

KAJIAN FASILITAS AKSELERATOR ELEKTROSTATIK TANDEM UNTUK APLIKASI DI BIDANG LINGKUNGAN

Djoko S. Pudjorahardjo, Budi Santosa, Aminus Salam, Subari Santoso
Puslitbang Teknologi Maju - BATAN

ABSTRAK

KAJIAN FASILITAS AKSELERATOR ELEKTROSTATIK TANDEM UNTUK APLIKASI DI BIDANG LINGKUNGAN. Telah dilakukan kajian fasilitas akselerator elektrostatis tandem untuk aplikasi bidang lingkungan. Kajian ini berkaitan dengan rencana pembangunan laboratorium berbasis akselerator di P3TM-BATAN, yang antara lain akan dimanfaatkan di bidang lingkungan. Pemanfaatan teknologi akselerator di bidang lingkungan terutama adalah sebagai alat analisis cuplikan lingkungan. Pertumbuhan kawasan industri yang cukup pesat di era industrialisasi telah mengakibatkan dampak terhadap lingkungan berupa pencemaran lingkungan (udara, air, tanah). Oleh karena itu penting dilakukan pemantauan lingkungan sebagai upaya untuk pengendalian pencemaran lingkungan. Pemantauan ini dapat dilakukan dengan analisis cuplikan lingkungan untuk mengetahui jenis dan kadar unsur-unsur pencemar. Analisis cuplikan lingkungan menggunakan teknologi akselerator dilakukan dengan teknik analisis berkas ion. Satu diantara teknik analisis berkas ion yang banyak digunakan adalah teknik PIXE (Proton Induced X-ray Emission) dengan memanfaatkan berkas proton pada energi 1 sampai 3 MeV yang dapat dihasilkan oleh akselerator jenis elektrostatis tandem. Pada makalah ini disampaikan hasil kajian fasilitas akselerator elektrostatis tandem untuk aplikasi bidang lingkungan. Untuk merealisasikan rencana pemanfaatan akselerator di bidang lingkungan untuk analisis cuplikan lingkungan, maka selain akselerator elektrostatis tandem harus dipenuhi juga peralatan analisis dengan teknik PIXE beserta fasilitas pendukungnya.

Kata kunci: akselerator, tandem, PIXE, lingkungan.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF TANDEM ELECTROSTATIC ACCELERATOR FACILITY FOR ENVIRONMENTAL APPLICATION. Assessment of tandem electrostatic accelerator facility for environmental application has been carried out. The assessment is related to the plan of establishment of accelerator based laboratory at P3TM- BATAN. The laboratory is planned to provide contribution in the field of environment for pollution control. The role of accelerator technology in this case is as a tool of analysis of environment samples. The fast growth of industry areas causes environment pollution (air, water, soil). Therefore it is important to monitor environment as action for pollution control. The monitoring can be carried out by means of analysis of environment samples to determine the elements of environment pollutant. The analysis of environment samples using accelerator technology is carried out by ion beam analysis techniques such as PIXE (Proton Induced X-ray Emission) technique using proton beam with energy from 1 up to 3 MeV which can be produced by tandem electrostatic accelerator. The paper describes the result of assesment of tandem electrostatic accelerator facility for environmental application. To implement the plan of accelerator application for analysis of environment samples, the equipments of PIXE analytical technique and its supporting facilities are necessary to be completed besides tandem electrostatic accelerator it self.

Key words: accelerator, tandem, PIXE, environment.

PENDAHULUAN

Pembangunan nasional yang dilaksanakan sejak tahun 70-an dan hingga saat ini terus berlangsung di satu sisi telah meningkatkan taraf hidup bangsa Indonesia. Bahkan memasuki abad XXI sebagai era industrialisasi diharapkan industri di Indonesia berkembang pesat, di mana akan makin banyak didirikan kawasan industri. Dengan demikian dapat meningkatkan pemasukan

devisa bagi negara dan membuka lapangan kerja baru. Namun di sisi lain pertumbuhan kawasan industri yang demikian pesat juga akan memberikan dampak negatif. Satu diantaranya adalah timbulnya masalah lingkungan berupa pencemaran lingkungan.

Pencemaran lingkungan diakibatkan oleh limbah industri yang kurang dikelola dengan baik. Diantara limbah industri dapat berupa bahan-bahan beracun dan berbahaya yang dapat merusak keselamatan lingkungan dan menurunkan kualitas

kesehatan masyarakat. Disamping oleh limbah industri, pencemaran lingkungan juga dapat diakibatkan oleh asap kendaraan bermotor, penggunaan pestisida yang berlebihan, dan lain-lain. Bahan-bahan pencemar atau biasa disebut dengan **polutan** dapat berupa senyawa anorganik, senyawa organik atau senyawa organik logam. Senyawa-senyawa tersebut dapat berinteraksi dengan media udara, tanah, air, biota, atau organik hidup lainnya^[1,2].

Keadaan lingkungan berpengaruh terhadap kualitas hidup manusia, hewan dan tumbuhan yang hidup di lingkungan tersebut. Lingkungan yang kurang sehat, terlebih karena adanya berbagai macam polutan yang berbahaya, dapat menyebabkan berbagai penyakit yang dapat diderita baik oleh manusia maupun hewan. Oleh karena itu lingkungan harus senantiasa dijaga agar tidak tercemar oleh berbagai polutan berbahaya. Beberapa langkah konkrit harus dilakukan misalnya pengelolaan limbah industri secara profesional dan memenuhi persyaratan AMDAL, pengurangan pelepasan gas beracun dari kendaraan bermotor, pengurangan pemakaian pestisida untuk pemupukan tanaman, dan lain-lain.

BATAN sebagai instansi pemerintah yang berwenang untuk memanfaatkan iptek nuklir untuk kesejahteraan masyarakat merasa terpanggil untuk berperanserta dalam memecahkan masalah pencemaran lingkungan. Diantara iptek nuklir yang saat ini dimiliki oleh BATAN adalah teknologi akselerator. Di negara-negara maju, teknologi akselerator telah terbukti sangat bermanfaat dan banyak diaplikasikan di berbagai bidang termasuk di bidang lingkungan yaitu untuk pemantauan lingkungan hidup dalam upaya pengendalian pencemaran lingkungan hidup. BATAN merencanakan di waktu mendatang dapat dibangun suatu fasilitas berbasis teknologi akselerator yang dapat dimanfaatkan juga untuk memecahkan masalah di bidang lingkungan^[3].

Penguasaan teknologi akselerator dan pemanfaatannya sangat diperlukan sehingga dapat memberikan peran berarti bagi penanggulangan masalah lingkungan hidup. Pemanfaatan teknologi akselerator untuk pengendalian pencemaran lingkungan hidup dilakukan dengan teknik analisis berkas ion (*ion beam analytical technique*). Dalam hal ini berkas ion yang dihasilkan oleh akselerator dimanfaatkan untuk menentukan komposisi dan kadar unsur-unsur polutan dari suatu cuplikan lingkungan. Dalam makalah ini disampaikan hasil kajian fasilitas akselerator elektrostatik tandem sebagai penghasil berkas ion untuk teknik analisis berkas ion rangka mendukung rencana pembangunan fasilitas berbasis teknologi akselerator di P3TM.

BAHAN KAJIAN

Dalam rangka mengkaji fasilitas akselerator elektrostatik tandem yang akan dimanfaatkan untuk pemantauan kualitas lingkungan hidup, ada beberapa bahan kajian yang akan dikaji yaitu:

Teknik Analisis Berkas Ion^[4,5]

Teknik analisis berkas ion adalah teknik analisis unsur dengan memanfaatkan berkas ion yang dihasilkan oleh suatu akselerator. Berkas ion tersebut mempunyai karakteristik tertentu yang meliputi energi, arus, diameter berkas, emitasi, dan sebagainya, yang kesemuanya dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan. Bila berkas ion mengenai suatu bahan cuplikan, maka akan terjadi interaksi antara berkas ion dengan atom-atom dalam bahan cuplikan dan memberikan efek informatif yang dapat dimanfaatkan untuk teknik analisis.

Secara makro, efek interaksi tersebut adalah **penyerapan** berkas ion secara total oleh bahan cuplikan dan **penembusan** bahan cuplikan oleh berkas ion. Penyerapan berkas ion secara total oleh bahan cuplikan diakibatkan oleh tumbukan berulang kali antara ion dengan elektron atau inti atom bahan cuplikan sehingga secara bertahap akan kehilangan energi kinetiknya dan akhirnya berhenti pada kedalaman tertentu. Sedangkan penembusan bahan cuplikan oleh berkas ion karena bahan cuplikan tidak dapat menghentikan gerakan ion. Secara mikro, efek interaksi antara berkas ion dengan elektron dan inti atom bahan cuplikan adalah peristiwa **eksitasi** dan/atau **ionisasi** atom/molekul bahan cuplikan. Dalam hal ini energi ion ditransfer ke elektron dalam bahan sehingga elektron dapat naik ke orbit yang lebih tinggi atau elektron terlepas dari orbitnya di dalam atom.

Interaksi berkas ion dengan bahan cuplikan baik secara makro maupun secara mikro dapat menghasilkan suatu *product* yang dipancarkan dari bahan cuplikan dengan kebolehjadian yang ditentukan oleh tampang lintang (*cross-section*) interaksinya. *Product* tersebut dapat berupa foton, sinar X, atau partikel lain, yang kemudian diukur sebagai spektrum yang dapat memberikan informasi tentang komposisi cuplikan dan *elemental depth distribution*. Berdasarkan *product* dan jenis informasi yang dapat diperoleh dari hasil interaksi berkas ion dengan bahan cuplikan, dikenal beberapa macam teknik analisis berkas ion seperti PIXE (*Particle Induced X-ray Emission*), RBS (*Rutherford Backscattering Spectrometry*), ERDA (*Elastic Recoil Detection Analysis*), NRA (*Nuclear Reaction Analysis*), CPAA (*Charged Particle*

Activation Analysis) dan AMS (Accelerator Mass Spectrometry)^[4,5].

- Pada PIXE diukur energi sinar X yang dipancarkan saat elektron mengisi kekosongan pada kulit dalam (*inner shell*) akibat peristiwa eksitasi oleh berkas proton. Energi sinar X yang terukur merupakan karakteristik dari unsur dalam cuplikan, sehingga teknik PIXE dapat digunakan untuk analisis unsur.
- Pada RBS diukur energi ion yang terhambur balik secara elastis oleh inti atom cuplikan. Energi ion yang terukur tergantung pada massa inti atom cuplikan dan kedalaman hamburan tersebut dari permukaan cuplikan.
- Pada ERDA diukur energi *recoil* dari inti atom cuplikan yang mengalami hamburan elastis dengan berkas ion. Energi yang terukur tergantung pada massa *recoil* dan kedalaman hamburan dari permukaan cuplikan.
- Pada NRA diukur energi *products* yang dihasilkan (p, n, α , γ , dsb) pada reaksi nuklir antara berkas ion dengan inti atom cuplikan. Energi yang terukur memberikan informasi spesifik dari inti atom cuplikan.

Beberapa teknik analisis dapat digunakan secara simultan. Sebagai contoh, teknik PIXE, RBS, ERDA, NRA dan PIGE dapat diinstalasi pada satu *vacuum chamber* dan digunakan pada saat yang sama^[4].

Diantara beberapa macam teknik analisis berkas ion, teknik PIXE banyak memberikan manfaat di bidang lingkungan. Dengan teknik PIXE cuplikan lingkungan dapat dianalisis dengan hasil yang sangat akurat, sehingga dapat diketahui jenis dan kadar unsur-unsur pencemar atau polutan di dalam lingkungan. Bahkan polutan dengan kadar yang sangat rendah yang biasanya dikenal sebagai unsur kelumit (*trace elements*), dengan teknik analisis berkas ion masih dapat dideteksi keberadaannya.

Akselerator Elektrostatik Tandem^[6,7]

Akselerator elektrostatik adalah jenis akselerator dengan medan pemercepat partikel berupa medan listrik statis yang dibangkitkan dengan generator tegangan tinggi searah. Beberapa tipe generator tegangan tinggi searah untuk akselerator elektrostatik yaitu tipe *cascade transformer*, tipe pelipat tegangan (*Cockroft-Walton* dan *dinamitron*), tipe kombinasi *cascade transformer* dengan pelipat tegangan (*deltatron*) dan tipe sabuk pembawa

muatan (*Van de Graaff, pelletron/tandem, felici*). Tegangan tinggi searah dari suatu terminal tegangan tinggi didistribusikan pada tabung pemercepat melalui elektroda-elektroda sedemikian rupa sehingga diperoleh medan listrik statis pada tabung pemercepat yang digunakan untuk memercepat partikel bermuatan. Akselerator elektrostatik mampu menghasilkan berbagai jenis partikel bermuatan mulai dari proton, ion-ion dari atom ringan hingga atom berat. Energi ion yang dihasilkannya sebanding dengan tegangan tinggi yang terpasang pada sistem pemercepat partikel dan juga tergantung pada massa ionnya^[6].

Akselerator dalam teknik analisis berkas ion diperlukan untuk menghasilkan berkas ion dengan energi beberapa MeV yang akan ditembakkan pada bahan cuplikan. Jenis akselerator yang banyak digunakan untuk keperluan tersebut adalah akselerator jenis elektrostatik seperti akselerator jenis Van de Graaff dan jenis tandem. Kecenderungan di dunia saat ini bahwa laboratorium-laboratorium akselerator menggunakan akselerator elektrostatik tandem^[4]. Akselerator jenis ini mampu menghasilkan berbagai jenis partikel seperti proton, ion-ion ringan hingga berat dengan energi orde MeV sampai puluhan MeV (sesuai dengan massa ionnya) dan arus ion orde μA sampai ratusan μA . Oleh karena itu jenis akselerator elektrostatik tandem menjadi fokus pembahasan dalam makalah ini.

HASIL KAJIAN DAN PEMBAHASAN

Pemantauan kualitas lingkungan perlu dilakukan untuk mengetahui apakah suatu lingkungan telah tercemar oleh berbagai macam polutan, atau sebaliknya cukup aman dan sehat bagi kehidupan. Teknologi nuklir dapat diaplikasikan untuk kegiatan pemantauan kualitas lingkungan, yaitu dengan memanfaatkan teknik analisis berkas ion. Cuplikan lingkungan dianalisis untuk mengetahui jenis dan kadar polutan yang terkandung dalam cuplikan lingkungan. Beberapa jenis polutan di lingkungan mempunyai kadar yang sangat rendah dan disebut sebagai unsur kelumit (*trace element*)^[1]. Untuk pencemaran yang bersifat kelumit hanya dapat dideteksi dengan teknik analisis tertentu, termasuk teknik PIXE.

PIXE merupakan teknik analisis berkas ion yang handal dan telah banyak dimanfaatkan di berbagai negara. Dasar-dasar fisis dari PIXE terdiri dari^[4]:

- Tumbukan tak elastis antara partikel bermuatan (proton atau ion yang lebih berat) dengan atom-

atom cuplikan saat partikel bermuatan tersebut masuk ke dalam cuplikan.

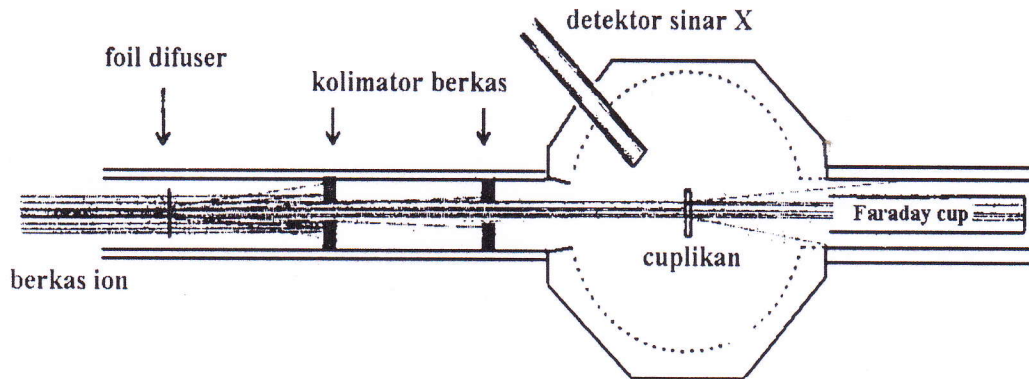
- Pengurangan energi partikel bermuatan sepanjang lintasannya di dalam cuplikan menurut konsep *specific energy loss* atau *stopping power*.
- Pemancaran sinar X karakteristik dari atom-atom cuplikan yang tereksitasi sepanjang lintasan partikel bermuatan di dalam cuplikan. Kebolehjadian proses ini ditentukan oleh faktorampang lintang produksi sinar X.
- Atenuasi sinar X yang terpancar dari cuplikan oleh material lain.

Instrumentasi PIXE

Susunan peralatan pokok untuk PIXE ditampilkan pada Gambar 1. Peralatan pokok untuk PIXE terdiri dari: (1) tabung hanyut (*drift tube*) untuk lewat berkas ion yang di dalamnya terdapat *diffuser foil*, kolimator berkas, *Faraday cup*, dan (2)

target chamber di mana cuplikan yang akan dianalisis ditempatkan, di dalamnya terdapat detektor sinar X dan *sample holder*.

Tabung hanyut dan *target chamber* harus divakum antara 10^{-3} hingga 10^{-4} Pa agar kebolehjadian tumbukan antara berkas ion dengan molekul gas yang tersisa sekecil mungkin. Dengan demikian *energy loss* berkas ion dapat diabaikan karena *energy loss* untuk sebagian besar ion ringan dengan energi beberapa MeV pada kevakuman tersebut kurang dari 1 eV per 1 m panjang tabung hanyut (Tabel 1). Bahkan untuk proton, *energy loss* dapat diabaikan pada kevakuman antara 10^{-1} hingga 10^{-2} Pa. Oleh karena itu peralatan pokok PIXE harus didukung dengan sistem vakum yang memadai. Saat ini yang umum digunakan adalah pompa rotari dan pompa turbomolekular. Disamping itu tabung hanyut dan *target chamber* sebaiknya dibuat dari bahan dengan laju *outgassing* rendah, misalnya *stainless steel*. Untuk jendela *target chamber* dapat digunakan bahan dari gelas atau *perspex*, sedangkan untuk *vacuum seal* sebaiknya menggunakan bahan metal.



Gambar 1. Peralatan pokok untuk PIXE^[4].

Tabel 1. Jangkauan di udara dan *energy loss* (ΔE) beberapa jenis ion ringan^[4].

Jenis Ion	Jangkauan di udara (mm)	ΔE (eV/m, pada kevakuman 10^{-4} Pa)
p (1 MeV)	23,25	0,0273
p (2 MeV)	71,25	0,0169
p (3 MeV)	140,52	0,0126
α (1 MeV)	5,21	0,232
α (2 MeV)	10,24	0,107
¹² C (3 MeV)	5,21	0,868
²⁸ Si (6 MeV)	6,27	1,860

Profil atau tampang lintang berkas ion yang masuk ke *target chamber* ditentukan oleh *diffuser foil* dan kolimator berkas yang ada di dalam tabung hanyut. *Diffuser foil* dibuat dari bahan dengan konduktivitas termal dan konduktivitas listrik yang tinggi, misalnya Al, Cu, Ag atau Au. Dengan *diffuser foil* dapat diperoleh distribusi berkas ion yang seragam pada tampang lintang berkas. Sedangkan kolimator berkas membatasi ukuran tampang lintang berkas yang masuk ke *target chamber*. Kolimator umumnya berbentuk lubang bulat berdiameter 3 sampai 8 mm. Paling sedikit terdiri dari 2 buah kolimator, di mana kolimator pertama menentukan bentuk berkas dan kolimator

kedua sebagai kolimator anti hamburan, yaitu menahan berkas terhambur pada tepi kolimator pertama agar tidak masuk ke *target chamber*.

Untuk jenis cuplikan yang tidak dapat divakum, misalnya cuplikan berbentuk cair, maka harus ada udara di dalam *target chamber*. Tetapi jangkau proton dan atenuasi sinar X di udara akan merupakan suatu kendala. Untuk mengatasinya maka *target chamber* diisi dengan helium sebagai pengganti udara. Hal ini karena *energy loss* proton di dalam helium jauh lebih rendah dari pada di dalam udara (Tabel 2). Disamping itu atenuasi sinar X di dalam helium lebih rendah dan konduktivitas termalnya lebih tinggi dari pada udara.

Tabel 2. Karakteristik udara, helium dan beberapa bahan untuk *exit foil*^[4].

Bahan	Kerapatan (g/cm ³)	Proton (3 MeV)	
		dE/dx	Jangkau (mm)
Udara	0,00125	12,6 keV/mm	139
He	0,00017	2,21 keV/mm	767
Be	1,85	18,54 keV/ μ m	0,095
C (grafit)	2,25	24,20 keV/ μ m	0,073
C (diamond)	3,50	37,53 keV/ μ m	0,047
Kapton	1,43	15,81 keV/ μ m	0,110
Al	2,70	22,42 keV/ μ m	0,081
Au	19,31	72,17 keV/ μ m	0,026

Untuk jenis cuplikan yang karena sesuatu hal tidak mungkin diletakkan di dalam *target chamber*, misalnya benda-benda seni dan arkeologi, maka teknik PIXE harus dilakukan secara *external beam*. Cuplikan ditempatkan di udara luar dan berkas ion dikeluarkan dari tabung hanyut ke udara luar melalui *exit foil*. Dalam hal ini hanya berkas proton yang ideal digunakan karena *energy loss*-nya di udara paling rendah dibanding jenis ion ringan lainnya. Bahan untuk *exit foil* harus dari bahan dengan efek *energy loss*, *stragglings* dan *bremstrahlung* rendah, tidak timbul sinar X serta kebolehjadian terjadi reaksi inti rendah bila dilewati proton. Dari Tabel 2, kapton merupakan bahan yang paling banyak dipakai untuk *exit foil*. Jarak *exit foil* dan detektor sinar X terhadap cuplikan harus sedekat mungkin agar *energy loss* berkas proton seminimal mungkin dan spektrum sinar X di daerah energi rendah masih dapat terdeteksi.

Detektor sinar X yang umum digunakan untuk PIXE adalah detektor jenis semikonduktor Si(Li). Teknik PIXE memerlukan sistem spek-

trometer sinar X untuk mengolah warta dari detektor sinar X menjadi spektrum sinar X. Selanjutnya untuk mengolah data yang terkandung pada spektrum tersebut diperlukan sistem pengolah data yang dilengkapi dengan perangkat lunak analisis data. Saat ini banyak tersedia perangkat lunak untuk PIXE yang pada umumnya untuk menghitung *peak area* dari spektrum sinar X (intensitas) dan konsentrasi unsur yang bersangkutan sehingga memudahkan pemanfaatan PIXE untuk analisis. Beberapa diantaranya adalah AXIL, DATPIXE, GEOPIXE, GUPIX, PIXAN, SESAMX, dan lain-lain^[4].

Ditinjau dari aspek teknis, teknik PIXE mempunyai beberapa keunggulan dibanding teknik-teknik analisis lainnya yaitu^[2] :

- PIXE merupakan analisis tidak merusak (*non destructive analysis*).
- Preparasi cuplikan cukup sederhana dan hanya dalam jumlah (0,1 mg).
- Dapat untuk menentukan unsur-unsur ringan sampai berat (nomor atom $Z > 12$, termasuk Pb,

Si, N, O dan F) secara serentak dalam waktu yang pendek.

- Kepekaan deteksi tinggi (10 sampai 100 kali dari teknik lainnya).
- Latar pencacahan rendah (orde 0,01 sampai 1 ppm).
- Dapat untuk analisis unsur kelumit secara internal dan eksternal.
- Dapat untuk analisis polutan asli dan migrasinya.

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi keakuratan dan kepresisian PIXE sebagai teknik analisis adalah energi partikel datang, *total exposure* cuplikan oleh berkas partikel, geometri cuplikan, efisiensi deteksi, komposisi matrix cuplikan, dan ketidak-pastian statistik pada penentuan luas puncak spectrum^[4].

Teknik PIXE dapat digunakan secara simultan dengan teknik RBS karena instrumentasi

kedua teknik analisis tersebut identik meliputi akselerator, *target chamber*, *target holder*, dan beberapa perangkat elektronik. Hal ini banyak dilakukan di beberapa laboratorium akselerator yang menggunakan teknik analisis berkas ion. Perbedaan teknik RBS dengan PIXE terletak dalam hal jenis radiasi yang dideteksi. Pada RBS dideteksi ion-ion yang terhambur secara elastis oleh inti atom target. Dengan menggunakan kaidah kekekalan momentum dan energi maka dapat ditentukan komposisi unsur bahan target berdasarkan distribusi energi ion terhambur. Energi ion untuk teknik RBS biasanya MeV dengan resolusi energi $\sim 10^{-4}$ yang dihasilkan dari suatu akselerator elektrostatik. Jenis ion yang digunakan umumnya adalah ion $^4\text{He}^+$. Tetapi ion-ion yang lebih berat seperti ion $^{14}\text{N}^+$ juga sering digunakan karena mempunyai limit deteksi yang lebih baik untuk unsur-unsur berat^[5].

Contoh hasil pemanfaatan teknik PIXE untuk analisis cuplikan lingkungan seperti ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Contoh hasil analisis beberapa jenis cuplikan dengan teknik PIXE^[2].

No.	Cuplikan	Unsur-unsur terdeteksi
1.	Darah	Pb, Cr, Se, Zn, Fe dan Cu, Si, P, K, Ca, Ni, Ti, Mn, Cl
2.	Rambut	S, Se, Zn, Br, As dan K.
3.	Air minum	Bi, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, In, Mn, Ni, Pb, Pd, Tl, Zn
4.	Air destilat	Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sn, Pb
5.	Air laut	Ca, Ti, V, Mn, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Hg, Pb, Se, As, Br, Pb, Sr, Zr, U, Mo, Ag, Cd, Sn, I, Ba
6.	Aerosol	Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Pb, As, Br, Pb, Sr

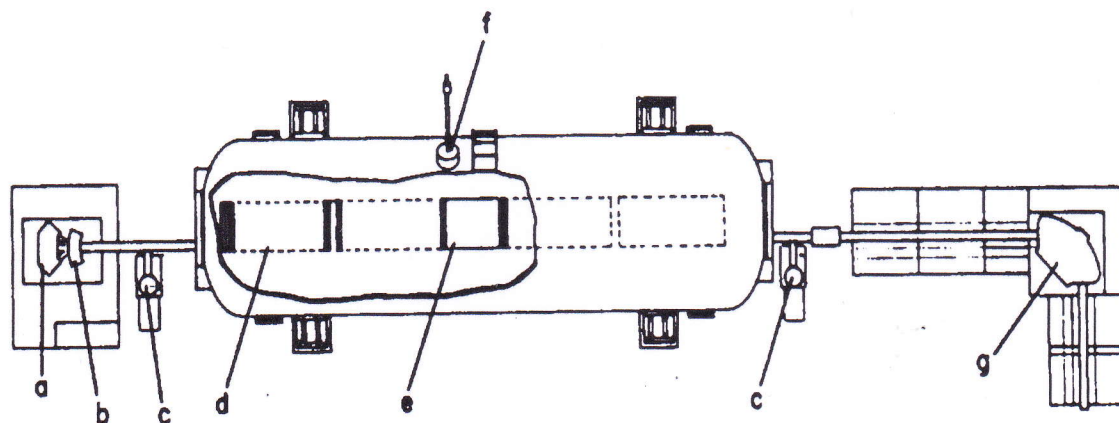
Kebutuhan Akselerator Elektrostatik Tandem^[6,7]

Untuk merealisasikan suatu laboratorium analisis cuplikan lingkungan dengan teknik PIXE mutlak diperlukan perangkat akselerator sebagai pembangkit berkas proton dengan energi 1 hingga 3 MeV. Akselerator yang diperlukan adalah akselerator elektrostatik tandem sesuai dengan kecenderungan di dunia saat ini yang menggunakan akselerator elektrostatik tandem untuk laboratorium analisis berkas ion. Akselerator jenis ini mampu menghasilkan berbagai jenis partikel seperti proton, ion-ion ringan hingga berat dengan energi orde MeV sampai puluhan MeV dan arus ion orde μA sampai ratusan μA ^[6].

Pada Gambar 2 ditampilkan bagan akselerator elektrostatik tandem mulai dari sumber ion

sampai dengan bagian keluaran di mana berkas ion hasil percepatan siap diaplikasikan.

Sumber ion menghasilkan ion-ion yang kemudian melalui suatu sistem injektor ion-ion tersebut diinjeksikan ke dalam terminal tegangan tinggi yang terletak di tengah-tengah tangki melalui suatu kolom energi rendah. Pada terminal tegangan tinggi terdapat sistem *stripper* berbentuk gas atau *foil* yang berfungsi untuk mengubah ion negatif menjadi ion positif. Setelah terminal tegangan tinggi terdapat tabung pemercepat dengan generator tegangan tinggi searah untuk mempercepat ion-ion positif. Akselerator tandem juga dilengkapi dengan pengontrol korona sehingga kemungkinan timbulnya korona yang dapat mengganggu pada terminal tegangan tinggi dapat dicegah^[6].



Gambar 2. Skema akselerator elektrostatik tandem dengan komponen-komponen utamanya:^[6] (a) sumber ion; (b) sistem injeksi ion; (c) sistem vakum; (d) kolom energi rendah; (e) terminal tegangan tinggi; (f) pengontrol korona; (g). magnet analisator.

Sumber ion pada akselerator elektrostatik tandem adalah sumber ion negatif. Salah satu jenis sumber ion negatif untuk cuplikan jenis padat adalah sumber ion negatif jenis **SNICS** (*Source of Negatif Ions by Cesium Sputtering*). Sumber ion negatif jenis SNICS dapat menghasilkan ion-ion negatif dari bahan padatan mulai dari nomor atom rendah sampai tinggi. Proses ionisasinya adalah dengan *sputtering* menggunakan ion-ion cesium yang dihasilkan melalui ionisasi permukaan pada suatu *ionizer* berbentuk kerucut terbuat dari bahan tantalum. Sedangkan untuk cuplikan jenis gas adalah sumber ion negatif jenis **ALPHATROSS**. Pada awalnya jenis sumber ion ini digunakan untuk menghasilkan ion He^- . Tetapi pada perkembangan selanjutnya digunakan juga untuk menghasilkan ion-ion H^- , NH^- dan O^- . Ionisasi pada sumber ion ALPHATROSS terjadi dengan menggunakan medan RF. Gas He dimasukkan ke dalam tabung ionisasi yang terbuat dari gelas quartz di mana terdapat medan RF dengan frekuensi 100 MHz. Dengan adanya medan RF maka gas He akan terionisasi menjadi ion He^+ . Kemudian dengan menggunakan tegangan 2 – 6 kV yang terpasang pada ujung tabung ionisasi ion He^+ tertarik keluar dari tabung ionisasi menuju ke saluran atau kanal pertukaran muatan (*charge exchange canal*). Di dalam kanal tersebut terdapat uap Rb sebagai penukar muatan, sehingga ketika ion He^+ melewatinya terjadi reaksi pertukaran muatan dan menjadi ion He^{-16} .

Pada Gambar 3 ditampilkan bagian sistem pemercepat akselerator tandem. Sistem pemercepat pada akselerator tandem adalah bagian yang terdiri

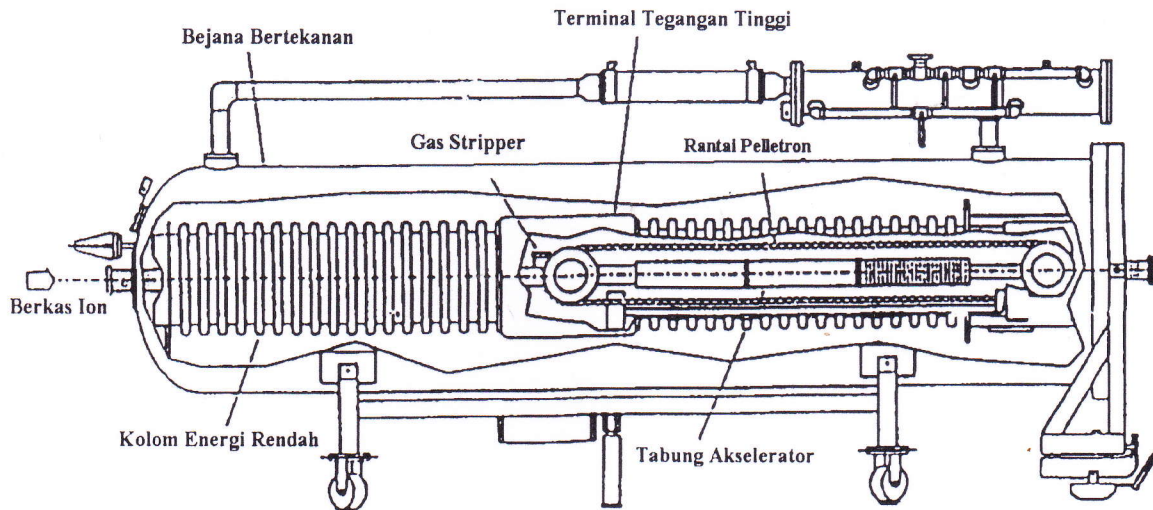
dari kolom energi rendah, sistem *stripper*, kolom energi tinggi, dan terminal tegangan tinggi yang semuanya terletak di dalam suatu tabung bertekanan tinggi ($> 1 \text{ atm}$) berisi gas freon atau gas SF_6 sebagai gas isolator untuk menghindari adanya lucutan pada bagian-bagian sistem pemercepat akibat tegangan tinggi yang terpasang.

Kolom energi rendah berupa tabung pemercepat untuk mempercepat ion-ion negatif yang diinjeksikan dari sumber ion ke dalam sistem pemercepat. Medan listrik statis antara sistem injektor dengan terminal tegangan tinggi menarik ion-ion negatif masuk ke dalam sistem *stripper*. Sistem *stripper* berupa gas atau *foil* berfungsi untuk mengubah ion negatif menjadi ion positif dengan cara melepaskan 2 buah elektron dari ion negatif yang menemukannya. Dalam hal berkas ion negatif hidrogen maka relatif mudah untuk melepaskan kedua elektronnya menjadi berkas proton yang homogen dengan energi ($2V_T e + E_i$) di mana V_T tegangan terminal dan E_i energi ion negatif yang masuk.

Generator tegangan tinggi searah pada sistem pemercepat berfungsi untuk memberikan tegangan tinggi pada terminal tegangan tinggi. Generator tegangan tinggi searah pada sistem pemercepat akselerator elektrostatik tandem adalah jenis *pelletron*. Jenis ini termasuk generator tegangan tinggi searah dengan sistem pembawa muatan berupa rantai *pelletron* (*pelletron chain*), yaitu sebuah rantai yang terdiri dari silinder logam, disambung satu dengan lainnya menggunakan isolator plastik. Celah antara silinder satu dengan lainnya berfungsi juga

sebagai celah lucutan yang melindungi mata rantai isolator dengan baik. Rantai pemuatan pelletron meniadakan adanya debu dan mengurangi *ripple* tegangan terminal. Berbeda dengan jenis Van de Graaff, jenis pelletron sangat efektif mengisolasi

terminal dari *ripple* frekuensi, mudah untuk dilakukan diagnosa dan perawatan serta terlindungi dari lucutan secara sempurna. Keunggulan lain dari tipe pelletron adalah tegangan terminal lebih stabil dan umur rantai pelletron lebih panjang^[6].



Gambar 3. Bagian pemercepat pada akselerator elektrostatik tandem^[6].

Energi proton yang diperlukan untuk teknik PIXE antara 1 sampai 3 MeV. Oleh karena itu diperlukan akselerator elektrostatik tandem dengan tegangan terminal 1,5 MV. Sampai saat ini pabrikan akselerator elektrostatik tandem terkemuka di dunia adalah NEC (*National Electrostatics Corporation*), USA. Salah satu produk NEC adalah akselerator elektrostatik tandem tipe SSDH yang sudah banyak digunakan oleh laboratorium di dunia. Tipe ini mempunyai jangkauan tegangan terminal dari 50 kV sampai 1,7 MV, sehingga jangkauan energi proton yang dapat dihasilkan oleh akselerator ini dari 0,1 sampai 3,4 MeV. Bagian pemercepat akselerator elektrostatik tandem tipe SSDH berada di dalam tangki bertekanan dengan ukuran panjang 2,18 m dan diameter 0,61 m. Sedangkan ukuran panjang seluruhnya dari bagian injektor sampai dengan magnet analisator 5,9 m^[7].

Dari kajian yang telah dilakukan diperoleh persyaratan pengguna (*user requirement*) minimal yang harus dipenuhi untuk merealisasikan rencana pemanfaatan teknologi akselerator di bidang lingkungan untuk analisis cuplikan lingkungan dalam rangka pengendalian pencemaran lingkungan (Tabel 4).

Banyak negara di dunia telah memanfaatkan teknik PIXE sebagai alat analisis. Bahkan beberapa negara berkembang telah mendapat bantuan berupa sistem akselerator energi rendah dan instrumentasi PIXE dari IAEA. Bantuan ini diberikan melalui program *technical co-operation projects*, *co-ordinated research projects*, dan lain-lain. Indonesia juga berpeluang untuk mendapatkan bantuan serupa asalkan kita dapat membuat suatu program yang jelas arah dan manfaatnya yaitu untuk menyelesaikan masalah pembangunan nasional khususnya di bidang lingkungan. Program tersebut tidak hanya penting untuk BATAN, tetapi secara nasional merupakan program yang harus didukung dan dilaksanakan secara terpadu oleh beberapa instansi terkait. Masalah lingkungan merupakan masalah yang kompleks, sehingga penanganannya memerlukan peran serta berbagai pihak yang berwenang, masyarakat dan lembaga-lembaga swadaya masyarakat. Teknologi akselerator merupakan teknologi maju yang perlu disosialisasikan dan ditawarkan sebagai salah satu teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk penanganan masalah lingkungan.

Tabel 4. Kebutuhan pengguna fasilitas akselerator elektrostatik tandem untuk aplikasi di bidang lingkungan.

Jenis akselerator	Elektrostatik tandem
Energi ion	Variabel, 1 – 3 MeV
Arus ion	Variabel, stabil, orde nA hingga μ A
Struktur berkas ion	Homogen, diameter μ m hingga mm
Jenis ion	Proton
Peralatan PIXE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Target chamber</i> ▪ Sistem probe eksternal ▪ Integrator arus ▪ Detektor Si(Li) ▪ Sistem vakum ▪ Perangkat lunak PIXE ▪ <i>Sample collector</i> ▪ Foil difuser ▪ Kolimator berkas ▪ <i>Faraday cup</i>
Utilitas	Catudaya untuk sistem vakum (kontinyu 24 jam) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Catudaya untuk peralatan utama dan pendukung (saat dioperasikan) ▪ Catudaya untuk pintu <i>shielding</i> ▪ Catudaya untuk peralatan preparasi ▪ Catudaya untuk AC (kontinyu 24 jam) ▪ Sarana air bersih untuk preparasi, pendingin, toilet/ kamar mandi
Kebutuhan ruangan	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ruang akselerator dan PIXE ▪ Ruang penyiapan sampel (preparasi) ▪ Ruang kontrol ▪ Ruang staf ▪ Gudang ▪ Kamar mandi/WC

KESIMPULAN

Dari kajian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa aplikasi akselerator untuk lingkungan pada dasarnya adalah pemanfaatan berkas proton/ion yang dihasilkan oleh akselerator untuk teknik analisis dengan berkas proton/ion, yang salah satunya adalah teknik PIXE. Teknik PIXE digunakan untuk analisis cuplikan lingkungan dengan tujuan untuk pemantauan lingkungan hidup dalam upaya meningkatkan pengendalian pencemaran lingkungan hidup. Akselerator yang diperlukan adalah akselerator elektrostatik tandem 1,7 MV (sesuai dengan saran dari IAEA) beserta fasilitas pendukungnya. Untuk pengadaan akselerator ini kita harus membuat suatu program yang fokus,

terpadu dan didukung oleh semua pihak yang terkait dengan masalah lingkungan.

DAFTAR ACUAN

- [1] A. TAFTAZANI, DARSONO, WISYA-CHUDIN F., *Application of Accelerator for Environmental Samples Analysis*, Makalah Rakor Akselerator I, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 22 Juni 1999.
- [2] A. TAFTAZANI, DARSONO, SUDJAT-MOKO, *Studi Kemampuan Akselerator (PIXE) Untuk Pemantauan Kualitas Lingkungan Hidup*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol.5, No.1, Oktober 2003.

- [3] M. IYOS R. SUBKI, *Program Pengembangan Teknologi Akselerator dan Aplikasinya di Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol.1, No.2, Desember 1999.
- [4] -----, *Instrumentation for PIXE and RBS*, IAEA-TECDOC-1190, December 2000.
- [5] DARSONO, *Aplikasi Teknologi Akselerator Untuk Analisis*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol.3, No.1, Februari 2001.
- [6] DJOKO S. P., dkk, *Akselerator Elektrostatik Untuk Aplikasi Bidang Industri, Kedokteran, Bioteknologi, Lingkungan dan Untuk Sistem Injektor Sinkrotron*, Makalah Rakor Akselerator II, P3TM - BATAN Yogyakarta, 29 Juni 2000.
- [7] -----, *Pelletron, Accelerators/Ion Beam System*, National Electrostatics Corporation, Middleton, Wincousin, USA.

TANYA JAWA

Trimardji A.

- *Kajian disini sifatnya hanya diagnostik, bagaimana terapi, apakah akan juga disosialisasikan? Polusi udara sudah sangat membahayakan kesehatan, terutama bagi generasi penerus.*
- *Apakah sudah ada di dunia ini (USA, Eropa) PIXE yang portable?*

Djoko SP.

- *Sebagai lembaga litbang kita akan memberikan rekomendasi hasil analisis kepada institusi yang berwenang mengambil kebijakan masalah lingkungan (misal Bapedal). Kebijakan tentang bagaimana menindaklanjuti hasil analisis bukan wewenang kami.*
- *Belum ada informasi tentang itu (akan ditelusuri pada sistem internet).*

Subarkah

- *Bagaimana teknik PIXE untuk membedakan unsur-unsur isotop? (Berapa resolusi yang dapat dicapai).*

Djoko SP

- *Pada prinsipnya bisa, karena resolusi teknik PIXE yang tinggi.*

Riyatun

- *Apakah semua unsur dapat dianalisis dengan PIXE?*
- *Apakah selalu non destructive test?*

Djoko SP

- *PIXE dapat untuk analisis unsur-unsur ringan hingga berat, yaitu $Z > 12$.*
- *PIXE memang merupakan metode non destructive test (NDT) yang dapat dilakukan baik secara internal maupun external.*