. Namun dengan rancangan STT dengan riak 1% maka ditentukan kesalahan steady state keseluruhan adalah 2% dari tegangan STT yang dihasilkan.

Rill Isaris

- Dalam rancangan belum dikemukakan berapa rating STT yang direncanakan. Bagaimana komponen feed back system pada rangkaian STT berfungsi untuk menstabilkan outputnya?
- Apakah disain ini sudah memperhatikan SPEC Requirement kebutuhan MBE dimaksud, dan menggunakan teknologi komponen state of the art?

Taufik

- Rating STT direncanakan 300 kV. Tegangan tinggi dari STT diperkecil sesuai dengan tegangan komponen IC. Tegangan feed back dibandingkan dengan set point yang dilakukan, pada rangkaian penguat instrumentasi, keluaran dari penguat instrumentasi ini digunakan untuk memperkecil kesalahan dengan menggerakkan motor yang dikopel dengan variak agar tegangannya sesuai dengan tegangan set point.
- Desain sudah disesuaikan dengan spesifikasi requirement kebutuhan MBE lateks. Teknologi komponen yang digunakan disesuaikan dengan ketersediaan dipasar dan harganya. Jadi dalam hal ini komponen yang digunakan masih dikatakan baru.

SPARK GAP SEBAGAI SKAKELAR TEGANGAN TINGGI

Widdi Usada, Suryadi

Bidang Teknologi Akselerator dan Fisika Reaktor, PTAPB-BATAN

ABSTRAK

SPARK GAP SEBAGAI SKAKELAR TEGANGAN TINGGI. Dibahas prinsip dasar spark gap. Dilakukan pula konstruksi dan uji coba spark gap. Hasilnya menunjukkan, dengan pengaturan yang sesuai, spark gap dapat beroperasi secara konsisten dan mempunyai jitter yang kecil (50 n detik).

ABSTRACT

SPARK GAP AS HIGH VOLTAGE SWITCH. Basic principle of spark gap has been discussed. Construction and testing of spark gap also have been carried out. The result shown, by adequate arrangement, the spark gap will running well and has small jitter (50 n sec).

PENDAHULUAN

Dalam teknologi tegangan tinggi, sering dibutuhkan skakelar (*switch*) untuk menghubungkan sumber tegangan/arus dengan system. Sebagai skakelar sering digunakan *ignitron* atau *spark-gap*^[1]. *Spark-gap* dapat dengan mudah dibuat dan tidak membutuhkan biaya tinggi. Skakelar harus mempunyai beberapa sifat tertentu, mempunyai waktu tanggap yang cepat, dapat dioperasikan secara berulang (*repetitive*) tidak membebani system (resistansi dan induktansi rendah). Didalam makalah ini akan dibahas rancangan pembuatan *spark-gap* dan ditunjukkan pula hasil uji coba.

DASAR TEORI

Spark-gap

Spark gap yang akan dibuat sering dinamakan sebagai *swinging cascade spark gap* (scsg), tersusun oleh dua lempeng logam sejajar dengan jarak tertentu. Pada celah diantara kedua lempeng diletakkan sebatang logam yang sejajar dengan lempeng, yang berfungsi sebagai pemacu. Jarak antara masing-masing lempeng logam dengan batang pemacu akan menentukan besar sumber tegangan yang dapat digunakan.

Spark gap dapat dipasang diudara terbuka ($p = 1 \text{ atm}$) atau dalam suatu bejana bertekanan. Didalam makalah ini hanya ditinjau *spark gap* yang berada di udara terbuka. *Breakdown* terjadi bila medan listrik yang terbentuk di antara lempeng logam dan batang logam sama atau lebih besar dari

3 kV/mm, untuk udara bertekanan tegangan *breakdown* akan lebih tinggi. Kerja *spark gap* bergantung pada medan listrik yang terdapat diantara lempeng logam dengan batang logam yang berfungsi sebagai pemacu.

Susunan lengkap *spark gap*^[2]

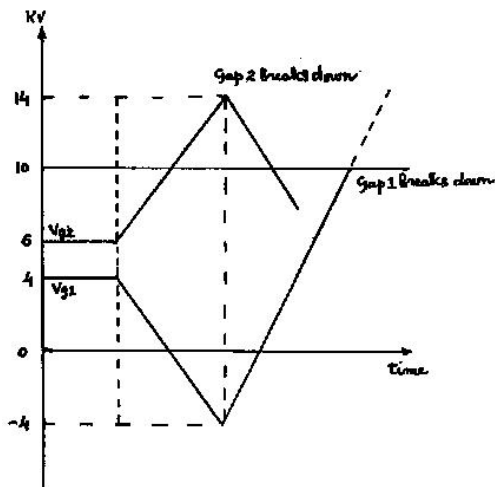
Lempeng pertama dihubungkan dengan tegangan tinggi, lempeng kedua dihubungkan dengan tanah. Jarak antara lempeng pertama dengan batang pemacu (gap.1) dan lempeng kedua dengan batang pemacu (gap.2), diatur sehingga gap.1 dibanding gap.2 menjadi 3:2. Agar aman, pada saat sumber tegangan tinggi terpasang maka lebar gap.1 dan gap.2 harus memenuhi kriteria $< 3 \text{ kV/mm}$. Antara lempeng pertama dengan batang pemacu dipasang tahanan R_1 dan antara batang pemacu dengan lempeng kedua dipasang tahanan R_2 . R_1 dan R_2 mempunyai orde besar $M\Omega$. Perbandingan besar R_1 dan R_2 juga 3:2

Prinsip kerja scsg

Sebagai contoh, untuk system scsg (*swinging cascade spark gap*) yang tersusun oleh, *capacitor bank* dengan parameter sebagai berikut, tegangan 10 kV dan kapasitas 15 μF , *spark gap*, merupakan sepasang lempeng sejajar dengan jarak antara sebesar 5 mm, batang pemacu dipasang sejauh 3 mm dari lempeng pertama. Dipasang tahanan R_1 sebesar 99 $M\Omega$ antara lempeng pertama dan batang pemacu dan R_2 sebesar 66 $M\Omega$, antara batang pemacu dan lempeng kedua. Maka akan ada tegangan 10 kV di lempeng pertama, 4 kV di batang pemacu dan 0 kV di lempeng kedua. Kondisi sistem

masih aman karena di gap.1 dan gap.2 masih dipenuhi kondisi < 3 kV/mm.

Dinamika perubahan tegangan ditunjukkan pada Gambar 1. Bila batang pemicu dipicu dengan tegangan negatif -8kV, maka tegangan batang pemicu akan berayun (*swinging*) ke -4 kV. Akibatnya, beda tegangan di gap.1 menjadi 14 kV dan di gap.2, -4 kV. Medan listrik di gap.1 menjadi 14 kV/3 mm, 4,67 kV/mm, nilai ini jauh melebihi tegangan *breakdown* di udara. Maka akan terjadi *breakdown* di gap.1, disertai naiknya tegangan pada batang pemicu mendekati 10 kV, dan akan diikuti *breakdown* pada gap.2 sesaat setelah batang pemicu mencapai tegangan 6 kV. Sehingga terjadi proses hantaran arus listrik lewat *spark gap*.



Gambar 1. Dinamika tegangan pada gap.

Waktu Tanggap dan Jitter

Waktu tanggap *spark gap* bergantung pada proses *breakdown* yang terjadi, hal ini berlangsung dalam orde μ detik.

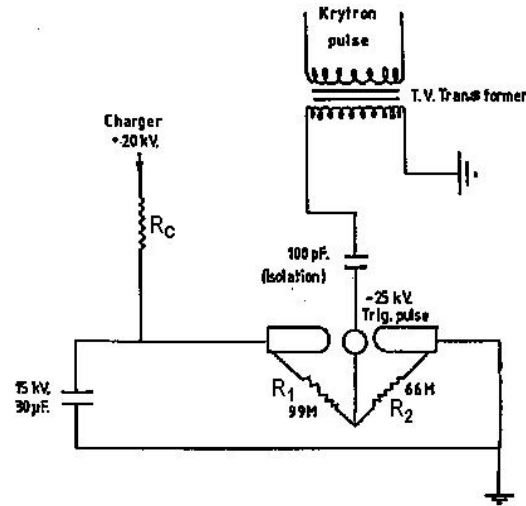
Selisih waktu antara waktu pemicu dihidupkan dengan saat *breakdown* berawal, dinamakan dengan waktu tunda, Δt , idealnya besaran Δt akan selalu sama. Dalam kenyataan, proses *breakdown* merupakan proses statistik, jadi Δt tidak selalu sama. Jadi selisih antara Δt maksimum dengan Δt minimum dinamakan *jitter*.

RANCANGAN DAN EKSPERIMEN

Rancangan percobaan seperti terlihat pada Gambar 2.

Beberapa pertimbangan, agar pengisian kapasitor dapat mencapai tegangan yang diinginkan dan penurunan tegangan pada R_c dapat diabaikan, serta tidak terjadi kebocoran arus pada sistem *spark gap*, serta didapat pembagian tegangan yang stabil pada *spark gap*, maka dipilih,

$$R_c \ll R_1 + R_2, R_c = 100 \text{ k}\Omega, R_1 = 99 \text{ M}\Omega, R_2 = 66 \text{ M}\Omega,$$



Gambar 2. Diagram percobaan.

Sebagai langkah awal, akan dihitung induktansi *spark gap*. *Spark gap* dipasang pada kapasitor bank dengan kapasitas 60 μ F dan tegangan 9,3 kV dan sebagai beban digunakan lempeng aluminium. Dalam seluruh percobaan digunakan pulsa pemicu dengan waktu bangkit (*rise time*) 1 μ detik. Arus yang timbul diukur dengan menggunakan kumparan Rogowsky, hasil pengukuran ditampilkan pada osiloskop, terlihat tampilan fungsi sinus yang teredam. Faktor redaman f merupakan perbandingan dua puncak yang berturut-tan. Hasilnya, $f = 0,597$ dan periode osilasi $T = 10 \mu$ detik. Sehingga dapat dihitung besarnya arus puncak dan induktansi^[3],

$$I = \frac{\pi C V_0 (1 + f)}{T} = 280 \text{ kA}$$

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} = 42,2 \text{ nH}$$

Oleh karena besarnya induktansi sistem diluar *spark gap* adalah, 29 nH, maka berdasarkan perhitungan diperoleh induktansi *spark gap*, 13,2 nH.

Spark gap dipasang pada rangkaian percobaan yang sebenarnya (Gambar 2). Kemudian dilakukan pengamatan dengan menghidupkan sistem pemacu, untuk tegangan kapasitor yang dinaikkan secara bertahap. Untuk tiap tegangan terpasang dilakukan pemucuan sepuluh kali. Data menunjukkan, untuk tegangan kapasitor yang rendah, ternyata lucutan hanya terjadi pada salah satu gap, jadi skakelar (switch) tidak menutup, tenaga yang tersimpan dalam kapasitor tidak mengalir keluar. Hanya pada jangkauan tegangan tertentu saja terjadi *swinging cascade*. Hasil pengamatan ditunjukkan dalam Tabel 1. Berdasar pengamatan waktu awal pemucuan dan waktu timbulnya arus didapat *jitter* maksimum 50 n detik.

Tabel 1. Pengamatan hasil *breakdown spark gap*.

Tegangan terukur pada <i>spark gap</i> (kV)	% Breakdown		
	Gap.1	Gap.2	Kaskade
0	100		
0,61	100		
1,21	100		
1,82	100		
2,43	80	20	
3,04	100		
3,64	60	40	
4,25	90	10	
4,86	100		
5,46	100		
6,10	100		
6,71	100		
7,29	40		60
7,89	60		40
8,50			100
9,11			100
9,76			100
13,42			100
14,03	<i>breakdown</i> secara spontan		

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil eksperimen, *spark gap* dapat mengalirkan arus maksimum 280 kA (hasil pengukuran dengan kumparan Rogowsky) dan

induktansi 13,2 nH (hasil pengukuran dikurangi dengan induktansi kapasitor *bank*) dan didapat pula *jitter* sebesar 50 n detik (berdasar pengamatan dengan osiloskop).

Untuk meningkatkan besar arus maksimum yang bisa lewat *spark gap*, dapat diperoleh dengan memperpanjang *spark gap*, tapi ini akan memperbesar induktansi. Untuk keperluan eksperimen perlu diperhatikan kedua besaran ini sehingga dapat dipilih kondisi optimalnya.

Dalam pengujian *spark gap* untuk bermacam-macam tegangan kapasitor, terlihat adanya hasil yang acak untuk tegangan rendah dan skakelar tidak berfungsi (0 s/d 6,71 kV) dan mulai berfungsi tetapi tidak konsisten (7,29-7,89 kV) dan mulai berfungsi konsisten pada tegangan 8,50 kV s/d 13,42 kV. Untuk tegangan lebih tinggi akan terjadi *breakdown* secara spontan.

Peristiwa *breakdown* merupakan gejala statistik, sehingga ada selang waktu tunda antara saat pemucuan dengan mulai terjadinya *breakdown* (*time lag*). Secara teoritis, peristiwa *breakdown* dibagi menjadi dua tahap, *statistikacal time lag* dan *formative time lag*^[1]. *Statistical time lag*, menunjukkan keboleh jadian terbentuknya elektron awal dalam peristiwa lucutan yang mempunyai potensi untuk proses selanjutnya. *Formative time lag*, menunjukkan keboleh jadian elektron awal yang ada untuk menjalani proses ionisasi berantai sehingga terjadi *breakdown*. Untuk tegangan/medan listrik yang kecil, maka kedua peristiwa tersebut mempunyai kebolehjadian yang sangat kecil, sehingga secara makroskopis peristiwanya akan tampak rambang/kacau, tidak konsisten.

Untuk tegangan/medan listrik yang tinggi, keboleh jadian terjadinya peristiwa tersebut makin besar, sehingga secara makroskopis peristiwanya menjadi tampak konsisten.

KESIMPULAN

Berdasar hasil yang diperoleh, dapatlah ditarik kesimpulan

1. Spak gap dapat berfungsi dengan baik, dengan mengatur kondisi fisis yang sesuai, jarak antara elektroda lebih besar dari kemungkinan *breakdown* di udara.
2. *Jitter* yang rendah (50 n detik), *spark gap* dapat digunakan dalam teknologi tegangan tinggi yang membutuhkan presisi waktu tinggi. Misal untuk mesin berkas elektron pulsa, yang sedang direncanakan untuk dibuat di P3TM.

3. Untuk memperkecil jitter, waktu bangkit (*rise time*) pulsa pemicu harus diperbesar, agar dapat mengurangi pengaruh statistik proses lucutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] FLETCHER,R.C., *Production and Measurement of Ultra High Speed Impulses*, Rev. Sci. Instr. 20, 861, 1949.
- [2] SURYADI, *Fokus Plasma Sebagai Sumber Neutron*, Tesis S2, UGM, 1989.
- [3] S.LEE, *Electromagnetic Shock Tube*, in S.Lee et.al.,ed., *Laser and Plasma Technology*, World Scientific, Singapore, 1985.
- [4] DAVIES,A.J., EVANS,C.J., *The Theory of Ionization Growth in Gases Under Pulsed and Static Field*, CERN 73-10, Geneva, 1973.

KARAKTERISTIK NEUTRONIK DARI REAKSI SPALLASI PROTON-MERKURI PADA SISTEM TARGET ADS

Silakhuddin, Slamet Santosa

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

ABSTRAK

KARAKTERISTIK NEUTRONIK DARI REAKSI SPALLASI PROTON-MERKURI PADA SISTEM TARGET ADS. Telah dilakukan perhitungan dan analisis dari yield, distribusi fluks dan spektrum neutron hasil spallasi antara proton energi tinggi dan target merkuri pada sistem target dari Accelerator Driven System (ADS). Perhitungannya menggunakan program FLUKA. Target merkuri dimodelkan sebagai silinder berjari-jari 20 cm dan panjang 80 cm. Rentang energi proton yang dipakai antara 100 MeV hingga 1000 MeV. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk energi proton beberapa ratus MeV, diperoleh yield neutron dalam besaran 10^{16} n/det/MA-proton. Untuk energi proton hingga 500 MeV target Hg mempunyai yield yang kira-kira sama dengan target Pb dan W dan untuk rentang energi 500-1000 MeV melampauinya. Pada daerah energi 200 hingga 500 MeV karakteristik distribusi fluks neutron di sekitar target dan spektrum neutron di dalam target adalah hampir serupa. Intensitas tertinggi dari neutron dicapai pada energi 300 keV.

Kata kunci : target spallasi, ADS

ABSTRACTS

NEUTRONICS CHARACTERISTIC OF PROTON-MERCURY SPALLATION REACTION ON A TARGET SYSTEM OF ADS. Calculation and analysis of neutron yield, neutron flux and neutron spectrum of spallation reaction between high energy proton and mercury on a target system of Accelerator Driven System (ADS) have been carried out. The calculation by using a FLUKA program. The mercury target was modeled as a cylinder of 20 cm radius and 80 cm long. The range of proton energy is between 100 MeV and 1000 MeV. The calculation shows that in the hundreds MeV of proton energy it can be obtained neutron yield in the around of 10^{16} n/sec/MA-proton. For proton energy until 500 MeV, yield of Hg target is approximately equal with Pb and W targets and leading in the energy range of 500-1000 MeV. In the proton energies between 200 and 500 MeV, the characteristic of neutron flux distribution around the target and neutron spectrum inside the target are almost similar. In the neutron spectrum, neutron maximum intensity is located in the around of 300 keV.

Key words : spallation target, ADS

PENDAHULUAN

Salah satu isu penting dalam introduksi PLTN di Indonesia adalah menyangkut masalah penanganan limbah nuklir hasil operasi PLTN, karena suatu kenyataan bahwa operasi PLTN akan meninggalkan dampak lingkungan khususnya masalah limbah nuklir umur panjang. Untuk mencapai kondisi penerimaan masyarakat (*public acceptance*) dalam introduksi PLTN, maka masalah kemampuan penanganan limbah nuklir (disamping masalah budaya keselamatan) harus menjadi topik penting dalam kegiatan litbang di Indonesia. Antisipasi kearah itu sebenarnya sudah dilakukan, terbukti dengan telah dimasukkannya topik dalam Agenda Riset Nasional tentang kajian teknologi pengolahan limbah nuklir dan proses penyimpanan bahan bakar nuklir bekas^[1]. Pengolahan limbah nuklir menggunakan teknologi transmudasi dalam

fasilitas Accelerator Driven System (ADS) merupakan suatu metode untuk mengurangi bahkan menghilangkan dampak negatif dari limbah nuklir umur panjang. Dengan penguasaan teknologi transmudasi dengan ADS akan memberikan suatu opini positif di masyarakat bahwa SDM Indonesia telah siap masuk kedalam era PLTN.

Salah satu program litbang di PTAPB adalah pengembangan teknologi ADS untuk transmudasi limbah nuklir. Dalam tahap-tahap awal telah dan sedang dilakukan pengkajian dan perhitungan-perhitungan untuk desain sistem akselerator partikel energi tinggi dan target spallasi. Sistem akselerator energi tinggi telah diperoleh hasil kajian bahwa sistem akselerator Linac adalah yang sesuai untuk penggunaan dalam ADS. Untuk target spallasi akan diteliti beberapa material seperti timbal, wolfram dan merkuri.

Dalam suatu ADS sumber neutron yang terkendali dihasilkan oleh suatu reaksi spallasi antara proton atau deuteron energi tinggi dengan suatu target inti berat. Proton atau deuteron energi tinggi berasal dari bagian akselerator dan target inti berat berada pada sistem target. Penentuan yield neutron hasil spallasi berguna untuk keperluan desain daya akselerator yaitu intensitas dan energi partikel penembak^[2].

Target untuk proses spallasi yang kini tengah dikaji ada yang berbentuk padat dan ada yang cair. Target cair menjadi bahan pertimbangan kajian karena beberapa pertimbangan antara lain: transfer panas berlangsung secara konveksi, tidak ada stress yang disebabkan gradient termal di dalam target dan keaktifan yang dihasilkan lebih rendah dalam volume target yang lebih besar.

Merkuri merupakan salah satu kandidat target cair yang kini tengah dikaji, berbentuk cair pada suhu kamar sehingga tidak memerlukan pemanasan tambahan untuk mencegah pembekuan. Dibanding PbBi, target merkuri merupakan sumber neutron yang lebih kuat dan densitasnya 30% di atasnya. Merkuri juga mudah dalam proses pemurniannya, tidak menghasilkan produk aktif alfa dan hanya mempunyai satu isotop umur panjang (Hg-194) yang juga produk spallasi yang langka. Tampang lintang serapan neutron termal yang tinggi merupakan satu kerugian bila dioperasikan pada reaktor termal tetapi tidak perlu dipandang masalah untuk operasi reaktor neutron cepat. Atas dasar alasan-alasan tersebut merkuri telah merupakan salah satu pilihan sebagai material target untuk pembangkitan sumber neutron spallasi^[3]. Material-material target lainnya yang sekarang sedang dikaji adalah: bismuth, wolfram, tungsten (di KENS dan ISIS), uranium 238 (di Proyek SNS USA) dan timbal.

Banyak masalah yang harus dikaji dalam masalah target spallasi dalam ADS, tetapi pada makalah ini hanya dikhususkan pada analisis hasil perhitungan yield neutron, distribusi fluks dan spektrum neutron yang dihasilkan pada reaksi proton untuk target merkuri. Masalah ini merupakan masalah sentral untuk proses-proses sebelumnya dan sesudahnya dalam ADS; karena pemilihan jenis akselerator pada dasarnya tertuju untuk menghasilkan neutron hasil spallasi yang kuat dan proses unjuk kerja reaktor subkritik sangat ditentukan oleh sumber neutron spallasinya.

Perhitungan ini merupakan bagian dari kegiatan litbang Kajian Transmutasi Limbah Nuklir Menggunakan ADS yang telah dicanangkan mulai tahun 2007 untuk selama tiga tahun. Sasaran tahun ini adalah diperoleh karakteristik umum tentang

teknologi akselerator energi tinggi dan sistem target spallasi. Perhitungan dilakukan menggunakan program FLUKA yang telah digunakan oleh beberapa negara Eropa untuk mendesain ADS. Hasil perhitungan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap masalah sejauh mana merkuri dapat digunakan sebagai material target yang layak digunakan.

DASAR PERHITUNGAN

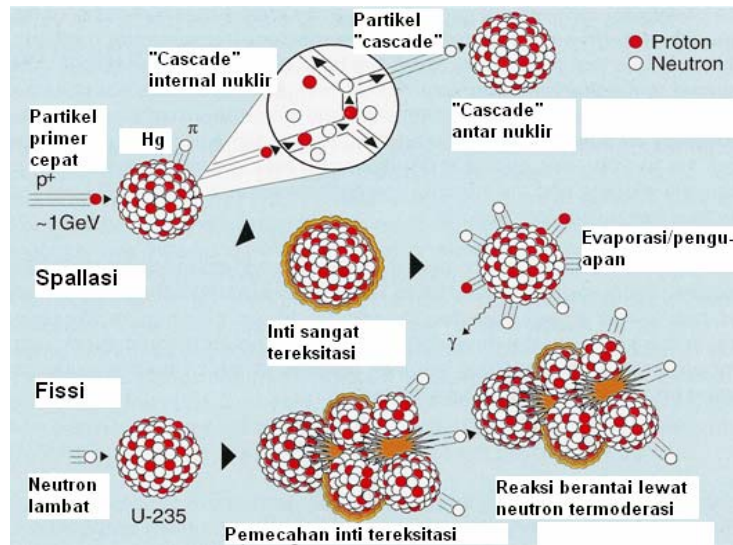
Reaksi Spallasi

Jika suatu partikel (misal proton atau deuteron) energi tinggi menumbuk target unsur berat, beberapa neutron akan terlontarkan oleh reaksi spallasi^[4]. Dalam tahap pertama proses spallasi, partikel datang berinteraksi secara langsung dengan nukleon individu inti target dan partikel sekunder berenergi sangat tinggi terlontarkan. Tahap ini di dalam teori fisika nuklir disebut sebagai *intra nuclear cascade*. Energi dipindahkan dari partikel datang ke inti target, menyebabkan inti tersebut berada di tingkat eksitasi tinggi. Partikel-partikel yang dilontarkan di dalam proses ini adalah neutron, proton atau pion. Dalam proses tahap kedua yaitu tahap *inter nuclear cascade*, inti-inti target "menguapkan" sejumlah besar nukleon-nukleon atau *cluster* kecil nukleon dengan energi lebih rendah (beberapa MeV) seperti neutron, proton dan deuteron. Sebagai hasil dari proses-proses tersebut sejumlah besar neutron dihasilkan.

Pada Gambar 1 diperlihatkan skema proses spallasi dan dipertandingkan dengan proses fisi. Perbedaan yang prinsip dari keduanya adalah bahwa pada proses spallasi tidak bersifat *sustainable* seperti pada proses fisi, yaitu proses tidak dapat berlangsung terus tanpa ada partikel penembak yang datang.

Program FLUKA

FLUKA akronim dari FLUktuierende Kas-kade merupakan program yang secara umum dipakai untuk mensimulasikan interaksi radiasi dengan bahan^[5]. Kode fisika ini diaplikasikan untuk menyelesaikan problem-problem yang sangat luas, mulai dari fisika energi tinggi hingga fisika medik dan fisika radiasi termasuk di dalamnya untuk mengkaji desain ADS. Dalam teknologi ADS baik untuk tujuan transmudasi limbah maupun produksi energi, kode ini juga telah cukup banyak digunakan untuk mensimulasi reaksi nuklir spallasi yang dihasilkan oleh proton energi tinggi pada target spallasi^[6].



Gambar 1. Skema reaksi spallasi oleh proton menghasilkan neutron dan proses fisi.

Program FLUKA menetapkan input target yang berbentuk silinder sedangkan jenis partikel datang, energi kinetik dan komposisi material target dapat divariasikan, dengan maksud untuk mempelajari efek-efek dari parameter-parameter tersebut pada karakteristik neutronik dari sistem. File output akan menunjukkan distribusi partikel, deposisi energi pada target, kerapatan fisi dan spektrum energi di dalam target, yang akan memungkinkan pengambilan kesimpulan berguna berkenaan dengan desain sistem.

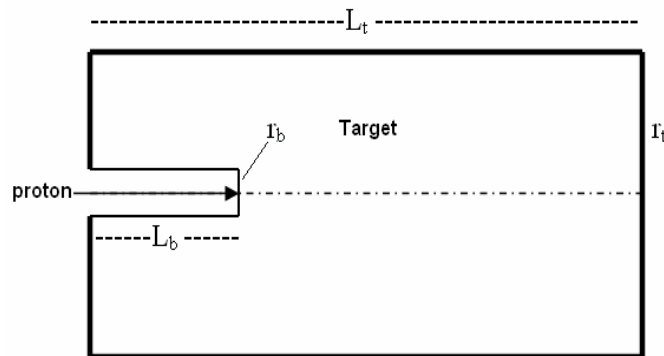
Reaksi spallasi antara proton dengan energi 0,1 hingga 1 GeV dengan target merkuri (Hg) bermassa atom 200,6. Berkas dianggap mengarah ke z terdistribusi secara *gaussian* dengan standar deviasi 5 mm dalam arah x dan y. Target mempunyai panjang (L_t) 80 cm dan radiusnya (r_t) 20 cm. Pada Gambar 2 diperlihatkan geometri dari sistem target.

Berkas proton didesain masuk kedalam silinder melalui lorong vakum yang mempunyai radius (r_b) 2 cm dan panjang (L_b) 20 cm. Kemudian akan dihitung:

1. yield neutron
2. distribusi fluks neutron di sekitar target
3. spektrum neutron di dalam target

TATA KERJA

Obyek Analisis



Gambar 2. Model sistem target spallasi.

Sarana Perhitungan

Analisis diperoleh dari suatu perhitungan menggunakan program FLUKA. Untuk menjalankan Program ini diperlukan input yang terdiri atas baris-baris (*lines*)^[7]:

TITLE (Judul)

Walaupun judul hanya optional tetapi dianjurkan untuk dibuat, dalam hal ini misal “Perhitungan Yield Neutron dari Reaksi Proton hingga 1 GeV dengan Target Merkuri”.

BEAM (Berkas Partikel)

Mendefinisikan tentang karakteristik berkas : energi, profil, jenis partikel. Energi dinyatakan dalam satuan GeV; profil intensitas dapat dalam bentuk homogen atau bentuk Gaussian; jenis partikel dinyatakan dalam tulisan NAMA partikelnya. Untuk kasus dalam analisis ini ditulis sebagai:

- energi: 0.1 – 1.0 GeV
- profil: Gaussian
- jenis partikel PROTON

BEAMPOS (Posisi Berkas)

Baris ini memberikan input posisi awal berkas. Penentuan posisi dapat diambil di suatu koordinat asalkan tidak pada koordinat batas daerah *blackhole*.

Geometry Definition (Definisi geometri)

Mendefinisikan tentang:

- geometri dari *blackhole*
- geometri target: bola, bidang, silinder

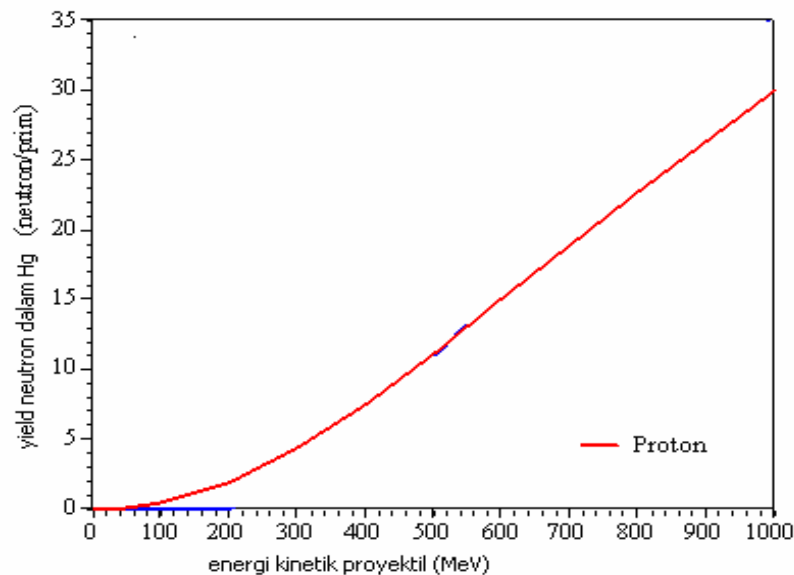
HASIL DAN PEMBAHASAN

Yield neutron

Hasil perhitungan yield neutron ditunjukkan pada Gambar 3.

Data pada Gambar 3 menunjukkan bahwa untuk energi hingga 500 MeV kenaikan *yield* neutron sebagai fungsi energi proyektil mengikuti fungsi eksponensial dan di atas 500 MeV kenaikannya linear. Jumlah proton datang untuk suatu arus proton I amper adalah : $\Phi = 6.25 \times \frac{I \times 10^{18}}{Z}$, dengan Z adalah muatan proton dalam satuan muatan elektron (sme). Sehingga jika diambil sebagai ilustrasi, *yield* yang diperoleh dari reaksi spallasi oleh proton adalah seperti dicantumkan pada Tabel 1.

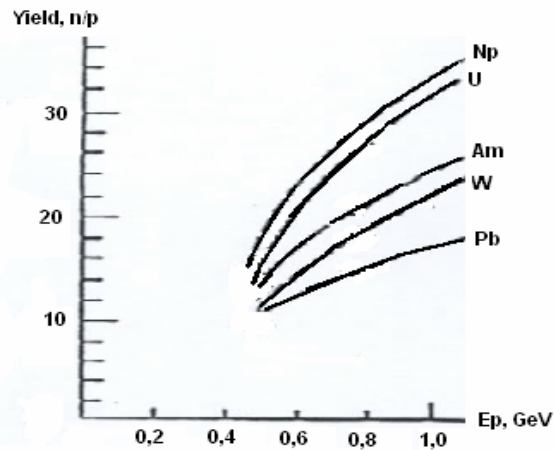
Yield neutron per proton (n/p) dari Hg dapat dibandingkan dengan material lain seperti ditunjukkan pada Gambar 4^[2].



Gambar 3. Yield neutron sebagai fungsi energi proton.

Tabel 1. Data yield neutron.

No	Energi proton, MeV	Yield nneutron, n/p	Yield neutron, n/mA-proton
1	100	<1	Sukar diamati
2	200	2	$1,25 \times 10^{16}$
3	300	4	$2,50 \times 10^{16}$
4	400	7	$4,40 \times 10^{16}$
5	500	11	$6,90 \times 10^{16}$
6	1000	30	



Gambar 4. Yield neutron/proton dari beberapa material.

Di sekitar 500 MeV, target merkuri kira-kira mempunyai yield n/p yang sama dengan material berat konvensional seperti Pb dan W. Di banding material fisil misal disini Am, U dan Np material Hg memang ada dibawahnya, tetapi material-material uranium dan di dekatnya mempunyai energi deposisi yang jauh lebih tinggi dibanding material berat lainnya disebabkan fisi dan pembentukan aktinida.

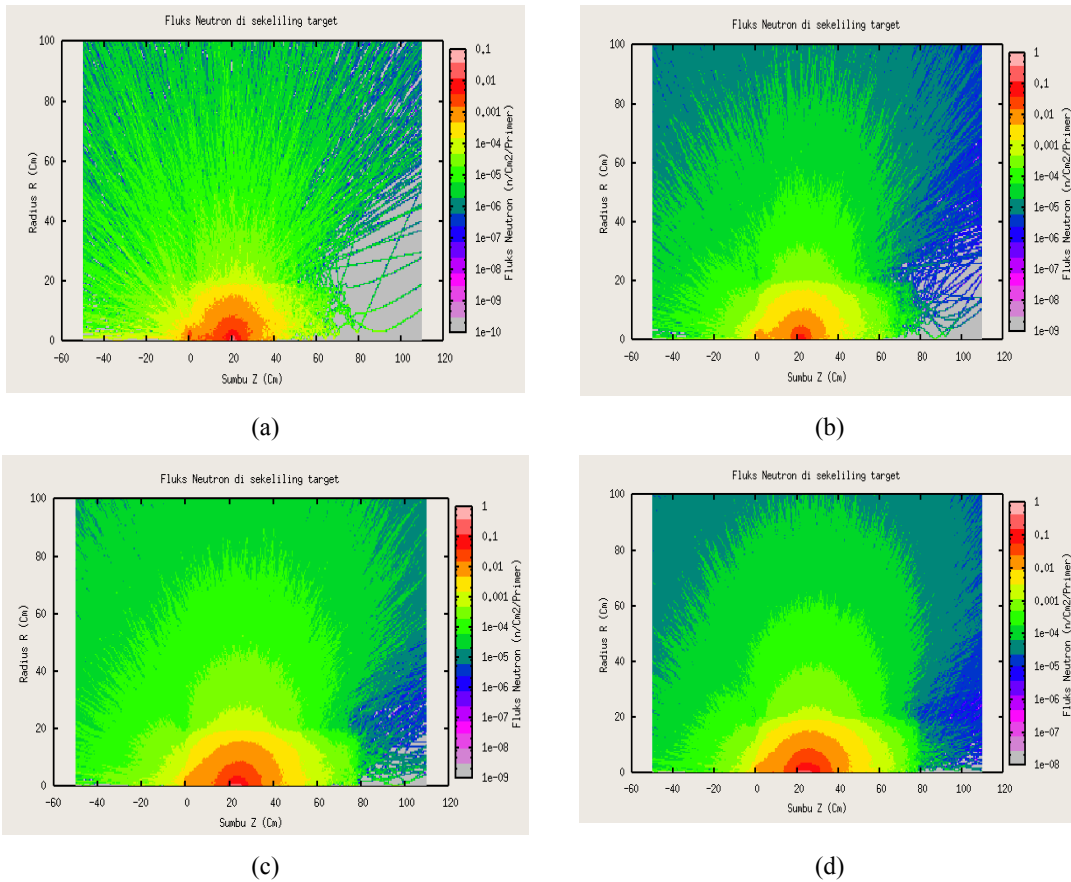
Pada energi di atas 500 MeV, yield target Hg mengungguli target-target Pb dan W dan terus menanjak dengan linear sementara target jenis lain naik dengan kecenderungan kearah jenuh. Pada energi proton 1 GeV, yield dari target Hg mencapai sekitar 30, nilai ini bersaing dengan yield yang didapat dari target U dan jauh mengungguli yield dari Pb dan W.

Distribusi fluks neutron

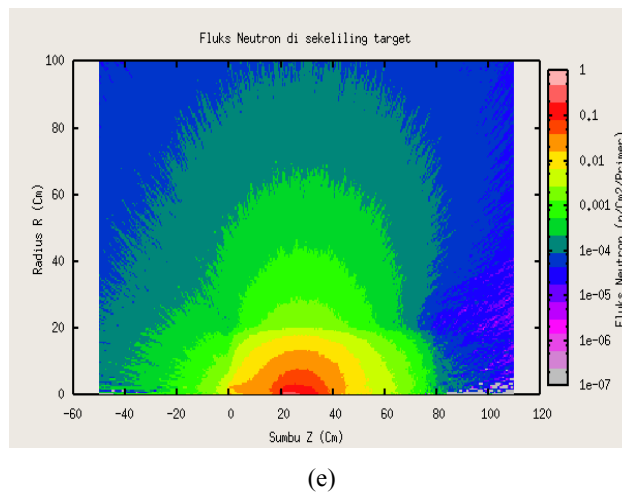
Distribusi fluks neutron di dalam dan di sekitar target silinder dicantumkan pada Gambar 5; posisi nol adalah ujung awal dari target silinder.

Dari pengamatan energi proton 100, 200, 300, 400 dan 500 MeV dapat diambil hal-hal sebagai berikut:

1. Terjadi lompatan yang nyata dari energi 100 MeV ke 200 MeV, dan di atas 200 MeV perubahannya tidak terlalu nyata
2. Melihat bentuk distribusi fluks pada radius 20 cm yaitu radius target, bentuknya menyerupai bentuk silinder target, yang berarti bahwa proton terhambur atau energinya terdeposisi keseluruhan target. Pada energi 100 MeV proton terhambur sampai dengan panjang 60 cm dan di atas 200 MeV terhambur hingga 80 cm, hal inilah yang menyebabkan mengapa fenomena yang disebutkan pada butir 1 di atas terjadi
3. Distribusi fluks yang seolah berhenti pada posisi 80 cm dan masih cukup nyata pada posisi < 0 cm ini berarti bahwa penggunaan target Hg yang berbentuk silinder sebaiknya ditempatkan pada lebih ke posisi ujung /dasar dari reaktor subkritik.



Gambar 5. Distribusi fluks neutron didalam dan disekitar target, untuk energi-energi proton: (a) 100 MeV, (b) 200 MeV, (c) 300 MeV, (d) 400 MeV.



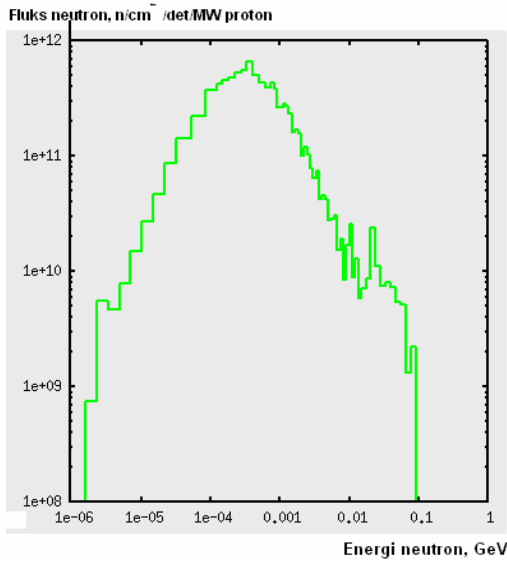
Gambar 5(e). Distribusi fluks neutron didalam dan disekitar target, untuk energi proton 500 MeV.

Spektrum Neutron

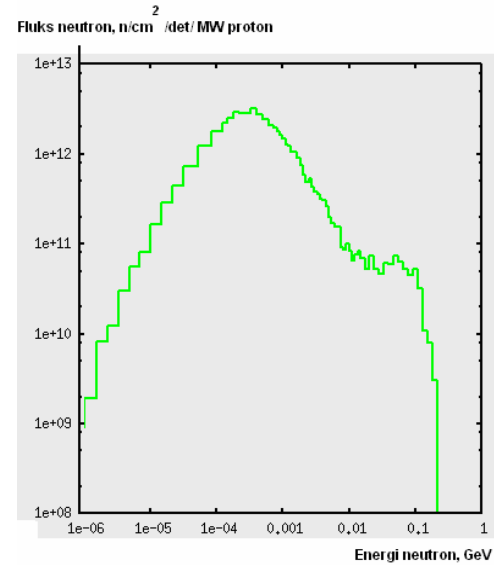
Hasil Fluka untuk perhitungan spektrum neutron spallasi di dalam target ditunjukkan pada Gambar 6(a) hingga 6(e), dalam satuan neutron /cm²/det/MW berkas proton.

Spektrum untuk kelima energi memperlihatkan yaitu kemiripan-kemiripan dalam hal:

1. Bentangan energi neutron berkisar antara beberapa ratus eV hingga ratusan MeV
2. Puncak spektrum terletak pada kira-kira 300 keV.

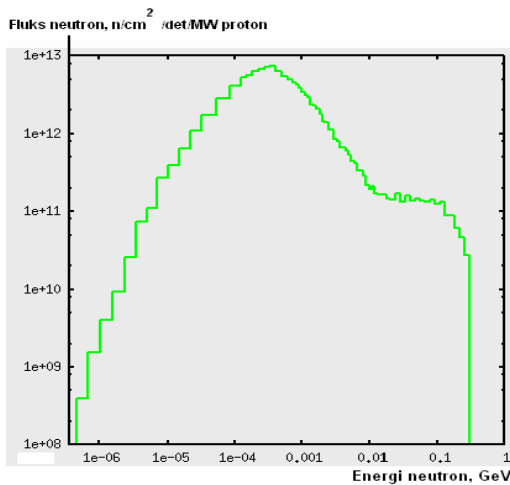


(a)

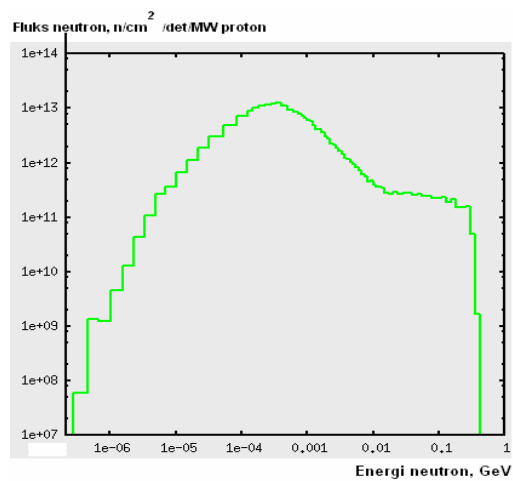


(b)

Gambar 6. (a) Spektrum neutron spallasi un-tuk energi proton 100 MeV dan (b) un-tuk energi neutron 200 MeV.

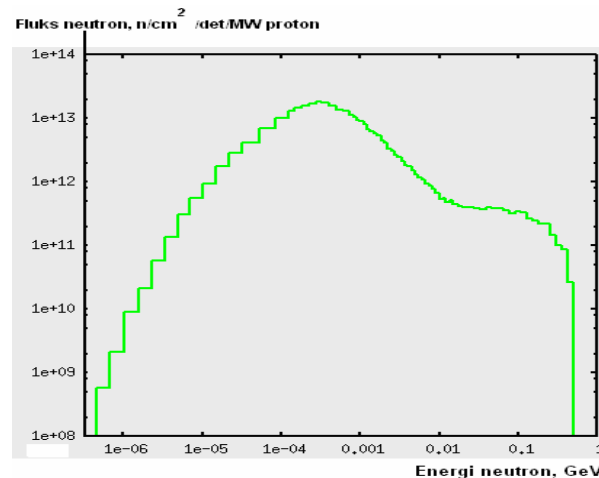


(c)



(d)

Gambar 6. (c) Spektrum neutron spallasi un-tuk energi proton 300 MeV dan (d) un-tuk energi neutron 400 MeV.



(e)

Gambar 6(e). Spektrum neutron spallasi untuk energi proton 500 MeV.

Energi puncak 300 keV ini sesuai benar dengan perhitungan Adonai Herrera dkk^[8]. Sesungguhnya energi penguapan rata-rata dalam teori spallasi adalah 2-3 MeV, akan tetapi disebabkan oleh hamburan berkali-kali neutron di dalam target sehingga energi puncaknya hanya 300 keV.

KESIMPULAN

1. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa reaksi spallasi proton-merkuri pada energi beberapa ratus MeV menghasilkan yield neutron dalam besaran 10^{16} n/detik/mA-proton.
2. Target Hg mempunyai yield neutron yang kira-kira sama dengan target Pb dan W pada energi proton hingga 500 MeV dan *yield* yang lebih tinggi di atas energi tersebut.
3. Pada daerah energi 200 hingga 500 MeV karakteristik distribusi fluks neutron di sekitar target tidak menunjukkan perbedaan kuantitas yang menyolok dan polanya hampir mirip.
4. Bentuk spektrum juga memperlihatkan bentuk yang mirip dan intensitas tertinggi dari neutron dicapai pada energi 300 keV. Data ini sesuai dengan energi neutron hasil perhitungan referensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Buku Agenda Riset Nasional 2006-2009, halaman 94 butir (h-1) (4)*, Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia.

- [2] KADI Y., *'Physics of Spallation and Sub-critical Cores: Fundamentals*, Materials of Workshop on Technology and Applications of Accelerator Driven System, ICTP Trieste Italy, 17 – 28 Oktober 2005.
- [3] GUNTER S. BAUER, *Target Design and Technology for Research Spallation Neutron Sources*, Materials of Workshop on Technology and Applications of Accelerator Driven System, ICTP Trieste Italy, 17 – 28 Oktober 2005.
- [4] MUKAIYAMA T., *Safeguards Aspects of High Power Proton Accelerator Driven System*, Proceedings of 3rd Workshop on Science and Modern Technology for Safeguards, Tokyo Japan 13-16 November 2000.
- [5] A. FASSO *et al*, *'FLUKA: Status and Prospective for Hadronic Application*, Proceedings of Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, October 23 – 26 2000.
- [6] KADI Y., *The EA-MC Monte Carlo Package*, Proceeding of the Fifth International Meeting on Simulating Accelerator Environment, OECD Headquarters, Paris, France, July 2000.
- [7] *Online Fluka manual*, www.fluka.org/manual/sect/s002/text.html
- [8] A. HERRERA *et al*, *Accelerator Driven System Design, Fluka Calculation*, Materials of Workshop on Technology and Applications of Accelerator Driven System, ICTP Trieste Italy, 17 – 28 Oktober 2005.

TANYA JAWAB

Sudjatmoko

- *Yang dipakai untuk reaksi spallasi apakah proton atau neutron.*
- *Apakah dalam perhitungan dengan FLUKA, materialnya dapat divariasi.*

Silakhuddin

- Dalam penelitian ini telah dihitung hasil reaksi spallasi antara target merkuri dengan proton.
- Ya, dengan FLUKA dapat dipilih/divariasi jenis material target sehingga dapat dibandingkan material satu dengan lainnya.

KESTABILAN BERKAS RADIASI AKSELERATOR LINIER PADA RADIOTERAPI

Putri Suryo Dinoto, Intanung Syafitri

P2STPFRZR - BAPETEN

ABSTRAK

LINAC dapat dipakai untuk mempercepat partikel hingga berenergi di atas 1 BeV. Betatron praktis tidak mungkin mencapai energi setinggi itu karena memerlukan magnet berukuran sangat besar. LINAC semula dipakai untuk mempercepat partikel bermuatan positif seperti proton. Namun, setelah melalui berbagai modifikasi, mesin ini dapat pula dipakai untuk mempercepat partikel bermuatan negatif seperti elektron. Dalam hal ini, elektron yang dipercepat mampu bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya (elektron dengan energi 2 MeV bergerak dengan kecepatan 0,98 c, dengan c adalah kecepatan cahaya). Jika elektron berenergi tinggi itu ditabrakkan pada target dari logam berat maka dari pesawat LINAC ini akan dipancarkan sinar-X berenergi tinggi, dan pada radioterapi dapat juga dilakukan menggunakan elektron berenergi tinggi. Salah satu penentu keberhasilan terapi kanker dalam radioterapi adalah keseragaman distribusi dosis dalam satu lapangan berkas radiasi yang terlihat pada parameter flatness dan symmetry. Pengukuran flatness dan symmetry pada pesawat akselerator linier medik perlu dilakukan secara periodik mengingat adanya ketidakstabilan pada berkas yang dihasilkan terhadap waktu. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan dosimeter rainbow. Rekomendasi dari AAPM untuk pengukuran flatness dan symmetry tidak boleh lebih dari 3%, dengan demikian pesawat akselerator linier medik layak digunakan untuk perlakuan terapi pasien.

Kata kunci : LINAC, radioterapi, flatness, symmetry

ABSTRACT

LINAC can be used to accelerate particle until 1 BeV energy. Practically the betatron is impossible to achieve this energy as high as LINAC energy because needs magnet in big size. In the first time, the use of LINAC is to accelerate positive charge ion such as proton. However, after several modification, this machine can be used to accelerate electron. In this case, accelerated electron can move near the speed of light (electron with 2 MeV energy move with speed 0,98 c, with c is velocity light). If the highest energy electron is to be collided with heavy metal from LINAC machine will be emitted by high energy x-rays, and on the radiotherapy could be done with electron in high energy. The one of cancer therapy success in radiotherapy is the uniform of doses distribution in one field radiation beam that can be sign in flatness and symmetry parameter. Flatness and symmetry measurement in medical accelerator linier machine needs to be perform periodically, because there some unstable in beam that result with the time. Measurement using rainbow dosimeter. AAPM recommendation, that mentioned the flatness and symmetry shall be $\leq 3\%$, so medical linier accelerator adequate for using in patient therapy.

Keywords : LINAC, radiotherapy, flatness, symmetry

PENDAHULUAN

Dunia kedokteran selalu mengalami perkembangan yang cukup signifikan. Salah satunya dengan pemanfaatan teknologi nuklir dalam tindakan-tindakan radiodiagnosa, radioterapi, dan kedokteran nuklir. Berbagai jenis radiasi pengion untuk keperluan radioterapi dibangkitkan menggunakan akselerator (alat pemercepat) partikel. Awalnya, akselerator partikel digunakan untuk penelitian fisika energi tinggi dengan cara menabrakkan partikel berkecepatan sangat tinggi ke target tertentu. Namun, ada beberapa jenis akselerator partikel yang dirancang

untuk memproduksi radiasi berenergi tinggi untuk keperluan radioterapi. Radioterapi didefinisikan sebagai suatu cara mematikan sel kanker/tumor pada manusia dengan teknik radiasi yaitu memberikan dosis radiasi pengion yang cukup besar pada jaringan kanker tanpa (seminimal mungkin) merusak jaringan sehat, terutama organ-organ klinis.

Akselerator adalah alat yang dipakai untuk mempercepat gerak partikel bermuatan seperti elektron, proton, inti-inti ringan, dan inti atom lainnya. Mempercepat gerak partikel bertujuan agar partikel tersebut bergerak sangat cepat sehingga memiliki energi kinetik yang sangat tinggi. Untuk

mempercepat partikel ini diperlukan medan listrik ataupun medan magnet. Dilihat dari jenis gerakan partikel, ada dua jenis akselerator, yaitu akselerator dengan gerak partikelnya lurus (lebih dikenal dengan sebutan akselerator linier) dan gerak partikelnya melingkar (akselerator siklik)^[5].

Tabung sinar-X merupakan contoh paling sederhana tentang jenis akselerator partikel tunggal. Dalam tabung ini, elektron yang dipancarkan oleh filamen panas dipercepat melalui tabung hampa menuju target *tungsten* atau *wolfram* (W) yang diberi beda potensial positif tinggi terhadap sumber elektron. Sinar-X terpancar ketika elektron berkecepatan tinggi tersebut berhenti dalam target. Tabung sinar-X dioperasikan dalam beda tegangan hingga kira-kira 2×10^6 V. cHal itu berarti elektron dipercepat di dalam tabung hingga memiliki energi kinetik sebesar 2×10^6 eV, dan sinar-X yang dihasilkannya memiliki energi maksimum 2×10^6 eV atau 2 MeV^[5].

AKSELERATOR LINIER

Dalam sejarahnya pada tahun 1929 di Swiss, R. Wideroe memperkenalkan Akselerator linier (*Linear Accelerator*, LINAC) pertama kali. Namun unjuk kerjanya saat itu kurang memuaskan. LINAC mempunyai kelebihan dan kekurangan dibandingkan dengan akselerator magnetik.^[5] Kelebihan akselerator linier adalah:

1. Memerlukan magnet dengan ukuran yang jauh lebih kecil dibandingkan pada akselerator magnetik untuk menghasilkan partikel dengan energi kinetik yang sama.
2. Ukuran alat dan biaya yang diperlukan untuk mengoperasikan LINAC kira-kira proporsional dengan energi akhir partikel yang dipercepat. Sedangkan pada akselerator magnetik, tenaga yang diperlukan akan lebih tinggi untuk menghasilkan energi akhir partikel yang sama besarnya. Oleh sebab itu, untuk mendapatkan partikel berenergi sangat tinggi LINAC akan lebih ekonomis dibandingkan akselerator magnetik. Disamping itu, penyuntikan partikel yang akan dipercepat dalam akselerator magnetik sangat sulit dilakukan, sedang pada LINAC partikel dalam bentuk berkas terkolimasi secara otomatis terpancar ke dalam tabung akselerator.
3. LINAC dapat dipakai untuk mempercepat partikel hingga berenergi di atas 1 BeV.
4. Dapat dipakai untuk mempercepat partikel bermuatan negatif seperti elektron. Dalam hal ini, elektron yang dipercepat mampu bergerak

dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya (elektron dengan energi 2 MeV bergerak dengan kecepatan 0,98 c, dengan c adalah kecepatan cahaya). Jika elektron berenergi tinggi itu ditabrakkan pada target dari logam berat maka dari pesawat LINAC ini akan dipancarkan sinar-X berenergi tinggi.

5. Elektron yang dipercepat dalam LINAC dapat langsung dimanfaatkan untuk radioterapi tanpa harus ditabrakkan terlebih dahulu dengan target logam berat. Jadi LINAC dapat juga berperan sebagai sumber radiasi partikel berupa elektron cepat yang dapat dimanfaatkan untuk radioterapi tumor.

Kekurangan akselerator linier:

1. Mempunyai sistem elektrik dan operasional yang rumit.
2. Biaya konstruksi (instalasi), perawatan, dan operasionalnya mahal.
3. Mengingat ketidakstabilan pesawat LINAC, maka perlu dilakukan pengecekan pada sistem sesering mungkin dan direkomendasikan setiap hari.
4. Laju dosis keluaran pesawat LINAC tidak lebih stabil daripada dengan sumber terapi zat radioaktif Co-60 atau Cs-137.
5. Semakin besar energi yang dihasilkannya, panjangnya alat membutuhkan tempat yang semakin luas.
6. Jika dinding rongga akselerator dibuat dari material konduktor yang normal (besi, tembaga) maka medan akselerasinya juga makin besar sehingga hambatan dinding akan mengubah energi elektrik menjadi panas.

Pesawat LINAC paling sederhana mempunyai energi 4 – 6 MeV dengan ukuran tabung agak pendek 50 – 100 cm, sedangkan pesawat LINAC yang digunakan untuk terapi mempunyai energi dari 4 – 35 MeV. LINAC modern dilengkapi dengan pilihan treatment berkas radiasi, yaitu: berkas elektron dan berkas foton (dual mode), dua berkas foton, lima atau lebih berkas energi elektron.^[5]

KESTABILAN BERKAS RADIASI PESAWAT LINAC MEDIK

Salah satu kekurangan pesawat akselerator linier medik adalah adanya ketidakstabilan berkas terhadap waktu akibat rumitnya sistem elektrik yang ada. Kestabilan berkas radiasi ini berpengaruh terhadap distribusi dosis yang sampai ke pasien.

Untuk itu, mengontrol tingkat kestabilan berkas radiasi sebagai bagian dari *quality assurance* (jaminan kualitas) merupakan hal yang sangat penting dilakukan mengingat ketepatan dan ketelitian dosis yang diberikan pada pasien sangat mempengaruhi efektivitas pengobatan atau perlakuan terapi. Cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui tingkat kestabilan berkas radiasi suatu pesawat akselerator linier yaitu dengan menentukan besarnya:

1. *Flatness* berkas radiasi

Flatness berkas radiasi foton didefinisikan sebagai prosentase variasi dosis maksimum yang diperbolehkan dalam satu lapangan berkas radiasi¹. Dengan kata lain, *flatness* dapat pula dinyatakan sebagai perbandingan dosis maksimum yang terjadi dalam suatu lapangan berkas radiasi dengan dosis minimum yang terjadi di lapangan tersebut.

2. *Symmetry* berkas radiasi

Symmetry berkas radiasi foton didefinisikan sebagai prosentase deviasi maksimum yang diperbolehkan dari dosis di sisi kiri terhadap dosis di sisi kanan berkas radiasi.^[1]

Dengan mengetahui besaran tersebut di atas, dapat diputuskan apakah pesawat terapi layak dan terjamin untuk keperluan terapi terhadap pasien pada saat dilakukan tindakan. *Flatness* dan *symmetry* berkas radiasi adalah parameter yang harus diperiksa pada waktu *acceptance test* pesawat radioterapi dan kemudian dilakukan pemeriksaan secara periodik. Dalam aplikasi klinis, besaran *flatness* dan *symmetry* menunjukkan distribusi dosis yang terjadi dalam satu lapangan berkas radiasi. Idealnya, distribusi dosis dalam satu lapangan berkas radiasi harus sama di semua titik sehingga dosis yang diterima kanker merata. Namun, dalam prakteknya hal ini sangat sulit dicapai. Untuk meminimalisasi ketidakrataan berkas tersebut, perlu diberikan batasan besar ketidakrataan distribusi dosis yang diperbolehkan. AAPM merekomendasikan besarnya *flatness* dan *symmetry* berkas radiasi foton tidak boleh lebih dari 3%.^[1] Dengan adanya batasan ketidakrataan ini diharapkan tujuan radioterapi dapat tercapai.

Pengukuran *flatness* dan *symmetry* dilakukan pada satu atau beberapa luas lapangan radiasi pada kedalaman tertentu di phantom, secara langsung maupun tidak langsung. Pengukuran secara langsung dilakukan dalam phantom air yang dilengkapi dengan sistem *scanning* dosimetri. Pengukuran ini dilakukan dengan mendeteksi langsung berkas radiasi menggunakan detektor yang

diletakkan dalam phantom air dan digerakkan oleh suatu sistem penggerak serta terkontrol dalam tiga dimensi. Pengoperasian dan analisis hasil pengukuran langsung dilakukan melalui program komputer. Prosedur pengukuran ini memerlukan persiapan alat yang lebih teliti dan memerlukan banyak waktu. Dengan menggunakan prosedur ini, penentuan *flatness* dan *symmetry* hanya mungkin dilakukan 6 bulan sekali.^[2]

Mengingat ketidakstabilan dari pesawat akselerator linier medik yang perlu dievaluasi sesering mungkin dan direkomendasikan untuk dilakukan setiap hari, maka perlu dicari alternatif bentuk alat ukur dan prosedur lain untuk menentukan *flatness* dan *symmetry* berkas radiasi pesawat akselerator linier medik sehari-harinya.^[2] Pengukuran tidak langsung dilakukan dengan menggunakan film. Film diletakkan di phantom padat pada kedalaman tertentu sesuai dengan yang diinginkan dan diradiasi. Setelah melalui tahap pencucian dan pengeringan, film ini dianalisis dengan densitometer film. Densitometer yang dirangkai dengan mikrokomputer akan menghasilkan kurva sensitometrik yang kemudian digunakan untuk mengkonversi profil densitas ke profil dosis. Profil dosis ini kemudian didigitasi di beberapa titik seperti yang diukur pada metode phantom air. Persiapan alat untuk metode ini memang lebih sederhana dan singkat, namun hasilnya tidak dapat langsung dilihat, harus melalui proses yang panjang. Di samping itu, film untuk metode ini tidak mudah didapatkan di Indonesia. Untuk penentuan *flatness* dan *symmetry* harian memerlukan alat yang persiapannya mudah dan singkat serta hasilnya dapat langsung terlihat seperti metode penelitian yang dilakukan oleh Universitas Indonesia Jurusan Fisika bekerjasama dengan *Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir-BATAN*, serta *Bagian Radioterapi RSCM*. Dalam penelitian tersebut dilakukan pengukuran dengan meletakkan 5 buah detektor dioda *rainbow* yang diletakkan pada kedalaman 1,5 cm phantom Perspex di sepanjang sumbu berkas radiasi. Pengukuran dilakukan pada tiap titik sebanyak 3 kali pengambilan data untuk masing-masing arah *crossplane* dan *inplane*. Persiapan alat ini sangat mudah dan singkat, hanya menempatkan kelima detektor pada tempat yang tersedia dan kondisi yang diatur hanya luas lapangan serta jarak fokus. Dengan adanya kemudahan ini diharapkan pengukuran dapat dilakukan setiap hari tanpa membebani pesawat untuk keperluan pasien, karena hanya memerlukan waktu beberapa menit saja.

Ketidakstabilan berkas radiasi yang dihasilkan pesawat sangat mungkin terjadi mengingat

pesawat akselerator linier medik terdiri dari komponen-komponen elektronik yang sangat kompleks. Ketidakstabilan pada salah satu komponen akan menghasilkan ketidakstabilan pada berkas radiasi yang dihasilkan. Hal ini dapat berupa ketidakstabilan suplai tegangan dan frekuensi gelombang mikro pada tabung pemercepat, serta suplai tegangan pada *bending* magnet. Suplai tegangan dan suplai frekuensi gelombang mikro akan mempengaruhi energi berkas elektron yang dihasilkan. Bila pada suplai tegangan dan frekuensi gelombang mikro terjadi ketidakstabilan, maka pada energi berkas radiasi yang dihasilkan pun akan terjadi ketidakstabilan. *Bending magnet* berfungsi memfokuskan berkas elektron pada satu titik.^[2] Ketidakstabilan medan magnet pada *bending magnet* ini akan menghasilkan ketidakstabilan pada pemfokusannya. Tingkat ketelitian dalam melakukan setiap pengukuran juga akan mempengaruhi fluktuasi data eksperimen yang dihasilkan. Untuk itu, memperkecil tingkat kesalahan akibat kekurangtelitian sangat diperlukan. Faktor lain yang mempengaruhi kestabilan data yang dihasilkan adalah karakteristik detektor yang digunakan. Detektor dioda memiliki sensitivitas yang tinggi, namun memiliki ketergantungan terhadap energi dan sensitivitasnya berubah karena kerusakan akibat radiasi. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Universitas Indonesia Jurusan Fisika bekerjasama dengan *Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir-BATAN*, serta *Bagian Radioterapi RSCM* ini diperoleh hasil di bawah nilai 3%, kecuali data *flatness* pada eksperimen I. Hal ini sesuai dengan rekomendasi yang ada^[1], sehingga metode ini dapat digunakan untuk mengevaluasi *flatness* dan *symmetry* berkas foton. Dengan kemudahan pada persiapan alat ini memungkinkan pengukuran dengan alat ini dapat dilakukan sehari-hari tanpa membebani pesawat untuk keperluan pasien, karena hanya memerlukan waktu beberapa menit.

KESIMPULAN

1. Keberhasilan terapi kanker dengan radiasi sangat bergantung pada keakuratan dosis yang diberikan ke jaringan kanker.
2. Pesawat akselerator linier medik memiliki kendala adanya ketidakstabilan berkas radiasi yang dihasilkan terhadap waktu. Mengontrol tingkat kestabilan berkas merupakan hal yang penting dilakukan. Salah satu parameter yang menentukan tingkat kestabilan berkas adalah *flatness* dan *symmetry* berkas radiasi. Dengan parameter ini dapat diputuskan apakah pesawat terapi tersebut layak dan terjamin untuk

keperluan terapi terhadap pasien saat dilakukan tindakan. Metode pengukuran *flatness* dan *symmetry* menggunakan 5 buah detektor dioda pada phantom perspex yang sangat mudah dan singkat sehingga memungkinkan untuk dilakukan setiap hari.

3. Berdasarkan rekomendasi AAPM, pesawat LINAC dinyatakan layak dipergunakan untuk tindakan radioterapi jika pengukuran *flatness* dan *symmetry* tidak lebih dari 3 %.
4. Untuk pemeriksaan kestabilan berkas radiasi akselerator linier pada radioterapi lebih mudah dilakukan dengan metode yang telah dilakukan dalam penelitian. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Universitas Indonesia Jurusan Fisika bekerjasama dengan *Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir-BATAN*. Hal ini dikarenakan kemudahan pada persiapan alat dan memungkinkan pengukuran dapat dilakukan sehari-hari tanpa membebani pesawat untuk keperluan pasien, karena hanya memerlukan waktu beberapa menit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] CUNNINGHAM, J.R. AND JOHNS, H.E., *The Physics of Radiology*. Edisi 4, Charles C Thomas Publisher, Springfield, 1983.
- [2] DESSY ARIANTY, SANTOSO SUKIRNO, NASUKHA, JUMADI, *Pengukuran Flatness dan Symmetry Berkas Radiasi Foton untuk Mengetahui Kelayakan Pesawat Akselerator Linier Medik dalam Keberhasilan Pengobatan Kanker*, 2002.
- [3] GRENEE D. and WILLIAMS P., *Linier Accelerator For Radiation Therapy*, 2nd edition, Bristol Philadelphia, 1997.
- [4] HENDEE W., IBBOTT G. and HENDEE E., *Radiation Therapy Physics*, 3rd edition, USA, 2005.
- [5] MUKLIS AKHADI, APU., Drs., *Akselerator Partikel untuk Radioterapi*, 2002.
- [6] MUKLIS AKHADI, APU., Drs., *Napak Tilas 106 Tahun Perjalanan Sinar-X: 8 November 1895 – 8 November 2001*, 2001.
- [7] Report of AAPM Radiation Therapy Task Group No. 45. *AAPM (American Association of Physicist in Medicine) Code of Practice for Radiotherapy Accelerators*. Medical Physics, 1994.

SISTEM SEDIAAN DAN INJEKSI AMONIAK UNTUK PENGOLAHAN GAS BUANG PLTU BATUBARA MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON

Budi Setiawan dan Muhadi AW.

PTAPB – BATAN YOGYAKARTA

ABSTRAK

SISTEM SEDIAAN DAN INJEKSI AMONIAK UNTUK PENGOLAHAN GAS BUANG PLTU BATUBARA MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON. Telah dilakukan prarancangan sistem dengan mempertimbangkan kebutuhan gas amoniak sebesar 24,78 kg/jam untuk kebutuhan 1 bulan serta tekanan sistem reaksi 1 atm. Dari kebutuhan tersebut dirancang sebuah tangki gas berdiri vertikal dengan tekanan 236 psi, volume tanki 1574,1867 ft³, dengan diameter 8 ft dan panjang 30 ft. Bahan konstruksi dari jenis Low alloy Steel SA203 Grade B, dengan perbandingan bentuk X : Y = 2 : 1 Ellipsoidal Dished Head, tebal 1 in. Sistem injeksi searah dengan arus utama gas buang terletak, yang diatur dengan valve, sebelum masuk reaktor mesin berkas elektron..

ABSTRACT

AMMONIAC SUPPLY AND INJECTION SYSTEM FOR FLUE GAS TREATMENT IN COAL POWERED STEAM ELECTRICITY GENERATOR USING ELECTRON BEAM MACHINE. System design had been conducted with the considering ammoniac gas requirement 24.78 kg/hour for 1 month requirement and 1 atm in reaction system pressure. Based on the requirement, we designed a 236 psi vertical standing gas tank. The volume of the tank is 1574.1867 ft³, with diameter 8 ft and length 30 ft. The construction material is Grade B Low alloy Steel SA203, shaped X : Y = 2 : 1 Ellipsoidal Dished Head, 1 inch thick. Injection system co current with main emission gas current is located before entering electron beam machine reactor, its controlled by valve.

PENDAHULUAN

Pemakaian batubara dalam kegiatan industri sangat banyak ditemukan, terutama batubara yang digunakan sebagai bahan bakar. Pada suatu PLTU yang memasok kebutuhan energi listrik bagi industri-industri lain kebanyakan menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya. Indonesia memiliki cadangan batubara 36,5 milyar ton atau sebanyak 3,1 % dari seluruh cadangan batubara dunia. Cadangan batubara tersebut 67,9 % terdapat di Sumatra, 31,6 % terdapat di Kalimantan dan sisanya terdapat di Jawa, Sulawesi dan Papua^[1]. Dari sekian banyak cadangan batubara di Indonesia ternyata yang kualitasnya memenuhi standar baku mutu emisi (BME) 2000 kurang dari 10 %. Sebagian besar cadangan batubara Indonesia kualitasnya tidak memenuhi standar BME 2000.

Pada pembakaran batubara selain dihasilkan gas buangan (CO, NOx, dan SOx) juga banyak dihasilkan partikel-partikel terdispersi ke udara sebagai bahan pencemar. Partikel-partikel tersebut antara lain : karbon dalam bentuk abu atau fly ash (

C), debu silika, debu alumina dan oksida-oksida besi. Gas-gas tersebut sangat berbahaya terhadap lingkungan, seperti gas NO yang mencemari udara tetapi secara visual sulit diamati karena gas tersebut tidak berwarna dan tidak berbau, sedangkan gas NO₂ mencemari udara mudah diamati dari baunya yang sangat menyengat dan warnanya coklat, demikian juga dengan oksida belerang. Udara yang mengandung gas NO dalam batas normal relatif aman dan tak berbahaya, tetapi bila gas NO berada dalam konsentrasi tinggi akan menyebabkan sesak nafas. Sebagian besar pencemaran udara oleh gas belerang oksida (SO_x) berasal dari pembakaran bahan-bahan fosil, terutama batubara. Ada dua macam gas belerang oksida (SO_x) yaitu : SO₂ dan SO₃. dalam hal ini perubahan akan menghasilkan gas SO₂ yang lebih banyak dari pada gas SO₃. walaupun gas SO₂ lebih dominan akan tetapi pertemuannya dengan udara yang mengandung oksigen akan menghasilkan SO₃.

Akibat dari pembakaran batubara yang berlebihan akan menghasilkan emisi gas buang (flue gas) yang mengandung SO₂ dan NOx dengan kadar

yang cukup tinggi, hal ini merupakan sumber polusi udara yang cukup besar. Reaksi oksidasi terhadap gas buang dengan oksigen di udara akan menghasilkan asam sulfat dan asam nitrat yang menyebabkan terjadinya hujan asam yang sangat berbahaya bagi lingkungan, apa lagi dengan meningkatnya penggunaan batubara berkualitas rendah menyebabkan tingkat pencemaran udara yang makin memprihatinkan. Berbagai teknologi dan proses telah dikembangkan untuk mengurangi emisi SO₂ dan NO_x, diantaranya adalah FGD (*Flue Gas Desulphurisation*), SCR (*Selective Catalytic Reduction*) dan EB-FGT (*Electron Beam Flue Gas Treatment*) menggunakan MBE (Mesin Bekas Electron).

Penerapan teknologi EB-FGT untuk memecahkan permasalahan gas buang dapat dijelaskan dalam beberapa proses sebagai berikut :

- Pendinginan gas buang. Pendinginan dilakukan dengan mengkontakkan gas buang dengan air, dimana air disamping sebagai pendingin juga berfungsi sebagai sumber terbentuknya radikal OH^o,
- Injeksi amoniak. Injeksi atau penambahan amoniak dan adanya air berfungsi untuk mengikat asam sulfat dan asam nitrat yang terbentuk membentuk amonium sulfat dan amonium nitrat,
- Reaksi dalam reaktor. Di dalam reaktor gas buang khususnya SO₂, SO₃, NO_x akan bereaksi dengan radikal bebas yang terbentuk karena air yang dikenai berkas elektron, sehingga terbentuk garam-garam amonium sulfat dan amonium nitrat,
- Pemisahan garam-garam dari gas buang yang tersisa pada Elektro Statik Presipitator (ESP).

Dengan dilakukannya prarancangan sistem sediaan dan injeksi amoniak ini diharapkan dapat digunakan sebagai bagian dari bahan rancangan sistem pengolahan gas buang secara keseluruhan, sehingga nantinya dapat diaktualisasikan dalam sebuah dokumen Basic Engineering Design Package. Pada pra rancangan sistem sediaan gas amoniak dihitung untuk keperluan pengolahan gas buang sebanyak 20.000 Nm³/jam, yang memerlukan gas amoniak sebanyak 24,78 kg/jam^[2], dan disediakan untuk keperluan proses selama 1 bulan.

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Sistem sediaan adalah sistem yang mampu menyediakan aliran gas amoniak sebanyak 24,78 kg/jam selama 1 bulan, atau $24,78 \times 24 \times 30 =$

17841,600 kg. Dari jumlah yang dibutuhkan kemudian dilakukan penyusunan pertimbangan rancangan sistem sbb :

1. Amonia bisa disimpan menurut 2 keadaan standar, yakni tekanan 1 atm (dengan suhu - 33.5°C) atau suhu lingkungan (dengan tekanan tinggi).
2. Pada prakteknya, di semua pabrik yang menggunakan amonia, pilihan pertama (standar tekanan) lebih disukai, yaitu dengan sistem pendingin (refrigerasi).
3. Untuk kapasitas kecil (seperti pada tangki ini), penggunaan sistem refrigerasi bisa jadi tidak feasible (terlalu mahal) dibandingkan harga alat.
4. Biaya untuk 'menjaga' tekanan lebih murah daripada untuk 'menjaga' suhu.
5. Kelemahan yang ada : tangki menjadi lebih tebal sehingga biaya konstruksi mahal.
6. Untuk tekanan 16 atm dipilih tangki silinder dengan head bentuk elipsoidal.
7. Dipilih bentuk vertikal karena hemat tempat.

Jenis^[3] : Vertical Tank, Elliptical Dished Heads

Bahan : Iron steel - Low alloy Steel SA203 Grade B

Dari pertimbangan di atas disusun langkah kerja sbb:

1. Ditentukan tekanan sistem dalam tangki
2. Ditentukan volume tangki
3. Dimensi Tangki
4. Tebal pelat
5. *Head design*
6. Dihitung dudukan atau *Lug - support of horizontal vessel - uninsulated vessel*
7. Ditentukan *Nozzle and Manhole*
8. Ditentukan peralatan pendukung

Untuk sistem injeksi, didisain berdasar kebutuhan dan kondisi sistem sebelum memasuki reaktor.

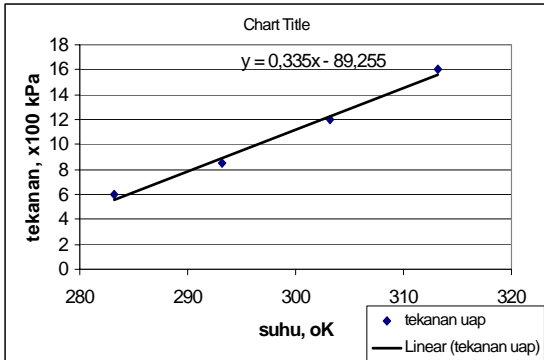
Rincian dan detail dari system dimuat dalam Lampiran yang menunjukkan ukuran, perkiraan biaya dan kebutuhan sebenarnya system.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari data kebutuhan diketahui bahwa amoniak 99.99 % normal boiling point = -33,5 °C. Sedang suhu sistem 25 °C, (faktor keamanan T = 35 °C), kemudian dicari data tekanan cair jenuh seperti pada Tabel 1. dan Gambar 1.^[4]

Tabel 1. Data tekanan uap jenuh NH₃.

Suhu, °K	Suhu, °C	Tekanan, ×100 kPa
283,15	10	6
293,15	20	8,5
303,15	30	12
313,15	40	16



Gambar 1. Kurva linier tekanan dan suhu.

Dari persamaan garis dapat dihitung, pada suhu 35 °C atau 308,15 °K, tekanan adalah 13,975 × 100 kPa, dengan faktor keamanan 1,1, maka tekanan adalah 15,373 × 100 kPa, diambil 16 x 100 kPa atau 16 atm atau 235,2 psi, diambil tekanan 236 psi.

Perhitungan Volume :

- Kebutuhan amoniak = 24,78 kg/jam
- Kapastias = 30 hari
- Jumlah harus ditampung = 24,78 × 24 × 30 = 17.841,600 kg
- Densitas = 0,618 kg/L
- Volume NH₃ cair = 17.841,600 × 0,618 = 29968,903 L = 28,8699 m³
- Jumlah tangki 1 buah
- Volume tangki = 29968,903 L = 7627,451 galon = 181,610 bbl = 1020,138 ft³

Dimensi Tangki :

Untuk tangki dengan elliptical dished head berlaku^[3]:

$$V = \pi \frac{D^2}{4} \times L + \pi \frac{D^3}{12}$$

Asumsi : Tebal Plate kurang dari 2 in, maka L/D = 6

$$V = \pi \frac{D^2}{4} \times 6D + \pi \frac{D^3}{12}$$

Volume tangki = (V cairan + ruang kosong) × over design =

$$(V + V \times 0,2) \times 1,1 = 1346,582 \text{ ft}^3 = 239,724 \text{ bbl}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{12V}{19\pi}}$$

$$D = 6,4701 \text{ ft} \quad L = 38,8205 \text{ ft}$$

Diambil ukuran standar dari Appendix E, Brownel & Young^[3]:

$$D = 8 \text{ ft} = 2,4384 \text{ m}$$

$$L = 30 \text{ ft} = 9,1440 \text{ m}$$

Jadi $V = 1574,1867 \text{ ft}^3$

Tebal Plate

Longitudinal stress

$$t = \left(P \times \frac{d}{4} \times E \times f \right) + c$$

$$P = \text{internal pressure} = r \times (L-1)/144 = 244,5428 \text{ psi}$$

$$d = \text{inside diameter} = 96 \text{ in}$$

$$f = \text{allowable working pressure} = 17500 \text{ psig}$$

(untuk Plate Steel SA240 Grade B)

$$E = \text{efek sambungan} = 85\%$$

$$c = \text{corrosion allowance} = 0,125 \text{ in}$$

Maka $t = 0,5196 \text{ in}$

Tebal standar = 9/16 in

Circumferential stress

$$t = P \times \frac{d}{2E f} + c$$

$$t = 0,9141 \text{ in}$$

Tebal standar = 15/16 in

Menurut PVH^[3], tebal shell :

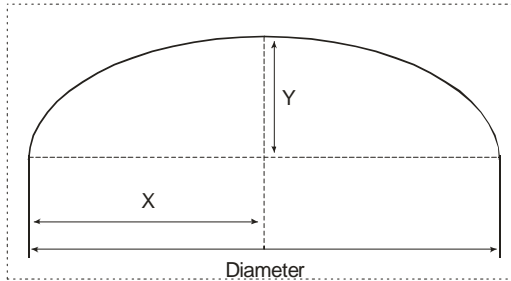
$$t = P \times \frac{R}{E \cdot f - 0,6P} + c$$

$$t = 0,92187 \text{ in}$$

Tebal standar = 15/16 in

Maka diambil tebal standar = 15/16 in atau 1 in

Heads Design



Gambar 2. Ellipsoidal dished head.

Head Design mengikuti pola Ellipsoidal Dished Head seperti pada Gambar 2.

Jenis X : Y = 2 : 1 Ellipsoidal Dished Head

Material Low alloy Steel SA203 Grade B

F = 17500 psi

Menurut PVH^[5], tebal shell

$$t = P \frac{D}{(2E f - 0,2 P)} + c = 0,91541$$

Tebal standar = 15/16 in

Maka diambil tebal standar = 15/16 in atau 1 in

Lug-support of horizontal vessel - uninsulated vessel

Menghitung berat alat (data PVH)^[5] :

shell 1013 lb/ft, panjang 30 ft	berat = 30390 lb
head ellips 3394 lb	berat = 6788 lb (top & bottom)
berat vessel	= 37178 lb = 16864 kg
massa bahan	= 17841,6000 kg
massa total	= 34705,4302 kg = 34,70543017 ton

angka aman (kali 1,1)	= 38,17597319 ton
diambil	= 39 ton
	= 85979,4 lb
Diambil jumlah lug	= 4 buah
Q tiap lug	= 21494,85 lb
Angka aman (kali 1,1)	= 23644,335 lb
Dipilih untuk kriteria	= 36000 lb

Nozzle and Manhole

Standar PVH^[5]:

untuk ID > 36 in, minimum 15 in manhole atau 2 - 6 in pipe size nozzle

diambil 24 in manhole

6 in pipe size nozzle (3 buah; 1 untuk *intake* (atas), 1 untuk *outtake* (atas), 1 untuk *blowdown* (dasar))

Instrumentasi Kendali

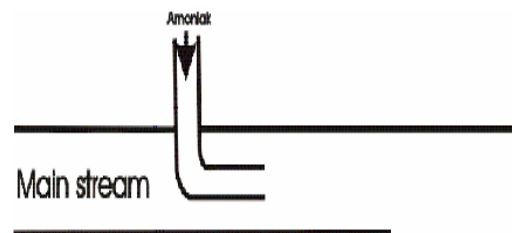
Sistem sediaan gas amoniak (tangki) harus dilengkapi dengan :

- katup pengaman (*vent*)
- level indikator
- pressure indikator
- pressure gas valve
- flow meter

Sistem Injeksi

Gas amoniak disimpan dalam bentuk cair dengan tekanan tinggi agar terjadi pengurangan volume. Pada bagian atas tangki terjadi uap jenuh NH₃ yang akan mengalir ke sistem aliran gas buang pada tekanan 1 atm secara kontinyu.

Kecepatan aliran diatur dengan valve yang secara otomatis akan mengatur kecepatan alir gas NH₃ sesuai kebutuhan (d disesuaikan aliran gas buang)



Gambar 3. Posisi sistem injeksi.

Posisi sistem injeksi diletakkan sebelum masuk reaktor, dengan harapan gas akan tercampur sempurna ketika memasuki reaktor. Pada Gambar 3 sistem injeksi gas amoniak dibuat searah dengan arus gas buang, hal ini akan sangat mendukung pemerataan reaksi.

KESIMPULAN

1. Sistem sediaan berupa tanki vertikal bertekanan 236 psi dengan volume tanki 1574,1867 ft³ (D = 8 ft, L = 30 ft). Volume NH₃ cair sebanyak 28,8699 m³.
2. Bahan dari Jenis *Low alloy Steel* SA203 Grade B, bentuk X : Y = 2 : 1 Ellipsoidal Dished Head, tebal 1 in.
3. Sistem injeksi dibuat searah dengan arus utama gas buang, dengan keluaran sebelum reaktor mesin berkas elektron. Kecepatan gas diatur dengan menggunakan *valve*.

DAFTAR ACUAN

- [1] SUGIYONO, AGUS, *Teknologi Dan Kulivasi Grafikasi Batubara Pertambangan*, Pertamina –KNI-WEC, Lokakarya Energi, 1996.
- [2] TIM PENYUSUN DOKUMEN, *Basic Engineering Design Package (BEDP) Sistem Pengolahan Gas Buang PLTU Batubara Menggunakan MBE*, Revisi : 0, PTAPB – Batan, Yogyakarta.
- [3] BROWNELL, L. E. AND YOUNG, E. H., *Process Equipment Design : Vessel Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1959.
- [4] COULSON, J. M. AND RICHARDSON, J. F., *Chemical Engineering : An Introduction to Chemical Engineering Design*, Vol. 6, Pergamon Press, New York, 1983.
- [5] MEGYESY, E. F., *Pressure Vessel Handbook*, 11th ed., Pressure Vessel Handbook Publishing, Inc., Tulsa, 1972.

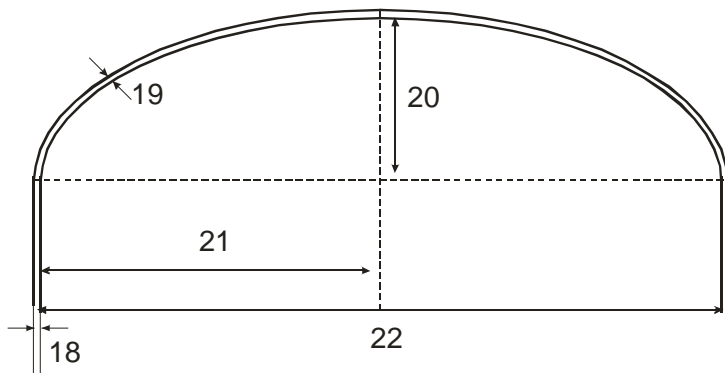
LAMPIRAN

1. Estimasi Harga

Informasi harga dari www.matche.com untuk tahun 2007, harga Pressure Vessel dengan massa 37178 lb adalah US\$ 271700

2. Gambar Detil Komponen

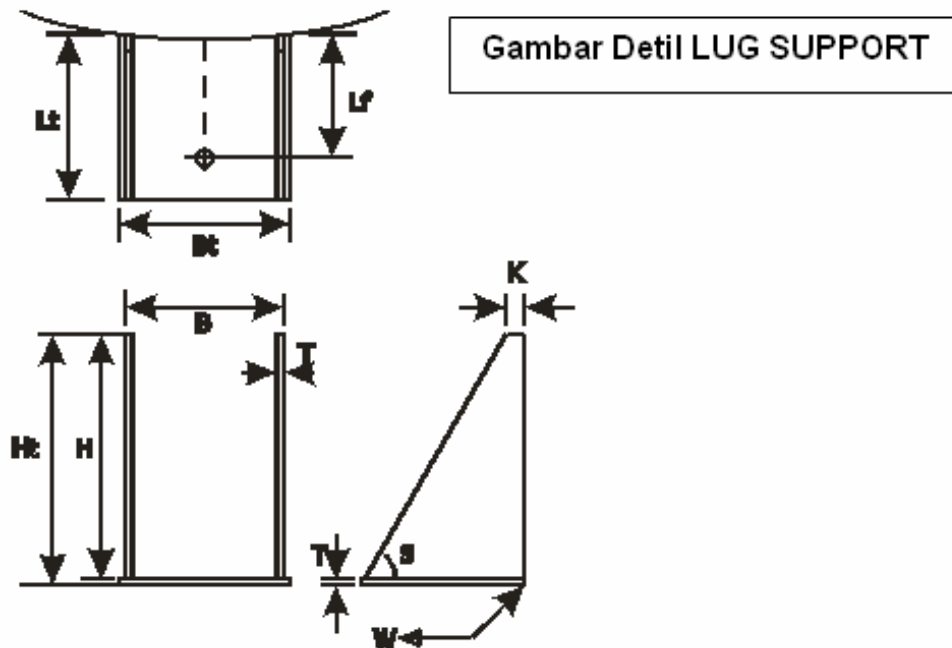
Gambar Head Design



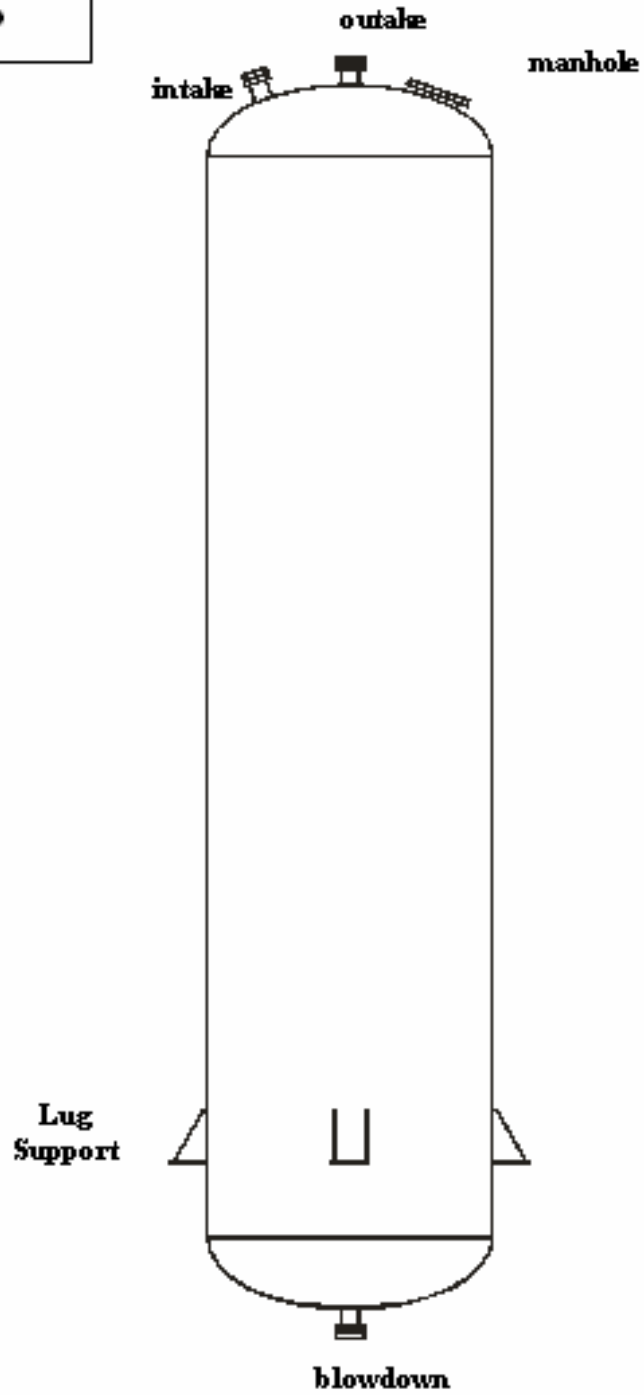
More detail on head & shell		
18	1	in
19	1	in
20	2	ft
21	4	ft
22	8	ft

Gambar LUG SUPPORT

Dimensi lug (unisolated vessel) :				
Lt =	12	in	1,000	ft
B =	11,5	in	0,958	ft
Bt =	12,5	in	1,042	ft
H =	22	in	1,833	ft
Ht =	22,5	in	1,875	ft
K =	1,25	in	0,104	ft
Lf =	9	in	0,750	ft
T =	0,5	in	0,042	ft
W =	0,1875	in	0,016	ft
S =	60	degrees		
berat =	80	lb		
Material bahan =	SA 285 C			

**Gambar Detil LUG SUPPORT**

**Gambar Tangki
Lengkap**



TANYA JAWAB**Rill Isaris**

- *Removal gas SO₂ dan NO_x dengan umpan gas NH₃ dapat menghasilkan bahan kimia (NH₄)₂SO₄ dan NH₄NO₃ berturut-turut. Apakah efisiensi removal tersebut selain tergantung panjang pipa/vessel untuk proses, dosis radiasi dan temperature, juga tergantung pada konsentrasi gas NH₃ yang diumpankan? Apakah angka 24,78 kg/j merupakan besaran yang mereferensi kepada kapasitas flow gas 20.000 Nm³/j?*

- *Pemilihan bahan alloy steel SA 2003 apakah sudah dari bagian analisis bahan?*

Muhadi AW

- *Secara umum tidak, tetapi karena perbandingan kecepatan alir akan menentukan rasio mol kebutuhan reaksi maka konsentrasi perlu ditentukan. Ya, angka 24,78 kg/j merupakan kebutuhan untuk flow gas 20.000 Nm³/j.*
- *Ya, dilihat dari kekuatannya mampu menahan tekanan yang di tentukan.*

UJI KARAKTERISTIK KANDUNGAN UNSUR LOGAM SUNGAI CODE DENGAN METODE ANALISIS AKTIVASI NEUTRON CEPAT (AANC)

Agus Tri Purwanto, Sunardi

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

ABSTRAK

UJI KARAKTERISTIK KANDUNGAN UNSUR LOGAM SUNGAI CODE DENGAN METODE ANALISIS AKTIVASI NEUTRON CEPAT (AANC). Telah dilakukan uji karakteristik kandungan unsur logam sungai Code dengan cara mengidentifikasi dan menentukan distribusi kadar unsur yang terkandung dalam sedimen dengan metode AANC. Cuplikan sedimen diambil sepanjang sungai Code dari hulu sampai hilir, kemudian dibersihkan dari kotoran, batu, tumbuhan dan dikeringkan pada sinar matahari. Cuplikan ditumbuk sampai halus dan homogen, kemudian dibuat pelet dengan diameter 1 cm dan tebal 0,5 cm. Cuplikan diiradiasi dengan neutron cepat 14 MeV menggunakan generator neutron dan dilakukan pencacahan dengan alat spektrometer gamma. Hasil analisis kualitatif menunjukkan bahwa cuplikan teridentifikasi unsur Cu-63, Fe-56, Al-27, P-31, Mg-24, Si-28 dengan kadar masing-masing sebagai berikut: Cu-63= (40-72) µg/g, Fe-56=(13091-35127) µg/g, Al-27(30101-43745) µg/g, P-31(165-988) µg/g, Mg-24(1305-5869) µg/g dan Si-28(11851-31656) µg/g.

ABSTRACT

CHARACTERISTIC TEST ON ELEMENT CONTENTS IN CODE RIVER USING FNAA METHOD.

Characteristic test on element contents in Code river by identification and determination of distribution concentration using FNAA method have been done. The samples were taken from around Code river and then the sample were cleaned from stone, grass, then samples were dried under sun light then grinded until homogen and form into pelet 1 cm diameter and 0,5 cm thick. Samples were irradiated with 14 MeV fast neutron using neutron generator and counted using gamma spectrometri. Qualitative analysis show that the samples identified of element of Cu-63, Fe-56, Al-27, P-31, Mg-24, Si-28 and the quantitative result show that the concentration are Cu-63= (40-72) µg/g, Fe-56=(13091-35127) µg/g, Al-27(30101-43745) µg/g, P-31(165-988) µg/g, Mg-24(1305-5869) µg/g dan Si-28(11851-31656) µg/g.

PENDAHULUAN

Pencemaran mulai terangkat ke permukaan secara internasional dan menjadi topik bahasan utama berkisar pada tahun lima puluhan, tepatnya ketika ditemukan suatu penyakit mental dan kelainan pada syaraf (penyakit Minamata). Pencemaran atau polusi adalah suatu kondisi yang telah berubah dari bentuk asal pada keadaan yang lebih buruk. Pergeseran bentuk tatanan dari kondisi asal pada kondisi yang buruk ini dapat terjadi sebagai akibat masukan dari bahan-bahan pencemar atau polutan. Bahan polutan tersebut pada umumnya mempunyai sifat racun (toksik) yang berbahaya bagi organisme hidup. Toksisitas atau daya racun dan polutan itulah yang kemudian menjadi pemicu terjadinya pencemaran^[1].

Air sungai merupakan salah satu sumber daya alam yang memiliki peranan sangat penting dalam kehidupan manusia, terutama dalam bidang pertanian, industri dan pariwisata. Sungai sebagai badan air sekaligus sumber daya air yang bersifat

terbuka tentu mudah sekali tercemar limbah air buangan, antara lain limbah rumah tangga, industri dan sumber lainnya. Hal ini akan berdampak pada perubahan kualitas air sedemikian rupa, sehingga air di daerah hilir tidak dapat dimanfaatkan bagi keperluan pertanian, perikanan, penyediaan air bersih, dan industri.

Menurut data PROKASIH Propinsi DIY 2003 BAPEDALDA Yogyakarta, sungai Code adalah sungai yang menampung lebih banyak sisa-sisa pembuangan dari kegiatan yang ada disekitarnya dibandingkan sungai yang lainnya, sehingga dimungkinkan tingkat pencemarannya relatif lebih besar^[2].

Sungai Code yang terletak di Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta merupakan salah satu aliran sungai yang melewati tiga kabupaten yaitu: Kabupaten Sleman, Kotamadya Yogyakarta serta Kabupaten Bantul. Seiring dengan pembangunan yang pesat di sekitar Sungai Code, maka muncul beberapa dampak positif maupun negatif. Salah satu

dampak negatif antara lain semakin banyaknya bahan buangan dari limbah rumah tangga, industri, dan rumah sakit yang masuk ke dalam badan air tersebut, sehingga menyebabkan menurunnya kualitas air Sungai Code. Melihat dari sumber-sumber tersebut, maka dimungkinkan aliran Sungai Code tercemar oleh unsur-unsur logam baik logam ringan maupun logam berat yang berasal dari limbah rumah tangga, industri dan rumah sakit. Apabila kadar unsur-unsur logam dalam suatu aliran sungai melebihi ambang batas yang diperbolehkan maka akan berakibat buruk bagi ekosistem di dalamnya.

Pemantauan kualitas air Sungai Code sangat dibutuhkan agar dapat mengetahui seberapa besar tingkat pencemaran yang terjadi, sehingga dengan cepat dan tepat dapat dilakukan tindakan untuk mengurangi atau mencegah dampak lingkungan akibat pencemaran tersebut. Sistem pemantauan kondisi air dapat dilakukan secara kualitatif untuk mengetahui unsur-unsur logam yang terkandung di dalamnya maupun secara kuantitatif untuk mengetahui nilai kadar unsur-unsurnya. Dalam penelitian ini akan dilakukan pemantauan kandungan unsur yang terdapat pada sedimen Sungai Code dengan metode analisis aktivasi neutron cepat (AANC).

TEORI AANC

Prinsip Dasar Analisis Aktivasi Neutron Cepat (AANC)

Metode analisis aktivasi neutron cepat telah banyak digunakan secara luas dalam bidang geologi, kedokteran, pertanian, metalurgi, lingkungan dan industri. Metode ini juga telah dikembangkan dalam bidang pengetahuan lingkungan dan ilmu forensik⁽¹⁾. Analisis aktivasi neutron cepat adalah sebuah metode analisis untuk mengetahui kandungan unsur-unsur logam dalam sebuah cuplikan. Metode ini memanfaatkan sistem ketidakstabilan inti atom yang diakibatkan oleh iradiasi neutron cepat. Inti atom yang tidak stabil akan bersifat radioaktif dan terjadi peluruhan untuk mencapai kestabilan kembali. Dengan menggunakan detektor- γ maka energi yang dipancarkan unsur-unsur tersebut dapat dibaca dan dianalisis untuk mengetahui jenis unsur serta kadar yang ada dalam cuplikan tersebut.

Teknik analisis AANC didasarkan pada reaksi neutron cepat dengan inti, cuplikan yang akan dianalisis diiradiasi dengan menggunakan generator neutron. Inti atom unsur yang berada dalam cuplikan akan menangkap neutron dan berubah menjadi radioaktif dengan memancarkan sinar γ . Sinar γ yang dipancarkan umumnya memiliki energi yang

karakteristik untuk setiap unsur/isotop, sehingga dapat diidentifikasi dengan menggunakan teknik spektroskopi *gamma*.

Jumlah cacah kejadian peluruhan selama waktu untuk pencacahan (t_c) adalah^[3].

$$C = \int_{t=0}^{t_c} kA_d e^{-\lambda t} dt \quad (1)$$

$$= k \frac{\phi \sigma N}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_c}) e^{-\lambda d} (1 - e^{-\lambda t_c})$$

dengan

$$K = \varepsilon Y, \varepsilon = \text{efisiensi pencacahan}$$

$$Y = \text{prosentasi peluruhan gamma}$$

Jumlah nuklida sasaran dapat dihitung dengan kesetaraan mol:

$$N = \frac{mN_A}{BA} a \quad (2)$$

dengan

$$m = \text{massa cuplikan}$$

$$N_A = \text{bilangan Avogadro}$$

$$BA = \text{berat atom unsur cuplikan}$$

$$a = \text{kelimpahan relatif isotop cuplikan}$$

Dengan demikian persamaan (1) menjadi :

$$C = \frac{mN_A}{BA} a \frac{\phi \sigma \varepsilon Y}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_c}) e^{-\lambda d} (1 - e^{-\lambda t_c}) \quad (3)$$

dengan

$$\phi = \text{fluks neutron}$$

$$\sigma = \text{tampang lintang reaksi}$$

$$\lambda = \text{ketetapan peluruhan}$$

$$t_a = \text{waktu yang diperlukan untuk iradiasi}$$

$$t_d = \text{waktu tunda}$$

$$t_c = \text{waktu yang diperlukan untuk pencacahan}$$

Persamaan (2) tersebut adakah sebagai dasar dan persamaan akhir analisis aktivasi.

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Tahapan pengambilan data dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1.

Bahan penelitian

1. Cuplikan penelitian terdiri dari sampel endapan Sungai Code
2. Nitrogen cair
3. Sumber standar Co-60 dan Cs-137

Alat penelitian

1. Alat pengambil sampel
2. Alat pengambil sampel terdiri dari: ember plastik, gayung, cetok.
3. Alat preparasi sampel dan standar

Alat preparasi sampel dan standar yang digunakan dalam penelitian ini meliputi, penggiling bola (*sentrifugal ball mill*), plastik klip, *vial polyethylene*, timbangan digital Ohaus GT-410 *germany*, *stop watch*.

Alat iradiasi sampel adalah generator neutron SAMES J-25. Sedangkan alat pencacah yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat spektrometer gamma dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Produksi: Canberra Industries Inc.
2. Model: GC1018 dengan seri: 4922305
3. Detektor yang digunakan : detektor HPGe dengan tingkat kemurnian detektor HPGe: 10^6 atom m^{-3}
4. Preamplifier, produksi: Cambera Industries Inc.
5. Amplifier, produksi: Ortec Industries Inc.
6. Sumber tegangan tinggi (HV), produksi: Ortec Industries Inc.
7. Penganalisis salur ganda (MCA), *model accuSpec with analog to digital converter (ADC) on board*.
8. Komputer dengan sistem operasi DOS.

Penyediaan dan preparasi sampel

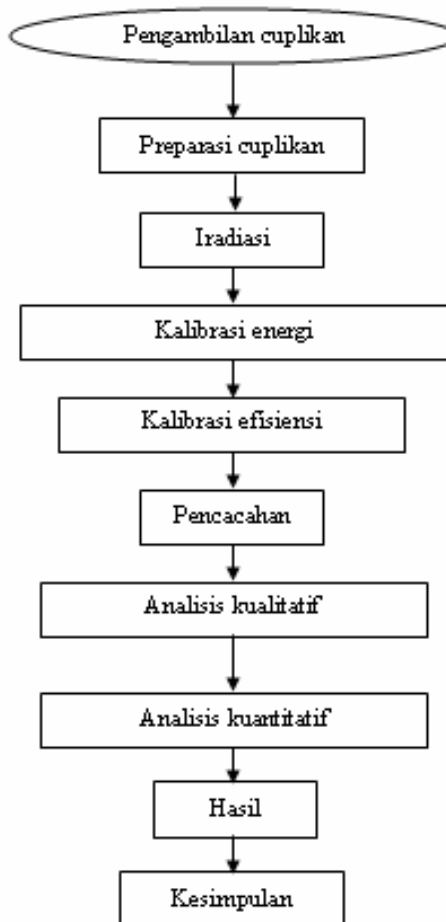
Dalam pengambilan sampel endapan Sungai Code menggunakan gayung dan dimasukkan ke dasar sungai Code. Setiap lokasi diambil tiga titik ke arah lebar sungai untuk mewakili kondisi endapan pada lokasi tersebut. Sampel yang telah diambil kemudian dikeringkan dengan cara di panaskan di bawah sinar matahari. Setelah betul-betul kering sampel endapan tersebut dibersihkan dari batu dan rumput. Untuk memperbesar luas permukaan partikel-parikel dalam endapan maka sampel tersebut dihaluskan dengan cara ditumbuk secara manual. Setelah betul-betul halus dengan ukuran 100 mesh, sampel kemudian ditimbang seberat 1,5 gr dan dimasukkan dalam kantong plastik kecil yang telah diberi label.

Iradiasi dan pencacahan sampel

Sampel endapan Sungai Code yang telah dimasukkan dalam wadah diiradiasi dalam generator neutron SAMES J-25 selama 30 menit, dan pencacahan dilakukan dengan spektrometer gamma selama 2 menit. Dari spektrum energi yang didapatkan digunakan untuk analisis kualitatif, sedangkan jumlah cacah persekon (*cps*) digunakan

sebagai data analisis kuantitatif untuk menghitung massa unsur-unsur yang terkandung dalam sampel.

Skema Penelitian



Gambar .1. Skema Penelitian dengan Generator Neutron dan Spektrometer Gamma

Kalibrasi spektrometer gamma

Spektrometri- γ adalah suatu metoda pengukuran yang bersifat nisbi (relatif), sehingga sebelum suatu prangkat spektrometer- γ dapat dipakai untuk melakukan analisis, alat tersebut perlu dikalibrasi lebih dahulu secara cermat dan teliti. Ada dua jenis kalibrasi yang perlu dilakukan, yaitu kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi^[4].

Kalibrasi energi

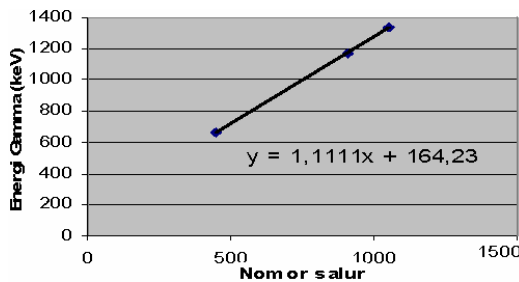
Sebelum melakukan pencacahan sampel air dan endapan Sungai Code, terlebih dahulu harus dilakukan kalibrasi energi pada detektor dengan tujuan agar nilai energi- γ yang muncul dalam

monitor betul-betul nilai energi- γ sesungguhnya yang dimiliki oleh unsur tertentu, selain itu kalibrasi juga bertujuan untuk membentuk garis lurus apabila dibuat sebuah grafik nomor salur versus energi- γ . Kalibrasi ini dilakukan dengan mencacah sumber radioaktif standar yang sudah diketahui energinya dengan tepat. Dalam penelitian ini, untuk melakukan kalibrasi energi digunakan sumber radioaktif standar Co-60 dan Cs-137. Adapun hasil pencacahan sumber standar tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Kalibrasi Energi Detektor HPGe dengan Menggunakan Sumber Standar Cs-137 dan Co-60

No	Sumber satndar	Nomor salur	Energi (keV)
1	Cs 137	448	662
2	Co 60	90	1173
3	Co 60	1052	1332

Dari hasil pencacahan seperti yang terlihat pada Tabel 1 diperoleh grafik garis lurus antara nomor salur dengan energi gamma seperti yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hubungan antara Nomor Salur dan Energi- γ

Dengan menggunakan analisis regresi linier, diperoleh *slope* $a = 1,1111$ dan *intercept* $b = 164,23$ sehingga diperoleh persamaan linier sebagai berikut:

$$Y = 1,1111X + 164,23.$$

Analisis kualitatif

Energi sinar- γ yang dipancarkan oleh suatu radionuklida adalah salah satu sifat karakteristik dari radionuklida tersebut. Maka dari itu dalam analisis kualitatif tingkat energi sinar- γ yang ditangkap oleh detektor digunakan untuk menentukan jenis unsur yang terkandung dalam cuplikan.

Analisis kuantitatif

Setelah puncak-puncak spektrum gamma dalam cuplikan selesai diidentifikasi, kemudian analisis kuantitatif dapat dilakukan. Analisis kuantitatif bertujuan untuk mengetahui kadar suatu unsur di dalam cuplikan.

Penentuan secara nisbi

Penentuan kuantitatif secara nisbi menggunakan suatu unsur standar yang telah diketahui secara pasti konsentrasinya, serta matrik isotop penyusunnya. Cuplikan tersebut disisipkan ke dalam cuplikan murni dan diiradiasi bersama-sama, sehingga mengalami paparan radiasi neutron yang sama banyaknya. Dengan membandingkan laju cacah cuplikan dan standar dapat dihitung kadar unsur dalam cuplikan, yaitu:

$$\frac{W_{cuplikan}}{W_{std}} = \frac{C_{cuplikan}}{C_{std}}$$

$$W_{cuplikan} = W_{std} \times \frac{C_{cuplikan}}{C_{std}} \quad (3)$$

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Analisis Kualitatif

Analisis kualitatif bertujuan untuk menentukan jenis unsur yang terkandung dalam endapan Sungai Code dengan cara mencocokkan energi gamma yang dihasilkan dari pencacahan cuplikan dengan energi gamma yang terdapat pada tabel. Adapun hasil analisis kualitatif secara berturut-turut disajikan pada Tabel 1

Analisis Kuantitatif

Analisis kuantitatif dilakukan dengan metode penentuan secara nisbi, yaitu dengan membandingkan laju cacah cuplikan yang akan dianalisis dengan laju cacah cuplikan standar yang telah diketahui kadarnya. Dari data yang diperoleh berupa laju cacah pada saat pencacahan (A_c), kemudian kadar dari masing-masing unsur yang telah diuji secara kualitatif dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3). Hasil dari analisis kuantitatif disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Kualitatif Unsur-Unsur Logam yang Terkandung dalam Cuplikan Endapan Sungai Code

No	Unsur	Lokasi									
		Ssc1	Ssc2	Ssc3	Ssc4	Ssc5	Ssc6	Ssc7	Ssc8	Ssc9	Ssc10
1	Cu-63	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
2	Al-27	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
3	Fe-56	Ttd	√	ttd	√	ttd	√	√	√	ttd	√
4	P-31	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
5	Mg-24	√	√	ttd	ttd	ttd	Ttd	√	ttd	√	√
6	Si-28	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

Keterangan

√ = Terdeteksi

ttd = Tidak terdeteksi

Ssc = Sampel Sungai Code

Lokasi:

Ssc1 = Jembatan Ring Road Utara

Ssc6 = Jembatan Jl. Mas Suharto

Ssc2 = Belakang RS. Sardjito

Ssc7 = Jembatan Jl. Sultan Agung

Ssc3 = Jembatan Jl. Dr. Sardjito

Ssc8 = Jembatan Jl. Kol. Sugiono

Ssc4 = Jembatan Gondolayu

Ssc9 = Jembatan Jl. Tritunggal

Ssc5 = Jembatan Jl. Abu Bakar

Ssc10 = Jembatan Jl. Ring Road Selatan

Tabel 3.. Data kuantitatif unsur-unsur logam yang terkandung dalam cuplikan endapan Sungai Code

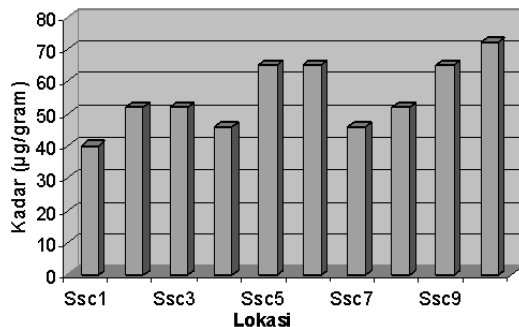
Unsur	Kadar (µg/g)									
	Lokasi									
	Ssc1	Ssc2	Ssc3	Ssc4	Ssc5	Ssc6	Ssc7	Ssc8	Ssc9	Ssc10
Cu-63	40 ± 2,65	52 ± 2,88	52 ± 3,17	46 ± 2,87	65 ± 3,21	65 ± 3,33	46 ± 2,77	52 ± 2,81	65 ± 3,46	72 ± 3,87
Fe-56	ttd	30363 ± 1504	ttd	35127 ±1543	ttd	28190 ±1439	26212 ±1332	13091 ±678	ttd	27673 ±1422
Al-27	3010 1±15 67	37132±1 652	40712 ±1897	32513 ±1611	36402 ±1764	36912 ±1769	33102 ±1493	33001 ±1415	40902±1 883	43745 ±1923
P-31	165 ± 7,72	274 ± 13,11	325 ± 15,79	251 ± 11,78	257 ± 11,82	272 ± 16,67	205 ± 10,07	245 ± 11,56	273 ± 12,59	988 ± 32,55
Mg-24	1305 ± 45,6 7	1676 ± 48,98	ttd	ttd	ttd	ttd	1517 ± 43,22	ttd	2670 ± 87,78	5869 ± 112,5
Si-28	1185 1 ± 504, 5	27553 ± 876,7	27877 ± 863,4	26837 ± 798,7	25374 ± 778,9	28401 ± 812,8	17652 ± 663,5	16132 ± 652,7	28701 ± 819,9	31656 ± 904,1

Analisis kualitatif dilakukan dengan mencocokkan energi- γ yang dihasilkan dari hasil pencacahan cuplikan dengan energi- γ yang ada dalam tabel. Dari hasil analisis kualitatif unsur-unsur yang terdeteksi yaitu pada sampel endapan Sungai Code: Cu-63, Fe-56, Al-27, P-31, Mg-24, Si-28.

Dari hasil penelitian sebagian besar unsur-unsur logam yang terdeteksi adalah unsur-unsur logam ringan, hal ini karena sumber utama pencemar di Sungai Code adalah limbah rumah tangga yang berasal dari hotel dan rumah penduduk. Untuk unsur silikon (Si) dan unsur logam dalam endapan belum ada baku mutu atau ambang batasnya.

Analisis kuantitatif pada sampel endapan Sungai Code

Tembaga (Cu-63)

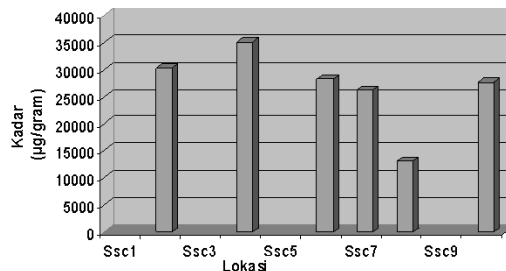


Gambar 3. Grafik Kadar Unsur Cu-63 pada Cuplikan Endapan Sungai Code

Dari Gambar 3. terlihat bahwa logam Cu-63 terdapat pada semua lokasi. Hal ini menunjukkan bahwa selain dari bahan pencemar, logam Cu juga sudah ada secara alamiah terdapat di alam. Kadar logam Cu tertinggi terdapat pada lokasi Ssc10 (Jembatan Ring Road Selatan) sebagai hasil kumulatif dari titik-titik lokasi sebelumnya. Sumber pencemaran logam Cu-63 ini diduga sebagian berasal dari limbah rumah tangga serta tambahan dari limbah rumah sakit. Dugaan ini dikarenakan pada titik-titik lokasi yang berdekatan dengan rumah sakit memiliki jumlah kadar logam Cu-63 yang lebih besar seperti lokasi Ssc2, Ssc5. limbah rumah sakit ini dimungkinkan berasal dari limbah air yang berasal dari sisa-sisa cucian alat-alat kedokteran dan obat-obatan yang mengandung logam Cu serta limbah cucian peralatan dapur yang terbawa secara bersama-sama melalui saluran pembuangan yang di alirkan ke Sungai Code.

Besi (Fe-56)

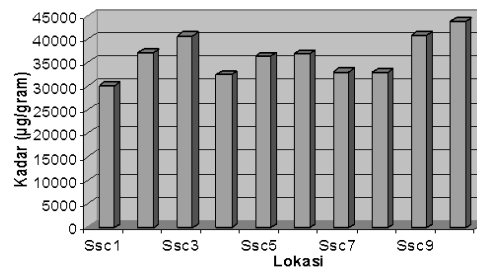
Dari Gambar 4. terlihat bahwa kandungan Fe-56 tidak terdeteksi pada setiap lokasi. Hal ini dikarenakan kondisi sungai yang tidak homogen atau sama sehingga dimungkinkan terjadi pengendapan pada titik-titik tertentu sehingga kandungan logam Fe-56 tidak tersebar merata pada setiap lokasi. Sumber utama logam Fe-56 ini diduga dari pasir besi yang secara alamiah sudah ada pada dasar sungai yaitu pelapukan dari batu-batuan yang banyak mengandung unsur Fe-56. selain itu dimungkinkan berasal dari limbah rumah sakit yaitu sisa-sisa obat atau darah yang terbawa air got ke aliran Sungai Code.



Gambar 4. Grafik Kadar Unsur Fe-56 pada Cuplikan Endapan Sungai Code

Aluminium (Al-27)

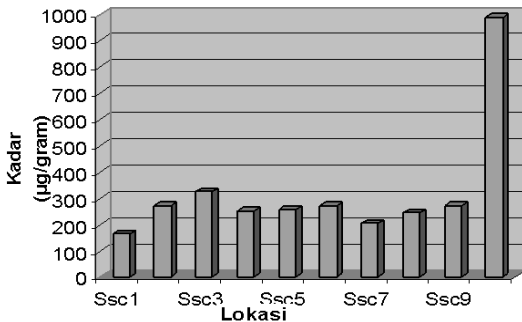
Dari Gambar 5. terlihat bahwa titik lokasi yang memiliki nilai-nilai kadar logam tertinggi tidak jauh berbeda dengan Gambar 2. dan Gambar 3. Hal ini semakin memperkuat bahwa sumber pencemar utama dari sungai code ini berasal dari rumah sakit dan hotel-hotel yang terdapat di sekitar sungai code. Selain itu juga, limbah rumah tangga yang berasal dari rumah-rumah penduduk tidak menutup kemungkinan sebagai sumber pencemar yang cukup besar pula pada endapan Sungai Code. Hal ini dikarenakan limbah hotel-hotel tidak jauh berbeda dengan limbah yang berasal dari rumah-rumah penduduk.



Gambar 5. Grafik Kadar Unsur Al-27 pada Cuplikan Endapan Sungai Code

Fosfor (P-31)

Besar kadar fosfor seperti terlihat pada Gambar 6. relatif kecil dibandingkan dengan kadar unsur-unsur logam yang telah dibahas sebelumnya, sehingga dimungkinkan nilai pencemaran fosfor relatif kecil. Kandungan fosfor yang terdapat pada Sungai Code ini dimungkinkan berasal dari alam secara alami. Pada lokasi Ssc10 memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan lokasi yang lain. Hal ini dikarenakan pada lokasi tersebut bersebelahan dengan lahan pertanian, sehingga banyak air pertanian yang masuk ke sungai. Aliran pertanian tersebut diperkirakan banyak mengandung posfat yang berasal dari pupuk pertanian.

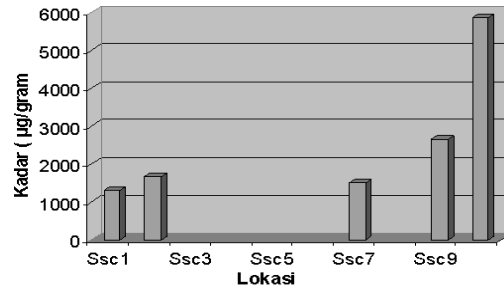


Gambar 6. Grafik Kadar Unsur P-31 pada Cuplikan Endapan Sungai Code

Magnesium (Mg-24)

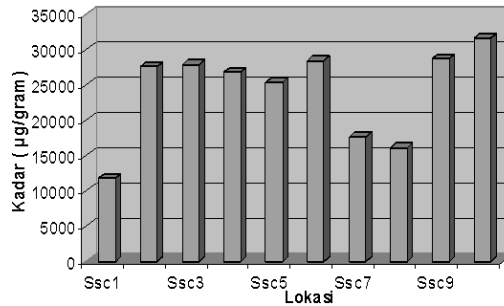
Dari Gambar 7. terlihat bahwa hanya pada lokasi Ssc1, Ssc2, Ssc7, Ssc9, Ssc10 yang terdeteksi memiliki kandungan Mg-24. Hal ini dikarenakan konsentrasi yang relatif kecil sehingga tidak bisa tersebar secara merata di setiap lokasi atau dengan kata lain telah terjadi pengendapan sebelum terbawa arus air. Dimungkinkan kandungan magnesium ini berasal dari limbah percetakan, karena di sekitar lokasi Ssc9 dan Ssc 10 terdapat saluran pembuangan yang berasal dari percetakan. Limbah percetakan ini dimungkinkan berasal dari sisa-sisa bahan tinta pewarna yang dibuang ke saluran got yang mengalir ke Sungai Code. Adapun besar kadar unsur logam Mg-24 di dalam endapan Sungai Code secara singkat disajikan pada Gambar 7.

Dari grafik diatas menunjukkan nilai kadar Si-28 yang terkandung dalam endapan Sungai Code tersebar merata pada setiap lokasi. Hal ini dikarenakan kondisi sungai yang sebagian besar mengandung banyak pasir sehingga kandungan silikonnya juga relatif besar. Pada Ssc10 yang kondisi sungainya lebih banyak mengandung lumpur



Gambar 7. Grafik Kadar Unsur Mg-24 pada Cuplikan Endapan Sungai Code

Silikon (Si-28)



Gambar 8. Grafik Kadar Unsur Si-28 pada Cuplikan Endapan Sungai Code

juga memiliki nilai kadar Si-28 yang relatif besar juga dibanding lokasi yang lain, hal ini dimungkinkan kandungan tersebut berasal dari lokasi-lokasi sebelumnya yang terbawa arus dan mengendap pada lokasi Ssc10 (Jembatan Ring Road Selatan). Adapun besar kadar unsur Si-28 dalam endapan Sungai Code secara singkat disajikan pada Gambar 8.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Hasil analisis kualitatif menunjukkan bahwa cuplikan teridentifikasi unsur Cu-63, Fe-56, Al-27, P-31, Mg-24, Si-28 dengan kadar masing-masing sebagai berikut: Cu-63= (40-72) µg/g, Fe-56=(13091-35127) µg/g, Al-27(30101-43745) µg/g, P-31(165-988) µg/g, Mg-24(1305-5869) µg/g dan Si-28(11851-31656) µg/g.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Suraji yang telah membantu dalam aktivasi cuplikan. Harapan penulis semoga bantuan tersebut menjadikan amal yang baik dan mendapat imbalan dari Allah SWT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] HERYANDO PALAR, Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat, Rineka Cipta, Jakarta, 1994
- [2] Bapedalda Yogyakarta, Prokasih Propinsi DIY 2003, Yogyakarta, Badan Penanggulangan Dampak Lingkungan Daerah Yogyakarta, 2003.
- [3] DARSONO, Generator neutron dan aplikasinya, diklat pengenalan dan aplikasi akselerator, Yogyakarta, PUSDIKLAT-BATAN, 1998.
- [4] SUSETYO, W., Spektrometri Gamma dan Penerapannya Dalam Analisis Pengaktifan Neutron, Gajah Mada University Press, Yogyakarta, 1988.
- [5] GERHARD ERDTMAND, Neutron Activation Tables, Kernchemie in Einzeldarstellungen Vol..6, Weinheim Verlag Chemie, New York, 1976.

TANYA JAWAB

Riyadi

- *Dalam analisis ini apakah tidak perlu di lakukan kalibrasi efisiensi detektor*
- *Apakah sudah ada baku mutu untuk sampel endapan*

Agus Tri Purwanto

- Analisis ini menggunakan metode nisbi (relatif), jadi tidak perlu kalibrasi efisiensi detektor
- Baku mutu untuk endapan belum ada

DEPOSISI LAPISAN TIPIS Mo/CuInS₂ PADA SUBSTRAT KACA DENGAN TEKNIK SPUTTERING

Bambang Siswanto, Wirjoadi, Yunanto

Pustek Akselerator dan Proses Bahan - Batan Yogyakarta

ABSTRAK

DEPOSISI LAPISAN TIPIS Mo/CuInS₂ PADA SUBSTRAT KACA DENGAN TEKNIK SPUTTERING. Telah dilakukan deposisi lapisan Mo/CuInS₂ pada substrat kaca dengan teknik plasma sputtering DC. Target Mo dari bahan plat dan paduan CuInS₂ dari serbuk Cu, In, S dengan kemurnian 99,998%. Deposisi dilakukan untuk beberapa variasi parameter proses yang meliputi: waktu deposisi (15 - 45) menit, suhu substrat (150 - 300°C) dan tekanan gas (0,9-1,4×10⁻¹ Torr). Tujuan dari penelitian ini untuk dapat diperoleh parameter proses optimum dalam penumbuhan lapisan tipis Mo/CuInS₂. Pengukuran resistansi dilakukan dengan menggunakan probe empat titik dan struktur kristal lapisan tipis yang terbentuk dianalisis dari pola spektrum XRD, sedangkan morfologi dan komposisi unsur dievaluasi dari foto SEM dan spektrum EDS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resistansi terkecil sebesar 440 Ω. Struktur kristal Mo dan CuInS₂ terorientasi pada bidang (110) dan (112), (213), (305). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa lapisan tipis komponen sel surya Mo/CuInS₂ telah berhasil ditumbuhkan.

Kata kunci: resistansi, struktur kristal, komposisi unsur, lapisan tipis Mo/CuInS₂

ABSTRACT

DEPOSITION OF Mo/CuInS₂ THIN FILMS ON GLASS SUBSTRATE USING SPUTTERING TECHNIQUE. The Mo/CuInS₂ thin films were deposited on glass substrate using plasma DC sputtering technique. A Mo target was made from Mo plate material and CuInS₂ alloy target was made from Cu, In, S powder with purity of 99.998%. The deposition process was done with the following process parameter variations: deposition time was 15 to 45 min, substrate temperature was 150 to 300 °C and the gas pressure was kept constants of range 0.9 to 1.6 ×10⁻¹ Torr. The purpose of the research is to obtain an optimum process parameter of Mo/CuInS₂ thin film growth. The film resistance was measured using four-point probe. The crystal structure was analyzed using X-ray diffraction (XRD) while the morphology and an element composition were observed using SEM and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) spectrum. The result shows that minimum resistance of Mo/CuInS₂ thin films is 400 Ω and this was achieved the process parameter 150 °C of temperature; 30 min of time and 1.4×10⁻¹ Torr of gas pressure. The crystal structure of Mo and CuInS₂ are oriented at (110) and (112),(312),(305) plane. It could be concluded that the Mo/CuInS₂ thin film is successfully grown on the glass substrate.

Key word: resistance, crystal structure, element composition, Mo/CuInS₂ thin film

PENDAHULUAN

Penelitian sel surya telah banyak menarik perhatian, karena sel surya merupakan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, terutama di negara kepulauan di daerah tropika maka sumber energi ini sangat cocok untuk dikembangkan. Secara umum sel surya CIS terdiri dari beberapa lapisan diantaranya adalah: lapisan tipis elektroda belakang, lapisan tipis tipe-P, lapisan tipis tipe-N dan lapisan elektroda transparan. Khusus sel surya berbasis CIS, efisiensi yang dihasilkan adalah cukup tinggi dibandingkan dengan sel surya lapisan tipis jenis lainnya.^[1,2]

Optimasi parameter proses dalam pembuatan lapisan tipis sangat penting karena dengan parameter yang optimum akan dihasilkan kualitas

lapisan yang baik sehingga kemungkinan besar dapat meningkatkan efisiensi sel surya lapisan tipis. JO. KLAER, et al., dalam publikasinya melaporkan bahwa telah diperoleh efisiensi sel surya dengan bahan absorber CuInS₂ dalam skala mini modul sebesar 9,2 %.^[3] Selain itu dengan meminimumkan resistansi dari lapisan tipis CuInS₂ hasil deposisi juga akan memberikan sumbangan terhadap efisiensi dari sel surya, karena dengan resistansi yang rendah maka kerugian arus yang timbul dapat diminimumkan.

Elektroda belakang dari sistem sel surya ini menggunakan lapisan tipis dari bahan Mo, karena bahan ini mempunyai konduktivitas dan reflektifitas yang tinggi. Selain itu efek difusinya juga rendah sehingga jika digunakan sebagai elektrode belakang

tidak akan mempengaruhi lapisan tipis di atasnya (CuInS₂). Deposisi lapisan tipis Mo dilakukan dengan parameter optimum dari penelitian sebelumnya^[4].

Teknik *sputtering* telah banyak digunakan dalam pembuatan lapisan tipis semikonduktor, karena dengan teknik ini sangat mungkin akan menghasilkan struktur yang serupa dengan bahan target yang dideposisikan. Dalam teknik ini kualitas dan sifat-sifat lapisan tipis yang terdeposit pada permukaan substrat bergantung pada beberapa parameter proses deposisi diantaranya adalah: tekanan gas, waktu deposisi, suhu substrat, jarak elektrode, daya dan faktor geometri sistem elektrodanya^[5,6].

Jumlah bahan target tersputter dan kemudian terdeposit pada satuan luas permukaan substrat yang secara matematis dirumuskan sbb. :

$$W \cong \frac{k_t W_o}{pd} \quad (1)$$

dan laju deposisi R (Å/detik.cm²) dapat dituliskan dalam persamaan :

$$R = \frac{W}{t} \quad (2)$$

Dengan k_t adalah suatu konstanta yang tergantung pada bentuk/geometri elektroda W_o adalah jumlah partikel yang tersputter per satuan luasan target (a.u/cm²) p adalah tekanan gas lucutan (Torr), d adalah jarak elektroda (cm), W adalah rapat lapisan yang tersputter (Å/cm²), dan t adalah waktu sputter (detik). Jumlah partikel yang tersputter per satuan luasan target dituliskan dalam bentuk persamaan :

$$W_o = \frac{J_+}{e} S t \frac{A}{N_A} \quad (3)$$

dengan j_+ adalah rapat arus ion pada target (Ampere/m²), e adalah muatan elektron (Coulomb), S adalah sputter yield, A adalah berat atom dari bahan target yang tersputter (kg), dan N_A adalah bilangan Avogadro.

Dalam makalah ini juga dilaporkan hasil pengukuran resistansi lapisan tipis Mo/CuInS₂, struktur kristal dari lapisan tipis yang terbentuk dari pola difraksi sinar-X yang menentukan orientasi bidang kristalnya dan morfologi maupun komposisi unsur lapisan tipis yang dihasilkan. Parameter optimum ditentukan dari hasil pengukuran resistansi lapisan tipis Mo/CuInS₂. Analisis struktur kristal dan komposisi unsur adalah untuk membuktikan bahwa kristal yang terbentuk sesuai dengan yang diharapkan. Dengan demikian

bahan lapisan tipis Mo/CuInS₂ yang diperoleh dari hasil penelitian ini nantinya dapat dimanfaatkan sebagai komponen sel surya berbasis CIS.

TATA KERJA DAN PER COBAAN

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahapan yang meliputi, preparasi cuplikan dan target, proses deposisi lapisan tipis dan karakterisasi hasil deposisi. Oleh karenanya dilakukan pekerjaan sebagai berikut.

Persiapan Target dan Preparasi Cuplikan

Bahan utama yang disiapkan dalam percobaan ini adalah bahan target dari Cu, In dan S. Serbuk yang telah dicampur kemudian diaduk sampai merata, dimasukkan dalam tabung kaca lalu divakumkan, kemudian dipanaskan pada suhu 600°C dan selanjutnya dipres menjadi bentuk pelet dengan diameter 60 mm, tebal 1 mm, sedangkan target Mo dari bahan plat. Substrat dari kaca preparat dengan ukuran (85×25) mm², dicuci secara berturut-turut; pertama dengan air deterjen untuk menghilangkan adanya kontaminasi senyawa organik maupun non organik, lalu dengan air bersih dan alkohol dalam *ultrasonic cleaner*, dan selanjutnya disimpan dalam kotak sampel.

Proses Deposisi Lapisan Tipis Mo/CuInS₂

Peralatan sistem deposisi yang digunakan adalah plasma *sputtering* DC dengan komponen utama: tabung reaktor plasma, sistem elektrode yang terpasang sejajar, sistem catu daya tegangan tinggi DC, sistem vakum yang terdiri dari pompa turbo molekuler yang dilengkapi dengan pompa rotari dan meter vakum, sistem pendingin target dan pemanas substrat dan sistem aliran gas ke tabung plasma.

Pemasangan substrat pada anode dan target pada katode dalam tabung reaktor, lalu dihampakan menggunakan pompa rotari dilanjutkan dengan pompa turbo. Sistem pemanas dan sistem pengontrol aliran gas diatur sesuai parameter yang dikehendaki, kemudian catu daya tegangan tinggi DC dihidupkan sampai gas terionisasi. Pada proses deposisi ini dibagi menjadi dua tahapan yaitu deposisi lapisan tipis Mo pada substrat kaca dengan waktu deposisi 45 menit dan suhu substrat 250°C, kemudian tahap berikutnya deposisi lapisan tipis CuInS₂ pada lapisan Mo dengan memvariasi waktu deposisi (15, 30, 45, 60) menit, suhu substrat (150, 200, 250, 300 °C) dan tekanan gas (1×10⁻², 1,2×10⁻¹, 1,4×10⁻¹, 1,6×10⁻¹) Torr.

Karakterisasi Lapisan Tipis Mo/CuInS₂

Sifat listrik

Besar resistivitas pada lapisan tipis dapat diukur dengan menggunakan probe empat titik, yaitu suatu jajaran empat probe diletakkan di atas lapisan tipis yang diukur resistivitasnya. Kemudian sumber tegangan dipasang pada dua probe terluar untuk menghasilkan arus diantara probe dalam, dengan demikian pada probe bagian dalam akan timbul tegangan. Hasil yang telah didapat dianalisis berdasarkan hukum ohm, dalam hal ini bila lapisan tipis yang diukur mempunyai ukuran yang tidak terbatas atau bila tebalnya cukup besar dibandingkan dengan jarak antar probe resistivitasnya dapat didekati dengan persamaan^[7] :

$$\rho = (\pi V t) / (I \ln 2) \quad (4)$$

ρ = resistivitas (Ωm)

V = tegangan (Volt)

I = arus (Ampere)

t = tebal lapisan (m)

Struktur kristal

Apabila target dikenai sinar-X, maka intensitas sinar-X yang ditransmisikan lebih kecil dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya penyerapan dan hamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar yang dihamburkan jika berbeda fase maka akan saling menghilangkan, sedangkan yang mempunyai fase yang sama akan saling menguatkan. Berkas sinar-X yang saling menguatkan ini disebut berkas difraksi. Persyaratan yang harus dipenuhi agar sinar-X yang dihamburkan merupakan berkas difraksi (hukum Bragg), yang mana perbedaan lintasan berkas difraksi sinar-X adalah merupakan kelipatan panjang gelombang, secara matematis dirumuskan :

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5)$$

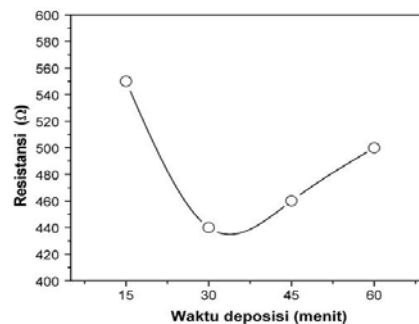
Dengan n adalah bilangan bulat 1, 2, 3, ..., λ adalah panjang gelombang sinar-X, d adalah jarak antar bidang dan θ adalah sudut difraksi. Berkas sinar-X tidak hanya dipantulkan oleh bidang permukaan saja, melainkan juga dipantulkan oleh bidang-bidang di bawahnya dan keadaan ini membentuk pola interferensi yang saling menguatkan untuk sudut-sudut yang memenuhi hukum Bragg. Gejala ini dapat diamati dari grafik hubungan antara intensitas spektrum karakteristik sebagai fungsi sudut 2θ , hal ini yang memberikan informasi dalam analisis struktur kristal dengan XRD.

Karakterisasi Morphologi dan Komposisi Unsur Lapisan Tipis Mo/CuInS₂

Untuk mengetahui morfologi permukaan lapisan Mo/CuInS₂ dengan menggunakan SEM (*Scanning Elektrom Microscopy*). Peralatan ini menggunakan hamburan balik elektron-elektron (30 kV yang merupakan energi datang) yang dipantulkan sampel dan elektron-elektron sekunder ($E = 100 \text{ eV}$). Elektron-elektron sekunder yang mempunyai energi rendah dibelokkan membentuk sudut dan menimbulkan bayangan topografi, kemudian elektron-elektron tersebut dikumpulkan dalam sistem kolektor dan diteruskan ke pengganda foto melalui sirkuit penguatan lalu ditampilkan pada monitor. Sedangkan untuk analisis komposisi unsur dilakukan dengan menggunakan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) yang dikopel dengan SEM. Dalam analisis ini memanfaatkan sinar-X yang ditimbulkan akibat materi yang ditembak elektron energi tinggi. Sinar-X tersebut dideteksi dengan detektor fase padat (Si-Li) yang menghasilkan suatu tegangan yang sebanding dengan energi dari foton-foton yang datang, sehingga energi dari setiap foton yang datang dapat terukur dan keluaran digambarkan sebagai intensitas terhadap energi. Sifat karakteristik dari energi yang terdeteksi tersebut menginformasikan komposisi unsur dari sampel yang dianalisis.

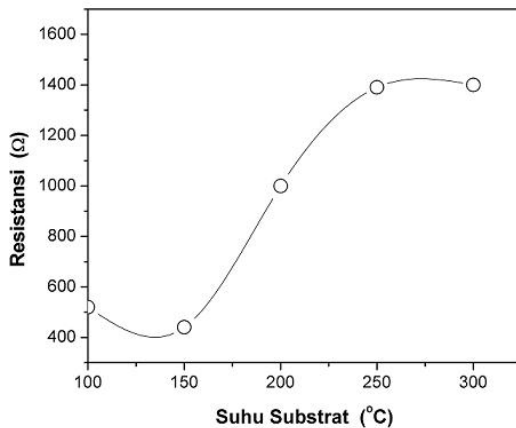
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran resistansi untuk berbagai variasi parameter ditampilkan pada Gambar (1 – 3). Spektrum pola difraksi sinar-X hasil pengamatan XRD dari lapisan Mo/CuInS₂ ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan hasil pengamatan dengan SEM yang dikopel dengan EDS ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 1. Grafik resistansi vs waktu deposisi, pada suhu substrat 150°C dan tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ Torr.

Gambar 1 adalah grafik resistansi sebagai fungsi variasi waktu deposisi, pada suhu substrat 150°C dan tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ Torr. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada waktu deposisi 15 menit diperoleh nilai resistansi sebesar 550Ω , hal ini kemungkinan partikel CuInS_2 hasil *sputtering* belum mencukupi untuk terdeposit pada luasan permukaan lapisan Mo atau lapisan yang dihasilkan masih sangat tipis, sehingga nilai resistansinya juga tinggi. Selanjutnya nilai resistansi terkecil untuk lapisan tipis Mo/ CuInS_2 dicapai pada waktu deposisi 30 menit yaitu sebesar 440Ω , hal ini merupakan parameter proses deposisi yang optimum untuk variasi waktu deposisi. Peristiwa ini terjadi karena bertambahnya waktu deposisi menyebabkan jumlah partikel tersputter per satuan luas juga meningkat dan kebolehdan atom-atom target terdeposit pada permukaan substrat semakin besar. Sejalan dengan bertambahnya waktu deposisi maka lapisan tipis CuInS_2 yang terbentuk pada lapisan Mo juga bertam-bah rapat, sehingga nilai resistansinya menurun. Jika waktu deposisi dinaikkan lagi menjadi 45 dan 60 menit maka nilai resistansinya naik lagi menjadi 480Ω dan 500Ω , hal ini mungkin proses penyisipan telah mulai jenuh dan yang terjadi adalah penumpukan atom-atom tersputter pada permukaan lapisan Mo sehingga kondisi lapisan tidak rapat/porous dan resistansinya meningkat.



Gambar 2. Grafik resistansi vs suhu substrat, pada waktu deposisi 30 menit dan tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ Torr

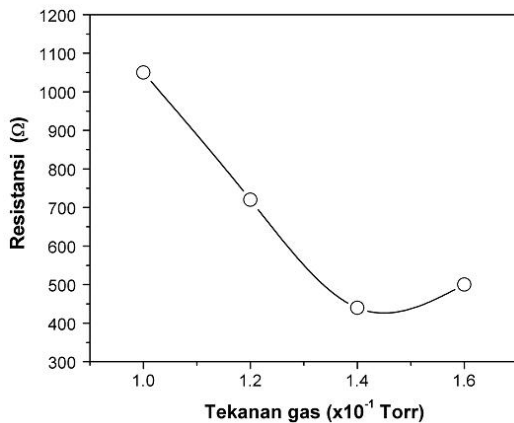
Gambar 2 adalah grafik resistansi dengan variasi suhu substrat pada waktu deposisi 30 menit dan tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ Torr. Dari Gambar 2 tersebut menunjukkan bahwa pada deposisi tanpa pemanasan substrat diperoleh resistansi sebesar $R = 532 \Omega$ dan pada suhu substrat 150°C resistansi lapisan tipis Mo/ CuInS_2 sebesar $R = 440 \Omega$, hal ini kemungkinan masih terjadinya proses difusi antara

lapisan Mo dan CuInS_2 sehingga resistansinya kecil. Namun setelah suhu substrat dinaikkan lagi pada suhu 200°C dan 250°C maka nilai resistansinya meningkat drastis menjadi 1000Ω dan 1390Ω . Peristiwa ini menggambarkan bahwa proses difusi antar kedua lapisan tipis telah optimum dan yang terjadi adalah proses penumpukan atom-atom target tersputter tersebut pada permukaan lapisan tipis Mo, sebagai akibatnya hasil lapisan CuInS_2 bertambah tebal/tidak rapat dan nilai resistansinya meningkat. Jika suhu substrat dinaikkan lagi menjadi 300°C maka nilai resistansi meningkat lagi menjadi 1400Ω tetapi tidak sedrastis suhu sebelumnya.

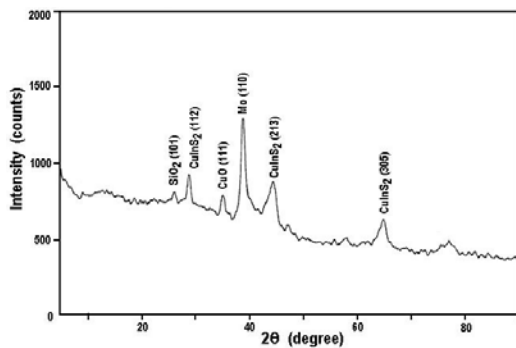
Gambar 3 adalah grafik resistansi dengan variasi tekanan gas pada waktu deposisi 30 menit dan suhu substrat 150°C . Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada tekanan gas $1,0 \times 10^{-1}$ Torr diperoleh nilai resistansi lapisan Mo/ CuInS_2 sebesar 1050Ω , jika tekanan gas dinaikkan maka diperoleh nilai resistansi yang terus menurun hingga mencapai resistansi yang minimum sebesar 440Ω pada tekanan $1,4 \times 10^{-1}$ Torr (tekanan optimum). Pada tekanan $1,0 \times 10^{-1}$ hingga $1,2 \times 10^{-1}$ Torr, hasil pengukuran resistansi masih lebih tinggi dibandingkan pada kondisi optimumnya, hal ini disebabkan bahwa pada kondisi tersebut rapat plasma yang terbentuk belum optimum dan atom-atom hasil sputternya belum mencukupi untuk terdeposit pada substrat, sehingga diperoleh nilai resistansi yang lebih besar dari 440Ω . Hal itu juga terjadi karena parameter tekanan gas dapat mempengaruhi rapat plasma yang terbentuk pada proses deposisi, dan bila energi plasma yang terbentuk masih rendah, kualitas lapisan tipis Mo/ CuInS_2 juga masih rendah sehingga resistansinya tinggi. Jika tekanan gas dinaikkan akan dihasilkan rapat plasma yang meningkat dan akibatnya energi sputternya juga meningkat sehingga atom-atom target hasil bombardir juga mempunyai energi yang cukup tinggi dan pada saatnya akan dicapai kondisi yang optimum dan dihasilkan kualitas lapisan tipis yang optimum juga. Tetapi jika tekanan gas dinaikkan menjadi $1,6 \times 10^{-1}$ Torr maka nilai resistansi lapisan Mo/ CuInS_2 juga meningkat menjadi 500Ω , hal ini disebabkan karena energi plasmanya terlalu tinggi dan sebagai akibatnya akan terjadi energi balik (*resputtering*), sehingga terjadi kerusakan pada permukaan lapisan yang telah terbentuk dan nilai resistansinya meningkat.

Gambar 4 adalah spektrum pola difraksi sinar-X hasil pengamatan XRD dari lapisan tipis CuInS_2 untuk suhu substrat 150°C , tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ torr dan waktu deposisi 30 menit. Dari Gambar 5 tersebut menunjukkan bahwa telah terbentuk struktur kristal lapisan tipis yang

bersesuaian dengan bahan target ditandai terbentuknya puncak-puncak intensitas



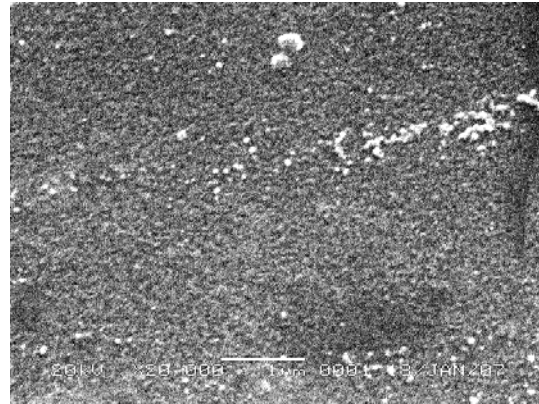
Gambar 3. Grafik resistansi vs tekanan gas, pada waktu deposisi 30 menit dan suhu substrat 150°C



Gambar 4. Spektrum pola difraksi sinar-X hasil pengamatan XRD dari lapisan Mo/CuInS₂, pada waktu deposisi 30 menit, suhu substrat 150°C , tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ Torr.

difraksi yaitu pada sudut 2θ masing-masing sebesar $28,76^{\circ}$; $44,34^{\circ}$ dan $64,94^{\circ}$ yang mengindikasikan struktur kristal CuInS₂ yang terorientasi pada bidang kristal (112), (213) dan (305). Dalam spektrum tersebut juga muncul intensitas puncak difraksi pada sudut 2θ $38,1876^{\circ}$ yang merupakan indikasi struktur kristal Mo yang terorientasi pada bidang kristal (110). Dibanding dengan data JCPDS CuInS₂ No. 38-0777 terjadi penurunan jarak antar bidang dari $d(A) = 3,1573$ menjadi $d(A) = 3,1017$ artinya puncak intensitas CuInS₂ (112) bergeser kesudut yang lebih besar, dalam hal ini disebabkan karena beda perlakuan panas saat pembentukan kristal CuInS₂, demikian juga puncak intensitas CuInS₂

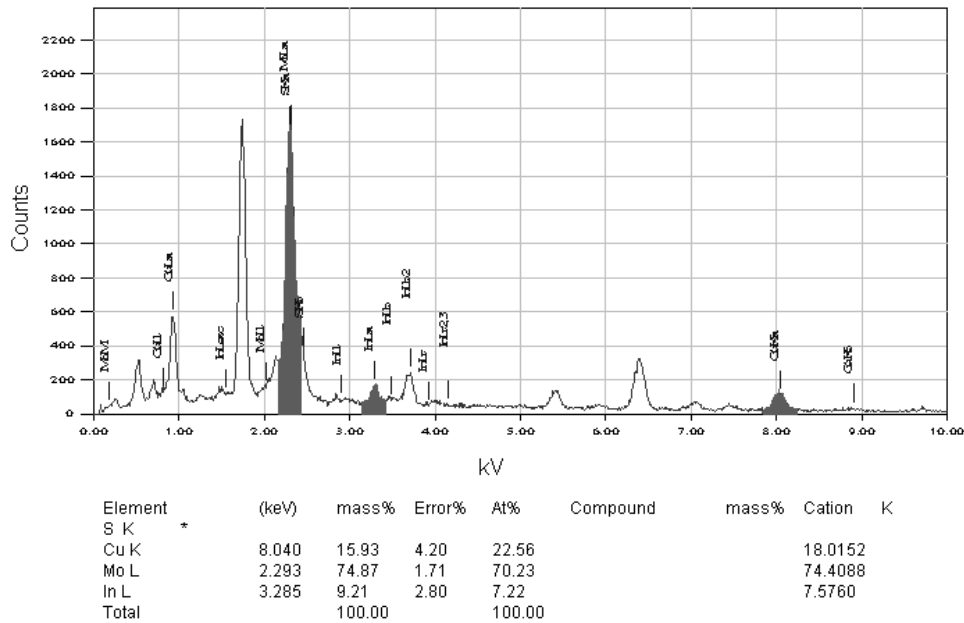
(312) dan (305) dari $d(A) = 2,0561$ menjadi $d(A) = 2,0413$ dan $d(A) = 1,4187$ menjadi $d(A) = 1,4127$. Munculnya struktur kristal untuk unsur-unsur yang lain seperti kristal SiO₂ (101) terjadi akibat dari pemanasan substrat dan kristal CuO (111) sudah terbentuk pada saat proses pembuatan paduan target CuInS₂.



Gambar 5. Struktur mikro hasil pengamatan SEM dari lapisan tipis Mo/CuInS₂ yang dideposisi pada suhu substrat 150°C , waktu deposisi 30 menit dan tekanan gas $1,4 \times 10^{-1}$ Torr

Gambar 5 adalah struktur mikro lapisan tipis Mo/CuInS₂ hasil pengamatan SEM. Gambar 5 menunjukkan bahwa lapisan tipis Mo/CuInS₂ yang terbentuk mempunyai ukuran butir yang halus.

Gambar 6 adalah spektrum hasil pengamatan EDS dari lapisan Mo/CuInS₂. Pada gambar tersebut tampak bahwa terdapat beberapa unsur yang bersesuaian dengan bahan yang dideposisikan. Unsur Mo mempunyai konsentrasi yang cukup tinggi yaitu sekitar 70,23 % atom, hal ini karena dalam lapisan tipis yang terbentuk sangat dimungkinkan Mo mempunyai ketebalan yang paling tebal dibandingkan lapisan CuInS₂. Masih dalam spektrum EDS di atas terlihat munculnya komposisi unsur Cu dan In masing-masing sebesar 22,56 % dan 7,22 %, hal ini diperoleh dari paduan CuInS₂, sedangkan unsur S tidak tampak dalam pengamatan ini. Kemungkinan tidak munculnya unsur S tersebut disebabkan waktu pengamatan dengan metode spot tidak terdapat unsur S di sekitar lokasi pengamatan atau unsur S telah menghilang sewaktu proses deposisi. Munculnya puncak-puncak spektrum yang lain dimungkinkan berasal dari substrat yang digunakan maupun pengotoran akibat terjadinya unsur-unsur yang masuk pada saat sebelum proses preparasi.



Gambar 6. Spektrum hasil pengamatan EDS dari lapisan Mo/CuInS₂.

KESIMPULAN

Dari beberapa hasil pengukuran lapisan tipis Mo/CuInS₂ untuk berbagai parameter proses maka dapat disimpulkan bahwa,

1. Parameter proses deposisi yaitu waktu deposisi, suhu substrat dan tekanan gas sangat mempengaruhi kualitas hasil deposisi antara lain ketebalan dan kekuatan lapisan yang terbentuk pada substrat.
2. Diperoleh nilai resistansi minimum lapisan tipis Mo/CuInS₂ sebesar 440 Ω, yang diperoleh dari hasil deposisi pada waktu deposisi 30 menit, suhu substrat 150 °C dan tekanan gas 1,4×10⁻¹ Torr.
3. Dapat diperoleh lapisan tipis kristal Mo dan CuInS₂ yang berorientasi pada bidang (110) dan (112), (213), (305) dengan ukuran butir yang halus dan konsentrasi unsur Mo = 70,56 % At, Cu = 22,23 % At, In = 7,22 % At dan S tidak tampak

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Bpk. Drs. BA. Tjipto Sujitno, MT, APU, yang telah banyak memberikan koreksinya. Semoga segala bantuan dan budi baiknya mendapat balasan dari Yang Maha Kuasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] MARIAN NANU, et al., "CuInS₂-TiO₂ heterojunctions solar cell obtained by atomic layer deposition", *Thin Solid Films* 431-432 (2003) 492-496
- [2] JERRY D. HARRIS, et al., "Characterization of CuInS₂ film prepared by atmospheric pressure spray chemical vapor deposition", *Material Science and Engineering B98* (2003) 150-155
- [3] JO. KLAER, KAI SIEMER, ILKA LUCK, DIETER BRAUNIG, "9.2% Efficient CuInS₂ mini-module", *Thin Solid Films* 387 (2001) 169-171
- [4] BAMBANG SISWANTO, "Pengaruh Parameter Proses Terhadap Sifat Listrik Lapisan Tipis Mo Hasil Deposisi Dengan Teknik Plasma Sputtering" *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir, PTAPB-BATAN*, 2007, 328-332
- [5] WASA, K., HAYAKAWA, S., *Handbook of Sputter Deposition Technology: Principles, Technology and Application*, Noyes Publication, New Jersey, 1992.
- [6] KONUMA M, *Film Deposition by Plasma Techniques*, Springer Verlag, Berlin, 1992

- [7] HALLIDAY, RESNICK, PANTUN SILABAN, ERWIN SUCIPTO, Fisika, Erlangga, Jakarta, (1984).

TANYA JAWAB

Sudaryadi

- *Pada proses deposisi waktu untuk mendapatkan hasil yang paling baik dibutuhkan waktu berapa menit*
- *Hasil pelapisan material tersebut, digunakan untuk apa yang paling baik*

Bambang Siswanto

- *Dalam penelitian ini diperoleh waktu deposisi yang optimum selama 30 menit, yang mana pada waktu deposisi tersebut diperoleh nilai resistansi yang terkecil*
- *Tujuan penelitian ini untuk menyiapkan material lapisan tipis yang akan digunakan sebagai sel surya*

ANALISIS UNSUR DALAM BATUAN DI CEKUNGAN BENTARSARI KABUPATEN BREBES JAWA TENGAH MENGGUNAKAN METODE AANC

Elin Nuraini, Agus Tri Purwanto
PTAPB-BATAN

ABSTRAK

ANALISIS UNSUR DALAM BATUAN DI CEKUNGAN BENTARSARI KABUPATEN BREBES JAWA TENGAH MENGGUNAKAN METODE AANC. Telah dilakukan penelitian untuk menentukan jenis kandungan unsur pada batuan dengan Metode Analisis Aktivasi Neutron Cepat (AANC). Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan kandungan unsur dan tingkat radioaktivitas pada batuan. Analisis yang digunakan untuk menentukan jenis unsur dan konsentrasi adalah kualitatif dan kuantitatif. Sampel diambil dari kedalaman 0,5-1,0 m dan dipreparasi terlebih dahulu untuk selanjutnya diaktivasi dengan Generator Neutron. Sampel yang telah diaktivasi di cacah menggunakan detektor NaI (TI). Pengukuran radioaktivitas dilakukan dengan detektor Geiger-Muller yang dioperasikan pada tegangan 500 volt dan lama pencacahan 20 menit. Parameter yang digunakan untuk mengetahui penyebaran radioaktivitas adalah cpm, posisi ketinggian, posisi lintang dan bujur. Keempat parameter ini diolah menggunakan program surver untuk mengetahui penyebaran radioaktivitas pada masing-masing posisi. Hasil analisis data menggunakan metode AANC diperoleh unsur dalam batuan di Cekungan Bentarsari adalah Fe, Al, Ca, dan Si dengan masing-masing kadar sebagai berikut : (0,121±0,046) gr sampai (1,019±0,041) gr untuk Fe, (0,158±0,056) gr sampai (1,354±0,169) gr untuk Al, dan (0,466±0,64) gr sampai (1,481±0,307) gr untuk Ca, dan (0,056±0,016) gr sampai (1,564±0,004) gr untuk Si. Nilai radioaktivitas tertinggi adalah 31 cpm (0,0258 cps) pada kode lokasi CB-31, sedangkan terendah 2 cpm (0,0002 cps) pada kode lokasi CB-6.

Kata kunci : Cekungan Bentarsari, Batuan, Metode AANC, Radioaktivitas

ABSTRACT

ELEMENTAL ANALYSIS OF BENTARSARI BASIN'S ROCKS AT BREBES REGENCY CENTRAL JAVA USING AANC. Elemental analysis of Bentarsari Basin's Rocks has been done using AANC technique. The aims of this research is to determine the elements contents and radioactivities level Bentarsari Basin's Rock. Analysis that to be used to determine the kinds and concentrations are qualitatively and quantitatively. Sampels taken from 0.5 - 1.0 m of depth, prepared and activated using Neutron Generator. The activated sampels were counted using NaI (TI) detector. Measurement of radio activities level has been done using Geiger-Muller detector at 500 Volt of operation voltage for 20 minutes. The used parameters to detemine the radioactivity spread were cpm, elevation position, diagonal and longitudinal positions. These parameters were proceeded using Surver Program. It was found that the elements compositions of Bentarsari Basin's Rosks are Fe (0,121±0,046) gr-(,019±0,04) gr, Al (0,158±0,056) gr – (1,354±0,169) gr, Ca (0,466±0,064)gr – (1,481±0,307) gr, and Si (0,056±0,016) gr –(1,564±0,004) gr. Tthe highest radioactivities level is in order of 31 cpm (0.0258 cps) at CB-31 location code, while the lowest radioactivities is in order of 2 cpm (0.0002 cps) at CB-16 location code.

Key word : Bentarsari Basin, Rocks, AANC Methods, Radioactivity

LATAR BELAKANG

Indonesia merupakan salah satu negara dengan kekayaan alam yang cukup melimpah. Satu diantaranya adalah terdapatnya Cekungan Bentarsari di Kabupaten Brebes yang memiliki batuan penyusun yang sangat bervariasi. Daerah ini terletak kurang-lebih 35 kilometer dari kota Bumiayu ke arah barat, termasuk Kecamatan Salem, Kabupaten Brebes, Jawa tengah, dengan luas daerah 8×15 km². Cekungan Bentarsari terletak diantara

108⁰45¹BT-108⁰53¹BT dan 7⁰7 LS-7⁰12 LS. Menurut informasi yang didapat dari penduduk setempat maupun data geologi yang ada dimungkinkan di daerah penelitian ini memiliki lapisan batuan yang bervariasi dan memiliki nilai ekonomis yang cukup tinggi, salah satunya adalah terdapatnya kandungan batubara yang sangat bermanfaat untuk dijadikan sumber energi baik untuk sekarang maupun masa mendatang^[1].

Batuan merupakan kumpulan satu atau lebih benda padat homogen yang terbentuk secara

anorganik serta terletak pada lapisan kerak bumi (litosfera). Berdasarkan kejadiannya genesis, tekstur dan komposisi mineralnya batuan penyusun kerak bumi dibagi menjadi tiga jenis. Pertama, batuan yang berasal dari cairan magma yang membeku akibat mengalami pendinginan dan dinamakan batuan beku. Batuan ini terdiri atas kristal-kristal mineral dan kadang-kadang mengandung kaca. Kedua yaitu semua batuan yang terdapat dipermukaan bumi (beku, sedimen dan metamorf) yang mengalami pelapukan. Material hasil pelapukan selanjutnya tererosi dan akan diendapkan kembali. Material yang diendapkan dari proses ini akan mengalami litifikasi, yaitu mengeras menjadi batuan yang disebut batuan sedimen. Ketiga yaitu batuan hasil ubahan dari batuan asal yang telah ada yang terjadi akibat adanya penambahan tekanan dan temperatur, batuan jenis ini dinamakan batuan metamorf^[2].

Metode aktivasi neutron merupakan suatu metode analisis kandungan unsur dalam suatu cuplikan secara kualitatif dan kuantitatif dengan mengiradiasi cuplikan yang akan di analisis. Cuplikan yang diirradiasi ditembak dengan neutron sehingga akan menghasilkan isotop-isotop bersifat spesifik dan karakteristik. Analisis kualitatif dilakukan dengan mengidentifikasi radiasi nuklir tersebut, sedangkan analisis kuantitatif dilakukan secara komparatif yaitu dengan membandingkan cacah cuplikan dengan cacah standar dikalikan kadar cuplikan standar.

Untuk menghitung kadar cuplikan dengan metode komparatif/relatif dapat dihitung dengan persamaan^[3].

$$W_{cuplikan} = \frac{(cps_0)_{cuplikan}}{(cps_0)_{standar}} \times W_{standar} \quad (1)$$

dengan

$W_{cuplikan}$ = Kadar unsur yang diperhatikan
 Cps_0 = Laju cacah atau cps saat aktivasi dihentikan

dengan :

$$Cps_r = Cps_0 e^{-0,693t/T} \quad (2)$$

Cps_0 = Cps yang diketahui dari pencahahan
 t = Waktu tunda yaitu waktu dari akhir aktivasi sampai dengan waktu pencahahan
 T = waktu paro dari unsur yang akan dihitung kadarnya

Analisis kandungan unsur dalam suatu cuplikan dengan menggunakan AANC memiliki beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan metode analisis yang lain, misalnya *Analysis Absorption Spectrometry* (AAS) dan Pencacahan Neutron Kasip (PNK). Keuntungan menggunakan metode AANC antara lain hasil analisis dapat diperoleh cepat, tidak merusak, dan cuplikan yang memiliki lebih dari satu unsur dapat diketahui pada saat yang sama.



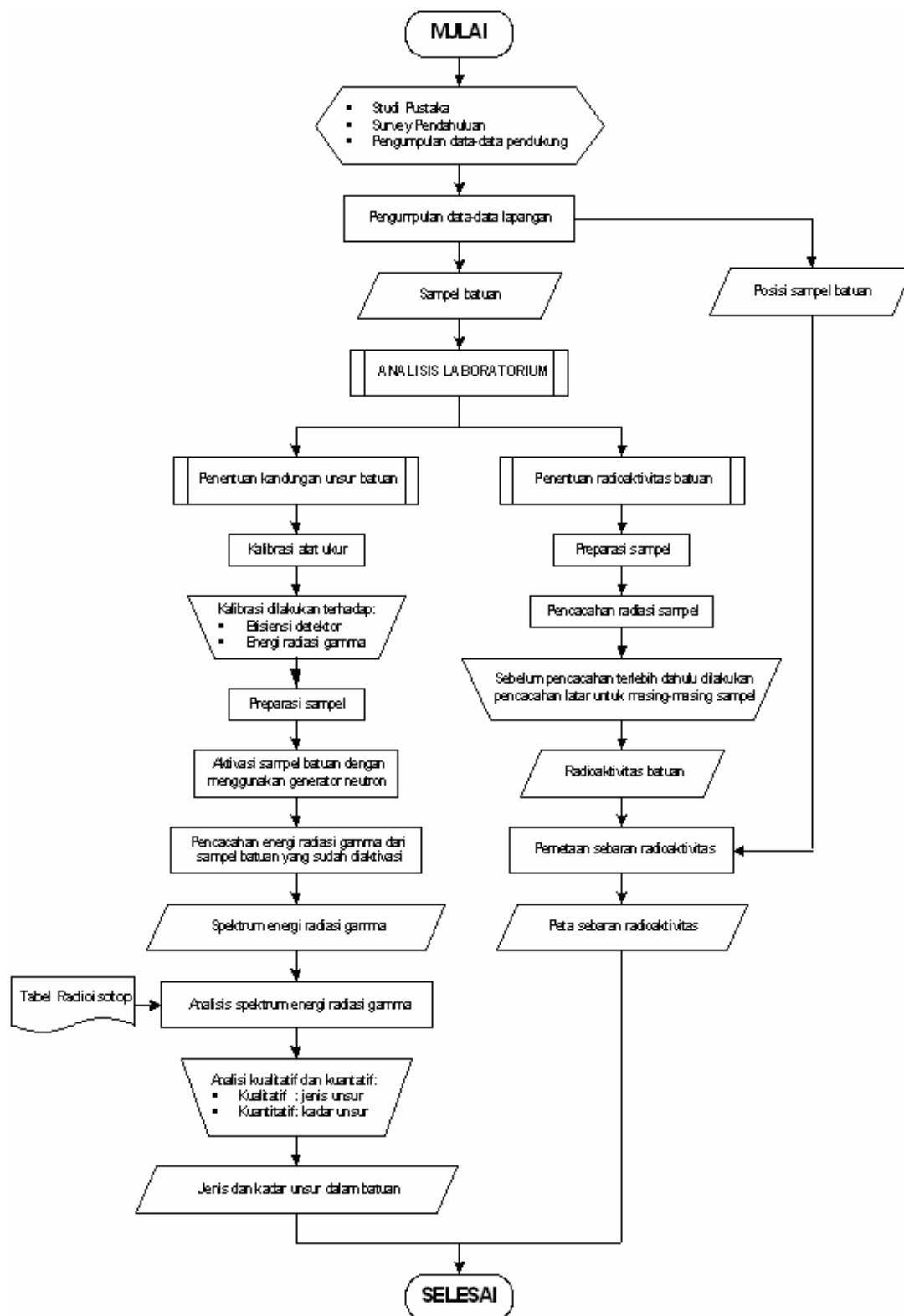
Gambar 1. Cekungan Bentarsari

Penelitian ini memfokuskan pengambilan sampel pada batuan, karena pada batuan terakumulasi unsur-unsur dari reaksi alam dan bahan mineral antara lain Ca, Mg, K, dan Si. Parameter yang digunakan untuk mengetahui penyebaran radioaktivitas adalah cpm, posisi ketinggian, posisi lintang dan bujur^[4,5]. Keempat parameter ini diolah menggunakan Program Surver untuk mengetahui penyebaran radioaktivitas pada masing-masing posisi. Sedangkan untuk mengetahui komposisi dan konsentrasi masing-masing unsur dalam cuplikan batuan digunakan metode Analisis Aktivasi Neutron Cepat (AANC).

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Alat dan Bahan

1. Alat *sampling*: bor tangan, sendok, tali, kantong plastik, GPS, peta wilayah, kompas, radiometer
2. Alat preparasi: baki, sendok, alat penggerus, kertas label, neraca digital, wadah polyetelin
3. PC dan *AccuSpec*
4. Detektor NaI(Tl)
5. Perangkat spektroskopi γ
6. Cuplikan berupa batuan
7. Cuplikan standar
8. Sumber standar ^{60}Co , ^{137}Cs (untuk kalibrasi energi γ)
9. Unit generator neutron SAMES J-25



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian Penentuan Unsur Batuan

Penentuan Unsur Batuan

Prosedur Penentuan unsur dalam batuan dapat dilihat dalam skema penelitian pada Gambar 2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kualitatif dan Kuantitatif

Analisis kualitatif dilakukan dengan mencocokkan puncak energi γ yang muncul dengan tabel unsur yang diketahui energinya dengan energi tabel standar isotop (*Neutron Activation Tables*).^(6,7) Dengan mempertimbangkan waktu paro, waktu tunda, tampang lintang sehingga diperoleh jenis unsur yang terkandung dalam sampel.

Tabel-1. Data hasil analisis kualitatif dalam batuan di Cekungan Bentarsari

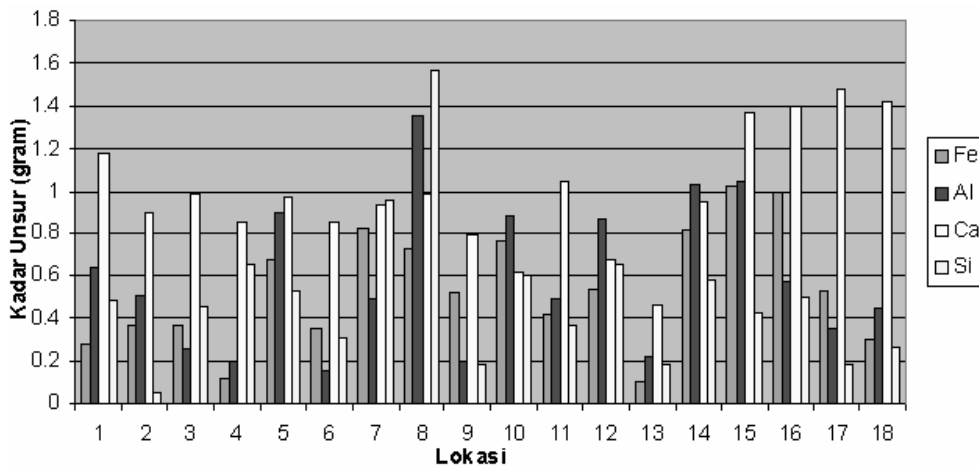
No	Energi γ	Reaksi yang terjadi	Jenis Unsur
1	846	(n,p) Mn-56	Fe-56
2	1014	(n,p)Mg-27	Al-27
3	1296	(n,2n)Ca-47	Ca-48
4	1778	(n,p)-28	Si-28

Unsur yang diperoleh dari analisis kualitatif dalam penelitian ini yaitu Fe, Al, Ca, dan Si. Analisis kuantitatif dilakukan untuk mengetahui kadar unsur Fe, Al, Ca dan Si dalam batuan di Cekungan Bentarsari.

Dengan menggunakan persamaan (1) didapatkan kadar unsur Fe, Al, Ca, dan Si pada Cekungan Bentarsari. Hasil penentuan kadar unsur pada batuan dari Cekungan Bentarsari ditunjukkan pada Gambar 3.

Berdasarkan analisis data secara kualitatif dan kuantitatif, diperoleh unsur-unsur yang terkandung dalam batuan di Cekungan Bentarsari adalah Fe, Al, Ca, dan Si. Keempat unsur ini tersebar secara merata diseluruh lokasi pengambilan sampel. Hal ini disebabkan karena keempat unsur tersebut sudah ada di alam, khususnya di tanah. Unsur Fe mempunyai kadar tertinggi pada lokasi 15 yaitu sebesar $(1,019 \pm 0,041)$ gr sedangkan untuk kadar Fe terendah berada pada lokasi 2 yaitu sebesar $(0,121 \pm 0,046)$ gr. Kadar unsur Al yang paling tinggi berada pada lokasi 8 yaitu sebesar $(1,354 \pm 0,169)$ gr sedangkan terendah berada pada lokasi 6 sebesar $(0,158 \pm 0,056)$ gr, hal ini dipengaruhi oleh topografi sungai yang tidak sama sehingga terjadi pengendapan sebaran unsur Ca pada Cekungan

Bentarsari ini juga relatif besar pada masing-masing lokasi pengambilan sampel, dengan kadar tertinggi sebesar $(1,481 \pm 0,307)$ gr pada lokasi 17, dan paling rendah sebesar $0,466 \pm 0,064$ gr pada lokasi 13. Kontribusi Ca pada posisi ini berasal dari batuan sungai yang melapuk mengingat sampel pada posisi ini diambil dari tepian sungai yang ada di wilayah tersebut. Sedangkan kandungan unsur tertinggi dari unsur Si adalah $(1,564 \pm 0,004)$ gr pada lokasi 8 dan terendah pada lokasi 2 yaitu sebesar $(0,056 \pm 0,016)$ gr. Perubahan kadar unsur pada batuan di Cekungan Bentarsari dapat juga disebabkan beberapa hal, salah satunya kondisi pada saat dilakukan sampling. Suhu lingkungan membuat air menguap, sehingga mempertinggi kadar unsur yang ada.



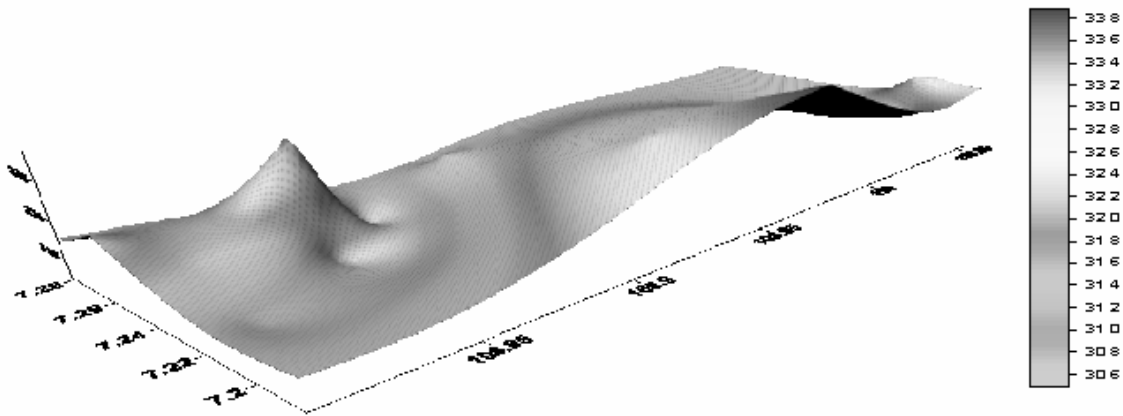
Gambar-3. Perbandingan kadar unsur pada batuan di Cekungan Bentarsari

Tabel 2. Data Pengambilan Sampel Radioaktivitas Batuan menggunakan GM Counter EIN -1204 lama cacah : 20 menit. Hv : 500

No	Kode Sampel	Cacah Latar	Cacah sampel	(CPM)
1	CB-01	158 ± 0,079	161 ± 0,079	3 ± 0,577
2	CB-02	153 ± 0,081	167 ± 0,077	14 ± 0,267
3	CB-03	159 ± 0,079	172 ± 0,076	13 ± 0,277
4	CB-04	159 ± 0,079	161 ± 0,079	12 ± 0,289
5	CB-05	179 ± 0,075	185 ± 0,074	6 ± 0,408
6	CB-06	165 ± 0,078	167 ± 0,077	2 ± 0,707
7	CB-07	154 ± 0,081	162 ± 0,079	8 ± 0,354
8	CB-08	174 ± 0,076	180 ± 0,075	6 ± 0,408
9	CB-09	160 ± 0,079	166 ± 0,078	6 ± 0,408
10	CB-10	160 ± 0,079	162 ± 0,079	2 ± 0,707
11	CB-11	164 ± 0,078	174 ± 0,076	10 ± 0,316
12	CB-12	138 ± 0,085	156 ± 0,080	18 ± 0,236
13	CB-13	153 ± 0,081	172 ± 0,076	19 ± 0,229
14	CB-14	147 ± 0,082	153 ± 0,081	6 ± 0,408
15	CB-15	164 ± 0,078	175 ± 0,076	11 ± 0,302
16	CB-16	145 ± 0,083	158 ± 0,079	13 ± 0,277
17	CB-17	185 ± 0,074	192 ± 0,072	7 ± 0,038
18	CB-18	174 ± 0,076	205 ± 0,069	31 ± 0,179

Tabel 3. Data pengambilan sampel batuan

No	Lokasi	Ketinggian (Mdpl)	Posisi Lintang	Posisi Bujur
1	CB - 01	314	07 ⁰ 09.416	108 ⁰ 47.926
2	CB - 02	313	07 ⁰ 09.479	108 ⁰ 47.878
3	CB - 03	339	07 ⁰ 09.406	108 ⁰ 47.681
4	CB - 04	337	07 ⁰ 09.404	108 ⁰ 47.596
5	CB - 05	331	07 ⁰ 09.440	108 ⁰ 47.509
6	CB - 06	325	07 ⁰ 09.435	108 ⁰ 47.951
7	CB - 07	317	07 ⁰ 09.467	108 ⁰ 47.978
8	CB - 08	309	07 ⁰ 09.490	108 ⁰ 48.056
9	CB - 09	315	07 ⁰ 09.576	108 ⁰ 48.062
10	CB - 10	305	07 ⁰ 09.574	108 ⁰ 48.200
11	CB - 11	312	07 ⁰ 09.608	108 ⁰ 48.215
12	CB - 12	336	07 ⁰ 09.630	108 ⁰ 48.203
13	CB - 13	305	07 ⁰ 09.634	108 ⁰ 48.273
14	CB - 14	315	07 ⁰ 09.669	108 ⁰ 48.405
15	CB - 15	311	07 ⁰ 09.736	108 ⁰ 48.408
16	CB - 16	310	07 ⁰ 09.780	108 ⁰ 48.162
17	CB - 17	322	07 ⁰ 09.728	108 ⁰ 48.008
18	CB - 18	316	07 ⁰ 09.873	108 ⁰ 48.023



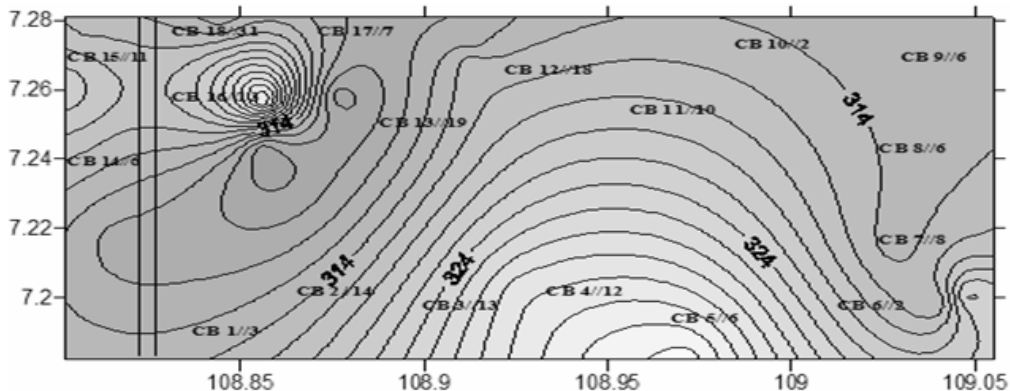
Gambar -4. Tofografi wilayah pengambilan sampel

Pengukuran Radioaktivitas Batuan

Data survei secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 3 yang dilengkapi dengan parameter ketinggian, posisi lintang dan bujur yang diperoleh menggunakan *Global Position System* (GPS). Berat sampel batuan yang akan dicacah ditentukan sebesar 0,5 gram pada masing-masing posisi. Proses penimbangan menggunakan jenis timbangan digital AND EK-400 H. Pencacahan sampel menggunakan alat cacah GM-ORTEC selama 20 menit. Hasil pengukuran radioaktivitas batuan ditunjukkan pada Tabel 2.

Pengambilan sampel batuan dilakukan secara langsung dari berbagai titik yang tersebar di Cekungan Bentarsari. Jumlah seluruh titik lokasi pengambilan sampel adalah 18 buah. Pada Tabel 3 dapat dilihat data survei yang meliputi ketinggian, posisi lintang dan posisi bujur yang bertujuan untuk menggambarkan *countour* wilayah pada masing-masing posisi pengambilan sampel (Gambar 4)

Pengukuran radioaktivitas dilakukan dengan membuat variasi jarak lokasi pengambilan sampel dengan radius maksimal sepuluh kilometer. Sampel diambil dari kedalaman kurang lebih satu meter dibawah permukaan tanah dan memisahkannya menggunakan wadah berlabel untuk membedakan batuan dari masing-masing posisi. Batuan yang telah diambil kemudian di keringkan dengan penyinaran sinar matahari dan di preparasi dengan menumbuknya sampai halus menggunakan cawan porselin. Sebelum batuan dicacah menggunakan detektor Geiger-Muller selama 20 menit. Sampel yang telah dipreparasi ditimbang terlebih dahulu menggunakan timbangan jenis AND EK-400 H untuk mendapatkan berat bersih sampel seberat 0.5 gram dan mencampurnya menggunakan larutan aquades agar debu yang berasal dari batuan tidak masuk ke detektor serta mengeringkannya kembali selama 2 hari.



Gambar-5 Sebaran radioaktivitas batuan di Cekungan Bentarsari

Sampel yang telah dipreparasi dan dikeringkan kemudian dicacah selama 20 menit. Hasil yang diperoleh dikoreksi dengan cacah radiasi latar (*back-ground*) yang telah diukur terlebih dahulu. Hasil cacah radioaktivitas total bersih dalam satuan cacah permenit (cpm). Dari pencacahan yang telah dilakukan terhadap sampel batuan di Cekungan Bentarsari ini didapatkan hasil bahwa dari 18 titik pengambilan sampel yang tersebar dan diambil pada kedalaman 0,5-1,0 meter menunjukkan nilai yang bervariasi antara 2 cpm (0,0002 cps) sampai 31 cpm (0,0258 cps). Nilai radioaktivitas yang diperoleh kemudian dipetakan dalam bentuk *contour* yang menyatakan sebaran radioaktivitas pada tiap posisi menggunakan program Surver.

KESIMPULAN

Pada penelitian analisis unsur dalam batuan Di Cekungan Bentarsari Kabupaten Brebes Jawa Tengah menggunakan metode analisis aktivasi neutron cepat (AANC) dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Unsur-unsur yang terkandung dalam Cekungan Bentarsari adalah Fe, Al, Ca, dan Si dengan kadar antara (0,121±0,046) gr sampai (1,019±0,041)gr untuk Fe, (0,158±0,056) gr sampai (0,1354±0,169) gr untuk Al, dan (0,466±0,064) gr sampai (0,148±0,307) gr untuk Ca, dan (0,056±0,016) gr sampai (0,1564±0,004) gr untuk Si.
2. Nilai radioaktivitas batuan tertinggi dari Cekungan Bentarsari adalah sebesar 31 cpm (0,0258 cps) dari titik CB-18 dan terendah sebesar 2 cpm (0,0002 cps) dari titik CB-6. Perbedaan nilai radioaktivitas pada masing-masing posisi sangat dipengaruhi oleh sebaran batubara yang ada di wilayah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] http://gc.lib.itb.ac.id/go.php?id=jbptitbgc-gdl-s1-2004_teddysutad168&node=11&start=6 diakses 10 Desember 2006.
- [2] Faure, G, *Principle of isotopic Geology Second Edition*, John Wiley And Sons, New York, 1986.
- [3] Nargowalla, S, *Activation Analysis With Neutron Generator*, John Wiley and Sons, New York, 1973.
- [4] Kustowo, *Peta Geologi Lembar Majenang, Jawa*, Pusat Penelitin dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1975.

- [5] Pasangka,B, *Kajian Teoritis Dan Beberapa Metode "Radiometric Dating"*, UGM, 1996.
- [6] Gerhard Erdtmann, *Neutron Activation Tables*, Kernchemie in Einzeldarstellungen Volume 6, 1976
- [7] Tsoulfanidis, N, *Measurment and Detection of Radiation*, Hemishphere Publishing Corp, 1983.

TANYA JAWAB

Rill Isaris

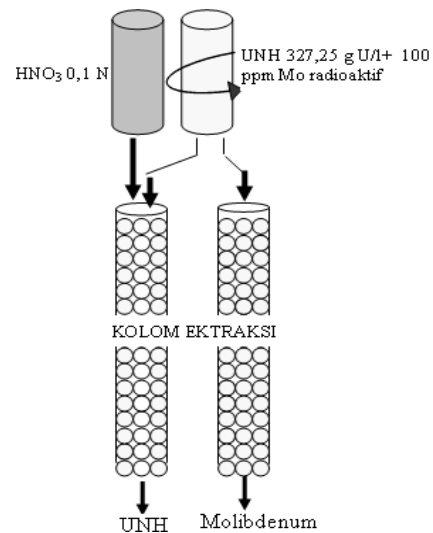
- Apakah hasil analisa unsur Fe, Al, Ca, Si yang saudara peroleh di cekungan Bantarsari sudah bisa memberikan indikasi potensi batubara yang terdapat di dalamnya
- Apakah rencana penelitian ini sudah dikordinasikan dengan pihak yang memiliki data awal potensi batu bara (Departemen Pertambangan dan Energi?) atau instansi penelitian lain? Dan mungkin dapat diperluas ke seluruh Indonesia

Elin Nuraini

- Ya, karena menurut literatur kandungan batu bara ada diantara keempat unsur tersebut, diantaranya Ca dan Si. Akan tetapi disamping unsur tersebut masih banyak unsur lain yang terkandung diantara batuan sedimen di cekungan Bentarsari diantara Cr, Cu, Co, Pb, Mo dan Zn (Analisis dengan netron-netron termal dan XRF)
- Rencana lokasi penelitian ini mula-mula berasal dari pemerintah setempat yang meminta kami bekerja sama untuk meneliti batuan sedimen di cekungan Bentarsari. Instansi yang terkait dengan penelitian ini adalah UNSUD dan DIKTI Purworejo.

menghasilkan ^{99}Mo , diharapkan proses ini akan memperpendek proses karena tidak perlu proses pelarutan dan pengendapan. ^{99}Mo hasil iradiasi dengan akselerator akan di pisahkan dengan menggunakan 2 kolom, kolom pertama berisi silika-TBP yang akan mengambil uranil nitrat sedang hasil fisi termasuk molibdenum lolos. Kolom ke dua berisi alumina yang akan mengabsorpsi molibdenum sedangkan hasil fisi lainnya lolos. Dengan menggunakan ke dua kolom tersebut selain dapat memisahkan molibdenum juga dapat memisahkan hasil fisi. Uranil nitrat yang tertangkap di kolom pertama dapat dielusikan menggunakan HNO_3 encer, setelah dipekatkan dapat dipakai lagi sebagai umpan pada akselerator dan mempunyai waktu hidup selama 15 tahun. Untuk maksud tersebut dalam penelitian ini di buat simulasi yaitu larutan molibdenum alam di iradiasi di reaktor Kartini, larutan tersebut di campurkan ke dalam uranil nitrat kemudian dipisahkan di dalam kolom pertama yang berisi silika-TBP. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui secara kualitatif pemisahan molibdenum dari uranil nitrat dengan kolom yang berisi silika-TBP, jika hal ini berhasil maka data ini dapat dipakai untuk pemisahan molibdenum dari uranil nitrat pada kondisi yang sebenarnya. Ekstraksi kromatografi menjadi pilihan karena pada akhir-akhir ini sangat populer dan sangat ideal untuk memisahkan hasil fisi dan aktinida terutama radionuklida-radionuklida seperti plutonium, uranium, amerisium, stronsium dll [2]. Ekstraksi kromatografi adalah bentuk kromatografi cair-cair yang di kopel dengan ekstrak organik yang biasa digunakan pada ekstraksi cair-cair dengan karakter multi stage dari proses kromatografi. Ada dua macam proses yang dikembangkan dalam reprocessing menggunakan ekstraksi kromatografi yaitu *Chromex process* untuk pemisahan hasil fisi dan aktinida, proses ini pertama kali dikembangkan secara sukses untuk *reprocessing* skala industri pada aktivitas tinggi. Yang ke dua yaitu *Purochromex process* untuk mengisolasi uranium dan plutonium dari pelarutan bahan bakar air ringan [3,4]. Di dalam *Chromex process* Tributylfosfat (TBP) yang sudah sejak lama dikenal sebagai ekstrak yang sangat selektif pada ekstraksi cair-cair untuk reprocessing bahan bakar nuklir, dikembangkan pada ekstraksi kromatografi. Pada ekstraksi kromatografi ini, TBP ditempelkan pada fasa diam (resin, silika, alumina, polimer organik), sedang fasa geraknya adalah uranil nitrat [3,4,5]. Gambar 1 adalah kolom yang berisi silika-TBP untuk memisahkan molibdenum dari uranil nitrat.

Dalam penelitian ini digunakan simulasi 100 ppm larutan molibdenum alam di iradiasi di reaktor



Dianalisis dng titrasi Di analisis dng AAN

Gambar 1. Kolom ekstraksi

Kartini fasilitas Lazy Susan pada flux $3,0 \cdot 10^{11}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{det}^{-1}$ selama 6 jam. Molibdenum yang telah di iradiasi ditambahkan pada larutan uranil nitrat kadar 327,25 g U/L kemudian di pisahkan dengan kolom yang berisi silika-TBP. Molibdenum yang keluar dari kolom pada selang waktu satu (1) menit di analisis menggunakan spektrometer gama sedang uranium yang tertempel pada silika-TBP di elusi menggunakan 0,1 N HNO_3 dan kadar uraniumnya dianalisis secara titrimetri menggunakan metode titan. Analisis kuantitatif dilakukan dengan membuat kurva kalibrasi antara absorbansi vs konsentrasi larutan standar. Dalam penelitian ini digunakan larutan standar dalam satuan berat (untuk memudahkan pengolahan data) vs aktivitas awal (cps), dengan menggunakan persamaan regresi $Y = bX + a$ maka untuk larutan sampel hasil pemisahan molibdenum dapat dihitung. Untuk mencari aktivitas pada waktu nol (mula-mula) maka digunakan rumus sbb:

$$A_0 = A_t e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Kinerja Kolom Ekstraksi Kromatografi

Pada dasarnya pemisahan yang mungkin dilakukan dalam kolom ekstraksi kromatografi ditentukan oleh beberapa faktor seperti:

Faktor Pisah (FP), adalah perbandingan koefisien distribusi dari komponen yang dipisahkan.

$$\text{Koefisien distribusi molibdenum (Kd)} \\ \text{Mo} = \frac{\sum \text{moFo}}{\sum \text{moFa}} \quad (4)$$

Koefisien distribusi uranium (Kd)

$$U = \frac{\sum U_{Fo}}{\sum U_{Fa}} \quad (5)$$

Faktor pisah (FP)

$$U/Mo = \frac{KdU}{KdMo} \quad (6)$$

Kd Mo = koefisien distribusi molibdenum.

U Fo = jumlah uranium dalam fasa organik

U Fa = jumlah uranium dalam fasa air

Mo Fo = jumlah molibdenum dalam fasa organik

Mo Fa = jumlah molibdenum dalam fasa air

BAHAN DAN TATA KERJA

Bahan

Serbuk U_3O_8 ; ABM (Air Bebas Mineral); HNO_3 pekat; H_2SO_4 pekat; Asam Amido Sulfonat; $TiCl_3$; $FeCl_3$; Indikator PP; NaOH tritisol 0,1 N; $K_2Cr_2O_7$ tritisol 0,1 N; digunakan untuk membuat larutan uranil nitrat dan analisis kadar uranium serta keasaman. Sebelum hidropobisasi *Kiesel Gel 40* dipanaskan dalam Oven termostatik (desikator vakum) kemudian dimasukkan dalam labu leher tiga yang dilengkapi dengan pompa vakum, corong pisah dan tabung gas N_2 untuk dihidropobisasi dengan DMCS (*Dimethyl Dichloro silane*). *Impregnasi* dilakukan dalam beker yang berisi Aseton dan TBP (*Tri Butyl Phosphate*). Digunakan kolom ekstraksi panjang 8 cm diameter 1 cm dilengkapi dengan pendingin dipakai untuk memisahkan ^{99}Mo dari uranium serta elusi pada keasaman HNO_3 0,1 N. *Natrium molybdat* 100 ppm dari merk di iradiasi di reaktor Kartini pada fasilitas Lazy Susan pada flux $3,0 \cdot 10^{11}$ neutron cm^{-2} det $^{-1}$ selama 6 jam.

Tata kerja

a). Hidropobisasi *Kiesel Gel 40*

Ke dalam gelas beker dimasukkan sebanyak 15 gram kiesel gel 40 dipanaskan dalam oven thermo static pada suhu $150^\circ C$ (sambil divakum selama 1 jam). Setelah dingin dimasukkan ke dalam labu leher tiga, divakumkan selama 30 menit. Sebanyak 6 ml DMCS dimasukkan kedalam corong pisah dari atas labu setetes demi setetes sampai habis (penetasan dilakukan 1 tetes dengan 1 menit pengadukan dan dibiarkan selama 5 menit). Diaduk selama 24 jam kemudian dialiri gas N_2 (untuk menghilangkan gas HCl yang ada).

Selanjutnya untuk menghilangkan sisa gas HCl dan uap DMCS yang masih tertinggal dalam

labu maka dipanaskan pada suhu $60^\circ C$ sambil divakum selama 30 menit.

b.) *Impregnasi TBP pada kiesel gel*

Sebanyak 5 gram kiesel gel 40 hasil hidropobisasi dimasukkan dalam beker glas 50 ml dan ditambahkan 10 ml aseton dan 2,5 ml TBP, diaduk sampai homogen, hingga kering tanpa pemanasan.

c). *Pengisian kolom*

Setelah silika-TBP benar-benar kering, masukkan kedalam kolom ekstraksi secara bed (catu), caranya: masukkan serbuk tersebut sedikit demi sedikit kedalam kolom panjang 30 cm dan diameter 1 cm yang sebelumnya telah diberi glass-wool pada bagian paling bawah. Selanjutnya setelah mencapai ketinggian 1 cm kolom dialiri gas N_2 selama 2 menit. Hal ini terus dilakukan hingga serbuk habis (5 g = 5 cm tingginya).

Sebelum digunakan kolom dibasahi dengan larutan HNO_3 0,1N sebanyak 4ml hingga semua serbuk basah. Kemudian masukkan larutan uranil nitrat berkadar 327,25 g/L dan pH 2 sampai jenuh. Untuk mengelusi digunakan larutan HNO_3 0,1 N.

d) *Pemisahan molibdenum dari uranium.*

Sebanyak 4 ml larutan uranil nitrat dengan konsentrasi 327,25 g/L dan 4 ml larutan molibdenum 100 ppm yang telah di iradiasi di reaktor Kartini digunakan sebagai umpan pada kolom kromatografi

Diatur kecepatan alir antara tetes masuk dan keluar dibuat sama yaitu 0,4 ml / menit.

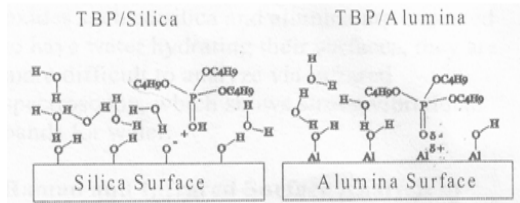
- Larutan yang keluar dari kolom pada selang waktu 1 menit diambil kemudian dianalisis kadar dan ditentukan berat uranium dan molibdenumnya.
- Berat uranium dapat ditentukan dari hasil kali antara konsentrasi dengan volume cuplikan. Sedang molibdenumnya diperoleh dengan membandingkan larutan standar dari 0-80 ppm merk yang telah di iradiasi di reaktor Kartini. Dengan membuat grafik massa vs aktivitas awal, dan dengan menggunakan persamaan regresi linier maka dapat diperoleh massa molibdenum dalam cuplikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan Hidropobisasi *Kiesel Gel 40* dan *impregnasi dengan TBP*

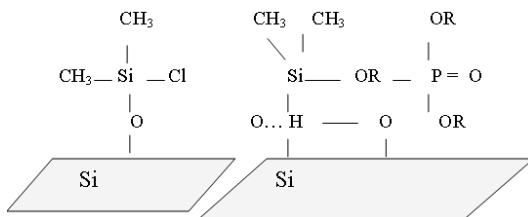
Hidropobisasi dilakukan untuk mengubah sifat silika yang hidrofil menjadi hidrofob yaitu

dengan menambah DMCS. Jika silika langsung direndam dengan TBP maka akan terjadi adsorpsi TBP secara langsung yang ikatannya sbb^[8] :



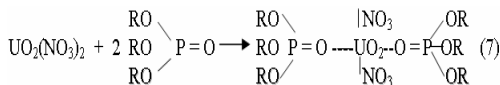
Gambar 2. Adsorpsi TBP pada silika atau alumina^[8,9]

Jika silika langsung ditambah TBP tanpa hidropobisasi maka akan terjadi reaksi seperti di atas maka proses ekstraksi kromatografi tidak akan terjadi karena gugus P=O dari TBP tidak dapat berikatan dengan uranium karena sudah mengikat silika, untuk itu maka dilakukan hidropobisasi agar supaya gugus P=O ada dipermukaan silika. Gambar dibawah menunjukkan kemungkinan reaksi yang terjadi setelah hidropobisasi dan impregnasi dengan TBP sbb^[9]



Dari reaksi tersebut dimungkinkan bahwa gugus P=O ada dipermukaan sehingga dapat dipakai untuk ekstraksi kromatografi. Adapun reaksi yang terjadi pada ekstraksi kromatografi adalah seperti reaksi yang terjadi pada reaksi ekstraksi cair-cair sbb

Reaksi cair-cair :

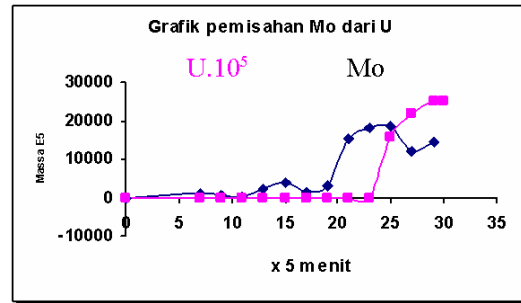


Ekstraksi kromatografi

Ekstraksi dilakukan dengan mengiradasi 4 ml larutan induk molibdenum Merck sebagai umpan kemudian dicampur dengan larutan uranil nitrat 327,25 g/L kemudian dipisahkan secara ekstraksi kromatografi. Selang waktu 5 menit di analisis kadar uranium dan molibdenumnya, diperoleh grafik seperti terlihat pada Gambar 3

Dari Gambar 3 terlihat bahwa molibdenum keluar lebih dulu yaitu pada menit ke 35 sedangkan uranium muncul pada menit ke 125. Dalam

ekstraksi kromatografi TBP cukup selektif terhadap uranium



Gambar 3. Kurva massa Mo,U vs waktu pemisahan

dan membentuk kompleks $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TBP$ seperti pada reaksi cair-cair (7). Dalam ekstraksi cair-cair uranium, Zr, Ru terdapat di fasa organik (TBP) sedang hasil fisi termasuk molibdenum berada di fasa air.

Penentuan Kd (U), Kd (Mo) dan FP (U/Mo) dari pemisahan Molibdenum dari Uranium.

- Sampel uranium yang digunakan sebanyak 4 ml, konsentrasi 327,25 gr/L.
- Larutan Mo yang digunakan sebanyak 4 ml, konsentrasi 100 ppm
- Berat molibdenum masuk = $100 \text{ mgr/L} \times 0,004 \text{ L} = 400 \text{ } \mu\text{gr}$
- Molibdenum 100 ppm hasil counting = 12,36 μgr
- Berat molibdenum keluar = 1,77 μgr
- Berat uranium masuk = $327,25 \text{ gr/L} \times 0,004 \text{ L} = 1309 \text{ mgr}$
- Berat uranium keluar = 132,42 mgr

sehingga :

Koefisien distribusi molibdenum (Kd)

$$Mo = \frac{\sum moFo}{\sum moFa} = \frac{12,36 - 1,77}{1,77} = 5,98$$

Koefisien distribusi uranium (Kd)

$$U = \frac{\sum UFo}{\sum UFa} = \frac{1309 - 132,42}{132,42} = 8,88$$

Faktor pisah (FP)

$$U/Mo = \frac{KdU}{KdMo} = \frac{8,88}{5,98} = 1,48$$

Tabel 1. Data-data Molibdenum Hasil Penelitian

Matrik reaktor 19-4-2007 jam 9.04 Matrik reaktor 20-4-2007 jam 15.04 Ditunjukkan sejumlah di bawah ini 20-4-2007													
No	Waktu counting	pendinghkan	t1/2(detk), 67,80/60	ttranda (detk)	ttranda t1/2	ketpa 1	$\lambda=0,693/t1/2$	It	e	$e^{-\lambda t}$	At, cps	No. cacah/detik	masa
1	15.05	24. -	241.200	86.460	0,36846	0,693	0,0000287	0,24841	2,71830	1,28199	18,47	12,36	
1 ppm	14.28	23.24	241.200	84.240	0,36688	0,693	0,0000287	0,24203	2,71830	0,65792	2,62	3,337	
2 ppm	15.34	23.30	241.200	84.600	0,36812	0,693	0,0000287	0,24307	2,71830	0,66073	4,17	5,317	
10 ppm	14.40	23.36	241.200	85.020	0,36937	0,693	0,0000287	0,24427	2,71830	0,66401	22,43	14,89	
40 ppm	14.52	23.48	241.200	85.680	0,36937	0,693	0,0000287	0,24617	2,71830	0,66916	9,37		
80 ppm	14.59	23.55	241.200	86.112	0,37061	0,693	0,0000287	0,24741	2,71830	0,67264	19,64		
2	16.55		241.200	86.571	0,36992	0,693	0,0000287	0,24873	2,71830	1,28240	0,05	0,076943881	
3	17.00		241.200	86.871	0,36916	0,693	0,0000287	0,24959	2,71830	1,28350	0,04	0,051340154	
4	17.05		241.200	87.171	0,36141	0,693	0,0000287	0,25045	2,71830	1,28461	0,18	0,231229915	
5	17.11		241.200	87.531	0,36290	0,693	0,0000287	0,25149	2,71830	1,28594	0,14	0,180031606	
6	17.16		241.200	87.831	0,36414	0,693	0,0000287	0,25235	2,71830	1,28705	0,26	0,334632722	
7	17.21		241.200	88.131	0,36539	0,693	0,0000287	0,25321	2,71830	1,28816	0,1	0,128815878	
8	17.27		241.200	88.491	0,36688	0,693	0,0000287	0,25425	2,71830	1,28949	0,2	0,257896371	
9	17.32		241.200	88.791	0,36812	0,693	0,0000287	0,25511	2,71830	1,29060	0,96	1,238979654	3,97E-01
10	17.37		241.200	89.091	0,36937	0,693	0,0000287	0,25597	2,71830	1,29172	1,14	1,472557057	5,60E-01
11	17.42		241.200	89.391	0,37061	0,693	0,0000287	0,25683	2,71830	1,29283	1,18	1,525540092	5,90E-01
12	17.48		241.200	89.751	0,37210	0,693	0,0000287	0,25787	2,71830	1,29417	0,78	1,0094514290	2,31E-01
13	17.21		241.200	89.901	0,37272	0,693	0,0000287	0,25830	2,71830	1,29473	0,09	0,116525373	
Jumlah =												6,623945132	1,778

Tabel 2. Data-data Uranium Hasil Analisis Pemisahan

Nomor Sampel	Volume K ₂ Cr ₂ O ₇ (mL)	Kadar U (gr/L)	Berat U (mgr)
1	0,02	0	0
2	0,02	0	0
3	0,02	0	0
4	0,02	0	0
5	0,02	0	0
6	0,02	0	0
7	0,02	0	0
8	0,02	0	0
9	0,02	0	0
10	0,02	0	0
11	0,02	0	0
12	0,02	0	0
13	0,02	0	0
14	0,02	0	0
15	0,02	0	0
16	0,02	0	0
17	0,02	0	0
18	0,02	0	0
19	0,02	0	0
20	0,02	0	0
21	0,02	0	0
22	0,02	0	0
23	0,02	0	0
24	0,02	0	0
25	0,12	59	15,7333
26	0,16	82,6	22,0267
27	0,16	82,6	22,0267
28	0,16	82,6	22,0267
29	0,18	94,4	25,3057
30	0,18	94,4	25,3057

Σ 132,4268

Data ini menunjukkan bahwa uranium dan dan molibdenum mempunyai Kd yang tidak jauh berbeda, sehingga faktor pisahnya sangat kecil. Faktor pisah yang kecil ini dikarenakan masih banyak faktor yang berpengaruh yang belum dilakukan dalam penelitian ini. Faktor faktor yang berpengaruh antara lain adalah tinggi dan diameter kolom, kecepatan alir, keasaman umpan atau pH, kadar umpan. Selain itu, dalam pemisahan ini analisis molibdenum digunakan AAN, berarti yang teranalisis hanya molibdenum yang aktif sedang yang terpisahkan dengan ekstraksi kromatografi adalah pemisahan molibdenum secara kimia biasa dalam arti molibdenum total baik yang aktif maupun yang tidak aktif sehingga Kd nya sangat kecil.

KESIMPULAN DAN SARAN

Secara kuantitatif molibdenum dapat dipisahkan dari uranil nitrat dengan ekstraksi kromatografi dengan kolom yang berisi silika-TBP tinggi 8 cm, diameter 1 cm, kecepatan alir 3 tetes /menit, molybdenum keluar lebih dulu pada menit ke 35 sedangkan uranium muncul pada menit ke 125. Diperoleh harga Kd (Mo) = 5,98 dan Kd (U) =8,88 ; faktor pemisahan = 1,48 .

SARAN

Penelitian ini perlu dilanjutkan dengan mencoba iradiasi molibdenum pada kadar yang lebih besar dan variabel tinggi dan diameter kolom, kecepatan alir, keasaman umpan atau pH dan kadar umpan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Sdr. Eko Sasmito siswa SMK Negeri 3 Kimia Madiun dan Sdr. Hartanta mahasiswa STTN yang telah tekun dan rajin membantu mengerjakan penelitian ini sampai selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Daniel, Wasil ;” METHOD AND APPARATUS FOR THE PRODUCTION AND EXTRAC-TION OF MOLYBDENUM⁹⁹”, -Patent 5910971.
- [2] Esrich, Hubert;”EXTRACTION CHROMATOGRAPHY SEPARATION OF FISSION PRODUCTS ANDACTINIDES”,<http://www.nc.chalmers.se/avhandl/deavh/ESCHRICH.HTM>.
- E. Horwitz Philip “EXTRACTION CHROMATOGRAPHY OF ACTINIDES AND SELECTED FISSION PRODUCTS: Achievement of Selectivity”, Eichrom Technologies , Inc; USA.[WWW. eichrom.com/products/extraction.cfm](http://WWW.eichrom.com/products/extraction.cfm).
- [4] Anonym ;” PREPARATION OF COLUMN FOSR REVERSED-PHASE PARTITION CHROMATOGRAPHY ”.
- [5] Pemberton Research Group;” SURFACE RAMAN AND INFRARED SPCTROSCOPY TO PROBE ORGANIC POLLUTION OF SOIL SAMPLE :, Surface Analysis of Environmental System; 1999.
- [6] Navratil , J.D and Alford ,C.E; “ TRIBUTYL-PHOSPHATE IMPREGNATED SORBENT FOR PLUTONIUM-URANIUM SEPARATION “, Technical Report , May 2001.
- [7] Horwitz Philip , E at al, “ SEPARATION AND PRECONCENTRATION OF URANIUM FROM ACIDIC MEDIA BY EXTRACTION CHROMATOGRAPHY ”, Analytical Chimica Acta; 1992.
- [8] AlexBernard Scolten;” MOLECULER SURFACE STRUCTURS OF MODIFIED SILICA FOR CHROMATOGRAPHY ”, Eindhoven University of Technology ; 1996
- [9] Gla,M; Harvey J, ” NOVEL SILICA-BASED ION EXCHANGE RESIN ”, Research Sponsored by the U.S. Department of Energy’sMorgantown Energy Technology Center, under contract DE-AR21-96MC33088 with Eichrom Industries. Inc., 8205 South Cass Avenue, Suite 107, Darien, IL 60561; telefax: 630-963-0381.

UJI COBA FORMULASI KOMPON UNTUK BAHAN CIUT PANAS SEBAGAI ISOLASI KABEL

Gatot Trimulyadi Rekso, Anik Sunarni

Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi

Badan Tenaga Nuklir Nasional

Jl. Cinere, Ps Jumat PO Box 7002 JKSL, Jakarta 12070

Fax : 021 7513270. E-mail : [gotot28@batan.go.id](mailto:gatot28@batan.go.id)

ABSTRAK

UJI COBA FORMULASI KOMPON UNTUK BAHAN CIUT PANAS SEBAGAI ISOLASI KABEL.

Telah dilakukan percobaan pembuatan bahan ciut-panas (heat shrinkable) untuk isolasi kabel. Penelitian ini bertujuan mencoba formulasi kompon bahan isolasi kabel yang telah diperoleh, yaitu formula 1 dan 2 untuk dicoba sebagai bahan ciut panas pada peralatan yang ada di industri kabel. Hasil percobaan menunjukkan formula 1 dan 2 dapat digunakan sebagai bahan ciut panas pada peralatan skala industri. Formula 2 menunjukkan sifat kimia dan mekanik yang lebih baik dibandingkan formula 1.

ABSTRACT

THE TRIAL EXPERIMENT OF COMPOUND FORMULATION FOR HEAT SHRINKABLE MATERIALS FOR CABLE INSULATION.

The aim of the experiment is to make a trial of the compound formulation for cable insulation that is formulated in formulation 1 and 2, as heat shrinkable materials in the machinery of cable industry. The results indicated that the formulation 1 and 2 can be used as the heat shrinkable material in the industrial machinery. It was found that the formulation 2 as better chemical and mechanical properties compared with formula 1.

PENDAHULUAN

Sejalan dengan perkembangan teknologi, penggunaan kabel tidak hanya untuk keperluan jaringan listrik, tetapi digunakan juga dalam telekomunikasi, automobil dan industri elektronika. Penggunaan tersebut membutuhkan jenis kabel tertentu diantaranya diperlukan kabel yang tahan panas dan bahkan tahan tegangan tinggi. Polietilen merupakan salah satu jenis polimer yang digunakan untuk bahan isolasi kabel.

Polietilen adalah polimer semi kristalin dengan satuan pengulangan $-CH_2-CH_2-$, berdasarkan berat jenisnya polietilen dibagi menjadi tiga jenis yaitu polietilen densitas rendah (LDPE), medium densitas (MDPE) dan densitas tinggi (HDPE). Jenis yang paling banyak digunakan sebagai bahan isolasi kabel yang proses pengikatan silangnya dengan teknik radiasi adalah yang densitas rendah (LDPE), karena jenis ini bercabang cabang dengan derajat kristanilitas sekitar 50 – 65 %, sedangkan HDPE merupakan polietilen linier dengan derajat kristalinitas tinggi sekitar 95 %. Terjadinya pengikatan silang lebih dominan terbentuk pada fasa amorf, sehingga jika derajat kristalinitasnya tinggi maka fasa amorfnya rendah yang mengakibatkan tingkat pengikatan silangnya juga rendah^[1].

Dasar teknologi ciut panas terhadap bahan polimer pada LDPE berdasarkan fenomena iradiasi LDPE akan menyebabkan terjadinya suatu reaksi kimia dimana ikatan antar molekul bermunculan. Ikatan antar molekul diberi nama ikatan silang (*crosslinking*). LDPE yang telah berikatan silang disebut XLDPE. Karena sambungan ikatan silang jauh lebih kuat dari sambungan kristalin, maka apabila bahan XLDPE dipanaskan pada suhu kristalin 120⁰C, akan mempunyai bentuk yang tetap dan tidak meleleh atau mencair. Daya tahan terhadap suhu panas tersebut karena struktur di tunjang oleh sambungan sambungan yang berikatan silang, karena titik kristalin hilang akan tetapi bahan tidak meleleh hanya melunak, sehingga dapat dicetak dan di ekspansi menjadi bentuk yang diinginkan. Apabila bahan ini dipanaskan untuk yang kedua kalinya maka bahan tersebut titik kristalin yang hilang akan bermunculan kembali, sehingga akan kembali seperti ukuran bentuk semula seperti sebelum dipanaskan dan dicetak/ekspansi untuk yang pertama kali.

Tujuan dari penelitian ini adalah mencoba formulasi kompon bahan isolasi kabel ciut-panas yang telah di teliti dan dikembangkan di PATIR-BATAN untuk di uji coba pada peralatan yang lebih

besar yang ada pada Industri Kabel PT Kabelindo Murni, Jakarta.

Bahan

Pembuatan kompon

Formulasi 1. Kompon *Low density Polyethelene* (90 %) produk Polandia (Marlene EPFS 4020) yang mengandung aditif anti oksidan *Irganox 1076* (1 %) produk Ciba-Geigy, *carbon black* buatan Union Carbide (8%) dan *flame retardant*(1,0 %) dan dan formulasi 2 ditambah *butyl rubber* buatan China-Taiwan. sebanyak 10 %. Pembuatan kompon dilakukan dengan alat *labo-plastomil* pada temperatur 130°C selama kurang lebih 10 menit. Komposisi formula 1 dan 2 ditunjukkan pada Tabel 1.

Pengujian pada kompon yang telah di iradiasi meliputi fraksi padatan diukur untuk mengetahui jumlah ikatan silang yang terjadi. Penentuan fraksi padatan dengan metode gravimetri, sampel $\pm 0,5$ gram dimasukan dalam bungkus kasa kawat kemudian di ekstraksi dengan pelarut xylene menggunakan sokhlet pada temperatur 150°C selama 24 jam. Selain itu dilakukan juga pengukuran tegangan putus (Tb) dan mulur putus (Eb) dengan menggunakan alat Strograph-Ri buatan Toyoseiki pada kondisi sesuai dengan standar ASTM 1721-91W.

Tahap pembuatan bahan ciut panas

Ada tiga tahapan pada pembuatan bahan ciut panas

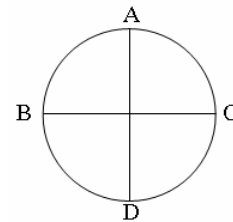
a. Tahap ekstruksi Pembuatan tube

Kompon LDPE yang telah jadi kemudian

dibuat kelongsong kabel (tube), yang dilakukan dengan peralatan yang ada di PT Kabelindo Murni, Jakarta, sehingga diperoleh kelongsongan kabel dengan ukuran diameter luar 20 mm, dengan ketebalan film 3 mm. Ekstruksi dilakukan pada temperatur 135°C, kemudian di celupkan kedalam air dengan teknik pendinginan cepat (*quenching technique*).

b. Tahap iradiasi (pengikatan silang LDPE)

Tube (kelongsong) kabel hasil ekstruksi dipotong potong sepanjang 2 m, iradiasi dilakukan dengan berkas elektron dari mesin berkas elektron GJ-2, pada energi 2 MeV dan kuat arus 10 mA. Dosis iradiasi masing-masing titik 50 kGy, dilakukan pada 4 titik permukaan.



Laju dosis pada posisi iradiasi di ukur dengan dosimeter *Cellulosa Tri Acetate*.

c. Tahap Ekspansi (pengembangan)

Tahap ekspansi menggunakan peralatan yang ada di PT Kabelindo Murni, Jakarta, ekspansi dilakukan dengan pemanasan dan uap panas, sehingga kelongsong (tube) mengembang sesuai dengan derajat pengembangan dari bahan yang digunakan.

Tabel 1. Komposisi bahan kimia formula 1 dan formula 2 buat kompon solasi kabel

No	Formula	Komposisi (%)				
		Ldpe	Irganox 1076	Carbon black	Flame retardant	Butyl rubber
1	Kontrol	100	-	-	-	-
2	Formula 1	90	1,0	8,0	1,0	-
3	Formula 2	80	1,0	8,0	1,0	10

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat kompon XLDE

LDPE bila telah diiradiasi akan terbentuk ikatan silang dengan struktur jaringan tiga dimensi. Sehingga akan mempunyai sifat kelarutan yang sangat rendah dalam pelarut organik, sedangkan LDPE yang tidak berikatan silang larut dengan baik. Fraksi ikatan silang yang tidak larut disebut sebagai fraksi padatan. Prosen fraksi padatan hasil iradiasi merupakan ukuran indikasi terbentuknya ikatan silang dalam molekul polimer. Pada umumnya apabila ikatan silang dalam polimer tinggi, berarti bertambah besar prosentase padatan yang tidak larut akibat ekstraksi.

Table 2. Fraksi padatan kompon setelah irradiasi dengan EBM

No	Formula	Fraksi Padatan (%)
1	Kontrol	55
2	Formula 1	58
3	Formula 2	63
Tanpa iradiasi fraksi padatan LDPE : 0 %		

Pada Tabel 2, diperlihatkan hubungan antara prosentase padatan dengan berbagai formulasi setelah di iradiasi. Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa prosentase fraksi padatan untuk kompon LDPE formula 1 dan 2 tanpa penambahan *butyl rubber* pada berbagai dosis iradiasi menunjukkan nilai fraksi padatan yang masih rendah nilainya masih dibawah 60 %, akan tetapi dengan penambahan *butyl rubber* pada formulasi 2 terlihat adanya kenaikan nilai fraksi padatannya.

Mutu bahan polimer umumnya didasarkan pada responnya terhadap gaya eksternal dan pengukuran nilai tegangan putus serta mulur putus polimer adalah dasar untuk studi tentang sifat mekanik. Hasil pengukuran dari kompon LDPE, formulasi 1 dan formulasi 2 ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai tegangan putus (Tb) dan perpanjangan putus Kompon setelah iradiasi

No	Formula	Tegangan putus (kg/cm ²)	Perpanjangan putus (%)
1	Kontrol	140	450
2	Formula 1	185	375
3	Formula 2	190	360
LDPE tanpa radiasi		Tb = 133	Eb = 680
Standar ASTM D2655-83			
Untuk bahan isolasi kabel			

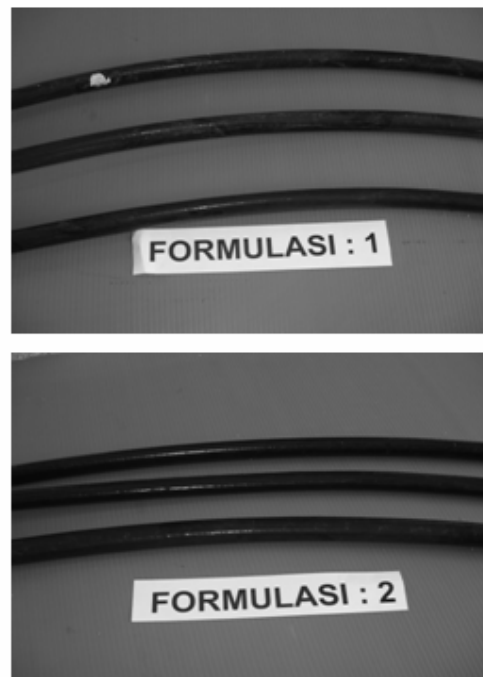
Dari Tabel di atas dapat dilihat bahwa pada formulasi 1 dan 2 menunjukkan tegangan putus yang lebih baik dibandingkan kontrol. Hal ini sesuai dengan fenomena bertambahnya tingginya kadar ikatan silang akan mengakibatkan nilai tegangan putus lebih baik. Sedangkan nilai perpanjangan putus sebaliknya pada formulasi 1 dan 2 lebih rendah dibandingkan kontrol. Hal ini disebabkan karena sifat kekerasannya meningkat akibat meningkatnya nilai fraksi padatannya. Nilai tegangan putus dan perpanjangan putus LDPE yang di iradiasi memenuhi standar untuk bahan isolasi tegangan tinggi (ASTM D2655-83).

Ekstruksi

Kompon LDPE formula 1 dan 2 dapat diekstruksi dengan memberikan penampilan yang baik dan menghasilkan tube (kelongsong) sesuai ukuran peralatan yang digunakan.

Tabel 4. Ukuran tube yang dihasilkan dengan menggunakan setting tube 20 mm.

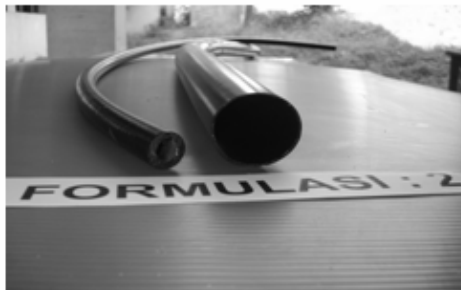
No	Formula	Diameter dalam (mm)	Diameter luar (mm)
1	Formula 1	16,9	19,1 mm
2	Formula 2	17,0	19,5 mm



Gambar 1. Hasil ekstruksi tube (kelongsong kabel) formula 1 dan 2

Tabel 5. Ukuran tube yang dihasilkan setelah ekspansi.

No	Formula	Diameter luar (mm)		Ketebalan (mm)	
		Sebelum ekspansi (mm)	Sesudah ekspansi (mm)	Sebelum ekspansi (mm)	Sesudah ekspansi (mm)
1	Formula 1	19,2	38,3	3,0	1,2
2	Formula 2	19,2	38,5	3,1	1,1



Gambar 2. Tube formula 1 dan 2 sebelum dan sesudah ekspansi

Ekspansi.

Kelongsong kabel yang telah di irradiasi kemudian di tiup menggunakan uap panas pada temperatur 150°C dan tekanan tinggi, hasilnya menunjukkan pengembangan yang merata dan tidak ditemukan kebocoran atau pecah

Diameter luar dan ketebalan tube sebelum dan sesudah ekspansi ditunjukkan pada Tabel 5, dapat dilihat baik formula 1 dan 2 setelah ekspansi diameter mengembang dengan ukuran yang hampir sama mendekati nilai 2 kali diameter sebelum ekspansi. Gambar kelongsong kabel formula 1 dan 2 sebelum dan sesudah ekspansi ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan selongsong yang telah di ekspansi dapat mengembang secara merata, hal ini menunjukkan pengikatan silangnya merata. Oleh karena itu hal yang sangat penting dalam pembuatan bahan ciut panas dosis yang diserap harus homogen. Dalam aplikasinya menggunakan konveyor kabel haruslah setiap titik dari selongsong kabel menerima dosis yang sama.

KESIMPULAN

1. Dari hasil percobaan menunjukkan bahwa kompon formula 1 dan formula 2 yang dikembangkan di PATIR-BATAN dapat digunakan untuk pembuatan bahan ciut panas dalam skala Industri.
2. Formula 2 menghasilkan sifat kelongsong kabel dengan nilai pengikatan silang dan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan formula 1.
3. Untuk pembuatan bahan ciut panas agar pengikatan silang merata haruslah dosis yang diterima homogen agar proses ekspansi pengembangannya merata di setiap titik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] CHAPIRO, A., Radiation Chemistry of Polymeric System, New York , Willey-Interscience. (1962).
- [2] SPINKS J.W, and WOODS R.J., Principles of Radiation Chemistry, Edward Arnold, Ltd., London, (1970).
- [3] BRANDRUP J., and IMMERGUT E.H., Polymer Handbook , New York : Willey-Interscience (1975).
- [4] YAMAMOTO, S., Crosslinking of wire and cable with electron beam, Proceeding of the Workshop on the Utilization of Electron Beam, Japan Atomic Energy Research Institute (Nov. 1990)
- [5] NIKLAUS STUDER, Radiation Crosslinking of Polymer in the Wire and Cable Industry, Beta Gamma No 1 (1988), 14 – 17.
- [6] GATOT TRIMULYADI R.,, ANIK SUNARNI, ISNI MARLIYANTI dan MIRZAN T RAZZAK. Perbandingan hasil pengikatan silang iradiasi LDPE dan PVC dengan berbagai energi berkas elektron. Prosiding Simposium Nasional Polimer, Himpunan Polimer Indonesia. 1995, 83-86.
- [7] GATOT TRIMULYADI., ANIK SUNARNI., ISNI MARLIANTI., MIRZAN T.RAZZAK Karakterisasi kompon polietilen densitas rendah iradiasi sebagai bahan isolasi kabel,. Prosiding Seminar Nasional II ,Kimia dalam pembangunan, JASA-KIAI. ISSN : 0854-4778, , Yogyakarta, 1998.

TANYA JAWAB

Sri Rinanti Susilowati

- *Bagaimana tekniknya agar pada proses irradiasi bahan setelah ekstraksi dosis iradiasi terdistribusi dengan merata agar tidak terjadi pelepasan*

Gatot Tri Mulyono Rekso

- Agar dosis iradiasi yang diterima isolasi kabel merata, disain konveyornya harus benar agar tiap titik dapat dosis yang tetap bila diiradiasi dengan MBE
- Penentuan dosis radiasi homogen dapat dibaca dari dosimeter CTA yang dililitkan pada kabel

- Untuk bahan *heat shrink cable* sebaiknya dibuat pita atau kelongsong kabel ukuran kecil, ini lebih mudah dalam proses iradiasi

Mudjijana

- *Apakah ada perubahan volume PE pada saat di iradiasi atau pemanasan kembali*

Gatot Tri Mulyono Rekso

- Tidak ada perubahan volume PE pada saat proses iradiasi, iradiasi hanya mengakibatkan terjadinya ikatan silang dan setelah dipanaskan 1 kali akan mengembang titik kristalin hilang yang tinggal hanya ikatan silang, setelah dipanaskan kedua kali titik kristalin muncul lagi jadi kembali ke ukuran semula

KAJIAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DARI INDUSTRI KULIT MENGGUNAKAN IRADIASI BERKAS ELEKTRON

Herry Poernomo

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb Yogyakarta 55281

Tel. (0274) 484436, Fax. (0274) 487824, E-mail : herry_poernomo05@yahoo.co.id

Cahya Widiyati

Akademi Teknologi Kulit – Departemen Perindustrian

ABSTRAK

Telah dilakukan kajian pengolahan limbah cair dari industri penyamakan kulit menggunakan iradiasi berkas elektron. Tujuan kajian ini adalah untuk mendapatkan metoda detoksifikasi dan desinfeksi limbah cair dari industri penyamakan kulit menggunakan iradiasi berkas elektron. Proses detoksifikasi dan desinfeksi dilakukan dengan menembakkan berkas elektron ke dalam limbah cair yang mengandung Cr^{3+} atau Cr^{6+} toksik dan kemungkinan bakteri patogen. Hasil kajian menunjukkan bahwa mesin berkas elektron dapat mendetoksifikasi Cr^{3+} dan Cr^{6+} menjadi Cr^0 yang tidak toksik, H_2S menjadi SO_2 yang kemudian bereaksi dengan H_2O , O_2 , dan NH_3 hasil degradasi senyawa organik dalam limbah cair oleh berkas elektron menjadi $(NH_4)_2SO_4$ yang tidak toksik, mereduksi COD, dan dapat mendesinfeksi bakteri patogen dalam limbah cair industri penyamakan kulit.

Kata kunci : detoksifikasi, desinfeksi, limbah penyamakan kulit, berkas elektron

ABSTRACT

Study of liquid waste treatment from leather tannery industry using electron beam irradiation has been arranged. The objective of this study is to obtain the detoxic and disinfection method of liquid waste from leather tannery industry using electron beam irradiation. The detoxification and disinfection processes was carried out by bombarding of electron beam into liquid waste consist of Cr^{3+} or Cr^{6+} toxic, H_2S toxic, and pathogen bacterium possibility. Result of study indicate that the electron beam machine can detoxic Cr^{3+} or Cr^{6+} to Cr^0 non toxic, H_2S to SO_2 and then reacting with H_2O , O_2 , and NH_3 as the degradation result of organic compound in the liquid waste to $(NH_4)_2SO_4$ non toxic, reducing of COD, and disinfecting pathogen bacterium in the liquid waste of tannery industry.

Keywords : detoxification, disinfection, leather tannery waste, electron beam

PENDAHULUAN

Industri penyamakan kulit di Indonesia merupakan salah satu industri yang menghasilkan devisa non migas bagi negara.

Memproyeksikan pertumbuhan industri penyamakan kulit ke depan, maka diprediksi bahwa jumlah produksi dan perusahaan penyamakan kulit akan terus bertambah seiring dengan pertumbuhan ekonomi nasional dan global serta bertambahnya populasi penduduk Indonesia. Sejalan dengan kebijaksanaan pemerintah untuk melaksanakan pembangunan industri yang berwawasan lingkungan, maka pengembangan industri harus selalu dikaitkan dengan usaha-usaha nyata dalam menjaga kelestarian lingkungan. Peningkatan jumlah beban limbah cair dari industri penyamakan kulit disamping karena peningkatan kapasitas produksi juga disebabkan terjadinya transformasi

dari penyamakan nabati menjadi penyamakan krom sebesar 85% dari seluruh proses penyamakan kulit nasional. Hal ini menyebabkan dampak beban pencemaran terhadap lingkungan akan semakin tinggi^[1].

Proses pembersihan limbah cair dari industri penyamakan kulit secara konvensional dengan tahapan seperti segregasi, ekualisasi, flokulasi-koagulasi, dan biokimia kurang memberikan hasil yang memadai untuk membunuh bakteri patogen dan terutama tidak efektif untuk merusak telur-telur bakteri patogen. Hasil akhir dari proses pembersihan limbah cair dari industri penyamakan kulit adalah beningan (efluen) yang biasanya dibuang di badan sungai. Apabila proses pembersihan tersebut kurang baik, maka beberapa polutan kimia toksik dan bakteri patogen yang

terkandung dalam efluen akan mencemari badan sungai.

Dispersi polutan kimia toksis dan infeksi bakteri patogen pada limbah cair dari industri penyamakan kulit seringkali mencemari lingkungan. Untuk mereduksi dispersi polutan kimia toksis dan infeksi bakteri patogen dalam limbah cair tersebut, maka salah satu metode yang diperkirakan cukup aman, efektif, efisien, dan dapat dilakukan secara simultan dalam waktu yang sangat singkat adalah dengan menggunakan teknologi iradiasi berkas elektron. Efluen limbah cair pasca iradiasi diharapkan memenuhi syarat sebagai *make-up* air proses untuk proses pengerjaan basah (*beam house process*) pada proses penyamakan kulit atau dapat didispersi ke sungai sebagai air untuk pengairan pertanian.

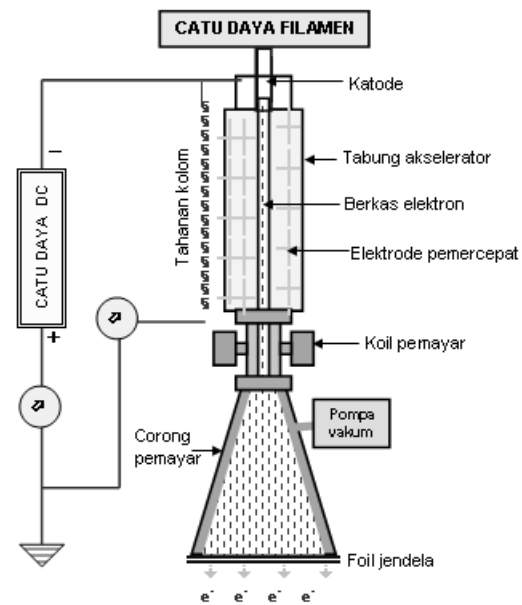
Berkas Elektron

Berkas elektron dihasilkan oleh sumber elektron dari Mesin Berkas Elektron (MBE) secara emisi termoionik pada filamen yang dipanaskan. Energi berkas elektron yang keluar dari sumber elektron dinaikkan hingga mencapai energi yang diinginkan dengan dilewatkan melalui tabung pemercepat dengan cara memasang tegangan listrik pada elektrode-elektrode tabung pemercepat. Berkas elektron setelah keluar dari tabung pemercepat discan menggunakan sistem pemayar (*scanning system*) pada corong pemayar (*scanning horn*) agar berkas elektron dapat mengenai seluruh permukaan bahan yang diiradiasi. Bahan yang akan diiradiasi dilewatkan di bawah jendela MBE menggunakan beberapa sistem antara lain sistem ban berjalan (*belt conveyor*), sistem aerosol, sistem pengadukan, dan sistem yang lain. Untuk menjaga keselamatan terhadap pekerja, maka pengoperasian MBE dilakukan dengan bantuan sistem instrumentasi dan kendali. Mesin berkas elektron yang pertama kali selesai dirancang-bangun di Indonesia adalah MBE energi rendah 0,35 MeV/5 mA yang saat ini ada di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) – BATAN, Yogyakarta.

Mesin berkas elektron adalah mesin yang menghasilkan berkas elektron dipercepat. Komponen utama MBE umumnya berupa sumber elektron, tabung pemercepat, generator tegangan tinggi, sistem pemayar dan vakum seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [2, 3].

TEORI

Menurut *Committee on Treatment of Tannery Effluents* (1979) dalam Anonim [1], adanya sisa daging dan lemak dalam limbah cair, maka



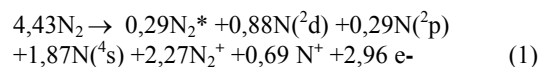
Gambar 1. Skema rangkaian peralatan MBE [2, 3]

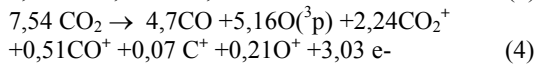
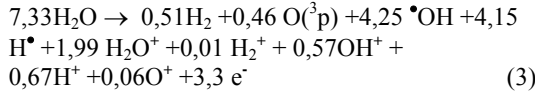
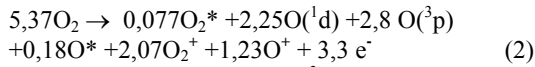
kemungkinan terdapat bakteri patogen dan bahkan bakteri anthrax dalam limbah cair. Sedangkan adanya senyawa nutrisi seperti lemak, sisa daging, karbohidrat, dan protein dalam limbah cair, maka menimbulkan gas seperti CO₂, NH₃, dan H₂S toksik dengan bau seperti telur busuk yang terjadi dari proses peruraian asam amino dalam senyawa nutrisi oleh aktivitas mikroorganisme.

Limbah cair yang langsung dibuang ke perairan tanpa pengolahan terlebih dahulu dapat menyebabkan penurunan kualitas air sungai dengan mekanisme pertumbuhan mikroorganisme yang berlimpah. Meningkatnya jumlah mikroorganisme dapat menyebabkan berkurangnya nilai oksigen terlarut atau *disolved oxygen* (DO), karena sebagian besar oksigen dipakai untuk respirasi mikroorganisme tersebut. Dengan menurunnya DO maka akan mempengaruhi kehidupan ikan dan biota air lainnya. Selain itu, buangan limbah cair ke perairan juga dapat menimbulkan bau seperti telur busuk dari gas H₂S [1, 4].

Radiolisis gas dalam udara oleh berkas elektron

Apabila udara dengan spesies reaktif utama seperti gas nitrogen (N₂), oksigen (O₂), karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O) terionisasi oleh berkas elektron pada energi terserap 100 eV atau 1,60 x 10⁻¹⁷ J, maka akan terjadi radiolisis membentuk beberapa ion, radikal bebas, dan molekul tereksitasi dengan reaksi sebagai berikut [5] :





Beberapa molekul yang teroksidasi bereaksi secara cepat dengan molekul-molekul latar dengan menghasilkan disosiasi tambahan, antara lain atom oksigen $\text{O}(\text{d})$ bereaksi cepat dengan molekul uap air H_2O membentuk tambahan radikal OH^* .

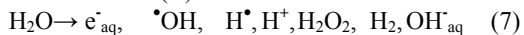
Radiolisis Kandungan Air dalam Limbah Cair

Ionisasi air oleh berkas elektron sekarang ini sudah diketahui secara jelas seperti ditunjukkan pada reaksi (3). Dari reaksi (3), ion H_2O^+ bereaksi dengan elektron (e^-) membentuk elektron termal (e_{th}^-). Elektron termal bereaksi dengan molekul air membentuk elektron terhidrasi (e_{aq}^-) dengan reaksi sebagai berikut [6]:



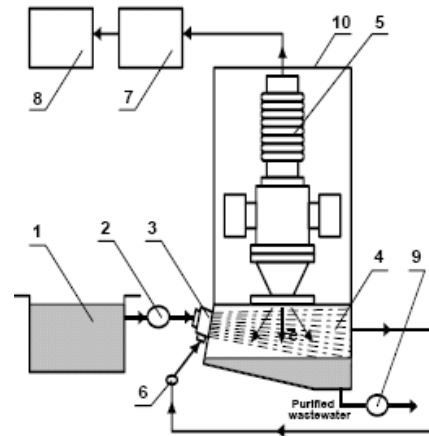
Apabila air terionisasi oleh elektron (e^-), maka energi penganan diserap oleh air membentuk radikal OH^* , elektron terhidrasi (e_{aq}^-) dan atom H^* sebagai radikal bebas yang reaktif dan bersifat sebagai reduktor kuat, serta H_2O_2 dan H_2 yang terbentuk karena reaksi cepat. Reaksi gross pada radiolisis air oleh berkas elektron dan nilai G (jumlah molekul yang ditukar per 100 eV energi terserap) pada pH 7 disajikan sebagai berikut [6, 7, 8]:

berkas (e^-)



Nilai G ($\mu\text{mol}/\text{J}$) pada pH 7 : (2,7) (0,6)(2,8) (0,45) (0,7) (3,2) (0,5)

Beberapa oksidator yang berupa radikal bebas antara lain OH^* mempunyai potensial oksidasi elektrokimia (E_0) = 2,8 V, $E_0\text{O}^* = 2,42$ V, $E_0\text{H}_2\text{O}_2 = 1,78$ V, dan $E_0\text{HO}_2^* = 1,70$ V. Oksidator yang bukan radikal bebas antara lain fluorin dengan $E_0 = 3,06$ V, $E_0\text{O}_3 = 2,08$ V, $E_0\text{KMnO}_4 = 1,67$ V, E_0 hipoklorit = 1,49 V, $E_0\text{Cl}_2 = 1,36$ V, E_0 klorin dioksida = 1,27 V, dan $E_0\text{O}_2$ dalam udara = 1,23 V. Dilihat dari urutan nilai potensial oksidasi elektrokimia, maka radikal bebas yang termasuk oksidator kuat adalah OH^* , O^* , H_2O_2 , dan HO_2^* [9, 10].



Keterangan :

1. Penampung umpan limbah cair
2. Pompa
3. Penyemprot
4. Ruang iradiasi
5. Akselerator elektron
6. Turboblower
7. Catu daya
8. Meja kontrol
9. Pompa
10. Shielding

Gambar 2 Skema pilot plant pengolahan air limbah dengan berkas elektron sistem aerosol [11]

PEMBAHASAN

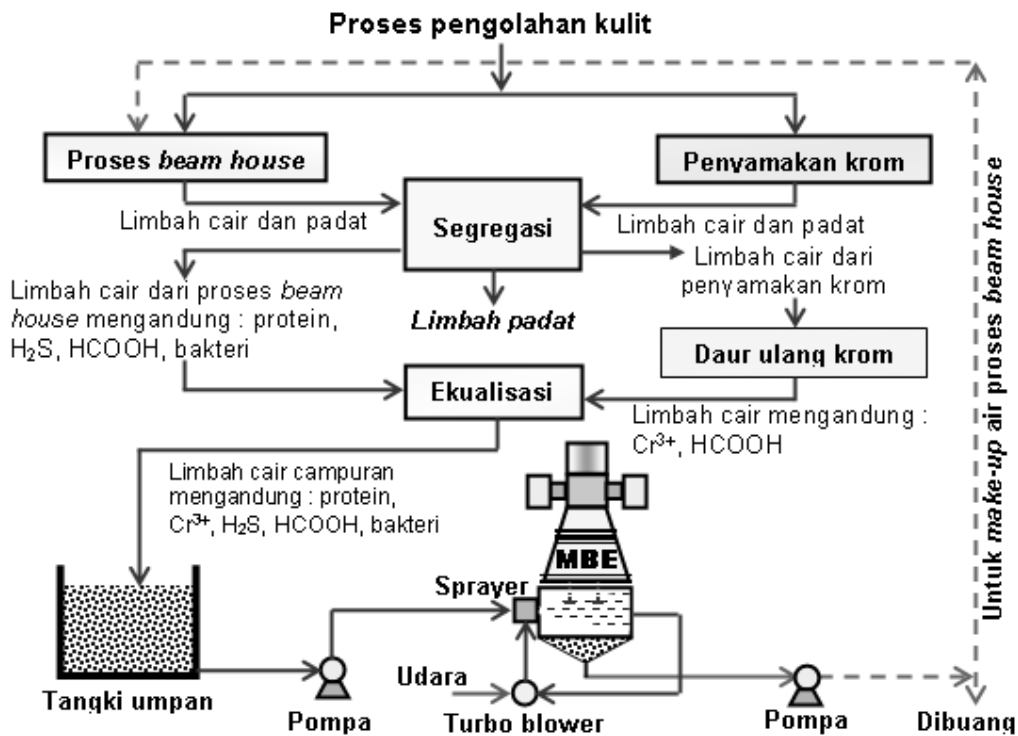
Detoksifikasi Polutan B3 dalam Air Limbah dengan Berkas Elektron

Penelitian yang telah dilakukan oleh Pikaev (1997) [11] dari *Institute of Physical Chemistry of the Russian Academy of Sciences* mendapatkan hasil bahwa berkas elektron dengan energi 0,3 MeV dan daya maksimum 15 kW dapat mendetoksifikasi polutan kimia (Cd^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{6+}), mereduksi COD dan BOD), dan membunuh mikroba patogen yang terdapat dalam *municipal wastewater*. Penelitian dilakukan dengan cara sistem aliran aerosol air limbah dalam ruangan iradiasi yang dikenai berkas elektron seperti pada Gambar 2 [11, 12].

Berkas elektron yang dihasilkan oleh akselerator elektron dengan energi 0,3 MeV tersebut cukup efektif mereduksi polutan kimia dan membunuh bakteri yang terdapat dalam *municipal wastewater* seperti ditunjukkan pada Tabel 1 [11, 12].

Tabel 1. Polutan dalam *municipal wastewater* yang tereduksi oleh berkas elektron.

Parameter	Sebelum Iradiasi	Dosis, kGy	Setelah Iradiasi
Warna (unit)	160	1,3	20
Transparansi (cm)	1,3	1,3	20
TSS (mg/L)	156	1,3	5
Bau (force)	4,5	1,4	0
COD (mg/L)	412	2,5 – 4,6	4 - 12
BOD ₅ (mg/L)	18 - 24	0,8 – 1,3	7,9 – 9,2
Sulfat (mg/L)	283	0,8 – 1,3	160
Phospat (mg/L)	8,8	0,8 – 1,3	4,3
Chlorit (mg/L)	48	0,8 – 1,3	23
Total jumlah mikroba (sel/cm ³)	10 ⁵	1,3	< 1

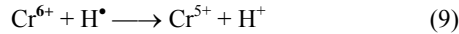
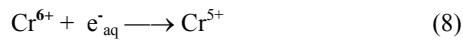


Gambar 3. Konsep pengolahan limbah cair penyamakan kulit dengan MBE

Pengolahan Limbah Cair dari Industri Penyamakan Kulit Menggunakan MBE

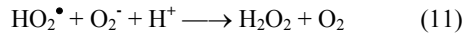
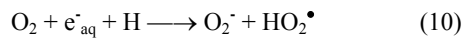
Dengan mengadopsi penelitian yang telah dilakukan oleh Pikaev dengan sistem aliran aerosol seperti Gambar 2, maka proses detoksifikasi dan desinfeksi limbah cair dari industri penyamakan kulit dapat dilakukan dengan cara seperti pada Gambar 3.

Limbah cair disemprotkan ke dalam ruangan iradiasi (*irradiation chamber*) dengan sistem aliran aerosol, kemudian diiradiasi dengan berkas elektron. Partikel aerosol limbah cair mengandung kation toksis akan terkena elektron sehingga terjadi reaksi antara ion-ion dengan elektron terhidrasi (e^-_{aq}) dan atom H^\bullet yang terbentuk dari radiolisis air. Contoh reduksi Cr^{6+} toksis menjadi krom netral (Cr^0) tidak toksis dijelaskan dengan reaksi sebagai berikut ^[11, 13, 14]

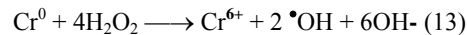


Ion Cr^{5+} adalah ion yang tidak stabil dan selanjutnya tereduksi oleh e_{aq}^- dan H^\bullet menjadi Cr^{3+} yang stabil. Demikian seterusnya akhirnya Cr^{3+} tereduksi oleh e_{aq}^- dan H^\bullet menjadi Cr^0 netral yang lebih stabil dari pengaruh oksidator alam lemah seperti oksigen (O_2).

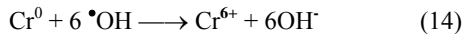
Jika air limbah dijenuhkan dengan udara, maka oksigen (O_2) yang terkandung dalam udara bereaksi dengan e_{aq}^- dan H^\bullet membentuk molekul radikal O_2^- dan HO_2^\bullet . Selanjutnya molekul radikal O_2^- dan HO_2^\bullet pelan-pelan bereaksi dengan H^+ membentuk hidrogen peroksida. Kemudian HO_2^\bullet dan H^+ juga mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{6+} dan hidrogen peroksida. Keseluruhan reaksi tersebut ditunjukkan sebagai berikut ^[11]:



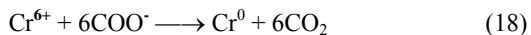
Hidrogen peroksida yang terbentuk dari reaksi (7), (11) dan (12) juga mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{6+} dengan reaksi sebagai berikut ^[11]



Radikal hidroksil yang terbentuk dari reaksi (7) dan (13) akan mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{6+} dengan reaksi sebagai berikut ^[4]



Untuk mencegah pengaruh negatif radikal bebas $\bullet\text{OH}$, HO_2^\bullet , dan H_2O_2 dimungkinkan dengan menggunakan *scavenger* ion formiat yang dapat mengkonversi radikal bebas ke dalam reaksi reduksi ^[14]. Radikal bebas H_2O_2 , $\bullet\text{OH}$, HO_2^\bullet dengan ion formiat masing-masing akan membentuk radikal ion COO^- yang dapat mereduksi Cr^{6+} menjadi logam netral Cr^0 dengan reaksi sebagai berikut ^[11]:



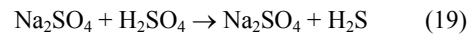
Berdasarkan reaksi tersebut di atas, maka untuk proses detoksifikasi Cr^{6+} dalam limbah cair penyamakan kulit dengan berkas elektron, maka ke dalam limbah cair perlu ditambahkan asam formiat sebagai *scavenger* untuk menjaga agar proses reduksi Cr^{3+} dan Cr^{6+} toksik oleh radikal bebas e_{aq}^- dan H^\bullet menjadi logam netral Cr^0 tidak toksik yang tetap stabil.

Keberadaan asam formiat (HCOOH) dalam campuran limbah cair pada bak ekualisasi dari industri penyamakan kulit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 justru memberikan keuntungan tersendiri, yaitu dapat mengurangi pemakaian asam formiat yang akan digunakan untuk mencegah pengaruh negatif radikal bebas $\bullet\text{OH}$, HO_2^\bullet , dan H_2O_2 yang dapat mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{3+} dan Cr^{6+} kembali.

Karena radikal O_2^- dan HO_2^\bullet yang ada di udara akan mereoksidasi ion-ion yang sudah tereduksi dengan elektron terhidrasi (e_{aq}^-), maka udara dapat dihilangkan dari air (sebagai contoh dengan gelembung gas inert) sebelum atau selama iradiasi berkas elektron terhadap limbah cair sedang berlangsung ^[11,12].

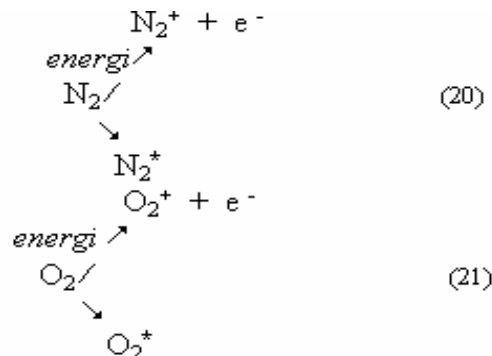
Detoksifikasi gas H_2S dalam Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit

Limbah cair dari proses produksi penyamakan kulit yang berasal dari proses pengerjaan basah (*beam house*) mengandung H_2S dari tahap proses pembuangan kapur (*deliming*), sisa H_2SO_4 dan sisa HCOOH dari tahap proses pembuangan kapur dan pengasaman (*pickling*). Terbentuknya gas H_2S yang bersifat toksik pada limbah cair industri penyamakan kulit antara lain berasal dari reaksi antara sisa Na_2SO_4 dari proses pengapuran dengan sisa H_2SO_4 ^[1]



Detoksifikasi gas H_2S dalam limbah cair industri penyamakan kulit oleh berkas elektron dapat mengadopsi dari mekanisme reaksi yang dikemukakan oleh Chmielewski (2005) dengan tahapan reaksi sebagai berikut ^[15]:

1. Transmisi energi O_2 dan N_2 dalam udara ($t_{\text{reaksi}} < 10^{-15}$ detik):

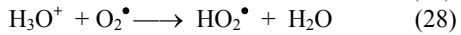
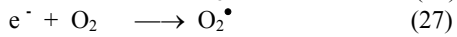
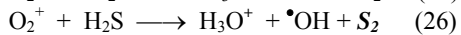
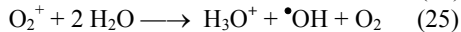
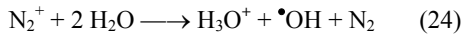


2. Dissosiasi molekuler ($10^{-15} < t_{\text{reaksi}} < 10^{-10}$ detik):

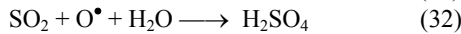
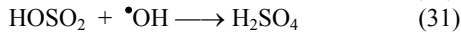
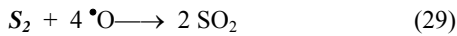




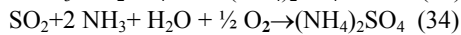
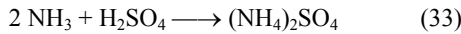
3. Reaksi ionik ($10^{-10} < t_{\text{reaksi}} < 10^{-5}$ detik) :



4. Reaksi radikal bebas ($10^{-5} < t_{\text{reaksi}} < 10^0$ detik) :



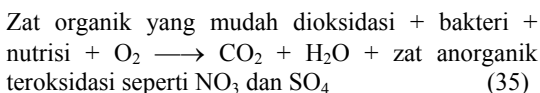
5. Reaksi penetralan ($10^{-5} < t_{\text{reaksi}} < 10^0$ detik) ^[5, 12, 15, 17] :



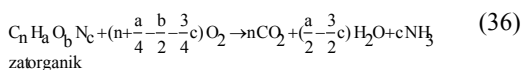
Dari reaksi di atas, maka hasil akhir detoksifikasi gas H₂S dalam limbah cair dari industri penyamakan kulit oleh berkas elektron adalah terbentuknya amonium sulfat : (NH₄)₂SO₄ non toksik yang terlarut dalam limbah cair pasca iradiasi.

Penurunan COD dalam Limbah Cair Menggunakan Berkas Elektron

Setiap bahan yang mudah dioksidasi yang ada dalam air limbah industri akan dioksidasi oleh biokimia (bakteri) atau proses kimia sehingga kandungan oksigen dalam air akan berkurang. Uji COD biasanya digunakan untuk mengukur banyaknya senyawa organik secara langsung dalam air. Dengan demikian angka COD merupakan ukuran pencemaran air oleh zat organik yang secara alamiah dapat dioksidasi dengan proses biokimia sehingga O₂ terlarut dalam air berkurang. Oksidasi zat organik melalui proses mikrobiologi pada dasarnya dapat dijelaskan dengan reaksi oksidasi biokimia yang bisa ditulis sebagai berikut ^[18] :



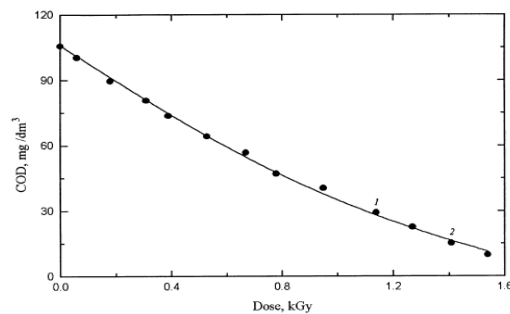
Banyaknya O₂ yang diperlukan untuk mengoksidasi zat organik dalam air dapat ditulis sebagai berikut ^[18] :



Dari reaksi (35) terlihat bahwa zat organik bermolekul besar dengan rantai hidrokarbon (C_nH_a)

yang panjang atau jumlah zat organik yang banyak diperlukan oksigen yang semakin banyak untuk proses oksidasi zat organik melalui proses biokimia. Dengan demikian apabila semakin besar kandungan zat organik dalam air limbah, maka oksigen terlarut dalam air limbah semakin berkurang.

Iradiasi berkas elektron pada air limbah dengan sistem aerasi dapat menurunkan COD. Hal ini disebabkan karena semakin banyak senyawa organik (C_nH_aO_bN_c) yang terdekomposisi oleh tambahan O₂ dari sistem aerasi. Disamping itu iradiasi berkas elektron terhadap air limbah dengan sistem aerasi menghasilkan molekul oksigen (O₂^{*}) dari radiolisis O₂ dalam udara seperti ditunjukkan dalam persamaan reaksi (2). Selanjutnya pada reaksi (23) molekul O₂^{*} akan terdisosiasi menjadi dua radikal bebas oksigen (2O[•]) yang lebih reaktif daripada O₂ dalam udara. Dengan demikian dekomposisi senyawa organik dalam air limbah akan dipercepat dan diperbanyak oleh peran radikal bebas O[•]. Semakin besar dekomposisi senyawa organik dalam air limbah oleh O₂ dalam udara dari sistem aerasi dan oleh O[•] dari iradiasi O₂ dalam udara oleh berkas elektron menyebabkan kadar senyawa organik dalam air limbah menjadi berkurang karena terdekomposisi menjadi H₂O, gas NH₃ dan CO₂. Hal inilah yang menjadikan terjadinya penurunan nilai COD dalam air limbah oleh iradiasi berkas elektron seperti pada Tabel 1 ^[4, 11]. Pengaruh dosis radiasi terserap terhadap penurunan COD dalam *municipal wastewater* seperti ditunjukkan pada Gambar 4 ^[12].

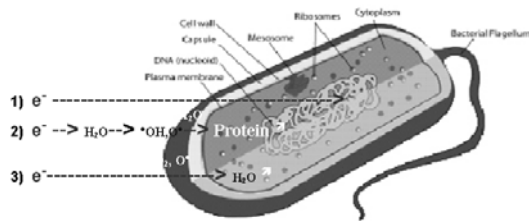


Gambar 4. Pengaruh dosis radiasi terserap terhadap penurunan nilai COD dalam air limbah selokan kota menggunakan berkas elektron ^[12]

Desinfeksi Mikroba (Bakteri)

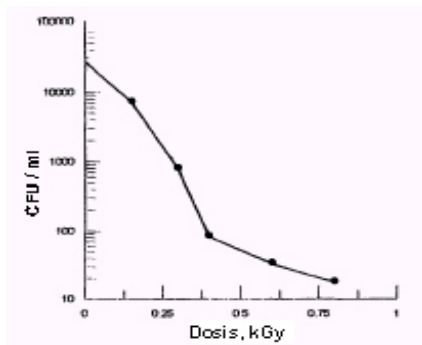
Radiasi pengion berinteraksi dengan bakteri dalam dua cara, yaitu secara langsung dan tidak langsung. Pada interaksi secara langsung, maka radiasi pengion (e⁻) berinteraksi dengan molekul kritis sel seperti deoksiribo nukleat acid (DNA) dan

protein yang ada dalam tubuh bakteri yang menyebabkan sel mikroba mati. Sedangkan interaksi secara tidak langsung, maka radiolisis air oleh berkas elektron yang menghasilkan radikal bebas yang sangat reaktif yang kemudian bereaksi dengan molekul air dan protein dalam sel bakteri sampai terjadi sel mikroba mati [19]. Efek letal radiasi berkas elektron menyebabkan kerusakan sel pada mikroorganism yang disebabkan oleh energi deposisi pada komponen kritis sel yang disebut DNA yang membawa informasi genetik sel dan membran sel dimana DNA menempel. Mikroba yang sensitif terhadap radiasi tidak dapat memperbaiki kerusakan *double strand break* yang menyebabkan mikroba mati. Disamping itu radikal bebas $\cdot\text{OH}$, H_2O_2 , O^\bullet yang terbentuk dari radiolisis air oleh berkas elektron akan mendegradasi protein dalam sel menjadi CO_2 , NH_3 , dan H_2O , maka protein sebagai nutrisi bagi kelangsungan hidup sel akan habis sehingga selnya mati [20]. Mekanisme sel bakteri mati ditunjukkan pada Gambar 5 [21]:

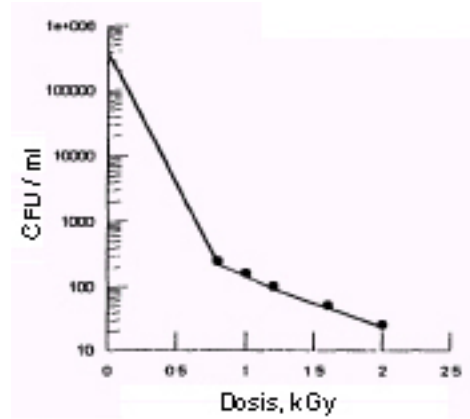


Gambar 5. Mekanisme kerusakan sel bakteri oleh berkas elektron [21]

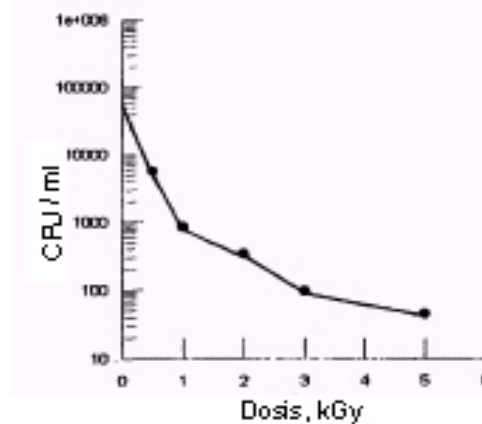
Dosis radiasi berpengaruh terhadap harapan hidup bakteri di dalam limbah. Sebagai contoh adalah pengaruh dosis radiasi terhadap unit pembentukan koloni bakteri dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) di dalam limbah cair effluen, limbah cair selokan, dan limbah lumpur adalah berbeda seperti yang ditunjukkan pada masing-masing Gambar 6 [22].



(a)



(b)



(c)

Gambar 6. Pengaruh dosis radiasi terhadap CFU bakteri coliform di dalam effluen limbah cair (a), air selokan perkotaan (b), limbah lumpur selokan (c) [22]

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Pikaev (1997, 2001) [11,12] dan Chmielewski (2004, 2005) [14,15,16], maka iradiasi berkas elektron pada limbah cair dari industri penyamakan kulit dapat dijelaskan dengan mekanisme sebagai berikut:

1. Unsur Cr^{6+} toksik dalam *municipal wastewater* direduksi oleh radikal bebas e^\bullet_{aq} dan H^\bullet menjadi Cr^0 tidak toksis [11, 12, 14],
2. Senyawa organik ($\text{C}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_c$) yang terlarut dalam *municipal wastewater* didekomposisi oleh oksidator radikal bebas O^\bullet menjadi H_2O , CO_2 dan NH_3 sehingga nilai COD menjadi turun seperti pada Tabel 1 dan Gambar 4 [11, 12, 18].

- Unsur H₂S toksik didegradasi oleh O₂ tereksitasi (O₂^{*}) menjadi SO₂ [15], selanjutnya SO₂ teroksidasi oleh 2 radikal bebas [•]OH menjadi H₂SO₄, atau SO₂ teroksidasi oleh radikal bebas O[•] yang terlarut dalam air menjadi H₂SO₄. Kemudian H₂SO₄ bereaksi dengan NH₃ dari hasil degradasi senyawa organik (C_nH_aO_bN_c) membentuk (NH₄)₂SO₄ [12, 15, 16, 17].
- Radikal bebas [•]OH, H₂O₂, O[•] mendesinfeksi bakteri patogen yang ada dalam *municipal wastewater* seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 6 [19, 20, 21].
- Senyawa organik seperti asam-asam amino dalam protein dapat didekomposisi oleh radikal bebas [•]OH dan O[•] menjadi beberapa rantai samping radikal aliphatic, kemudian akhir dari reaksi selanjutnya akan menghasilkan H₂O, CO₂ dan NH₃. Dengan demikian kadar senyawa organik menjadi berkurang yang ditandai dengan COD dalam *municipal wastewater* menjadi turun seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 4 [11, 12, 18].

Dari metoda penelitian reduksi polutan kimia dan biologi pada *municipal wastewater* dan pembersihan gas buang dengan MBE yang telah dilakukan oleh Pikaev (1997, 2001) [11,12] dan Chmielewski (2004, 2005) [14,15,16], maka dengan menggunakan metoda tersebut dimungkinkan dapat diadopsi untuk penelitian detoksifikasi Cr⁶⁺ dan H₂S, desinfeksi bakteri patogen, penurunan COD dan senyawa organik dalam limbah cair dari industri penyamakan kulit di Indonesia dengan menggunakan MBE pada energi 0,35 MeV/5 mA yang ada di PTAPB – BATAN, Yogyakarta.

KESIMPULAN

- Berkas elektron secara umum dapat mereduksi COD dan mendekomposisi senyawa protein dalam limbah cair penyamakan kulit menjadi H₂O, CO₂, dan NH₃, dapat mereduksi Cr⁶⁺ toksik menjadi Cr⁰ tidak toksik, mengkonversi H₂S toksik menjadi SO₂ yang kemudian bereaksi dengan H₂O, O₂, dan NH₃ menjadi (NH₄)₂SO₄ tidak toksis, dapat mendesinfeksi bakteri patogen.
- Kandungan HCOOH dalam limbah cair penyamakan kulit memberikan manfaat karena berfungsi sebagai *scavenger* yang dibutuhkan untuk mencegah teroksidasinya Cr⁰ netral tidak toksis oleh oksidator radikal bebas [•]OH, H₂O₂, dan HO₂[•] menjadi Cr⁶⁺ toksis kembali.
- Terbentuknya (NH₄)₂SO₄ dari detoksifikasi H₂S dalam limbah cair penyamakan kulit dengan

berkas elektron dapat memberikan keuntungan karena (NH₄)₂SO₄ diperlukan untuk pembuangan kapur (*deliming*) pada proses pengerjaan basah (*beam house process*).

- Pengolahan limbah cair dari industri penyamakan kulit dengan berkas elektron tidak menghasilkan limbah lumpur, sehingga akan mengurangi biaya pembuangan limbah lumpur ke *secure landfill* yang memenuhi syarat.
- Limbah cair industri penyamakan kulit yang telah diolah dengan berkas elektron dapat digunakan sebagai *make-up* air proses untuk proses pengerjaan basah pada proses produksi penyamakan kulit sehingga akan mengurangi biaya pengolahan air untuk kebutuhan air proses.
- Mesin berkas elektron yang ada di PTAPB – Batan Yogyakarta dengan energi 0,35 MeV / 5 mA dimungkinkan dapat digunakan untuk kegiatan litbang pengolahan limbah cair dari industri penyamakan kulit.

DAFTAR PUSTAKA

- ANONIM, Teknologi Pengendalian Dampak Lingkungan Industri Penyamakan Kulit, Buku Panduan, Bapedal, (1996).
- IRAWATI, Z., Teknologi dan Aplikasi Iradiasi Bahan Pangan Menggunakan Mesin Berkas Elektron dan Iradiator Gamma, Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Akselerator VIII, P3TM-Batan, Yogyakarta, (2005).
- DARSONO, Construction of Electron Beam Machine 350 keV/10 mA for Multipurpose Application of Thin Film at P3TM – BATAN, Proceedings of The FCNA 2003 Workshop on Application Electron Accelerator 18-22 August 2003, Kuala Lumpur, Malaysia, JAERI-Conf 2004-007, (2003).
- EIGER, ED., SMITH, BF., Environmental Science (A Study of Interrelation-ship), Mc Graw Hill, New York, (2002).
- CHMIELEWSKI, A.G., Electron Beam for Power Plant Flue Gas Treatment, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 3 – 29.
- GETOFF, N., Radiation Chemistry and the Environment, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12

- September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 121 – 131.
- [7] BEKBOLET, M., BALCIOGLU, I.A., GETOFF, N., Radiation Induced Decomposition of Chlorinated Benzaldehyde in Aqueous Solution, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 263 – 271.
- [8] HE, Y., WU, J., FANG, X., SONNTAG, C., Hydroxyl-Radical Induced Dechlorination of Pentachlorophenol in Water, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 273-280.
- [9] USEPA, Handbook on Advanced Oxidation Processes, EPA/625/R-98/004, (1998).
- [10] KDASI, A.A., IDRIS, A., SAED, K., GUAN, C.T., Treatment of Textile Wastewater by Advanced Oxidation Processes-A Review, *Global Nest : the Int. J.*, Vo. 6 No. 3, (2004), pp. 222 – 230.
- [11] PIKAEV, A.K., New Environmental Applications of Radiation Technology, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 243 – 254.
- [12] PIKAEV, A.K., PODZOROVA, E.A., BAKHTIN, O.M., LYSENKO, S.L., BELYSHEV, V.A., Electron Beam Technology for Purification of Municipal Wastewater in the Aerosol Flow, In : Use of Irradiation for Chemical and Microbial Decontamination of Water, Wastewater and Sludge, Final Report of a Co-ordinated Research Project, IAEA-Tecdoc-1225, (2001), pp. 45 – 55.
- [13] PIKAEV, A.K., KARTASHEVA, L.I., ZHESTKOVA, T.P., YURIK, T.K., CHULKOV, V.N., DIDENKO, O.A., KIM, D.K., KIM, Y., AND HAN, B., Removal of Heavy Metals from Water by Electron-Beam Treatment in the Presence of an Hydroxyl Radical Scavenger, *Mendeleviev Communications Electronic Version*, Issue 2, (1997), pp. 47 – 86
www.uonbi.ac.ke/acad_depts/chemistry/radiochemistry/heavymetals.pdf, 13 Juli 2006.
- [14] CHMIELEWSKI, A.G., Application of Ionizing Radiation to Environment Protection, In : Radiation Treatment of Gaseous and Liquid Effluents for Contaminant Removal, Proceedings of Technical Meeting Held in Sofia, Bulgaria, IAEA-Tecdoc-1473, (2004), pp. 11 – 24.
- [15] CHMIELEWSKI, A.G., TYMIŃSKI, B., PAWELEC, A., AND ZIMEK, Z., The Industrial Plant for Electron Beam Flue Gas Treatment – Experiences and Perspectives, Proceeding Second International Conference on Clean Coal Technologies for our Future. Instytut Chemii I Techniki Jadrowej, Dorodna 16, 03-195 Warszawa-Poland, (2005).
- [16] CHMIELEWSKI, A.G., Application of Ionizing Radiation to Environment Protection, Faculty of Process and Chemical Engineering, Warsaw University of Technology - Poland, *Nukleonika* 2005; 50 (Supplement 3):S17–S24, (2005).
- [17] DOUTSKINOV, N., Result of the Startup Operation of a Pilot Installation Electron Beam Flue Gas Treatment in the Maritsa East 2 Thermal Power Plant, In : Radiation Treatment of Gaseous and Liquid Effluents for Contaminant Removal, Proceedings of Technical Meeting Held in Sofia, Bulgaria, IAEA-Tecdoc-1473, (2004), pp. 35 – 43.
- [18] Chemical Oxygen Demand, http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_oxygen_demand, 13 Juli 2006.
- [19] SABHARWAL, S., SHAH, M.R., KUMAR, N., PATEL, J.B., Technical and Economic Aspects of Radiation Hygienization of Municipal Sewage Sludge Using Gamma Irradiation, In : Radiation Treatment of Gaseous and Liquid Effluents for Contaminant Removal, Proceedings of Technical Meeting Held in Sofia, Bulgaria, 7-10 September 2004, IAEA, Tecdoc-1473, (2004), pp. 111 – 118.
- [20] DARWIS, D., Aplikasi Mesin Berkas Elektron dalam Bidang Biomedical Polimer dan Farmasi, Diktat Materi Kuliah BATAN Accelerator School, P3TM – BATAN, (2004).
- [21] POERNOMO, H., WIDIYATI, C., Kajian Konversi Limbah Lumpur Penyamakan Kulit Menjadi Kompos Menggunakan Berkas Elektron, Prosiding Seminar Teknologi dan Aplikasi Akselerator IX, PTAPB – BATAN, Yogyakarta, (2006).
- [22] LAVALE, D.S., SHAH, M.R., RAWAT, K.P., GEORGE, J.R., Sewage Sludge Irradiators Batch and Continuous Flow, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, (1997), pp. 289 – 301.

PENGARUH IMPLANTASI ION AIN TERHADAP KEKERASAN DAN KEAUSAN BAHAN BANTALAN BOLA

Indreswari Suroso, Mudjjjana
Jurusan Teknik Mesin FT-UGM

Tjipto Sujitno
PTAPB-BATAN,

ABSTRAK

PENGARUH IMPLANTASI ION AIN TERHADAP KEKERASAN DAN KEAUSAN BAHAN BANTALAN BOLA. Bantalan bola merupakan salah satu komponen mesin yang sudah banyak digunakan. Bagian utama dari komponen ini adalah ring luar, ring dalam, dan bola. Gesekan selalu terjadi antara ring dan bola menyebabkan keausan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh implantasi ion AIN terhadap kekerasan dan keausan bahan ring dan bola pada bantalan bola. Pengujian kekerasan dan keausan dilakukan pada bahan ring bola dan bola sebelum dan setelah diimplantasi AIN. Proses implantasi ion AIN dilakukan pada energi tetap 100 keV dan waktu divariasi yaitu 60, 90, dan 120 menit. Pengujian kekerasan dilakukan dengan alat uji mikro Vickers dengan indentasi 10 gram. Kekerasan awal bahan di raceway yaitu bola 864 VHN, ring dalam 828 VHN, dan ring luar 644 VHN, setelah diimplantasi ion AIN kekerasan bahan ring dan bola sebagai berikut: ring luar sebesar 925 VHN, ring dalam 1225 VHN dan bola 1253 VHN atau mengalami peningkatan kekerasan bola 45 %, ring dalam 48 % dan ring luar 43 %. Dari hasil uji aus diperoleh hasil bahwa laju keausan tertinggi pada beban aksial 100 N dan beban radial 100 N serta langkah 125×10^8 m sebesar $1,3 \times 10^{-9}$ mm³/N.m. Sedang laju keausan terendah diperoleh pada pembebanan radial 100 N dan aksial 50 N sebesar 3×10^{-10} mm³/N.m. Hasil pengujian komposisi bahan bantalan bola menggunakan SEM-EDAXS sebelum diimplantasi ion AIN adalah ring luar: 97,61% Fe; 0,73% C; 0,86 % Cr; 0,35% Si; 0,27% Mn, Ring dalam: 97,32% Fe; 1,24% C; 0,68 % Cr; 0,33% Si; 0,28% Mn; bola: 96,41% Fe; 1,42% C; 1,24 % Cr; 0,34% Si; 0,29% Mn; dan sangkar: 98,89% Fe; 0,46% C; 1,24 % Cr; 0,25% Si; 0,18% Mn. Setelah diimplantasi ion AIN maka komposisi kimia menjadi ring luar : 44,36% C; 7,55% N; 0,32% Al; 47,78% Fe, ring dalam : 45,64% C; 8,3% N; 6,54% O; 0,7% Si; 1,03% Al; 0,29%bP; 37,91% Fe, dan bola : 23,27% C; 8, 02% N; 68,18% Fe.

Kata kunci : bantalan bola, implantasi ion, kekerasan, keausan

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF AIN ION ON THE HARDNESS AND WEAR OF BALL BEARING MATERIALS. Ball bearing is commonly used as machine component. The main parts of this component are outer race, inner race, and ball. The friction between the race and ball causes the wear of race ball bearing. The aim of this research is to find out the effect of ion implantation on the hardness and wear of the material of the ball bearing race. Hardness and wear test was done to the material of the ball bearing race for unimplanted and implanted materials/components. The ion AIN implantation was done for various of time 60, 90, dan 120 minutes time with energy constant is 100 keV. Hardness test was done by using micro Vickers test instrument at indentation load of 10 gf. The unimplanted hardness of material in raceway of ball is 864 VHN, inner race is 828 VHN, and outer race is 644 VHN, and after implanted, the hardness of ball is 1253 VHN, inner race 1225 VHN, and outer race 1253 VHN or increasing in hardness of ball is 45 %, inner race is 48 % and outer race is 43 %. From wearness test, it was found that the highest wearness rate at axial and radial load in order of 100 N and the slidings 25×10^8 m is in order of $1,3 \times 10^{-9}$ mm³/N.m. While the lowest is in order of 3×10^{-10} mm³/N.m, this is achieved radial and axial load 100 N and 50 N respectively. The chemical composition analysis using SEM-EDAXS of ball bearing race before implantation process is: 97,61% Fe; 0,73% C; 0,86 % Cr; 0,35% Si; 0,27% Mn, for outer race, 97,32% Fe; 1,24% C; 0,68 % Cr; 0,33% Si; 0,28% Mn; for inner race, 96,41% Fe; 1,42% C; 1,24 % Cr; 0,34% Si; 0,29% Mn; for ball and 98,89% Fe; 0,46% C; 1,24 % Cr; 0,25% Si; 0,18% Mn for cage. After implantation process, the chemical compositions are: 44,36% C; 7,55% N; 0,32% Al; 47,78% Fe, for outer race, 45,64% C; 8,3% N; 6,54% O; 0,7% Si; 1,03% Al; 0,29%bP; 37,91% Fe, for inner race: and 23,27% C; 8, 02% N; 68,18% Fe for ball.

Keyword : ball bearing, ion implantation, hardness, wear

PENDAHULUAN

Untuk komponen bantalan bola (*ball bearing*), bagian ring dan bola dalam operasinya selalu bergesekan satu sama lain, sehingga bagian bantalan bola yang lunak akan cepat aus terlebih dahulu, untuk itu bagian ini perlu ditingkatkan sifat ketahanan ausnya. Sifat ketahanan aus itu sebanding dengan sifat kekerasannya, semakin keras material, maka material tersebut semakin tahan aus. Ini berarti dengan meningkatkan kekerasan permukaan suatu material/komponen secara tidak langsung meningkatkan ketahanan ausnya^[1].

Sifat kekerasan/ketahanan aus suatu permukaan material/komponen dapat ditingkatkan dengan cara menambahkan unsur-unsur tertentu (seperti C, N, TiN, TiC maupun WC) atau dengan cara perlakuan panas (*surface heat treatment*). Ada beberapa cara untuk meningkatkan kekerasan permukaan suatu material/komponen, yaitu dari cara yang konvensional maupun dengan cara yang modern^[2].

Cara konvensional meliputi cara karburasi maupun cara nitridasi. Dalam cara karburasi, material/komponen dipanasi pada temperatur sekitar 900°C dalam lingkungan karbon aktif, kemudian di *quench* (didinginkan secara tiba-tiba/mendadak). Sedangkan dalam cara nitridasi material/komponen dimasukkan dalam suatu bak yang berisi garam cyanida dan dipanaskan pada temperatur sekitar 550°C. Proses tersebut berlangsung dalam waktu yang cukup lama yaitu sekitar 2 hingga 3 hari, tergantung pada ketebalan lapisan yang ingin dituju^[2].

Cara modern meliputi cara Plasma, Sputtering maupun cara Implantasi Ion. Cara Plasma sangat tepat dikenakan pada materi yang berujud gas. Sedang cara sputtering dapat menggunakan materi yang berujud gas maupun padatan^[3]. Akselerator implantasi ion merupakan jenis akselerator ion yang khusus didesain untuk mengimplantasikan ion-ion dari suatu atom atau molekul ke dalam suatu material. prinsip kerja mesin implantasi ion adalah pengionan atom-atom dopan dalam sumber ion, mempercepat ion-ion tersebut dalam tabung akselerator, dan selanjutnya memfokuskan ke permukaan suatu target. Untuk mendapatkan ion dopan yang benar-benar murni maka sebelum ditembakkan ke target, berkas ion tersebut terlebih dulu dilewatkan melalui magnet penganalisa baru kemudian ditembakkan ke permukaan material sasaran^[4].

Kelebihan-kelebihan dari teknik implantasi ion dibandingkan dengan teknik lain adalah:

1. Secara teori setiap ion dapat diimplantasikan ke suatu material tanpa komplikasi
2. Kemurnian ion dopan dapat dikendalikan dengan tepat, yaitu dengan memisahkan berkas ion oleh magnet pemisah berkas ion
3. Proses implantasi bersih, karena dilakukan di ruang hampa tanpa adanya paparan suhu tinggi yang beresiko pada kontaminasi permukaan
4. Proses dapat dikerjakan pada suhu kamar, dengan demikian kemungkinan timbulnya tegangan karena termal (*thermal stress*) dapat dihindari
5. Proses lebih cepat (dalam orde menit hingga jam), bila dibandingkan dengan metode konvensional (orde hari)^[5].

Dalam proses perlakuan permukaan menggunakan teknik implantasi ion Dalam proses perlakuan permukaan (*surface treatment*) menggunakan teknik implantasi ion, faktor-faktor yang harus diperhatikan untuk mendapatkan hasil yang optimum meliputi energi (*E*), dosis/intensitas (*D*) dan jenis ion yang diimplantasikan maupun jenis material sasaran. Energi ion akan menentukan kedalaman penetrasi ion terimplantasi, sedangkan dosis ion akan menentukan konsentrasi/prosentase atom yang terimplantasi dalam material sasaran. Besarnya dosis ion ditentukan oleh nilai arus berkas (μA) maupun lamanya proses implantasi (detik).

Dosis ion didefinisikan sebagai jumlah ion yang sampai pada permukaan sasaran persatuan luas berkas (ion/cm). Besaran ini akan menentukan jumlah atau prosentase ion yang terimplantasi. Nilai dosis ion sebagai fungsi arus berkas ion dan lamanya proses implantasi (detik). Dalam prakteknya nilai dosis ion dapat diatur melalui dua cara yaitu dengan memvariasi besarnya arus ion sedangkan waktunya tetap atau lamanya proses implantasi divariasi sedangkan arus berkas ion dibuat tetap.

Besarnya jumlah ion yang diimplantasikan atau disebut dengan dosis ion dapat dihitung melalui persamaan^[5].

$$D = \frac{It}{eA_{\text{berkas}}}$$

dengan

D = Dosis ion (ion/cm)

I = arus berkas ion (ampere)

t = lamanya proses implantasi (detik)

A = luasan berkas (cm²)

e = muatan keunsuran elektron (1.602×10^{19} coulomb)

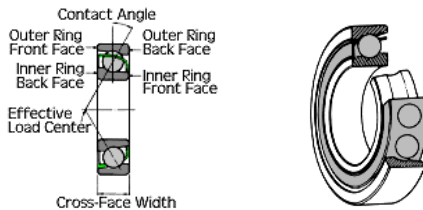
Besar energi ion diperoleh dari tegangan pemercepat yang terpasang pada tabung pemercepat. Energi kinetik berkas ion akan menentukan kedalaman penembusan (*penetration depth*) dan profil distribusi konsentrasi ion-ion dalam material sasaran. Besar kecilnya energi ion ini dapat dikontrol dengan mengatur besar tegangan tinggi yang terpasang.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh implantasi ion AlN terhadap kekerasan dan keausan bahan ball bearing dan metode yang diterapkan adalah dengan cara implantasi ion.

DASAR TEORI

Bantalan Bola

Angular contact ball bearing mempunyai kemampuan menahan beban radial dan beban aksial. Sangkar bola terbuat dari baja biasanya digunakan, tetapi untuk sudut kontak kurang dari 30° digunakan sangkar bola dari resin *polyamide*. Tipe bantalan ini digunakan pada kecepatan tinggi misalnya poros mesin gerinda dan poros tegak motor elektrik. (NSK, 2003). Gambar 2.3 menunjukkan gambar dari *single row angular contact ball bearing* :



Gambar 1. Single row angular contact ball bearing

Kekerasan Bahan

Kekerasan permukaan bahan dapat didefinisikan sebagai ketahanan bahan terhadap deformasi plastis. Ada beberapa cara untuk mengukur kekerasan permukaan bahan diantaranya adalah metode Brinell, Rockwell, Knoop dan Vickers. Untuk uji keras permukaan lapisan tipis, metode uji yang paling tepat adalah uji Knoop dan Vickers.

Untuk uji Vickers secara matematik, nilai kekerasan Vickers dapat dituliskan dalam bentuk persamaan^[6],

$$VHN = 1,854 P/d^2 \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

dengan:

- P=beban yang diberikan (kg)
- d = diagonal bekas injakan (mm)

Keausan Bahan

Keausan material/komponen dapat didefinisikan sebagai hilangnya material akibat bergesekan dengan komponen lain, secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut^[7]

$$\text{Volume Keausan (V)} = \frac{\text{Berat keausan (g)}}{\text{berat jenis (g/mm}^3\text{)}} \quad (3)$$

Sedangkan laju keausan dapat dituliskan dalam bentuk persamaan

$$\text{Laju Keausan} = \frac{V}{S} \quad (4)$$

dengan,

S merupakan jarak tempuh, yang besarnya adalah

$$S = \pi d n t \quad (5)$$

dengan

- V = volume keausan
- S = jarak tempuh
- d = diameter
- n= putaran poros
- t = waktu

METODE PENELITIAN

Bahan Yang Digunakan Pada Penelitian

Bantalan bola dengan no seri 20 BSW 01, AlN berbentuk serbuk sebagai bahan yang akan diimplantasi, kertas gosok dengan ukuran 600 sampai dengan 2000 mesh untuk menghaluskan permukaan spesimen (benda uji), autosol metal polish untuk memoles spesimen dan alkohol untuk membersihkan spesimen. Gambar 2 menunjukkan dari gambar *ball bearing* untuk spesimen (benda uji) :



Gambar 2. Bantalan bola dengan dua arah pembebanan ring luar, 2. ring dalam, 3. bola dan sangkar, 4. potongan bantalan bola

Adapun spesifikasi teknis dari bahan uji disajikan pada Tabel 1

Tabel 1. Spesifikasi bahan uji bantalan bola

Diameter dalam (d)	20 mm
Diameter luar (D)	52 mm
Diameter bola (d ₁)	10 mm
Lebar	15 mm
Bahan ring dan bola	Baja paduan
Masa jenis bearing	7,8 g/cm ³

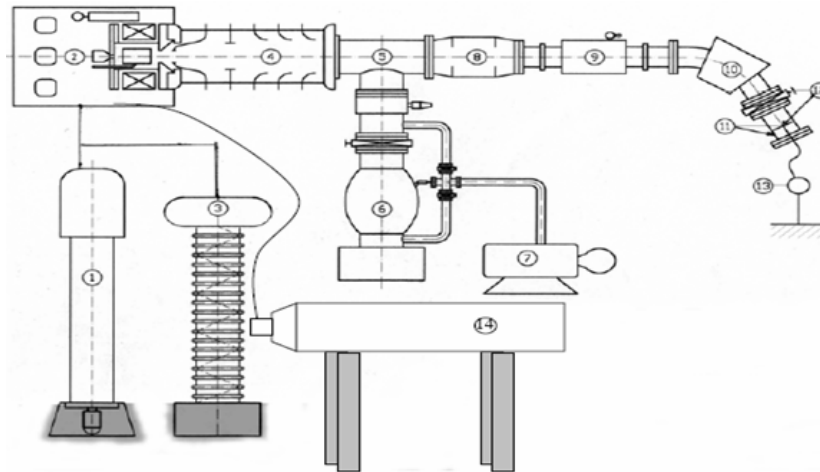
Alat-Alat Yang Digunakan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi,

1. Mesin implantasi ion, dilengkapi dengan pompa rotary, pompa difusi, sistem kontrol vakum, kontrol aliran gas, kontrol suhu, sumber tegangan tinggi DC, sistem pendingin dan regulator tekanan gas. Alat ini ada di Laboratorium Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) - BATAN Yogyakarta.
2. *Ultrasonik cleaner*, untuk membersihkan benda uji yang diimplantasi ion. Alat ini ada di

Laboratorium Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) - BATAN Yogyakarta.

3. Alat uji mikro *Vickers hardness tester* di Laboratorium Bahan Teknik Jurusan Teknik Mesin (D3) Universitas Gadjah Mada.
4. Mikroskop Optik, untuk foto permukaan bantalan bola. Alat ini ada di Laboratorium Bahan Teknik Jurusan Teknik Mesin (D3) Universitas Gadjah Mada.
5. Alat uji keausan, untuk menguji keausan bantalan bola.
6. Mesin polis
7. EDM, untuk memotong bantalan bola. Alat ini ada di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Negeri Yogyakarta.
8. Alat timbangan, untuk menimbang perubahan berat bantalan bola. Alat ini ada di Laboratorium Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB)-BATAN Yogyakarta.
9. SEM/EDX milik Laboratorium Geologi Kwartir Bandung



Keterangan

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sumber tegangan terisolir | 8. Lensa quadrupol |
| 2. Kotak terisolir | 9. Pemandu berkas |
| 3. Sumber tegangan tinggi | 10. Magnet analisator ion |
| 4. Tabung akselerator | 11. Parade cup (ruang sasaran) |
| 5. Pipa T | 12. Target sampel yang diionisasi |
| 6. Pompa difusi | 13. Alat ukur arus berkas ion |
| 7. Pompa rotari | 14. Tabung gas nitrogen |

Gambar 3. Skema alat implantasi ion (Sumber : PTAPB BATAN Yogyakarta)

Pelaksanaan Penelitian

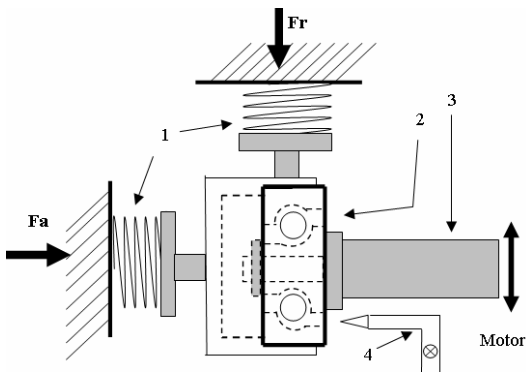
Implantasi ion AIN pada bahan *ball bearing* dilakukan dengan waktu dan energi tetap sebesar masing-masing , 90 menit 100 keV. Pengujian aus dilakukan pada kecepatan 3000 rpm, beban aksial 5 kg dan beban radial 5 kg dengan variasi waktu 3, 6, dan 12 jam. Pengujian kekerasan mikro Vickers dilakukan dengan beban 10 gram

Proses Implantasi Ion AIN

Spesimen diimplantasi ion AIN), serbuk AIN sebagai target diletakkan pada katoda dan benda uji ring dan bola diletakkan pada anoda kemudian dilakukan pemvakuman. Setelah proses pemvakuman tercapai, sumber tegangan tinggi DC dihubungkan dengan terminal katoda dan anoda. Adapun skema alat implantor ion disajikan pada Gambar 3.

Alat Uji Keausan

Alat uji keausan dibuat oleh peneliti dengan kecepatan tinggi 3000 rpm sehingga mudah dalam penelitian dan perhitungan tingkat keausan bahan ring bantalan bola *single row angular contact ball bearing*. Bahan ring permukaannya dibuat rata dengan ukuran 6 mm × 11 mm. Sebagai pemegangnya dipasangkan ke resin dengan panjang 40-60 mm, tinggi 25 mm dan tebal 5-10 mm. Skema alat uji keausan disajikan pada Gambar 4.



Keterangan

- 1. Pegas
- 2. Bantalan bola
- 3. Poros
- 4. Nozzel
- Fa: Beban aksial
- Fr: Beban radial

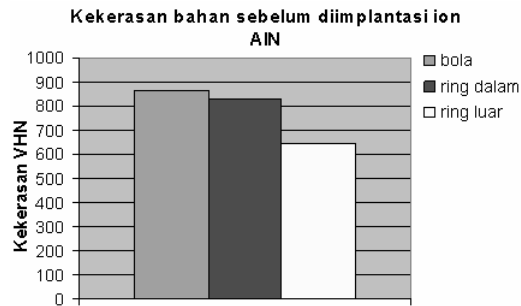
Gambar 4. Alat uji keausan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Kekerasan Vickers

Kekerasan bahan ring yang sebelum diimplantasi

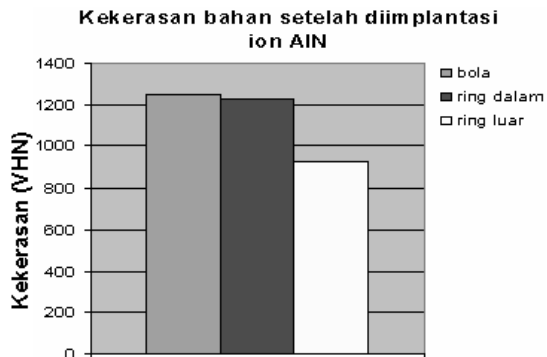
Pada Gambar 4.1 menyajikan hasil pengujian kekerasan Vickers beban 10 gram pada permukaan bahan bantalan bola yang tidak diimplantasi. Kekerasan awal bahan di *race way* yaitu bola 864 VHN, ring dalam 828 VHN dan ring luar 644 VHN.



Gambar 5. Grafik kekerasan Vickers (VHN) komponen ball bearing sebelum diimplantasi ion

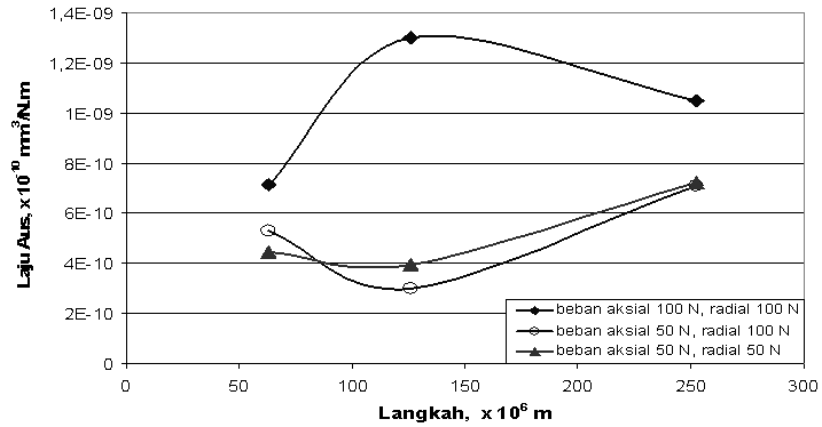
Hasil uji kekerasan bahan setelah diimplantasi AIN

Hasil uji kekerasan untuk bantalan bola yang diimplantasi ion selama 90 menit dan energi 100 keV adalah; untuk ring luar sebesar 925 VHN, ring dalam 1225 VHN dan bola 1253 VHN atau mengalami peningkatan pada, ring dalam 48 %, ring luar 43 % dan bola 45 %. Gambar 6 menunjukkan grafik kekerasan bahan setelah diimplantasi ion AIN selama 90 menit dan pada energi 90 keV.



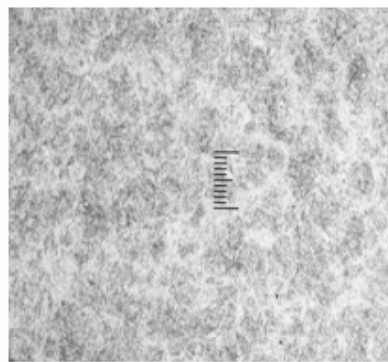
Gambar 6. Grafik kekerasan bahan setelah diimplantasi ion AIN

Hasil uji keausan

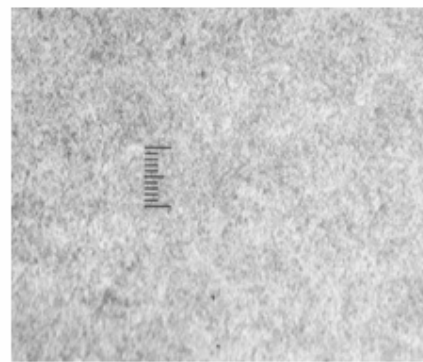


Gambar 7. Laju aus bantalan bola terhadap langkah

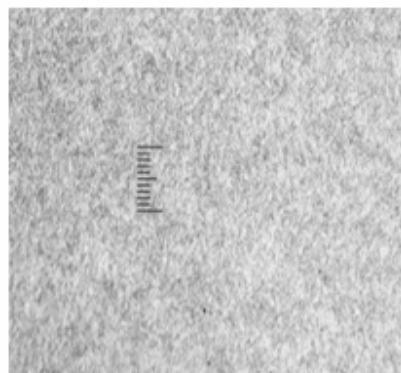
Hasil foto struktur mikro



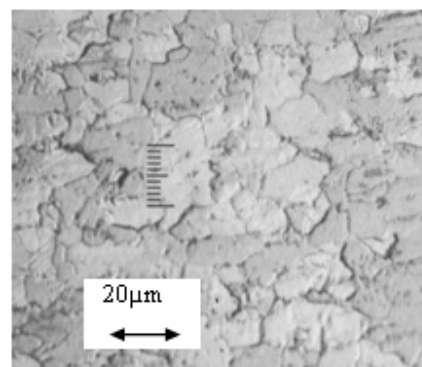
(a) Struktur mikro ring luar



(b) Struktur mikro bola



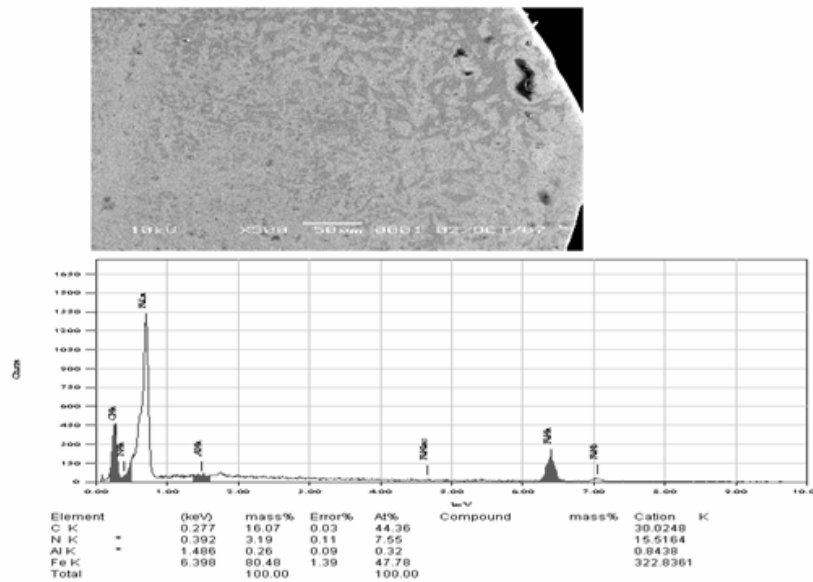
(c) Struktur mikro ring dalam



(d) Struktur mikro sangkar

Gambar 8. Struktur mikro permukaan untuk (a) Struktur mikro ring luar, (b) Struktur mikro bola, (c) Struktur mikro ring dalam, (d) Struktur mikro sangkar

Hasil Analisa Unsur Menggunakan SEM-EDAXS

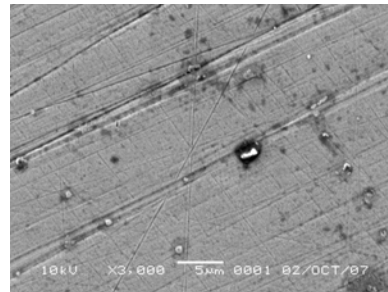


Gambar 9. Hasil EDX ring luar pada bantalan bola perbesaran 300×

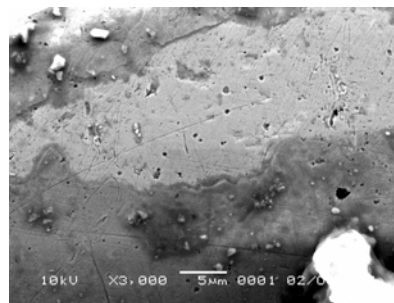
Dari hasil pengujian aus diperoleh hasil bahwa laju keausan tertinggi pada saat beban aksial 100 N dan beban radial 100 N serta langkah 125×10^8 m pada laju keausan $1,3 \times 10^{-10}$ mm³/N.m Namun laju keausan terendah saat pembebanan radial 100 N dan aksial 50 N adalah sebesar 3×10^{-10} mm³/N.m.

Hasil pengujian komposisi bahan bantalan bola memberikan informasi bahwa bantalan bola sebelum diimplantasi ion AlN merupakan baja paduan dengan unsur utama untuk ring luar: 97,61% Fe; 0,73% C; 0,86 % Cr; 0,35% Si; 0,27% Mn, Ring dalam: 97,32% Fe; 1,24% C; 0,68 % Cr; 0,33% Si; 0,28% Mn; bola: 96,41% Fe; 1,42% C; 1,24 % Cr; 0,34% Si; 0,29% Mn; dan sangkar: 98,89% Fe; 0,46% C; 1,24 % Cr; 0,25% Si; 0,18% Mn. Setelah diimplantasi ion AlN maka komposisi kimia menjadi ring luar : 44,36% C; 7,55% N; 0,32% Al; 47,78% Fe, ring dalam : 45,64% C; 8,3% N; 6,54% O; 0,7% Si; 1,03% Al; 0,29%bP; 37,91% Fe, dan bola : 23,27% C; 8, 02% N; 68,18% Fe.

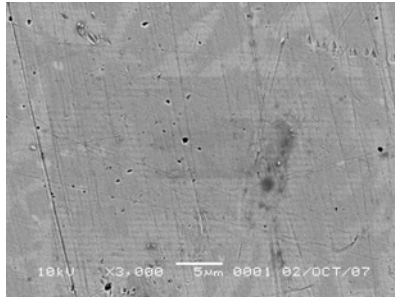
Hasil foto sem bantalan bola perbesaran 3000x



Gambar 4.14 Gambar Foto SEM bola pada bantalan bola perbesaran 3000×



Gambar 4.16 Gambar Foto SEM Ring dalam pada bantalan bola perbesaran 3000×



Gambar 4.18 Gambar Foto SEM Ring luar pada bantalan bola perbesaran 3000x

KESIMPULAN

1. Kekerasan awal bahan di raceway yaitu bola 864 VHN, ring dalam 828 VHN, dan ring luar 644 VHN, setelah diimplantasi ion AlN kekerasan bahan ring dan bola sebagai berikut: ring luar sebesar 925 VHN, ring dalam 1225 VHN dan bola 1253 VHN atau mengalami peningkatan kekerasan bola 45 %, ring dalam 48 % dan ring luar 43 %. Nilai keausan diperoleh dengan memvariasikan beban pada alat uji aus.
2. Hasil pengujian komposisi bahan bantalan bola sebelum diimplantasi ion AlN adalah ring luar: 97,61% Fe; 0,73% C; 0,86 % Cr; 0,35% Si; 0,27% Mn, Ring dalam: 97,32% Fe; 1,24% C; 0,68 % Cr; 0,33% Si; 0,28% Mn; bola: 96,41% Fe; 1,42% C; 1,24 % Cr; 0,34% Si; 0,29% Mn; dan sangkar: 98,89% Fe; 0,46% C; 1,24 % Cr; 0,25% Si; 0,18% Mn. Setelah diimplantasi ion AlN maka komposisi kimia menjadi ring luar : 44,36% C; 7,55% N; 0,32% Al; 47,78% Fe, ring dalam : 45,64% C; 8,3% N; 6,54% O; 0,7% Si; 1,03% Al; 0,29% bP; 37,91% Fe, dan bola : 23,27% C; 8,02% N; 68,18% Fe.
3. Dari hasil uji aus diperoleh hasil bahwa laju keausan tertinggi pada beban aksial 100 N dan beban radial 100 N serta langkah 125×10^8 m sebesar $1,3 \times 10^{-10}$ mm³/N.m. Sedang laju keausan terendah diperoleh pada pembebanan radial 100 N dan aksial 50 N sebesar 3×10^{-10} mm³/N.m.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] WILLIAM F. SMITH, 1990, Principles of Materials Science and Engineering, McGrawHill, Inc, Third Edition.
- [2] METAL HANDBOOK 8th Edition, Vol 2, 1964, , Heat Treating, Cleaning and Finishing, American Society for Metals.
- [3] Shen, L., Ricky, F.U., Paul, C.H.U., 2004, “*Shyntesis of AlN Films by Plasma Immersion*

Ion Implantation-Deposition using Hybrid Gas-Metal Cathodic Arc Gun”, Scientific Instrument, pp.719-724

- [4] Moller, W. and Mukherjee, S., 2002, “Plasma-Based Ion Implantation”, Current Science, Vol. 83, No. 3
- [5] Ueda, M., Gomes, F. G., Kostov, K. G., Reuther, H., Lepiński, C., M., Soares, Jr., Takai, O., dan Silva, M. M., 2004, “*Result from Experiment on Hybrid Plasma Immersion Ion Implantation*”, Brazilian Journal of Physics
- [6] GEORGE E. DIETER, 1986, Mechanical Metallurgy, Third Edition, McGraw-Hill Book Company
- [7] Yao, S. H., Kao, W. H., Su, Y. L., Liu, T. H., 2004, “Effect of Periods on Wear Performance of TiN/AlN Superlattice Films, “*Material Science and Engineering A* 392, pp 380-385.

TANYA JAWAB

Bambang Siswanto

- Kekerasan bahan awal 864 VHN, 828 VHN dan 644 VHN setelah diimplantasi kekerasannya meningkat 45%, 48% dan 43%, mengapa peningkatannya tidak linier?

Indraswari Suroso

- Hal ini disebabkan karena permukaan material hasil implantasi ion bervariasi setelah diuji kekerasannya sehingga hasil kekerasan implantasi ion AlN tidak linier, bisa saja linier tergantung komposisi Al dan N dapat dilihat dalam EDAX maka kekerasan bahan meningkat tergantung dari komposisi Al dan N

Iping Suhariadi

- Sebelum diimplantasi misal ring luar komposisi Fe cukup tinggi dan unsur ion logam yang lain kurang dari 1%, dan setelah diimplantasi ring luar komposisi Fe menurun cukup signifikan dari komposisi untuk unsur non logam yang lain meningkat. Tetapi kenapa dikatakan setelah implantasi, terjadi peningkatan kekerasan, padahal komposisi unsur logam menurun?

Indraswari Suroso

- Fungsi dari implantasi ion AlN diharapkan untuk meningkatkan kekerasan bahan sehingga bantalan yang kekerasannya paling rendah (ring luar), bola, ring dalam diharapkan kekerasannya meningkat hal ini diluar komposisi Fe karena yang diimplantasikan AlN sehingga yang kita lihat dalam EDAX adalah komposisi Al dan N-nya

Gatot Tri Mulaydi Rekso

- *Kenapa dipilih AlN untuk implantasi*
- *Apakah ada komposisi ion lain yang lebih baik, karena dengan AlN peningkatan kekerasan sekitar 43-48%*

Indraswari Suroso

- Ion AlN karena sudah ada penelitian yang mendahului kami TiN, N sebenarnya masih banyak yang lain namun kami tertarik karena untuk membandingkan dengan TiN, N ternyata hasilnya lebih baik dibandingkan dengan TiAl dan N
- Selama kami melihat hasil penelitian pendahulu kami TiN, dan N peningkatan kekerasan tertinggi pada ion AlN.

Silakhuddin

- *Jika dosis diartikan sebagai tergantung arus ion x waktu., tapi mengapa dalam makalah/ abstrak tidak dicantumkan besar arus ion atau jumlah ion/cm² yang diimplankan*
- *Mengapa kandungan Fe dan C pada sebelum dan sesudah implantasi berbeda menyolok, misal untuk ring luar; sebelum 97,6% Fe; 0,73% C sedangkan sesudah 47,78% Fe; 44,36% C*

Indraswari Suroso

- Arus ion =10 μ A dan 100 keV dan waktu optimum 90 menit
- Sebelum diimplantasi adalah bantalan bola jenis baja paduan karbon sedang, setelah diimplantasi mungkin terdapat adanya minyak difusi sehingga ikut terimplantasi.

KAJIAN PEMBUATAN PROTOTIPE KAPASITIF-RESISTIF RH MIKROSENSOR BERBAHAN DIELEKTRIK Al_2O_3

Tjipto Sujitno

Badan Tenaga Nuklir Nasional

Iping Suhariadi, Kamsul Abraha

Jurusan Fisika, FMIPA, UGM

ABSTRAK

KAJIAN PEMBUATAN PROTOTIPE KAPASITIF-RESISTIF RH MIKROSENSOR BERBAHAN DIELEKTRIK Al_2O_3 . Telah dilakukan kajian pembuatan prototipe kapasitif-resistif RH mikrosensor berbahan dielektrik aluminium oksida (Al_2O_3). Pendeposisian lapisan tipis Al_2O_3 dilakukan melalui teknik DC Sputtering konvensional. Pengujian dengan UV/Visible Spectroscopy dilakukan untuk menyelidiki keadaan stoikiometri dan menentukan ketebalan dari lapisan tipis Al_2O_3 yang dihasilkan. Pengujian dengan difraksi sinar-X dilakukan untuk mengetahui efek dari variasi suhu substrat terhadap struktur kristal lapisan tipis Al_2O_3 . Hasil pengkarakterisasian dari ketiga sensor menunjukkan karakter yang sama dimana ketiga sensor tersebut sangat sensitif untuk kelembaban tinggi diatas 60% dengan respon waktu kurang dari 5 detik.

Kata kunci: lapisan tipis Al_2O_3 , DC sputtering, kapasitif-resistif RH mikrosensor

ABSTRACT

STUDY ON THE FABRICATION OF A PROTOTYPE OF CAPACITIVE-RESISTIVE RH MICROSENSOR FROM Al_2O_3 DIELECTRIC MATERIAL A study on the fabrication of capacitive-resistive relative humidity microsensor prototype has been performed. The deposition of Al_2O_3 thin films was done using conventional DC sputtering method. UV/Visible test was performed to investigate the stoichiometric of the thin films and to determine their thickness. X-Rays Diffraction analysis was performed to investigate the effect of substrate's temperature variation on crystal structure of Al_2O_3 thin films. Characterization result of three sensors showed the same character where all of them were found to be very sensitive for high relative humidity, i.e above 60%, with time responses were found to be less than 5 second.

Key words: Al_2O_3 thin films, DC sputtering, capacitive-resistive RH microsensor

PENDAHULUAN

Hingga saat ini penggunaan sensor kelembaban telah meningkat pesat dalam proses industri dan kontrol lingkungan seperti pada BMG, bidang kedokteran, bioteknologi, industri kertas dll. Karena kelembaban merupakan faktor lingkungan yang bersifat permanen, pengukuran dan pengontrolannya menjadi sangat penting, tidak hanya untuk kenyamanan manusia tetapi juga untuk bidang industri dan teknologi. Sejauh ini telah banyak publikasi artikel atas sensor kelembaban dengan tinjauan berupa mekanisme proses dan bahan (Arai dan Seiyama, 1992).

Al_2O_3 sebagai *porous material* sensitif terhadap uap air. Kemampuan aluminium oksida untuk mendeteksi kelembaban dikarenakan adanya konduksi ionik akibat adanya mekanisme Grotthuss. Secara umum Al_2O_3 memiliki 2 fase yaitu α - Al_2O_3 (*corundum*) dan γ - Al_2O_3 (*amorphous*). Bentuk amorf dari aluminium oksida (γ - Al_2O_3) memiliki

lebih dibandingkan bentuk korundumnya, yaitu memiliki porositas yang lebih tinggi sehingga lebih sensitif. Tetapi kelemahan γ - Al_2O_3 adalah kurang stabil sehingga mudah terdegradasi pada kelembaban normal, sedangkan α - Al_2O_3 adalah bentuk yang stabil (Chen dan Lu, 2005)

Metode pendeposisian Al_2O_3 sebagai bahan keramik yang lazim digunakan adalah dengan anodisasi, *electron beam evaporation*, dan *sputtering*. Untuk pendeposisian dengan metode *sputtering*, *dual magnetron mid frequency ac reactive sputtering* dan *pulsed dc reactive sputtering* dipandang sebagai metode terbaik dalam mendeposisikan bahan isolator dengan laju deposisi tinggi (Carter et al, 2006). Metode yang diusulkan dalam penelitian ini adalah dengan DC sputtering konvensional yang tersedia di PTAPB-BATAN.

Struktur tipe geometri elektroda interdigital digunakan pada prototipe kapasistif-resistif RH Mikrosensor kali ini. Berdasarkan penelitian sebe-

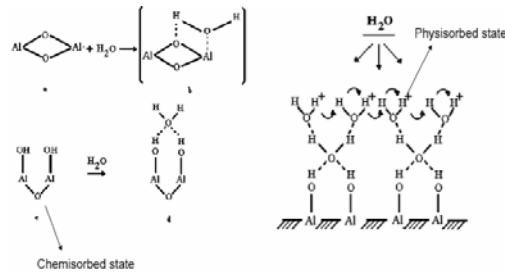
lumnya, ketika struktur tipe sandwich yang digunakan dimana bahan dielektrik Al_2O_3 diapit diantara dua elektroda, timbul permasalahan berupa short circuit, meskipun lapisan tipis Al_2O_3 telah benar-benar terbentuk diantara dua elektroda tersebut. Satu alasan yang mungkin adalah lapisan tipis Al_2O_3 yang terbentuk memiliki struktur pori-pori terbuka sehingga mengakibatkan short circuit (Chen et al, 1991).

TEORI

Pengukuran terhadap kelembaban menentukan jumlah uap air yang ada pada suatu gas yang dapat berupa campuran seperti udara, atau berupa gas murni seperti nitrogen atau argon. Berdasarkan teknik pengukurannya, satuan yang hampir selalu digunakan dalam pengukuran kelembaban adalah Kelembaban Relatif (RH), titik embun/beku (D/F PT) dan bagian perjuta (ppm). Kelembaban relatif (RH) merupakan perbandingan dari tekanan parsial uap air terhadap uap air jenuh suatu gas pada suhu tertentu.

Mekanisme penyerapan uap air pada permukaan aluminium oksida terdiri atas penyerapan secara kimia dan secara fisis. Penyerapan kimiawi uap air pada permukaan oksida melalui mekanisme disosiatif membentuk dua permukaan hidroksil untuk setiap molekul air, misalnya penyerapan grup hidroksil pada permukaan kation dan proton dari logam membentuk grup hidroksil kedua dengan sebuah ion O^{2-} permukaan yang berdekatan. Disisi lain, lapisan pertama uap air yang diserap secara fisis pada substrat hidroksilat terlokalisasi oleh ikatan hidrogen ganda dari sebuah molekul air tunggal.

Uap air yang diserap termampatkan pada permukaan dari bahan dan proton akan dihantarkan pada lapisan akuatik yang terbentuk. Di dalam air, proton adalah pembawa muatan dominan yang bertanggung jawab untuk konduktivitas listrik. Konduksi tersebut dikarenakan adanya mekanisme Grotthuss, yang mana proton menerobos dari satu molekul air ke molekul air lainnya melalui ikatan hidrogen. Jika lebih banyak lapisan yang mengalami kondensasi, keteraturan dari permukaan awal mungkin akan hilang secara perlahan dan proton akan memiliki lebih dan lebih lagi kebebasan untuk bergerak di bagian dalam lapisan air yang termampatkan melalui mekanisme Grotthuss. Hal ini berakibat pada berubahnya nilai tetapan dielektrik dan bertambahnya daya hantar listrik



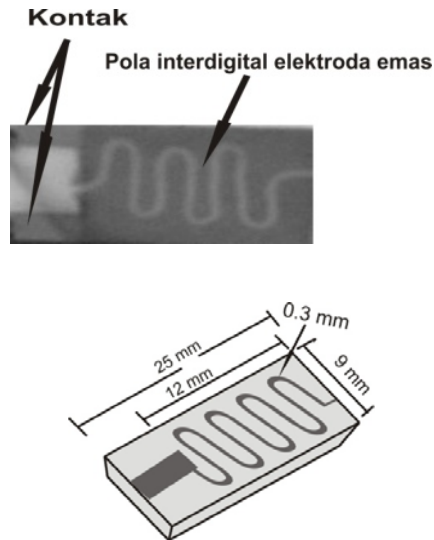
Gambar 1 Empat tahapan absorpsi (A) dan struktur multilayer dari air yang termampatkan (B) (Electronic Material II, 2004)

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Pertama, substrat alumina yang telah dipotong dengan ukuran $9 \text{ mm} \times 16.5 \text{ mm}$ dibersihkan menggunakan litrosome cleaner. Tahap pembersihan dimulai dengan merendam substrat alumina dalam larutan acetone, deterjen, acetone dan terakhir larutan ethanol, diikuti dengan pengeringan substrat menggunakan hair dryer selama 2 menit. Masing-masing tahap perendaman dilakukan selama 60 menit. Elektroda Au dideposisikan di atas substrat alumina melalui evaporasi termal dengan pola interdigital pada tekanan sekitar 1×10^{-7} mbar dan tegangan sekitar 60 volt. Substrat alumina yang telah terlapis elektroda emas ini dilapisi dengan lapisan tipis Al_2O_3 sebagai bahan penyensor dengan metode DC sputtering. Al_2O_3 berupa pellet dengan diameter $\pm 6 \text{ cm}$ dan tebal $\pm 1 \text{ cm}$ digunakan sebagai target. Selain substrat alumina tersebut, substrat kaca yang telah dibersihkan juga dimasukkan ke dalam substrat holder untuk memastikan keadaan visual stokiometri dari lapisan tipis Al_2O_3 yang terbentuk (keadaan stokiometri lapisan tipis Al_2O_3 seharusnya coklat transparan) (Li et al, 2006). Pendeposisian melalui DC sputtering dilakukan pada tekanan 5×10^{-2} torr, dengan tegangan deposisi 5×10^3 volt dan laju gas argon mencapai 30 ccm. Selama proses deposisi, medan magnet dihidupkan melalui solenoida eksternal untuk meningkatkan rapat arus dari ion. Pendeposisian dilakukan dengan variasi suhu substrat 200°C , 250°C dan 300°C masing-masing selama 1 jam. Selama proses deposisi berlangsung, tegangan deposisi berfluktuatif dan arus mengalami penurunan cukup signifikan akibat gejala *poisoning target*. Pada saat terjadi gejala *poisoning target*, laju gas argon terus ditambah secara bertahap untuk mempertahankan rapat arus dari ion.

UV/Visible Spectrofotometer digunakan untuk menganalisa sifat optis dan mengukur ketebalan dari lapisan tipis Al_2O_3 yang terbentuk. Struktur kristal dari lapisan tipis Al_2O_3 dikarak-

terisasi dengan standard difraksi sinar-X menggunakan sumber $\text{Cu } K \alpha$ (0.154 nm). Pengujian sensitivitas dari sensor kelembaban dilakukan di dalam desikator tertutup menggunakan *silica gel* sebagai pengering, dengan mengamati perubahan nilai kapasitansi dan resistansi terhadap perubahan kelembaban relatif yang diberikan pada suhu lingkungan 25°C dan 40°C.



Gambar 2. Desain prototipe sensor kelembaban

HASIL DAN PEMBAHASAN

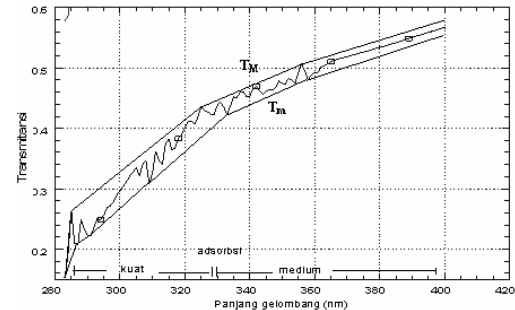
Sifat Optis Dari Lapisan Tipis Al_2O_3

Indeks bias dari lapisan tipis Al_2O_3

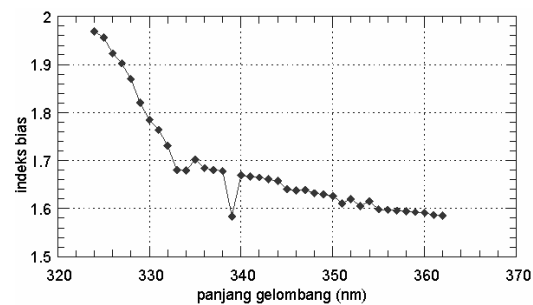
Selama proses pendeposisian lapisan tipis Al_2O_3 terjadi gejala *poisoning target*, seperti yang telah dijelaskan pada seksi sebelumnya. *Poisoning target* atau target dikatakan dalam keadaan teracuni merupakan suatu ungkapan untuk menggambarkan target sputtering yang tertutup dengan lapisan yang direaksikan, dan ketika teracuni sifat listrik dan fisis dari target mungkin dapat berubah (Carter et al, 2006). Penentuan indeks bias dari lapisan tipis Al_2O_3 yang terbentuk menjadi penting untuk menyelidiki sejauh mana perubahan sifat fisis dan listrik yang dialami lapisan tipis Al_2O_3 tersebut.

Dengan mengacu pada Gambar 3, dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa spektrum transmisi dengan kenaikan tajam berada pada daerah 280 nm hingga 323 nm, sehingga daerah ini merupakan daerah dengan tingkat absorpsi kuat. Pada daerah absorpsi kuat, jari-jari interferensi tidak muncul, dan tidak ada cara untuk menghitung indeks bias (n) dan tingkat absorpsi (x) secara terpisah, karenanya perhitungan dengan menggunakan metode-metode

di atas akan memberikan hasil n dan x yang kurang sesuai (Swanepoel, 1983). Hal serupa ditunjukkan oleh nilai indeks bias n_1 , dimana untuk daerah $\lambda < 324$ nm nilai n_1 sangat besar ($n_1 > 2$). Oleh sebab itu, akar-akar persamaan kuadrat pertama (s_1 dan n_1) lebih tepat untuk digunakan dalam analisa.



Gambar 3. Grafik interpolasi spektrum transmisi film Al_2O_3 pada substrat kaca

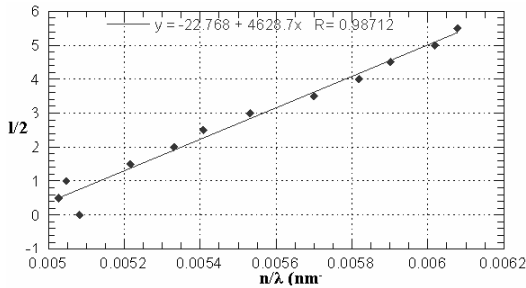


Gambar 4. Nilai indeks bias lapisan tipis untuk tiap-tiap panjang gelombang

Lapisan tipis Al_2O_3 dari hasil uji UV-Vis memberikan nilai indeks bias $n = 1.58-1.97$ (gambar 4). Berdasarkan literatur, nilai indeks bias untuk Al_2O_3 adalah $n = 1.65-1.77$ (Carter et al, 2006), dan nilai ini berbeda tipis dengan nilai indeks bias yang diperoleh. Oleh sebab itu dapat disimpulkan bahwa lapisan tipis Al_2O_3 yang terbentuk hasil dari sputtering berada dalam keadaan stoikiometri.

Pengukuran ketebalan dari lapisan tipis Al_2O_3

Untuk nilai $n(\lambda)$ yang sudah diketahui, maka ketebalan dari lapisan tipis dapat ditentukan dengan persamaan 11 dalam lampiran. Dari grafik (5) dapat diketahui bahwa nilai gradien dari grafik adalah 4628.7 dan menghasilkan nilai $d = 2.31 \mu\text{m}$. Dari titik potong grafik dengan sumbu y diketahui bahwa nilai $c = -22.77$ yang menghasilkan nilai orde pertama interferensi untuk titik ekstrim $m_0 = 23$.

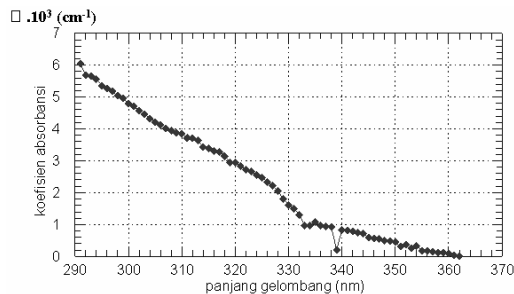


Gambar 5. Grafik n/λ vs $l/2$

Koefisien Absorpsi

Tipe spektrum absorpsi dari lapisan tipis Al_2O_3 dapat ditunjukkan pada Gambar 6 di bawah ini. Dari Gambar 6 tampak bahwa untuk daerah dengan panjang gelombang yang semakin pendek maka tingkat absorpsi semakin tinggi.

Penentuan sifat optis diatas dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya prosedur dalam pengolahan data. Kesalahan relatif pada nilai s sebesar 1% akan mengakibatkan kesalahan relatif 0.5% pada nilai n . Kesalahan 1% pada T_M akan menghantarkan kesalahan relatif n sebesar 0.5% untuk daerah absorpsi lemah, dan meningkat menjadi 1% untuk daerah absorpsi medium. Kesalahan relatif 1% pada T_m akan mengakibatkan kesalahan relatif n sebesar 1.5% pada daerah absorpsi lemah dan menjadi 3% pada daerah absorpsi medium (Swanepoel, 1983).



Gambar 6. Spektrum koefisien absorpsi dari Al_2O_3

Pengaruh dari suhu substrat

Pada penelitian ini dilakukan uji XRD terhadap struktur kristal dari lapisan tipis Al_2O_3 pada substrat kaca dengan suhu substrat $T=300^\circ C$ dan $T=250^\circ C$. Hasil dari uji XRD seperti tampak pada grafik 2θ vs intensitas di bawah ini. Dari Gambar 7 dapat diketahui kecenderungan hasil deposisi lapisan tipis Al_2O_3 yang lebih bersifat amorf. Namun, fenomena munculnya fase kristalin α dari Al_2O_3 sudah muncul, meski dengan tingkat

kekristalan yang kecil. Hal ini ditunjukkan dengan semakin tingginya puncak difraksi sinar X untuk suhu substrat yang semakin tinggi pada daerah sekitar $20\sim 68^\circ$ seperti yang terlihat pada gambar 7, dan dengan membandingkan hasil yang diperoleh dengan data JCPDS dapat diketahui fase α (*corundum*) dengan struktur kristal rhombohedral seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Untuk puncak lain pada lapisan tipis Al_2O_3 dengan suhu substrat $300^\circ C$ terdapat pada $2\theta\sim 20.99^\circ, 21.48^\circ, 22.82^\circ, 25.25^\circ, 25.71^\circ, 26.36^\circ, 27.07^\circ, 28.01^\circ, 32.16^\circ, 35.30^\circ, 38.86^\circ,$ dan 39.79° . Sedangkan pada lapisan tipis Al_2O_3 dengan suhu substrat $250^\circ C$, puncak-puncak yang lain terdapat pada $2\theta\sim 20.61^\circ, 21.48^\circ, 22.98^\circ, 30.58^\circ, 37.48^\circ, 50.98^\circ, 51.70^\circ$ dan 67.95° . Keberadaan puncak-puncak yang lain tersebut mengindikasikan keberadaan fase γ , fase θ atau fase κ dari Al_2O_3 . Untuk mengidentifikasi puncak-puncak tersebut secara lebih spesifik tidaklah mudah dikarenakan adanya tekanan terinduksi yang mudah mengubah puncak difraksi sinar-X (Li et al, 2000).

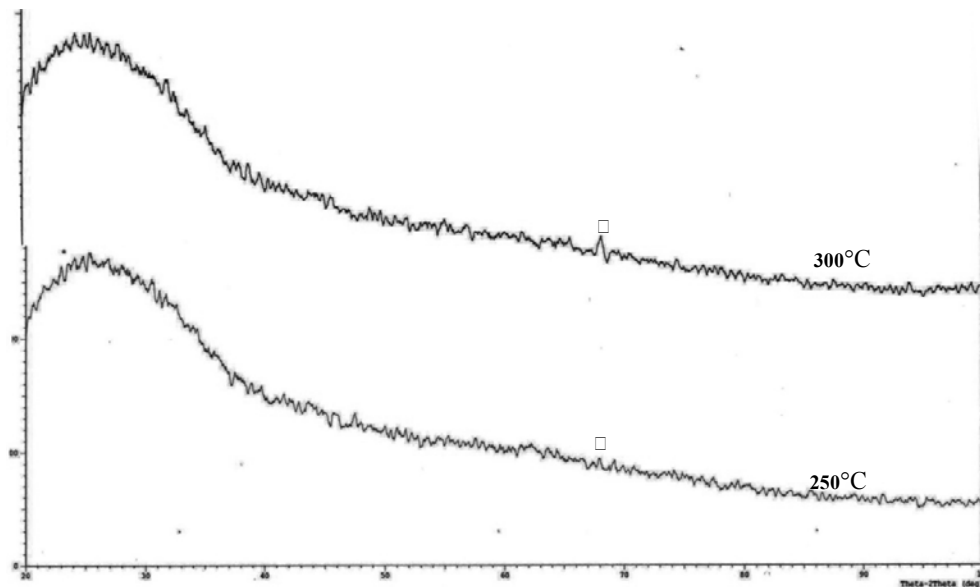
Dari tabel (1) di atas dapat dilihat bahwa untuk lapisan tipis Al_2O_3 dengan suhu substrat $300^\circ C$ memiliki fase kristalin α lebih tinggi daripada lapisan tipis Al_2O_3 dengan suhu substrat $250^\circ C$, sehingga dapat disimpulkan suhu substrat mempengaruhi struktur kristal dari lapisan tipis Al_2O_3 . Semakin tinggi suhu substrat, maka lapisan Al_2O_3 yang dihasilkan akan semakin bersifat fase kristalin α . Untuk mengubah lapisan tipis Al_2O_3 dari amorf ke fase α diperlukan suhu minimal $800^\circ C$ (Chen dan Lu, 2005), tetapi hal ini tidak dapat terpenuhi pada penelitian ini dikarenakan keterbatasan alat dimana pemanas substrat pada DC Sputtering hanya mampu memanaskan maksimal $400^\circ C$

Karakterisasi Sensor Kelembaban Dengan Bahan Dielektrik Al_2O_3

Pengaruh suhu karakterisasi terhadap lapisan tipis Al_2O_3

Pada penelitian juga dilakukan karakterisasi sensor yang telah dihasilkan pada suhu $40^\circ C$ untuk menjajagi kemungkinan penggunaan sensor pada suhu luar ruangan serta mengkajinya. Hasil dari karakterisasi seperti yang tampak pada Gambar 8

Dari grafik 8a tampak bahwa sensor Al_2O_3 dapat mendeteksi kelembaban dari kelembaban relatif 90% hingga serendah 20% yang diberikan, baik untuk karakterisasi pada suhu $25^\circ C$ maupun $40^\circ C$. Untuk grafik 8b menunjukkan karakteristik yang sama baik untuk karakterisasi pada suhu $25^\circ C$



Gambar 7. Hasil uji XRD untuk Al_2O_3 dengan suhu substrat $T=300^\circ\text{C}$ dan $T=250^\circ\text{C}$

Tabel 1. Data Indeks Miller fase $^\circ\text{C}$ dari lapisan tipis Al_2O_3

T substrat	Data yang diperoleh		Data JCPDS d(A)	h	k	l
	2 θ	d(A)				
1. 250□	~67.95°	1.3784	1.3743	3	0	0
2. 300□	~68.19	1.3742	1.3743	3	0	0

maupun 40°C , dimana grafik cenderung menurun untuk RH 90% hingga 50% dan bernilai konstan untuk RH kurang dari 50%, sehingga disimpulkan daerah pendeteksian sensor dengan suhu substrat 250°C berada pada kelembaban di atas 50%.

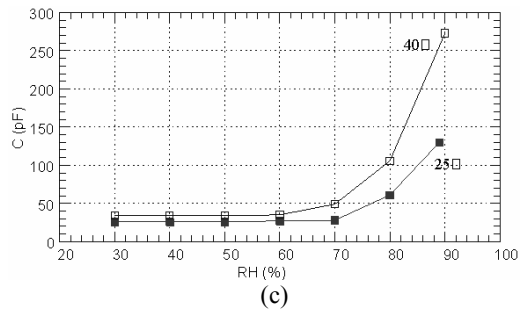
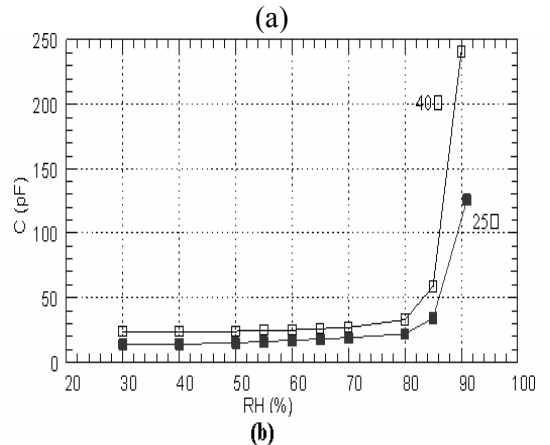
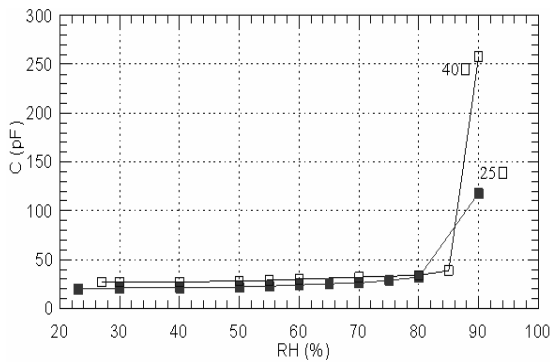
Sedangkan grafik 8c untuk pengkarakterisasian pada suhu 25°C dan 40°C menunjukkan perubahan nilai grafik hanya berada pada kelembaban relatif 60 hingga 90%, dan bernilai konstan untuk RH kurang dari 60%. Hal ini mengindikasikan sensor dengan suhu substrat 300°C tidak mampu mendeteksi kelembaban di bawah 60%.

Pada Gambar 9 di bawah ini dapat diamati bahwa semakin kecil nilai RH maka nilai R akan semakin tinggi. Hal ini berbeda dengan grafik 8 di atas dimana nilai C akan menurun untuk nilai RH yang semakin kecil. Hal ini dapat dipahami karena hambatan berbanding terbalik dengan kapasitansi. Tetapi untuk nilai output sensor berupa resistansi

menunjukkan karakterisasi yang lebih baik dari nilai output berupa kapasitansi karena dari grafik RH versus R di atas, ketiga sensor menunjukkan nilai R yang berubah di setiap nilai RH yang diberikan, sehingga dapat dikatakan ketiga sensor mampu mendeteksi kelembaban untuk daerah kelembaban hingga di bawah 50%. Untuk daerah RH di atas 50%, pengkarakterisasian tidak dapat dilakukan karena keterbatasan alat ukur yang hanya mampu membaca hambatan maksimal $2000\text{ M}\Omega$.

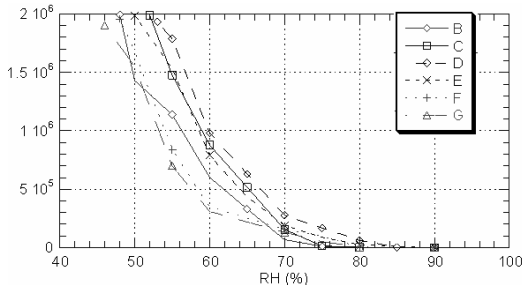
Pengkarakterisasian dengan variasi suhu baik untuk nilai R maupun C menunjukkan perilaku yang sama, dimana nilai C lebih tinggi dan nilai R lebih rendah untuk karakterisasi pada suhu 40°C dibandingkan dengan nilai R dan C pada suhu 25°C . Hal ini disebabkan karena semakin tinggi suhu lingkungan karakterisasi, maka semakin banyak uap air di udara dan tingkat kelembabannya semakin tinggi pula.

Ditinjau dari segi pengaruh suhu substrat terhadap sensitivitas sensor, dari grafik 8 dapat dilihat bahwa sensor dengan suhu substrat lebih rendah, yaitu 200°C memiliki sensitivitas hampir diseluruh RH yang diberikan. Hal ini dapat dipahami berdasarkan data hasil uji XRD dimana lapisan Al₂O₃ dengan suhu substrat lebih rendah cenderung bersifat amorf (sedikit fase α yang dimiliki). Untuk sensor kelembaban dengan fase kristalin, umumnya mekanisme konduksi murni didasarkan pada konduksi proton dari air yang tidak cukup sensitif untuk kelembaban rendah, dimana uap air jarang membentuk lapisan-lapisan yang dapat bergerak secara kontinu pada permukaan sensor. Sedangkan untuk wujud amorf, terjadi efek penerobosan elektron diantara situs air donor. Pada efek penerobosan, yang bersamaan dengannya energi terinduksi oleh anion permukaan, memfasilitasi elektron untuk melompat di sepanjang permukaan yang tertutup oleh oleh lapisan yang tak bergerak dan karenanya memberikan kontribusi terhadap konduktivitas. Mekanisme ini cukup membantu untuk mendeteksi tingkat kelembaban yang rendah, dimana pada kelembaban rendah mekanisme konduksinya bukanlah konduksi proton yang efektif (Chen dan Lu, 2005).



- (a) Lapisan tipis Al₂O₃ suhu substrat 200°C
- (b) Lapisan tipis Al₂O₃ suhu substrat 250°C
- (c) Lapisan tipis Al₂O₃ suhu substrat 300°C

Grafik 8. Grafik kapasitansi versus kelembaban relatif untuk variasi suhu karakterisasi

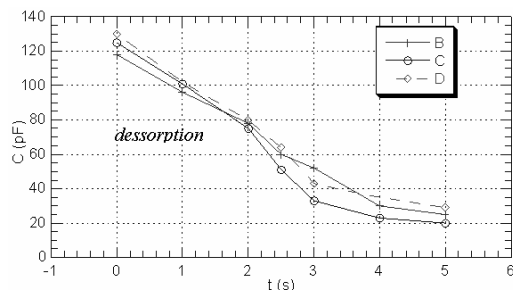


- (a) lapisan tipis Al₂O₃ suhu substrat 200°C pada karakterisasi 25°C (F) dan 40°C (G)
- (b) lapisan tipis Al₂O₃ suhu substrat 250°C pada karakterisasi 25°C (C) dan 40°C (B)
- (c) lapisan tipis Al₂O₃ suhu substrat 300°C pada karakterisasi 25°C (D) dan 40°C (E)

Gambar 9. Grafik perubahan nilai resistansi terhadap perubahan kelembaban relatif untuk

Waktu tanggap dari sensor

Waktu tanggap didefinisikan sebagai kemampuan sensor untuk mencapai nilai 90% dari nilai akhir yang diberikan (Elizabeth et al, 2002). Berdasarkan data baik dari grafik (8) maupun grafik (9), ketiga sensor menunjukkan karakteristik yang sama baik pengkarakterisasian pada suhu 25°C maupun 40°C, dimana nilai pada sumbu y mengalami perubahan secara drastis untuk RH lebih dari 60%. Oleh karena itu, pengujian waktu tanggap dilakukan pada RH 60% hingga 90%. Hasil dari pengujian seperti yang tampak pada Gambar 10 menunjukkan bahwa waktu tanggap dari ketiga sensor untuk daerah ini kurang dari 5 detik. Dapat disimpulkan bahwa ketiga sensor sangat sensitif untuk kelembaban tinggi (lebih dari 60%).



Gambar 10. Grafik respon waktu dari ketiga sensor Al_2O_3 dengan suhu substrat 200°C (B), 250°C (C), dan 300°C (D)

KESIMPULAN

Telah ditunjukkan bahwa metode DC sputtering konvensional mampu mendeposisikan lapisan tipis Al_2O_3 meski terjadi penurunan tegangan deposisi secara signifikan selama proses berlangsung, dan lapisan tipis Al_2O_3 yang dihasilkan dari metode ini masih berada dalam keadaan stoikiometrinya. Berdasarkan data uji XRD, Fase kristalin α Al_2O_3 optimum dapat dicapai melalui optimasi suhu substrat. Dari hasil di atas, pengkarakterisasian nilai resistansi dari sensor menunjukkan hasil yang lebih menggembarakan daripada pengkarakterisasian nilai kapasitansi dari ketiga sensor, dimana pada pengkarakterisasian berupa nilai resistansi menunjukkan bahwa ketiga sensor dapat merespon perubahan kelembaban relatif hingga di bawah 50%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arai H. dan Seiyama T., 1992, "Humidity sensors", *Sensors, A Comprehensive Survey Volume 3*, Chemical and Biochemical Sensors Part II, Germany
- [2] 2004, "Humidity sensor", *Electronics Materials II*, Korea University
- [3] D.C Carter, W. D. Sproul, dan D. J. Cristie, 2006, "Effective control for reactive sputtering process", *Vacuum Technology and Coating* www.vactechmag.com
- [4] Li Quan, Y. H. Yu, C. S. Bathia, L. D. Marks, S. C. Lee, dan Y.W. Chung, 2000, "Low temperature magnetron sputter-deposition, hardness, and electrical resistivity of amorphous and crystalline alumina thin films", *J. American Vacuum Society*

- [5] Swanpoel R., 1983, "Determination of thickness and Optical Constant of Amorphous Silicon", *J. Phys. E.Sci. Instrument*, vol 16
- [6] Z. Chen dan Lu C., 2005, "Humidity sensors: A review of materials and mechanisms", *Sensors Letters*.3, 274-295
- [7] Z. Chen, M. C. Jin, dan G. Chen, 1991, *J. Am. Ceram. Soc.* 74, 1325

TANYA JAWAB

Lilis Susanti

- Se jauh ini apakah sudah ada contoh mass production pembuatan microsensor berbahan dielektrik Al_2O_3 tersebut?
- Selain teknik DC sputtering konvensional yang dibandingkan dengan untuk kajian ini? Keunggulan, kelemahan dan syarat aplikasi apa saja (untuk DC sputtering ini)

Iping Suhariadi

- Se jauh yang saya ketahui pembuatan microsensor berbahan dielektrik Al_2O_3 telah banyak dilakukan diluar negeri, tetapi untuk di Indonesia kajian tentang Al_2O_3 , saya kurang tahu

LAMPIRAN

Rumus dalam penentuan sifat optis dan pengukuran ketebalan

$$T = \frac{2s}{s^2+1} \quad (1)$$

$$T = T(\lambda, s, n, d, \alpha) \quad (2)$$

$$T = \frac{Ax}{B-Cx\cos\varphi+Dx} \quad (3)$$

dimana $A=16n^2s$ (4a)

$$B=(n+1)^3(n+s^2) \quad (4b)$$

$$C=2(n^2-1)(n^2-s^2) \quad (4c)$$

$$D=(n-1)^3(n-s^2) \quad (4d)$$

$$\varphi=4\pi nd/\lambda \quad (4e)$$

$$x=\exp(-\alpha d) \quad (4f)$$

Dengan menggunakan bentuk ini, jejari interferensi yang melalui titik-titik ekstrim pada spektrum ($\cos\varphi=\pm 1$) didefinisikan sebagai

$$T_M = \frac{Ax}{B-Cx+Dx^2} \quad (5a)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B+Cx+Dx^2} \quad (5b)$$

Pada daerah absorpsi lemah dan medium, nilai $\alpha \neq 0$ dan $x < 1$, pengurangan timbal balik antara persamaan (IV.5a) dengan persamaan (IV.5b) memberikan persamaan yang takbergantung x

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2C}{A} \quad (6)$$

$$n = [N + (N^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (7)$$

$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{s^2+1}{2} \quad (8)$$

$$2nd = m\lambda \quad (9)$$

$$2nd = (m_0 - l/2)\lambda \quad (10)$$

$$\frac{l}{2} = 2d \left(\frac{n}{\lambda} \right) - m_0 \quad (11)$$

dimana l adalah integer = 0,1,2,... dan m_0 adalah orde tak dikenal dari jari interferensi pada spektrum yang diukur, n merupakan indeks bias lapisan tipis, d adalah tebal dari lapisan tipis, α adalah koefisien absorpsi dan bernilai $\alpha = 4\pi k/\lambda$, k adalah koefisien ekstingsi, T_M merupakan fungsi yang melewati puncak-puncak spektrum, sedangkan T_m adalah fungsi yang melewati lembah-lembah pada spektrum.

KAJIAN TEKNOLOGI PEMBUATAN PUPUK ORGANIK CAIR DARI LIMBAH CAIR PRA PENYAMAKAN KULIT PASCA IRADIASI

Herry Poernomo

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb Yogyakarta 55281

Tel. (0274) 484436, Fax. (0274) 487824, E-mail : herry_poernomo05@yahoo.co.id

ABSTRAK

Telah dilakukan kajian teknologi pembuatan pupuk organik cair dari limbah cair pra penyamakan kulit pasca iradiasi. Tujuan kajian ini adalah untuk mendapatkan metoda pembuatan pupuk organik cair dari hasil iradiasi limbah cair pra penyamakan kulit dengan iradiasi berkas elektron. Proses iradiasi pada limbah cair pra penyamakan kulit adalah untuk detoksifikasi H₂S, desinfeksi bakteri patogen, dan dekomposisi senyawa organik (protein) agar nisbah C/N tereduksi sekitar 30. Hasil kajian menunjukkan bahwa limbah cair pasca iradiasi yang mengandung unsur hara makro dapat dikonversi menjadi pupuk organik cair secara fermentasi aerob menggunakan mikroorganisme efektif.

Kata kunci : limbah cair, pra penyamakan kulit, iradiasi, pupuk organik cair

ABSTRACT

Study of manufacture technology of liquid organic fertilizer from liquid waste of pre-tannery post irradiation has been arranged. The objective is to obtain method of liquid organic fertilizer manufacture from irradiation result of liquid waste using electron beam. Irradiation proces on liquid waste of pre-tannery is for detoxification of H₂S, desinfection of pathogen bacteria, and decomposition of organic compound (protein) so that C/N ratio lessened about 30. Result of study indicate that liquid waste of pre-tannery post irradiation contain of macro nutrition can be converted into liquid organic fertilizer by aerob fermentation method by using effective microorganism.

Keywords : liquid waste, pre tannery, irradiation, liquid organic fertilizer

PENDAHULUAN

Distribusi pupuk kimia anorganik bersubsidi seperti urea, ZA, TSP, KCl yang dipasarkan di Indonesia hampir setiap tahun selalu terjadi kenaikan harga sampai pada tingkat yang memberatkan para petani. Hal ini secara langsung akan meningkatkan biaya produksi tanaman pangan, sehingga pendapatan para petani akan semakin turun. Lambat laun para petani akan banyak yang beralih ke pemakaian pupuk organik (kompos) untuk meningkatkan produktifitas tanaman pangan.

Efek globalisasi ekonomi dan penerapan tarif di dunia saat ini berdampak pada berbagai kebijakan Pemerintah telah secara bertahap mengurangi berbagai subsidi seperti bahan bakar minyak. Pada suatu saat nanti subsidi harga pupuk kimia anorganik pelan tapi pasti akan dikurangi secara bertahap dan kemudian akan dihapus sama sekali oleh pemerintah. Dengan pengurangan dan penghapusan subsidi harga pupuk kimia anorganik, maka harganya makin memberatkan para petani.

Gerakan dari para pecinta lingkungan, terutama juga pengaruh globalisasi mulai berperan dan ikut campur dalam mengembalikan pola pikir para penentu kebijakan dan para praktisi di lapangan untuk menggunakan produk yang lebih berbasis kembali ke alam (*back to nature*) dan ramah lingkungan^[1].

Berdasarkan hal tersebut di atas, maka pupuk organik cair mulai mendapat perhatian sebagai alternatif yang *cost-effective* dan *environmentally sound* untuk proses stabilisasi dan pembuangan akhir dari limbah cair. Semakin ketatnya peraturan tentang polusi udara dan air yang masing-masing untuk mendukung program langit biru dan program kali bersih (prokasih), maka telah mendorong pengembangan proses pembuatan pupuk organik cair (POC) atau kompos cair dari limbah pertanian, peternakan, dan industri sebagai suatu opsi yang *viabile* dari *wastes management* secara umum, khususnya *wastewater management*^[1].

Proses pengomposan itu sendiri merupakan biodegradasi dari bahan organik menjadi suatu

produk yang stabil. Proses pengomposan yang sempurna akan menghasilkan produk yang tidak mengganggu baik selama penyimpanan maupun aplikasinya, seperti bau busuk, bakteri patogen. Selama proses pengomposan, temperatur akan mencapai range pasteurization dari 50°C - 70°C, sehingga bakteri patogen dari *wastewater sludge* (jika dari pengolahan limbah domestik atau municipal) akan mati^[1].

Meskipun proses pengomposan dapat berlangsung dalam kondisi aerobik maupun anaerobik, proses aerobik lebih cocok diaplikasikan pada pengomposan dari *wastewater sludge*, terutama dari municipal. Proses pengomposan aerobik lebih mempercepat proses penguraian dan berlangsung pada temperatur yang relatif tinggi sehingga sekaligus berguna untuk menghilangkan bakteri patogen yang berasal dari kotoran manusia. Disamping itu pengomposan aerobik juga meminimalkan potensi bau yang ditimbulkan^[1].

Secara umum kompos sangat bermanfaat sebagai *soil conditioner* dengan adanya kandungan bahan organik yang tinggi, karena sifat kestabilannya maka bahan organik dalam kompos akan terdegradasi secara perlahan dan tertahan secara efektif untuk waktu yang lebih lama dibandingkan bahan organik dari limbah yang belum dikomposkan. Kandungan makro dan mikro nutrisi yang berasal dari *wastewater sludge* sangat bermanfaat untuk pertumbuhan tanaman, baik perkebunan, pertanian maupun hortikultura & hobbies. Disamping itu produk kompos juga akan meningkatkan kualitas tanah yang berpasir, tanah liat maupun kondisi tanah yang telah jenuh (*more balance soils*). Sedangkan dari sisi mikrobanya, aplikasi kompos sangat bermanfaat untuk reklamasi dari tanah yang telah kehilangan atau rusak top soilnya, seperti akibat cutting-filling pada pembukaan lahan untuk industri dan *real-estate*, akibat aktivitas pertambangan terbuka atau pada tanah yang sebelumnya terlalu banyak menggunakan pupuk kimia karena akan meningkatkan populasi mikroba tanah yang berfungsi untuk penyediaan nutrisi yang siap diserap oleh akar tanaman^[1].

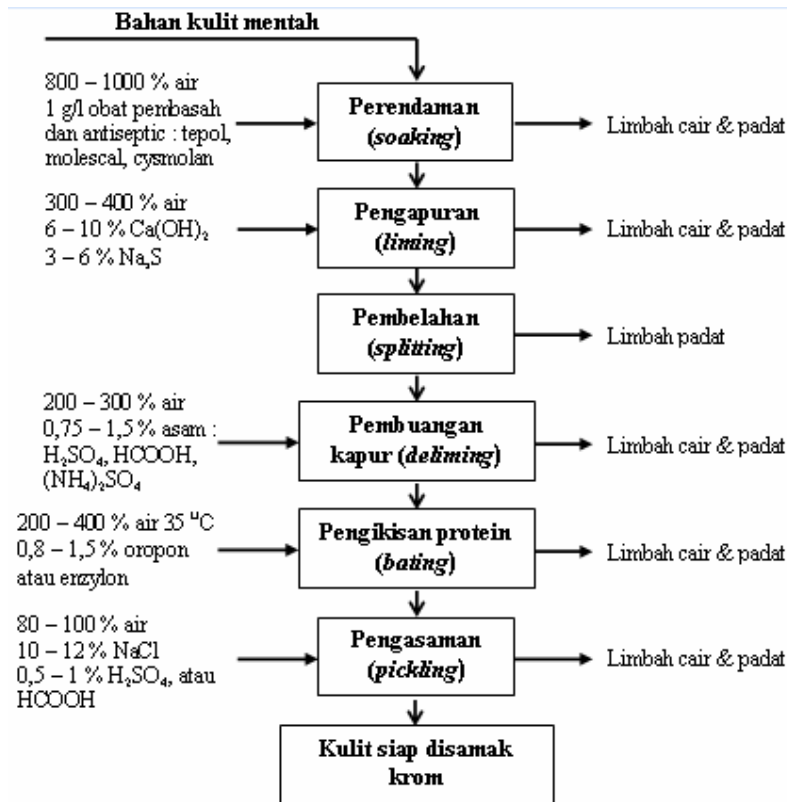
Aktivitas perkembangan industri, khususnya industri penyamakan kulit dan industri pengolahan ke depan tentu akan membawa dampak negatif yaitu beban badan sungai dalam menerima buangan limbah cair akan semakin berat. Dari asumsi pertumbuhan ekonomi nasional sekitar 7% per tahun, maka limbah cair yang ditimbulkan dari industri penyamakan kulit dan industri pengolahan di Indonesia dapat diprediksi akan meningkat terus. Peningkatan limbah cair dari industri tersebut dapat dijadikan sebagai jaminan kesinambungan bahan

baku untuk pembuatan POC yang dapat menggantikan peran pupuk kimia anorganik yang tidak ramah lingkungan dan harganya akan semakin tinggi akibat pengurangan dan penghapusan subsidi. Dengan demikian ke depan pemanfaatan POC dari limbah cair yang mengandung unsur hara makro dan mikro dari industri pengolahan diharapkan dapat menyelesaikan masalah pencemaran lingkungan dan sekaligus mendukung substitusi pupuk kimia anorganik buatan pabrik dengan pupuk organik cair yang ramah lingkungan^[1].

Sebagian besar industri penyamakan kulit melakukan pembersihan limbah cair dari hasil ekualisasi yaitu campuran dari limbah cair pra penyamakan kulit (*pre tanning*) secara proses pengerjaan basah (*beam house process*) dan proses penyamakan kulit dengan krom (*chrome tanning*). Umumnya proses pengerjaan basah di industri pengolahan kulit dapat dijelaskan seperti pada Gambar 1^[2].

Limbah cair yang ditimbulkan dari *pre tanning* secara proses pengerjaan basah menimbulkan volume limbah sekitar 25 l/kg kulit mentah. Kemudian kelanjutan dari proses pengerjaan basah adalah proses penyamakan kulit dengan krom yang menimbulkan limbah cair sebanyak sekitar 5 l/kg kulit mentah. Limbah cair dari proses *pre tanning* sangat berpotensi menimbulkan gas H₂S polutan toksis yang berbau seperti telur busuk. Namun demikian limbah cair dari proses *pre tanning* justru banyak mengandung unsur hara makro seperti nitrogen (NH₄⁺) dari proses pengikisan protein pada kulit (*bating*) dan dari proses pembuangan kapur pada kulit (*deliming*), kalsium (Ca²⁺) dari proses pengapuran kulit (*liming*), sulfur (SO₄²⁻) dari proses pembuangan kapur pada kulit (*deliming*), serta klorida Cl dari proses pengasaman kulit (*pickling*). Efluen limbah dari pabrik pengolahan kulit di Indonesia mengandung unsur hara makro N (NH₄⁺) sebesar 91,52 - 217,3 mg/l dan S (SO₄²⁻) sebesar 11,6 - 147,2 mg/l^[1]. Kedua unsur tersebut merupakan unsur hara makro yang apabila dapat bergabung akan menjadi (NH₄)₂SO₄ atau disebut pupuk ZA (*Zwavelzuure Ammonium*). Sedangkan unsur hara Ca²⁺ dan SO₄²⁻ dapat membentuk zat pembawa (*carrier*) CaSO₄ pada pupuk double superphosphate (DP) dengan unsur hara fosfor (P)^[3].

Berdasarkan kandungan unsur hara makro seperti NH₄⁺, P₂O₅, SO₄²⁻, Ca²⁺ yang cukup besar dalam limbah cair dari proses *pre tanning* pada industri pengolahan kulit, maka limbah cair dapat dibuat menjadi pupuk organik cair. Proses pembuatan pupuk organik cair dilakukan dengan mengiradiasi limbah cair dari proses *pre tanning*



Gambar 1. Diagram alir proses pra penyamakan kulit ^[2]

menggunakan berkas elektron. Iradiasi berkas elektron akan mendetoksifikasi gas H_2S toksik menjadi SO_2 yang bereaksi dengan H_2O , O_2 , dan NH_3 hasil degradasi protein dalam limbah cair oleh berkas elektron menjadi $(NH_4)_2SO_4$ yang berfungsi sebagai bahan baku pupuk ZA.

TEORI

Pupuk Organik

Penggunaan pupuk di dunia terus meningkat sesuai dengan pertumbuhan luas areal pertanian, pertumbuhan penduduk, kenaikan tingkat intensifikasi tanaman pangan serta makin beragamnya penggunaan pupuk sebagai usaha peningkatan hasil pertanian. Para ahli lingkungan hidup khawatir dengan pemakaian pupuk kimia anorganik yang berasal dari pabrik ini akan menambah tingkat polusi tanah yang akhirnya berpengaruh juga terhadap kesehatan manusia^[3].

Berdasarkan hal tersebut makin berkembang alasan untuk mengurangi penggunaan pupuk kimia anorganik dan agar pembuatan pabrik-pabrik pupuk kimia anorganik di dunia dikurangi atau diganti

dengan pembuatan pupuk organik agar manusia bisa terhindar dari malapetaka akibat akumulasi polusi. Upaya pembudidayaan tanaman dengan pertanian organik merupakan usaha untuk dapat mendapatkan bahan makanan tanpa penggunaan pupuk kimia anorganik. Dengan sistem ini diharapkan tanaman dapat hidup tanpa ada masukan dari luar sehingga dalam kehidupan tanaman terdapat suatu siklus hidup yang tertutup^[3].

Banyak sifat baik pupuk organik cair terhadap kesuburan tanah antara lain ialah :

1. Bahan organik dalam proses mineralisasi akan melepaskan hara tanaman dengan lengkap (N, P, K, Ca, Mg, S, serta hara mikro) dalam jumlah tidak tentu dan relatif kecil.
2. Memperbaiki kehidupan biologi tanah (baik hewan tingkat tinggi maupun tingkat rendah) menjadi lebih baik karena ketersediaan makan lebih terjamin.
3. Dapat meningkatkan daya sangga (*buffering capacity*) terhadap guncangan perubahan drastis sifat tanah.

4. Mengandung mikrobia dalam jumlah cukup yang berperan dalam proses dekomposisi bahan organik.

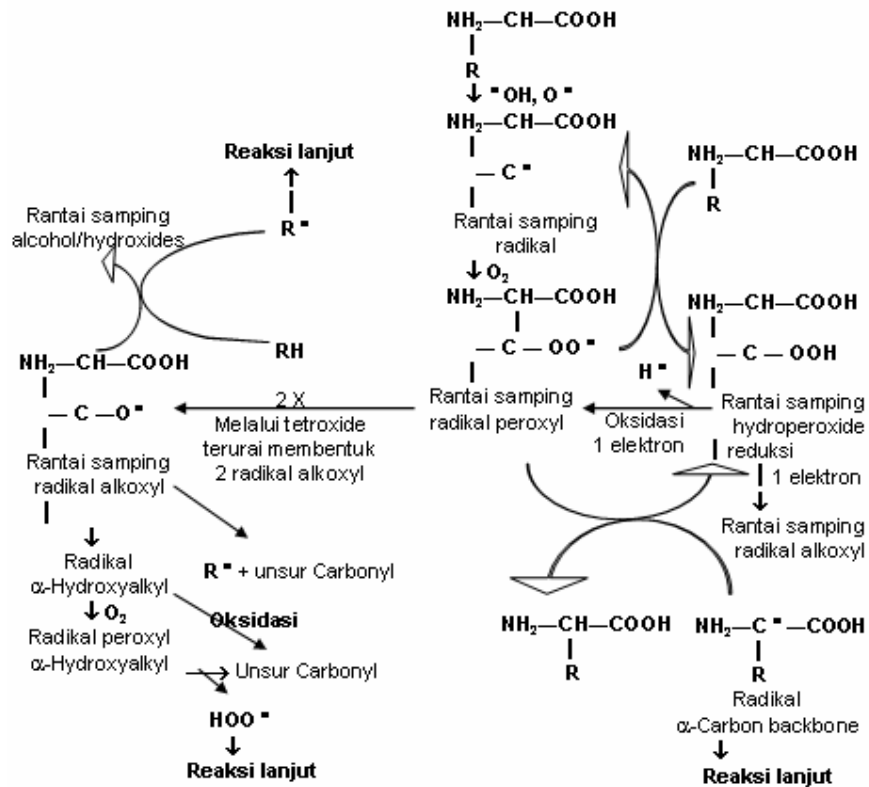
Pupuk organik cair merupakan hasil degradasi bahan organik (unsur karbon) dalam media cair oleh mikrobia secara fermentasi aerob agar memiliki nisbah C/N yang rendah. Bahan yang ideal untuk difermentasi menjadi POC memiliki nisbah C/N sekitar 30, sedangkan POC yang dihasilkan memiliki nisbah C/N < 20. Bahan organik yang memiliki nisbah C/N jauh lebih tinggi di atas 30 akan terombak dalam waktu yang lama, sebaliknya jika nisbah tersebut terlalu rendah akan terjadi kehilangan N karena menguap selama proses perombakan berlangsung. POC yang dihasilkan dengan fermentasi menggunakan teknologi mikrobia efektif dikenal dengan nama bokashi. Dengan cara ini proses pembuatan POC dapat berlangsung lebih singkat dibandingkan cara konvensional^[3].

PEMBAHASAN

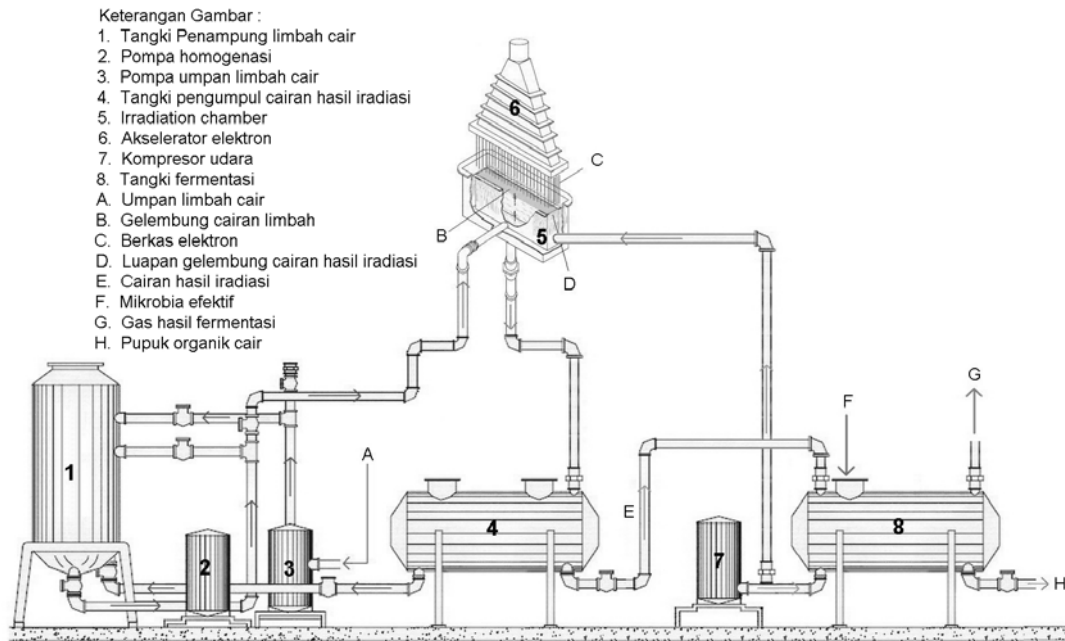
Dekomposisi Senyawa Organik (Protein) dalam Limbah Cair dengan Berkas Elektron

Dekomposisi senyawa organik dalam limbah cair dari limbah cair pra penyamakan kulit dengan berkas elektron dimaksudkan untuk menurunkan jumlah karbon (C) pada protein dalam limbah cair dalam waktu jauh lebih cepat dibandingkan dengan proses pembuatan pupuk organik secara konvensional menggunakan mikrobia biasa maupun secara teknologi fermentasi menggunakan mikrobia efektif yang dikenal dengan nama bokashi. Dekomposisi protein oleh berkas elektron dimaksudkan agar terpenuhi rasio C/N < 20 sebagai standar kualitas pupuk organik.

Senyawa organik seperti protein (C_nH_aO_bN_c) oleh enzim protease dapat dihidrolisis menjadi polipeptida, oligopeptida dan asam-asam amino.

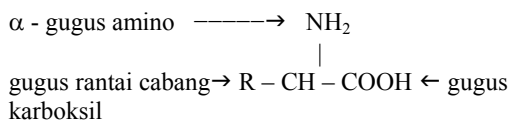


Gambar 2. Reaksi utama terbentuknya rantai samping radikal aliphatic selama oksidasi protein oleh radikal bebas oksidator kuat [·]OH dan O^{·-} ^[5]



Gambar 3. Konsep diagram alir proses pembuatan POC dari limbah cair pra penyamakan kulit pasca iradiasi dengan berkas elektron ^[6, 7]

Senyawa protein yang terdiri dari asam-asam amino ditulis dengan struktur umum sebagai berikut ^[4]



Beberapa asam amino dalam protein dapat didekomposisi oleh radikal bebas oksidator kuat $\cdot\text{OH}$ dan O^\bullet seperti pada Gambar 2 ^[5].

Apabila radikal bebas $\cdot\text{OH}$ dan O^\bullet terus menerus mengoksidasi protein di dalam limbah cair pra penyamakan kulit, maka semakin banyak asam amino dan protein dalam limbah cair akan terdekomposisi menjadi H_2O , NH_3 , dan CO_2 . Proses Pembuatan Pupuk Organik Cair (POC) dari Limbah Cair Pra Penyamakan Kulit Pasca Iradiasi dengan Berkas Elektron

Kajian pembuatan bahan baku POC dari limbah cair pra penyamakan kulit pasca iradiasi dengan berkas elektron dilakukan dengan mengadopsi dan memodifikasi hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Lavale (1997) dan Sampa (2003) dapat dijelaskan dengan diagram alir proses seperti pada Gambar 3 ^[6, 7]

Tahapan proses pembuatan pupuk organik cair (POC) dari limbah cair pra penyamakan kulit

pasca iradiasi dengan berkas elektron dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Umpan limbah cair oleh pompa 3 dimasukkan ke dalam tangki 1,
2. Limbah cair dari tangki 1 oleh pompa 2 dimasukkan ke dalam tangki iradiasi 5 bagian dalam,
3. Limbah cair pada tangki iradiasi 5 bagian dalam digelembungkan dengan cara diinjeksi dengan udara dari kompresor 7,
4. Gelembung cairan yang naik ke permukaan pada tangki iradiasi 5 bagian dalam ditembak dengan berkas elektron dari akselerator elektron 6,
5. Aliran gelembung cairan setelah dikenai dengan berkas elektron akan meluap ke tangki iradiasi 5 bagian luar,
6. Akumulasi dan tabrakan antar gelembung cairan pada tangki iradiasi 5 bagian luar akan menjadi cairan yang selanjutnya mengalir secara grafitasi ke dalam tangki 4,
7. Cairan hasil iradiasi dalam tangki 4 dimasukkan ke dalam tangki 1 dan dicampur dengan umpan limbah cair dari pompa 3,
8. Campuran cairan dalam tangki 1 selanjutnya oleh pompa homogenasi 2 dimasukkan ke dalam tangki

iradiasi 5 untuk diiradiasi yang kedua kali dengan berkas electron.

9. Demikian seterusnya dilakukan perulangan seperti langkah 1 s.d. 8 sehingga akan diperoleh cairan E hasil iradiasi akhir.

Cairan E hasil akhir iradiasi adalah limbah cair dari pra penyamakan kulit yang telah terdetoksifikasi dari gas H₂S, terdesinfeksi dari bakteri pembusuk yang mengkonsumsi unsur hara makro dan mikro dalam limbah cair, dan tereduksi unsur karbon (C) karena terdegradasinya protein dalam limbah cair oleh beberapa radikal bebas yang dihasilkan oleh radiolisis air oleh berkas elektron.

Degradasi unsur karbon pada protein dalam limbah cair oleh berkas elektron dimaksudkan untuk menurunkan kandungan karbon (C) dalam limbah cair. Bahan organik yang mempunyai C/N masih tinggi berarti masih mentah. Pupuk organik yang belum matang (C/N tinggi) dianggap merugikan, karena bila diberikan langsung ke dalam tanah maka bahan organik diserang oleh mikrobia (bakteri maupun fungi) untuk memperoleh energi. Sehingga populasi mikrobia yang tinggi memerlukan juga hara tanaman untuk tumbuhan dan kembang biak. Hara yang seharusnya digunakan oleh tanaman berubah digunakan oleh mikrobia. Dengan kata lain mikrobia bersaing dengan tanaman untuk memperebutkan hara yang ada. Hara menjadi tidak tersedia (unavailable) karena berubah dari senyawa anorganik menjadi senyawa organik jaringan mikrobia, hal ini disebut *immobilisasi* hara. Terjadinya immobilisasi hara tanaman bahkan sering menimbulkan adanya gejala defisiensi. Makin banyak bahan organik mentah diberikan ke dalam tanah makin tinggi populasi yang menyerangnya, makin banyak hara yang mengalami immobilisasi. Walaupun demikian nantinya bila mikrobia mati akan mengalami dekomposisi hara yang immobil tersebut berubah menjadi tersedia lagi. Jadi immobilisasi merupakan pengikatan hara tersedia menjadi tidak tersedia dalam jangka waktu relatif tidak terlalu lama^[3].

Proses Mikrobiologi Pengomposan

Pengomposan merupakan proses penguraian aerobik - thermophilic dari konstituen organik (misalnya dari sampah / buangan organik alami dan excess sludge dari biological wastewater treatment) menjadi produk akhir yang relatif stabil, menyerupai humus. Ada 3 group mikroorganisme yang berperan, yaitu: bakteri, actinomycetes dan fungi. Fungsi bakteri akan mengurai senyawa golongan protein lipid dan lemak pada kondisi thermophilic serta menghasilkan energi panas. Actinomycetes dan fungi

yang selama proses pengomposan berada pada kondisi mesophilic dan thermophilic berfungsi untuk mengurai senyawa-senyawa organik yang kompleks dan selulosa dari bahan organik atau dari bulking agent. Faktor kondisi lingkungan selama operasional sangat berpengaruh terhadap aktivitas mikro organisme dalam proses oksidasi - dekomposisi tersebut dan pada akhirnya berpengaruh terhadap kecepatan dan siklus proses pengomposan serta kualitas kompos yang dihasilkan^[1].

Selama proses pengomposan ada 3 tahapan berbeda dalam kaitannya dengan temperatur yang diamati, yaitu : mesophilic, thermophilic dan cooling (tahap pendinginan). Pada tahap awal mesophilic temperatur proses akan naik dari suhu lingkungan ke 40°C dengan adanya fungi & bacteria pembentuk asam. Temperatur proses akan terus meningkat ke tahap thermophilic antara 40 - 70°C, dimana mikro-organisme akan digantikan oleh bakteri thermophilic, actinomycetes dan thermophilic fungi. Pada range thermophilic temperatur, proses degradasi dan stabilisasi akan berlangsung secara maksimal. Tahap pendinginan ditandai dengan penurunan aktivitas mikroba dan penggantian dari mikroorganisme thermophilic dengan bacteria & fungi mesophilic. Selama tahap cooling, proses penguapan air dari material yang telah dikomposkan akan masih terus berlangsung, demikian pula stabilisasi pH dan penyempurnaan pembentukan humic acid^[1].

Pengomposan merupakan wujud aktivitas kerjasama dari berbagai mikroorganisme (bakteri, actinomycetes dan fungi) yang didukung oleh berbagai kondisi / faktor penting dari lingkungan yang memungkinkan terjadinya proses mikro biologis, yaitu^[1] :

- A. Kelembaban (kandungan air)
- B. Suhu
- C. pH
- D. Konsentrasi nutrisi
- E. Kebutuhan oksigen

A. Kelembaban (kandungan air)

Penguraian senyawa organik sangat tergantung pada faktor kelembaban (*moisture*). Limit terendah dari aktivitas bakteri adalah antara 12 - 15 %; meskipun sebenarnya *moisture content* < 40 % merupakan batas dari kecepatan penguraian optimum. Idealnya kandungan air antara 50 - 60 %. Jika *moisture content* dari campuran > 60 % maka integritas struktural yang baik juga tidak akan dicapai. Selama proses pengomposan sebagian air akan teruapkan sehingga perlu dilakukan pengaturan dengan penyemprotan, misalnya bersamaan dengan pembalikan pada proses windrow, untuk menjaga

kondisi *moisture content* yang optimum selama proses pengomposan. Pada kondisi akhir, tahap pendinginan, *moisture content* diharapkan supaya terus menurun untuk mencapai mendapatkan produk akhir yang lebih mudah penanganannya, penyimpanan dan aplikasi akhir.

B. Suhu

Kondisi paling optimum pengomposan dari pencapaian suhu antara 55 - 65°C, tetapi harus < 80 °C. Kondisi suhu tersebut juga diperlukan untuk proses inaktivasi dari bakteri patogen di dalam sludge (jika ada). *Moisture content*, kecepatan aerasi, ukuran dan bentuk tumpukan, kondisi lingkungan sekitar dan kandungan nutrisi sangat mempengaruhi distribusi temperatur dalam tumpukan kompos. Sebagai contoh, kecenderungan suhu akan lebih rendah jika kondisi kelembaban berlebih karena panas yang dihasilkan akan digunakan untuk proses penguapan. Sebaliknya kondisi kelembaban yang rendah akan menurunkan aktivitas mikroba dan menurunkan kecepatan pembentukan panas.

C. pH

Kondisi pH optimum untuk pertumbuhan bakteri pada umumnya adalah antara 6.0 - 7.5 dan 5.5 - 8.0 untuk fungi. Selama proses dan dalam tumpukan umumnya kondisi pH bervariasi dan akan terkontrol dengan sendirinya. Kondisi pH awal yang relatif tinggi, misalnya akibat penggunaan kalsium dalam limbah akan melarutkan nitrogen dalam kompos dan selanjutnya akan diemisikan sebagai ammoniak. Tidaklah mudah untuk mengatur kondisi pH dalam tumpukan massa kompos untuk pencapaian pertumbuhan biologis yang optimum, dan untuk itu juga belum ditemukan kontrol operasional yang efektif.

D. Konsentrasi Nutrisi

Unsur karbon dan nitrogen keduanya dibutuhkan sebagai sumber energi untuk pertumbuhan mikroorganisme, yaitu 30 bagian Karbon (C) dan 1 bagian Nitrogen (N) atau C/N ratio = 30 dalam perbandingan berat. Untuk itu maka proses pengomposan yang paling efisien mempersyaratkan kebutuhan C/N ratio antara 25 - 35 sebagai perbandingan yang paling ideal. Unsur C dalam ratio tersebut dipandang sebagai *biodegradable carbon*. Ratio C/N yang rendah, atau kandungan unsur N yang tinggi akan meningkatkan emisi dari Nitrogen sebagai ammoniak. Sedangkan ratio C/N yang tinggi, atau kandungan unsur N yang relatif kurang / rendah akan menyebabkan proses

pengomposan berlangsung lebih lambat dan Nitrogen menjadi faktor penghambat (*growth-rate limiting factor*).

E. Kebutuhan Oksigen

Persyaratan konsentrasi optimum dari oksigen di dalam massa kompos antara 5 - 15 % volume. Peningkatan kandungan oksigen melewati 15 %, misalnya akibat pengaliran udara yang terlalu cepat atau terlalu sering dibalik akan menurunkan temperatur dari sistem. Setidaknya diperlukan kandungan Oksigen > 5 % untuk menjaga kestabilan kondisi aerobik, meskipun pada kondisi konsentrasi oksigen di dalam tumpukan yang hanya ~ 0.5 % tidak didapati adanya kondisi anaerobik.

Pada proses pengomposan secara aerobik, oksigen mutlak dibutuhkan. Mikroorganisme yang terlibat dalam proses pengomposan membutuhkan oksigen dan air untuk merombak bahan organik dan mengasimilasikan sejumlah karbon, nitrogen, fosfor, belerang, dan unsur lainnya untuk sintesis protoplasma sel tubuhnya. Karbon diasimilasikan lebih banyak daripada nitrogen dan digunakan sebagai sumber energi serta membentuk protoplasma. Sekitar dua pertiga bagian dari karbon dikeluarkan dalam bentuk karbon dioksida (CO₂), sedangkan sisanya akan berkombinasi dengan nitrogen dalam sel. Proses perombakan bahan organik secara aerobik akan menghasilkan humus, karbon dioksida, air, dan energi. Beberapa bagian energinya digunakan untuk pertumbuhan mikroorganisme, dan sisanya dikeluarkan dalam bentuk panas. Secara keseluruhan reaksinya akan berlangsung sebagai berikut^[9]:

Mikroba aerob
Bahan organik > CO₂ + H₂O + unsur hara + humus + energi

Pembuatan POC Secara Fermentasi Aerob Menggunakan Bioaktivator

Proses pembuatan POC dari limbah cair pra penyamakan kulit pasca iradiasi (cairan E) dilakukan dengan komposter secara fermentasi dalam tangki fermentasi pada Gambar 3 menggunakan bioaktivator seperti Boisca atau Effective Microorganism (EM4) yang mudah diperoleh di toko-toko kimia dan pertanian. Bioaktivator merupakan bahan yang membantu mempercepat proses pembuatan POC dan meningkatkan kualitasnya. Beberapa manfaat bioaktivator bagi tanaman dan tanah^[8]:

1. Menghambat pertumbuhan hama dan penyakit tanaman dalam tanah

2. Membantu meningkatkan kapasitas fotosintesis tanaman
3. Membantu proses penyerapan dan penyaluran unsur hara dari akar ke daun
4. Meningkatkan kualitas bahan organik sebagai pupuk
5. Meningkatkan kualitas pertumbuhan vegetatif dan generatif tanaman

Konsep pembuatan POC dari limbah cair pra penyamakan kulit pasca iradiasi seperti pada Gambar 3 dapat dilakukan dengan cara mengadopsi pembuatan kompos dari limbah organik dengan bioaktivator sebagai berikut^[8, 9]

1. Air sumur atau air PAM yang tidak mengandung kaporit dimasukkan ke dalam sprayer 1 liter. Keberadaan kaporit dalam air dapat mematikan mikroba yang ada di dalam bioaktivator.
2. Untuk peningkatan kualitas POC, maka ke dalam komposter dapat ditambahkan tepung tulang sebanyak 2 – 3% dari berat limbah organik sebagai sumber Ca dan P, tepung cangkang telur sebanyak 1% dari berat limbah organik sebagai sumber Ca, dan sekam padi atau serbuk gergaji sebanyak 3% dari berat limbah organik sebagai sumber K sebelum dilakukan proses pengomposan.
3. Cairan bioaktivator sebanyak 1 – 2 tutup botol Boisca atau EM4 ditambahkan ke dalam sprayer, kemudian disemprotkan ke dalam komposter yang sebelumnya telah terisi dengan limbah cair pasca iradiasi, tepung tulang, tepung cangkang telur, sekam padi atau serbuk gergaji.
4. Proses pengomposan di dalam komposter dilakukan secara aerob, maka diperlukan aliran udara ke dalam limbah cair dalam komposter secara aerasi. Aliran udara selain berfungsi untuk proses

pengomposan, juga dimaksudkan untuk mengusir sisa-sisa gas hasil pembusukan senyawa organik (protein) dalam limbah cair oleh mikroorganisme selama berlangsung proses pengomposan.

5. Proses pengomposan limbah cair dalam komposter berlangsung kira-kira 3 – 4 hari dengan hasil analisis C/N < 20.
6. Cairan dalam komposter dimasukkan ke dalam drum dengan dilewatkan melalui penyaring kain yang halus yang dipasang pada mulut drum.
7. Cairan dalam drum dibiarkan selama 1 – hari agar partikel-partikel suspensi dapat mengendap dan cairan menjadi bening.
8. Cairan bening ini sudah menjadi POC dan dimasukkan ke dalam botol kemasan, diberi label, dan siap dijual.

Spesifikasi dan POC dalam Kemasan di Pasaran Dalam Negeri

Spesifikasi POC tergantung dari bahan baku, teknik pembuatan, dan keinginan dari para pembuatnya yang dapat dilakukan oleh industri rumah tangga (home industry), industri menengah seperti koperasi dan kelompok tani, dan industri besar seperti pabrik pupuk yang menggunakan beberapa peralatan besar dan modern untuk memproduksi pupuk organik dalam skala besar yang selalu terjaga kualitasnya. Hal inilah yang menyebabkan beberapa produk POC yang ada di pasaran akan selalu berbeda spesifikasi dan harganya seperti pada Tabel 1. Fungsi POC lebih unggul daripada kompos padat biasa, maka harganya jauh lebih mahal jika dibandingkan dengan kompos padat yang harganya sekitar Rp. 1.000/kg^[10].

Tabel 1. Spesifikasi dan harga pupuk organik cair yang ada di pasaran^[11]

Nutrisi	Kandungan nutrisi beberapa pupuk organik cair di pasaran			
	2 N	Stim	Super Top Soil	Bio KG Florist
Harga	Rp. 37.000/liter	Rp. 22.500/liter	Rp. 30.000/liter	Rp. 65.000/liter
N	5,2 %	1,22 %	1,8 %	0,23 %
P ₂ O ₅	0,243 %	0,92 %	0,76 %	0,02 %
K ₂ O	0,023 %	1,38 %	0,38 %	0,13 %
CaO	1,360 mg/l	1.100 mg/l	0,971 mg/l	1200 mg/l
MgO	10,1 mg/l	500 mg/l	0,129 mg/l	0,003 mg/l
S	8,8 mg/l	600 mg/l	2,15 mg/l	300 mg/l
Fe	186,6 mg/l	11,58 mg/l	236 mg/l	75,87 mg/l
Zn	10,1 mg/l	11,4 mg/l	-	16,01 mg/l
Cu	14,9 mg/l	9,74 mg/l	2,11 mg/l	0,03 mg/l
Mn	21,6 mg/l	8,24 mg/l	15,8 mg/l	16,38 mg/l

Tabel 2. Fungsi nutrisi pada pupuk organik terhadap tanaman ^[11]

Nutrisi	Fungsi dalam tanaman
N	Membuat bagian tanaman menjadi lebih hijau segar karena banyak mengandung butir hijau daun yang penting dalam proses fotosintesa, mempercepat pertumbuhan tanaman (tinggi, jumlah anakan, cabang, dan lain-lain), menambah kandungan protein hasil panen
P ₂ O ₅	Merangsang pertumbuhan akar, khususnya akar benih dan tanaman muda, sebagai bahan mentah untuk pembentukan sejumlah protein tertentu, membantu asimilasi dan pernafasan, mempercepat pemasakan biji dan buah.
K ₂ O	Membantu pembentukan protein dan karbohidrat, memperkuat tubuh tanaman agar daun, bunga, dan buah tidak mudah gugur.
CaO	Merangsang pembentukan bulu-bulu akar, mengeraskan batang tanaman, merangsang pembentukan biji, menetralkan senyawa atau suasana yang tidak menguntungkan bagi tanaman.
MgO	Menciptakan hijau daun yang sempurna dan terbentuk karbohidrat, lemak dan minyak-minyak, transformasi fosfat dalam tanaman.
S	Membantu pembentukan butir hijau daun sehingga daun menjadi lebih hijau, menambah kandungan protein dan vitamin hasil panen, meningkatkan jumlah anakan yang menghasilkan, berperan penting pada proses pembulatan zat gula.
Fe	Membantu pernafasan tanaman dan pembentukan hijau daun.
Zn	Memberi dorongan terhadap pertumbuhan tanaman karena diduga seng dapat membentuk hormon tumbuh.
Cu	Mendorong terbentuknya hijau daun dan dapat menjadi bahan utama dalam berbagai enzim.
Mn	Sebagai komponen untuk memperlancar proses asimilasi, merupakan komponen penting dalam berbagai enzim.

Fungsi Nutrisi pada Pupuk Organik Cair (POC) Terhadap Tanaman

Tanaman dalam pertumbuhannya memerlukan paling sedikit 16 unsur hara agar pertumbuhannya normal. Dari ke-16 unsur hara tersebut, tiga unsur (karbon, hidrogen, dan oksigen) diperoleh dari udara, sedangkan 13 unsur lagi disediakan oleh tanah. Ke-13 unsur tersebut adalah nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), klor (Cl), besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), seng (Zn), boron (B), dan molibdenum (Mo). Untuk memenuhi kebutuhan unsur hara tanaman dengan mengandalkan unsur hara yang tersedia dalam tanah itu tidak cukup, karena unsur hara yang terkandung dalam tanah relatif sedikit kuantitas unsur haranya tidak dapat memenuhi tanaman tertentu. Hal ini dapat terpenuhi dengan menambahkan unsur hara dari sumber pupuk organik. Fungsi unsur hara dalam pupuk organik pada tanaman dijelaskan pada Tabel 2.

KESIMPULAN

Dari hasil kajian dapat disimpulkan bahwa Mesin Berkas Elektron (MBE) yang ada di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) – BATAN dengan energi 0,35 MeV/5 mA dimungkinkan dapat digunakan untuk kegiatan litbang pem-

buatan POC dari limbah cair pra penyamakan kulit pasca iradiasi. Mengingat harga POC di pasaran cukup tinggi, maka kemungkinan limbah cair dari proses pra penyamakan kulit pasca iradiasi berkas elektron layak dapat dikonversi menjadi POC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SUPRIYANTO, A., Aplikasi Wastewater Sludge untuk Proses Pengomposan Serbuk Gergaji, PT. Novarties Biochemie, Citeurep Bogor Indonesia, http://sinergy-forum.net/zoa/paper/html/paper_AgusSupriyanto.html, 4 Feb. 2007.
- [2] ANONIM, Teknologi Pengendalian Dampak Lingkungan Industri Penyamakan Kulit, Buku Panduan, Bapedal, (1996).
- [3] YUWONO, N.W., Pupuk, <http://nasih.staff.ugm.ac.id/p/index.htm>, 13 Februari 2007
- [4] BASKORO, T., Mikrobiologi Umum, edisi 6, Gadjah Mada University Press, (1994).
- [5] URBANAVICIUS, A., Free Radical Damages In Proteins, www.cryst.bbk.ac.uk/pps97/assignments/projects/adomas/Free_Radical_Damages_In_Proteins.html#damages, 2 Maret 2007.
- [6] LAVALE, D.S., SHAH, M.R., RAWAT, K.P., GEORGE, J.R., Sewage Sludge Irradiators

- Batch and Continuous Flow, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, (1997), pp. 289–301.
- [7] SAMPA., M.H.O., On Going Research in Brazil Using Electron Beam Liquid Waste Treatment, In : Status of Industrial Scale Radiation Treatment of Wastewater and its Future, Proceedings of a Consultants Meeting Held in Daejon, (2003), pp. 29 – 36.
- [8] HADISUWITO, S., Membuat Pupuk Kompos Cair, PT. AgroMedia Pustaka, Cetakan Pertama, Jakarta, (2007).
- [9] SIMAMORA, S., SALUNDIK, Meningkatkan Kualitas Kompos, PT. AgroMedia Pustaka, Cetakan Pertama, Jakarta, (2006).
- [10] Composter Rotary Klin BioPhosko, http://www.kencanaonline.com/online/product_info.php?cPath=32&products_id=271, 26 Oktober 2007
- [11] EFFENDI, D., Pengolahan dan Kajian Kemungkinan Pemanfaatan Air Limbah Industri Susu PT. Sarihusada Tbk. Jogjakarta untuk Pupuk Organik Cair, Skripsi Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Stiper Jogjakarta, (2004).

TANYA JAWAB

Indraswari Suroso

- *Apakah pengaruh H₂S dalam detoksifikasi untuk meningkatkan produk tanaman dalam pembuatan pupuk organik cair*

Herry Poernomo

- Pengaruh H₂S sebetulnya tidak baik karena H₂S bersifat toksis dan berbau busuk. Tetapi dengan teknologi iradiasi berkas elektron maka H₂S akan terkoversi oleh radikal bebas O menjadi SO₂, yang selanjutnya bereaksi dengan NH₃ hasil dekomposisi protein oleh radikal bebas OH dan O serta H₂O dan oksigen menjadi (NH₄)₂ SO₄ toksis yang biasa disebut pupuk ZA (Zuouwerzure Ammonium)

Mudjjana

- *Apakah pupuk organik dari limbah cair ini dapat digunakan untuk hydrophonix tomat, terong dan lain-lainnya?*

Herry Poernomo

- Pupuk organik cair (POC) dari limbah cair pra penyamakan kulit dapat digunakan sebagai pupuk/ media hydrophonix seperti tomat, terong dll., jika sudah di treatment secara radiasi dengan berkas elektron dan difermentasi menggunakan bioaktivator

Sri Rinanti Susilowati

- *Sebelum dilakukan proses iradiasi apakah diperlukan treatment tertentu, seandainya ada, apa manfaatnya*
- *Selain limbah penyamakan kulit adakah limbah yang lain yang dapat dibuat pupuk organik cair?*

Herry Poernomo

- Perlu dilakukan treatment tertentu seperti penyaringan dari suspensi padat. Manfaatnya adalah supaya suspensi tidak mengganggu dalam pembuatan POC
- Selain limbah penyamakan kulit juga ada limbah cair dari industri pangan seperti susu, ikan, daging dalam kaleng

PERAN PENAMBAHAN Y DAN Ce TERHADAP SIFAT KETAHANAN OKSIDASI MATERIAL INTERMETALIK TiAl DAN FeAl.

Lely Susita R.M., Suprpto, Tjipto Sujitno

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

ABSTRAK

PERAN PENAMBAHAN Y DAN Ce TERHADAP SIFAT KETAHANAN OKSIDASI MATERIAL INTERMETALIK TiAl DAN FeAl. Peningkatan sifat ketahanan oksidasi material memerlukan rekayasa permukaan karena oksidasi biasanya dimulai dari permukaan. Dalam penelitian ini telah dilakukan implantasi ion Y dan Ce pada permukaan material intermetalik TiAl dan FeAl untuk meningkatkan sifat ketahanan oksidasi paduan tersebut. Sifat ketahanan oksidasi dari material TiAl dan FeAl disebabkan karena selama beroperasi mampu membentuk lapisan oksida pelindung seperti Y_2O_3 dan Ce_2O_3 . Untuk pengujian pada kondisi siklus termal, material dioksidasi pada suhu 850 °C dengan waktu pemanasan selama 5 jam dan pendinginan pada suhu kamar selama 19 jam. Proses oksidasi dilakukan dalam lingkungan oksigen, yang diperoleh dengan cara mengalirkan gas oksigen ke dalam tabung oksidasi dengan laju alir 0,019 cc/menit dan tekanan 1,5 kgf/cm². Berdasarkan analisis data hasil penelitian, menunjukkan bahwa implantasi ion Y dan Ce pada material TiAl memberikan efek ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan implantasi ion Y dan Ce pada material FeAl. Kondisi optimum dari penambahan Y dan Ce dalam meningkatkan ketahanan oksidasi material FeAl selama siklus termal masing-masing dicapai pada dosis ion Y $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan Ce $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², sedangkan kondisi optimum untuk meningkatkan ketahanan oksidasi Ti30Al dan Ti50Al masing-masing diperoleh pada dosis ion Ce $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion Y $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm².

ABSTRACT

THE ROLE OF Y AND Ce ADDITION ON THE OXIDATION RESISTANCE OF TiAl AND FeAl INTERMETALLICS MATERIALS. Improvement of oxidation resistance properties needs an engineering surfaces, because the oxidation usually initiated from the surfaces. In this research addition of Y and Ce into TiAl and FeAl intermetallics surfaces has been done using ion implantation technique. The aim of this research is to study the effect of Y and Ce addition on their oxidation resistance properties. Improving of oxidation resistance properties of TiAl and FeAl materials is caused by the formation of protective layer of Y_2O_3 and Ce_2O_3 . For testing at thermal cycling condition, the samples were oxidized at 850 °C of temperature for 5 hours and cooled at room temperature for 19 hours. The oxidation process were carried out in oxygen environment by introducing the oxygen gas into furnace tube at flowrate 0,019 cc/min and pressure 1,5 kgf/cm². Based on the result and data analysis, it was found that the addition of Y and Ce can better improve the oxidation resistance of TiAl materials compared to the oxidation resistance of FeAl. Optimum conditions of Y and Ce ion dose in addition of oxidation resistance of FeAl during thermal cycling is 2.98×10^{15} ion/cm² and 4.47×10^{15} ion/cm² respectively, while optimum conditions for improving of oxidation resistance of Ti30Al and Ti50Al is achieved at Ce ion dose in order of 2.98×10^{15} ion/cm² and Y in order of 2.98×10^{15} ion/cm² respectively

PENDAHULUAN

Material intermetalik TiAl banyak digunakan sebagai material *airframe high performance* dan turbin gas, karena memiliki massa jenis yang rendah, temperatur leleh yang tinggi, kekuatan yang baik pada temperatur tinggi dan ketahanan mulur yang baik pula. Berdasarkan keunggulan sifatnya dan didukung oleh sifat ketahanan oksidasi yang baik pada temperatur tinggi, maka material ini banyak digunakan pada industri pesawat terbang sebagai

material yang dominan tetapi dalam jumlah yang terbatas karena kelemahan material TiAl tidak tahan terhadap operasi di atas suhu 700°C dan keuletannya menurun^[1]. Material TiAl di atas suhu 700°C tidak membentuk oksida proteksi selama proses oksidasi dalam udara, umumnya terbentuk campuran oksida Al_2O_3/TiO_2 yang mempunyai sifat non proteksi. Terbentuknya lapisan non proteksi disebabkan oleh menipisnya komponen Al/Ti karena untuk konsumsi pembentukan Al_2O_3/TiO_2 . Fenomena terbentuknya lapisan non proteksi yang menyebabkan laju pertumbuhan oksida yang cepat

biasanya terjadi pada waktu pemaparan yang cukup lama^[2].

Peningkatan ketahanan oksidasi suatu material memerlukan rekayasa permukaan karena oksidasi biasanya dimulai dari permukaan material. Salah satu metode yang digunakan untuk tujuan tersebut adalah teknik implantasi ion, yaitu suatu teknik untuk menambahkan atau mengimplantasikan unsur dopan ke dalam material target. Unsur dopan yang ditambahkan atau diimplantasikan ke dalam material untuk meningkatkan ketahanan oksidasi dinamakan elemen reaktif. Unsur-unsur yang termasuk dalam elemen reaktif antara lain Ce dan Y. Elemen reaktif tersebut dapat berperan sebagai penyetabil dan penambah daya lekat (*adherence*) dari lapisan oksida protektif yang telah terbentuk sehingga menjadi kuat walaupun terjadi siklus termal^[3].

Efek dari penambahan elemen reaktif pada material TiAl maupun FeAl untuk jumlah tertentu akan mengurangi kerusakan dari lapisan oksida yang telah terbentuk akibat siklus termal dengan kata lain dapat menghambat laju oksidasi, hal ini disebabkan karena material TiAl dan FeAl yang mengandung elemen reaktif mampu membentuk lapisan oksida pelindung (*protective oxide layer*) yang berperan sebagai penghambat difusi oksigen sehingga diperoleh laju pertumbuhan oksida yang lebih lambat dibandingkan material TiAl dan FeAl^[4].

Penelitian ini dilakukan untuk mengamati sifat ketahanan oksidasi pada material TiAl dan FeAl yang tidak diimplantasi maupun yang diimplantasi dengan ion Y dan Ce setelah proses oksidasi. Selama proses oksidasi, pemanasan cuplikan dilakukan pada suhu 800°C berkenaan dengan pemakaian TiAl dan FeAl sebagai material struktural pada temperatur menengah (600°C – 800°C).

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Tahapan dalam penelitian ini meliputi

1. Persiapan cuplikan dari material Ti30Al (komposisi 70% Ti dan 30% Al), Ti50Al (komposisi 50% Ti dan 50% Al) dan FeAl meliputi pemotongan dalam bentuk keping, penghalusan dengan kertas abrasif, dan pencucian cuplikan dengan menggunakan alkohol untuk menghilangkan adanya kontaminasi (debu, minyak atau lemak) pada permukaan cuplikan.
2. Teknik eksperimen, setiap cuplikan yang telah disiapkan diimplantasi dengan ion yttrium dan

cerium pada berbagai variasi dosis ion, hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan material dengan sifat ketahanan oksidasi yang optimal.

3. Pengujian atau karakterisasi, meliputi uji oksidasi dan pengukuran perubahan berat sebagai akibat proses oksidasi dengan menggunakan neraca analitis (ketelitian 0,1 mg). Uji oksidasi dilakukan dalam media oksigen pada kondisi siklus termal dengan waktu pemanasan setiap siklus termal 5 jam pada suhu 800°C dan pendinginan 19 jam pada suhu kamar. Selama uji siklus termal, cuplikan dimasukkan ke dalam tabung yang dialiri gas oksigen dengan laju aliran 0,019 cc/menit dan tekanan 1,5 kgf/cm². Adanya oksigen di lingkungan sekitar cuplikan menyebabkan terjadinya proses oksidasi pada suhu 800°C.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Parameter implantasi ion

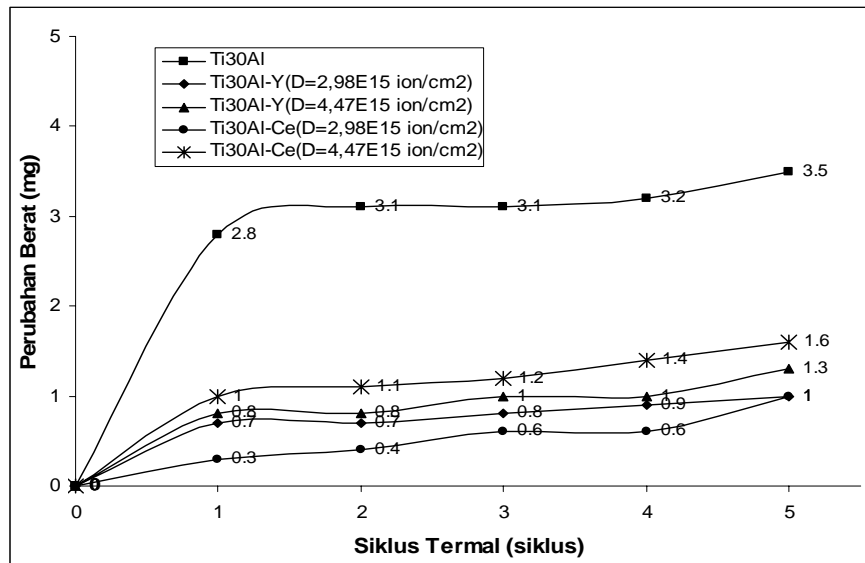
Dalam teknik implantasi ion, terdapat parameter penting yang akan mempengaruhi perubahan sifat ketahanan oksidasi material setelah berakhirnya proses implantasi ion. Parameter tersebut adalah energi ion, dosis ion, massa atau jenis ion dopan dan massa atau jenis material target. Dosis ion akan menentukan jumlah ion atau prosentase ion yang diimplantasikan, sedangkan besarnya dosis ion ditentukan oleh besarnya arus berkas ion yang dihasilkan oleh sumber ion dan waktu pada saat berlangsungnya proses implantasi. Energi ion akan menentukan kedalaman penetrasi ion dopan (berhubungan dengan jangkauan ion) pada permukaan material target, sedangkan besarnya energi ion ditentukan oleh besarnya tegangan tinggi pemercepat ion dopan.

Quadackers dkk.^[5] menyebutkan bahwa penambahan ion dopan akan efektif bila jumlahnya berkisar antara 0,1% hingga 2% berat tergantung dari jenis ion dopan maupun material targetnya, dan terdistribusi secara merata pada kedalaman orde 500 Å.

Sebelum proses implantasi ion terlebih dahulu dilakukan perhitungan teoritis dan simulasi program SRIM. Hasil perhitungan ini ditampilkan pada Tabel 1, dan dari data-data tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk memprediksi prosentase ion.

Tabel 1. Parameter hasil perhitungan proses implantasi ion

Material Target	Jenis Ion Dopan	Energi Ion (keV)	Jangkau Ion (Å)	Dosis Ion (ion/cm ²)	% Ion
Ti30Al	Y	100	424	2,98×10 ¹⁵	1,37
				4,47×10 ¹⁵	2,04
	Ce	100	346	2,98×10 ¹⁵	1,91
				4,47×10 ¹⁵	2,84
Ti50Al	Y	100	453	2,98×10 ¹⁵	1,33
				4,47×10 ¹⁵	1,98
	Ce	100	371	2,98×10 ¹⁵	1,84
				4,47×10 ¹⁵	2,73
FeAl	Y	100	259	2,98×10 ¹⁵	1,67
				4,47×10 ¹⁵	2,49
				5,96×10 ¹⁵	3,29
				7,45×10 ¹⁵	4,08
	Ce	100	211	2,98×10 ¹⁵	2,35
				4,47×10 ¹⁵	3,42
				5,96×10 ¹⁵	4,59
				7,45×10 ¹⁵	5,61



Gambar 1. Laju oksidasi siklus termal Ti30Al, Ti30Al-Y dan Ti30Al-Ce hasil implantasi ion pada dosis ion 2,98×10¹⁵ ion/cm² dan 4,47×10¹⁵ ion/cm²

Uji oksidasi siklus termal

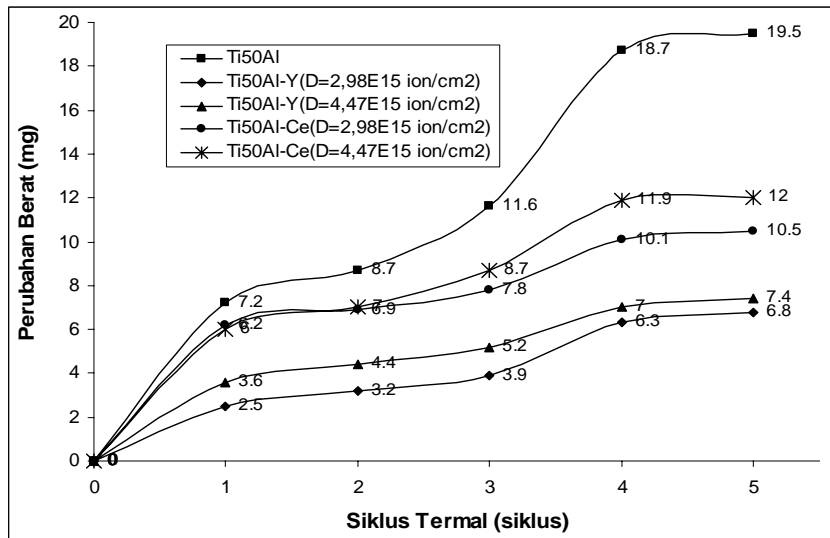
Cuplikan TiAl dan FeAl yang telah diimplantasi dengan ion dopan yttrium (Y) dan cerium (Ce) diuji sifat ketahanan oksidasinya dalam media oksigen selama 7 siklus termal dengan waktu pemanasan setiap siklus termal 5 jam pada suhu 850°C dan pendinginan 19 jam pada suhu kamar. Selama proses oksidasi berlangsung pada cuplikan TiAl dan

FeAl, probabilitas terbesar terjadinya oksidasi adalah antara yttrium dan oksigen membentuk oksida yttrium (Y₂O₃) serta antara cerium dan oksigen membentuk oksida cerium (Ce₂O₃), karena oksidasi dimulai dari permukaan cuplikan yang mengandung kedua jenis dopan tersebut.

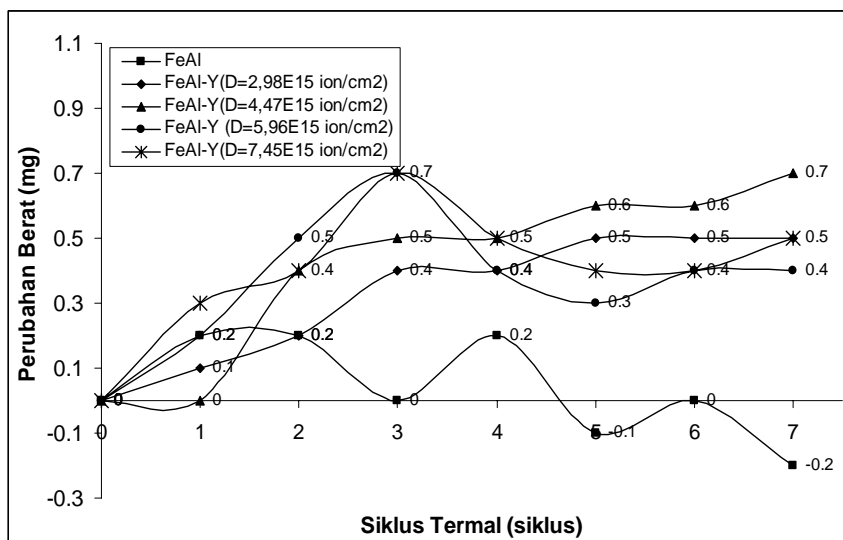
Oksida yang stabil dan tidak mudah menguap diharapkan akan tetap tinggal pada permukaan TiAl

dan FeAl yang disertai dengan peningkatan berat cuplikan. Apabila oksida tetap lekat dan menjadi penghalang difusi oksigen akan menyebabkan laju oksidasi semakin berkurang. Dalam hal ini laju oksidasi berbanding terbalik dengan berat oksida. Persamaan untuk laju oksidasi seperti ini $dy/dt = c/y$, kalau diintegrasikan menjadi $y^2 = c t$ dengan y : berat oksida, t : waktu dan c : adalah konstanta. Apabila oksida yang terbentuk berpori dan tidak berfungsi sebagai pelindung maka laju pertumbuhan oksida konstan terhadap waktu. $dy/dt = c$, yang bila diintegrasikan menghasilkan $y = c t$ ^[1].

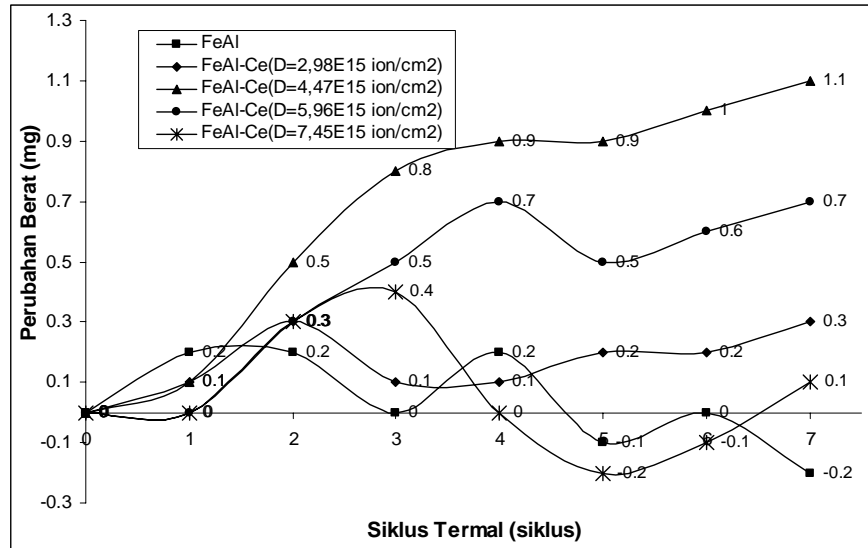
Apabila oksida yang terbentuk berpori dan tidak berfungsi sebagai pelindung maka laju pertumbuhan oksida konstan terhadap waktu. $dy/dt = c$ ^[1]. Metode pengukuran laju oksidasi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode konvensional dengan menggunakan neraca analitis merk Sartorius tipe 2462, yang mempunyai ketelitian 0,1 mg. Hasil uji oksidasi siklus termal dalam lingkungan oksigen pada suhu 850°C untuk paduan TiAl dan FeAl yang diimplantasi dengan ion Y dan Ce untuk berbagai variasi dosis ion disajikan pada Gambar 1 – 4.



Gambar 2. Laju oksidasi siklus termal Ti50Al, Ti50Al-Y dan Ti50Al-Ce hasil implantasi ion pada dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm²



Gambar 3. Laju oksidasi siklus termal FeAl dan FeAl-Y hasil implantasi ion pada dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm², dan $7,45 \times 10^{15}$ ion/cm².



Gambar 4. Laju oksidasi siklus termal FeAl dan FeAl-Ce hasil implantasi ion pada dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm², dan $7,45 \times 10^{15}$ ion/cm².

PEMBAHASAN

Sifat ketahanan oksidasi material Ti30Al dan Ti50Al

Dari hasil uji oksidasi menunjukkan bahwa selama uji oksidasi pada permukaan Ti30Al dan Ti50Al, oksida yang terbentuk pada awal oksidasi hingga akhir siklus semakin tebal (laju oksidasinya cepat). Hal ini menandakan bahwa oksida yang telah terbentuk tidak mampu merintanginya masuknya oksigen ke permukaan Ti30Al maupun Ti50Al. Namun demikian dalam rentang 5 siklus termal, tidak terjadi pengelupasan oksida untuk semua dosis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan oksida pelindung yang terbentuk mempunyai daya lekat yang kuat sehingga mampu menghalangi proses oksidasi selanjutnya.

Pengaruh implantasi ion Y dan Ce terhadap sifat ketahanan oksidasi material Ti30Al

Ion Y dan Ce yang diimplantasikan pada permukaan Ti30Al divariasikan pada dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm². Pada Gambar 3 terlihat adanya kecenderungan terbentuknya lapisan oksida yang bersifat protektif, baik untuk Ti30Al yang diimplantasi dengan ion Y maupun Ce. Pada rentang waktu oksidasi dari awal oksidasi hingga akhir siklus, laju oksidasinya lebih kecil dari pada Ti30Al yang tidak diimplantasi. Hal ini disebabkan karena material yang mengandung Y atau Ce akan

terbentuk lapisan Y_2O_3 atau Ce_2O_3 yang berperan sebagai penghambat difusi oksigen sehingga mengurangi laju oksidasi.

Dapat disimpulkan bahwa penambahan ion Y atau Ce pada material Ti30Al mampu meningkatkan ketahanan oksidasi material Ti30Al. Hal ini ditunjukkan adanya penurunan laju oksidasi. Kondisi optimum dari penambahan ion Y atau Ce dalam meningkatkan ketahanan oksidasi material Ti30Al selama siklus termal dicapai pada dosis ion Ce $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², karena pada dosis ini laju oksidasinya paling rendah.

Pengaruh implantasi ion Y dan Ce terhadap sifat ketahanan oksidasi material Ti50Al

Ion Y dan Ce yang diimplantasikan ke permukaan Ti50Al divariasikan pada dosis ion tertentu, yaitu $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm². Dari hasil uji oksidasi menunjukkan bahwa laju oksidasi dipengaruhi oleh implantasi elemen reaktif Y dan Ce pada permukaan Ti50Al.

Laju oksidasi Ti50Al yang diimplantasi dengan ion Ce mempunyai profil laju oksidasi yang hampir sama dengan Ti50Al yang tidak diimplantasi. Namun demikian ketahanan oksidasi material Ti50Al yang diimplantasi ion Ce masih lebih baik dari pada Ti50Al yang tidak diimplantasi, hal ini ditunjukkan adanya penurunan laju oksidasi. Pada Ti50Al yang diimplantasi ion Y pada dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm²

mempunyai profil laju oksidasi yang lebih baik dari pada Ti50Al yang diimplantasi dengan ion Ce, karena pada kondisi ini laju oksidasinya lebih rendah. Dalam rentang 5 siklus termal tidak terjadi pengelupasan oksida untuk Ti50Al yang tidak diimplantasi maupun yang diimplantasi dengan ion Y dan Ce, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Dapat disimpulkan bahwa penambahan ion Y dan Ce pada material Ti50Al mampu meningkatkan ketahanan oksidasi material Ti50Al. Kondisi optimum untuk meningkatkan ketahanan oksidasi diperoleh pada dosis ion Y sebesar $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² karena pada dosis ini laju oksidasinya lebih mendatar.

Sifat ketahanan oksidasi material FeAl

Selama uji oksidasi, pembentukan oksida pada permukaan cuplikan FeAl ditandai dengan adanya lapisan tipis berwarna hitam yang dapat diamati secara visual. Oksida yang terbentuk pada awal oksidasi hingga siklus kedua mengalami peningkatan. Namun ketika waktu oksidasi lebih dari dua siklus, laju oksidasinya menurun karena terjadi pengelupasan oksida yang telah terbentuk. Pada siklus yang keempat, laju oksidasinya mengalami peningkatan dan akhirnya turun kembali karena terjadi pengelupasan oksida bahkan sampai ke material induk. Peristiwa ini ditandai dengan berat cuplikan setelah oksidasi lebih kecil dibandingkan dengan sebelum oksidasi. Pengelupasan ini berlanjut sampai pada akhir siklus, yaitu siklus yang ketujuh, sehingga berat cuplikan setelah oksidasi lebih kecil dibandingkan dengan berat cuplikan sebelum oksidasi. Ada beberapa faktor yang menyebabkan pengelupasan oksida tersebut, antara lain

1. Adanya *thermal stress* yang muncul akibat siklus termal dan *stress* akibat pertumbuhan oksidanya sendiri. Apabila siklus termal berlangsung lama dan terus menerus maka akumulasi *thermal stress* akan semakin besar, sehingga oksida yang telah terbentuk tidak mampu lagi menahan beban tersebut, sebagai akibatnya terjadilah pengelupasan oksida.
2. Terbentuknya lapisan non proteksi yang disebabkan oleh menipisnya komponen aluminium karena untuk pembentukan alumina (Al₂O₃)

Kelemahan ini dapat diperbaiki dengan menambahkan elemen reaktif pada jumlah tertentu (0,1% - 2%) dengan teknik implantasi ion. Elemen reaktif yang diimplantasikan ke permukaan cuplikan FeAl tersebut adalah yttrium (Y) dan cerium (Ce). Unsur-unsur ini sangat mudah

bereaksi dengan oksigen, dan oksida yang terbentuk bersifat protektif.

Pengaruh implantasi ion Y terhadap sifat ketahanan oksidasi material FeAl

Ion Y yang diimplantasikan ke permukaan FeAl divariasikan pada dosis ion tertentu, yaitu $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm², dan $7,45 \times 10^{15}$ ion/cm². Dari hasil uji oksidasi menunjukkan bahwa laju oksidasi dipengaruhi oleh implantasi ion Y pada permukaan FeAl. Semakin besar dosis ion Y maka semakin besar laju oksidasinya. Hal ini disebabkan oleh semakin bertambahnya ion Y untuk membentuk oksida yttrium

Profil kinetika oksidasi FeAl yang tidak diimplantasi maupun yang diimplantasi dengan ion Y ditunjukkan oleh Gambar 1. Pada FeAl yang diimplantasi dengan ion Y pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², oksida yang terbentuk sudah mempunyai daya lekat yang kuat, hal ini ditunjukkan dengan tidak terjadinya pengelupasan oksida yang telah terbentuk selama rentang waktu oksidasi 7 siklus. Sedangkan untuk dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $7,45 \times 10^{15}$ ion/cm², laju oksidasinya meningkat dari awal oksidasi hingga siklus yang ketiga, setelah itu laju oksidasi menjadi turun karena terjadi pengelupasan oksida. Namun pengelupasan oksida yang terjadi pada FeAl yang diimplantasi dengan ion Y tidak sampai ke material induknya.

Secara umum implantasi ion Y ke permukaan FeAl mampu meningkatkan ketahanan oksidasi dibandingkan dengan FeAl yang tidak diimplantasi. Kondisi optimum dari penambahan ion Y dalam meningkatkan ketahanan oksidasi material FeAl selama siklus termal dicapai pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², karena pada dosis ini laju oksidasinya paling rendah. Hal ini menandakan bahwa oksida yang telah terbentuk bersifat protektif, mampu menghalangi proses oksidasi selanjutnya.

Pengaruh implantasi ion Ce terhadap sifat ketahanan oksidasi material FeAl.

Profil laju oksidasi FeAl yang diimplantasi dengan ion Ce ditunjukkan oleh Gambar 2. Dalam rentang dosis ion antara $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² $7,45 \times 10^{15}$ ion/cm², kondisi optimum untuk meningkatkan ketahanan oksidasi diperoleh pada dosis ion Ce sebesar $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², karena pada dosis ini oksida yang terbentuk sudah mempunyai daya lekat yang kuat, hal ini ditunjukkan dengan tidak terjadinya pengelupasan oksida yang terbentuk selama rentang waktu oksidasi 7 siklus. Sedangkan

FeAl yang diimplantasi dengan ion Ce pada dosis $7,45 \times 10^{15}$ ion/cm² mempunyai profil laju oksidasi yang hampir sama dengan FeAl yang tidak diimplantasi, karena selama proses oksidasi berlangsung, oksida yang terbentuk cenderung bersifat non protektif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan seperti yang telah diuraikan di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut

1. Kelemahan material TiAl dan FeAl untuk aplikasi pada temperatur di atas 700°C dapat diatasi dengan menambahkan elemen reaktif pada jumlah tertentu (0,1% - 2% berat) serta terdistribusi merata pada kedalaman kurang dari 500 Å. Dengan teknik implantasi ion dapat dilakukan penambahan elemen reaktif dalam orde 0,1% - 2% berat secara akurat serta terdistribusi pada kedalaman kurang dari 500 Å dengan mengatur dosis dan energi ion.
2. Implantasi ion Y dan Ce pada material TiAl dan FeAl mampu memberikan kontribusi yang signifikan terhadap perubahan sifat ketahanan oksidasi material TiAl dan FeAl selama siklus termal pada suhu 850°C. Sifat ketahanan oksidasi material TiAl yang diimplantasi dengan ion Y dan Ce lebih baik dibandingkan dengan material FeAl yang diimplantasi dengan ion Y dan Ce.
3. Kondisi optimum dari penambahan ion Y dan Ce dalam meningkatkan ketahanan oksidasi material Ti30Al dan Ti50Al masing-masing diperoleh pada dosis ion Ce $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion Y $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², sedangkan kondisi optimum untuk meningkatkan ketahanan oksidasi FeAl selama siklus termal masing-masing dicapai pada dosis ion Y $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan Ce $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm².

DAFTAR PUSTAKA

- [1] WANG, G.X. and DAHMS, M., "Influence of Heat Treatment on Microstructure of Ti-35%Wt Al Prepared by Elemental Powder Metallurgy", *Scripte Metallurgica et Materialia*, Vol. 26 Hal 717, 1992
- [2] HORNAUER, U., et al., "Microstructure and Oxidation Kinetics of Intermetallic TiAl after Si and Mo Ion Implantation", *Surface and Coatings Technology*, 128-129, (2000), 418-422.

- [3] STRAWBRIDGE, A. and HOU, P.Y., "The Role of Reactive Elements in Oxide Scale Adhesion", *Materials at High Temperatures*, Volume 12, Numbers 2-3 (1994) 177-181.
- [4] MAYER, J., QUADAKKERS, W.J., UNTORO, P., "Improvement of High Temperature Corrosion Resistance of Titanium Aluminides", Draft Proposal for a joint Germany-Indonesian Research Project (2002).
- [5] QUADAKKERS, et al., "Bath to Bath Variations in The Oxidation Behaviour of Alumina Forming Fe-Based Alloys", *Materials and Corrosion*, 51 (2000) 350 – 357.

PENGARUH DOSIS IRADIASI BERKAS ELEKTRON TERHADAP BEBERAPA PARAMETER LINGKUNGAN DARI LIMBAH CAIR INDUSTRI PENYAMAKAN KULIT

M Yazid, Zainul Arifin

*Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan
Badan Tenaga Nuklir Nasional*

ABSTRAK

PENGARUH DOSIS IRRADIASI BERKAS ELEKTRON TERHADAP BEBERAPA PARAMETER LINGKUNGAN DARI LIMBAH CAIR INDUSTRI PENYAMAKAN KULIT. Telah dilakukan penelitian pengaruh dosis iradiasi berkas elektron terhadap parameter fisikokimia lingkungan yang meliputi BOD, COD, DO dan pH serta parameter mikrobiologi khususnya populasi bakteri dari limbah cair industri penyamakan kulit. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendapatkan data beberapa parameter lingkungan tersebut yang diharapkan dapat digunakan sebagai data masukan dalam pembuatan rancangan sistem pengolahan limbah cair industri tersebut. Sampel limbah diperoleh dari salah satu industri penyamakan kulit di Yogyakarta, sedangkan iradiasi dilakukan menggunakan Mesin Berkas Elektron 350 keV/10 mA dengan variasi dosis 5 – 30 kGy. Kemudian dilakukan pengukuran BOD, COD, DO dan pH serta perhitungan populasi bakteri. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa perlakuan iradiasi berkas elektron mengakibatkan penurunan kadar BOD tertinggi pada dosis iradiasi 30 kGy yang mencapai 58 % untuk BOD dan 48 % untuk COD. Selain itu, juga mengakibatkan terjadinya penurunan populasi bakteri pada dosis 5 – 15 kGy, sedangkan pada dosis 25 – 30 kGy semua jenis bakteri mengalami kematian. Jenis bakteri gram positif relatif lebih rentan terhadap radiasi berkas elektron, jika dibandingkan dengan jenis gram negatif.

ABSTRACT

INFLUENCE OF ELECTRON BEAM IRRADIATION DOSE ON SEVERAL ENVIRONMENTAL PARAMETERS FOR THE LIQUID WASTE FROM TANNING LEATHER INDUSTRY. The research on the electron beam dose influence on the physical and chemical parameters in the environment such BOD, COD, DO, pH and the microbiological parameter especially bacterial population in the liquid waste from tanning leather industry has been done. The objective of this research is to obtain the data of several environmental parameters expected can be used as an entry data for designing the waste treatment system for this industry. The waste samples were collected from the tanning leather industry in the vicinity of Yogyakarta while the irradiation was carried out by using Electron Beam Machine 350 keV/10 mA with the variation doses 5 – 30 kGy. The population of bacteria as well as BOD, COD, DO and pH were measured, before and after the irradiation process. From the research result can be concluded that the 30 kGy dose electron beam irradiation can cause the decrease of BOD about 58 % and COD about 48 %. In addition, it also causes the decrease of bacterial population at the irradiation doses 5 – 15 kGy whereas at the irradiation doses 25 – 30 kGy all bacteria were death. The gram positive bacteria is relative more resistant to the electron beam irradiation compared with the gram negative bacteria.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dan industri pada umumnya diikuti dengan peningkatan penggunaan bahan kimia yang mengandung unsur logam berat untuk mendukung kualitas produk yang dihasilkan sehingga menjadi lebih tahan lama dan bermutu tinggi. Berbagai kegiatan industri dapat menimbulkan bermacam-macam limbah yang mengandung zat pencemar baik bahan organik, anorganik, logam berat, maupun radioaktif. Secara fisik, pencemaran oleh limbah industri dapat diindikasikan dengan timbulnya bau yang tidak

sedap dan warna yang dinilai telah merusak estetika. Secara kimia, indikator terjadinya pencemaran lingkungan antara lain ditunjukkan dengan tingginya nilai *Biological Oxygen Demand (BOD)* dan *Chemical Oxygen Demand (COD)* limbah.

Salah satu industri yang menimbulkan limbah berbahaya adalah industri penyamakan kulit, yang dalam prosesnya terdiri dari beberapa tahap yang menghasilkan limbah padat, cair dan gas, yang masing-masing tahap memiliki karakter sifat fisik, kimia maupun biologi yang berbeda-beda. Buangan limbah penyamakan kira-kira 8.000 – 12.000 gallon setiap 1.000 pound bahan basah, yang terdiri dari

8.000 ppm buangan zat padat, 1.500 ppm zat-zat organik, 1.000 ppm protein, 300 ppm NaCl, 1.000 ppm sulfida, 40 ppm Kromium, 60 ppm Amonium Nitrogen dan 1.000 ppm BOD yang memiliki pH di atas 9. Pada umumnya bahan-bahan pencemar tersebut menimbulkan bau yang tidak enak, warna air yang dialiri menjadi keruh karena pencemaran zat-zat organik dari bahan protein dan lemak yang terkandung pada limbah tersebut. Air buangan industri penyamakan kulit dapat mencemarkan badan air penerima, baik secara fisik, kimia, maupun biologis^[1].

Keberadaan zat-zat pencemar yang berlebihan pada suatu lingkungan dapat mempengaruhi kehidupan organisme penyusun ekosistem. Pada tingkat pencemaran yang semakin tinggi dapat mengakibatkan berubahnya keseimbangan ekosistem alam yang dapat merugikan kehidupan manusia. Melihat permasalahan di atas, maka upaya pengembangan teknik pengolahan limbah terus dilakukan.

Penggunaan teknologi Mesin Berkas Elektron untuk pengolahan limbah semakin pesat dilakukan. Beberapa keuntungannya antara lain: MBE memiliki parameter proses iradiasi yang dapat disesuaikan menurut keperluan, proses iradiasi dilakukan dengan mudah dan efisien, kapasitas energi yang dikeluarkan cukup tinggi, sumber radiasi dapat dimatikan jika tidak beroperasi dan tidak memerlukan preparasi pendahuluan^[2].

Salah satu pemanfaatan teknik radiasi adalah untuk melakukan seleksi mikroorganisme yang hidup di dalam limbah sehingga mekanisme kompetisi antar genus yang berbeda menjadi berkurang dan akibatnya dapat memacu pertumbuhan mikroorganisme yang terseleksi tersebut, sehingga akan memacu kinerjanya untuk suatu keperluan tertentu yang telah direncanakan. Menurut penelitian Luthfiana (2002), disebutkan bahwa iradiasi Gamma pada limbah rumah sakit dan limbah rumah tangga memberikan efek yang signifikan untuk proses desinfeksi bakteri patogen. Dosis 20 kGy telah mampu menurunkan populasi bakteri dalam limbah dan pada 25 kGy tak satupun bakteri yang dapat bertahan hidup^[3].

TATA KERJA

Bahan Yang Diperlukan

1. Sampel limbah cair industri penyamakan kulit
2. Media pertumbuhan bakteri antara lain : nutrien agar, nutrien cair, media SIM.
3. Bahan kimia dan reagen antara lain : alkohol 75% dan 90%, reagen kovacs, larutan buffer fosfat,

magnesium sulfat, calcium chloride dan ferri chlorida. serta aquades.

4. Zat warna yang meliputi kristal violet (gram A), iodin (Gram B), etil alkohol (Gram C), safranin (Gram D), malachite green 5%

Peralatan Yang Digunakan

1. Mesin Berkas Elektron 350 keV/10 mA
2. Spektrofotometer
3. Inkubator
4. pH meter, Alat pengukur BOD, Alat pengukur COD, DO meter, Magnetic stirrer, Colony counter, Mikroskop, Lampu buzen, Autoclave, Erlen-meyer, Pipet, Tabung reaksi, Jarum ose, Kassa, Kapas, Beker glass, Nampan, Mikroburet, Labu godog., Petridish

Cara Kerja

Preparasi Sampel

Sampel limbah cair diambil dari industri penyamakan kulit di Yogyakarta. dari bak penampung awal, kemudian diukur pH, temperatur, COD, BOD dan DO awal sebagai kontrol. Iradiasi berkas elektron dilakukan dengan menempatkan sampel dengan ketebalan 0,2 mm ke dalam nampan (35 x 25 cm), di atas konveyor dengan kecepatan 2,7 m/dt, sehingga didapatkan variasi dosis 0 kGy, 5 kGy, 10 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 25 kGy dan 30 kGy. Kemudian dilakukan pengukuran pH, temperatur, COD, BOD dan DO.

Pengukuran BOD

Pengukuran BOD limbah ditentukan dengan pengukuran BOD₅ menggunakan metode Winkler^[4].

Pengukuran Kadar COD

Pengukuran kadar COD limbah^[4] dilakukan dengan cara : sampel diambil 20 cc, ditambah 10 cc N/4 K₂Cr₂O₇, 30 cc H₂SO₄ yang mengandung Ag₂SO₄, kemudian dipanasi selama 30 menit. Setelah itu didinginkan dan ditambah 50 ml aquades. Erlenmeyer didinginkan dengan es dan ditambah 2 atau 3 tetes indikator Ferroin. Dititrasi dengan Fe(NH₄)₂(SO)₄ dari warna hijau kebiruan menjadi coklat kemerah-merahan. Dibuat blanko menggunakan aquades yang diperlakukan sama seperti sampel, kemudian dihitung COD dengan persamaan^[4].

$$mg/l \cdot COD = \frac{(a - b) \times f \times 1.000 \times 2}{ml.sampel}$$

dengan

a = ml $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ yang digunakan titrasi blanko

b = ml $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ yang digunakan untuk titrasi sampel

f = faktor dari $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$

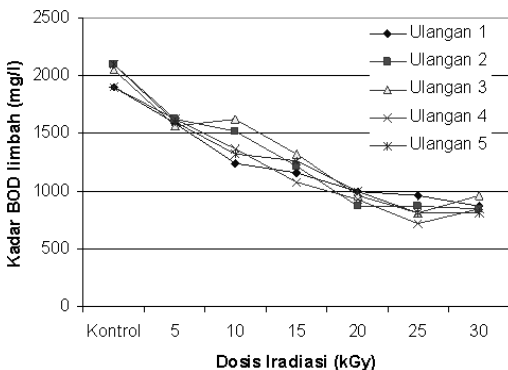
$$f = \frac{10}{ml.Fe(NH_4)_2(SO_4)_2}$$

Perhitungan Jumlah Bakteri

Pada awalnya dilakukan pengenceran sampel limbah industri ini dengan penambahan aquadest steril sampai dengan 10^{10} kali. Kemudian diinokulasikan ke media *nutrient agar* (*agar plate*) yang mengandung *pepton meat*, *pepton casein* dan ekstrak *yeast* secara *spread plate*, yang selanjutnya diinkubasikan selama 24 sampai 48 jam. Dilakukan perhitungan koloni bakteri yang tumbuh menggunakan metode *total plate count*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mesin berkas elektron mampu menghasilkan radiasi berkas elektron yang dapat menimbulkan reaksi ionisasi pada limbah cair. Reaksi tersebut menghasilkan oksidator kuat dan radikal-radikal bebas yang dapat bereaksi dengan senyawa organik maupun anorganik limbah. Penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh iradiasi berkas elektron terhadap beberapa sifat fisika, kimia dan biologi limbah cair penyamakan kulit.



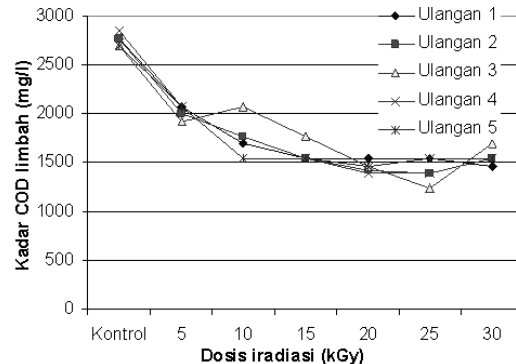
Gambar 1. Grafik Pengaruh Iradiasi Berkas Elektron Terhadap BOD.

Limbah cair penyamakan kulit diambil dari bak inlet (ekualisasi) dengan dasar bahwa pada bak tersebut menampung hampir seluruh limbah cair selama proses penyamakan kulit berlangsung, sehingga di dalam bak akan terkumpul kandungan bahan-bahan organik dan anorganik limbah. Setelah

itu dilakukan pengukuran sifat biologi, kimia dan fisika limbah antara lain penghitungan *total plate count* bakteri, kadar BOD, COD, DO, pH dan suhu limbah cair.

Penentuan kadar BOD di dalam sampel yang dilakukan sebelum dan sesudah diinkubasikan pada suhu $20^{\circ}C$ selama 5 hari, karena pada rentang waktu tersebut bahan organik telah terdegradasi sekitar 70 sampai 80 %^[4]. Pengaruh dosis radiasi berkas elektron terhadap BOD disajikan pada grafik dalam Gambar 1. Dalam penelitian ini menggunakan sampel sebanyak lima buah (dalam gambar tertulis ulangan 1 sampai ulangan 5) untuk melihat tren keseragaman penurunan dari kadar BOD limbah dan menentukan dosis yang paling optimum. Dalam Gambar 1 terlihat penurunan kadar BOD limbah mulai terjadi saat dosis iradiasi berkas elektron mulai ditambahkan ke dalam limbah.

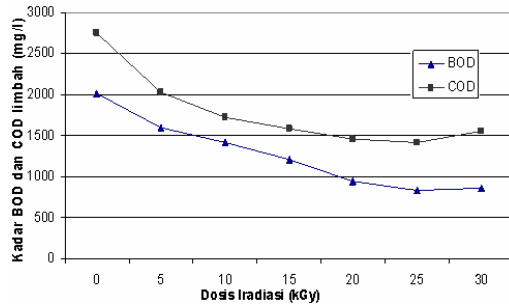
Kadar COD limbah diperoleh dari hasil oksidasi limbah dengan cara direbus dalam larutan asam dikromat. Proses tersebut hampir mengoksidasikan senyawa – senyawa organik dalam limbah menjadi CO_2 dan H_2O . Adapun pengaruh iradiasi berkas elektron terhadap penurunan COD limbah cair penyamakan kulit ditunjukkan pada grafik di dalam Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh Dosis radiasi Berkas Elektron Terhadap COD Limbah.

Adapun pengaruh dosis radiasi berkas elektron terhadap kadar rata-rata BOD dan COD limbah cair industri penyamakan kulit disajikan pada grafik di dalam Gambar 3. Dari grafik pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa semakin besar dosis radiasi elektron, kadar rerata BOD dan COD limbah semakin menurun. Hal ini kemungkinan akibat dari terpecahnya molekul kompleks bahan organik karena reaksi ionisasi akibat iradiasi berkas elektron, sehingga menyebabkan terjadinya pengurangan bahan organik^[5]. Selain itu, kemungkinan karena dengan perlakuan iradiasi

berkas elektron mengakibatkan kematian bakteri yang mungkin saja berpotensi dalam biodegradasi limbah, sehingga dengan kandungan senyawa organik yang telah berkurang ataupun terpecah menjadi molekul yang lebih sederhana serta adanya pengurangan jumlah bakteri dalam limbah menyebabkan menurunnya pemakaian oksigen untuk proses degradasi bahan organik oleh mikroorganisme tersebut.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Dosis Radiasi Berkas Elektron Terhadap Kadar Rerata BOD dan COD.

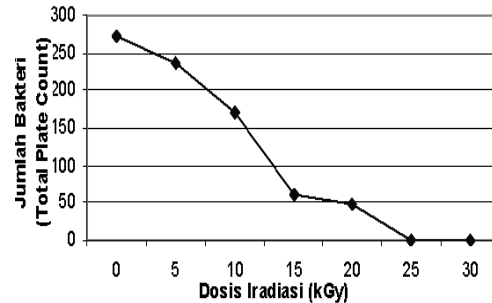
Secara kimia, penurunan kadar BOD dan COD kemungkinan akibat terjadinya induksi elektron ke dalam limbah cair, sehingga menyebabkan reaksi ionisasi. Pada awalnya terjadi pembentukan radikal bebas sebagai akibat dari radiolisis air, diantaranya radikal H dan OH adalah yang paling reaktif dan bereaksi dengan molekul organik seperti asam amino dan protein menjadi molekul yang lebih kecil dan akhirnya menjadi CO_2 . Radikal OH juga merupakan radikal bebas yang kemungkinan juga akan bereaksi dengan sesamanya membentuk H_2O_2 , yang bersifat sebagai oksidator kuat. Bahan organik yang telah terpecah akibat reaksi ionisasi mengakibatkan pengurangan kadar bahan organik pada limbah, sehingga menurunkan kadar BOD dan COD limbah tersebut^[4].

Selain itu, radiasi pengion juga mampu memecahkan persoalan limbah organik *non degradable* dengan cara mengubah senyawa-senyawa yang sulit terdegradasi menjadi senyawa yang mudah teroksidasi baik secara kimia maupun biologi, bahkan dapat digunakan untuk *decolorisasi*, limbah *nondegradable* serta desinfeksi lumpur.

Kemudahan air limbah untuk dapat diuraikan secara biologis dapat ditentukan dari perbandingan kadar COD dan BOD_5 limbah tersebut. Jika limbah industri memiliki nilai perbandingan lebih besar dari dua, berarti limbah tersebut mengandung sejumlah besar zat yang sulit terurai secara biologis. Dengan demikian, maka limbah hasil perlakuan iradiasi berkas elektron pada penelitian ini masih tergolong

limbah yang mudah terurai secara biologis, karena hasilnya kurang dari dua.

Perlakuan iradiasi berkas elektron pada penelitian ini memang telah mengakibatkan penurunan kadar BOD dari sekitar 2.010 mg/l menjadi 864 mg/l, sedangkan penurunan COD dari 2.756 mg/l menjadi 1.554 mg/l. Prosentase penurunan tertinggi terjadi pada dosis iradiasi 30 kGy yang mencapai 58 % untuk BOD dan 48 % untuk COD. Namun penurunan BOD dan COD ini belum mencapai standar yang ditetapkan berdasarkan Keputusan Gubernur DIY No. 218/KPTS/1998 bahwa nilai standar baku mutu limbah cair industri penyamakan kulit untuk kadar BOD sebesar 50 mg/l untuk kulit mentah, 40 mg/l untuk *wet blue*. Sedangkan untuk kadar COD adalah 100 mg/l untuk kulit mentah dan 90 mg/l untuk *wet blue*. Berkenaan dengan itu masih diperlukan penelitian lebih lanjut, baik dengan pengolahan limbah *multi stage* ataupun dengan mengisolasi bakteri yang telah terseleksi oleh radiasi berkas elektron ini.



Gambar 4. Grafik pengaruh dosis radiasi berkas elektron terhadap jumlah bakteri.

Sedangkan pengaruh dosis iradiasi berkas elektron terhadap jumlah bakteri dari hasil perhitungan menggunakan metode *Total Plate Count* selengkapnya disajikan pada Gambar 4. Grafik tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan jumlah bakteri pada iradiasi 5 kGy, dan semakin tajam pada dosis 15 kGy. Sedangkan pada dosis 25 kGy dan 30 kGy, bakteri sudah tidak dapat bertahan hidup lagi. Hal ini disebabkan karena sel bakteri telah banyak mengalami kerusakan akibat pengaruh iradiasi berkas elektron.

Iradiasi dapat membunuh bakteri karena efek ionisasi yang berasal dari pancaran energinya yang mengakibatkan terjadinya perubahan struktur DNA. Mekanisme kerusakan sel bakteri akibat radiasi pada umumnya melalui 4 tahapan yaitu tahap fisika, kimia-fisika, kimia-biologi dan diakhiri dengan tahapan biologi yang ditandai dengan adanya respon biologis yang bervariasi tergantung molekul atau sel-sel penting yang bereaksi dengan radikal bebas dan peroksida pada tahapan sebelumnya

Radial (K ²)	Isiost	Material	Bentuk	Tampilan	Elemen	Bentuk (Gram)	Sports	Prokoilthk	
0	1	Kaling	Korsetik	Berlekuk	Tmbil	Batang ⊕	-	+	
	2	Ptdh	Bandardeyga tepba kaling	Tak Beatiab	Sepdik awal	Birt ⊖	-	-	
	3	Ptdh	Bandar	Bombak	Cembung	Birt ⊕	-	+	
	4	Ptdh tepimeral	Bandardeyga tepba tmbil	Lcjh	Tmbil	Birt ⊖	-	-	
	5	Ptdh	Korput	Bombak	Berukit-dikit	Birt ⊖	-	-	
	6	Ptdh	Bandardeyga tepba tmbil	Bombak	Sepdik awal	Birt ⊕	-	-	
	7	Ptdh	Korsetik	Lcjh	Tmbil	Batang ⊕	-	-	
	8	Ptdh	Tak Deatral, me wyabar	Berlekuk	Cembung	Birt ⊖	-	+	
	9	Ptdh	Bandar	Bombak	Cembung	Birt ⊕	-	-	
	10	kekalingan	Bandar	Lcjh	Cembung	Birt ⊕	-	+	
	11	Ptdh & k s i	Tak Deatral, me wyabar	Bombak	Sepdik awal	Birt ⊕	-	-	
	12	Ptdh & k s i	Tak Deatral, me wyabar	Berlekuk	Cembung	Birt ⊖	-	-	
5	1	Kaling	Korsetik	Berlekuk	Tmbil	Batang ⊕	-	+	
	2	Ptdh	Bandardeyga tepba kaling	Tak Beatiab	Sepdik awal	Birt ⊖	-	-	
	5	Ptdh	Korput	Bombak	Berukit-dikit	Birt ⊖	-	-	
	7	Ptdh	Korsetik	Lcjh	Tmbil	Batang ⊕	-	-	
	8	Ptdh	Tak Deatral, me wyabar	Berlekuk	Tmbil	Batang ⊕	-	-	
	9	Ptdh	Bandar	Bombak	Cembung	Birt ⊕	-	-	
	10	kekalingan	Bandar	Lcjh	Cembung	Birt ⊕	-	+	
	10	1	Kaling	Korsetik	Berlekuk	Tmbil	Batang ⊕	-	+
		3	Ptdh	Bandar	Bombak	Cembung	Birt ⊕	-	+
		6	Ptdh	Bandardeyga tepba tmbil	Bombak	Sepdik awal	Birt ⊕	-	-
7		Ptdh	Korsetik	Lcjh	Tmbil	Birt ⊕	-	-	
11		Ptdh & k s i	Tak Deatral, me wyabar	Bombak	Sepdik awal	Birt ⊕	-	-	
15		1	Kaling	Korsetik	Berlekuk	Tmbil	Batang ⊕	-	+
		7	Ptdh	Korsetik	Lcjh	Tmbil	Batang ⊕	-	-
		10	kekalingan	Bandar	Lcjh	Cembung	Birt ⊕	-	+
		12	Ptdh & k s i	Tak Deatral, me wyabar	Berlekuk	Cembung	Birt ⊕	-	-
20		1	Kaling	Korsetik	Berlekuk	Tmbil	Batang ⊕	-	+
	7	Ptdh	Korsetik	Lcjh	Tmbil	Batang ⊕	-	-	
	10	kekalingan	Bandar	Lcjh	Cembung	Birt ⊕	-	+	
	25	-	-	-	-	-	-	-	-

Secara umum data tersebut menunjukkan bahwa perlakuan iradiasi berkas elektron pada limbah cair penyamakan kulit berpengaruh terhadap penurunan populasi bakteri. Populasi bakteri semakin menurun dengan semakin besarnya dosis iradiasi berkas elektron. Berdasarkan data hasil pengamatan ciri morfologi, bakteri yang tumbuh di dalam limbah tersebut sangatlah bervariasi baik bentuk, ukuran, warna elevasi dan tepi koloni. Data karakteristik fenotopik bakteri di dalam limbah dengan variasi dosis selengkapanya disajikan pada Tabel 1. Hasil pengecatan gram terhadap masing-masing isolat juga bervariasi baik gram positif maupun negatif. Akan tetapi bakteri yang masih bertahan hidup rata-rata memiliki sifat gram positif.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa bakteri gram positif relatif lebih rentan terhadap radiasi berkas elektron, hal ini dapat ditunjukkan dengan keberadaan gram negatif yang hanya sampai pada dosis radiasi 10 kGy sedangkan pada dosis di atas 15 kGy didominasi oleh bakteri gram positif.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain :

1. Perlakuan iradiasi berkas elektron mengakibatkan penurunan kadar BOD tertinggi terjadi pada dosis iradiasi 30 kGy yang mencapai 58 % untuk BOD dan 48 % untuk COD.
2. Perlakuan iradiasi berkas elektron pada limbah cair penyamakan kulit berpengaruh terhadap penurunan populasi bakteri pada iradiasi 5 kGy, dan semakin tajam pada dosis 15 kGy. Sedangkan pada dosis 25 kGy dan 30 kGy, bakteri sudah tidak dapat bertahan hidup lagi.
3. Jenis bakteri gram positif relatif lebih rentan terhadap radiasi berkas elektron, jika dibandingkan dengan jenis gram negatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim., "Industrial Pollution Control Guide Lines Tanning Industry", United Nations Economic and Social Commission for Asia and Pacific, Bangkok (1982).
- [2] Pudjoraharjo,S., "Teknologi Mesin Berkas Elektron", BATAN Accelerator School, Yogyakarta (2004),
- [3] Luthfiana, L., "Pengaruh Iradiasi Gama Cobalt-60 terhadap Kehidupan Bakteria Patogen dalam Endapan Lumpur (Sludge)", Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam, Universitas Airlangga, Surabaya (2002),

- [4] Soetarto,E.S., "Pengelolaan Limbah Industri", PAU Bioteknologi Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, (1992),
- [5] Winardi dkk., "Pengaruh Iradiasi Gamma pada Zat Warna dalam Air", Prosiding Pertemuan Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jakarta, (1993).

TANYA JAWAB

Rill Isaris

- *Dalam eksperimen yang dilakukan bagaimana saudara dapat menetapkan (preset) nilai dosis sebesar 5, 10, 15, 20 dan 25 kGy secara bulat. Apakah ada pengatur dosis iradiasi pada MBE yang ada di PTAPB*
- *Mengapa setelah dosis tertentu (>30 kGy), kadar BOD/ COD sampel tidak berubah lagi?*

M. Yazid

- Dosis iradiasi dapat ditentukan dengan mengatur arus berkas elektron. Besar kecilnya arus berkas elektron menentukan besar kecilnya dosis iradiasi
- Setelah >30 kGy bakteri dalam limbah cair sudah tidak dapat bertahan hidup lagi. Hal tersebut berpengaruh terhadap kadar BOD/ COD sampel limbah. Karena dengan menurunnya jumlah bakteri dalam limbah, semakin menurun juga kadar BOD/COD sampel limbah.

Herry Poernomo

- *Mengapa dipilih limbah cair industri penyamakan kulit yang diteliti dengan iradiasi berkas elektron*
- *Mekanisme penurunan COD oleh iradiasi berkas elektron seperti apa?*
- *Unsur apa saja yang menyebabkan COD/BOD dalam limbah cair menjadi besar*

M. Yazid

- Karena pada limbah cair industri penyamakan kulit terdapat perbandingan COD/BOD <2 sehingga mudah terurai secara biologis dan apabila dilakukan iradiasi dengan berkas elektron semakin mempermudah penguraian kandungan organik yang ada di dalamnya diakibatkan adanya pembentukan radikal bebas akibat radiolisis dalam air
- Dekomposisi senyawa organik dalam air limbah dipercepat dan diperbanyak oleh adanya radikal

bebas OH dan H yang bereaksi dengan molekul organik seperti asam amino dan protein menjadi yang lebih kecil dan akhirnya menjadi CO₂

- Unsur-unsur dalam molekul organik seperti asam amino dan protein

EFEK IMPLANTASI ION TiN TERHADAP KEAUSAN DAN KEKERASAN KOMPONEN BANTALAN BOLA DALAM MEDIA KOROSIF KABUT AIR LAUT

Sinarep

Pengajar pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Mataram, Lombok

Tjipto Sujitno

Staf Peneliti PTAPB-BATAN, Yogyakarta

Mudjijana

Pengajar pada Program Pasca Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin, FT-UGM, Yogyakarta

ABSTRAK

EFEK IMPLANTASI ION TiN TERHADAP KEAUSAN DAN KEKERASAN KOMPONEN BANTALAN BOLA DALAM MEDIA KOROSIF KABUT AIR LAUT. Telah dilakukan penelitian tentang pengaruh implantasi ion TiN terhadap korosi aus dalam media korosif kabut air laut dan kekerasan komponen bantalan bola. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh implantasi ion TiN terhadap keausan dan kekerasan komponen bantalan bola dalam media korosif kabut air laut. Untuk maksud tersebut implantasi ion TiN menggunakan mesin implantor ion 150 keV/2 mA di PTAPB-BATAN dilakukan pada berbagai variasi waktu implantasi yaitu 60, 70, 80, 90 dan 100 menit pada energi tetap sebesar 100 keV. Pengujian keausan dalam media kabut air laut menggunakan alat uji aus buatan sendiri dilakukan pada putaran poros 3100 rpm selama 3 s/d 12 jam, proses pengkabutan air laut menggunakan pompa kompresor pada laju 216 ml/jam dan tekanan 1 kgf/cm². Uji kekerasan untuk komponen dasar maupun komponen yang diimplantasi menggunakan alat uji keras microhardness tester di PAU-UGM, Yogyakarta. Dari hasil uji keras yang telah dilakukan diperoleh hasil bahwa kekerasan awal untuk bagian bola sebesar 864 VHN, untuk bagian ring dalam sebesar 828 VHN sedang untuk bagian luar sebesar 644 VHN, setelah diimplantasi dengan ion TiN untuk berbagai variasi waktu implantasi diperoleh kekerasan optimum sebesar 1220 VHN untuk bagian permukaan bola, 1149 VHN untuk ring luar dan 916 VHN untuk ring bagian dalam. Kondisi optimum tersebut dicapai pada waktu implantasi selama 90 menit. Dari hasil uji aus diperoleh hasil bahwa untuk komponen dasar volume teraus sebesar 110 mm³, sedang untuk yang diimplantasi volume terausnya sebesar 9 mm³. Kondisi ini dicapai pada waktu implantasi selama 90 menit.

Kata kunci; bantalan bola, implantasi ion TiN, kabut air laut dan aus.

ABSTRACT

THE EFFECT OF TiN IMPLANTATION ON THE WEAR CORROSION IN MIST OF SEA WATER MEDIA AND HARDESS OF BALL BEARING COMPONENTS. Research on the effect of TiN ion implantation on the wear corrosion in mist of sea water media and hardness of ball bearing components has been carried out. The aim of this research is to study the effect of TiN ion implantation on the wear corrosion in mist of sea water media and hardness of ball bearing components. For the purpose, TiN ion implantation process was carried out using 150 keV/2 mA ion implantor for fixed energy in order of 100 keV and for various of time such as 60, 70, 80, 90 and 100 minutes at PTAPB-BATAN, Yogyakarta. Wear corrosion in mist of sea water media testing was done using wear tester homemade with the speed in order of 3100 rpm for 3 up to 12 hours. Spraying process was done by using a compressor pump with the speed of 216 ml/hour and pressure 1 kgf/cm². Hardness testing was applied for implanted and unimplanted samples using microhardness tester at PAU-UGM, Yogyakarta. It was found that the hardness of base material is around 864 VHN for the ball surface, 828 VHN for inner ring and 644 VHN for outer ring. After implantation process for various of time, the optimum hardness is 1220 VHN for the ball surface, 1149 VHN for outer ring and 916 VHN for inner ring. From the wear corrosion testing, it was found that for the base components the weared/corroded volume is 110 mm³, while for implanted componenmts is 9 mm³. Optimum conditions was achieved at the implantation time in order of 90 minutes.

Keywords : ball bearing, TiN ion implantation, sea water mist, wear

PENDAHULUAN

Bantalan bola merupakan salah satu komponen pendukung yang terdapat pada mesin dan bagian-bagian peralatan yang berputar sebagaimana yang terdapat pada komponen otomotif, perahu boat ataupun kapal laut. Pada dunia industri seperti perminyakan dan bahan kimia, mesin dan komponen bantalan bola akan mengalami keausan di bawah kondisi-kondisi korosif. Selama beroperasi, komponen ini bagian permukaannya disamping akan mengalami keausan akibat getaran yang diakibatkan oleh gerakan terus-menerus selama pembebanan juga akan mengalami korosi. Studi yang berkaitan dengan hal tersebut telah banyak dilakukan. Walaupun demikian, studi mengenai korosi-aus sangatlah berbeda dengan studi-studi lainnya dan efek kabut air laut merupakan salah satu parameter penelitian yang menarik untuk dilaksanakan.

Masalah yang timbul ini baik kekerasan maupun keausan akan menyebabkan umur pakai dari bantalan bola kemungkinan tidak lama, sehingga perlu diperlakukan proses lanjut untuk meningkatkan nilai kekerasan maupun keausannya. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara memberi lapisan tertentu dan dengan teknik tertentu pula. Teknik pelapisan yang dipilih pada penelitian ini adalah implantasi ion TiN dengan variasi waktu dan pada energi konstan sebesar 100 keV. Dalam hal ini, bagian yang dilapisi *ball bearing* adalah ring dalam, ring luar dan bola, sedang uji korosi aus dilakukan dalam media korosif kabut air laut. Air laut diambil di Pantai Parangtritis. Dengan penelitian ini, diharapkan akan diperoleh kondisi optimum dari parameter pelapisan yaitu waktu implantasi. Uji keausan dilakukan dengan parameter variasi waktu implantasi ion, beban, dan waktu putaran dalam media korosif kabut air laut. Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh waktu implantasi ion TiN yang diimplantasikan pada energi 100 keV terhadap kekerasan dan laju korosi aus dalam media korosif kabut air laut komponen bantalan bola (*ball bearings*).

Berkaitan dengan penelitian komponen yang mengalami keausan tersebut, perbedaan kekerasan bersifat sangat signifikan antara bola dan ring, yang sebenarnya kedua hal ini menimbulkan gesekan sehingga memunculkan kasus keausan berupa komponen yang lunak akan habis lebih dahulu dibanding yang keras. Untuk itu, kekerasan bahan atau komponen sangat perlu ditingkatkan khususnya pada permukaan yang bergesek (Soekrisno, 2004). Masalah lain yang bisa terjadi dalam hal ini ialah bola dan ring akan berkarat atau mengalami korosi hampir di semua lingkungan atmosfer bila

kelembaban melebihi 60% dengan munculnya butiran-butiran air pada permukaan komponen (Widharto, 2001). Hasil yang ditunjukkan pada penelitian sebelumnya juga didukung oleh Huang dkk, 2003 adalah efek Cl⁻ pada perilaku korosi aus baja tahan-karat AISI 321 dalam media H₂SO₄. Ada suatu beban kritis pada potensial alami, yang korosi ausnya adalah sedikit diturunkan oleh Cl⁻, sedangkan di atasnya ditingkatkan.

Implantasi ion titanium dan *acetylene* pada permukaan baja bearing AISI 440 menghasilkan perbaikan yang signifikan terhadap ketahanan aus dan gesekan. Hal ini sangat potensial untuk memperbaiki sifat permukaan dan umur pakai bantalan bola (Zeng, dkk, 2003). Kerusakan akibat aus pada permukaan dapat diturunkan dengan meningkatkan kekerasan, yang salah satunya dengan implantasi ion TiN. Metode implantasi ion merupakan proses yang sangat menguntungkan dalam merubah sifat-sifat permukaan bahan, yang parameter-parameternya seperti jenis ion, energi, dosis yang diberikan serta sudut penembakan dapat diatur dan disesuaikan secara presisi (Moller dan Mukherjee, 2002).

Secara umum, modifikasi permukaan suatu komponen bertujuan untuk meningkatkan ketahanan aus permukaan dan untuk memodifikasi sifat friksionalnya (Hutchings, 1995). Modifikasi permukaan logam diharapkan akan meningkatkan ketahanan aus yang berarti menurunkan keausan logam.

Ada dua jenis pendekatan modifikasi permukaan yang digunakan pada komponen implantasi (Dearnley, 1999), yakni : Pertama, melapisi permukaan komponen logam dengan bahan yang lebih tahan aus. Kedua, mengeraskan permukaan dengan mengubah komposisi permukaan komponen logam dengan adanya elemen yang terdifusi. Proses yang termasuk dalam jenis pertama antara lain *sputtering* dan *plasma nitriding* sedangkan implantasi ion termasuk jenis kedua.

Volume teraus dapat dihitung menggunakan persamaan,

$$\text{Volume Keausan (V)} = \frac{\text{berat keausan (g)}}{\text{berat jenis (g/mm}^3\text{)}} \quad (1)$$

Sedang laju keausan dapat dihitung menggunakan persamaan,

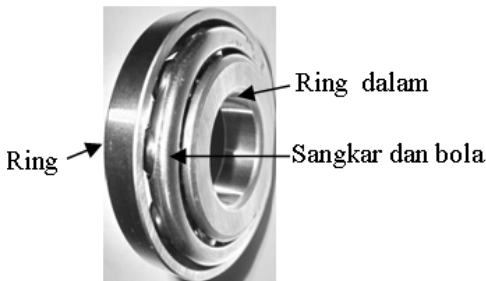
$$\text{Laju aus} = \frac{V}{S} \quad (2)$$

dengan :

- S = $\pi d n t$, jarak tempuh
- d = diameter poros
- n = putaran poros (rpm)
- t = waktu, menit
- V = volume keausan (mm³)

METODE PENELITIAN

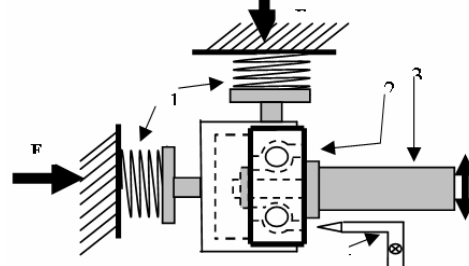
Dalam penelitian ini bahan yang digunakan meliputi serbuk TiN, kertas gosok dengan ukuran 600 sampai dengan 2000 mesh, autosol metal polish, alkohol, dan bantalan bola (*ball bearing*) tipe *angular contact ball bearing*, seri 20BSW01 yang mempunyai diameter dalam 20 mm, diameter luar 52 mm, diameter bola 10 mm, dan massa jenis 7,8 gr/cm³. Komposisi bahan bantalan bola sebelum diimplantasi ion TiN adalah ring luar: 97,61% Fe, 0,73% C, 0,86 % Cr, 0,35% Si, 0,27% Mn, Ring dalam: 97,32% Fe, 1,24% C, 0,68 % Cr, 0,33% Si, 0,28% Mn, bola: 96,41% Fe, 1,42% C, 1,24 % Cr, 0,34% Si, 0,29% Mn, dan sangkar: 98,89% Fe, 0,46% C, 1,24 % Cr, 0,25% Si, 0,18% Mn. Untuk pengujian korosi aus digunakan media korosif kabut air laut Pantai Parangtritis dengan kandungan NaCl 3,18%. Adapun alat yang digunakan adalah mesin implantasi ion, ultrasonik cleaner, alat uji keras *microhardness tester*, alat uji keausan, mesin polis, dan timbangan. Bentuk bantalan bola (*ball bearing*) sebagai sampel uji disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bantalan bola dengan dua arah pembebanan (aksial dan radial)

Untuk keperluan eksperimen, disiapkan benda uji bantalan bola sebanyak 73 buah, yang masing-masing terdiri dari 36 buah yang diimplantasi ion TiN, 36 buah tidak diimplantasi dan 1 buah untuk dipotong-potong untuk sampel uji keras. Untuk keperluan uji keras, satu buah bantalan bola dipotong menggunakan alat EDM (Electric Discharge Machine) dengan ukuran 6 × 6 × 3 mm kemudian dipoles sampai halus dengan kertas gosok dari ukuran 600 hingga 2000 mesh. Selanjutnya spesimen ini diimplantasi ion TiN pada energi 100 keV dengan berbagai variasi waktu yaitu dari 60, 70, 80, 90 dan 100 menit, kemudian diuji kekerasannya menggunakan alat uji keras dengan indentor Vickers. Dari hasil pengujian kekerasan untuk berbagai sampel yang diimplantasi dengan

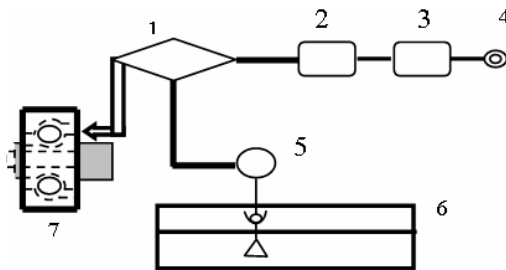
berbagai variasi waktu tersebut, akan didapatkan hasil kekerasan yang optimum. Dari hasil kekerasan optimum tersebut akan digunakan sebagai acuan untuk melakukan implantasi ion TiN pada bantalan bola yang akan diuji korosi ausnya dalam media korosif kabut air laut. Di samping itu bantalan bola hasil implantasi ion juga akan difoto struktur mikronya, hal ini dimaksudkan untuk mengetahui perubahan morfologi permukaan. Sedangkan spesimen yang diimplantasi untuk uji keausan adalah bagian ring luar, ring dalam dan bola. Bagian-bagian tersebut sebelumnya dibersihkan dengan alkohol dalam alat *ultrasonik cleaner*, dikeringkan baru kemudian diimplantasi dengan ion TiN. Adapun skema alat uji aus disajikan pada Gambar 2. Sedangkan skema sistim pengkabutan air laut disajikan pada Gambar 3.



Keterangan

- 1. Pegas
- 2. Bantalan bola
- 3. Poros
- 4. Nozzel
- Fa. Beban aksial
- Fr: beban radial

Gambar 2. Skema Alat Uji Keausan



Keterangan

- 1. Pipa pencampuran
- 2. Pengukuran tekanan
- 3. Saringan udara
- 4. Kompresor
- 5. Pompa
- 6. Air laut
- 7. Bantalan bola

Gambar 3. Sistem pengkabutan air laut

Bantalan bola yang sudah diimplantasi maupun yang tidak diimplantasi diuji ketahanan korosi ausnya dalam media korosif kabut air menggunakan alat seperti yang disajikan pada Gambar 2. Kemudian ditentukan beban aksial dan radial yang diletakkan pada masing-masing ujung lengan dengan cara memutar handel dan menekan pegas sehingga ujung kontak pin menekan permukaan bearing dan mendapatkan gaya atau beban, adapun bebannya adalah 37, 75 N, dan 149 N.

Untuk pengujian korosi aus dalam media korosif kabut air laut, terlebih dahulu mesin dijalankan sementara kecepatan air lautnya pun diukur terlebih dahulu dengan menggunakan mesin kompresor udara yang bertekanan udara 1 kgf/cm². Nozel alat painting diatur sesuai dengan kebutuhan air laut yaitu 216 ml/jam. Kemudian mesin dijalankan dengan putaran poros 3100 rpm dan air laut yang berupa kabut ditembakkan dengan nozel pada bantalan bola seperti yang disajikan pada Gambar 2 dan 3.

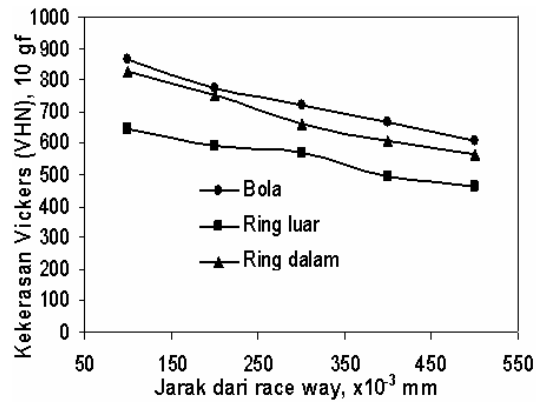
Dari setiap variasi beban dan waktu, diperoleh data kehilangan berat bantalan bola pada masing-masing perlakuan. Adapun data yang bisa diperoleh pada pengujian ini adalah pengurangan berat. Kemudian data tersebut diolah menjadi nilai korosi aus dalam media korosif kabut air laut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kekerasan Awal Komponen Bantalan Bola

Kekerasan merupakan salah satu sifat bahan yang sangat mempengaruhi ketahanan aus dari bahan. Pada bantalan bola peningkatan kekerasan umumnya dicapai melalui proses perlakuan panas. Pada Gambar 4 disajikan hasil pengujian kekerasan Vickers pada beban 10 gf pada permukaan bahan bantalan bola yang tidak diimplantasi. Kekerasan awal bahan di *race way* yaitu bola 864 VHN, ring dalam 828 VHN dan ring luar 644 VHN.

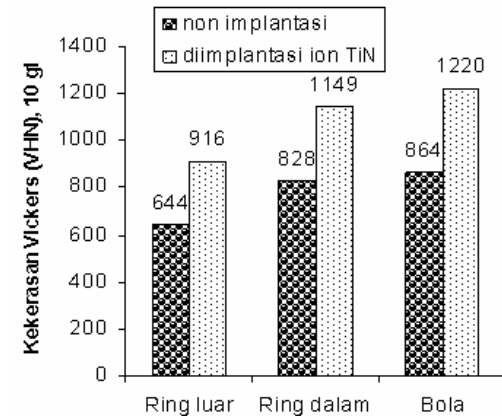
Bantalan bola yaitu ring luar, ring dalam dan bola memiliki kekerasan yang berbeda untuk masing-masing bagian, ring luar yang merupakan bagian yang paling lunak dibanding dengan ring dalam dan bola. Ring luar kemungkinan akan lebih cepat aus karena memiliki perbedaan kekerasan yang signifikan dibanding yang terjadi pada bola. Rata-rata perbedaan di sini, ring luar dengan bola 31% dan ring dalam dengan bola 7%. Untuk mengurangi keausan ring luar, ring dalam dan bola perlu dilakukan peningkatan kekerasan yaitu dengan metode implantasi ion TiN.



Gambar 4 Kekerasan Vickers (VHN) pada ring dan bola sebagai fungsi jarak race way

Kekerasan Komponen Bantalan Bola yang Diimplantasi Ion TiN

Gambar 5 menyajikan hasil pengujian kekerasan Vickers pada beban 10 gf pada permukaan bahan bantalan bola yang non implantasi dan yang diimplantasi ion TiN. Kekerasan awal bahan di *race way* yaitu bola 864 VHN, ring dalam 828 VHN dan ring luar 644 VHN. Kekerasan Vickers komponen yang diimplantasi ion TiN pada waktu 90 menit adalah ring luar sebesar 916 VHN, ring dalam 1149 VHN dan bola 1220 VHN atau mengalami peningkatan kekerasan bola 41 %, ring dalam 39 % dan ring luar 42%.

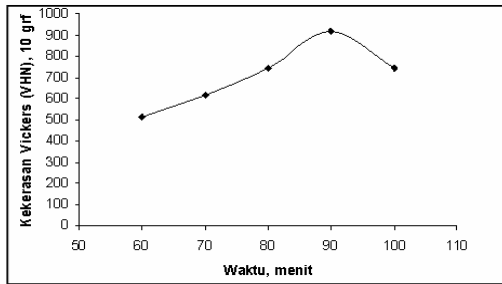


Gambar 5. Kekerasan Vickers (VHN) race way bantalan bola

Peningkatan angka kekerasan ini disebabkan oleh larutnya ion-ion TiN dalam material induk (matriks) secara substitusi. Fenomena ini dapat mengakibatkan pengerasan larut padat substitusi. Apabila jumlah ion TiN telah melampaui batas kelarutan, maka secara berangsur-angsur akan

membentuk fase baru yang memiliki sifat lebih keras daripada fase induknya. Terbentuknya fase baru tersebut bergantung pada jumlah ion TiN yang diberikan. Selain itu selama proses implantasi ion TiN juga terbentuk cacat sisipan yang akan menimbulkan medan tegangan dalam yang akibatnya juga akan memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekerasan permukaan bahan.

Gambar 6 merupakan hasil pengujian kekerasan Vickers beban 10 gf pada bantalan bola di *race way* yang diimplantasi ion TiN untuk 5 variasi waktu, juga tampak bahwa peningkatan kekerasan permukaan terjadi pada waktu implantasi dari 60 sampai 90 menit dan setelah itu mengalami penurunan kekerasan

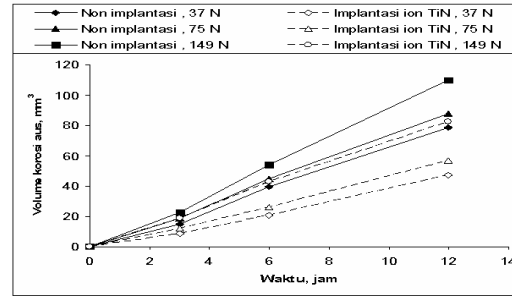


Gambar 6. Hubungan waktu implantasi ion TiN terhadap kekerasan permukaan ring luar bola

Dari Gambar 6 terlihat bahwa semakin meningkat waktu implantasi ternyata kekerasannya juga meningkat. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya waktu implantasi berarti jumlah ion TiN yang larut juga semakin banyak, pada hal kekerasan suatu bahan sangat ditentukan oleh jumlah ion terlarut. Kekerasan optimum sebesar 916 VHN (untuk ring luar) dicapai pada waktu implantasi 90 menit. Tetapi bila waktu implantasi diperlama, justru kekerasannya menurun. Hal ini dimungkinkan karena disamping selama proses implantasi benda uji menjadi panas akibat interaksi ion dengan benda uji, dengan semakin lamanya proses implantasi berarti ion-ion tersebut mempunyai kebolehdifusi untuk berdifusi ketempat yang lebih dalam juga akan semakin besar, dengan demikian batas kelarutan material target akan semakin melebar, yang berarti yang dulunya daya larut telah terpenuhi menjadi tidak terpenuhi, sehingga kekerasannya pun juga akan menurun. akan berkurang yang akan mengakibatkan penurunan kekerasan permukaannya

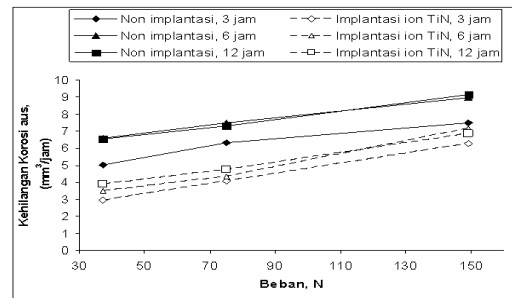
Korosi Aus dalam Media Korosif Kabut Air Laut

Gambar 7 menyajikan grafik hubungan volume korosi aus bantalan bola terhadap waktu pada putaran poros 3100 rpm. Terlihat jelas bahwa volume korosi aus komponen yang tidak diimplantasi meningkat dengan bertambahnya beban dan waktu. Volume aus tertinggi terdapat pada komponen yang tidak diimplantasi dengan beban 149 N dan waktu 12 jam yakni 110 mm³, dan yang terendah terjadi pada implantasi ion TiN dengan beban 37 N dan waktu 3 jam yakni 9 mm³.



Gambar 7. Pengaruh waktu pengausan terhadap volume korosi aus bantalan bola yang diimplantasi pada waktu 90 menit maupun material awal dalam media korosif kabut air laut pada putaran poros 3100 rpm

Hasil pengamatan pada ring luar dan ring dalam yang diimplantasi ion TiN menunjukkan penurunan volume korosi aus dibandingkan yang non implantasi. Hal ini sesuai harapan bahwa bahan yang diimplantasi akan meningkat kekerasannya dan mengurangi volume korosi aus bahan.



Gambar 8. Pengaruh beban terhadap korosi aus bantalan bola dalam media korosif kabut air laut pada putaran poros 3100 rpm

Gambar 8 memperlihatkan pengaruh beban terhadap korosi aus bantalan bola dalam media korosif kabut air laut pada putaran poros 3100 rpm. Kehilangan korosi aus meningkat dengan bertam-

bahnya beban pada komponen yang tidak diimplantasi dan terjadi pada beban 145 N dengan waktu 12 jam yaitu $9,1506 \text{ mm}^3/\text{jam}$ dan yang terendah terjadi pada implantasi ion TiN dengan beban 37 N selama 3 jam yakni $2,9530 \text{ mm}^3/\text{jam}$.

Hasil pengujian memperlihatkan peningkatan korosi aus relatif melonjak tajam seiring dengan bertambahnya beban pada material yang tidak diimplantasi. Sementara itu, untuk komponen yang diimplantasi ion TiN korosi aus mulai meningkat pada saat lapisan implantasi TiN terlepas dari logam induknya. Peningkatan ini disebabkan kabut air laut yang sangat agresif karena adanya percikan air laut yang terbawa oleh udara dan percikan yang mengandung NaCl dan garam-garam lain yang sangat korosif sehingga membentuk elektrolit kuat. Di samping itu, komposisi kimia seperti udara bisa juga mengandung garam-garam dan zat lainnya yang bersumber dari air laut. Apabila dikenai oleh air, endapan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ini semakin bersifat korosif dengan terbentuknya $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Selain itu, karena gesekan antara partikel-partikel logam. Peristiwa ini terstimulasi oleh adanya film tipis yang telah hancur disusul terjadinya kekasaran pada permukaannya yang makin bertambah. Munculnya film tipis ini memang sangat mempengaruhi ketahanan korosi aus, meskipun kontak gesekan dan degradasi menyebabkan penghancuran film tersebut secara cepat. Di sisi lain, kontaminasi mampu mempengaruhi lemahnya ikatan antara permukaan bantalan bola, yang akhirnya menimbulkan penurunan kekuatan geser antara permukaan. Hasil-hasil kehilangan korosi aus pada beban rendah dapat dijelaskan sebagai dampak produk korosi air laut-udara atau kabut air laut yang ada pada permukaan bantalan bola.

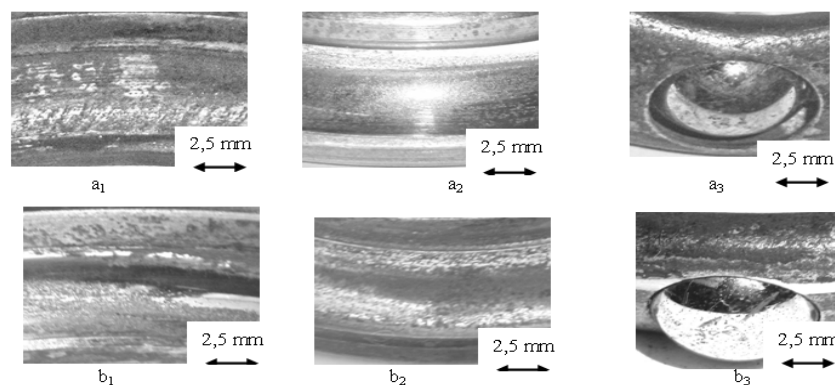
Foto Makro Bantalan Bola

Untuk mengetahui terjadinya korosi aus dalam media kabut air laut dari permukaan komponen

induk maupun yang diimplantasi telah dilakukan pengambilan foto, yang hasilnya seperti disajikan pada Gambar 9 Foto makro bantalan bola dengan media korosif kabut air laut bisa dilihat pada Gambar 9 a dan b.. Gambar 9 a adalah foto makro komponen yang tidak diimplantasi memperlihatkan goresan besar dan dalam untuk ring luar pada beban 149 N. Di sisi lain lapisan TiN yang diimplantasi ion terlihat mulai terkikis (Gambar 9 b).

Kabut air laut menyebabkan terbentuk dan berkembangnya goresan dengan hancurnya permukaan film pada *race way* bantalan bola yang tidak diimplantasi. Akan tetapi gejala perkembangan goresan tersebut bisa terlihat di bawah beban kritis. Dengan bertambahnya beban dan jarak ini, kesempatan perkembangan goresan tersebut akan mengalami pengurangan karena gesekan permukaan yang terjadi berjalan terus-menerus yang menyebabkan hancurnya permukaan film, sehingga goresan yang muncul sebelumnya bisa dibuat lebih dangkal atau bahkan hilang sama sekali (Huang dkk, 2003).

Walaupun demikian, kehilangan material yang disebabkan oleh tegangan geser mengalami pengurangan di bawah kondisi beban keausan yang rendah. Ada waktu yang cukup bagi goresan untuk berkembang sehingga goresan mengalami perubahan lebih besar dan dalam. Hal ini disebabkan karena tekanan udara dan percikan air laut yang mengandung NaCl dan garam-garam yang sangat korosif akan membentuk elektrolit kuat sehingga nantinya bisa mempengaruhi korosifitas bantalan bola.



Gambar. 9. Foto makro bantalan bola dengan media korosif kabut air laut. a. non implantasi dengan beban 149 N dan jarak 252433 m, b. implantasi ion TiN dengan beban 149 N dan jarak 252433 m. 1. ring luar. 2 ring dalam 3. bola dan sangkar.

KESIMPULAN

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan;

1. Implantasi ion TiN pada energi 100 keV dan arus ion 10 μ A selama 90 menit pada bahan bantalan menghasilkan kekerasan permukaan optimum sebesar 1220 VHN untuk bagian bola, 1149 VHN untuk ring dalam dan 916 VHN untuk ring luar. Kekerasan awal masing masing bagian adalah sebesar 864 VHN untuk bola, 828 VHN untuk ring dalam dan 644 VHN untuk ring luar atau kalau dinyatakan dalam persen peningkatannya berturut-turut 41 % untuk bola, 39 % untuk ring dalam dan 42% untuk ring luar.
2. Volume korosi aus yang diimplantasi ion TiN mengalami penurunan dan yang tidak diimplantasi mengalami peningkatan drastis dengan bertambahnya beban dan jarak sedangkan yang diimplantasi ion TiN hampir tidak terjadi kenaikan.
3. Ketahanan aus akan meningkat pada logam yang diimplantasi ion TiN. Hal ini ditandai dengan penurunan korosi aus dan laju aus apabila dibandingkan dengan yang terdapat pada logam yang tidak diimplantasi.
4. Foto makro bantalan bola non implantasi dengan media korosif kabut air laut yang memiliki goresan di dalam *race way* terlihat lebih dalam dan jumlahnya lebih banyak di bawah beban kritis dan goresan berkurang dengan bertambahnya beban dan jarak.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada kepada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mataram, Departemen Pendidikan Tinggi Jakarta, yang telah memberikan kesempatan untuk menempuh pendidikan Jenjang S-2. Ucapan terimakasih juga, penulis sampaikan kepada kepala, staf, teknisi, Laboratorium Bahan Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada dan kepada Kepala, staf, teknisi, Kelompok Aplikasi Akselerator Bidang Teknologi Akselerator dan Aplikasi Fisika Nuklir PTAPB-BATAN Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dearnley, P.A., 1999, A review of metallic, ceramic and surface treated metal used for bearing surface in human joint replacement, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 213 part II.

- [2] Huang, Y., Jiang X., Sizuoli, 2003, Effect of Cl⁻ on the Corrosive Wear of AISI 321 Stainless Steel in H₂SO₄ Solution, Bull. Mater. Sci., Vol. 26, No. 4, pp, 431-434. Indian Academy of Sciences.
- [3] Hutchings, I.M., 1992, Tribology Friction and Wear of Engineering Materials, London.
- [4] Moller, W. and Mukherjee, S., 2002, Plasma-Based Ion Implantation, Current Science, Vol. 83, No. 3NSK, 2003, Rolling Motion & Rolling Element, NSK Co. Ltd. Singapore.
- [5] Shen, L., Wang, k., Tie, J., Tong, H.H., Chen, Q.C., Tang, D.L., Fu, R.K.Y., and Chu, P.K., 2005, Modification of High-Chromium Cast Iron Alloy by N and Ti Ion Implantation, Surface & Coating Technology, Elsevier, PP, 196, 349-352.
- [6] Soekrisno, 2004, Perbandingan Kekerasan Struktur Mikro dan Komposisi kimia Bantalan Bola Produk Jepang dan China, Jurnal Mesin dan Industri, Vol. 1, No. 3, Hal. 9-14.
- [7] Widharto, S., 2001, Karat dan Pencegahannya, Pratnya Paramita, Jakarta.
- [8] Zeng, Z.M., Tian, X.B. and Chu, P.K., 2003, Ion Enhanced Deposition by Dual Titanium and Acetylene Plasma Immersion Ion Implantation, Journal Vacum Science Tecnology, A 21.

TANYA JAWAB

Drs. Riil Isaris, APU,

- Apakah tidak dilakukan pengujian (waktu) untuk mengetahui waktu terpanjang dimana tidak terjadi lagi penambahan kekerasan bahan?(*steady state*).
- Apakah bisa juga dilakukan eksperimen untuk melihat perubahan kekerasan dengan memvariasi arus implantor ion?
- Apakah bantalan bola tersebut merupakan komponen yang digunakan di kapal?

Tjipto Sujitno

- Untuk variasi waktu sudah dilakukan, tetapi hasil yang diperoleh bukanlah kekerasan yang *steady state*, tetapi justru kekerasannya menurun, hal ini dikarenakan sudah menjadi sifat bahan bahwa, pada kondisi unsur paduan tertentu akan menghasilkan fasa tertentu dengan sifat yang

tertentu pula. Jadi dalam eksperimen variasi waktu, hasil yang diperoleh adalah kondisi waktu optimum yang akan memberikan kekerasan tertinggi

- Perubahan kekerasan “sebanding” dengan jumlah ion/atom/unsur yang dimasukkan. Jumlah ion/atom/unsur tersebut sebanding dengan lamanya proses implantasi/waktu implantasi dan besarnya arus ion. Jadi untuk memperoleh jumlah ion/atom/unsur dapat diperoleh dengan dua cara yaitu dengan memvariasi arusnya dan waktu dibuat tetap atau waktu divariasi dengan arus ion dibuat tetap. Dalam praktek akan lebih mudah kalau arusnya dibuat tetap sedang lamanya/waktu proses divariasi.
- Bukan, komponen ini banyak digunakan pada industri otomotif.

Sayono

- *Kalau dilihat dari mekanisme pengerasan (penghalusan butir, terbentuknya fasa baru, larut padat, pengerasan regangan, texture, dsb), pengerasan dengan cara implantasi ion TiN ini, termasuk jenis pengerasan yang mana?*

Tjipto Sujitno

- Proses implantasi merupakan proses masuknya ion-ion/atom-atom (dalam hal ini Ti +N) dalam suatu target/material/komponen (dalam hal ini komponen *ball bearing*). Dengan masuknya ion/atom Ti+N yang tentunya akan menyebabkan medan tegangan dalam (internal stress) yang cukup besar. Karena ukuran dari atom Ti cukup besar, maka posisi atom Ti dalam material target hanya mungkin substitusi. Dari fenomena ini dapat disimpulkan bahwa mekanisme pengerasan yang terjadi adalah larut padat substitusi dan atau pengerasan karena regangan.

PENGARUH IMPLANTASI ELEMEN REAKTIF PADA MATERIAL FeNiCr DAN FeAl UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN OKSIDASI SUHU TINGGI

Sudjatomoko

PTAPB – BATAN, Yogyakarta

Kusminarto

FMIPA – UGM, Yogyakarta

Utari, Anis Yuniati

Fakultas Pasca Sarjana – UGM, Yogyakarta

ABSTRAK

PENGARUH IMPLANTASI ELEMEN REAKTIF PADA MATERIAL FeNiCr DAN FeAl UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN OKSIDASI SUHU TINGGI. Telah dilakukan penelitian tentang pengaruh elemen reaktif, yaitu yttrium dan cerium pada material FeNiCr dan FeAl untuk meningkatkan ketahanannya terhadap oksidasi suhu tinggi. Ion yttrium dan cerium diimplantasikan pada permukaan cuplikan dengan energi 100 keV dan dosis ion bervariasi pada orde 10^{15} ion/cm². Uji oksidasi dilakukan dalam media oksigen kering pada suhu 850 °C dengan enam kali siklus termal, dan karakterisasi komposisi unsur dilakukan menggunakan teknik XRF dan SEM-EDAX. Berdasarkan penelitian tersebut disimpulkan bahwa implantasi ion-ion yttrium dan cerium pada permukaan cuplikan FeNiCr dan FeAl dapat meningkatkan ketahanannya terhadap oksidasi suhu tinggi. Ketahanan oksidasi optimum dari cuplikan FeNiCr diperoleh pada dosis ion yttrium $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion cerium $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm², sedangkan untuk cuplikan FeAl diperoleh pada dosis ion yttrium $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion cerium $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².

Kata kunci : elemen reaktif, implantasi ion, dosis ion, oksidasi suhu tinggi

ABSTRACT

EFFECT OF THE REACTIVE ELEMENT IMPLANTATION ON THE FeNiCr AND FeAl MATERIALS FOR IMPROVING ITS HIGH TEMPERATURE OXIDATION RESISTANCE. Research concerning the effect of reactive element, i.e. yttrium and cerium on the FeNiCr and FeAl materials for improving its high temperature oxidation resistance has been done. The yttrium and cerium ions were implanted on the surface of samples with energy of 100 keV and variation of ion dose on the order of 10^{15} ion/cm². Oxidation test of the samples were done in dry oxygen media at the temperature of 850 °C with six time of thermal cycling, and characterization of elemental composition of the samples were done by using XRF and SEM-EDAX techniques. Based on these research, it was concluded that the implantation of yttrium and cerium ions on the surface of FeNiCr and FeAl samples could increase its high temperature oxidation. The optimum oxidation resistance of FeNiCr sample was obtained at the yttrium ion dose of $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm² and cerium ion dose of $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm², whereas for FeAl sample was obtained at the yttrium ion dose of $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² and cerium ion dose of $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².

Key words : reactive element, ion implantation, ion dose, high temperature oxidation

PENDAHULUAN

Penguasaan teknologi untuk mengubah dan memperbaiki sifat-sifat permukaan bahan atau material agar diperoleh material baru dengan sifat mekanik dan sifat fisika yang lebih unggul sangat bermanfaat dalam pengembangan teknologi logam atau metal. Sifat mekanik dan sifat fisika suatu metal berkaitan erat dengan struktur kristalnya. Fenomena ini memungkinkan untuk mengubah sifat mekanik dari

suatu metal dengan cara melakukan proses pengubahan struktur kristalnya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk menghasilkan material, khususnya metal dengan sifat baru dan lebih unggul adalah dengan proses implantasi ion. Proses ini adalah merupakan menyisipkan ion ke dalam permukaan material. Dengan teknik implantasi ion, atom-atom diionkan terlebih dahulu di dalam sistem sumber ion, kemudian dipercepat dalam tabung akselerator sebelum diimplantasikan ke dalam permukaan material cuplikan.

Salah satu jenis material yang banyak digunakan untuk elemen pemanas, baik yang berbentuk lembaran maupun kawat, konstruksi mesin penukar panas (*heat exchanger*), komponen turbin uap dan lainnya, harus dipilih suatu material yang tahan terhadap operasi suhu tinggi^[1,2]. Material yang tahan pada operasi suhu tinggi seperti paduan FeNiCr, FeNiAl, FeCrAl dan FeAl, karena selama beroperasi mampu membentuk lapisan oksida pelindung (*protective oxide layer*) seperti khrom oksida (CrO_2) dan aluminium oksida atau sering disebut alumina (Al_2O_3)^[3,4,5]. Lapisan alumina tersebut berkembang sangat lambat dan mempunyai kestabilan termodinamik sangat baik. Kelemahan utama paduan tersebut adalah tidak tahan terhadap operasi di atas suhu 700°C ^[6], karena terjadi kerusakan pada lapisan oksida Al_2O_3 .

Selama proses pertumbuhan oksida akan muncul *stress* atau adanya *strain* yang dihasilkan oleh peristiwa mekanis di dalam komponen pada saat diperbaiki, maka lapisan proteksi yang telah terbentuk cenderung mengelupas (*spallation*). *Stress* juga muncul pada siklus termal yang disebabkan karena adanya perbedaan koefisien pengembangan panas antara lapisan oksida dan material induknya^[1]. Untuk mengatasi masalah tersebut pada umumnya ditambahkan unsur-unsur lain dengan jumlah tertentu. Unsur-unsur yang ditambahkan tersebut dinamakan elemen reaktif (*RE : Reactive Element*), dan yang termasuk elemen reaktif adalah yttrium (Y), cerium (Ce), zirkonium (Zr), hafnium (Hf) dan titanium (Ti). Elemen-elemen reaktif tersebut akan berfungsi sebagai penstabil dan menambah daya rekat (*adherence*) dari lapisan oksida protektif yang telah terbentuk sehingga menjadi lebih kuat meskipun terjadi siklus termal^[7]. Laju penebalan lapisan oksida yang terbentuk maupun perbandingan difusi Al ke arah luar dengan difusi O ke arah dalam adalah berbeda berdasarkan jenis dan bentuk dari elemen reaktif yang ditambahkan pada material paduan^[8].

Pada makalah ini dilaporkan hasil analisis pengaruh penambahan elemen reaktif Y dan Ce dengan teknik implantasi ion terhadap peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi material FeNiCr dan FeAl. Untuk mengetahui ketahanan terhadap oksidasi suhu tinggi dilakukan uji siklus termal pada suhu 850°C di lingkungan gas oksigen. Selain itu juga dilakukan analisis komposisi unsur dalam cuplikan sebelum proses implantasi dan setelah dilakukan implantasi ion, serta setelah proses siklus termal menggunakan teknik XRF dan EDAX. Diharapkan berdasarkan hasil penelitian ini diketahui bahwa penambahan elemen reaktif Y dan Ce dengan teknik implantasi ion dapat

meningkatkan sifat ketahanan oksidasi material suhu tinggi, terutama jenis paduan FeNiCr dan FeAl. Dengan demikian hasil penelitian ini melengkapi data-data penelitian sebelumnya, terutama peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi material FeCrAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium^[9], dan diharapkan hasil penelitian tersebut bermanfaat dalam bidang industri sebagai material pengganti paduan super.

TATAKERJA DAN PERCOBAAN

Persiapan Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian adalah material paduan suhu tinggi FeNiCr dan FeAl, serbuk yttrium dan cerium yang masing-masing mempunyai kemurnian 99,9%, kertas ampelas, alkohol dan pasta intan.

Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain terdiri dari alat pemotong cuplikan, peralatan penghalus cuplikan, penggetar ultrasonik, akselerator implantasi ion 200 keV/2 mA buatan PTAPB-BATAN, tabung *furnace* type RTI/AGG : 220 volt/45 ampere dan suhu maksimum 1.000°C , neraca analitis GR Series : beban minimum 0,1 mg dan beban maksimum 210 g, peralatan XRF dan SEM-EDAX.

Material paduan suhu tinggi tersebut dipotong-potong dalam bentuk keping ukuran $10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ kemudian permukaannya dihaluskan menggunakan kertas ampelas, selanjutnya dipoles menggunakan pasta intan dan digosok dengan kain beludru sampai dihasilkan permukaan yang halus dan mengkilap. Untuk menghilangkan kotoran pada permukaan cuplikan dilakukan pencucian menggunakan alkohol dan kemudian dimasukkan dalam penggetar ultrasonik. Pengeringan cuplikan dilakukan dalam oven, kemudian disimpan dalam desikator agar cuplikan tidak terkontaminasi oleh udara.

Proses Implantasi Ion

Penyisipan elemen-elemen reaktif yttrium dan cerium dilakukan dengan menggunakan akselerator implantasi ion 200 keV/2 mA buatan PTAPB-BATAN Yogyakarta. Ada dua besaran penting dalam proses implantasi ion, yaitu kedalaman penetrasi ion pada permukaan material dan distribusi konsentrasi ion yang diimplantasikan. Parameter kedalaman penetrasi ion adalah jenis ion dan energi ion yang diimplantasikan serta jenis material atau bahan; sedangkan parameter yang mempengaruhi distribusi konsentrasi ion adalah arus

berkas ion dan lamanya proses implantasi ion berlangsung. Dalam penelitian ini, dosis ion divariasi dengan mengubah waktu atau lamanya proses implantasi, sedangkan energi dan arus berkas ion dibuat konstan masing-masing 100 keV dan 10 μ A. Dosis ion yttrium dan cerium yang diimplantasikan ke permukaan cuplikan FeNiCr masing-masing adalah $5,72 \times 10^{15}$ ion/cm², $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm²; sedang dosis ion untuk implantasi pada permukaan cuplikan FeAl masing-masing adalah $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $8,94 \times 10^{15}$ ion/cm².

Uji Oksidasi Siklus Termal

Uji oksidasi dilakukan setelah proses implantasi ion dan penimbangan cuplikan selesai. Uji oksidasi ini dilakukan dalam kondisi siklus termal dengan menggunakan tabung *furnace*. Sebagai tempat cuplikan digunakan tabung kaca jenis kuarsa yang tahan sampai suhu 1.000 °C. Uji oksidasi dilakukan dalam media oksigen kering, yaitu dengan mengalirkan oksigen dengan laju aliran 4,17 cc/menit dan tekanan 1 bar ke dalam tabung selama 6 siklus termal. Setiap siklus termal adalah 7 jam pemanasan pada suhu 850 °C dan pendinginan selama 17 jam pada suhu kamar 27 °C, setelah itu cuplikan ditimbang dan dicatat perubahan beratnya (Δm) kemudian dibuat grafik antara perubahan berat cuplikan dengan waktu oksidasi.

Karakterisasi XRF

Untuk menganalisis komposisi unsur di dalam cuplikan setelah proses implantasi ion digunakan teknik XRF, yaitu suatu metode analisis yang berdasarkan pada pengukuran energi dan intensitas spektra sinar-X yang dihasilkan sebagai akibat interaksi atom-atom unsur cuplikan yang dikenai radiasi sumber pegeksitasi (radioisotop). Radiasi sumber radioisotop terhadap cuplikan akan menghasilkan sinar-X yang selanjutnya akan mengenai detektor, sehingga akan dihasilkan denyut listrik atau pulsa. Energi sinar-X dari cuplikan yang terukur digunakan sebagai dasar analisis kualitatif, yang bertujuan untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung dalam suatu cuplikan. Intensitas spektrum sinar-X dipakai sebagai dasar analisis kuantitatif, yang dapat digunakan untuk mengetahui perbandingan unsur-unsur di dalam cuplikan, serta digunakan untuk mengetahui prosentase unsur yang ada dalam cuplikan jika diketahui standarnya.

Karakterisasi SEM-EDAX

Untuk mengetahui apakah elemen-elemen reaktif telah terimplantasi pada permukaan cuplikan,

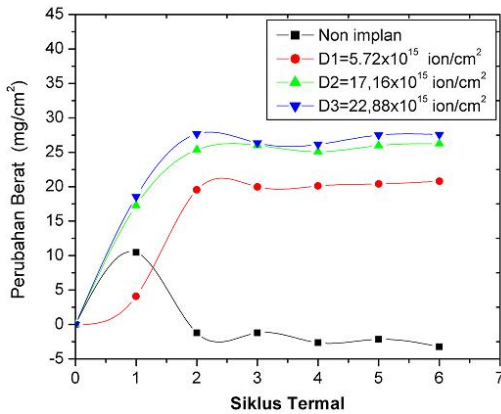
selain dilakukan dengan menggunakan teknik XRF, dalam penelitian ini juga dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-Ray*). Peralatan SEM ini menggunakan hamburan balik dan pantulan sekunder dari berkas elektron setelah berkas elektron berinteraksi dengan materi. Hasil interaksi tersebut berupa pantulan elektron-elektron sekunder, elektron-elektron yang terhambur dan radiasi sinar-X karakteristik akan memberikan informasi mengenai keadaan cuplikan seperti bentuk permukaan (topografi) dan komposisi kimia yang terkandung dalam cuplikan. Radiasi sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh cuplikan dapat memberikan informasi secara kualitatif dan kuantitatif tentang komposisi kimia dari cuplikan pada daerah yang sangat kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penambahan elemen-elemen reaktif seperti yttrium dan cerium dengan teknik implantasi ion biasanya akan efektif apabila jumlahnya antara 0,1% sampai dengan 2 % berat serta terdistribusi merata pada kedalaman sekitar 500 Å. Elemen reaktif tersebut akan berperan sebagai penstabil dan menambah daya lekat dari lapisan oksida protektif yang telah terbentuk sehingga menjadi kuat walaupun terjadi siklus termal.

Dalam penelitian ini dilakukan uji siklus termal untuk cuplikan FeNiCr dalam oksigen pada suhu 850 °C dengan pemanasan 7 jam dan waktu pendinginan 17 jam serta dilakukan dalam 6 kali siklus termal. Hasil uji siklus termal dari cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi dan setelah implantasi ion yttrium ditampilkan pada Gambar 1, dan untuk cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium ditampilkan pada Gambar 2.

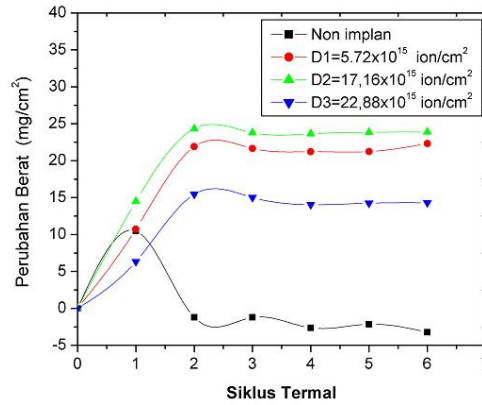
Berdasarkan hasil uji siklus termal pada Gambar 1 terlihat bahwa secara umum penambahan elemen reaktif yttrium dapat meningkatkan ketahanan cuplikan FeNiCr terhadap oksidasi suhu tinggi jika dibandingkan dengan cuplikan tanpa implantasi. Pada proses oksidasi sampai siklus 2 yaitu antara 0 hingga 14 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif. Selanjutnya perubahan berat cuplikan relatif kecil sebagai akibat terhentinya proses oksidasi lanjut, hal ini disebabkan karena adanya elemen reaktif yang dapat menghambat laju masuknya gas oksigen ke dalam cuplikan.



Gambar 1. Laju oksidasi cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi dan yang diimplantasi dengan ion yttrium pada dosis $D_1 = 5,72 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ dan $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$.

Namun akibat terjadinya siklus termal maka terjadi pengelupasan pada lapisan oksida yang telah terbentuk. Hal ini terlihat dengan terjadinya pengurangan berat pada interval siklus termal 2 – 3, yaitu 14 jam hingga 21 jam pada dosis $D_1 = 5,72 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ dan dosis $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, kemudian pada interval siklus termal berikutnya terjadi penambahan berat hingga terlihat mendarat. Sedangkan pada dosis $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ terjadi pengurangan berat dalam interval siklus termal 3 – 4, yaitu 21 hingga 28 jam, kemudian terjadi penambahan berat hingga terlihat agak mendarat pada interval siklus termal berikutnya. Hasil-hasil tersebut memperlihatkan bahwa cuplikan FeNiCr yang diimplantasi ion yttrium, pengelupasan tidak sampai terjadi di dalam substrat karena yttrium oksida yang terbentuk menjadi lapisan pelindung bagi material induk dan sekaligus menambah daya lekat antara oksida dan material induknya. Ketahanan oksidasi suhu tinggi optimum diperoleh pada cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion yttrium dosis $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$. Sedangkan cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi setelah proses oksidasi > 14 jam terjadi pengelupasan lapisan oksida protektif dari substratnya, hal ini ditandai dengan berkurangnya berat cuplikan.

Pada Gambar 2 ditampilkan hasil uji siklus termal dari cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium. Pada proses oksidasi pada siklus termal 0 - 2, yaitu antara 0 hingga 14 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif.



Gambar 2. Laju oksidasi cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi dan yang diimplantasi dengan ion cerium pada dosis $D_1 = 5,72 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ dan $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$.

Selanjutnya perubahan berat cuplikan relatif kecil sebagai akibat terhentinya proses oksidasi lanjut, hal ini disebabkan karena adanya elemen reaktif yang dapat menghambat laju masuknya gas oksigen ke dalam cuplikan. Dalam interval siklus termal 2 – 3, yaitu antara 14 hingga 21 jam terlihat terjadinya pengurangan berat untuk semua dosis ion, karena terjadi pengelupasan lapisan oksida yang telah terbentuk; kemudian pada interval siklus termal berikutnya terjadi penambahan berat hingga terlihat mendarat karena terbentuknya kembali lapisan oksida protektif sebagai lapisan pelindung bagi material induknya. Ketahanan oksidasi suhu tinggi optimum diperoleh pada cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium dosis $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$.

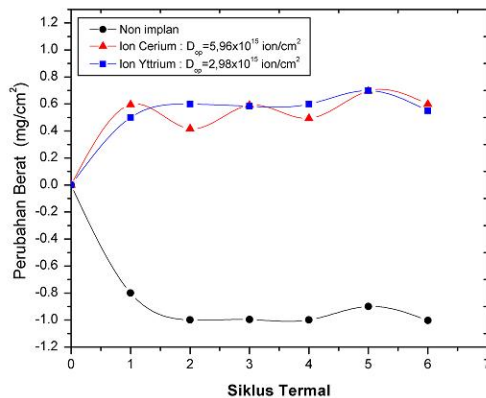
Untuk mengetahui komposisi unsur dalam cuplikan FeNiCr sebelum dan setelah proses implantasi ion dilakukan karakterisasi dengan teknik XRF. Hasil analisis komposisi unsur dalam cuplikan FeNiCr tersebut disajikan pada Tabel 1.

Berdasarkan hasil analisis komposisi unsur cuplikan FeNiCr pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa cuplikan FeNiCr standar tidak hanya terdiri dari unsur Fe, Ni dan Cr, tetapi juga terdapat unsur Mo dengan kadar 6,1 (% massa). Unsur-unsur lain selain Mo misalnya Al kemungkinan ada, tetapi tidak terdeteksi oleh alat XRF. Pada cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion yttrium terdeteksi adanya unsur yttrium dengan kadar 1,2 (% massa), dan cuplikan yang diimplantasi dengan ion cerium terdeteksi adanya unsur cerium dengan kadar 0,8 (% massa).

Tabel 1. Hasil analisis komposisi unsur cuplikan FeNiCr dengan teknik XRF

No.	Jenis Cuplikan	Jenis Unsur	% massa
1.	FeNiCr tanpa implantasi	Fe Ni Cr Mo	47,7 22,5 23,6 6,1
2.	FeNiCr yang diimplantasi dengan ion yttrium : dosis ion $5,72 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi 100 keV	Fe Ni Cr Mo Y	62,3 14,2 21,4 0,8 1,2
3.	FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium : dosis ion $5,72 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi 100 keV	Fe Ni Cr Mo Ce	50 22,4 22,1 4,7 0,8

Pada penelitian ini selain digunakan cuplikan FeNiCr, juga digunakan cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium pada energi yang sama yaitu 100 keV, akan tetapi dengan dosis ion yang berbeda berdasarkan pertimbangan karena material dasar yang digunakan berbeda dan untuk mendapatkan peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi yang optimum. Selain dibahas tentang laju oksidasi juga dilakukan analisis komposisi dan morfologi cuplikan FeAl sebelum dan setelah implantasi ion yttrium dan cerium.



Gambar 3. Laju oksidasi cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi dan yang diimplantasi ion yttrium dengan dosis optimum $D_{op} = 2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², dan ion cerium dengan dosis optimum $D_{op} = 5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².

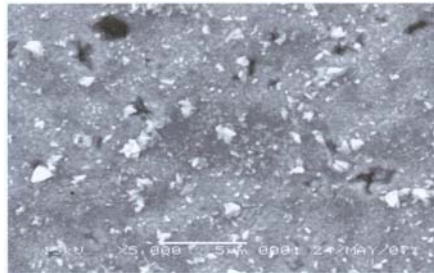
Berdasarkan hasil uji siklus termal pada Gambar 3 terlihat bahwa penambahan elemen reaktif yttrium dan cerium dapat meningkatkan ketahanan cuplikan FeAl terhadap oksidasi suhu tinggi, jika dibandingkan dengan cuplikan tanpa diimplantasi. Untuk cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium, proses oksidasi pada siklus termal 0 – 2, yaitu antara 0 hingga 14 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif. Pada siklus termal 2 -3 dan berikutnya pada siklus termal 3 – 4 relatif stabil tidak terjadi penambahan berat cuplikan, akan tetapi terjadi pembentukan lapisan oksida pada siklus termal 4 – 5 dan kemudian terjadi pengelupasan lapisan oksida pada siklus termal 5 – 6 yang ditandai dengan pengurangan berat cuplikan. Berdasarkan uji siklus termal tersebut dapat diketahui bahwa dosis ion yttrium optimum diperoleh pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm².

Pada Gambar 3 juga ditampilkan hasil uji siklus termal cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion cerium. Berdasarkan hasil uji siklus termal diketahui bahwa implantasi ion cerium dengan dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² yang mempunyai efek meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi dari cuplikan FeAl, sedangkan pada dosis ion cerium $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion cerium $8,94 \times 10^{15}$ ion/cm² tidak terjadi peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi. Pada siklus termal 0 – 1, yaitu antara 0 hingga 7 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif. Pada siklus termal 1 – 2 terjadi sedikit pengurangan berat karena terjadi pengelupasan lapisan oksida; selanjutnya pada siklus 2 – 3 terjadi sedikit penambahan berat karena terjadi lagi pertumbuhan lapisan oksida proteksi. Hal ini terjadi secara berulang hingga siklus termal ke 6, dan secara keseluruhan dengan implantasi ion cerium pada dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² terjadi peningkatan ketahanan terhadap oksidasi suhu tinggi.

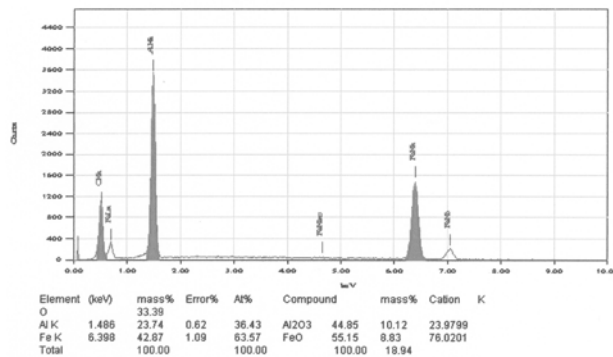
Hasil karakterisasi komposisi unsur dalam cuplikan FeAl setelah proses oksidasi hingga siklus termal ke enam disajikan pada Tabel 2 menggunakan teknik EDAX. Karakterisasi EDAX tersebut menghasilkan kandungan unsur-unsur pada cuplikan FeAl dan lapisan oksida yang terbentuk dalam prosen massa. Berdasarkan hasil analisis komposisi unsur yang disajikan pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi mengandung unsur-unsur Fe: 42,87 (% massa), Al: 23,74 (% massa) dan O: 33,39 (% massa), serta

Tabel 2. Hasil analisis komposisi unsur cuplikan FeAl dengan teknik EDAX

No.	Jenis Cuplikan	Jenis Unsur	% massa	Jenis Oksida	% massa
1.	FeAl tanpa implantasi	Fe	42,87	Al ₂ O ₃	44,85
		Al	23,74	FeO	55,15
		O	33,39		
2.	FeAl diimplantasi ion yttrium dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi ion 100 keV, pada 6 kali siklus termal	Fe	29,50	Al ₂ O ₃	61,37
		Al	32,48	FeO	37,95
		O	37,49	Y ₂ O ₃	0,68
		Y	0,54		
3.	FeAl diimplantasi ion cerium dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi ion 100 keV, pada 6 kali siklus termal	Fe	16,17	Al ₂ O ₃	78,48
		Al	41,54	FeO	20,80
		O	41,71	CeO ₂	0,72
		Ce	0,59		



(a)

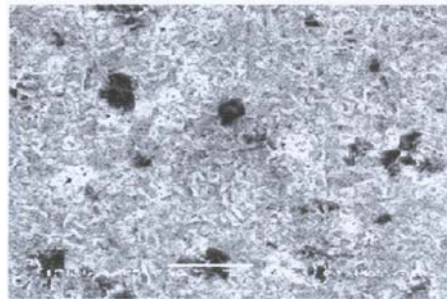


(b)

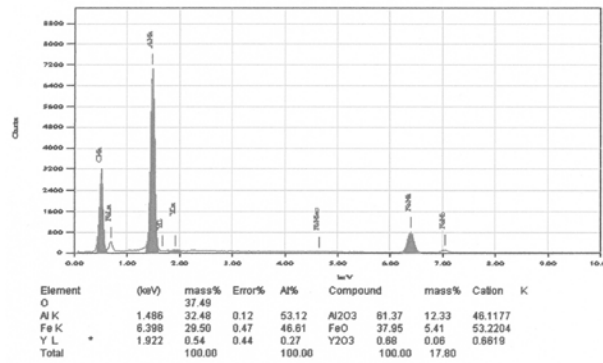
Gambar 4. (a) Morfologi permukaan cuplikan FeAl dan (b) kandungan unsur cuplikan FeAl tanpa implantasi setelah mengalami enam kali siklus termal.

oksida Al₂O₃: 44,85 (%massa) dan FeO: 55,15 (%massa). Hasil analisis komposisi unsur dari cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² memperlihatkan kandungan unsur Fe: 29,50 (% massa), Al: 32,48 (%massa), O: 37,49 (%massa) dan Y: 0,54 (%massa), serta oksida Al₂O₃: 61,37 (% massa), FeO: 37,95 (% massa) dan Y₂O₃: 0,68 (% massa). Sedangkan hasil analisis komposisi unsur dari cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion cerium

pada dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² memperlihatkan kandungan unsur-unsur Fe: 16,17 (% massa), Al: 41,54 (% massa), O: 41,71 (% massa) dan Ce: 0,59 (% massa), serta oksida Al₂O₃: 78,48 (%massa), FeO: 20,80 (% massa) dan CeO₂: 0,72 (% massa). Berdasarkan data-data pada Tabel 2 tersebut terbentuk lapisan yttrium oksida dan cerium oksida pada masing-masing cuplikan yang diimplantasi dengan ion yttrium dan ion cerium, dan lapisan oksida tersebut menjadi lapisan pelindung

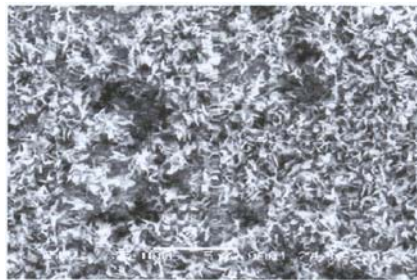


(a)

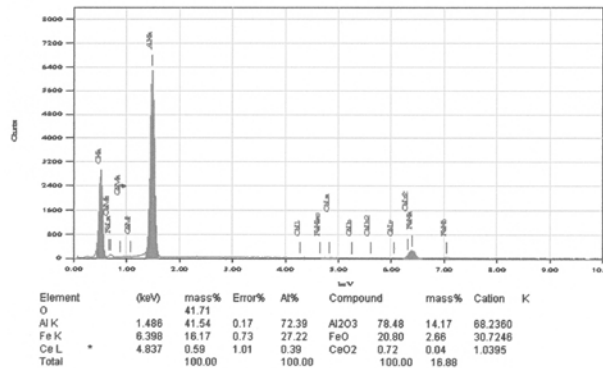


(b)

Gambar 5. (a) Morfologi permukaan material FeAl dan (b) kandungan unsur cuplikan FeAl yang diimplantasi ion yttrium dengan dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah mengalami enam kali siklus termal.



(a)



(b)

Gambar 6. (a) Morfologi permukaan material FeAl dan (b) kandungan unsur cuplikan FeAl yang diimplantasi ion cerium dengan dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah mengalami enam kali siklus termal.

bagi material induk dan sekaligus menambah daya lekat antara oksida dan material induknya.

Hasil karakterisasi menggunakan SEM memberikan morfologi permukaan material FeAl, baik yang tidak diimplantasi maupun yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium setelah melewati siklus termal ditampilkan pada Gambar 4(a), 5(a) dan 6(a). Berdasarkan hasil karakterisasi dengan SEM terlihat jelas perbedaan struktur morfologi cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi dengan cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium. Pada cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi menunjukkan permukaan yang tidak rata dan tidak teratur, dan terbentuk lapisan oksida Al_2O_3 dan FeO yang mudah mengelupas jika mengalami oksidasi karena daya lekatnya yang lemah. Sedangkan morfologi permukaan cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium terlihat lebih teratur dan terjadi perubahan butir-butir yang semakin besar. Pada permukaan cuplikan terbentuk lapisan oksida yttrium dan oksida cerium yang mempunyai daya lekat kuat, sehingga dapat melindungi permukaan cuplikan dari oksidasi suhu tinggi.

Karakterisasi EDAX menghasilkan kandungan unsur-unsur pada cuplikan FeAl dan hasil karakterisasi ditampilkan pada Gambar 4(b), 5(b) dan 6(b). Pada Gambar 4(b) adalah hasil karakterisasi EDAX dari cuplikan yang tidak diimplantasi terdapat unsur-unsur O, Al, Fe serta lapisan oksida Al_2O_3 dan FeO. Pada Gambar 5(b) ditampilkan cuplikan yang diimplantasi dengan ion yttrium terdapat unsur-unsur O, Fe, Al, Y serta lapisan oksida Al_2O_3 , FeO dan Y_2O_3 , dan lapisan oksida yttrium yang paling banyak diperoleh pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm². Unsur yttrium sebesar 0,54 (% massa) muncul sebagai hasil proses implantasi ion, dan setelah dilakukan uji oksidasi pada suhu 850 °C dan pada siklus termal ke enam terlihat bahwa selain terbentuk lapisan oksida Al_2O_3 dan FeO, juga terbentuk lapisan yttrium oksida Y_2O_3 : 0,68 (% massa) yang mempunyai daya lekat kuat sehingga dapat melindungi permukaan cuplikan dari oksidasi suhu tinggi.

Gambar 6(b) menampilkan hasil karakterisasi EDAX dari cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion cerium pada dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm². Pada permukaan cuplikan tersebut terdapat unsur-unsur O, Al, Fe, Ce dan lapisan oksida Al_2O_3 , FeO dan CeO_2 , dan unsur cerium 0,59 (% massa) muncul sebagai hasil proses implantasi ion. Seperti pada cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium, setelah dilakukan uji oksidasi pada suhu 850 °C dan siklus termal ke enam, terlihat adanya lapisan oksida Al_2O_3 , FeO dan juga lapisan cerium

oksida CeO_2 : 0,72 (% massa) yang mampu melindungi permukaan cuplikan dari oksidasi suhu tinggi. Dengan demikian implantasi elemen reaktif baik yttrium maupun cerium dapat meningkatkan ketahanan cuplikan FeAl terhadap oksidasi suhu tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan tersebut di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penambahan elemen reaktif yttrium dan cerium pada cuplikan FeNiCr dan FeAl dengan teknik implantasi untuk meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi memberikan hasil yang cukup signifikan bergantung terutama pada dosis ion yang diberikan, dan juga pada jenis material cuplikan yang digunakan.
2. Berdasarkan hasil uji oksidasi pada suhu 850 °C selama enam kali siklus termal dapat diketahui bahwa nilai dosis optimum ion yttrium adalah $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm² pada cuplikan FeNiCr dan dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² pada cuplikan FeAl; sedangkan nilai dosis optimum ion cerium sebesar $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm² pada cuplikan FeNiCr dan dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².
3. Peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi pada cuplikan FeNiCr dan FeAl masing-masing terjadi karena adanya elemen reaktif yttrium dan cerium yang diimplantasikan pada permukaan cuplikan, yang hasilnya ditunjukkan dari hasil karakterisasi dengan teknik XRF untuk cuplikan FeNiCr dan dengan teknik EDAX untuk cuplikan FeAl. Khususnya dengan teknik EDAX dapat dilihat terbentuknya lapisan oksida Al_2O_3 yang disertai dengan terbentuknya lapisan yttrium oksida Y_2O_3 dan cerium oksida CeO_2 . Lapisan oksida elemen reaktif tersebut menghambat terjadinya pengelupasan kerak oksida yang telah terbentuk sebelumnya, dan menghambat laju masuknya gas oksigen ke dalam material induk sehingga oksidasi lebih lanjut tidak terjadi, serta menambah daya lekat lapisan oksida yang terbentuk dengan material induk sehingga tidak mudah terjadi pengelupasan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Utari dan Sdr. Anis Yuniati, Mahasiswa Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada yang telah membantu melakukan eksperimen dan analisis data, sehingga

penelitian yang penulis lakukan dapat diselesaikan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Sunarto dan Sdr. Irianto yang telah membantu melakukan eksperimen dan pengambilan data. Semoga amal baik Saudara sekalian mendapat balasan dari Allah SWT. Amien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] JEDLINSKI, J., "The Oxidation Behavior of FeCrAl Aluminium Forming Alloys at High Temperature", *Solid State Ionics*, (1997) 101-103
- [2] PINT, B.A., SWINDEMAN, R.W., MORE, K.L., and TORTORELLI, P.F., "Material Selection for High Temperature (750° – 1000 °C) Metallic Recuperators for Improved Efficiency Microturbines" Oak Ridge National Laboratory, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge, Tennessee, USA
- [3] QUADAKKERS, W.J., MALKOW, I., and NICKEL, H., "The Effect of Mayor and Minor Alloying Elements on the Oxidation Limited Life of FeCrAl Based Alloys", *Proceedings of the 2nd International Conference on Heat Resistant*, Gatlinburg, Tennessee, (1995) 91-96
- [4] GURRAPA, I., WEINBRUCH, S., NAUMENKO, D., and QUADAKKERS, W.J., "Factor Governing Breakway Oxidation of FeCrAl Based Alloys", *Materials and Corrosion* 51, (2000) 224-235
- [5] N'DAH, E., GALERIE, A., WOUTERS, Y., GOOSSENS, D., NAUMENKO, D., KOCHUBEY, V., QUADAKKERS, W.J., "Metastable Alumina Formation During Oxidation of FeCrAl and Its Suppression by Surface Treatments" *Materials and Corrosion*, Vol. 56, Issue 12, (2005) 843-847
- [6] HORNAUER, U., "Microstructure and oxidation kinetics of intermetallic TiAl after Si and Mo ion implantation", *Surface and Coatings Technology*, 2000
- [7] PIN, B.A., MORE, K.L., TORTORELLI, P.F., PORTER, W.D., and WRIGHT, I.G., "Optimizing the Imperfect Oxidation Performance of Iron Aluminides", Oak Ridge National Laboratory, USA
- [8] NYCHKA, J.A., and CLARKE, D.R., "Quantification of Aluminium Outward Diffusion During Oxidation of FeCrAl Alloys", *Oxidation of Metals*, Vol. 63, Nos. 5/6, (2005) 325-352
- [9] UNTORO, P., SUDJATMOKO, et al., "The Effect of Yttrium of the Oxide Dispersion Strengthened MA956 on Their Microstructure Behaviour", *Korosi & Material, Proceeding Seminar Nasional Korosi 2001*, Bandung (2001) XIII-1 – XIII-8

TANYA JAWAB

Indraswari Suroso

- Apakah jika divariasikan arusnya tetap dapat meningkatkan ketahanan oksidasi material pada suhu tinggi?
- Apakah pengaruh yttrium dan cerium pada FeNiCr dan FeAl jika suhu tidak tinggi/rendah?

Sudjatomoko

- Dosis ion yang diimplantasikan sebagai fungsi arus berkas ion dan waktu implantasi, jadi untuk variasi arus atau variasi waktu diharapkan dapat meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi suatu material
- Untuk operasi suhu rendah tidak diperlukan implantasi yttrium atau cerium, karena pada FeNiCr dan FeAl akan terbentuk oksida protektif CrO₂ dan Al₂O₃ yang melindungi terjadinya oksida

Mudjijana

- Berapa beban yang diberikan pada saat uji siklus termal?

Sudjatomoko

- Pada saat uji siklus termal hanya dialirkan gas oksigen dengan laju aliran 4,17 cc/menit dan tekanan 1 bar, serta pada suhu 850°C tanpa pemberian beban

Suryadi

- Apakah ada kaitan dosis optimum dengan struktur kimia yang terbentuk di permukaan. Untuk skala industri (pembuatan turbin) apa ada metode implantasi dapat digunakan atau ada metode yang lain

Sudjatomoko

- Pada umumnya dosis optimum berkaitan dengan sifat-sifat mekanik dan morfologi permukaan bahan, tetapi kami tidak tahu kaitan dengan struktur kimianya. Untuk skala industri tidak menggunakan metode implantasi ion, tetapi menggunakan metode lain.

PENGERASAN PERMUKAAN PENA PISTON DENGAN TEKNIK NITRIDASI PLASMA

Suprpto, Lely Susita RM, Sukidi

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

ABSTRAK

PENGERASAN PERMUKAAN PENA PISTON DENGAN TEKNIK NITRIDASI PLASMA. Telah dilakukan nitridasi dengan teknik nitridasi plasma untuk pengerasan permukaan pena piston. Nitridasi bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat mekanik permukaan khususnya peningkatan kekerasan. Peningkatan kekerasan hanya pada permukaan material sedangkan pada bagian dalam sifatnya tetap seperti sifat sebelum dinitridasi. Nitridasi dilakukan dengan variasi tekanan untuk mendapatkan kondisi optimal sehingga diperoleh kekerasan maksimum. Hasil nitridasi diperoleh kekerasan maksimum 1102,91 KHN pada tekanan 1,8 mbar dengan peningkatan kekerasan 4,01 kali dibanding sebelum dinitridasi. Homogenitas kekerasan didapatkan 91 % untuk beban indentasi 10 gf dan 98 % untuk beban indentasi 200 gf. Untuk uji variasi beban indentasi ditunjukkan bahwa makin besar beban indentasi makin dalam bekas indentasi sehingga diperoleh kekerasan Vickers lebih rendah. Hasil uji metalografi diperoleh perubahan struktur butiran ferrit dan perlit yaitu berubah menjadi butiran yang halus sehingga terjadi peningkatan kekerasan.

Kata kunci: Pengerasan permukaan, pena piston, nitridasi plasma.

ABSTRACT

SURFACE HARDENING OF PISTON PEN USING PLASMA NITRIDING TECHNIQUES. Nitriding of piston pen has been done by using plasma nitriding technique. The purpose of this nitriding is to improve the mechanical properties piston pen especially its surface hardness. In the surface hardening, only the surface is improved, while the inner properties do not change, same as the base materials. To get the optimum conditions, the parameters such as gas pressure were varied. The maximum hardness in the order of 1102.91 KHN was achieved in pressure 1.8 mbar. Compared to the initial hardness (in the order of 220 KHN), the optimum increasing of hardness is 401 %. The homogeneity of hardness was achieved 91 % for indenter load 10 gf and 98 % for indenter load 200 gf. The test of indenter load variation indicated that the heavier the load indenter, more trace indented so that the lower hardness Vickers is obtained. From metallographic observation using optical microscope, it can be concluded that there is a phase changing from coarse ferrite and perlite to fine ferrite, and perlite structure such as to improve hardness.

Keywords: Surface hardening, piston pen, plasma nitriding.

PENDAHULUAN

Di dunia industri khususnya di industri permesinan memerlukan bahan yang mempunyai sifat: keras, tahan aus, tahan korosi, ulet, dan tangguh. Untuk komponen-komponen mesin yang saling bergesekan dengan komponen yang lain dan harus menopang beban berat sifat bahan tersebut sangat penting. Contoh komponen-komponen mesin ini adalah poros, bantalan, piston, cincin piston, pena piston dan batang piston. Pada kondisi operasi, poros berputar pada bantalan dan menopang beban sehingga terjadi gesekan antar permukaannya dan menimbulkan keausan. Disamping itu poros juga harus menopang beban yaitu: beban yang menyebabkan terjadinya momen putir, beban yang menyebabkan momen lengkung dan kombinasi dari kedua beban tersebut. Untuk piston dan cincin piston

bergesekan dengan silinder, sedangkan pena piston dan batang piston saling bergesekan saat meneruskan tenaga. Karena komponen ini disamping bergesekan juga menahan tekanan sehingga beban akibat tekanan tersebut ditumpu pada permukaannya maka akan terjadi keausan. Komponen-komponen ini kebanyakan dibuat dari baja karbon atau baja paduan. Baja karbon kemungkinan memenuhi sifat-sifat yang diperlukan tersebut sangat kecil, sedangkan untuk baja paduan kemungkinan dapat memenuhi sifat-sifat yang diperlukan namun harganya sangat mahal. Agar didapatkan harga yang lebih murah dan kualitasnya terpenuhi maka komponen suatu mesin kebanyakan dibuat dari bahan baja karbon dan dilanjutkan dengan perlakuan permukaan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus.

Beberapa jenis perlakuan permukaan secara konvensional untuk meningkatkan sifat mekanik permukaan logam antara lain cara karburasi, nitridasi, karbonitridasi, nyala api, dan induksi listrik^[1,2,3]. Dengan kemajuan teknologi untuk memperbaiki sifat mekanik permukaan logam, saat ini mulai dikembangkan cara lain untuk membentuk lapisan tipis dan memperbaiki sifat-sifat pada permukaannya. Cara tersebut meliputi metode evaporasi, implantasi ion, plasma lucutan pijar RF, dan plasma lucutan pijar DC^[4,5]. Pada penelitian ini digunakan metode plasma lucutan pijar DC yang diaplikasikan untuk proses nitridasi yang disebut nitridasi ion. Kelebihan dari metode ini yaitu dapat menghasilkan lapisan tipis baik dengan gas maupun bahan padat yang mempunyai titik leleh tinggi (*plasma sputtering*)^[5,6,7,8]. Di PTAPB-BATAN telah dilakukan rancang bangun sistem nitridasi ion dan untuk mengetahui kinerjanya maka digunakan untuk proses nitridasi komponen mesin yaitu pena piston agar sifat keras permukaannya dapat meningkat sehingga ketahanan ausnya meningkat dan menambah umur pakai.

DASAR TEORI

Nitridasi

Nitridasi adalah suatu proses pengerasan permukaan dengan menambahkan unsur nitrogen pada permukaan benda kerja (biasanya baja). Pada proses nitridasi secara konvensional dibedakan menjadi 2 (dua) cara yaitu proses nitridasi dengan gas (*gas nitriding*) dan proses nitridasi dengan cairan (*liquid nitriding*). Sehubungan dengan perkembangan teknologi telah dikembangkan teknologi terkini untuk proses nitridasi yaitu teknik nitridasi ion/plasma (*ion/plasma nitriding*)^[5,7,8].

Proses nitridasi dengan gas (*gas nitriding*)

Pada proses nitridasi ini menggunakan gas amonia (NH₃), nitridasi dilakukan di dalam tanur (*furnace*) pada suhu antara 460°C s/d. 600°C. Pada suhu ini amonia akan berdesosiasi sehingga menghasilkan atom hidrogen dan nitrogen dengan reaksi sebagai berikut:^[5]

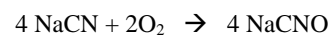


Dari desosiasi ini selanjutnya atom nitrogen larut pada permukaan benda yang dinitridasi sehingga membentuk nitrida. Proses nitridasi pada umumnya diterapkan untuk pengerasan peralatan (komponen mesin) yang terbuat dari baja karbon medium dan baja paduan yang mengandung unsur-unsur: Al, Cr, Mo dan unsur lain yang memungkinkan bereaksi dengan unsur nitrogen. Unsur-unsur baja tersebut akan bereaksi dengan nitrogen yang larut secara

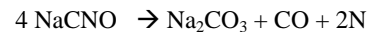
interstisi sehingga membentuk nitrida-nitrida seperti: Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N, Cr₂N, Mo₂N maupun AlN. Penggunaan metode ini umumnya untuk *valve guide*, *valve setting*, roda gigi (*gear* dan *pinion*), pena piston, cincin piston, dan *spiral springs*^[5].

Proses nitridasi dengan cairan (*liquid nitriding*)

Pada proses nitridasi ini menggunakan cairan garam seperti *cyanide-cyanite salts* yang mengandung 60% - 70% NaCN (berat) dan 30% - 40% KCN (berat). Proses ini diawali pencairan garam pada daerah suhu 560°C - 570°C dan waktu 1 - 2 jam untuk membasahi permukaan logam yang dinitridasi. Kemudian dilanjutkan dengan proses nitridasi pada suhu antara 565°C - 595°C dengan waktu sampai 12 jam. Untuk menghasilkan nitrogen dengan reaksi sebagai berikut^[5]:



Sodium cyanate ini bersifat tidak stabil sehingga terurai menghasilkan nitrogen sebagai berikut^[5]:



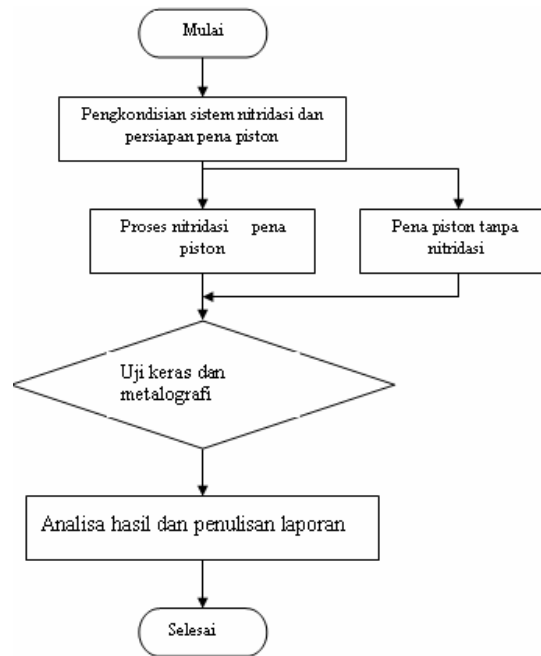
Selanjutnya atom nitrogen larut pada permukaan benda yang dinitridasi sehingga membentuk nitrida seperti pada nitridasi dengan gas NH₃.

Proses nitridasi dengan teknik nitridasi ion/plasma

Cara lain yang digunakan dalam proses nitridasi untuk pengerasan permukaan adalah dengan teknik nitridasi ion/plasma (*plasma nitriding*)^[5,7,8]. Teknik nitridasi ion/plasma termasuk teknologi terkini yang digunakan untuk proses pengerasan permukaan yang merupakan salah satu pengembangan pemanfaatan teknologi plasma. Pada nitridasi ion/plasma, proses nitridasi dilakukan dengan mendeposisikan ion nitrogen pada permukaan yang dikeraskan. Untuk membentuk ion nitrogen dilakukan dengan cara memplasmakan gas nitrogen di dalam tabung reaktor plasma sehingga terbentuk pasangan ion nitrogen dan elektron. Ion-ion nitrogen ini terdepositasi pada permukaan yang dikeraskan, sehingga terjadi difusi dan kelarutan secara interstisi membentuk lapisan nitrida. Jika yang dinitridasi adalah baja dengan unsur utama Fe maka akan terbentuk lapisan nitrida besi (FeN) pada permukaan. Nitrida besi (FeN) mempunyai sifat sangat keras sehingga membentuk lapisan keras pada permukaan baja yang dinitridasi.

TATA KERJA

Langkah-langkah dalam melakukan proses nitridasi dengan sistem nitridasi ion digambarkan dengan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1.



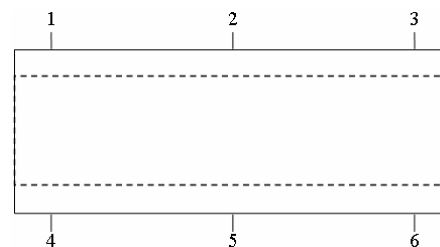
Gambar 1. Diagram alir proses nitridasi pena piston

Proses nitridasi dimulai dengan persiapan yaitu pembuatan cuplikan (pena piston) dan pengkondisian alat. Pena piston dibuat dari bahan baja ST 42 yang ukurannya disesuaikan dengan pena piston salah satu sepeda motor yang banyak digunakan di masyarakat sehingga dimensinya sesuai dengan dimensi sesungguhnya yaitu dengan diameter luar 13 mm, diameter dalam 7,8 mm dan panjang 38 mm. Dengan dimensi ini dapat diketahui fungsi sistem nitridasi ion/plasma untuk nitridasi komponen mesin yang sesungguhnya. Untuk mendapatkan tekanan optimum saat nitridasi dilakukan dengan variasi tekanan mulai 1,2 mbar sampai 2,0 mbar dengan interval 0,2 mbar.

Pengujian hasil nitridasi

Pengujian hasil nitridasi adalah untuk mengetahui peningkatan kekerasan hasil nitridasi dan homogenitasnya. Pengujian ini meliputi pengamatan perubahan kekerasan pada berbagai tempat pengukuran dan pengamatan perubahan struktur mikro yang terjadi. Pengamatan perubahan kekerasan dilakukan dengan mengukur kekerasan cuplikan yang dinitridasi pada berbagai tempat (Gambar 2) dan variasi beban penetrasi (10 gf, 25 gf, 50 gf, 100 gf, 200 gf dan 300 gf). Pengujian struktur mikro dilakukan dengan mengamati struktur mikro pada penampang melintang yang dinitridasi. Pengukuran kekerasan juga dilakukan

untuk bahan sebelum dinitridasi agar dapat diketahui perubahan kekerasannya. Dalam pengamatan struktur mikro untuk mengamati perubahan struktur mikro akibat terbentuknya nitrida hasil reaksi nitrogen dengan logam induk. Alat yang digunakan untuk pengukuran kekerasan adalah *Digital Micro Hardness Tester* jenis MXT 70 dan untuk pengamatan struktur mikro adalah mikroskop optik Zeiss jenis Axiolab LR 66238 C.

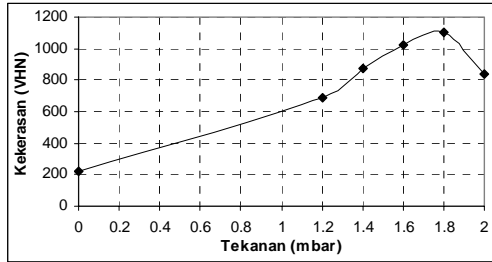


Gambar 2. Titik-titik pengujian kekerasan pena piston

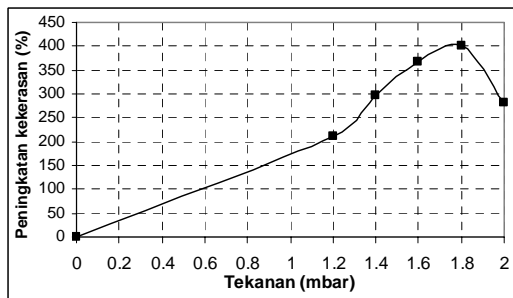
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan perubahan kekerasan dilakukan dengan mengamati kekerasan pena piston sebelum dan sesudah dinitridasi yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 8. Gambar 3 menunjukkan hasil pengamatan kekerasan untuk variasi tekanan tabung reaktor plasma saat nitridasi.

Pengamatan kekerasan ini untuk mengetahui tekanan optimum sehingga didapatkan hasil nitridasi dengan kekerasan maksimum. Pada hasil uji kekerasan (Gambar 3), kekerasan pada tekanan 0 mbar adalah kekerasan pena piston sebelum dinitridasi atau kekerasan benda kerja awal.



a. Kekerasan



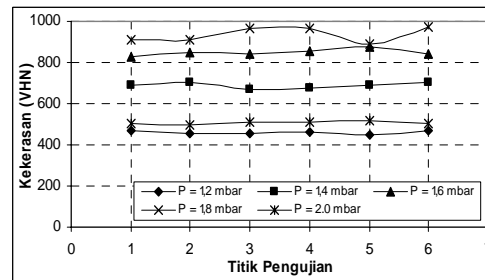
b. Peningkatan kekerasan (%)

Gambar 3. Kekerasan sebagai fungsi tekanan untuk beban indentasi 10 gf.

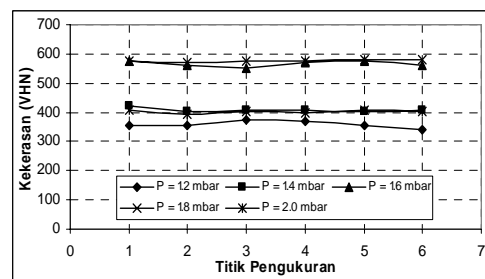
Nitridasi dimulai dari tekanan tabung reaktor plasma 1,2 mbar sampai dengan 2 mbar pada temperatur 525 °C. Berdasarkan hasil uji kekerasan didapatkan bahwa makin tinggi tekanan di dalam tabung reaktor makin tinggi kekerasan pena piston hasil nitridasi. Kenaikan kekerasan maksimum terjadi pada tekanan 1,8 mbar dan pada tekanan diatas 1,8 mbar terjadi penurunan kekerasan. Hal ini disebabkan makin tinggi tekanan reaktor plasma makin banyak atom nitrogen dan makin tinggi rapat plasma sehingga makin banyak ion nitrogen yang terbentuk dan terdeposisi pada permukaan pena piston. Dengan makin banyak ion (atom) nitrogen yang terdeposisi pada permukaan pena piston maka makin banyak atom nitrogen yang berdifusi dan membentuk nitrida besi (FeN) yang mempunyai sifat keras. Berdasarkan hasil uji kekerasan, dimungkinkan kesetimbangan deposisi dan difusi atom nitrogen terjadi pada tekanan 1,8 mbar. Hal ini terbukti bahwa pada tekanan 1,8 mbar diperoleh kekerasan maksimum sebesar 1102,91 VHN pada beban indentasi 10 gf dan kekerasan material awalnya

adalah 220 VHN. Dengan hasil ini diperoleh peningkatan kekerasan 401 % atau kekerasan hasil nitridasi 5,01 kali kekerasan sebelum dinitridasi untuk beban indentasi 10 gf.

Untuk mengetahui homogenitas kekerasan dilakukan pengukuran pada 6 titik (Gambar 2) untuk tiap pena piston yang dinitridasi dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Pada Gambar 4 ditunjukkan hasil pengukuran untuk mengetahui homogenitas kekerasan dengan beban indentasi 50 gf dan pada Gambar 5 dengan beban indentasi 200 gf. Besar beban 50 gf dipilih agar lebih mudah dalam mengukur bekas indentasi untuk menentukan kekerasan, namun tidak terlalu dalam sehingga masih pada daerah permukaan yang tipis, sedangkan besar beban 200 gram dipilih untuk mengetahui kekerasan pada permukaan dengan bekas indentasi yang lebih dalam tetapi masih pada lapisan nitrida besi yang terbentuk akibat nitridasi. Penentuan besar beban ini didasarkan coba-coba saat awal pengujian karena kekerasan benda uji dan besar beban indentasi sangat terkait dengan pengamatan bekas indentasi untuk menentukan nilai kekerasan.



Gambar 4. Kekerasan sebagai fungsi titik pengukuran pada variasi tekanan nitridasi untuk beban indentasi 50 gf.

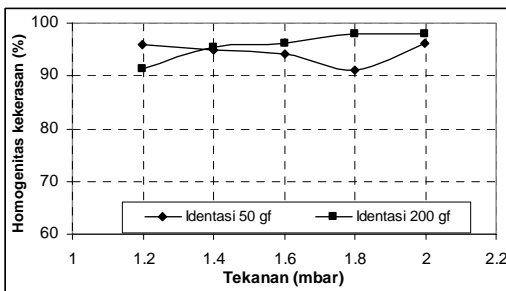


Gambar 5. Kekerasan sebagai fungsi titik pengukuran pada variasi tekanan nitridasi untuk beban indentasi 200 gf.

Pada beban indentasi 50 gf, didapatkan fluktuasi kekerasan tertinggi 9 % pada tekanan nitridasi 1,8 mbar dan terendah 3,7 % pada tekanan nitridasi 2,0 mbar. Untuk beban indentasi 200 gf, didapatkan

fluktuasi kekerasan tertinggi 1,6 % pada tekanan nitridasi 1,8 mbar dan terendah 3,2 % pada tekanan nitridasi 2,0 mbar. Kekerasan maksimum yang dihasilkan untuk beban indentasi 50 gf adalah 935,7 VHN dan untuk beban indentasi 200 gf adalah 575,9 VHN

Pada Gambar 6 ditunjukkan hasil perhitungan homogenitas kekerasan permukaan pena piston hasil nitridasi. Homogenitas kekerasan hasil nitridasi adalah sangat penting karena terkait dengan laju keausan saat komponen mesin digunakan. Jika kekerasan permukaan suatu komponen mesin tidak merata maka homogenitas kekerasannya rendah dan laju keausannya tidak merata.

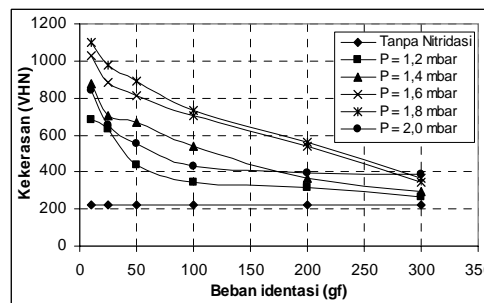


Gambar 7. Homogenitas kekerasan sebagai fungsi tekanan

Pada umumnya suatu komponen mesin yang saling bergesekan diperlukan sifat keras dipermukaannya. Sifat keras ini berbanding terbalik dengan laju keausan dan berbanding lurus dengan umur pakai (*life time*). Untuk komponen mesin yang saling bergesekan diperlukan sifat kekerasan permukaan dan homogenitas yang tinggi sehingga akan mempunyai laju keausan yang rendah dan mempunyai umur pakai yang lama. Dari hasil nitridasi pena piston diperoleh kekerasan 5 kali kekerasan awal untuk beban indentasi 10 gf, homogenitas 91 % untuk beban 50 gf dan 98 % untuk beban 200 gf. Hasil ini cukup baik untuk perlakuan permukaan khususnya untuk peningkatan kekerasan komponen mesin sehingga dapat meningkatkan kualitasnya.

Pada Gambar 8 ditunjukkan hasil pengujian kekerasan untuk variasi beban indentasi. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui hubungan kekerasan dengan kedalaman difusi nitrogen ke dalam permukaan pena piston sehingga membentuk nitrida besi yang mempunyai sifat keras. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa makin besar beban indentasi makin rendah kekerasan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan makin besar beban indentasi makin dalam bekas indentasi sehingga makin masuk ke permukaan pena piston. Pada proses nitridasi

dengan sistem ini, atom nitrogen terdeposisi ke permukaan pena piston dan dilanjutkan dengan proses difusi ke dalam permukaan. Makin ke dalam dari permukaan makin rendah konsentrasi atom nitrogen yang berdifusi dan membentuk nitrida besi sehingga makin rendah kekerasannya. Hasil pengujian untuk nitridasi pada tekanan optimum yaitu 1,8 mbar dan beban indentasi 10 gf didapatkan kekerasan 1102,91 VHN serta untuk beban indentasi 300 gf didapatkan kekerasan 367,56 VHN dari kekerasan awal 220 VHN. Untuk tekanan nitridasi 1,2 mbar didapatkan 685,65 VHN untuk beban indentasi 10 gf dan 268,66 VHN untuk beban indentasi 300 gf, sedangkan pada tekanan nitridasi 2,0 mbar didapatkan 839,3 VHN untuk beban indentasi 10 gf dan 388,2 VHN untuk beban indentasi 300 gf. Sesuai dengan tujuan nitridasi yaitu untuk meningkatkan kekerasan permukaan, maka hasil ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan kekerasan sebagai fungsi beban indentasi. Perubahan beban indentasi menyebabkan perubahan kedalaman bekas indentasi sehingga dari pengujian ini didapatkan kekerasan optimum pada permukaan walaupun pada jarak tertentu dari permukaan juga terjadi peningkatan kekerasan.

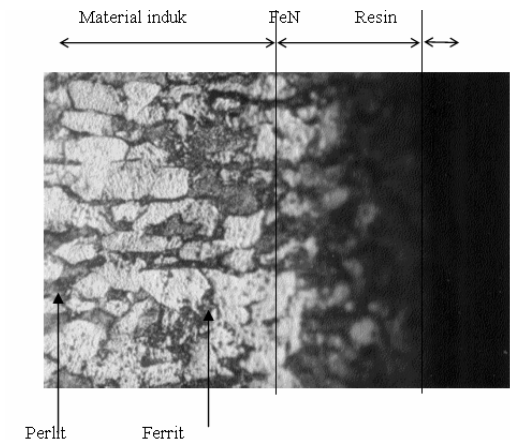


Gambar 8. Kekerasan sebagai fungsi beban indentasi untuk variasi tekanan

Pada Gambar 9 ditunjukkan struktur mikro penampang melintang pena piston hasil nitridasi. Dari gambar tersebut terlihat jelas terjadi perubahan lapisan permukaan akibat nitridasi. Perubahan ini ditunjukkan dengan adanya struktur butir yang halus pada permukaan yang disebabkan oleh terdosisinya atom nitrogen dan berdifusi ke dalam logam induk (Fe) sehingga membentuk ikatan nitrida besi (FeN) yang mempunyai sifat keras.

Pada gambar tersebut ditunjukkan 3 daerah yang berbeda yaitu daerah material induk, daerah FeN dan daerah resin. Daerah material induk menunjukkan daerah struktur kristal bahan dasar pena piston yang mempunyai struktur kristal kasar yaitu batas butir ferrit dan perlit cukup jelas. Daerah nitrida besi (FeN) menunjukkan daerah

terjadinya ikatan nitrogen (N) dengan logam induk (Fe) membentuk nitrida besi (FeN), sedangkan daerah



Gambar 9. Struktur mikro penampang melintang hasil nitridasi

resin menunjukkan struktur resin yang digunakan untuk menempatkan substrat (potongan pena piston) pada pengamatan struktur mikro. Adapun gambar pena piston yang dinitridasi ditunjukkan pada lampiran.

KESIMPULAN

Dari hasil proses nitridasi pena piston dengan teknik nitridasi plasma dan berdasarkan hasil pengolahan data dapat disimpulkan bahwa:

1. Kekerasan maksimum hasil nitridasi diperoleh pada tekanan nitridasi 1,8 mbar dan beban indentasi 10 gf sebesar 1102,91 KHN yaitu dengan peningkatan kekerasan 401 % dari bahan sebelum dinitridasi
2. Homogenitas kekerasan didapatkan 91 % untuk beban indentasi 10 gf dan 98 % untuk beban indentasi 200 gf.
3. Makin besar beban indentasi makin dalam bekas indentasi sehingga diperoleh kekerasan vikers lebih rendah.
4. Hasil uji metalografi diperoleh perubahan struktur butiran ferrit dan perlit yaitu berubah menjadi butiran yang halus sehingga terjadi peningkatan kekerasan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] DIETER, G.E., Metalurgi Mekanik, Penerjemah Sriati Djaprie, Penerbit Erlangga, Jakarta (1987).

- [2] Alexander W.O, Dasar-dasar Metalurgi untuk Rekayasawan, Penerbit Gramedia, Jakarta (1991).
- [3] -----, Metal Hand Book, Heat Treating, Cleaning and Finishing Volume 2, 8th Edition, ASTM, United State of America (1988).
- [4] KONUMA, M., Film Deposition By Plasma Techniques, Spinger Verlag, Berlin (1992)
- [5] SINHA,A.K., Physical Metallurgy Handbook, Mc Graw-Hill, New York (2003)
- [6] WASA, K. AND HAYAKAWA, S., Handbook of Sputter Deposition Tecnology, Naves Publication, New York (1992).
- [7] MUKHERJEE, S., Plasma Based Nitrogen Incorporation Techniques for Surface Modification, Current Science, Vol.83-No.3, Gandhinagar, India (2002).
- [8] UEDA, M., GOMES, G.F., KOSTOV, K.G., REUTHER, H., LEPIENSKI, C.M., SOARES, P.C., TOKAI, O., AND SILVA, M.M., Results from Experiments on Hybrid Plasma Immersion Ion Implantation/Nitriding Processing of Materials, Brazillian Journal of Physics, Vol. 34 no 4b, Sao Paulo (2004).

TANYA JAWAB

Rill Isaris

- *Dalam abstrak tercantum hasil dimensi bejana yang belum terlihat perhitungan di dalam makalah. Apakah hal tersebut berdasarkan Spec Requirement yang belum dinyatakan secara eksplisit?*
- *Apakah dapat dibuat opsi lain dimensi tersebut?*

Suprpto

- *Dimensi bejana ditentukan berdasarkan kebutuhan yang disesuaikan dengan bentuk corong pemayar dan window, kemudian dilakukan perhitungan pendinginan dan penggambaran secara detil sehingga di dapatkan dimensi sesungguhnya.*
- *Opsi lain sangat sulit karena harus menyesuaikan bentuk corong pemayar dan window*

Nada Marnada

- *Apakah disain bejana yang dibuat sudah memperhitungkan faktor waktu (lama) masa transpartasi yang pada kondisi tertentu akan*

merubah viskositas latex yang menjadi parameter perhitungan ?

Suprpto

- Perhitungan belum mempertimbangkan faktor waktu transportasi atau penyimpanan yang dapat merubah viskositas lateks. Viskositas diambil pada kondisi standar (acuan) dari lateks

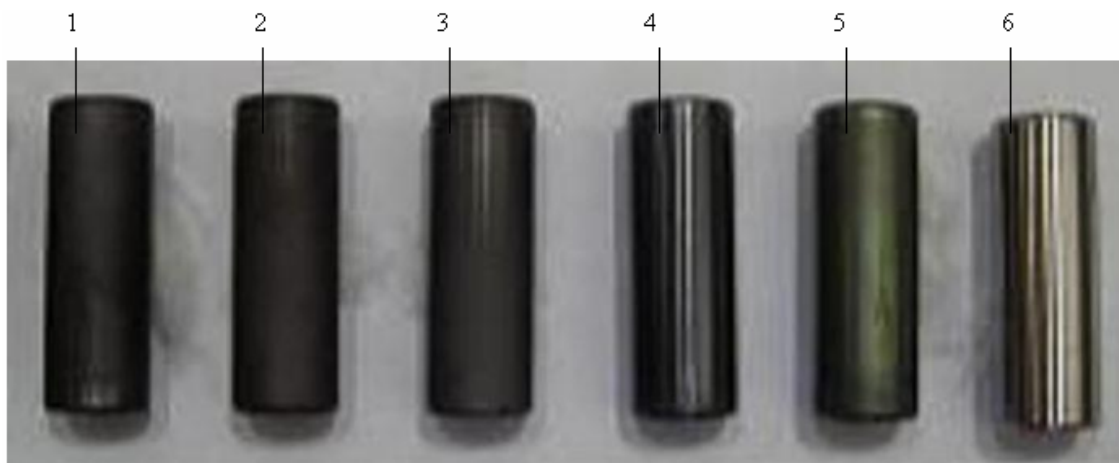
Utaja

- *Bagaimana menetralsir muatan yang ada di dalam lateks*

Suprpto

- Saat vulkanisasi, lateks diaduk dan disirkulasikan sehingga terjadi kontak antara molekul-molekul lateks dengan bejana . Dengan demikian terjadi penetrasi muatan walaupun tidak seluruhnya (100%) karena lateks merupakan isolator listrik.

Lampiran



Keterangan:

- | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1. Nitridasi pada 1,2 mbar | 2. Nitridasi pada 1,4 mbar | 3. Nitridasi pada 1,6 mbar |
| 4. Nitridasi pada 1,8 mbar | 5. Nitridasi pada 2,0 mbar | 6. Tanpa nitridasi |

Gambar 9. Pena piston yang dinitridasi dan tanpa nitridasi

DEPOSISI LAPISAN TIPIS SnO₂ UNTUK SENSOR GAS KARBON MONOKSIDA

Sayono, Tjipto Sujitno, Taxwim
PTAPB-BATAN Yogyakarta

ABSTRAK

DEPOSISI LAPISAN TIPIS SnO₂ UNTUK SENSOR GAS KARBON MONOKSIDA. Telah dilakukan deposisi lapisan tipis bahan SnO₂ untuk sensor gas karbonmonoksida pada permukaan substrat alumina dengan metode sputtering DC. Deposisi lapisan tipis SnO₂ dilakukan dengan parameter sputtering pada tegangan elektroda 2,5 kV, arus 50 mA, tekanan $2,2 \times 10^{-3}$ Torr, suhu substrat 250°C dan waktu deposisi 60 dan 120 menit. Dari hasil karakterisasi menunjukkan bahwa sensor gas dari lapisan tipis SnO₂ dapat mendeteksi gas CO. Hasil pengukuran sensitivitas menunjukkan bahwa sensor gas dari bahan SnO₂ mempunyai suhu operasi 275°C, waktu tanggap 90 – 140 detik dengan sensitivitas sebesar 7,4 % - 8,33 % pada konsentrasi 800 – 1000 ppm.

Kata kunci : Lapisan tipis SnO₂, suhu operasi, sentivitas, karbon monoksida,

ABSTRACT

DEPOSITION OF SnO₂ THIN FILM ON THE FOR CARBON MONOKSIDA GAS SENSOR. Deposition of SnO₂ thin film on the alumina substrate for gas sensor application has been done using sputtering method. Deposition of SnO₂ thin film was carried out with the following sputtering parameters i.e : sputtering voltage of 2.5 kV, current 50 mA, vacuum pressure 2.2×10^{-3} Torr, substrat temperature 250°C and deposition time was 60 and 120 minutes. From the characterization it was found that gas sensor from thin layer of SnO₂ can detect the CO gas. From Measurement, it was also found that the working temperature of the sensor is 275°C, respon time in order of 90 – 140 second while the optimum sensitivity of the sensor of CO gas for detecting CO gas is between 7,4 % - 8,33 % at 800 - 1000 ppm concentration.

Key word : Thin layer, working temperature, sensitivity, carbon monoksida

PENDAHULUAN

Kondisi pencemaran udara terlebih di kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung mengakibatkan tingkat polusi telah mencapai ambang batas yang amat membahayakan kesehatan manusia dan merusak lingkungan hidup seperti berbagai jenis tanaman yang bisa mati akibat kadar gas buang yang mencemari udara semakin berat^[1].

Kendaraan bermotor mengeluarkan zat-zat berbahaya yang dapat menimbulkan dampak negatif, baik terhadap kesehatan manusia maupun terhadap lingkungan, seperti timbal/timah hitam (Pb), *suspended particulate matter* (SPM), oksida nitrogen (NOx), hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), dan oksida fotokimia (Ox). Kendaraan bermotor menyumbang hampir seluruh karbon monoksida (CO) ke udara Jakarta. Keadaan ini mendorong usaha untuk mengadakan penelitian mengenai detektor gas (sensor gas) khususnya peka terhadap gas CO yang semakin mendapat perhatian terutama sejak ditemukan teknologi lapisan tipis (*thin film*) untuk mendeteksi adanya gas-gas berbau dan beracun.

Teknologi lapisan tipis menjadi salah satu metode untuk pembuatan sensor gas karena difusi gas yang cepat serta waktu tanggap yang relatif cepat. Keuntungan menggunakan teknologi lapisan tipis diantaranya adalah ketebalan, struktur dan sifat kelistrikan lapisan dapat dikontrol serta biaya yang dikeluarkan relatif murah. Teknologi lapisan tipis sebagai *nanotechnology* menjadi hal yang menarik untuk diteliti serta telah banyak menjangkau hampir semua bidang kehidupan.

Banyak teknik yang dapat digunakan untuk membuat lapisan tipis, diantaranya, yaitu: penguapan (*evaporation*), implantasi ion, dan percikan (*sputtering*). Penelitian ini akan menggunakan teknik *sputtering* untuk membuat lapisan tipis. Pada teknik tersebut, terjadi pelepasan atom-atom dari suatu permukaan (*target*) akibat terjadinya proses transfer energi kinetik ke atom-atom permukaan *target* pada saat terjadinya tumbukan ion-ion dengan *target*. Kemudian, atom-atom yang terlepas akan terdeposisi pada permukaan substrat sehingga membentuk suatu lapisan tipis

Beberapa sistem *sputtering* untuk tujuan deposisi lapisan tipis, antara lain *DC-sputtering*, *RF-Sputtering* dan *Sputtering Magnetron*. Untuk mendeposisikan bahan semikonduktor biasanya menggunakan *DC Sputtering*. *Sputtering* juga dapat menghasilkan bahan yang seragam (*uniform*) dan padat, selain itu bahan tersebut juga mempunyai sifat mekanik dan listrik yang sama dengan sifat dasarnya.

Usaha untuk membuat sensor gas semakin berkembang sejak diperkenalkan pertama kali oleh Seiyama dkk (1962), yang memungkinkan untuk pembuatan hidung elektronik (*electronic nose*). Seiyama (1962) dan Taquchi (1970) merupakan orang yang pertama kali menerapkan teknologi lapisan tipis untuk pendeteksian gas, dengan membuat sensor gas *chemoresistiv*^[2]. Sensor ini menggunakan prinsip interaksi antara atom dengan permukaan bahan ketika merespon gas yang akan mempengaruhi sifat permukaan. Sensor gas semikonduktor ini digunakan dalam banyak bidang sebagai deteksi gas industri dan rumah tangga untuk alarm kebocoran gas, pengendalian polusi dan lain sebagainya.

Selama ini teknologi lapisan tipis sebagai elemen dasar gas mengarah kepada bahan MOS (*Metal Oxide Semikonduktor*). Penelitian tentang sifat MOS sebagai sensor gas dapat menggunakan lapisan tipis ZnO, CeO₂, SnO₂, maupun TiO₂. Hasil penelitian terhadap MOS sebagai sensor gas beroperasi pada suhu yang tinggi. Dalam penelitian ini akan mengkaji suatu bahan semikonduktor SnO₂ untuk keperluan ini. Bahan tersebut di deposisikan pada substrat keramik Alumina Al₂O₃. Berbagai penelitian dilakukan serupa tetapi dengan metode yang berbeda, menunjukkan bahwa lapisan tipis SnO₂ dapat diaplikasikan sebagai sensor gas CO.

DASAR TEORI

Semikonduktor

Istilah semikonduktor digunakan untuk se golongan bahan yang daya hantarnya (konduktivitasnya) berada diantara penghantar (konduktor) dan isolator. Semikonduktor memiliki sifat yang dapat diatur dari isolator sampai superkonduktor dengan memberikan perlakuan tertentu.

Dalam semikonduktor semua elektron terikat pada atom tertentu dan tidak ada elektron yang bisa bergerak secara bebas. Situasi ini sama seperti isolator. Perbedaannya, dalam semikonduktor elektron yang dipakai untuk ikatan hanya terikat dengan lemah. Kalau elektron terikat secara lemah, berarti elektron itu bisa dilepaskan dari ikatannya dengan

mudah. Jika elektron sudah dilepaskan dari ikatannya, maka elektron itu bisa bergerak dalam kisi dan membawa arus listrik.

Semikonduktor SnO₂ Sebagai Bahan Sensor Gas

Sensor adalah elemen pengindera yang dapat mendeteksi perubahan rangsangan dan kemudian mengubahnya menjadi sinyal listrik. Sensor gas merupakan suatu alat yang mampu mendeteksi perubahan kondisi lingkungan dengan menghasilkan sinyal listrik yang besarnya sebanding dengan konsentrasi dan jenis gas. Sensor gas sering digunakan untuk mendeteksi keberadaan dan konsentrasi gas di suatu tempat, terutama untuk mendeteksi gas-gas berbahaya seperti CO, NO_x, SO_x.

Bahan yang dapat digunakan sebagai sensor gas diantaranya adalah semikonduktor oksida logam. Tidak seperti semikonduktor yang lain, dimana membutuhkan waktu yang lama untuk melalui siklus panas di udara, mengalami transformasi kimiawi yang *irreversible* dengan membentuk lapisan oksida yang stabil, *metal oxide* mengikat oksigen di permukaannya dengan cara *reversible*. Sensor *metal oxide* telah tersedia secara komersial selama beberapa tahun. Perusahaan yang memimpin pasar dalam bidang ini adalah Figaro Engineering, di Jepang. Tipe sensor *metal oxide* milik Figaro dikenal dengan nama "Taguchi Sensor", yang diberi nama sesuai peneliti awal bahan ini, T. Seiyama. Sensor *metal oxide* beroperasi dengan perubahan resistansi dari lapisan SnO₂ saat hadirnya gas di atmosfer.

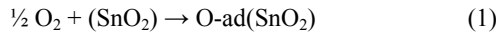
Cara kerja sensor jenis ini adalah dengan memanfaatkan perubahan konduktivitas bahan ketika menyerap suatu gas. Konduktivitas bahan sensor semikonduktor berubah seiring dengan terdeteksinya gas tertentu. Temperatur kerja dimana sensor metal oksida bekerja secara efisien tergantung dari atmosfer gas dan sifat bahan. Dalam kasus ini suhu antara 200°C–800°C, karena jauh diatas suhu kamar, maka sistem pemanas harus diimplementasikan dalam sensor ini. Sensor gas semikonduktor sederhana terdiri dari substrat (dimana bahan sensor diletakkan), *interdigitated electrode* (elektroda yang terdigitasi/ tercetak untuk mengukur perubahan resistansi), pengukur suhu dan pemanas (supaya suhu optimum dapat dicapai).

Bahan yang sering digunakan untuk sensor gas adalah SnO₂, karena SnO₂ telah terbukti cukup selektif atas deteksinya terhadap gas-gas spesifik seperti H₂, CO, NO₂, H₂S dan CH₄ seperti di tunjukkan pada Tabel 1.

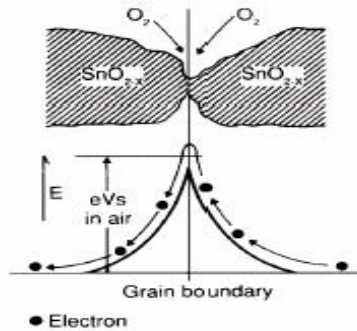
Tabel 1. Tipe Oksida dan Gas Yang Dideteksi

Tipe Oksida	Gas Yang Terdeteksi
SnO ₂	H ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S, CH ₄
TiO ₂	H ₂ , C ₂ H ₅ OH, O ₂
Fe ₂ O ₃	CO
Cr _{1.8} Ti _{0.2} O ₃	NH ₃
WO ₃	NO ₂ , NH ₃
In ₂ O ₃	O ₃ , NO ₂
LaFeO ₃	NO ₂ , NO _x

Ketika metal oksida (SnO₂) dipanaskan pada temperatur tertentu, oksigen akan diserap pada permukaan kristal dan oksigen akan bermuatan negatif, proses penyerapan oksigen oleh sensor dapat dilihat dari persamaan kimia berikut ini.



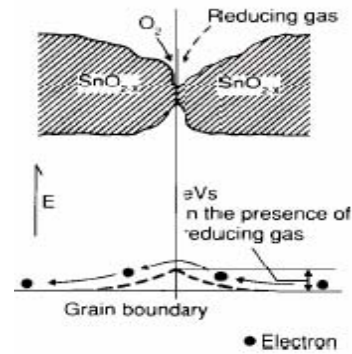
Hal ini disebabkan karena permukaan kristal mendonorkan elektron pada oksigen yang terdapat pada lapisan luar, sehingga oksigen akan bermuatan negatif dan muatan positif akan terbentuk pada permukaan luar kristal. Tegangan permukaan yang terbentuk akan menghambat laju aliran elektron seperti tampak pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi penyerapan O₂ oleh sensor

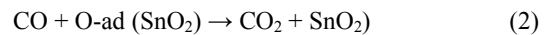
Di dalam sensor, arus elektrik mengalir melewati daerah batas butir (*grain boundary*) dari kristal SnO₂. Pada daerah batas butir, penyerapan oksigen mencegah muatan untuk bergerak bebas. Dengan adanya gas reduktor, kepadatan permukaan dari oksigen dengan muatan negatif berkurang, jadi lebar penghalang di batas butir menjadi berkurang seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (rapat permukaan dari muatan negatif oksigen akan berkurang).

Dengan menurunnya penghalang maka resistansi sensor akan juga ikut menurun. Dan ini mengurangi resistansi sensor yang diakibatkan karena menurunnya ketinggian penghalang dari daerah sambungan, misal terdapat adanya gas CO



Gambar 2. Ilustrasi ketika terdeteksi adanya gas

sebagai gas reduktor, yang terdeteksi maka persamaan kimianya dapat digambarkan seperti tampak pada persamaan berikut ini.



Hubungan antara resistansi sensor dengan konsentrasi gas pada proses deoksidasi dapat ditunjukkan dengan persamaan:

$$R = A[C]^{-\alpha} \quad (3)$$

dengan

- R = resistansi sensor
- A dan α = konstanta
- C = konsentrasi gas

Deposisi lapisan tebal (*thick film*), karena kombinasi yang cocok antara sifat fisik dan kimiawinya. Al₂O₃ dengan komposisi 96% digunakan dalam 90% produk standar industri substrat di seluruh dunia, dengan temperatur maksimum yang dapat dicapai mencapai 1500°C^[5].

Deposisi Lapisan Tipis SnO₂ dengan DC Sputtering

Deposisi adalah pelapisan sedangkan lapisan tipis adalah lapisan yang memiliki ketebalan dalam orde 1µm. Lapisan ini memiliki karakteristik yang sangat unik dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi mikro elektronika misalnya sebagai sensor gas dan sel surya.

Sistem *DC Sputtering* terdiri dari dua elektroda yaitu anoda dan katoda. Pada anoda ditempatkan substrat (bahan yang akan dilapisi) yang dilengkapi dengan pemanas untuk membuka pori-pori substrat, sehingga bahan yang dideposisi di atas permukaan substrat dapat melekat lebih kuat dan tidak mudah mengelupas. Pada katoda dipasang bahan target yang dilengkapi dengan sistem pen-

dingin (*water cooling system*) yang berfungsi menghindarkan bahan target agar tidak meleleh akibat suhu yang terlalu tinggi.

Apabila suatu permukaan bahan padat ditembak dengan partikel-partikel berenergi tinggi seperti ion atau partikel netral, maka atom-atom pada permukaan bahan tersebut akan ada yang terpental keluar karena mendapat tambahan energi dari proses transfer momentum. Fenomena ini dikenal sebagai *sputtering*. *Sputtering* pertama kali dilaporkan pada tahun 1852 oleh W.R.Grove, yang mengamati pendeposisian logam pada kaca saat mempelajari konduktivitas listrik gas.

Pendeposisian lapisan tipis diawali dengan proses ionisasi gas-gas *sputter*, misalnya Argon (Ar), Xenon (Xe), Krypton (Kr), Neon (Ne) atau Helium (He) pada tekanan di dalam tabung reaktor plasma. Karena pengaruh medan listrik diantara elektroda, maka ion-ion gas *sputter* akan bergerak dengan energi yang cukup menuju katoda/target. Bila energi kinetik ion gas-gas *sputter* cukup tinggi untuk mengatasi energi ikat (*binding energy*) atom-atom target, maka akibat perpindahan (*transfer*) momentum, atom-atom target akan terlempar keluar dari induknya. Atom-atom tersputter tersebut sebagian bergerak menuju permukaan substrat^[5].

TATA KERJA PENELITIAN

Preparasi Substrat Dan Metode Pembentukan Pola Elektroda Emas

Proses pembuatan substrat sensor yang berupa keping keramik Alumina (Al_2O_3) melalui beberapa tahap, sehingga siap diberi lapisan tipis (*thin film*) semikonduktor SnO_2 yakni tahap preparasi substrat yang meliputi pemotongan bahan alumina sesuai ukuran, pembentukan pola pemanas (*heater*) dan elektroda sensor dari lapisan emas. Dalam penelitian kali ini, pembuatan sistem pemanas dan elektroda menggunakan metode DC Sputtering.

Preparasi substrat ini dimaksudkan agar substrat yang digunakan bersih dari noda, minyak maupun debu yang dapat mengganggu proses deposisi lapisan elektroda emas (Au). Preparasi ini memerlukan alat berupa *Ultrasonic Cleaner* yang berguna untuk menghilangkan kotoran-kotoran pada substrat Al_2O_3 . Substrat yang akan digunakan dicuci dengan *acetone*, deterjen dan *ethanol* selama masing-masing 30 menit kemudian substrat dikeringkan selama 1 jam. Jika tahapan preparasi selesai, maka sampel disimpan dalam plastik klip dan disimpan dalam kotak penyimpanan yang bebas debu.

Deposisi Lapisan Tipis SnO_2

Deposisi lapisan tipis (*Thin Film*) bahan sensor gas SnO_2 dilakukan menggunakan metode DC Sputtering. Substrat yang digunakan adalah substrat Alumina Al_2O_3 yang telah memiliki lapisan emas dengan pola pemanas dan elektroda dengan konduk-tansi yang baik.

Langkah-langkah deposisi lapisan tipis SnO_2 sebagai berikut: Target SnO_2 dipasang pada katoda sedangkan substrat Alumina dipasang anoda pada pemegang (*holder*), di dalam tabung reaktor *sputtering* selanjutnya pemanas substrat dan kabel kontrol suhu dihubungkan ke catu daya. Reaktor *sputtering* dihampakan (vakum) dengan pompa rotary selama 30 menit hingga diperoleh kevakuman tabung *sputtering* mencapai orde 10^{-2} Torr, kemudian *chiller termocirculator* dihidupkan untuk mendinginkan sistem pemanas *diffusi* selama 15 menit. Setelah tekanan mencapai 10^{-3} Torr, Gas argon dialirkan ke dalam tabung *sputtering* hingga diperoleh tekanan kerja 3×10^{-2} Torr. Bahan target dipanaskan pada suhu $250^\circ C$ dengan sistem pemanas yang dipasang pada anoda. Sistem tegangan tinggi DC dihidupkan dan diatur pada nilai yang diinginkan yaitu sebesar 2,5 kV dan arus 50 mA. Selanjutnya deposisi lapisan tipis SnO_2 dilakukan dengan variasi waktu : 60 menit dan 120 menit.

Penentuan Suhu Operasi

Penentuan suhu operasi sensor dilakukan dengan menguji sensor dengan variasi suhu antara $200^\circ C - 300^\circ C$ pada konsentrasi gas uji yang paling tinggi. Hal ini sengaja dilakukan agar pola respon sensor terhadap berbagai suhu dapat teramati dengan jelas ketika dilakukan pada konsentrasi yang paling tinggi dari range yang ditentukan (1000 ppm).

Setelah sensor terpasang pada tabung uji, maka pompa rotary dinyalakan selama ± 15 menit hingga tabung dalam keadaan vacuum. Suhu sensor mulai dinaikkan secara perlahan dengan menaikkan tegangan dari sumber tegangan. Dari range suhu $200^\circ C - 300^\circ C$ diambil interval kenaikan $25^\circ C$. Sehingga suhu pengamatannya adalah $200^\circ C$, $225^\circ C$, $250^\circ C$, $275^\circ C$ dan $300^\circ C$ untuk diujikan pada gas CO yang disuntikkan dengan konsentrasi mulai dari 70 s/d 1000 ppm. Resistansi awal sensor sebelum dimasukkannya gas dicatat demikian pula tiap 10 detik hingga 4 menit dalam keadaan isothermal. Data yang didapat selanjutnya dibuat grafik dan suhu optimal sensor dapat ditentukan.

Penentuan suhu operasi sensor ini penting untuk menentukan suhu optimal sensor dapat

beroperasi. Dalam berbagai penelitian, telah ditemukan bahwa sensor dengan bahan metal oksida, terutama SnO₂, beroperasi pada suhu tinggi. Maka dalam penelitian ini range uji untuk menentukan suhu operasi optimal sensor ditetapkan pada nilai 200°C -300°C.

Penentuan Sensitivitas Untuk Variasi Konsentrasi Gas CO

Sensitivitas merupakan kemampuan sensor untuk mendeteksi kehadiran gas, yang secara matematis dapat diformulasikan^[6]

$$S = \frac{\Delta R}{R_n} = \frac{|R_n - R_g|}{R_n} \quad (4)$$

dengan

S = sensitivitas

R_n = resistansi pada udara normal (Ω)

R_g = resistansi

ketika dikenai gas (Ω), dengan R_n dan R_g terukur pada kondisi isothermal. Setelah ditentukan suhu operasi sensor, suhu tersebut digunakan seterusnya dalam pengujian sensitivitas sensor untuk berbagai variasi konsentrasi gas CO yang dimasukkan. Sama seperti penentuan suhu operasi optimal sensor. Dalam uji sensitivitas dengan variasi konsentrasi ini, resistansi sensor awal setelah mencapai suhu optimal dicatat (R_n). Demikian pula resistansinya dalam kurun waktu 4 menit yang dicatat tiap interval 10 detik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sensor gas dengan bahan aktif lapisan tipis semikonduktor SnO₂ yang di deposisi menggunakan metode sputtering diujikan dengan gas CO dengan konsentrasi antara 70 – 1000 ppm.

Suhu Operasi Sensor

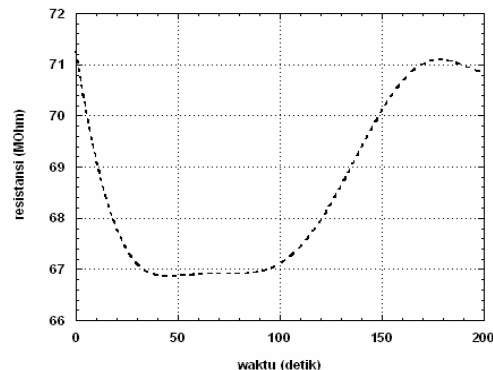
Sensor diuji dengan memasukkan gas CO dengan konsentrasi 1000 ppm ke dalam tabung uji. Sensor yang di sputtering selama 2 jam digunakan dalam pengujian ini. Masing-masing suhu yang ditetapkan memberikan nilai yang berbeda. Pada suhu 225°C hingga 250°C, resistansi sensor masih bergerak naik seiring waktu. Hal ini berarti bahan aktif sensor belum dapat dikatakan mampu mendeteksi adanya gas CO. Dari grafik respon sensor dengan konsentrasi 80 ppm seperti Gambar 3. terlihat belum dapat dibaca sifat dan karakteristik sensor. Sensor belum dapat mendeteksi keberadaan gas CO hingga suhu 250°C. Ini kemungkinan terjadi karena jumlah elektron yang ada di pita valensi

belum sepenuhnya pindah ke pita konduksi sehingga oksigen pada permukaan sensor belum diserap. Proses penyerapan oksigen oleh sensor dapat terjadi pada temperatur yang cukup tinggi. Ketika keadaan ini tercapai, maka oksigen akan diserap pada permukaan kristal dan oksigen akan bermuatan negatif. Karena permukaan kristal mendonorkan elektron pada oksigen yang terdapat pada lapisan luar.

Laju aliran elektron yang terhambat akibat tegangan permukaan di batas butir, akan menyebabkan konduktansi sensor berubah saat temperatur sensor mencapai 275°C. Resistansi sensor akan menurun, hingga tercapai titik stabilnya seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Sensitivitas Sensor terhadap Gas CO

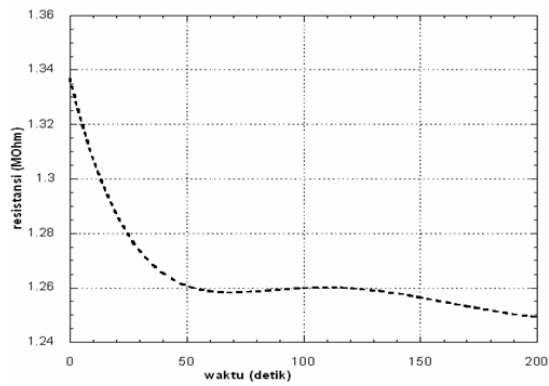
Sensitivitas sensor gas didefinisikan sebagai kemampuan dari sensor untuk merespon kehadiran gas dalam jumlah yang sekecil/serendah mungkin, yang dalam hal ini ditandai adanya perubahan nilai resistansi sensor pada kondisi sensor sebelum dan sesudah dikenai gas. Pada penelitian ini masing-masing sensor yang dibuat dengan waktu deposisi yang berbeda memiliki nilai sensitivitas yang berbeda pula.



Gambar 3. Respon sensor pada konsentrasi 80 ppm terhadap waktu pada suhu 250°C

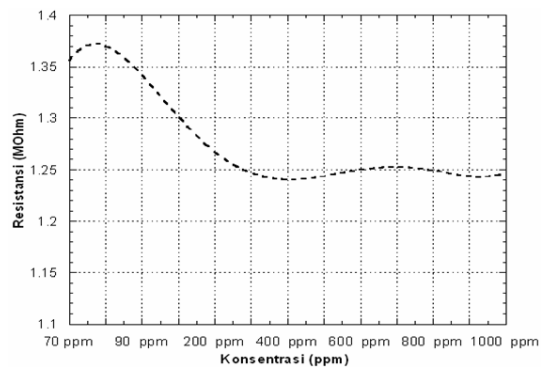
Untuk itu masing-masing sensor harus diamati tersendiri, sensitivitas sensor yang dideposisi selama 2 jam terhadap variasi konsentrasi gas CO seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5. Respon time sensor pada waktu 90 detik menunjukkan bahwa nilai R (nilai resistansi) masing-masing konsentrasi, rata-rata mencapai nilai optimumnya setelah mencapai konsentrasi 600 s/d 800 ppm. Meski nampak pada Gambar 4 terjadi penurunan yang cukup tajam dan



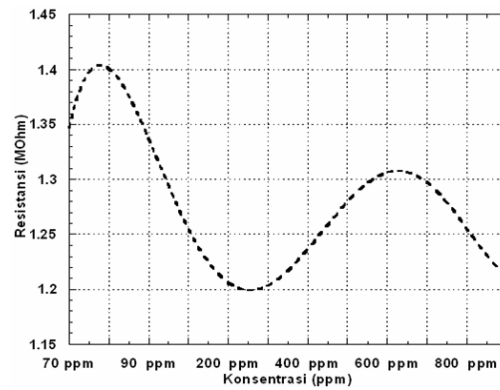
Gambar 4. Respon sensor pada suhu 275°C dengan gas uji CO pada konsentrasi 1000 ppm

belum stabil pada konsentrasi 200-300 ppm. Hal ini dimungkinkan karena konsentrasi atau volume gas uji masih terlalu kecil akibatnya perubahan nilai resistansi R_n dan R_g sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (4) masih sangat kecil. Sehingga sensor kurang peka/sensitif terhadap kehadiran gas CO. Namun demikian secara garis besar sensor ini (menunjukkan respon yang baik terhadap variasi konsentrasi gas CO.



Gambar 5. Respon sensor terhadap variasi konsentrasi gas CO pada waktu 90 detik (waktu deposisi 2 jam).

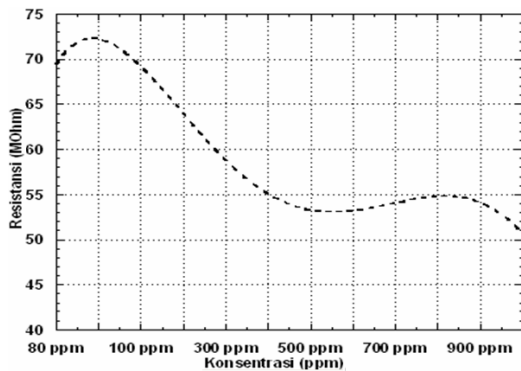
Ketidakstabilan respon sensor ini juga ditunjukkan ketika memasuki waktu 180 detik. Setelah melalui waktu 180 detik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6, respon sensor semakin tidak stabil di tiap variasi konsentrasi, ini terjadi karena waktu yang semakin lama kemungkinan pengaruh udara luar yang masuk ke tabung karakteristik semakin besar dan berpengaruh terhadap gas CO sebagai gas uji.



Gambar 6. Respon sensor terhadap variasi konsentrasi gas CO pada waktu 180 detik (waktu deposisi 2 jam).

Sensitivitas sensor dapat ditentukan dari respon terbaik pada konsentrasi tertentu. Pada substrat dengan deposisi lapisan tipis selama 2 jam ini, terlihat respon sensor paling optimum pada konsentrasi 1000 ppm. Dari hasil perhitungan sensitivitas sensor menggunakan persamaan (4), pada konsentrasi 1000 ppm dan waktu respon sensor 90 detik diperoleh sensitivitas sebesar 7,40 %. Rendahnya nilai sensitivitas disebabkan beberapa hal diantaranya karena karakteristik dilakukan pada ruang tidak hampa sehingga mempengaruhi terhadap kemurnian gas CO sebagai gas uji, volume gas uji masih terlalu kecil dan kemurnian bahan SnO_2 sebagai bahan target sputtering pada proses pembuatan lapisan tipis SnO_2 untuk sensor gas. Sedangkan sensor yang deposisi selama 1 jam memiliki waktu respon yang jauh berbeda, yakni waktu 140 detik seperti ditunjukkan pada Gambar 7, Pada Gambar tersebut sensor memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan respon sensor yang dideposisi selama 2 jam. Meski masing-masing waktu respon memiliki grafik yang menunjukkan resistansi yang semakin menurun, namun memasuki 140 detik, sensor cenderung lebih stabil terutama di konsentrasi tinggi. Meski memiliki grafik dengan penurunan yang cukup tajam pada konsentrasi 500 ppm,

Pada Gambar 7., terlihat bahwa respon sensor yang dideposisi selama 1 jam memiliki respon yang stabil di konsentrasi 800 ppm. Dari grafik terlihat bahwa sensor ini memiliki respon resistansi yang sangat stabil memasuki waktu 70 detik hingga akhir waktu pengujian. Dari hasil pengukuran diperoleh nilai resistansi sensor sebelum ada gas CO sebesar 66 M Ω dan nilai resistansi setelah ada gas CO sebesar 57 M Ω , sehingga setelah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (4) dihasilkan nilai sensitivitas sebesar 8,33 %



Gambar 7. Respon sensor terhadap variasi konsentrasi gas CO pada waktu respon 140 detik (waktu deposisi 1 jam).

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian deposisi lapisan tipis dari bahan SnO₂ untuk sensor gas karbon monoksida dapat disimpulkan sebagai berikut :

Deposisi lapisan tipis SnO₂ dapat digunakan untuk mendeteksi gas karbon monoksida. Dari hasil karakterisasi diperoleh lapisan tipis SnO₂ yang dideposisi selama 2 jam mempunyai waktu respon stabil 90 detik setelah ada gas CO dengan sensitivitas 7,40 % pada konsentrasi 1000 ppm. Sedangkan lapisan tipis yang dideposisi selama 1 jam mempunyai waktu respon setelah 70 detik dengan sensitivitas 8,33 % pada konsentrasi 800 ppm. Dengan demikian bila dibandingkan antara lapisan tipis SnO₂ yang dideposisi selama 1 jam dengan deposisi 2 jam, maka lapisan tipis SnO₂ yang dideposisi selama 1 jam memiliki karakteristik sensor yang lebih baik karena memiliki waktu respon yang lebih kecil, sensitivitas lebih tinggi dan konsentrasi lebih rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penelitian ini kami mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak : J. Karmadi, Sumarmo dan seluruh staf kelompok Aplikasi Akselerator atas segala bantuan yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] www.fikui.or.id , *Standar Emisi Gas Buang Baru Ditetapkan*, 2003, tanggal 25 September 2007
- [2] **OHRING, M.**, *The Material Science of Thin Films*, Academic Press Inc. New York, 2003

- [3] **FIGARO ENGINEERING INC.** , *Technical Information on Usage of TGS Sensors for Toxic and Explosive Gas Leak Detector*, General Information For TGS Sensors, Osaka Japan, 2004.
- [4] **PETER, T.I.** , *Design, Fabrication and Characterization of Thick-Film Gas Sensors*, Doctoral Thesis, Universitat Rovira iVirgili, Department d'Enginyeria Electronica, Tarragona, Spain, 2004
- [5] **TJIPTO S, AGUS S, SAYONO** , *Karakterisasi Lapis Tipis TiO₂ Pada Substrat Kaca Hasil Penumbuhan Dengan Teknik Sputtering DC Untuk Aplikasi Sensor Gas*, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 2003.
- [6] **TAMAKI, J., XU, C., MIURA, N., YAMAZOE, N.**, *Grain Size Effects on Gas Sensitivity of Porous SnO₂-based Elements*, Sensors and Actuators B, 3, 147-155, 1991.

TANYA JAWAB

Ratmi Herlani

– *Mengapa dipilih bahan alumina sebagai substrat pada pembuatan sensor gas ?*

Sayono

– Pemilihan bahan alumina (Al₂O₃) sebagai bahan substrat pada pembuatan sensor gas karena bahan tersebut mempunyai kelebihan antara lain :

- Nilai resistansi yang sangat besar dalam orde ribuan MΩ, sehingga nilai resistansi lapisan tipis SnO₂ yang menempel pada permukaan substrat tidak dipengaruhi oleh resistansi dari bahan alumina sebagai bahan substrat.
- Tahan suhu tinggi hingga di atas 1000°C, hal ini sangat mendukung/aman terhadap perubahan bentuk substrat akibat perubahan panas mengingat suhu operasi sensor dari bahan SnO₂ berada pada kisaran 200 s/d 400°C.
- Permukaan bahan alumina berpori sehingga lapisan tipis SnO₂ pada permukaan substrat dapat menempel lebih kuat sehingga tidak mudah mengelupas.

KARAKTERISASI STRUKTUR KRISTAL DAN STRUKTUR MIKROPADUAN BAHAN SEMIKONDUKTOR $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$

Wirjoadi, Bambang Siswanto

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan –BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta

ABSTRAK

KARAKTERISASI STRUKTUR KRISTAL DAN STRUKTUR MIKRO PADUAN BAHAN SEMIKONDUKTOR $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$. Telah dilakukan preparasi paduan bahan semikonduktor $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang dapat digunakan sebagai bahan target (CISS) dengan teknik Bridgman. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh hasil paduan bahan Cu, In, Se dan S menjadi bahan untuk target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang dipengaruhi oleh suhu dan waktu pemanasan. Bahan target dipanaskan pada suhu 350 °C, 980 °C dan 1.100 °C selama masing-masing 2, 1 dan 2 jam, kemudian didinginkan sampai suhu kamar. Hasil dari karakterisasi struktur kristal dengan XRD diperoleh bentuk kristal $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang terorientasi pada bidang (112), (204), (220), (116), (312), (316) dan (332). Karakterisasi struktur mikro dengan SEM menunjukkan bahwa morfologi permukaan yang terbentuk cukup homogen, sedangkan analisis komposisi unsur dengan EDS diperoleh hasil Cu = 28,11 %; In = 25,10 %; Se = 9,57 % dan S = 37,21 %.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF CRYSTAL AND MICROSTRUCTURE OF $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ SEMICONDUCTOR ALLOY MATERIAL. The semiconductor alloy material of $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ has been prepared by Bridgman technique. This can be used as a CISS target material. A $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ alloy target was made from Cu, In, Se and S material. The aim of the research is to obtain effect of temperature and heating time on the formation of $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ material. The material target were heated at 350 °C, 980 °C and 1.100 °C for 2, 1 and 2 hours respectively and then cooled down at room temperature. The crystal and micro structure were characterized using XRD and SEM, while the element composition was analyzed using EDS. The result shows that the crystal structure of $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ are oriented at (112), (204), (220), (116), (312), (316) dan (332) plane. The surface morphology is distributed homogenously with the element composition of Cu, In, Se and S are Cu = 28,11 %; In = 25,10 %; Se = 9,57 % and S = 37,21 %.

PENDAHULUAN

Pada tahun terakhir ini banyak dilakukan penelitian dan pengembangan pembuatan paduan bahan semi-konduktor, salah satunya adalah sel surya CIS. Selain sel surya berbasis CIS biasanya digunakan bahan semikonduktor murni yang diberi pengotor (dopan) bahan lain, sehingga nilai konduktivitasnya masih rendah. Untuk meningkatkan efisiensi dari sel surya ini digunakan bahan baru yaitu termasuk bahan dari konduktor yang dicampur dengan bahan semikonduktor. Dengan demikian efisiensi yang dihasilkan diharapkan juga lebih tinggi dari sel surya CIS^[1].

Salah satu bahan sel surya berbasis $\text{CuIn}(\text{Se},\text{S})_2$ sampai saat ini masih terus diteliti, karena bahan tersebut memiliki energi gap yang berkaitan dengan efisiensi optimal sel surya. Bahan dari CuInSe_2 (CIS) sebagai komponen sel surya mempunyai energi gap sekitar 1,01 eV. Penambahan dopan Galium pada CIS menjadi paduan $\text{CuIn}(\text{Ga})\text{Se}_2$

mempunyai energi gap dari 1,01 eV hingga energi gap CuGaSe_2 (CGS) sebesar 1,68 eV. Oleh karena itu dapat direalisasikan bahan sel surya $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) dengan energi gap yang berkaitan dengan efisiensi optimal. Untuk bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ adalah termasuk suatu bahan fotovoltaik yang mempunyai efisiensi cukup besar, secara teori material ini mempunyai efisiensi 20 %^[2].

Dalam penelitian ini telah dilakukan preparasi paduan bahan dari Cu, In, Se dan S menjadi bahan target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ atau bahan target (CISS) dengan teknik Bridgman. Pemilihan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ ini nantinya akan digunakan untuk membuat deposisi lapisan tipis sebagai salah satu komponen dasar sel surya. Teknik Bridgman ini dapat digunakan untuk menumbuhkan kristal dalam bentuk masif yaitu dengan cara melelehkan paduan bahan serbuk Cu, In, Se dan S masing-masing dengan kemurnian 99,99 % di dalam tabung kuarsa yang divakumkan, kemudian dipanaskan bertahap

dengan alat pemanas (*furnace*). Untuk menumbuhkan kristal paduan bahan yang telah dipanaskan sesuai dengan titik leleh masing-masing unsur bahan berdasarkan pada keadaan suatu sistem keseimbangan dan suhu kritis suatu bahan seperti ditunjukkan pada diagram fasa. Diagram fasa ini menyatakan tentang keadaan keseimbangan suatu sistem, sehingga secara sistematis dapat memberikan informasi dalam menentukan paduan bahan dan suhu kritis bahan. Dengan menggunakan diagram fasa diharapkan dapat dipakai untuk mengetahui dalam merancang “peta” percobaan prosedur penumbuhan kristal, sehingga diperoleh hasil interpretasi optimum^[3].

Satu diantara parameter-parameter yang berpengaruh dalam penelitian ini adalah suhu dan waktu pemanasan. Paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ atau (CISS) yang dibuat telah dipanaskan secara bertahap berturut-turut mulai dari suhu 40°C, suhu (40 - 350)°C selama 1 jam, suhu 350°C selama 2 jam, suhu (350 - 1.100)°C selama 1 jam, suhu 1.100°C selama 1 jam, kemudian suhu diturunkan dari (1.100-980)°C selama 1 jam, suhu 980°C selama 2 jam dan suhu (980 - 40)°C selama 3 jam. Kenaikan suhu diatur sedemikian rupa, sehingga dapat mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya ledakan yang diakibatkan oleh unsur tertentu pada suhu kritisnya.

Karakterisasi struktur kristal paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ digunakan spektrometer difraksi sinar X (XRD), sehingga diharapkan akan diperoleh penumbuhan kristal tunggal yang sempurna dengan kemurnian tinggi. Untuk karakterisasi struktur mikro (morfologi permukaan) dari paduan bahan target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ diamati dengan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan komposisi unsur kimia secara kuantitatif maupun kualitatif digunakan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*)^[4].

TATA KERJA

Dalam penelitian ini tahapan yang dilakukan meliputi persiapan bahan, pembuatan paduan bahan target dengan teknik Bridgman, pelaksanaan preparasi penumbuhan kristal, karakterisasi struktur kristal dan struktur mikro dari paduan bahan target

Persiapan bahan dan pembuatan pelet

Bahan yang akan digunakan untuk pembuatan target adalah paduan bahan dari serbuk Cu, In, Se dan S masing-masing dengan kemurnian 99,99 %. Paduan dari ke empat bahan tersebut dicampur dan diaduk sampai merata, kemudian dimasukkan ke dalam alat pengepres untuk di pres

dengan beban tekan 500 kg/cm². Hasil paduan bahan semikonduktor yang dicetak menjadi bentuk pelet $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ dengan ukuran diameter 13 mm dan tebal 2 mm.

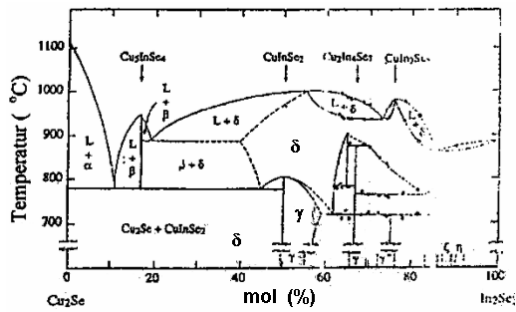
Pembuatan bahan target dengan teknik Bridgman.

Bahan semikonduktor $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang berbentuk pelet dimasukkan ke dalam tabung kaca kuarsa dengan ketebalan 2 mm, diameter dalam 12 mm dan diameter luar 16 mm. Kemudian tabung kaca kuarsa ditutup dengan mengelas diujung tabungnya, sehingga seperti bentuk kapsul. Selanjutnya tabung kaca kuarsa divakumkan dengan menggunakan pompa vakum rotari sampai tekanan vakumnya mencapai 5×10^{-4} Torr selama 4 jam. Untuk proses pengelasan tabung kuarsa yaitu ketika tekanan vakumnya sudah mencapai 10^{-4} Torr. Tujuan pengelasan tabung kaca kuarsa ini agar ketika dilakukan pemanasan paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang berada di dalam tabung tidak bereaksi dengan oksigen, nitrogen dan gas lain yang tidak dikehendaki.

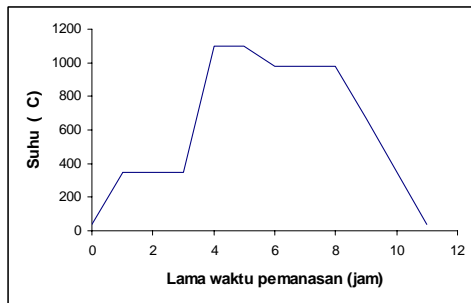
Pelaksanaan preparasi penumbuhan kristal.

Salah satu teknik yang dapat digunakan untuk penumbuhan kristal semikonduktor adalah dengan teknik Bridgman. Teknik penumbuhan kristal ini dalam bentuk masif yaitu dengan cara melelehkan bahan paduan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ berbentuk pelet ini ke dalam tabung kuarsa yang telah divakumkan. Kemudian kapsul tabung kuarsa ini dipanaskan secara bertahap dalam alat pemanas (*furnace*) pada posisi horisontal. Dalam pemanasan dipilih posisi horisontal, karena gaya adhesi antara bahan paduan dengan dinding tabung kuarsa lebih kecil bila dibandingkan dengan posisi vertikal, sehingga kemungkinan terjadi retakan atau cacat kristal dapat dikurangi^[5]. Satu diantara parameter yang berpengaruh dalam penumbuhan kristal adalah suhu dan waktu pemanasan. Untuk menentukan alur pemanasan paduan bahan semikonduktor, maka perlu diperhatikan diagram fasa ($\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}$) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dengan menggunakan diagram fasa ($\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}$) ini diharapkan dapat dipakai sebagai acuan untuk memperoleh penumbuhan kristal dan memberikan informasi dalam menentukan paduan bahan dan suhu kritis bahan.

Berdasarkan informasi diagram fasa ($\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}$) pada Gambar 1, maka untuk paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ telah dipanaskan secara bertahap sesuai dengan alur pemanasan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram fasa ($\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}$) untuk sistem keseimbangan bahan.



Gambar 2. Grafik alur pemanasan paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$.

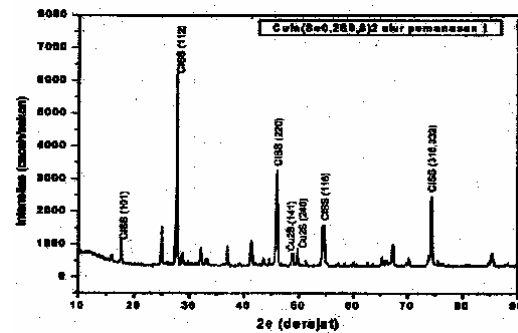
Paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ atau (CISS) telah dipanaskan secara bertahap berturut-turut mulai dari suhu 40°C , suhu $(40-350)^\circ\text{C}$ selama 1 jam, suhu 350°C selama 2 jam, suhu $(350-1.100)^\circ\text{C}$ selama 1 jam, suhu 1.100°C selama 1 jam, kemudian suhu diturunkan dari $(1.100-980)^\circ\text{C}$ selama 1 jam, suhu 980°C selama 2 jam dan suhu $(980-40)^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Dilakukan pemanasan bertahap ini tujuannya agar supaya paduan bahan Cu, In, Se dan S terjadi reaksi dan saling mengikat, sehingga paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ terdistribusi cukup homogen, karena masing-masing unsur mempunyai titik leleh yang berlainan yaitu $\text{Cu}=1.083^\circ\text{C}$, $\text{In}=165^\circ\text{C}$, $\text{Se}=217^\circ\text{C}$ dan $\text{S}=112^\circ\text{C}$. Untuk pemanasan 350°C dipertahankan selama 2 jam, agar paduan bahan ke tiga unsur In, Se dan S terjadi reaksi dan saling mengikat, sehingga distribusi paduan cukup homogen. Kemudian pemanasan dinaikkan 1.100°C dipertahankan selama 1 jam, agar paduan bahan ke empat unsur Cu, In, Se dan S dapat bereaksi yang saling mengikat menjadi target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$. Selanjutnya agar tidak terjadi keretakan atau pecah pada target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ akibat pendinginan mendadak, maka pemanasan akan diturunkan secara bertahap menjadi 980°C dipertahankan selama 2 jam, kemudian diturunkan lagi sampai suhu kamar.

Karakterisasi

Hasil paduan bahan target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ akan dikarakterisasi yaitu untuk mengetahui struktur kristal digunakan spektrometer difraksi sinar-X, dengan harapan diperoleh penumbuhan kristal tunggal yang sempurna dengan kemurnian tinggi. Karakterisasi struktur mikro (morfologi permukaan) diamati dengan alat SEM (*Scanning Electron Microscopy*) yaitu untuk mengetahui distribusi preparasi paduan bahan target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ dan untuk mengetahui komposisi unsur kimia secara kuantitatif digunakan EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*).

PEMBAHASAN

Hasil karakterisasi struktur kristal paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ dengan difraksi Sinar-X (XRD) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil karakterisasi struktur kristal paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ dengan XRD.

Pola difraksi sinar-X paduan bahan target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$ untuk pemanasan yang sesuai dengan alur pemanasan pada Gambar 2, telah menunjukkan adanya penumbuhan kristal seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan analisis data pola difraksi sinar-X dari preparasi paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2}, \text{S}_{0,8})_2$, telah memperlihatkan beberapa pertumbuhan kristal yang terorientasi pada bidang (112); (204), (220), (116), (312), (316) dan (332), dengan sudut 2θ berturut-turut $27,6469^\circ$; $44,6585^\circ$; $45,9257^\circ$; $54,3282^\circ$; $54,6062^\circ$; $74,2171^\circ$ dan $74,6000^\circ$. Apabila dibandingkan dengan data JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*), ada sedikit pergeseran sudut hamburan 2θ yaitu berturut-turut $27,250^\circ$; $45,300^\circ$; $45,300^\circ$; $53,700^\circ$; $53,700^\circ$; $72,800^\circ$ dan $72,800^\circ$. Pergeseran sudut hamburan ini dimungkinkan karena pada saat pertumbuhan kristal sangat dipengaruhi oleh suhu pemanasan dan kemungkinan lain adalah telah disisipi oleh atom-atom lain, sehingga akan mempengaruhi jarak antar

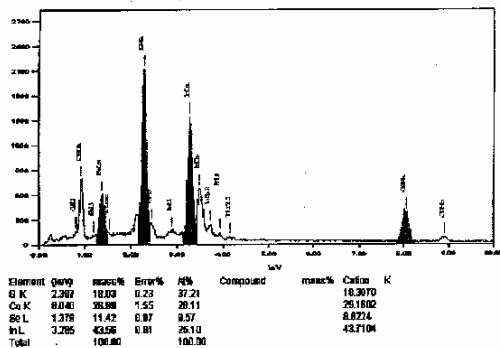
bidang kristal. Hasil karakterisasi struktur mikro (morfologi permukaan) paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ diamati dengan SEM ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Morfologi permukaan paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ dengan SEM (perbesaran 1.000 kali).

Morfologi permukaan dari paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ hasil pengamatan dengan SEM (perbesaran 1.000 kali) tampak telah menunjukkan serpihan-serpihan atau butiran-butiran yang terdistribusi cukup homogen. Dengan demikian dari kehomogenan paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ akan menghasilkan pertumbuhan kristal yang berkualitas. Apabila paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ dideposisikan pada permukaan substrat, maka akan menghasilkan lapisan tipis yang berkualitas dan dapat meningkatkan efisiensi.

Hasil komposisi unsur kimia paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ dengan EDS ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan antara intensitas dengan energi hasil karakterisasi dengan EDS.

Hasil untuk mengetahui apakah paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang terbentuk tersebut benar-benar mengandung (CISS),

maka komposisi unsur paduan bahan telah diamati dengan menggunakan EDS. Dari karakterisasi komposisi kandungan unsur dengan EDS akan didapatkan grafik hubungan antara intensitas dengan energi. Spektrum yang dihasilkan EDS adalah hasil penembakan berkas elektron yang menumbuk target menyebabkan terjadinya eksitasi dan ionisasi, sehingga atom-atom yang berada pada target dalam kondisi tidak stabil. Agar supaya atom-atom menjadi stabil kembali, maka akan dilepaskan sejumlah energi yang diperlukan untuk mengembalikan elektron ke keadaan awal. Tiap-tiap atom akan mempunyai energi tertentu untuk masing-masing elektronnya, sehingga akan menyebabkan energi sinar-X yang dilepaskan juga mempunyai nilai energi (karakteristik) tertentu. Energi karakteristik sinar-X seperti inilah yang dapat menunjukkan komposisi unsur paduan bahan semikonduktor target (CISS) dengan teknik Bridgman. Hasil karakterisasi paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ dengan EDS telah diperoleh persentase kandungan komposisi unsur dari $\text{Cu}=28,11\%$; $\text{In}=25,10\%$; $\text{Se}=9,57\%$ dan $\text{S}=37,21\%$ atau perbandingan mol unsur $\text{Cu}:\text{In}:\text{Se}:\text{S} = 1:0,9:0,34:1,3$. Dengan demikian hasil komposisi kandungan unsur dari preparasi paduan bahan target menjadi $\text{CuIn}_{0,9}(\text{Se}_{0,17},\text{S}_{0,65})_2$. Hal ini dimungkinkan karena pada saat preparasi seperti proses pengelasan tabung kuarsa membentuk kapsul masih muncul adanya unsur lain misalnya unsur oksigen (O_2).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil karakterisasi struktur kristal, struktur mikro dan pembahasan mengenai paduan bahan semikonduktor $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang telah dilakukan dengan teknik Bridgman, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil pola difraksi sinar-X dari paduan bahan semikonduktor $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang dibuat dengan teknik Bridgman telah memperlihatkan terbentuknya penumbuhan kristal.
2. Hasil karakterisasi struktur kristal dengan XRD, telah diperoleh beberapa pertumbuhan kristal $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang terorientasi pada bidang (112); (204); (220); (116); (312); (316) dan (332).
3. Hasil karakterisasi struktur mikro (morfologi permukaan) dengan SEM (perbesaran 1000 kali) telah menunjukkan bahwa paduan bahan semikonduktor target $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ terdistribusi cukup homogen.
4. Hasil karakterisasi komposisi unsur dari paduan bahan $\text{CuIn}(\text{Se}_{0,2},\text{S}_{0,8})_2$ yang diamati dengan EDS,

telah diperoleh persentase kandungan unsur Cu=28,11 %; In=25,10 %; Se=9,57 % dan S=37,21 % atau perbandingan mol unsur Cu : In : Se : S = 1 : 0,9 : 0,34 : 1,3.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr Yunanto, J. Karmadi, Sumaryadi, Isak Anshori dan Sdri. Kristianingsih S yang telah membantu penelitian ini, terutama pada saat melakukan pemvakuman, pengelasan tabung kuarsa dan pembuatan pelet paduan bahan. Semoga segala bantuan dan budi baik Saudara mendapat balasan dari Allah SWT. Amien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. BEKKER, V. ALBERTS, A.W. R. LEITCH, J. R. BOTHA, "Properties of CuIn(Se,S)₂ Thin Films Prepared by Two-Step Growth Processes", Thin Solid Film 431-432, (2003), 116-121.
- [2] JAN STERNER, "ALD Buffer Layer Growth and Interface Formation on Cu(In,Ge)Se₂ Solar Cell Absorbers", Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, (2004).
- [3] JONG WON LIM, JAE JOON CHOI, IN HWAN CHOI, "Characteristics of Cu InSe Thin Film Prepared by Sputtering of Cu₂Se-In₂Se₃ Target", Journal of the Sputtering. (2003).
- [4] C. P. LIU, B. H. TSENG, "Preparation and Characterization of CuInS₂ Thin Films Completely Converted From CuInSe₂ by Sulfurization", Article in Press, Thin Solid Film xx (2004), 1-5
- [5] LS YIP, I. SHIH, CHAMPNESS, "Method of Avoiding Ampoule Adhesion of Ingot in Bridgman Growth CuInSe₂", Journal of crystal growth, Nort Holand, K (2003).

TANYA JAWAB

Lely Susita

- *Dari uji struktur kristal, pada bahan Cu,In, Se dan S tentunya dapat diketahui sistem kristalnya. Apakah sistem kristal dari bahan Cu,In, Se dan S*

Wirjoadi

- *Dari uji struktur kristal pada bahan Cu,In, Se dan S, maka sistem kristalnya sesuai dengan bahan Cu,In, Se dan S*