

APLIKASI MESIN BERKAS ELEKTRON DI PUSAT TEKNOLOGI AKSELERATOR DAN PROSES BAHAN - BATAN

Djoko S. Pudjorahardjo

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

ABSTRAK

APLIKASI MESIN BERKAS ELEKTRON DI PUSAT TEKNOLOGI AKSELERATOR DAN PROSES BAHAN – BATAN. Mesin Berkas Elektron (MBE) di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) BATAN Yogyakarta mulai dioperasikan secara resmi pada bulan Desember 2003. MBE dengan energi berkas elektron maksimum 350 keV ini merupakan MBE hasil rancangbangun para peneliti dan teknisi di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan yang ketika itu masih bernama Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju. MBE ini termasuk MBE energi rendah ($E \leq 500$ keV), sehingga apabila mengacu pada kecenderungan teknologi MBE di dunia, maka MBE ini cocok untuk aplikasi di bidang industri. Aplikasi MBE di bidang industri banyak dilakukan untuk proses radiasi produk-produk industri. Saat ini MBE di PTAPB dapat dimanfaatkan untuk proses pelapisan permukaan, misalnya pada permukaan kayu untuk proses curing of coating, dan proses pengawetan bahan pangan, misalnya tepung terigu untuk memperpanjang umur simpan. Status aplikasi tersebut saat ini masih tahap litbang aplikasi awal, belum sampai pada tahap produksi. Berdasarkan hasil litbang aplikasi yang masih awal tersebut, maka kedua jenis aplikasi tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan parameter operasi MBE sebagai berikut: energi berkas elektron sekitar 300 keV, arus berkas elektron sekitar 0,5 mA dan kecepatan konveyor 1 cm/detik untuk proses curing of coating papan kayu dan 4 cm/detik untuk proses radiasi tepung terigu.

ABSTRACT

APPLICATION OF ELECTRON BEAM MACHINE AT THE CENTER FOR ACCELERATOR AND MATERIAL PROCESS TECHNOLOGY–BATAN. Electron Beam Machine (EBM) at the Center for Accelerator and Material Process Technology BATAN Yogyakarta had been officially operated since December 2003. The EBM with the maximum electron beam energy of 350 keV was designed and constructed by the researchers and engineers of the Center for Accelerator and Material Process Technology which was the Center for Research and Development of Advanced Technology. The EBM is categorized into the low energy EBM ($E \leq 500$ keV), so if we refer to the trend of EBM technology in the world, the EBM of the Center for Accelerator and Material Process Technology is applicable for industry. The applications of EBM in industry are mostly for radiation processing of industrial products. Currently the EBM of the Center for Accelerator and Material Process Technology is applicable for surface coating, e.g. curing of coating of wood, as well as for food preservation, e.g. irradiation of wheat flour for extending the storage life. The current status of these applications is still the preliminary applied research. Based on the results of the research, it is concluded that the applied research can be conducted by using the following EBM operation parameters: electron beam energy ~ 300 keV, electron beam current ~ 0.5 mA, conveyor velocity ~ 1 cm/sec for curing of coating of wood. For irradiation processing of wheat flour we need conveyor velocity ~ 4 cm/sec, whereas the electron beam energy and electron beam current are more or less the same as the curing of coating process.

PENDAHULUAN

Mesin berkas elektron (MBE) merupakan mesin pemercepat partikel di mana jenis partikel yang dipercepat adalah elektron. Di negara-negara maju MBE telah dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Contohnya di bidang industri, MBE dimanfaatkan untuk proses radiasi produk-produk industri seperti bahan isolasi kabel, tabung plastik, ban mobil, dan lain-lain agar kualitasnya lebih unggul. Disamping itu MBE juga

dimanfaatkan untuk *surface treatment* beberapa macam material seperti pita magnetik, kayu lapis, PCB, kertas, keramik dekoratif, dan lain-lain, sterilisasi peralatan medis, kemasan makanan dan buah-buahan agar tidak cepat busuk, serta untuk pengolahan gas buang industri agar tidak membahayakan lingkungan^[1].

Di Indonesia teknologi MBE mulai dimanfaatkan kurang lebih pada 2 dekade yang lalu, terutama untuk proses pengeringan pada pelapisan

kayu lapis dan parket, vulkanisasi karet, polimerisasi, dan proses radiasi lainnya. Pelopor pemanfaatan MBE untuk proses radiasi di Indonesia adalah BATAN, yaitu di kawasan Pusat Penelitian Tenaga Atom (PPTA) Pasar Jumat Jakarta. Di sana terdapat 2 buah MBE masing-masing dengan energi 300 keV (tipe EPS 300 buatan NHV Jepang) dan 2 MeV (tipe GJ-2 buatan SXFEM Cina). Selain BATAN, industri ban mobil Indonesia seperti PT. Gajah Tunggal dan Bridgestone juga sudah menggunakan MBE untuk meningkatkan mutu dari produksi ban mobil^[2].

Di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) BATAN Yogyakarta saat ini juga sudah ada MBE hasil rancangbangun sendiri. Kegiatan rancangbangun MBE 350 keV/10 mA dimulai pada tahun 1997 hingga selesai dan diresmikan pengoperasiannya oleh Menteri Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia pada bulan Desember 2003. MBE ini merupakan kebanggaan BATAN, khususnya PTAPB, karena mulai dari tahap perancangan, pembuatan, pengkonstruksian komponen-komponen MBE hingga ujicoba pengoperasian MBE dikerjakan sendiri oleh para peneliti dan teknisi PTAPB yang ketika itu masih bernama Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju (P3TM).

Rancangbangun MBE ini dilaksanakan dengan prinsip *learning by doing*, yaitu melaksanakan rancangbangun MBE sambil belajar, baik melalui literatur, *training* di luar negeri maupun diklat akselerator yang diadakan di BATAN. Walaupun dengan pendanaan yang tersendat-sendat tetapi karena tekad dan motivasi yang kuat untuk dapat mewujudkan sebuah MBE maka akhirnya MBE

tersebut dapat diselesaikan. Oleh karena itu MBE di PTAPB ini harus dapat dimanfaatkan secara optimal, baik oleh para peneliti di lingkungan BATAN maupun dari luar BATAN seperti Perguruan Tinggi, Industri, dan lain-lain.

Pemanfaatan MBE di PTAPB yang optimal dapat terwujud apabila MBE tersebut sudah dikenal secara luas oleh masyarakat pengguna. Saat ini masih sedikit pengguna yang mengenal MBE di PTAPB, oleh karena itu perlu ada upaya sosialisasi untuk mempromosikan MBE PTAPB oleh BATAN. Sosialisasi dapat berupa ceramah, seminar, pameran (*open house*), atau menggunakan media internet. Dalam makalah ini diinformasikan beberapa hal mengenai MBE 350 keV/10 mA di PTAPB yang meliputi spesifikasi teknis dan beberapa kemungkinan aplikasi yang dapat dilakukan dengan MBE tersebut, dengan harapan MBE PTAPB dapat tersosialisasikan melalui Seminar Sehari Akselerator ini kepada masyarakat pengguna, baik dari BATAN maupun dari luar BATAN.

SPEKIFIKASI TEKNIS MBE DI PTAPB

Agar masyarakat pengguna mempunyai gambaran yang jelas mengenai MBE yang ada di PTAPB, maka perlu disampaikan spesifikasi teknis MBE tersebut. Dengan demikian mereka dapat merancang suatu pemanfaatan dari MBE tersebut sesuai dengan bidang penelitiannya. Adapun spesifikasi teknis MBE yang ada di PTAPB seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis MBE 350 keV/10 mA di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan.

Model	BA-350/10/03
Energi elektron maksimum	350 keV
Arus elektron maksimum	10 mA
Ukuran berkas iradiasi	1200 mm × 60 mm
Daya listrik	5 kVA
Kecepatan konveyor	0,18 – 0,3 m/menit
Sumber elektron	Tipe termionik, filamen dari tungsten, <i>housing</i> dari SS
Sumber tegangan tinggi	Tipe Cockroft-Walton, kapasitas 500 kV/20 mA
Sistem pemfokus	Lensa magnetik solenoid, panjang kumparan 100 cm
Sistem pemayar	Kumparan elektromagnet, <i>pole</i> berbentuk trapesium, medan magnet maksimum 90 gauss.
Jendela	Bahan titanium, tebal 50 µm
Sistem vakum	Pompa rotari dan turbo molekul

APLIKASI MBE DI PTAPB

MBE energi rendah ($E \leq 500$ keV) banyak dimanfaatkan di bidang industri dan saat ini telah berkembang pesat, terutama dengan berkembangnya sistem instrumentasi dan kendali MBE berbasis teknologi komputer yang memungkinkan pengoperasian MBE menjadi mudah sebagaimana tuntutan dunia industri. Pemanfaatan MBE di bidang industri antara lain adalah untuk proses pengeringan pada pelapisan permukaan (*curing of coating*), pengawetan bahan-bahan makanan (*food preservation*), sterilisasi peralatan medis, pembentukan ikatan silang (*cross linking*) pada bahan-bahan plastik, karet dan bahan isolasi kabel, polimerisasi, dan lain-lain^[3]. MBE yang ada di PTAPB merupakan MBE energi rendah (350 keV) sehingga memungkinkan untuk dimanfaatkan di bidang industri seperti tersebut di atas. Berikut diuraikan beberapa aplikasi di bidang industri yang dapat dilakukan dengan MBE di PTAPB.

Aplikasi MBE Untuk Pelapisan Permukaan

Aplikasi MBE untuk pelapisan permukaan (*surface coating*) merupakan satu diantara sekian banyak aplikasi teknologi MBE. Pelapisan permukaan pada umumnya dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas permukaan suatu material sehingga sesuai dengan yang diinginkan. Kenyataan bahwa permukaan suatu material atau barang setelah sekian lama digunakan akan mengalami kerusakan yang dapat disebabkan oleh lingkungan (misalnya korosi, oksidasi), atau disebabkan oleh gesekan dengan benda lain. Oleh karena itu kemudian dilakukan pelapisan permukaan untuk meningkatkan kualitas permukaan barang tersebut sehingga lebih tahan terhadap pengaruh lingkungan ataupun terhadap goresan. Disamping itu pelapisan permukaan juga dapat dilakukan dengan tujuan agar permukaan barang menjadi lebih indah dan menarik sehingga akan meningkatkan nilai jual barang tersebut^[4].

Pada proses pelapisan permukaan suatu material, berkas elektron berkelakuan sebagai sumber energi yang berfungsi untuk mempermudah atau mempercepat reaksi kimia yang diperlukan dalam proses pelapisan permukaan. Pada cara konvensional, reaksi kimia biasanya berlangsung melalui inisiator bahan kimia dan energi panas. Tetapi dengan radiasi berkas elektron pemakaian bahan kimia dan panas sangat sedikit, baik jenis maupun kadarnya, karena sudah terwakili oleh sumber radiasi elektron tersebut. Oleh karena itu prosesnya dapat dilakukan pada suhu kamar, disamping itu prosesnya mudah dikontrol/dipantau, sederhana, cepat, bebas pencemaran baik udara

maupun limbah padat, serta produk yang dihasilkan tidak mengandung bahan beracun. Keuntungan lain dari pelapisan permukaan menggunakan MBE adalah^[5]:

1. Ramah lingkungan, karena tidak menggunakan larutan bahan organik sehingga tidak terjadi uap beracun yang dapat mencemari lingkungan.
2. Produktivitas tinggi, karena proses radiasi berlangsung sangat cepat dan kualitas hasilnya sangat bagus sehingga sangat cocok untuk aplikasi industri.
3. Untuk bahan-bahan substrat yang sensitif terhadap panas tidak menjadi masalah, karena proses radiasi ini berlangsung pada suhu kamar.
4. Prosesnya mudah dikendalikan melalui pengaturan berkas elektron yang keluar dari mesin berkas elektron.
5. Untuk produksi massal maka biaya operasinya cukup murah.

Pada Tabel 2 ditampilkan perbandingan proses pelapisan permukaan menggunakan radiasi ultraviolet, berkas elektron dan cara konvensional (katalisator).

Pelapisan permukaan menggunakan berkas elektron memerlukan suatu bahan pelapis yang disebut *radiation curable materials*. Bahan tersebut merupakan suatu cairan yang cukup pekat, pada umumnya merupakan suatu campuran atau formula yang terdiri dari bahan-bahan sebagai berikut^[7]:

- **Oligomer:** berfungsi untuk memberikan sifat dasar terhadap hasil pelapisan. Beberapa jenis oligomer antara lain adalah *acrylated epoxy*, *acrylated polyester*, *acrylated urethane* dan *acrylated silicone*. Masing-masing jenis oligomer tersebut memberikan sifat yang spesifik terhadap hasil pelapisan.
- **Monofunctional monomer:** berfungsi sebagai pengatur kepekatan *radiation curable materials* dan mempercepat proses *curing*. *Monofunctional monomer* hanya mempunyai sebuah *unsaturated structure* atau *double bond*, sehingga bila terkena radiasi akan cepat bereaksi dan menyatu dengan material yang diproses. *Monofunctional monomer* juga mempengaruhi sifat-sifat pelapisan, misalnya kekerasan dan fleksibilitas.
- **Multifunctional monomer:** berfungsi untuk membentuk *chemicals linkage* atau *cross linking* antara *segment-segment* oligomer.
- **Inisiators:** berfungsi untuk menginisialisasi proses *cross linking*; inisiators biasanya berupa bahan kimia yang apabila terkena radiasi akan mengalami disosiasi menjadi radikal bebas yang lebih reaktif dibandingkan dengan radikal

monomer. Tetapi untuk proses radiasi menggunakan berkas elektron inisiativasi tidak diperlukan, karena elektron dapat langsung menimbulkan reaksi *cross linking*.

- **Additives:** berfungsi untuk memodifikasi *performance* pelapisan dan meningkatkan sifat-sifat

khusus. Misalnya, **waxes** untuk meningkatkan ketahanan terhadap goresan, **silicone oil** dan **fatty acids** meningkatkan sifat-sifat **slip** dan **anti-blocking**. Contoh-contoh lain dari additives adalah *stabilizers*, *color pigment*, *defoamer*, *adhesion promoter* dan *flattening agent*.

Tabel 2. Perbandingan proses pelapisan permukaan menggunakan radiasi ultraviolet, berkas elektron dan cara konvensional (katalisator)^[6].

	Ultraviolet	Berkas Elektron	Konvensional
Energi pengeringan (<i>curing</i>)	3 – 6 eV	50 – 350 keV	-
Waktu pengeringan (<i>curing</i>)	detik - menit	detik	menit - jam
Penetrasi	terbatas	lebih tebal	-
Efisiensi energi	15 %	60 %	relatif rendah
Atmosfer radiasi	tidak perlu inert	inert	tidak perlu inert
Fotoinisiativasi	≤ 5 %	tidak diperlukan	katalisator ≤ 5 %
Kapasitas produksi	medium	tinggi	rendah
Jenis pelapisan	transparan/bening	transparan dan berwarna/opak	transparan dan berwarna
Pelindung untuk keamanan	sederhana	kompleks	sederhana
Harga alat	relatif rendah	tinggi	rendah

Radiation curable materials bila dikenai radiasi energi tinggi seperti berkas elektron akan menjadi sangat keras, karena akan terjadi suatu reaksi kimia yang membentuk suatu susunan molekul tiga dimensi. Permukaan bahan yang sudah terlapis dengan bahan semacam itu akan bersifat sangat keras, tahan terhadap bahan-bahan kimia yang bersifat merusak, tahan terhadap abrasi atau keausan dan tahan terhadap panas.

Pelapisan Permukaan Kayu

Diantara pemanfaatan MBE untuk pelapisan permukaan yang telah dapat dilakukan menggunakan MBE di PTAPB adalah proses pengeringan pada pelapisan (*curing of coating*) permukaan kayu. Hal ini sebenarnya bukan hal yang baru karena telah lama dilakukan di Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi (PATIR) BATAN Pasar Jumat untuk pelapisan permukaan *parquet* (papan kayu untuk lantai). Dengan telah dapat dioperasikannya MBE 350 keV di PTAPB maka sekarang proses pengeringan pada pelapisan kayu juga dapat dilakukan di PTAPB.

Pemanfaatan teknologi MBE di industri per-kayuan Indonesia sangat potensial karena Indonesia merupakan negara penghasil kayu yang besar di dunia. Industri per-kayuan di Indonesia berkembang dengan pesat sejalan dengan kebijaksanaan pemerintah dalam usaha mengalihkan ekspor kayu dari bentuk gelondongan ke bentuk kayu jadi atau setengah jadi. Hal tersebut terlihat dengan meningkatnya jumlah industri pengolah kayu menjadi

barang jadi atau setengah jadi, misalnya kayu lapis, papan partikel, mebel, lantai kayu, panel dinding, dan sebagainya^[5].

Pada umumnya tujuan pelapisan permukaan papan kayu ada 2 macam, yaitu untuk menambah keindahan dan meningkatkan kualitas permukaan sehingga lebih tahan bahan kimia, tahan panas dan tahan gores. Proses pelapisan papan kayu memerlukan 2 tahap pekerjaan, yaitu pelapisan dasar (*base coating*) dan pelapisan atas (*top coating*). Untuk pelapisan dasar mula-mula papan kayu diampelas, kemudian dilapisi dengan **oligomer** dan selanjutnya diiradiasi dengan berkas elektron. Untuk pelapisan atas, papan kayu yang telah diiradiasi tersebut diampelas lagi, kemudian dilapisi dengan pelapis atas dan diiradiasi lagi. Keuntungan pelapisan permukaan kayu menggunakan MBE bila dibandingkan dengan cara konvensional adalah^[5]:

- Kecepatan produksi relatif tinggi sehingga ruang operasi yang digunakan relatif lebih sempit.
- Bebas dari bahan pelarut yang menguap sehingga mengurangi masalah polusi udara
- Proses berlangsung pada suhu kamar sehingga dapat diterapkan pada substrat yang sensitif terhadap panas, misalnya kertas.
- Daya rekat yang memuaskan karena adhesinya merupakan ikatan kimia.

Teknik iradiasi berkas elektron sangat efisien untuk pelapisan papan kayu, misalnya pada

produksi kayu lapis laminasi kertas (*paper laminated plywood*). Teknik ini pada umumnya dilakukan pada permukaan papan kayu yang tidak mempunyai tekstur menarik dengan mengubah penampilan menggunakan kertas motif tertentu. Dengan teknik iradiasi berkas elektron maka proses pengeringan dapat dilakukan serentak untuk laminasi kertas (perekatan) dan pelapisan permukaan kertas. Parameter operasi MBE di PTAPB untuk aplikasi pelapisan permukaan kayu adalah sebagai berikut: arus berkas elektron 0,5 mA, tegangan tinggi 300 kV, kecepatan konveyor 0,9 cm/detik.

Aplikasi MBE Untuk Pengawetan Bahan Pangan

Bahan pangan merupakan kebutuhan pokok manusia yang paling mendasar. Dengan adanya krisis yang melanda Indonesia sejak beberapa tahun terakhir ini pemenuhan kebutuhan bahan pangan bagi masyarakat menjadi masalah nasional yang harus diselesaikan. Peningkatan produk bahan pangan merupakan suatu usaha yang dapat dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut. Namun peningkatan produk bahan pangan tidak akan berarti jika tidak disertai dengan peningkatan kualitas dan memperkecil produk yang hilang atau rusak pada saat pasca panen. Penanganan bahan pangan selama musim panen, saat pemrosesan dan saat penyimpanan sering menjadi masalah yang dapat mempengaruhi kualitas bahan pangan, terutama bila dikaitkan dengan usaha pencapaian ketahanan pangan nasional dan komoditas ekspor. Oleh karena itu pengembangan teknologi penanganan bahan pangan, termasuk di dalamnya teknologi pengawetan bahan pangan, harus mendapatkan perhatian yang serius dari pemerintah^[3].

Teknologi pengawetan bahan pangan beragam macamnya mulai dari cara yang sederhana yaitu penjemuran dengan sinar matahari sampai yang canggih yang memerlukan peralatan rumit dan tenaga yang terlatih^[8]. Diantara beberapa macam cara pengawetan bahan pangan adalah pengawetan bahan pangan menggunakan radiasi pengion, sinar γ , sinar X dan berkas elektron. Teknologi iradiasi untuk pengawetan bahan pangan yang kemudian populer dengan istilah **iradiasi pangan (*food irradiation*)** menjadi suatu alternatif bagi pengawetan berbagai macam produk pertanian dan bahan pangan seperti padi, jagung, kacang, kedelai, lada, kakao, buah-buahan, kentang, sayur-sayuran, dan sebagainya.

Sinar γ untuk iradiasi pangan berasal dari radioisotop, saat ini radioisotop sumber sinar γ yang

sudah dimanfaatkan secara komersial adalah ^{60}Co dan ^{137}Cs . Sinar X untuk iradiasi pangan dibatasi energinya sampai dengan 5 MeV, sedangkan berkas elektron dibatasi energinya sampai dengan 10 MeV. Baik sinar γ , sinar X maupun berkas elektron akan memberikan efek yang sama terhadap bahan pangan selama energi yang diberikan sama. Sinar γ dan sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang apabila melalui suatu medium akan dikonversi menjadi elektron cepat melalui proses-proses hamburan Compton, serapan fotoelektrik dan bentukan pasangan. Sehingga reaksi di dalam bahan pangan yang diiradiasi menggunakan sinar γ dan sinar X pada prinsipnya diambil alih oleh elektron cepat hasil konversi tersebut^[9]. Ini berarti bahwa reaksi yang ditimbulkan pada iradiasi pangan menggunakan sinar γ dan sinar X pada prinsipnya sama dengan iradiasi pangan menggunakan berkas elektron. Satu hal yang penting untuk diingat bahwa proses pengawetan bahan pangan menggunakan sinar γ , sinar X dan berkas elektron terbukti tidak menghasilkan neutron, sehingga bahan pangan tidak menjadi radio-aktif. Oleh karena itu iradiasi merupakan teknologi pengawetan bahan pangan yang aman dan efektif.

Tujuan iradiasi bahan pangan pada umumnya adalah: (1) untuk membunuh serangga dan parasit pada bahan pangan seperti biji-bijian (padi, kacang, dan lain-lain), buah-buahan dan sayur-sayuran, daging, *seafood*, (2) untuk menunda pematangan pada kentang dan bawang putih, (3) untuk menunda pematangan buah-buahan dan sayur-sayuran, dan (4) untuk mengurangi jumlah mikroorganisme pada makanan. Dengan demikian maka kerusakan pada bahan pangan dapat diperkecil dan umur bahan pangan menjadi lebih panjang (lebih awet). Dosis radiasi yang diperlukan pada iradiasi bahan pangan tergantung pada tujuan dari proses iradiasi tersebut. Hal ini dapat dicermati pada Tabel 3^[10].

Efektifitas iradiasi untuk membunuh bakteri atau mikroorganisme pada dosis tertentu ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu^[10]:

- Jenis mikroorganisme: untuk jenis mikroorganisme yang berbeda memerlukan dosis yang berbeda (lihat Tabel 4).
- Jumlah organisme mula-mula: makin banyak jumlah organisme maka suatu dosis radiasi tertentu makin kurang efektif.
- Komposisi bahan pangan: ada komposisi bahan pangan yang bersifat protektif terhadap radiasi (misal protein, catalase, senyawa-senyawa nitrit, sulfite, sulphydryl).
- Wujud fisis dari bahan pangan saat iradiasi.

Tabel 3. Kebutuhan dosis radiasi untuk beberapa macam pemanfaatan iradiasi pangan¹¹⁰¹.

Tujuan Iradiasi	Dosis (kGy)	Macam Bahan Pangan
Pencegahan pertunasan	0,03 – 0,15	Kentang, bawang putih, bawang merah, wortel
Disinfestasi, sterilisasi	0,1 – 1	Biji padi, kacang, buah-buahan, kakao
Penundaan pematangan	0,5 – 1	Pisang, pepaya, mangga, asparagus, <i>mushroom</i>
Peningkatan kualitas	1 – 10	Sayuran kering, <i>alcohol beverage</i> , biji kopi
<i>Radurization</i>	1 – 7	Buah-buahan, produk perikanan, daging
<i>Radacidation</i>	1 – 7	Udang beku, kaki katak beku, daging unggas
<i>Decontamination, sanitization</i>	3 – 10	Bumbu, sayuran kering, plasma darah, <i>egg powder</i> , preparat enzim, <i>gum arabic, cork</i>
<i>Radappertization</i>	20 – 50	Bahan makanan untuk diet (pasien, astronot), pakan hewan, bahan pengemas makanan, produk medis

Tabel 4. Dosis iradiasi yang diperlukan untuk membunuh beberapa jenis organisme¹¹⁰¹.

Jenis organisme/mikroorganisme	Dosis yang diperlukan (kGy)
Serangga	0,22 – 0,93
Virus	10 – 40
<i>Yeasts (fermentative)</i>	4 – 9
<i>Yeasts (film)</i>	3,7 – 18
<i>Molds (spores)</i>	1,3 – 11
Bakteri (sel pathogen):	
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	1,4
<i>Staphylococcus aureus</i>	1,4 – 7
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	4,2
<i>Salmonella spp</i>	3,7 – 4,8
Bakteri (sel <i>saprophytes</i>):	
Gram-negative:	
<i>Escherichia coli</i>	1 – 2,3
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,6 – 2,3
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	1,2 – 2,3
<i>Enterobacter aerogenes</i>	1,4 – 1,8
Gram-positive:	
<i>Lactobacillus spp</i>	0,23 – 0,38
<i>Streptococcus faecalis</i>	1,7 – 8,8
<i>Leuconostoc dextranicum</i>	0,9
<i>Sarcina lutea</i>	3,7
Bacterial spores:	
<i>Bacillus subtilis</i>	12 – 18
<i>Bacillus coagulans</i>	10
<i>Clostridium botulinum (A)</i>	19 – 37
<i>Clostridium botulinum (E)</i>	15 – 18
<i>Clostridium perfringens</i>	3,1
Putrefactive anaerobe 3679	23 – 50
<i>Bacillus stearothermophilus</i>	10 – 17

Iradiasi Bahan Pangan Menggunakan Soft Electron

Pengawetan bahan pangan menggunakan berkas elektron dari MBE di beberapa negara telah banyak dilakukan. Sedangkan di Indonesia masih merupakan metode baru sehingga perlu sosialisasi mengenai pemanfaatan MBE untuk pengawetan bahan pangan. MBE sebagai sumber radiasi elektron lebih memberikan harapan terhadap daya terima masyarakat (*public acceptance*) dibandingkan dengan sinar γ yang berasal dari radioisotop. Pandangan masyarakat terhadap sesuatu yang bersifat radioaktif terlanjur kurang menyenangkan. Oleh karena itu pengawetan bahan pangan menggunakan berkas elektron menjadi suatu alternatif pemecahan masalah keamanan pangan^[8].

Perbedaan penting antara sinar γ dengan berkas elektron adalah kemampuan penetrasi di dalam suatu bahan. Sinar γ mempunyai kemampuan penetrasi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan elektron. Kemampuan penetrasi elektron makin besar seiring dengan kenaikan energi elektron. Energi berkas elektron untuk iradiasi bahan pangan dibatasi maksimum hingga 10 MeV. Penetrasi elektron dengan energi 10 MeV adalah sekitar 4 cm pada bahan dengan kerapatan 1 gram/cm² (air). Energi yang diberikan elektron kepada bahan tergantung pada kedalaman elektron di dalam bahan^[9].

Perbedaan penting lainnya antara sinar γ dengan berkas elektron adalah laju dosis. Sebagai contoh, laju dosis sinar γ dari sumber ⁶⁰Co adalah 1 - 100 Gy/menit, sedangkan laju dosis berkas elektron dari suatu MBE adalah 10³ - 10⁶ Gy/detik. Laju dosis dapat mempengaruhi efek iradiasi pada bahan pangan, dan perbedaan efektifitas iradiasi pangan antara sinar γ dengan berkas elektron dianggap berasal dari perbedaan laju dosisnya yang begitu besar^[9].

Tabel 5. Perbandingan antara iradiasi menggunakan sinar γ dengan iradiasi menggunakan berkas elektron^[9].

	Sinar γ	Berkas elektron
Laju dosis	Rendah	Tinggi
Kemampuan proses	Rendah	Tinggi
Biaya iradiasi	Tinggi	Rendah
Sumber radiasi	⁶⁰ Co	Mesin Berkas Elektron
Perlengkapan tambahan	Perlu	Tidak perlu
Perawatan	Rendah	Tinggi
Persyaratan teknis	Rendah	Tinggi
Kemampuan penetrasi	Tinggi	Rendah

Disamping kedua perbedaan penting tersebut di atas, masih ada beberapa faktor perbedaan antara iradiasi menggunakan sinar γ dengan iradiasi menggunakan berkas elektron seperti ditampilkan pada Tabel 5. Dengan memperhatikan Tabel 5 maka dapat disimpulkan bahwa iradiasi menggunakan berkas elektron lebih menguntungkan daripada menggunakan sinar γ .

Sebagian besar kontaminasi mikroorganisme pada *dry food ingredient* seperti biji-bijian, kacang-kacangan dan *spices* terletak pada permukaan, sehingga iradiasi untuk dekontaminasi cukup dipermukaannya saja. Untuk iradiasi tersebut dapat menggunakan *soft electron*, yaitu elektron dengan energi $E \leq 300$ keV. Penetrasi *soft electron* pada bahan pangan seperti tersebut di atas hanya pada permukaan, sehingga iradiasi hanya akan membunuh mikroorganisme dipermukaan bahan pangan tanpa menurunkan kualitas bahan pangan tersebut^[9]. *Soft electron* dapat dihasilkan oleh MBE yang ada di PTAPB dengan mengendalikan tegangan pemercepat tidak melampaui 300 kV.

MBE di PTAPB sudah dapat diaplikasikan untuk iradiasi bahan pangan, misalnya yang telah dilakukan adalah iradiasi tepung terigu. Terigu merupakan bahan pangan berbasis tepung yang banyak manfaatnya serta merupakan komoditas ekspor. Aplikasi MBE untuk iradiasi tepung terigu di PTAPB saat ini masih pada tahap awal, yaitu untuk mempelajari proses iradiasi tepung terigu menggunakan *soft electron* dari MBE dengan tujuan untuk memperpanjang umur simpan tepung terigu^[8]. Untuk pelaksanaan proses iradiasi tepung terigu selain MBE sebagai sumber radiasi *soft electron* masih diperlukan peralatan tambahan yang meliputi^[8]:

- *Electron Spin Resonance (ESR)* untuk mengukur radikal bebas
- *Chromameter* untuk mengukur derajat putih
- *Spectrophotometer* untuk mengukur derajat pencoklatan
- Viskosimeter untuk mengukur kekentalan relatif
- *Oven* untuk mengukur kadar air dengan metoda gravimetric
- Timbangan (neraca), alat gelas dan alat penunjang lainnya.

KESIMPULAN

Dengan mempelajari beberapa tulisan mengenai aplikasi MBE untuk pelapisan permukaan dan untuk pengawetan bahan pangan, dan dengan

mempertimbangkan status operasional MBE di PTAPB saat ini, maka dapat disimpulkan bahwa MBE di PTAPB pada prinsipnya dapat dimanfaatkan untuk pelapisan permukaan (kayu, kertas, plastik, dll) dan pengawetan bahan pangan khususnya bahan pangan berbasis butiran atau tepung. Parameter operasi yang menentukan terhadap hasil aplikasi tersebut adalah dosis radiasi (dikendalikan melalui arus berkas elektron) dan energi berkas elektron (dikendalikan melalui tegangan pemercepat).

Status pemanfaatan MBE di PTAPB saat ini masih tahap penelitian awal yang masih memungkinkan untuk pengembangan lebih lanjut. Implementasi pemanfaatan MBE di PTAPB untuk kedua jenis aplikasi tersebut di atas masih memerlukan tambahan peralatan penunjang. Oleh karena itu agar MBE di PTAPB ini dapat dimanfaatkan secara optimal perlu dukungan dana yang memadai untuk pengadaan peralatan tambahan. Disamping itu perlu dilakukan sosialisasi yang lebih gencar agar keberadaan MBE di PTAPB lebih dikenal oleh masyarakat dan akan tertarik untuk memanfaatkannya.

DAFTAR ACUAN

- [1] DJOKO S. PUDJORAHARDJO, *Teknologi Mesin Berkas Elektron*, Diktat Materi Kuliah BATAN Accelerator School 2004, P3TM BATAN, Yogyakarta, 7 – 18 Juni 2004.
- [2] SUGIARTO DANU, *Dasar-dasar Aplikasi Mesin Berkas Elektron*, Diktat Materi Kuliah BATAN Accelerator School 2004, P3TM BATAN, Yogyakarta, 7 – 18 Juni 2004.
- [3] SUDJATMOKO, *Pemanfaatan Teknologi Akselerator Elektron (Mesin Berkas Elektron) Energi Rendah Dalam Bidang Industri*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol. 4, No. 1, Oktober 2002.
- [4] DJOKO S. PUDJORAHARDJO, *Teknologi Mesin Berkas Elektron Untuk Proses Perlakuan Permukaan (Surface Treatment)*, Diktat Pelatihan Teknologi Akselerator dan Aplikasinya (ATA-03), P3TM BATAN, Yogyakarta, 23 – 27 Juni 2003.
- [5] MUKHLIS AKHADI, *Teknologi Polimerisasi Radiasi Untuk Peningkatan Mutu Kayu*, Tempo Interaktif, Html
- [6] SUGIARTO DANU, *Aplikasi Mesin Berkas Elektron Dalam Bidang Polimer Industri*, Diktat Materi Kuliah BATAN Accelerator School 2004, P3TM BATAN, Yogyakarta, 7 – 18 Juni 2004.
- [7] MEHDI TAVAKOLI, *et. al.*, *New Coating Technologies for Wood Products*, An Evaluation and Review, Html.
- [8] RINDY P. TANHINDARTO, *Proses Iradiasi Tepung Terigu Dengan Menggunakan Mesin Berkas Elektron (350 keV, 10 mA)*, Makalah dipresentasikan pada Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Akselerator VIII, P3TM BATAN, Yogyakarta, 21 – 22 November 2005.
- [9] TORU HAYASHI, *Food Irradiation*, International Seminar on Nuclear Safety 2004, Radiation Application Course, RADA, JAERI Tokai, Jepang, January 17 – 28, 2005.
- [10] O.P. SNYDER and D.M. POLAND, *Food Irradiation Today*, <http://www.hi-tm.com>.