

PERKEMBANGAN SIKLOTRON DAN ASPEK TEKNIS DALAM PROGRAM PEMBANGUNAN LABORATORIUM BERBASIS AKSELERATOR

Sunarhadijoso

Pusat Pengembangan Radioisotop dan Radiofarmaka, BATAN

ABSTRAK

Pada saat ini BATAN sedang melakukan kegiatan Perencanaan Pembangunan Laboratorium Berbasis Akselerator (PPLBA) di P3TM dalam upaya pengembangan dan pendayagunaan teknologi akselerator untuk peningkatan kinerja industri dan kesejahteraan masyarakat. Berkaitan dengan hal tersebut disampaikan tinjauan dan gagasan sebagai satu bentuk kontribusi pandangan dalam kegiatan perencanaan yang dimaksudkan. Dikemukakan perkembangan generasi siklotron yang meliputi generasi siklotron konvensional, generasi sinkrosiklotron serta generasi siklotron AVF. Walaupun siklotron banyak digunakan untuk tujuan produksi radioisotop, namun konsep PPLBA tidak perlu mempertimbangkan hal tersebut karena siklotron untuk produksi radioisotop telah ada di P2RR Serpong. Alternatif kesatuan sistem akselerator yang direncanakan terdiri atas dua buah akselerator linier yang digabungkan dengan siklotron positif generasi sinkrosiklotron. Walaupun demikian, pemanfaatan akselerator linier dapat dilakukan tanpa keberadaan unit sinkrosiklotronnya. Dengan demikian dalam pelaksanaan pembangunan dan instalasinya, fasilitas sinkrosiklotron dapat ditempatkan pada periode tahap akhir, yaitu bila memang diperlukan berkas partikel energi tinggi yang tidak dapat dihasilkan dari akselerator liniernya. Beberapa aspek teknis berkaitan dengan aplikasiberkas ion, sarana fisik dan infrastruktur, kesiapan sumber daya manusia dan spesifikasi uji fungsi disampaikan untuk bahan informasi dalam pengambilan keputusan menuju realisasi PPLBA

ABSTRACT

BATAN is planning to establish an accelerator-based laboratory at P3TM Yogyakarta as an effort in the development and use of accelerator technology for improving industrial performance and public welfare. This paper reviews several aspects of cyclotron technology and describes the combination of a linear accelerator - cyclotron system as an alternative to be considered in the planning of the laboratory. The progress of cyclotron technology is discussed covering three generations, i.e. conventional cyclotron, synchrocyclotron and AVF cyclotron generations. The planning should not consider the accelerator application for radioisotope production because it is established in Serpong with the existing negative ion cyclotron. The proposed facility at P3TM may comprise two linear accelerators coupled with a positive ion cyclotron of synchrocyclotron generation. In fact, the attachment of the synchrocyclotron unit is flexible and it can be installed subsequently if the higher energy particle beam, which can not be produced by the linear accelerators, is extremely needed. Some technical aspects related to ion beam application, building construction and infrastructure, human resources, and specification of function test are discussed for additional information in the implementation of the planning.

PENDAHULUAN

Fasilitas Siklotron di Pusat Pengembangan Radioisotop dan Radiofarmaka (P2RR), BATAN, Serpong, merupakan fasilitas siklotron ion negatif hasil modifikasi dari siklotron ion positif tipe CS-30^(1,2,3). Modifikasi dilakukan dengan pertimbangan bahwa keberadaan fasilitas siklotron di P2RR diutamakan untuk tujuan produksi radioisotop medis, terutama radioisotop pemancar foton. Konsekuensi dari prioritas penggunaan tersebut adalah bahwa fasilitas siklotron harus dapat menghasilkan arus berkas yang tinggi. Variasi jenis partikel bermuatan yang dihasilkan tidak terlalu dipertimbangkan, sebab hampir semua radioisotop medis dari siklotron dapat dihasilkan

melalui reaksi inti $(p, xn)^{(4,5)}$. Berkaitan dengan produksi radioisotop, siklotron ion negatif mempunyai banyak kelebihan, terutama dalam hal potensi keamanan dan kemampuan operasional untuk menghasilkan arus berkas tinggi yang jauh lebih baik bila dibandingkan dengan siklotron ion positif⁽¹⁾.

Walaupun demikian, pemanfaatan siklotron di P2RR tersebut masih sangat terbatas, apabila dibandingkan dengan potensi yang dimilikinya. Tiga hal utama yang dirasakan membatasi pemanfaatan fasilitas siklotron tersebut adalah

- a) Keterbatasan kelengkapan sistem dan sarana pendukung untuk memperluas pemanfaatan system.

- b) Keterbatasan pengetahuan dan bekal pengalaman praktis sumber daya manusia di lingkungan P2RR dalam bidang rancang bangun.
- c) Kurangnya tantangan dan permintaan dari luar P2RR untuk dapat memanfaatkan langsung fasilitas yang ada.

Dengan keterbatasan yang disebutkan di atas, pengalaman dalam pengelolaan fasilitas siklotron yang ada tetap diharapkan dapat memberikan manfaat bagi perencanaan. Program Pembangunan Laboratorium Berbasis Akselerator (PPLBA), sebagai bagian dari Proyek di lingkungan Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju (P3TM), BATAN, Yogyakarta. Dalam Rapat Kerja BATAN pada bulan Agustus 1998, PPLBA telah diputuskan sebagai salah satu program prioritas BATAN⁽⁶⁾. Sebagai program besar dengan prioritas tinggi, maka PPLBA perlu melibatkan berbagai Unit Kerja di lingkungan BATAN. Tulisan ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan dan informasi dalam rangka pengambilan keputusan menuju realisasi PPLBA tersebut di atas.

Titik tolak awal tinjauan

Mengingat fasilitas siklotron di P2RR telah diutamakan untuk tujuan produksi radioisotop, maka tinjauan ini tidak mencakup penggunaan siklotron untuk tujuan produksi radioisotop. Perbedaan mendasar pada spesifikasi siklotron untuk tujuan produksi radioisotop dan untuk tujuan selain produksi radioisotop menyangkut tiga aspek, yaitu jenis, energi dan kuantitas arus berkas yang dapat dihasilkan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Konsep rancangan fasilitas siklotron sebagai bagian dari fasilitas akselerator pada Program Pembangunan Laboratorium Berbasis Akselerator di Kawasan P3TM mengarah pada penggabungan sistem siklotron dengan sistem akselerator linier⁽⁷⁾. Secara sederhana kedudukan sistem siklotron dalam keseluruhan fasilitas akselerator yang dikemukakan di atas dapat digambarkan seperti terlihat pada Gambar 1.

Dengan konsep dasar seperti dijelaskan di atas, maka jenis siklotron yang harus dipilih adalah jenis siklotron ion positif. Jenis siklotron ion positif ini dapat menghasilkan berkas partikel selain proton dan deuteron, namun mempunyai potensi kelemahan yang lebih banyak dibandingkan dengan siklotron ion negatif bila dioperasikan pada arus berkas yang tinggi⁽⁸⁾. Akan tetapi bila penggunaan siklotron tidak diarahkan untuk produksi radioisotop, maka arus berkas yang tinggi tidak diperlukan. Dengan demikian potensi kelemahan yang disebutkan di atas dapat

Perkembangan generasi siklotron

Pada dasarnya siklotron merupakan suatu "magnetic resonance accelerator", yaitu suatu pemercepat partikel yang dioperasikan dengan adanya medan magnet serba sama yang menyebabkan partikel dipercepat dengan gerak arah melingkar⁽⁸⁾. Diameter dipol kutub magnet suatu siklotron sangat bervariasi mulai dari hanya beberapa inci sampai lebih dari 230 inci. Energi partikel yang dihasilkan dapat mencapai ekuivalen dengan beberapa MeV sampai lebih dari 700 MeV proton.

Dewasa ini perkembangan teknologi siklotron telah sampai pada generasi yang ketiga. Generasi pertama adalah generasi siklotron konvensional (CC = Conventional Cyclotron), yang kedua adalah generasi sinkrosiklotron (SC = Synchro Cyclotron) dan yang ketiga adalah generasi Siklotron SF (SFC = Sector - Focused Cyclotron) atau Siklotron AVF (AVFC = Azimuthally Varying magnetic Field Cyclotron).

Siklotron Konvensional

Siklotron generasi pertama ini didasarkan pada konsep yang dikembangkan oleh Lawrence dalam upaya mengatasi keterbatasan pemercepat partikel (bermuatan) menggunakan celah beda potensial tinggi pada sistem akselerator linier. Dalam konsep tersebut medan magnet digul-akali untuk membelokkan arah kecepatan partikel bermuatan atau ion sedemikian sehingga partikel ion tersebut bergerak melingkar akibat medan potensial tinggi yang berosilasi antara dua buah elektroda. Karena bentuk elektroda yang menyerupai huruf D, maka kedua elektroda tersebut dinamakan Dee (Gambar 2).

Setelah partikel menempuh lintasan setengah lingkaran dalam sebuah Dee, osilasi tegangan antara kedua Dee memercepat partikel masuk ke dalam rongga Dee yang lainnya. Peningkatan energi terjadi secara berulang, sehingga partikel mengalami peningkatan energi tertentu ketika sampai pada bagian sisi luar medan magnet.

Dalam gerak melingkar, partikel mempunyai kecepatan sudut yang tetap, tidak tergantung pada radius lintasan gerak, dan dinyatakan dalam persamaan berikut

$$\omega = q B/m \quad (1)$$

dengan ω = kecepatan sudut, q = muatan partikel ion, B = medan magnet dan m = masa partikel.

Osilasi beda potensial antara kedua Dee harus disesuaikan dengan frekuensi revolusi partikel untuk mendapatkan keselarasan antara frekuensi osilasi dan frekuensi revolusi. Keadaan ini disebut sebagai

keadaan resonansi, dan frekuensi revolusi partikel (f) memenuhi persamaan

$$f = (q \cdot B) / (2 \cdot \pi \cdot m) \quad (2)$$

Pada kenyataannya, pertambahan kecepatan menyebabkan kenaikan masa relatif partikel. Karena itu kecepatan sudut pada persamaan ⁽¹⁾ menjadi lebih kecil atau menurun, dan bersamaan dengan itu frekuensi revolusi partikel pada persamaan ⁽²⁾ juga mengalami penurunan. Misalnya, dalam sebuah siklotron dengan diameter dipol magnet 60 inci, partikel yang mencapai kecepatan 30 000 mil per detik akan lebih berat sebesar 1 % dari keadaan diamnya⁽⁸⁾. Kenaikan masa relatif partikel ini mengakibatkan ketidaksesuaian antara frekuensi revolusi dan frekuensi osilasi yang menyebabkan terjadinya efek perlambatan pada gerak partikel.

Hal lain yang membatasi energi partikel dalam siklotron konvensional adalah terjadinya penyebaran partikel pada arah vertikal dalam rongga Dee. Penyebaran ke arah vertikal bidang medan siklotron ini lebih besar pada radius lintasan yang lebih besar, karena kecepatan partikel semakin tinggi. Untuk mempertahankan pemusatan berkas pada bidang median, maka medan magnet bagian luar dibuat lebih kecil dari medan magnet di bagian pusat, dengan cara memblat ketebalan kutub magnet lebih tipis pada arah radial, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Tetapi perbedaan ketebalan kutub magnet ini akan menyebabkan penurunan frekuensi revolusi partikel seperti ditunjukkan pada persamaan⁽²⁾.

Sinkrosiklotron (*Synchrocyclotron*)

Terjadinya perlambatan pada gerak partikel dalam siklotron konvensional seperti dijelaskan di atas mengakibatkan siklotron konvensional hanya dapat menghasilkan energi partikel yang setara dengan energi proton sampai 10 - 20 Mev. Salah satu cara untuk mengatasi kelemahan tersebut adalah dengan menurunkan frekuensi osilasi potensial Dee seiring dengan bertambahnya kecepatan partikel. Penurunan frekuensi ini harus dilakukan dengan tetap mempertahankan kesesuaian antara frekuensi osilasi potensial Dee dengan frekuensi revolusi partikel. Dengan demikian proses akselerasi dapat terus berlangsung sampai ke tingkat energi yang sangat tinggi. Konsep ini merupakan dasar teknologi sinkrosiklotron atau kadang-kadang disebut dengan *frequency-modulated cyclotron*

Pada sistem sinkrosiklotron, kecuali medan magnet dibuat mengecil pada arah radial (seperti pada sistem siklotron konvensional), frekuensi osilasi potensial Dee dibuat berubah sebagai fungsi waktu untuk memperoleh kesesuaian dengan frekuensi revolusi partikel. Karena itu berkas

partikel tidak dapat dilepaskan ke dalam rongga Dee secara terus menerus, melainkan diinjeksikan dalam selang waktu yang singkat untuk kemudian diakselerasi dalam selang waktu yang lama. Dengan demikian arus berkas pada sinkrosiklotron lebih terbatas, tidak dapat menghasilkan arus berkas relatif tinggi seperti pada siklotron konvensional. Akan tetapi energi partikel dapat ditingkatkan sampai mencapai sekitar 700 MeV untuk proton ⁽⁹⁾

Pengaturan frekuensi osilasi sebagai fungsi waktu dapat dilakukan dengan menggunakan kapasitor variabel pada rangkaian resonansi Dee ⁽¹⁰⁾. Kapasitor variabel ini mengendalikan osilasi potensial Dee agar tetap berada pada kondisi resonansi dengan frekuensi revolusi partikel berdasarkan

Siklotron AVF (*Sector-Focused Cyclotron*)

Generasi terbaru sistem siklotron ini menggabungkan kelebihan siklotron konvensional dalam hal kuantitas arus berkas partikel dengan keunggulan sinkrosiklotron dalam hal peningkatan energi berkas partikel tersebut. Dengan teknik AVF, pada kutub magnet dipasangkan keping besi atau baja berbentuk kincir yang menimbulkan sektor-sektor medan magnet dengan daerah medan kuat (*"Hill region"*) dan daerah medan lemah (*"Valley region"*) secara berselang-seling ⁽¹¹⁾ seperti ditunjukkan pada Gambar 4.a. Pemisahan sektor medan magnet kuat dan sektor medan magnet lemah akan menimbulkan vektor komponen medan magnet arah radial (BR) pada perbatasan *Hill* dan *Valley* (Gambar 4.b.). Di sisi lain lintasan gerak partikel tidak lagi melingkar sempurna, dan timbul vector komponen kecepatan linier arah radial (VR) pada perbatasan tersebut (Gambar 4.c.). Dengan adanya komponen medan magnet dan kecepatan linier arah radial tersebut maka timbul gaya terinduksi yang arahnya tegak lurus dan menuju bidang median siklotron, yaitu F yang memenuhi persamaan

$$F_e = q \cdot V_R \cdot B_R \quad (3)$$

Pada saat partikel bergerak dari sektor medan magnet lemah masuk ke dalam sector medan magnet kuat, gaya terinduksi F_e merupakan gaya pemfokusan partikel, sedang pada saat sebaliknya gaya F_e merupakan gaya penyebar partikel seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Karena pada sektor medan kuat komponen B_R lebih kuat dibandingkan pada sektor medan lemah, maka gaya pemfokusan partikel akan lebih besar dari pada gaya penyebar partikel. Dengan demikian secara keseluruhan efek pemfokusan partikel lebih dominan dibandingkan dengan efek penyebarannya, sehingga partikel tertahan tetap bergerak pada bidang median.

Resultante gaya terinduksi Fe yang ditimbulkan oleh pembagian sektor medan magnet tidak dipengaruhi oleh medan magnet rata-rata sepanjang arah radial. Tetapi karena adanya efek kenaikan massa relatif partikel pada kecepatan yang lebih tinggi, maka diperlukan kenaikan medan magnet pada arah radial agar kecepatan sudut dapat dipertahankan tetap seperti ditunjukkan pada persamaan ⁽¹⁾. Dengan demikian penampang ketebalan kutub magnet pada siklotron AVF, seperti ditunjukkan pada Gambar 6, berbeda dengan penampang ketebalan kutub magnet pada siklotron konvensional (Gambar 3). Penampang ketebalan magnet seperti terlihat pada Gambar 6 sebenarnya memberikan efek penyebaran ke luar bidang median, namun efek ini dapat dikompensasi oleh gaya terinduksi pemfokus partikel yang disebutkan di atas.

PERMASALAHAN TEKNIS DALAM REALISASI PEMBANGUNAN FASILITAS

Aplikasi berkas ion dalam sistem gabungan akselerator linier dan siklotron

Apabila dilihat kembali rangkaian sistem gabungan akselerator linier (*Linier Accelerator Linac*) dan siklotron seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, maka ada tiga kemungkinan ekstraksi berkas dengan spesifikasi arus berkas serta aplikasinya seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Aplikasi berkas ion untuk produksi radioisotop tidak diidentifikasi mengingat hal ini diharapkan akan lebih dikembangkan dengan sistem siklotron yang ada di P2RR. Dengan demikian rencana pembangunan Laboratorium Berbasis Akselerator di P3TM tidak perlu mencakup pembangunan sarana fisik Laboratorium Proses Radioisotop. Cakupan aplikasi berkas ion yang dinyatakan pada Tabel 2 tersebut telah dapat menampung permasalahan dalam empat bidang pengembangan yang telah digariskan oleh Kepala BATAN ⁽¹²⁾ yaitu

- Masalah pengembangan bidang industri, terutama teknologi rekayasa bahan metal maju, bahan elektronika dan mikroelektronika, bahan komponen optik, bahan super konduktor.
- Masalah pengembangan bioteknologi, terutama mutasi genetika akibat penerimaan dosis ion untuk mendapatkan jenis mutan unggul.
- Masalah pengembangan ilmu pengetahuan lingkungan, terutama analisis bahan lingkungan secara cepat dan akurat.
- Masalah pengembangan bidang kedokteran, terutama untuk terapi medis dan penelitian biomedis menggunakan proton energi tinggi

Sebagai bagian dari kesatuan gabungan akselerator linier-siklotron dalam Rencana Laboratorium Berbasis Akselerator di atas, fasilitas siklotron dapat dibangun pada tahapan akhir rencana tersebut. Pemanfaatan unit akselerator linier dapat digunakan sepenuhnya tanpa keberadaan sistem siklotron. Sistem siklotron diperlukan manakala memang diperlukan berkas partikel dengan energi tinggi, yang tidak dapat dihasilkan oleh sistem akselerator liniernya. Mengingat untuk keperluan diluar produksi radioisotop tidak diperlukan kuantitas arus berkas yang tinggi, maka sistem sinkrosiklotron merupakan pilihan yang lebih baik dibandingkan dengan siklotron konvensional. Pemilihan sistem siklotron AVF akan memberikan kesulitan tersendiri dalam masalah pengelolaan fungsi operasi dan pemeliharaan. Dikaitkan dengan pemikiran penggunaan untuk terapi dengan berkas ion, maka sistem sinkrosiklotron juga lebih baik daripada sistem siklotron AVF, karena dengan sinkrosiklotron dapat dilakukan pembebasan berkas ion secara diskontinu.

Rencana Pembangunan Sarana Fisik dan Infrastruktur

Rencana pembangunan sarana fisik dan infrastruktur berupa bangunan gedung dan sarana penunjangnya akan membutuhkan dana yang mungkin sekali tidak lebih kecil dari dana untuk pengadaan perangkat keras sistem akseleratornya. Lingkup kegiatan ini lebih banyak melibatkan perusahaan swasta domestik, baik pada tahapan perencanaan, pelaksanaan maupun pengawasannya. Berdasarkan pengalaman ⁽¹³⁾ perusahaan swasta domestik justru lebih berpotensi melakukan keterlambatan jadwal dan penyimpangan spesifikasi dibandingkan dengan institusi luar negeri yang akan berperan banyak dalam pemasokan perangkat keras sistem akseleratornya.

Ketidaksesuaian realisasi jadwal sarana fisik dan infrastruktur dengan jadwal perangkat keras akan mengakibatkan kelambatan instalasi fasilitas, dan jika keterlambatan tersebut semakin berlarut maka fasilitas perangkat keras akan kehilangan jaminan dan layanan purna jual. Kecuali itu keterlambatan jadwal domestik dan penyimpangan spesifikasi infrastruktur bahkan dapat mengakibatkan menurunnya kualitas uji fungsi yang harus dilaksanakan. Beberapa spesifikasi sarana fisik dan infrastruktur yang perlu diperhatikan antara lain suhu dan tekanan ruangan, kerapatan dan kualitas bahan dinding tembok bangunan, kelembaban dan siklus aliran udara, penyediaan sistem udara bertekanan dengan kapasitas yang cukup, laju alir dan suhu sistem air pendingin, penyediaan sumber daya (*Media Energy Supply*) dan sumber tegangan (*Uninterrupted Power Supply*) yang memadai.

Untuk lebih mempertahankan spesifikasi sarana fisik dan infrastruktur, sebaiknya dihindari perangkapan fungsi pelaksanaan dan fungsi pengawasan dalam kegiatan pembangunan sarana fisik dan infrastruktur tersebut. Keterlibatan personel BATAN yang tepat pada fungsi pengawasan dapat diharapkan lebih menjamin terpenuhinya spesifikasi yang telah ditentukan.

Kesiapan Sumber Daya Manusia

Di beberapa fasilitas akselerator, misalnya di Universitas Tohoku (Jepang) dan King Faisal Special Hospital and Research Centre (Saudi Arabia), pengelolaan fasilitas akselerator tidak dilakukan oleh personel institusi pemilik fasilitas tersebut, melainkan oleh tenaga ahli yang berasal dari pabrik pembuat akselerator yang sengaja disewa untuk menangani hal tersebut. Hal ini akan lebih menjamin kesinambungan fungsi operasi fasilitas, namun harus didukung dengan sumber dana cukup untuk dapat menyewa tenaga ahli yang diperlukan. Tentu saja ini akan sulit dilaksanakan di Indonesia. Bukan masalah dana saja, tetapi juga karena tidak ada institusi domestik yang memang berkecimpung dalam masalah teknologi akselerator. Dengan demikian BATAN harus menyiapkan sepenuhnya sumber daya manusia untuk mengelola fasilitas pasca uji fungsi nantinya.

Barangkali memang sudah cukup banyak tenaga ahli di BATAN yang secara filosofis memahami dengan baik segala sesuatu yang berkaitan dengan akselerator. Namun lebih dari itu suatu ketrampilan, pengalaman dan pengetahuan praktis dalam pengoperasian dan pemeliharaan perangkat keras akselerator akan lebih dibutuhkan. Karena itu sejak dini harus diusahakan adanya kesempatan untuk dapat mengikuti pelatihan praktis dalam pengoperasian, pemeliharaan, teknik diagnosis kegagalan fungsi operasi dan perbaikan sistem akselerator. Pengalaman dengan sistem siklotron yang ada di P2RR Serpong memang dapat dimanfaatkan, akan tetapi lebih baik bila pelatihan tersebut dilaksanakan pada institusi dengan tipe atau jenis fasilitas yang sama dengan yang akan dimiliki. Di samping itu, terbatasnya pendanaan yang dapat disiapkan harus diikuti dengan kemampuan pabrikasi komponen kritis dan rancang bangun pengembangan. Kedua hal tersebut juga hanya dapat diperoleh melalui pelatihan dan pengalaman praktis dalam institusi atau fasilitas akselerator, dan tidak cukup

Spesifikasi Uji Fungsi

Pelaksanaan uji fungsi merupakan hal yang sangat penting dikaitkan dengan kesinambungan fungsi operasi suatu fasilitas. Namun pada umumnya

dari segi kontribusi biaya mempunyai persentase yang relatif kecil. Karena itu kecermatan dan ketepatan dalam mendefinisikan spesifikasi uji fungsi merupakan hal yang harus diperhatikan. Dalam banyak hal kegagalan uji fungsi akan dianggap sebagai kasus minor, sekalipun hal itu akan berdampak pada tertundanya fungsi operasi suatu fasilitas.

Lingkup uji fungsi hendaknya mencakup uji fungsi parsial (*partial function test*) dan uji fungsi tahap akhir (*final acceptance test*). Dimaksudkan dengan uji fungsi parsial adalah pengujian fungsi operasi masing-masing unit yang fungsi operasinya menjadi persyaratan untuk dapat beroperasinya keseluruhan sistem, sedangkan uji fungsi tahap akhir adalah pengujian fungsi operasi keseluruhan sistem sebagai satu kesatuan. Di samping itu, perlu diperhatikan bahwa kinerja uji fungsi fasilitas perangkat keras akselerator akan sangat dipengaruhi oleh kinerja fungsi operasi sarana penunjang dalam sistem infrastruktur. Karena itu kinerja uji fungsi sistem infrastruktur harus diyakini memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan.

Dalam masing-masing tahapan uji fungsi hendaknya ditetapkan spesifikasi yang jelas dan tegas sehingga tidak memberikan peluang persepsi ganda. Spesifikasi uji fungsi hendaknya didasarkan pada kondisi yang diproyeksikan sebagai kondisi operasi normal, dan tidak terbatas pada pembuktian bahwa sistem telah dapat dioperasikan. Masalah lama waktu pengujian, kesinambungan fungsi operasi dan frekuensi *trip* (gangguan fungsi operasi) termasuk hal-hal yang perlu ditegaskan dalam spesifikasi uji fungsi tahap akhir. Kemungkinan terjadinya kegagalan uji fungsi yang harus diikuti dengan penggantian komponen atau perubahan instalasi juga perlu dipertimbangkan dalam mendefinisikan spesifikasi uji fungsi.

KESIMPULAN

Sistem siklotron sebagai bagian dari Rencana Pembangunan Laboratorium Berbasis Akselerator di P3TM sebaiknya jenis siklotron positif dari generasi sinkrosiklotron. Rancangan pemanfaatan sistem siklotron ini tidak perlu mempertimbangkan penggunaan untuk produksi radioisotop. Dikaitkan dengan periode perencanaan pembangunan dan instalasi fasilitas, maka fasilitas siklotron dapat ditempatkan pada periode tahap akhir, yaitu apabila ternyata diperlukan berkas partikel dengan energi tinggi, yang tidak dapat dihasilkan dari sistem akselerator liniernya. Beberapa hal berkaitan dengan perencanaan sarana fisik dan infrastruktur, kesiapan sumber daya manusia dan pendefinisian spesifikasi uji fungsi perlu mendapatkan perhatian khusus

seiring dengan tahapan perencanaan fasilitas dan perangkat keras sistem akseleratornya.

DAFTAR PUSTAKA.

1. SOENARJO, SILAKHUDDIN, H. SURYANTO, "Siklotron Pertama Di Asia Tenggara", Majalah Industri, Teknologi & Bisnis, No. 47 (1990) 11-13.
2. S SOENARJO, "Evaluasi Status Fasilitas Siklotron BATAN: Tinjauan Dan Gagasan Pengembangan", Hasil Penelitian PPR, No. 2 (1994) 77-93.
3. SOENARJO, S. ABRAHAM, H. SURYANTO, et al, "Modifikasi Siklotron CS-30 BATAN Menjadi Siklotron Ion Negatif, Seminar Teknologi Akselerator Dan Aplikasinya, BATAN, PPNY, Yogyakarta (1998).
4. SCHWEICKERT, V. BECHTOLD, Komullikasi Pribadi, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Germany (1990).
5. S SOENARJO, "Siklotron Positif Dan Siklotron Negatif, Apa Bedanya ?" Buletin BATAN, XVII (3) (1996) 20-34
6. AMINJOYO, SUDJATMOKO, D.S. PUDJORAHRADJO, "Rencana Pembangunan Laboratorium Berbasis Akselerator di PPNY-BATAN Yogyakarta", Seminar Nasional Teknologi Akselerator Dan Aplikasinya , BATAN, PPNY, Yogyakarta (1998).
7. SUDJATMOKO, "Kajian Teknis Pembangunan Laboratorium Akselerator Di Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta", Seminar Teknologi Akselerator dan Aplikasinya , BATAN, PPNY, Yogyakarta (1998).
8. ANONYMOUS, "What Is A Cyclotron ?", Website : 88.lbl.gov/88-docs/cyclotrondef.html, page 1-3.
9. LIVINGSTONE, J.P.BLEWETT," Particle Accelerator" Mc.Graw-Hill Book Company, New York (1962) 133-192.
10. LIVINGSTONE, J.P. BLEWETT, " Particle Accelerator", McGraw-Hill Book Company, New York (1962) 351-395.
11. ANONYMOUS, "Operating And Service Manual CP-42 Cyclotron Operations Manual", The Cyclotron Corporation, Berkeley (1982).
12. SUBKI, "Program Pengembangan Teknologi Akselerator dan Aplikasinya Di Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta" , seminar Nasinal Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, PPNY, BATAN, Yogyakarta (1998).
13. SOENARJO, "Pengalaman Penanganan Fasilitas Siklotron BATAN", Seminar KoorKoordinasi Teknis Pembangunan Mesin Berkas Elektron, PAIR, BATAN, Jakarta, Maret (1992).

TANYA JAWAB

Suyanto

- * Dalam pembangunan fisik dan infrastruktur apakah akselerator mirip dengan reaktor.
- * Infrastruktur apa saja yang disyaratkan dalam pembangunan akselerator, khususnya tentang tapak.

Sunarhadijoso

- * Perbedaan pokok adalah bahwa derajat spesifikasi keselamatan nuklir untuk fasilitas akselerator lebih rendah dari fasilitas reaktor. Tetapi pada bangunan fasilitas akselerator material bangunan harus mengandung natrium dalam kadar yang jauh lebih rendah dari bahan material untuk fasilitas reaktor. Hal ini dimaksudkan untuk mencegah terjadinya penyebaran medan radiasi γ akibatreaksi inti $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$.

- * Fasilitas infrastruktur (dan sarana penunjang) yang diperlukan antara lain fasilitas cave untuk penempatan perangkat keras akselerator, fasilitas/ laboratorium pasca irradiasi, fasilitas media energy supply dan catu daya, fasilitas kontrol dan kendali suhu dan tekanan ruang, kelembaban dan siklus aliran udara, fasilitas udara bertekanan, fasilitas air pendingin (air domestik maupun air bebas ion).

Busro Masduki

- * Penyaji menyampaikan penjelasan 3 jenis akselerator, kemudian memberikan persyaratan dari segi prasarana fisik, uji fungsi dan lain-lainnya. Mohon penjelasan pilihan akselerator, apakah persyaratan sama, mengingat ketiga akselerator tersebut mempunyai beda fungsi/ komponen dan lain sebagainya.

Sunarhadijoso

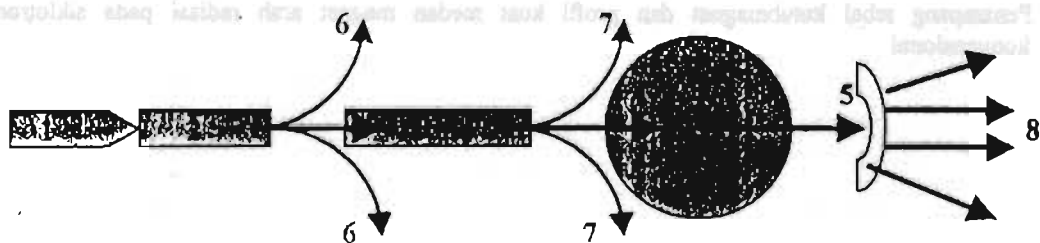
- Pilihan akselerator yang diusulkan adalah gabungan 2 buah akselerator linear dan satu akselerator siklis darigenerasi sinkrosiklotron (tidak diperlukan arus berkas tinggi karena fasilitas ini tidak digunakan untuk tujuan produksi isotop). Persyaratan yang diperlukan, bila maksudnya adalah persyaratan untuk fasilitas infrastruktur, maka untuk ketiga jenis akseleratorsiklis yang dikemukakan memerlukan fasilitas infrastruktur yang secara umum sama.

Tabel 1. Perbedaan spesifikasi siklotron untuk produksi radioisotop dan untuk tujuan selain produksi radioisotop.

PARAMETER	SIKLOTRON UNTUK PRODUKSI RADIOISOTOP	SIKLOTRON UNTUK TUJUAN LAIN
Jenis berkas partikel	Proton saja cukup (hampir semua radioisotop siklotron dapat dihasilkan melalui reaksi inti p, xn)	Proton, deuteron, helium-3, helium-4, ion-ion berat
Energi berkas partikel	10-20 MeV → radioisotop pemancar positron 20-40 MeV → radioisotop pemancar foton	Dari < 5 MeV sampai > 100 MeV, tergantung keperluan penggunaan
Arus berkas partikel	Perlu tinggi untuk mendapatkan keradioaktifan produk yang tinggi	Tidak menuntut penyediaan arus berkas yang tinggi

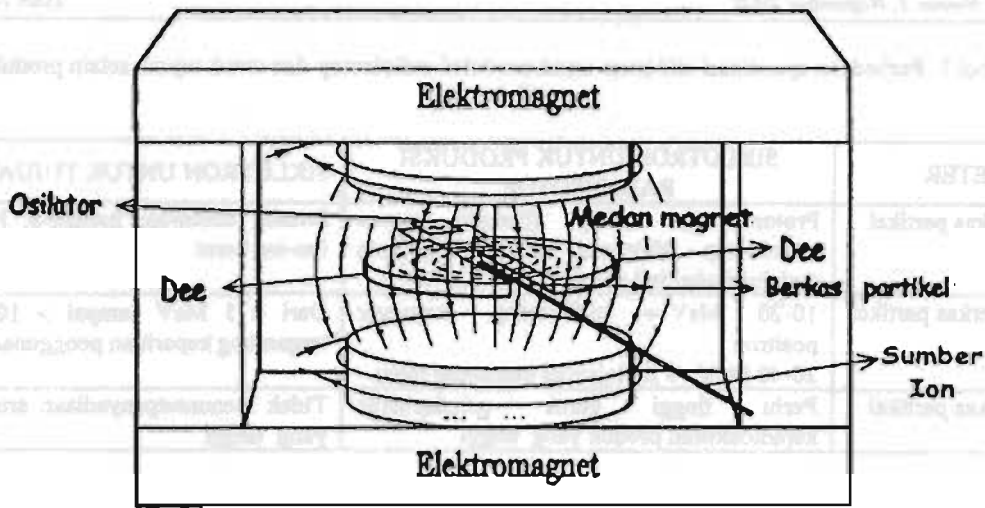
Tabel 2. Spesifikasi dan aplikasi berkas ion dari sistem gabungan Linac- siklotron

PROSES EKSTRAKSI	SPESIFIKASI BERKAS			APLIKASI
	MUATAN	ENERGI	ARUS	
Dari Linac pertama	Positif	Rendah	dari rendah sampai tinggi	Analisis material, analisis lingkungan, rekayasa bahan (pembentukan bahan dan piranti elektronika dan optik, peningkatan kualitas bahan)
Dari Linac kedua	Positif	Menengah	Dari rendah sampai tinggi	Studi korosi dan keausan, bioteknologi (khususnya tanaman)
Dari siklotron	Positif	Tinggi	Dari rendah sampai tinggi	Neutron terapi, proton terapi, teknologi pembedahan sel (<i>cell surgery technology</i>), mikrodosimeter, mutasi genetik (pada biji-bijian)

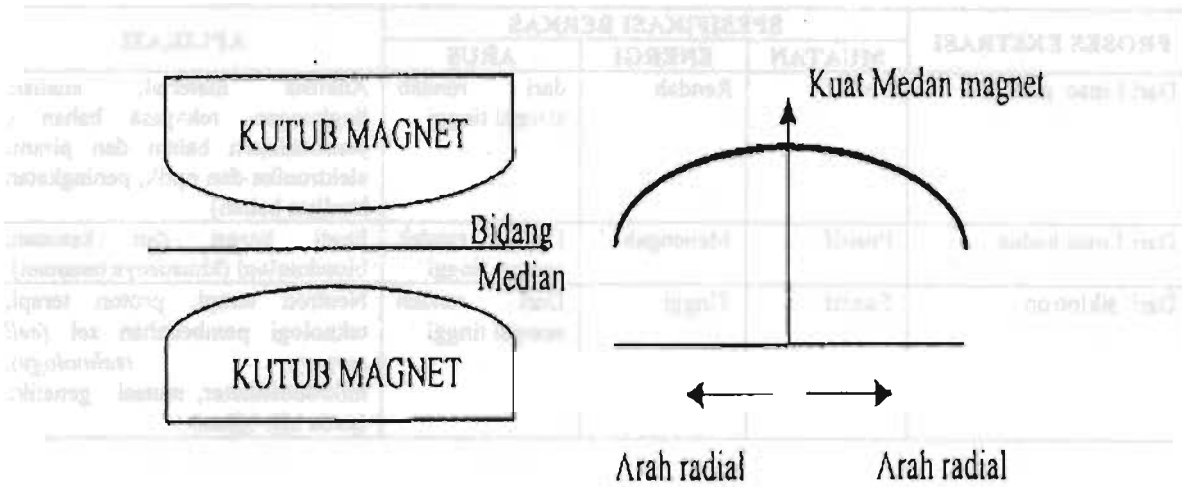


- | | | | |
|---|--------------------------------------|---|--|
| 1 | Sumber ion | 5 | Magnet pengarah berkas |
| 2 | Akselerator linier (Energi rendah) | 6 | Berkas terekstrasi (energi rendah) |
| 3 | Akselerator linier (Energi menengah) | 7 | Berkas terekstrasi (Energi menengah) |
| 4 | Siklotron | 8 | Berkas terekstrasi (energi tinggi, setelah melewati magnet pengarah) |

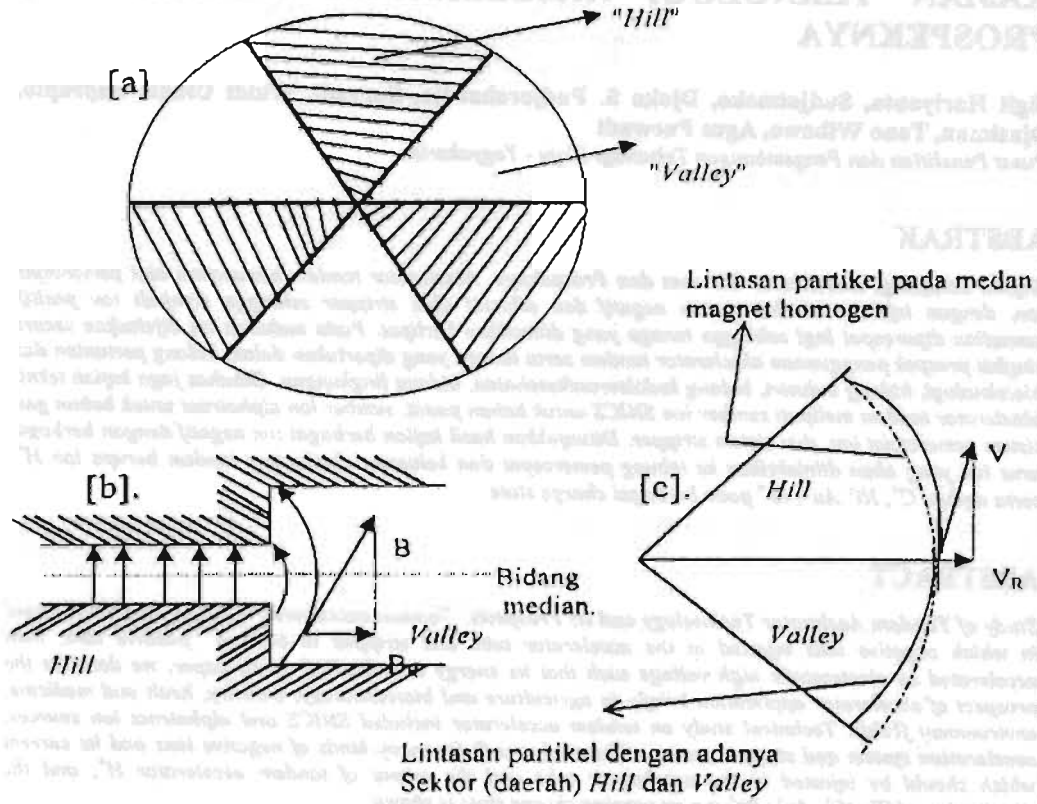
Gambar 1. Konsep kedudukan sistem siklotron dalam Fasilitas Akselerator



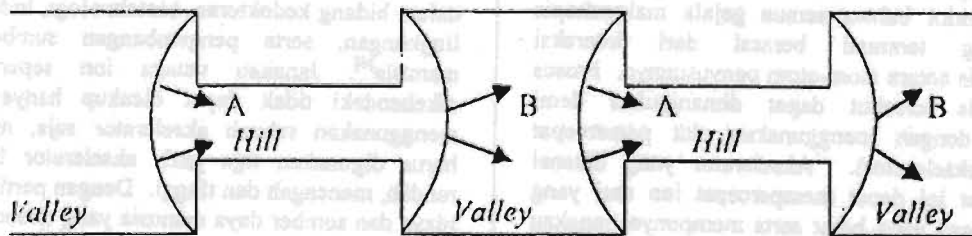
Gambar 2. Bagan sebuah siklotron konvensional



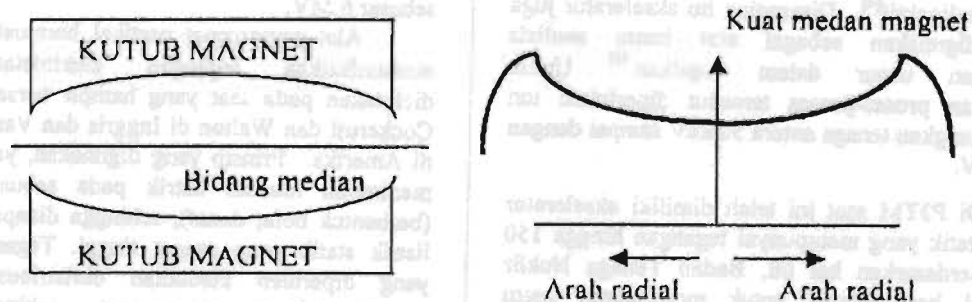
Gambar 3. Penampang tebal kutubmagnet dan profil kuat medan magnet arah radiasi pada siklotron konvensional



Gambar 4. Pembagian sektor medan kuat (Hill) dan medan lemah (Valley) [a] serta pembentukan komponen medan magnet arah radial [b] dan komponen kecepatan linier arah radial [c]



Gambar 5. Gaya terinduksi pemfokus [A] dan gaya terinduksi penyebar [B] partikel.



Gambar 6. Penampang tebal kutub magnet dan profil kuat medan magnet arah radial pada siklotron AVF.