

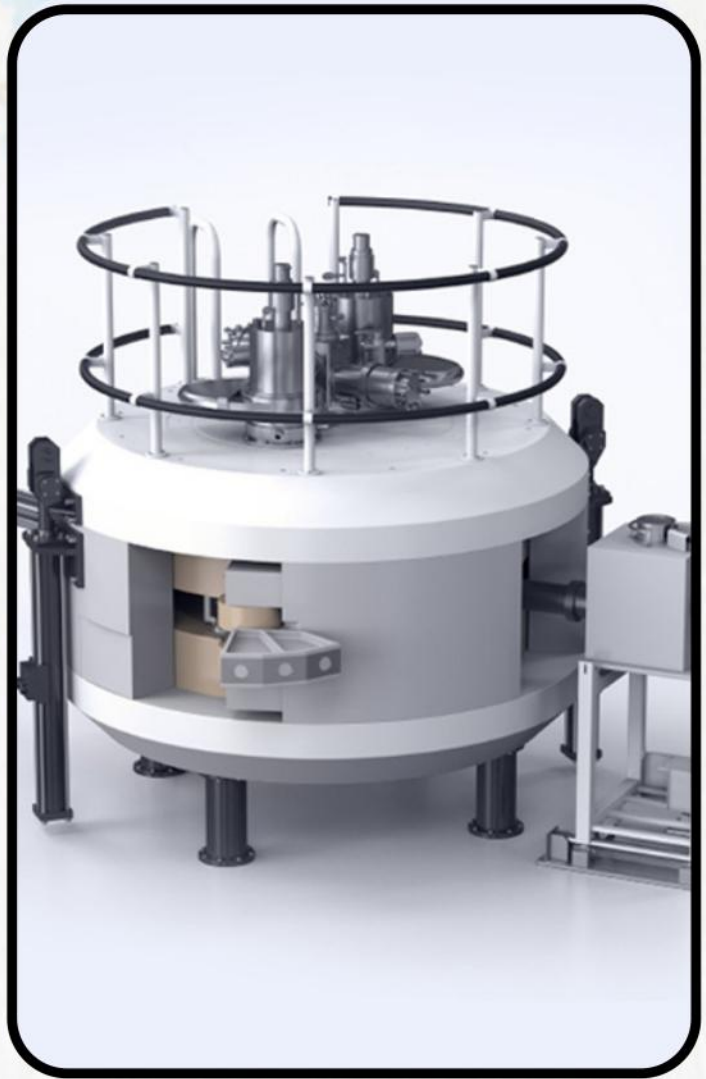


BRIN

BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

MODUL

PENGOPERASIAN SIKLOTRON



Fungsi Layanan
Pengembangan Kompetensi
SDM Nasional

DIREKTORAT PENGEMBANGAN KOMPETENSI

**BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL**

2024



MODUL 1

PENGOPERASIAN SIKLOTRON



**Pelatihan Operator dan Petugas Perawatan Radioisotop
dan Radiofarmaka dari Siklotron**

**DIREKTORAT PENGEMBANGAN KOMPETENSI
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
TAHUN 2024**

Penanggung Jawab:

1. Edy Giri Racman Putra, Ph.D.
2. Dr. Sasa Sofyan Munawar, S.Hut., M.P.
3. Alpha Fadila Juliana Rahman, S.Pd., M.Pd.

Tim Penyusun Modul:

1. Dr. Imam Kambali (Pusat Riset Teknologi Akselerator),
2. Heranudin, M.Eng., Ph.D. (Pusat Riset Teknologi Akselerator),
3. Parwanto, S.ST. (Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran)
4. Bisma Barron Patrianesha S.T. (Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran)
5. Rajiman, S.T. (Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran)
6. Dra. Rinawati Anwar (Direktorat Pengembangan Kompetensi)

Diterbitkan oleh:

Direktorat Pengembangan Kompetensi - BRIN
Jalan M.H. Thamrin No. 8,
Jakarta Pusat

Diterbitkan pertama kali tahun 2024

KATA PENGANTAR

Pengembangan kompetensi merupakan kebutuhan bagi setiap Sumber Daya Manusia (SDM) dalam menjalankan tugas dan fungsinya sesuai dengan penugasan yang diberikan. Pengembangan kompetensi bagi SDM harus mampu memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan kualitas hasil kerja secara berkesinambungan, lebih lanjutnya bagi kepentingan bangsa dan Negara Kesatuan Republik Indonesia. Pengembangan kompetensi menjadi bagian tidak terpisahkan dari pengembangan karier setiap SDM yang salah satunya dapat dilaksanakan melalui pelatihan-pelatihan teknis sesuai bidang tertentu.

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 78 Tahun 2021, Badan Riset dan Inovasi Nasional adalah lembaga pemerintah yang berada di bawah dan bertanggung jawab kepada Presiden dalam menyelenggarakan penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan, serta invensi dan inovasi, penyelenggaraan ketenaganukliran, dan penyelenggaraan keantariksaan yang terintegrasi. Dalam pengembangan kompetensi, Direktorat Pengembangan Kompetensi, Deputi Bidang Sumber Daya Manusia Iptek BRIN bertanggung jawab dalam penyelenggaraan pengembangan kompetensi melalui beberapa tahapan penyiapan pedoman pelatihan, fasilitator, modul, bahan ajar, *learning management system* (LMS) dan kelengkapan pelatihan lainnya.

Sejak Tahun 2024, Direktorat Pengembangan Kompetensi, Deputi Bidang Sumber Daya Manusia Iptek BRIN telah memberikan lisensi pedoman dan penyelenggaraan pelatihan kepada Lembaga Pelatihan Swasta (LPS) sesuai dengan ketentuan yang tertuang dalam perjanjian lisensi.

Direktorat Pengembangan Kompetensi atau Lembaga Pelatihan Swasta menggunakan modul sebagai salah satu dokumen penunjang dalam penyelenggaraan pelatihan. Modul ini berfungsi sebagai media transformasi pengetahuan, keterampilan, dan sikap kerja kepada peserta pelatihan untuk mencapai kompetensi tertentu.

Kami mengucapkan syukur ke hadirat Allah SWT, atas berkat rahmat-Nya, modul Pelatihan Teknis Operator dan Petugas Perawatan Fasilitas RIRF Dari Siklotron

yang berjudul Pengoperasian Siklotron dapat diselesaikan tepat waktu. Kami sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan modul ini.

Kami berharap modul ini dapat memberikan manfaat dan berkontribusi dalam meningkatkan dan mengembangkan kompetensi SDM secara luas. Kami terbuka atas segala saran dan masukan untuk peningkatan kualitas modul kedepan

Jakarta, 20 Desember 2024

Deputi Sumber Daya Manusia Ilmu
Pengetahuan dan Teknologi
Badan Riset dan Inovasi Nasional

(Tanda tangan)

Edy Giri Rachman Putra, Ph.D.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
PENDAHULUAN.....	1
A. Deskripsi Singkat	1
B. Alokasi Waktu	1
C. Tujuan Pembelajaran	2
1. Hasil Belajar	2
2. Indikator Hasil Belajar.....	2
D. Pokok Bahasan dan Sub Pokok Bahasan	2
1. Teori Dasar dan Komponen Siklotron	2
2. Pengoperasian Siklotron	2
3. Pemanfaatan Siklotron	2
4. Keselamatan dalam Pengoperasian Siklotron	2
5. Praktikum Pengoperasian Siklotron.....	2
MATERI POKOK 1: TEORI DASAR DAN KOMPONEN SIKLOTRON	3
A. Teori Dasar Siklotron.....	3
B. Komponen Siklotron	5
1. Komponen Utama Siklotron.....	5
2. Komponen Penunjang Siklotron	16
C. Prinsip Kerja Siklotron	23
D. Rangkuman.....	25
E. Evaluasi	26
MATERI POKOK 2: PENGOPERASIAN SIKLOTRON	29
A. Status/ Keadaan Sistem Siklotron (<i>Cyclotron System States</i>)	29
1. Tipe Status dan Sistem Transisi Siklotron.....	29
2. Kemungkinan Terjadinya <i>Interlock Fault</i> pada Sistem.....	36
B. Pra-operasi Siklotron.....	38
C. Operasi Siklotron (Start-up).....	42
D. Pasca-operasi Siklotron	48
E. Rangkuman.....	49
F. Evaluasi	50
MATERI POKOK 3: PEMANFAATAN SIKLOTRON.....	52

A. Pemanfaatan di Bidang Medis.....	52
B. Pemanfaatan di Bidang Industri.....	56
C. Rangkuman.....	59
D. Evaluasi	60
MATERI POKOK 4: KESELAMATAN DALAM PENGOPERASIAN SIKLOTRON	61
A. Prosedur dan Peralatan	63
1. Bahaya dan Risiko Pada Pengoperasian Sistem Siklotron	63
2. Sistem Keamanan dan Keselamatan Fasilitas Siklotron	64
3. Prosedur Access Daerah Radiasi (<i>Cave</i>)	77
4. Sistem Interlock Siklotron Secara Umum.....	81
B. Tugas dan Tanggung Jawab	92
1. Operator Produksi Radioisotop berbasis siklotron:	92
2. Supervisor Produksi Radioisotop berbasis siklotron:	92
3. Petugas Perawatan Fasilitas Produksi Radioisotop berbasis Siklotron:	93
4. Supervisor Perawatan Fasilitas Produksi Radioisotop berbasis Siklotron:	93
C. Rangkuman.....	94
D. Evaluasi	95
MATERI POKOK 5: PRAKTIKUM PENGOPERASIAN SIKLOTRON	97
A. Pendahuluan	97
1. Latar belakang.....	97
2. Rincian kegiatan praktikum.....	97
3. Tujuan pembelajaran	97
B. Teori.....	98
C. Peralatan dan Bahan.....	99
D. Langkah Kerja	99
E. Data Praktikum.....	104
1. Data <i>pre-start</i> Siklotron.....	104
2. Data Pengoperasian Siklotron (<i>Run Sheet</i>)	105
F. Tugas	109
DAFTAR PUSTAKA	110

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Ilustrasi sistem pemercepatan partikel bermuatan di dalam siklotron...	4
Gambar 2. Bukit dan lembah (<i>Hill and Valey</i>) yang dapat membangkitkan sektor medan magnet kuat dan lemah sepanjang arah azimuth untuk memberikan efek pemfokusan	7
Gambar 3. Magnet utama siklotron. (a) Konstruksi seluruh magnet utama. (b) Bukit dan lembah (<i>Hill and Valey</i>) pada magnet utama	8
Gambar 4. Ilustrasi bagian kepala sumber ion tipe PIG	10
Gambar 5. Produksi ion dari sumber ion siklotron	12
Gambar 6. Ilustrasi daerah pusat (<i>central region</i>) dari siklotron CS-30	13
Gambar 7. Ilustrasi bentuk Dee siklotron CS-30	14
Gambar 8. Rangkaian sistem oscilator RF pada siklotron CS-30.....	15
Gambar 9. Arah lintasan berkas sebelum dan setelah melewati sistem ekstraksi berkas	18
Gambar 10. Sistem ekstraksi siklotron ion negative	19
Gambar 11. Foil karbon tipis yang diletakkan pada radius ekstraksi siklotron.....	19
Gambar 12. Skema dasar sistem vakum siklotron CS-30	21
Gambar 13. Sistem transport berkas (<i>beamline</i>) pada siklotron CS-30	23
Gambar 14. Diagram Keadaan Sistem Siklotron Cyclone 18/9	32
Gambar 15. Transisi antar keadaan pada siklotron CS-30.....	33
Gambar 16. <i>Main Magnet Power Supply</i>	40
Gambar 17. Anode Power Supply, 1 sampai 10 KV dc pada 6 A.....	41
Gambar 18. Panel <i>Control Power Distribution</i>	42
Gambar 19. Panel <i>General On–Off</i>	42
Gambar 20. Tahap Pengoperasian Siklotron	43
Gambar 21. Panel <i>Cooling Water Interlock</i>	44
Gambar 22. Panel <i>Vacuum Gauge</i>	45
Gambar 23. Panel kontrol arus magnet.....	45
Gambar 24. Panel kontrol radiofrekuensi	45
Gambar 25. Panel meter <i>Beam Current</i>	45
Gambar 26. Urutan Start-Up Siklotron CS-30 secara keseluruhan dari	46

Gambar 27. Jalur pengontrolan pada siklotron CS-30 gedung 11.....	47
Gambar 28. Jalur pengontrolan transport berkas pada siklotron CS-30 gedung 11	47
Gambar 29. Fasilitas Siklotron CS-30 Lantai 1.....	67
Gambar 30. Panel Keselamatan di Ruang Kendali	69
Gambar 31. Penempatan Detektor Luapan Berkas.....	70
Gambar 32. Monitor Luapan Berkas	71
Gambar 33. Monitor Radiasi.....	72
Gambar 34. Kendali Operasi Pintu Cave.....	73
Gambar 35. Tombol Darurat, Flashing light, Speaker, Detektor Gamma	74
Gambar 36. Hand, Foot and Monitor yang digunakan untuk melakukan pemeriksaan terhadap kaki, dan tangan dari kontaminan alfa, beta dan gamma	76
Gambar 37. <i>Watchman Station Cave</i> Siklotron	80
Gambar 38. <i>Watchman Station Cave</i>	81
Gambar 39. Diagram Sistem Interlock Siklotron Secara Umum.....	81
Gambar 40. Sistem interlock Sumber Ion.....	83
Gambar 41. Diagram Kotak Catu Daya Sistem APS	84
Gambar 42. Sistem <i>Interlock APS</i>	86
Gambar 43. Sistem <i>Interlock Magnet Utama</i>	88
Gambar 44. Skema tata urutan pengoperasian sistem vakum.....	90
Gambar 45. Sistem interlock pada vakum.....	90
Gambar 46. Skema Sistem Pempvakuman Pompa	98
Gambar 47. Panel Kontrol Power Distribusi	101
Gambar 48. <i>Panel General ON-OFF</i>	101
Gambar 49. <i>Panel Cooling Water Interlocks</i>	101
Gambar 50. Panel Meter Vakum	101
Gambar 51. Panel <i>Magnet Power Supply</i>	102
Gambar 52. Panel Menaikkan Tegangan Dee	102
Gambar 53. Panel Kontrol Radiofrekuensi	102
Gambar 54. Panel Arus Berkas.....	103

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi Sistem Osilator Siklotron CS-30	16
Tabel 2. Keadaan sistem siklotron Cyclone 18/9.....	31
Tabel 3. Definisi keadaan sistem pada siklotron CS-30	34
Tabel 4. Pengelompokan manfaat siklotron di bidang medis berdasarkan energi partikel	52
Tabel 5. Beberapa radionuklida pemancar positron yang dapat digunakan untuk diagnosis dengan modalitas PET	53
Tabel 6. Beberapa radionuklida pemancar gamma yang dapat digunakan untuk diagnosis dengan modalitas SPECT	54
Tabel 7. Beberapa radionuklida untuk terapi yang dapat diproduksi dengan siklotron energi sedang	55
Tabel 8. Pengelompokan manfaat siklotron di bidang medis berdasarkan energi partikel	57
Tabel 9 Hubungan “interlock” pengendalian keselamatan internal.....	91
Tabel 10. Lembar Data pre-start Siklotron.....	104
Tabel 11. Lembar Data Pengoperasian Siklotron (<i>Run Sheet</i>).....	105

PENDAHULUAN

A. Deskripsi Singkat

Siklotron merupakan perangkat pemercepat partikel yang memiliki peran penting dalam berbagai bidang, terutama industri dan medis. Dalam bidang medis, siklotron digunakan untuk memproduksi radioisotop yang diperlukan dalam diagnosis dan terapi, seperti untuk pemindaian *Positron Emission Tomography* (PET) dan terapi kanker. Sementara itu, dalam bidang industri, siklotron dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti pengujian material, iradiasi bahan, serta produksi radioisotop untuk industri minyak dan gas.

Pemanfaatan siklotron memerlukan pengoperasian yang aman, efektif, dan sesuai dengan prosedur standar. Oleh karena itu, penyusunan modul pengoperasian siklotron ini bertujuan untuk menyediakan panduan yang komprehensif bagi para operator, teknisi, dan pengguna. Modul ini dirancang agar dapat diterapkan baik dalam konteks medis maupun industri, sehingga mencakup kebutuhan spesifik kedua bidang tersebut.

Pada bagian awal, modul ini akan menjelaskan prinsip dasar kerja siklotron, termasuk teori dasar dan komponen siklotron. Selanjutnya, akan dibahas secara rinci mengenai langkah pengoperasian siklotron, pemanfaatan siklotron, prosedur pengoperasian harian, prinsip keselamatan dalam pengoperasian siklotron, langkah-langkah keselamatan kerja, serta penanganan situasi darurat.

Dengan adanya modul ini, diharapkan para pengguna dapat memahami dan menerapkan prosedur operasional secara konsisten, meningkatkan efisiensi, serta meminimalkan risiko operasional. Modul ini juga diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan kapasitas sumber daya manusia di bidang teknologi siklotron, baik untuk keperluan medis maupun industri, guna mendukung kemajuan sektor kesehatan dan industri nasional.

B. Alokasi Waktu

21 Jam Pembelajaran @ 45 menit.

C. Tujuan Pembelajaran

1. Hasil Belajar

Peserta mampu mempraktekkan langkah pengoperasian siklotron secara selamat.

2. Indikator Hasil Belajar

Setelah selesai pembelajaran diharapkan peserta mampu:

- a. menjelaskan teori dasar dan komponen siklotron;
- b. mengidentifikasi langkah pengoperasian siklotron;
- c. menyebutkan pemanfaatan siklotron;
- d. menjelaskan prinsip keselamatan dalam pengoperasian siklotron; dan
- e. mempraktekkan pengoperasian siklotron.

D. Pokok Bahasan dan Sub Pokok Bahasan

Mata pelatihan ini terdiri dari 5 Materi Pokok, yaitu:

1. Teori Dasar dan Komponen Siklotron

- a. Teori Dasar Siklotron
- b. Fungsi Komponen Siklotron

2. Pengoperasian Siklotron

- a. Pra-operasi Siklotron
- b. Operasi Siklotron
- c. Pasca-operasi Siklotron

3. Pemanfaatan Siklotron

- a. Pemanfaatan Siklotron di Bidang Medis
- b. Pemanfaatan Siklotron di Bidang Industri

4. Keselamatan dalam Pengoperasian Siklotron

- a. Keselamatan dalam Pengoperasian Siklotron: Prosedur dan Peralatan
- b. Tugas dan Tanggung Jawab Operator Siklotron

5. Praktikum Pengoperasian Siklotron

MATERI POKOK 1: TEORI DASAR DAN KOMPONEN SIKLOTRON

Indikator Hasil Belajar: menjelaskan teori dasar dan komponen siklotron

A. Teori Dasar Siklotron

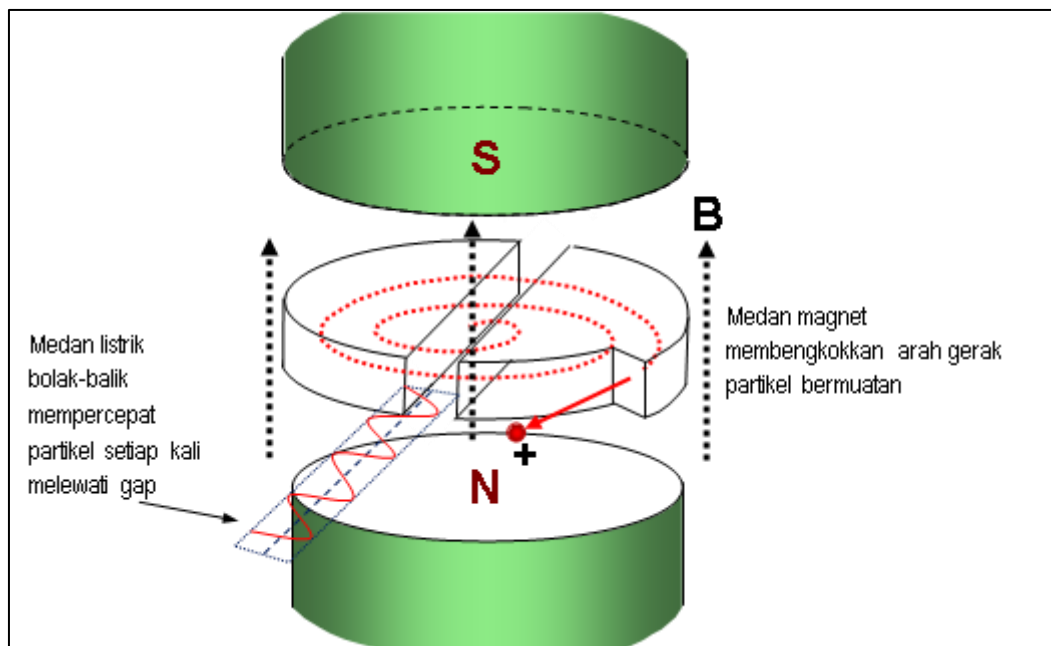
Siklotron adalah salah satu jenis akselerator partikel yang digunakan untuk mempercepat partikel bermuatan, seperti proton, atau ion, hingga mencapai energi kinetik yang sangat tinggi. Alat ini memanfaatkan medan magnet dan medan listrik untuk mengarahkan dan mempercepat partikel-partikel tersebut. Konsep siklotron pertama kali dikembangkan pada tahun 1930-an oleh fisikawan Amerika, Ernest O. Lawrence dan rekannya.

Siklotron terdiri dari dua elektroda berbentuk setengah lingkaran yang diletakkan di dalam sebuah ruangan hampa udara. Partikel bermuatan diinjeksikan ke dalam siklotron dan dipercepat dengan menggunakan medan listrik yang berubah-ubah secara periodik. Medan magnet yang kuat diterapkan secara tegak lurus dengan medan listrik, yang menyebabkan partikel bermuatan bergerak dalam lintasan spiral atau lingkaran sehingga energinya terus meningkat dengan setiap putaran.

Siklotron memiliki magnet berbentuk tapal kuda yang menciptakan medan magnet pada lintasan partikel. Medan ini membuat partikel bergerak dalam lintasan melingkar, karena gaya Lorentz yang dihasilkan oleh medan magnet mendorong partikel tersebut untuk bergerak dalam bentuk lingkaran.

Siklotron menggunakan medan listrik yang berosilasi di antara dua elektroda berbentuk huruf "D" (disebut *dee* karena bentuknya). Ketika partikel melewati celah di antara elektroda ini, medan listrik mempercepat partikel. Setiap kali partikel melewati celah ini, medan listrik berganti arah (sinkron dengan frekuensi putaran partikel), sehingga partikel terus mendapatkan dorongan tambahan setiap kali berputar. Secara sederhana, sistem siklotron ditunjukkan pada

Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi sistem percepatan partikel bermuatan di dalam siklotron
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Ketika suatu partikel bermuatan dengan massa m dan muatan listrik q dipercepat dalam medan magnet dengan kuat medan B , maka pada partikel yang bergerak melingkar dengan jari-jari r dan kecepatan v tersebut akan berlaku kesetimbangan antara gaya elektromagnetik yang bekerja pada partikel tersebut dengan gaya sentripetalnya sesuai dengan persamaan [1]:

$$qvB = \frac{mv^2}{r}, \dots \dots \dots (1)$$

Atau dapat ditulis ulang untuk mencari momentum partikel tersebut dengan:

$$mv = qBr, \dots \dots \dots (2)$$

Di dalam sistem MKS, m dinyatakan dalam kilogram, v dalam meter/detik, q dalam coulomb, r dalam meter, dan B dalam weber/m². Dalam hal ini, $q = e = 1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb. Untuk partikel proton, maka massa diamnya adalah $1,67 \times 10^{-27}$ kg.

Untuk siklotron dengan frekuensi (f) yang tetap (*fixed cyclotron*), maka frekuensi osilasinya dapat dirumuskan dengan:

$$f = \frac{qB}{2\pi m}, \dots \dots \dots (3)$$

Jika kecepatan partikel jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya, maka energi kinetik partikel tersebut dapat dinyatakan dengan:

$$T = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{q^2 \cdot B^2 \cdot r^2}{2m}, \dots\dots\dots (4)$$

Sedangkan untuk massa relativistik, yaitu ketika kecepatan partikel mendekati kecepatan cahaya, massanya menjadi:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \dots\dots\dots (5)$$

B. Komponen Siklotron

Calon petugas operator maupun petugas perawatan perlu memahami komponen-komponen siklotron beserta fungsinya terlebih dahulu agar dapat menjalankan tugas tanpa hambatan. Pada pelatihan ini, topik utama adalah komponen-komponen utama siklotron, di mana peserta pelatihan akan diperkenalkan dengan komponen utama siklotron, khususnya yang diperlukan dalam proses pembentukan ion hingga komponen-komponen yang digunakan dalam proses percepatan untuk menghasilkan ion berenergi tinggi. Selain itu, peserta juga akan mempelajari komponen untuk pemantauan berkas internal, komponen ekstraktor berkas, serta sistem pemvakuman siklotron.

Komponen siklotron terbagi menjadi dua kategori: komponen utama dan komponen penunjang. Komponen utama memungkinkan percepatan partikel, sedangkan komponen penunjang mendukung operasional dan keamanan siklotron.

Komponen-komponen yang akan dibahas mencakup Magnet Utama Siklotron, Sumber Ion, Sistem Osilator Siklotron, Sistem Monitor Berkas, Sistem Ekstraktor Berkas, dan Sistem Pemvakuman Siklotron.

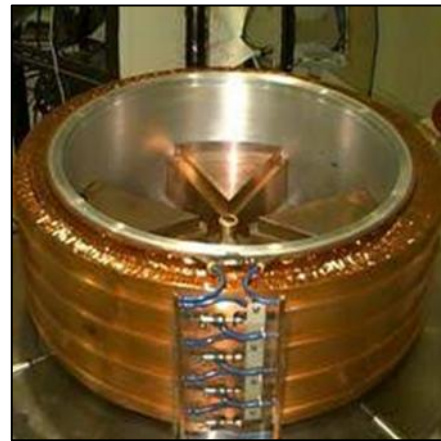
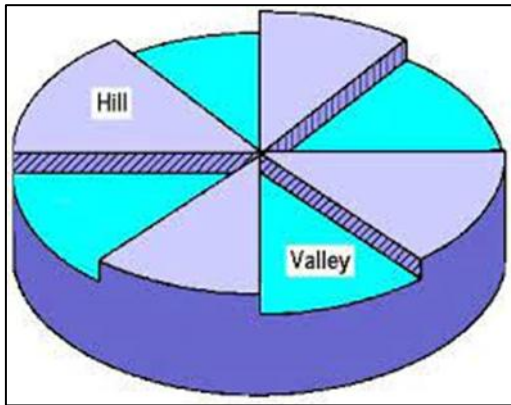
1. Komponen Utama Siklotron

a. Sistem Magnet Utama

Sistem magnet utama pada siklotron digunakan untuk memberikan lintasan sirkular pada partikel yang dipercepat. Berdasarkan teori dasar siklotron, pada siklotron keluaran awal, bentuk kutub magnet utama dirancang lebih tebal di bagian tengah dibandingkan dengan bagian

tepinya. Desain ini diperlukan untuk menghasilkan gaya pemfokusan vertikal. Dengan bentuk kutub yang lebih tebal di bagian tengah, medan magnet akan menurun secara bertahap seiring dengan bertambahnya jari-jari, sehingga garis-garis medan magnet melengkung keluar. Karena gaya yang bekerja pada partikel bermuatan yang bergerak tegak lurus terhadap medan magnet, partikel yang cenderung menjauh dari bidang median akan ditarik kembali menuju bidang tersebut. Namun, karena penambahan kecepatan menyebabkan perubahan relativitas pada massa partikel, diperlukan hubungan antara kenaikan kuat medan magnet dan jari-jari lintasan partikel sehingga nilai (B/ρ) tetap konstan dengan bertambahnya jari-jari lintasan.

Pada siklotron jenis baru, kuat medan magnet divariasikan secara teratur dalam arah azimut (*Azimuthally Varying Field*) dengan menempatkan potongan besi lunak secara bergantian pada kutub magnet untuk membentuk daerah bukit dan lembah (*Hill and Valley*). Daerah medan magnet kuat dan lemah ini menghasilkan efek pemfokusan pada berkas partikel yang dipercepat. Untuk mempertahankan isokronisme pada tingkat percepatan energi tinggi, di mana kecepatan ion mendekati kecepatan relativistik, kuat medan magnet di arah radial ditingkatkan. Ini dapat dicapai dengan membuat kutub magnet lebih tebal di bagian tepi dibandingkan bagian tengah. Pada jenis siklotron tertentu, pada daerah magnet utama juga dipasang komponen *harmonic coil* untuk pengaturan halus medan magnet yang dapat membentuk benjolan medan magnet (*magnetic bump*) yang diperlukan untuk mengontrol arah berkas partikel yang dipercepat.



Gambar 2. Bukit dan lembah (*Hill and Valey*) yang dapat membangkitkan sektor medan magnet kuat dan lemah sepanjang arah azimuth untuk memberikan efek pemfokusan
Sumber: Milik ITRR – DPFK, BRIN

- Pembentukan Lintasan Partikel

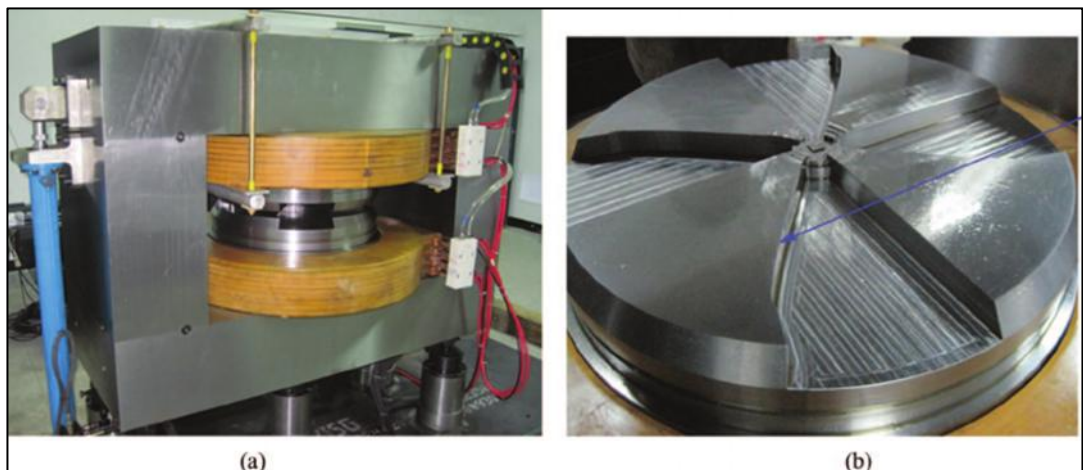
Lintasan gerak partikel bermuatan (ion) yang dipercepat dalam siklotron berbentuk spiral, dimulai dari daerah pusat (*central region*) menuju radius pemisahan (*extraction radius*). Sepanjang lintasannya, ion berosilasi secara radial dan vertikal di sekitar lintasan ideal yang disebut lintasan kesetimbangan (*equilibrium orbit*). Fase ion yang keluar dari daerah pusat (osilasi incoherent) bersifat acak, dipengaruhi oleh posisi ion dalam kolom pancaran sumber ion, momentum awal setiap ion, dan tegangan percepatan yang berubah sesuai bentuk sinusoidal. Selain osilasi incoherent, ion juga mengalami osilasi coherent yang dapat disebabkan oleh posisi sumber ion, penempatan komponen di daerah pusat yang kurang tepat, dan ketidaktepatan tegangan Dee. Kedua jenis osilasi ini normal terjadi dalam sistem siklotron dan harus dapat dikendalikan. Namun, osilasi incoherent secara teknis sulit dikendalikan, sementara osilasi coherent radial dapat dikendalikan dengan lebih baik.

Pengendalian osilasi ini penting karena, jika amplitudo osilasi terlalu besar, berkas partikel dapat menumbuk komponen dalam ruang percepatan dan hilang. Tumbukan yang kuat dapat merusak komponen tersebut. Selain itu, pengendalian osilasi juga penting untuk mencegah resonansi Walkinshaw, yaitu resonansi yang

menghubungkan osilasi radial dan vertikal yang dapat menyebabkan hilangnya berkas partikel, terutama pada radius ekstraksi.

- Konstruksi Sistem Magnet Utama Siklotron

Sistem magnet utama siklotron terdiri dari keping kutub magnet, yoke bagian atas dan bawah, serta penyangga seperti terlihat pada Gambar 3. Untuk membuka tangki siklotron, keping kutub magnet beserta yoke bagian atas dapat diangkat dengan menggunakan dua dongkrak hidrolik yang dipasang pada yoke bagian bawah. Saat tangki siklotron ditutup, yoke bagian atas disematkan dengan presisi menggunakan semat pelurus (*dowels*). Pada siklotron CS-30, kedua dongkrak ini memiliki ketinggian pengangkatan hingga 44 cm, cukup luas untuk perawatan dan pengaturan daerah pusat siklotron.



Gambar 3. Magnet utama siklotron. (a) Konstruksi seluruh magnet utama. (b) Bukit dan lembah (*Hill and Valey*) pada magnet utama
Sumber: Milik ITRR – DPFK, BRIN

Kutub magnet berbentuk lingkaran yang dibautkan pada dasar kutub atas dan bawah, sekaligus berfungsi sebagai penutup atas dan bawah ruang vakum percepatan. Setiap kutub dilengkapi dengan tiga keping besi berbentuk kincir untuk membagi medan magnet menjadi daerah *hill* (bukit) pada permukaan besi dan *valley* (lembah) pada area yang tidak tertutup besi. Kincir besi ini dirancang dengan presisi untuk menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan agar siklotron beroperasi secara isokronal. *Hill* ini disematkan secara presisi

menggunakan semat pelurus.

Sistem magnet utama juga dilengkapi perangkat pendingin air, catu daya (*power supply*) teregulasi, dan sistem kontrol yang ditempatkan pada konsol kontrol. Untuk menghasilkan medan magnet kuat, sistem ini menggunakan dua koil utama yang mengelilingi kutub magnet atas dan bawah. Pada siklotron CS-30, setiap koil terdiri dari enam pancake, masing-masing terdiri dari 264 lilitan konduktor tembaga berongga. Setiap *pancake* dililit dari dua konduktor panjang yang dihubungkan secara seri, sementara air pendingin mengalir melalui konduktor secara paralel. Manifold untuk sistem pendingin air ditempatkan di bawah penyangga magnet dan dilengkapi limit switches untuk pemantauan aliran dan suhu air.

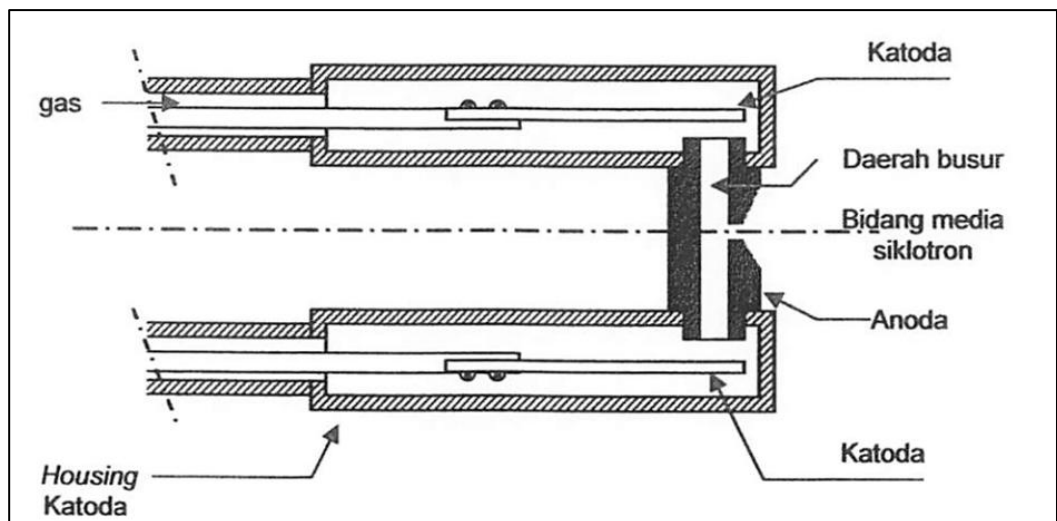
b. Sistem Sumber Ion

Sistem sumber ion adalah sistem yang digunakan untuk menghasilkan ion dari unsur tertentu, yang kemudian akan digerakkan dan dipercepat dalam siklotron. Dalam sistem siklotron seperti siklotron CS-30, sumber ion yang digunakan terdiri dari beberapa komponen, yaitu sumber ion tipe *Penning Ion Gauge* (PIG), catu daya, perangkat penyalur gas, dan kontrol sumber ion. Sumber ion tipe PIG ini bekerja berdasarkan prinsip osilasi elektron yang diusulkan oleh F.M. Penning dan pertama kali digunakan di Philips Laboratory pada tahun 1937. Sumber ion yang beroperasi berdasarkan prinsip ini dikenal sebagai sumber ion PIG, dengan prinsip kerja sebagai berikut:

Ion dihasilkan melalui penembakan elektron pada molekul gas. Hasil produksi ion tergantung pada jenis gas yang digunakan, kerapatan gas (atau tekanan gas), jumlah elektron yang tersedia, dan potensial ionisasi gas.

Komponen utama dari sumber ion tersusun seperti terlihat pada Gambar 4. Dua katoda tantalum (Ta) ditempatkan pada jarak dan posisi yang simetris di bagian atas dan bawah bidang media siklotron. Katoda ini terisolasi dari housing anoda, dengan anoda ditempatkan sejajar dengan

arah medan magnet, dan housing anoda serta katoda berada pada potensial ground. Gas untuk sumber ion dialirkan melalui saluran gas sumber ion menuju daerah *arc* (busur listrik), yang berada di ruang berbentuk silinder di dalam anoda. Saat tegangan negatif diberikan pada katoda, elektron dilepaskan dari permukaan masing-masing katoda dan ditarik menuju ground. Elektron tersebut menumbuk molekul gas di sepanjang lintasannya, menyebabkan pelepasan elektron dari molekul gas dan menghasilkan ion positif. Pada kondisi awal ini, *yield* (hasil) ion positif masih rendah.



Gambar 4. Ilustrasi bagian kepala sumber ion tipe PIG
Sumber: Milik ITRR – DPFK, BRIN

Ketika sumber ion beroperasi dalam medan magnet, elektron akan bergerak secara spiral pada radius kecil dan dipercepat menuju *ground*, melintasi *arc column*. Dalam pergerakannya, elektron dapat mendekati katoda lainnya, namun akan ditolak kembali sehingga terus berosilasi naik-turun. Elektron akan terus bergerak hingga energinya cukup untuk mengionisasi atom gas, menghasilkan ion positif. Tumbukan dengan atom gas menurunkan energi elektron hingga akhirnya elektron kehilangan energi kinetik yang cukup untuk mengionisasi gas dan akan tertarik ke dinding anoda atau *housing*, menghasilkan arus elektron pada rangkaian eksternal.

Ion positif yang terbentuk dipercepat menuju katoda dan akan

menumbuknya, menghasilkan elektron sekunder. Elektron sekunder ini akan dipercepat menuju anoda dan menghasilkan lebih banyak ion. Pada kondisi ini, tercapai kesetimbangan yang stabil antara produksi ion dan elektron. Jika tegangan antara katoda dan ground dinaikkan, energi ion juga meningkat sehingga katoda akan memanaskan hingga mencapai suhu termionik, menghasilkan elektron dalam jumlah besar dan menyebabkan peningkatan arus secara signifikan. Dalam kondisi ini, sumber ion beroperasi dalam mode termionik (*thermionic mode*). Saat beroperasi dalam mode ini, arus elektron pada rangkaian eksternal dapat meningkat hingga 100 kali lipat, yang menyebabkan penurunan tegangan pada arc column. Penurunan tegangan diikuti oleh peningkatan arus, yang akhirnya mencapai kestabilan operasi.

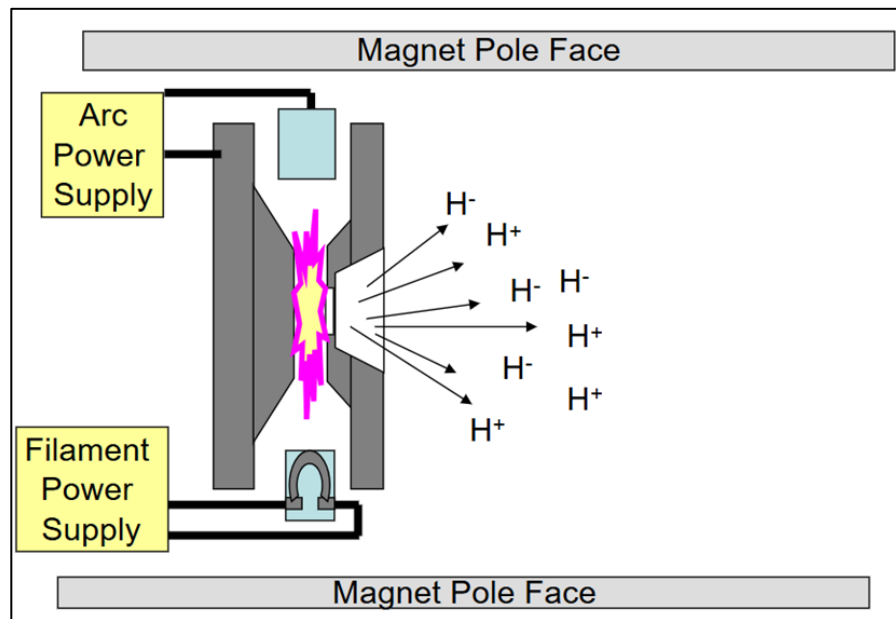
Konstruksi sumber ion tipe PIG bervariasi, tergantung pada pabrikan siklotron dan tipe siklotron itu sendiri.

Produksi Ion Hidrogen Negatif

Jumlah ion hidrogen negatif yang dapat dihasilkan sumber ion dalam siklotron bergantung pada posisi kolom busur (*arc column*) yang menentukan kolom plasma busur (*the plasma arc column*), arus busur, tegangan percepatan yang digunakan untuk memisahkan ion H dari sumber ion, susunan elektroda, serta medan magnet pada beberapa putaran awal dalam siklotron. Ion H yang dihasilkan dari sumber ion berasal dari gas hidrogen (molekul hidrogen) yang terdisosiasi dan membentuk plasma hidrogen (H dan H-) di area antara kolom busur dan celah pemisah (*extraction slit*), seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Disosiasi molekul hidrogen dan ionisasi atom hidrogen netral menjadi ion hidrogen positif (H⁺) terjadi melalui tumbukan molekul hidrogen oleh elektron primer yang dihasilkan dari katoda sumber ion yang diberi tegangan negatif. Elektron primer ini bergerak menuju ground, menumbuk molekul gas hidrogen sepanjang lintasannya, sehingga menyebabkan disosiasi molekul hidrogen dan menghasilkan atom hidrogen netral dan elektron. Selain disosiasi, terjadi juga ionisasi, yaitu

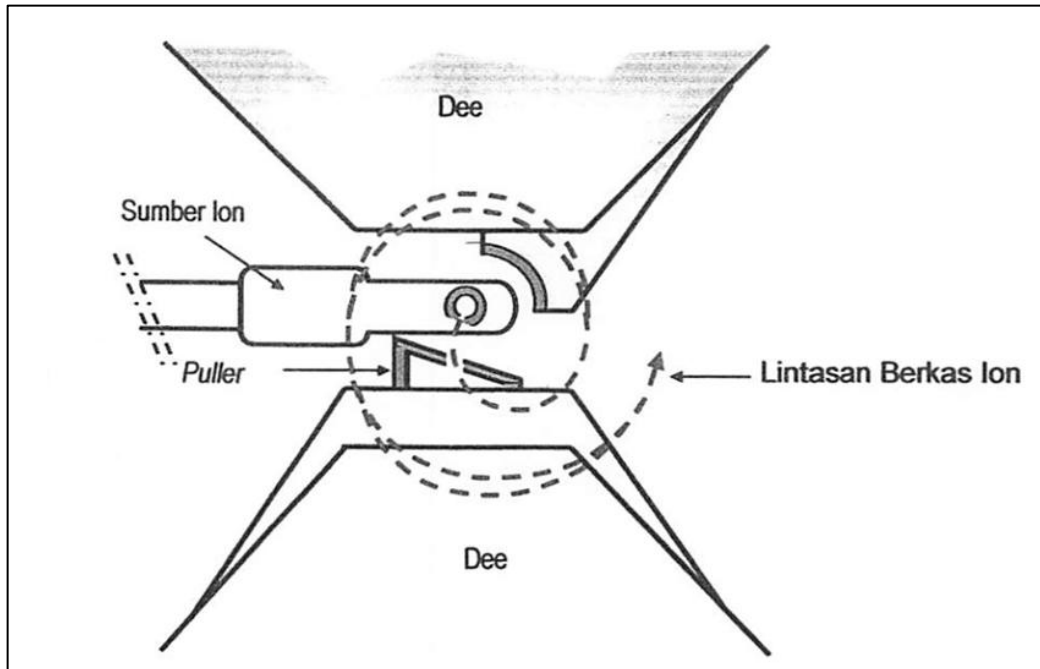
pelepasan elektron dari atom hidrogen netral yang menghasilkan ion hidrogen positif (H^+). Selain kehilangan elektron, atom hidrogen netral dari proses disosiasi dapat menyerap elektron tambahan, membentuk ion hidrogen negatif (H^-). Elektron yang diserap dalam reaksi ini berasal dari elektron bebas di sekitar kolom busur dengan energi ikat sebesar 0,75 eV.



Gambar 5. Produksi ion dari sumber ion siklotron
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Potensial antara kolom busur dan anoda sumber ion mendorong ion H keluar menuju celah pemisah, sehingga ion H keluar dari sumber ion dan dipercepat menuju elektroda penarik (*puller*) saat bagian siklus frekuensi radio (RF) pada Dee bermuatan positif. Sudut puller merupakan salah satu pengaturan di daerah pusat (*central region*) siklotron, penting untuk menentukan fase ion saat mencapai pusat celah percepatan berikutnya. Gambar 6 menunjukkan daerah pusat siklotron CS-30 dan Cyclone 18/9. Secara umum, pengaturan geometri ini memungkinkan sekelompok ion melewati celah percepatan kedua saat potensial percepatan menurun. Pada siklotron CS-30, untuk menghasilkan pemfokusan vertikal dan menyelaraskan fase ion dengan RF, digunakan kerucut magnetik pada sekitar radius 10 cm dari pusat magnet untuk meningkatkan medan magnet di pusat siklotron di atas nilai sinkronnya. Kerucut ini

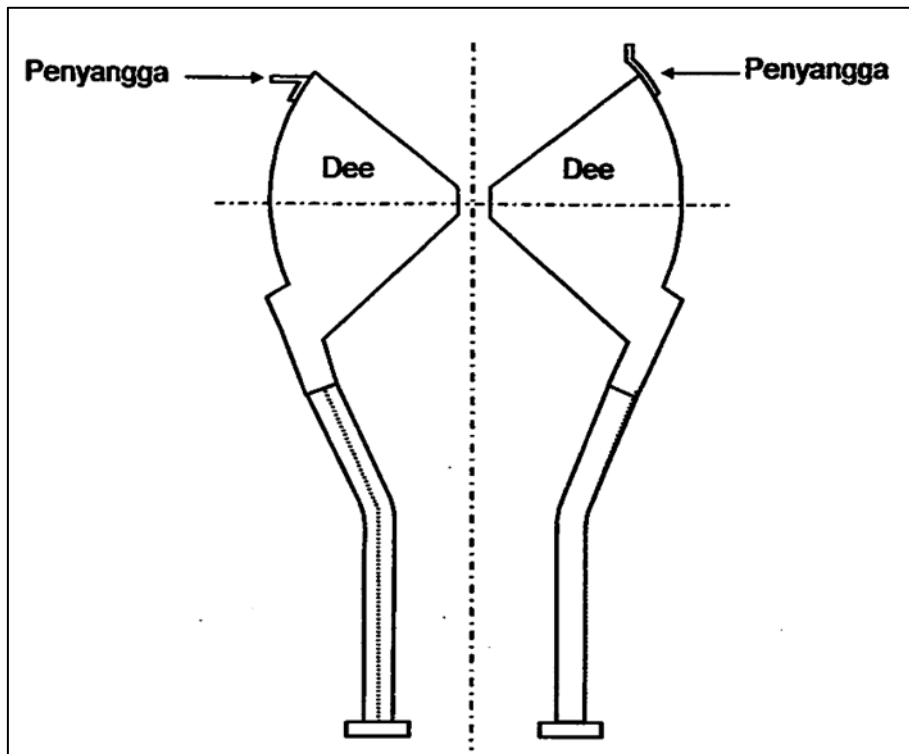
menghasilkan penurunan medan magnet secara radial pada 10 cm pertama putaran dalam siklotron, yang memberikan efek pemfokusan magnetik ke arah vertikal.



Gambar 6. Ilustrasi daerah pusat (*central region*) dari siklotron CS-30
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

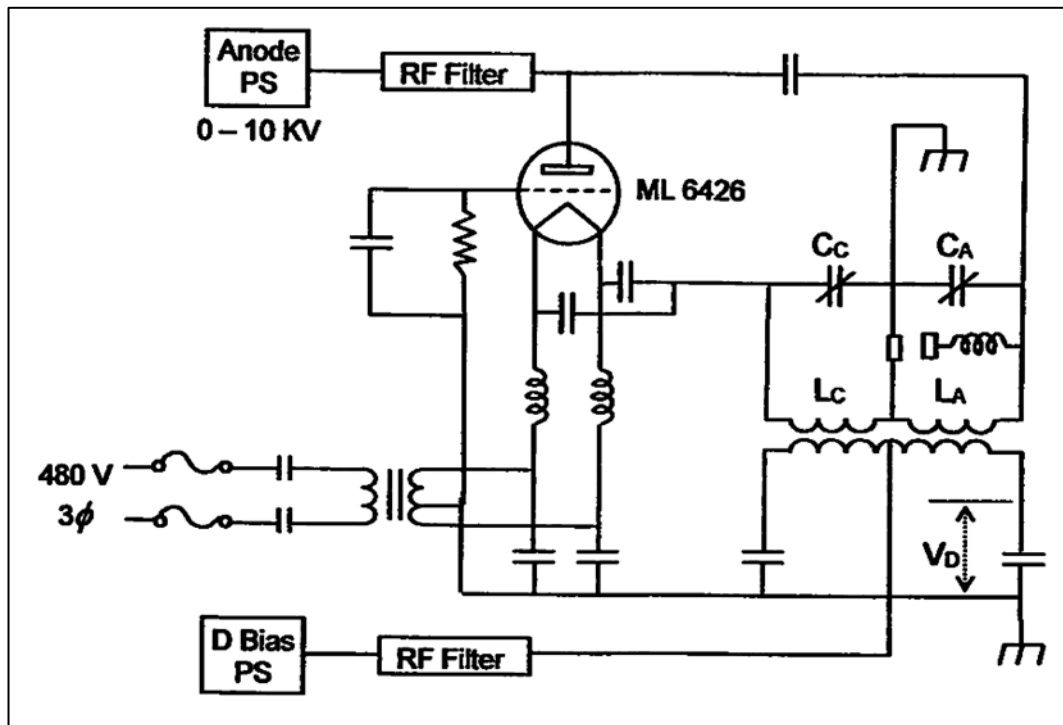
c. *Radio Frequency (RF) Osilator*

Sistem osilator pada siklotron berfungsi untuk menghasilkan tegangan tinggi dengan frekuensi radio yang diterapkan pada dua elektroda berongga berbentuk D (Dee), yang ditempatkan di antara dua kutub magnet utama. Rangkaian osilator dan komponen Dee ini merupakan unit utama dalam proses percepatan partikel di siklotron. Elektroda Dee dibuat dari tembaga OFHC (*Oxygen Free - High Conductivity*) untuk menghindari loncatan arus (*spark*). Pada siklotron generasi pertama, elektroda Dee berbentuk menyerupai huruf "D" yang sebenarnya, sehingga disebut sebagai elektroda Dee. Namun, pada siklotron modern, bentuk elektroda ini berupa juring dengan sudut 90 derajat atau kurang. Bentuk Dee pada siklotron CS-30 ditunjukkan pada Gambar 7. Desain elektroda ini memberikan ruang lebih luas untuk penempatan komponen lainnya, seperti sumber ion, *beam probe*, dan fasilitas ekstraktor.



Gambar 7. Ilustrasi bentuk Dee siklotron CS-30
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Kedua elektroda Dee merupakan bagian dari rangkaian resonator sistem osilator yang terhubung secara induktif dengan rangkaian resonator induktor di luar tangki siklotron. Sistem osilator ini memberikan tegangan tinggi frekuensi radio pada Dee dengan frekuensi yang disesuaikan dengan jenis partikel yang dipercepat, yang dapat ditentukan dari perbandingan massa-muatan partikel serta besarnya medan magnet yang digunakan. Untuk siklotron CS-30, rangkaian osilator ini terdiri dari tiga rangkaian resonan terpisah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-2. Kapasitor CA dan induktor LA membentuk rangkaian anoda, sedangkan kapasitor Cc dan induktor Le membentuk rangkaian katoda. Rangkaian resonator terdiri dari dua elektroda Dee, induktor resonator, dan *shorting plane*, yang membentuk resonansi setengah gelombang, seperti ditunjukkan pada Gambar 8, dengan osilasi yang dihasilkan menggunakan tabung bida.



Gambar 8. Rangkaian sistem oscilator RF pada siklotron CS-30
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Frekuensi R.F yang diinginkan dapat diatur dengan menyetel (*tuning*) rangkaian resonator pada frekuensi operasi, kemudian rangkaian anoda dan katoda disesuaikan untuk mencapai efisiensi resonansi optimal ($V_D/V_A = 3$ dan $V_D/V_C = 3$). Perubahan frekuensi resonator dilakukan dengan menggerakkan shorting plane pada perangkat induktor secara vertikal. Shorting plane ini digerakkan oleh motor yang dikontrol dari jarak jauh melalui panel kontrol R.F. di ruang kontrol siklotron. Kontak antara shorting plane dan perangkat resonator dilakukan dengan tekanan tinggi menggunakan silinder pneumatik, yang hanya diaktifkan saat mengubah frekuensi resonator. Kapasitor pada rangkaian anoda C memiliki batasan pada frekuensi tinggi, sehingga digunakan induktor kedua yang dipasang paralel dengan LA, yang menurunkan induktansi efektif untuk memungkinkan operasi pada frekuensi tinggi. Induktor kedua ini terletak pada perangkat osilator dan dapat dikendalikan dari jarak jauh melalui panel kontrol R.F. di ruang kontrol.

Contoh Spesifikasi Sistem Osilator Siklotron CS-30, dapat di lihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Sistem Osilator Siklotron CS-30

Komponen	Spesifikasi
Tabung (Tube)	Machlett 6426
Daya Filamen	1600 W (8V @ 700 A)
Dissipasi Pelat Maksimum	40 kW
Pendinginan Air	12 GPM, 80 PSI (76 LPM, 551,6 kPa)
Rentang Frekuensi	14.4 MHz to 27.0 MHz
Stabilitas Frekuensi	$\pm 1 \times 10\%$

2. Komponen Penunjang Siklotron

a. Sistem Monitor Berkas Internal Dan Sistem Ekstraktor Berkas

- Sistem Monitor Berkas Internal

Sistem monitor berkas internal adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur kuantitas arus berkas yang dibangkitkan sepanjang radius lintasan berkas internal sebelum titik ekstraksi. Posisi perangkat ini dapat digerakkan maju-mundur pada arah radial, sehingga memungkinkan pengukuran radius orbit terluar berkas yang dihitung dari pusat siklotron.

Komponen utama sistem monitor berkas ini terdiri dari kepala penahan berkas (*beam probe head*) yang terbuat dari tembaga dan dipasang pada ujung lengan beam probe. Lengan beam probe dapat digerakkan maju-mundur menggunakan motor yang dikendalikan dari panel kontrol di ruang kontrol siklotron. Untuk mendinginkan beam probe dari panas yang dihasilkan akibat tumbukan berkas pada kepala probe, sistem pendingin air dialirkan melalui lengan beam probe.

- Sistem Ekstraktor Berkas

Pada sistem pemercepat ion positif, seperti pada Siklotron CS-30

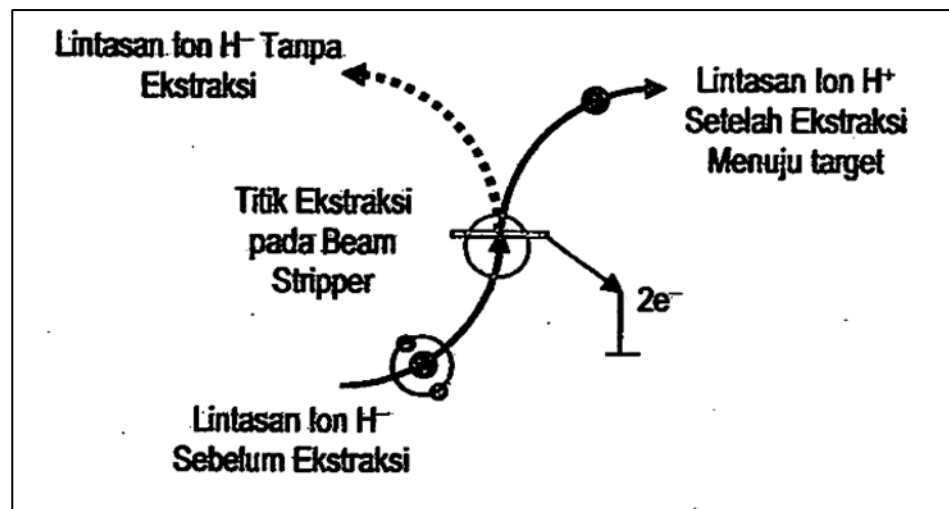
sebelum modifikasi, sistem ekstraktor terdiri dari deflektor berkas, saluran magnetik (*magnetic channel*), catu daya tegangan tinggi, dan sistem kontrol. Deflektor ini merupakan saluran medan elektrostatis yang terbentuk dari elektroda negatif dan septum sebagai ground. Jarak saluran medan elektrostatis pada deflektor berkisar antara 3 mm di ujung masuk berkas hingga 5 mm di ujung keluarnya, dengan panjang sekitar 40 cm. Tegangan yang diterapkan dapat diatur antara 0 hingga 60 kV DC. Partikel yang melewati saluran elektrostatis ini akan memasuki gradien medan listrik tinggi, sehingga ion akan terdefleksi ke radius yang lebih besar dan keluar dari orbitnya dalam medan magnet.

Setelah melewati deflektor, berkas partikel akan menyebar dalam arah radial horizontal namun kemudian difokuskan kembali oleh saluran magnetik untuk diarahkan ke sistem saluran berkas. Elektroda deflektor dibuat dari tembaga yang diisolasi dari ground menggunakan isolator keramik, sementara septum terbuat dari tungsten untuk menahan pelepasan daya tinggi akibat tumbukan dengan berkas partikel. Untuk melindungi septum, dipasang preseptum di bagian depan saluran medan elektrostatis. Preseptum ini juga terbuat dari tungsten dan memiliki ketebalan lebih besar daripada septum, serta didinginkan oleh air.

Komponen septum dan preseptum menerima tumbukan paling banyak dari berkas partikel, terutama jika terdapat ketidaktepatan dalam pola ekstraksi atau defleksi berkas, yang menyebabkan residu radioaktif akibat aktivasi oleh tumbukan partikel energi tinggi. Efisiensi ekstraksi pada sistem ini sangat bergantung pada ketepatan pengaturan pola ekstraksi.

Pada sistem pemercepat ion negatif, seperti pada Siklotron CS-30 BRIN setelah modifikasi menjadi pemercepat ion negatif, sistem ekstraktor menggunakan foil karbon sebagai beam stripper. Berkas ion H setelah dipercepat melewati foil karbon, yang menyebabkan ion H kehilangan satu elektron dan berubah menjadi H^+ (proton). Sesuai

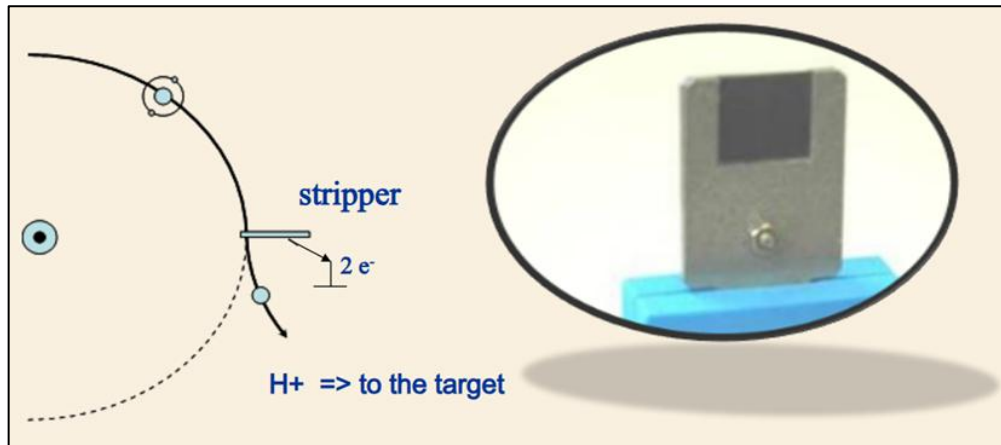
kaidah tangan kiri, perubahan ini membalik arah lintasan berkas partikel, sehingga ion H^+ bergerak secara spiral dengan arah berlawanan dengan ion H^- dan cepat meninggalkan medan magnet menuju saluran berkas ke arah target. Gambar 9. Arah lintasan berkas sebelum dan setelah melewati sistem ekstraksi berkas dapat dilihat pada Gambar 9. Dengan mekanisme ekstraksi ini, efisiensi ekstraksi berkas dapat mencapai 100%.



Gambar 9. Arah lintasan berkas sebelum dan setelah melewati sistem ekstraksi berkas

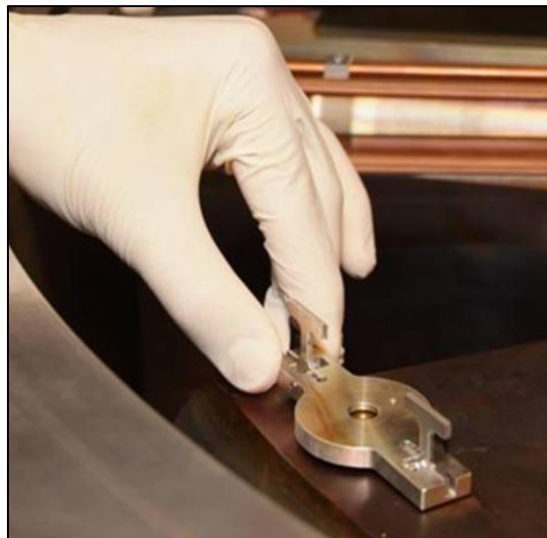
Sumber: Milik ITRR-DPFFK, BRIN

Posisi ekstraktor menentukan lintasan ion H^+ untuk meninggalkan medan magnet utama. Siklotron dengan energi variabel dapat menggunakan lengan ekstraktor dengan posisi variabel (radius) untuk mengeluarkan berkas pada energi dan port tertentu. Karena energi ion rendah saat masih dekat pusat siklotron dan meningkat saat mencapai radius terbesarnya, penempatan ekstraktor karbon dirancang agar berkas H^- dapat menembus foil karbon secara tegak lurus atau sependek mungkin dengan menggunakan foil karbon setipis mungkin. Ketika ion H^- melewati atom karbon, terjadi tolak-menolak antara elektron-elektron atom karbon dan atom hidrogen, sehingga elektron hidrogen mudah terlepas, membentuk ion H^+ yang selanjutnya menembus foil karbon tanpa hambatan (Gambar 10).



Gambar 10. Sistem ekstraksi siklotron ion negative

Pada Cyclone 18/9, terdapat dua sistem carousel untuk stripper yang dipasang pada setiap sektor magnet; satu carousel dipasang sepanjang sumbu sektor magnet, dan satu lagi pada posisi -11° terhadap sumbu sektor. Setiap carousel memiliki dua foil stripper (Gambar 11), dengan umur pemakaian setiap foil sekitar 10.000 μAh operasi.



Gambar 11. Foil karbon tipis yang diletakkan pada radius ekstraksi siklotron
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

b. Sistem Pemvakuman Siklotron

Pada sistem pemvakuman siklotron CS-30, terdapat tiga tingkatan pemvakuman:

- Tingkat Vakum Rendah

Pada tahap pertama, untuk mencapai vakum rendah hingga 10^3 Torr, digunakan pompa mekanik atau pompa rotari dengan kecepatan pemompaan 651 liter/menit.

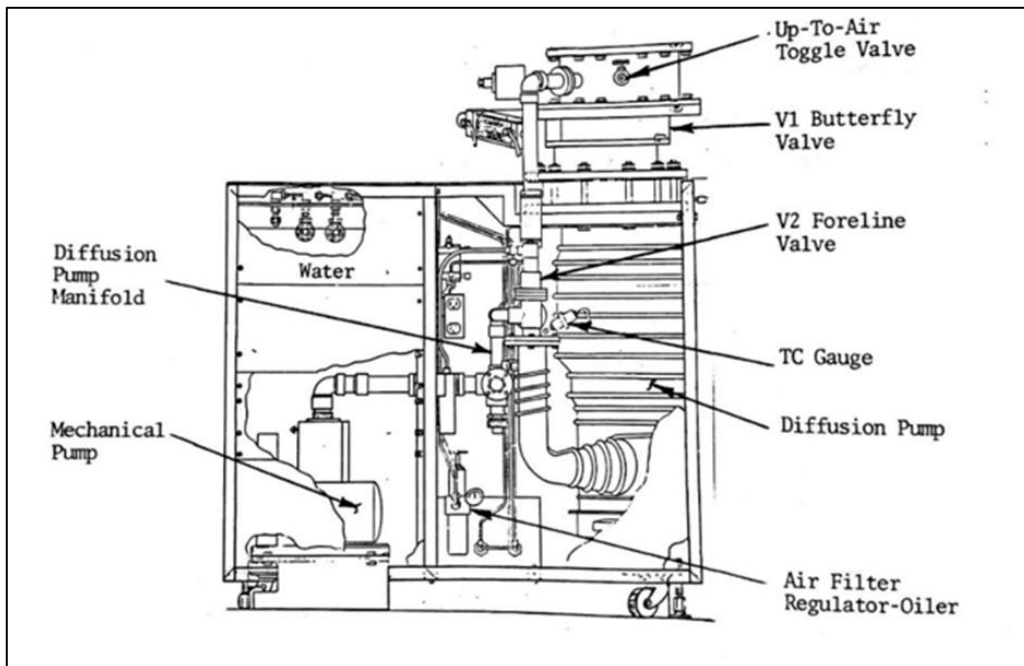
- Tingkat Vakum Menengah

Pada tahap kedua, digunakan pompa vakum difusi dengan kecepatan pemompaan 5.300 liter/detik untuk molekul udara dan 7.000 liter/detik untuk molekul hidrogen, hingga mencapai tekanan 10^7 Torr. Pompa vakum difusi ini dioperasikan setelah ruang pemercepat siklotron mencapai batas kerja minimum pompa ini, yaitu 10^3 Torr. Pompa rotari juga digunakan untuk memvakumkan foreline dari pompa vakum difusi.

- Tingkat Vakum Tinggi

Untuk mencapai tekanan 10^8 Torr atau lebih, digunakan pompa vakum tingkat ketiga, yaitu pompa vakum cryo. Kecepatan pemompaan pompa ini adalah 1.500 liter/detik untuk molekul udara dan 1.200 liter/detik untuk molekul hidrogen. Pompa rotari juga digunakan untuk memvakumkan ruang cryo sebagai tahap awal mencapai persyaratan kondisi kerja cryo.

Susunan lengkap pompa vakum yang digunakan pada siklotron CS-30 BRIN dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Skema dasar sistem vakum siklotron CS-30
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

c. Sistem Transport Berkas

Sistem Transport Berkas atau *Beam Transport System* adalah tabung/ruang vakum yang digunakan untuk menyalurkan atau membawa berkas partikel dari *exit port* siklotron menuju *target chamber* (Gambar 13). Sistem ini dapat berbentuk saluran pendek dengan beam shutter di antara exit port dan target chamber, atau berupa beam line yang lebih panjang dan kompleks, yang melibatkan sistem pemvakuman, magnet untuk *focusing*, *steering*, *switching* berkas, serta monitor profil berkas..

Siklotron CS-30 BRIN memiliki satu saluran berkas utama (main beam line) dan tujuh saluran berkas cabang, dilengkapi dengan berbagai komponen transport berkas. Pada saluran berkas utama, komponen-komponen utama yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Combo magnet: digunakan untuk mengoreksi sudut ekstraksi berkas secara horizontal pada energi berkas antara 24 MeV hingga 27 MeV.
- Vacuum valve: digunakan untuk memisahkan sistem pemvakuman pada ruang siklotron dan beam line, di mana masing-masing memiliki sistem pemvakuman tersendiri.

- X-Y steering magnet: digunakan untuk fine-tuning posisi berkas secara vertikal dan horizontal.
- Quadrupole doublet: terdiri dari pasangan *quadrupole singlet* identik, satu untuk pemfokusan vertikal (defokus horizontal) dan satu lagi untuk pemfokusan horizontal (defokus vertikal).
- Monitor berkas: memonitor posisi dan profil berkas.
- Beam shutter: menghentikan berkas (sebagai *beam stop*) selama proses tuning sebelum diteruskan ke sistem target. Beam shutter ini juga digunakan untuk memeriksa efisiensi transmisi berkas dari exit port hingga saluran berkas utama, dan dapat menghentikan berkas dengan cepat jika proses iradiasi selesai atau ada kendala pada switching magnet, saluran berkas cabang, atau sistem target.
- Switching magnet: mengarahkan berkas ke salah satu dari tujuh saluran berkas cabang. Satu cabang sejajar dengan saluran utama (*beam line* 0°), tiga cabang ke kiri (15°, 30°, dan 45°), serta tiga cabang ke kanan (15°, 30°, dan 45°). Saluran berkas cabang juga dilengkapi dengan komponen transport berkas, termasuk: dua *vacuum valve*, satu *quadrupole doublet*, satu *beam shutter*, satu *beam collimator*, dan satu *target chamber*. Struktur dan konfigurasi ini memastikan pengendalian berkas yang efisien dan aman dari siklotron hingga mencapai target.



Gambar 13. Sistem transport berkas (*beamline*) pada siklotron CS-30
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

C. Prinsip Kerja Siklotron

Prinsip kerja siklotron didasarkan pada kombinasi medan magnet dan medan listrik yang bekerja untuk mempercepat partikel dalam lintasan spiral yang semakin membesar. Secara garis besar, prinsip kerja siklotron dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Medan magnetik untuk membelokkan partikel: Siklotron memiliki dua elektroda berbentuk "D" yang ditempatkan dalam medan magnet yang kuat. Medan magnet ini bekerja tegak lurus terhadap bidang gerak partikel, sehingga partikel bermuatan akan mengalami gaya Lorentz yang membelokkannya ke lintasan melingkar. Semakin tinggi kecepatan partikel, semakin besar radius lintasannya.
2. Medan listrik untuk mempercepat partikel: Di antara kedua elektroda "D" terdapat celah yang menghasilkan medan listrik bolak-balik dengan frekuensi tertentu. Ketika partikel melewati celah ini, medan listrik memberikan dorongan sehingga kecepatannya meningkat. Partikel yang dipercepat akan terus mengelilingi lintasan spiral di antara kedua elektroda "D".

3. Frekuensi Resonansi (Frekuensi Siklotron): Siklotron beroperasi pada frekuensi yang sesuai dengan frekuensi gerak partikel di dalam medan magnet, yang disebut frekuensi siklotron. Frekuensi ini penting agar medan listrik yang dihasilkan di antara elektroda selalu sinkron dengan gerakan partikel yang melintasi celah sehingga percepatan terus-menerus terjadi.
4. Lintasan Spiral yang Membesar: Setiap kali partikel melintasi celah di antara elektroda "D", kecepatannya bertambah, dan akibatnya radius lintasannya semakin besar. Hal ini menghasilkan lintasan spiral yang melingkar keluar sampai partikel mencapai energi yang diinginkan.
5. Ekstraksi Partikel: Setelah partikel mencapai energi tinggi, partikel tersebut diekstraksi dari siklotron untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti penelitian fisika nuklir, terapi kanker (dalam bentuk terapi proton), atau produksi isotop untuk kedokteran nuklir.

D. Rangkuman

Siklotron adalah akselerator partikel yang mempercepat partikel bermuatan seperti proton dengan menggunakan medan magnet dan listrik. Dikembangkan oleh Ernest O. Lawrence pada 1930-an, siklotron terdiri dari dua elektroda berbentuk setengah lingkaran (Dee) di dalam ruang hampa. Partikel bergerak dalam lintasan melingkar di bawah pengaruh medan magnet yang tegak lurus dan mendapat dorongan dari medan listrik yang berosilasi. Energi partikel meningkat dengan setiap putaran hingga mencapai energi kinetik yang tinggi.

Komponen siklotron terdiri dari komponen utama dan komponen penunjang. Komponen utama meliputi:

1. Magnet utama: menciptakan medan magnet melingkar untuk mengarahkan partikel.
2. Dee: elektroda yang mempercepat partikel dengan medan listrik bolak-balik.
3. Sumber ion: menghasilkan partikel bermuatan.
4. Sistem RF: memberikan arus bolak-balik pada Dee untuk percepatan optimal.
5. Sedangkan komponen penunjang antara lain:
 - a. Sistem pendingin: mencegah overheating.
 - b. Sistem vakum: mengurangi hambatan udara.
 - c. Sistem kontrol: mengatur parameter siklotron.
 - d. Perisai radiasi: melindungi dari radiasi.
 - e. Detektor partikel: mengukur energi dan arah partikel.
 - f. Sistem target: memastikan partikel digunakan sesuai tujuan.

Siklotron bekerja dengan memanfaatkan medan magnet untuk membelokkan partikel bermuatan dan medan listrik untuk mempercepatnya di lintasan spiral. Frekuensi siklotron disinkronkan agar medan listrik terus mendorong partikel setiap kali melewati celah Dee, sehingga kecepatannya meningkat dan radius lintasannya membesar hingga energi yang diinginkan tercapai. Partikel yang sudah mencapai energi tinggi dapat diekstraksi untuk berbagai aplikasi, termasuk terapi kanker dan produksi isotop medis.

E. Evaluasi

Jawablah pertanyaan berikut ini:

1. Berapa energi proton (dalam MeV) yang dipercepat di dalam medan magnet 1,2 Tesla dan diekstraksi pada radius 40 cm?
2. Berapa massa relativistik proton yang bergerak dengan energi kinetik 30 MeV?
3. Pada radius berapakah (dalam cm) berkas proton harus diekstraksi untuk mencapai energi 18 MeV yang dipercepat di dalam medan magnet 1,5 Tesla?

Jawaban

1. Berapa energi proton (dalam MeV) yang dipercepat di dalam medan magnet 1,2 Tesla dan diekstraksi pada radius 40 cm?

Jawaban:

Energi proton dalam medan magnet dapat dihitung menggunakan hubungan antara gaya Lorentz dan lintasan partikel bermuatan dalam medan magnet melingkar, yang diberikan oleh persamaan:

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \text{ atau } mv = qBr$$

di mana:

- r adalah radius lintasan partikel ($r = 0,4 \text{ m}$)
- q adalah muatan partikel ($q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ untuk proton),
- B adalah kekuatan medan magnet ($B = 1,2 \text{ T}$)

Momentum partikel $p = mv$ dapat dinyatakan dengan energi total E dan energi diam $E_0 = mc^2$:

$$mv = p = \frac{E^2 - E_0^2}{c^2}$$

$$p = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c}$$

Dengan substitusi ini, energi total E dapat dihitung dengan:

$$r = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{qBc} \text{ atau } E^2 = qBrc + E_0^2$$

Langkah-langkah:

1. Hitung energi diam proton: $E_0 = mc^2 = (1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}) \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$
2. Hitung E dalam satuan J, lalu konversi ke MeV
(1 J = $6,242 \times 10^{12}$ MeV)

Mari kita hitung langkah-langkah ini.

Energi total proton yang dipercepat adalah sekitar **949,13 MeV**, sedangkan energi diamnya adalah **938,17 MeV**.

Energi kinetik proton (energi total dikurangi energi diam) adalah sekitar **10,96 MeV**.

2. Berapa massa relativistik proton yang bergerak dengan energi kinetik 30 MeV?

Jawaban:

Untuk menghitung **massa relativistik** proton yang bergerak dengan energi kinetik 30 MeV, kita perlu menggunakan formula relativitas khusus. Berikut langkah-langkahnya:

1. Formula Massa Relativistik

Massa relativistik (m_r) dapat dinyatakan dengan:

$$m_r = \gamma m_0$$

Di mana:

- m_0 adalah massa diam proton ($m_0 = 938.27 \text{ MeV}/c^2$).
- γ adalah faktor Lorentz, yang diberikan oleh:

$$\gamma = 1 + \frac{E}{m_0 c^2}$$

$$\gamma = 1 + \frac{30}{938,27} = 1,032$$

Massa relativistik (m_r) proton = $968,27 \text{ MeV}/c^2$

3. Pada radius berapakah (dalam cm) berkas proton harus diekstraksi untuk mencapai energi 18 MeV yang dipercepat di dalam medan magnet 1,5 Tesla?

Jawaban:

Untuk menghitung radius lintasan proton di dalam medan magnet, kita dapat menggunakan persamaan yang menghubungkan gaya Lorentz,

momentum partikel, dan medan magnet:

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \text{ atau } r = \frac{mv^2}{qB}$$

$$E_t = E_k + E_0$$

Momentum relativistik (p):

$$p = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c}$$

Dengan substitusi parameter yang sudah diketahui diperoleh radius lintasan proton untuk mencapai energi 18 MeV dalam medan magnet 1,5 Tesla adalah sekitar **41,09 cm**.

MATERI POKOK 2: PENGOPERASIAN SIKLOTRON

Indikator Hasil Belajar: mengidentifikasi langkah pengoperasian siklotron

Siklotron adalah salah satu peralatan yang digunakan untuk mempercepat partikel bermuatan seperti proton. Siklotron CS-30 yang berada di Gedung 11 kawasan KST B.J. Habibie, Serpong merupakan siklotron hasil modifikasi dari pemercepat ion positif menjadi ion negatif dengan energi yang dapat divariasi dari 24 MeV hingga 27 MeV. Dalam pengoperasian mesin siklotron perlu mengetahui masing-masing karakteristik dan prinsip kerja dari sub sistem sub sistem mesin siklotron.

Dengan mengetahui karakteristik dan prinsip kerja dari sub sistem mesin siklotron, maka kita dapat mengoperasikan mesin siklotron tersebut secara aman dan efisien. Karakteristik dari mesin siklotron dapat diketahui dari prinsip kerja dari komponen-komponen utama mesin siklotron untuk menghasilkan partikel yang dipercepat.

A. Status/ Keadaan Sistem Siklotron (*Cyclotron System States*)

1. Tipe Status dan Sistem Transisi Siklotron

Dalam pengoperasian sistem siklotron untuk menghasilkan berkas ion energetik untuk iradiasi target dalam berbagai keperluan, dan juga pada pengoperasian sub-sub sistem siklotron dalam rangka mempertahankan kesiapan fungsi operasi sistem siklotron secara keseluruhan, pada umumnya terdapat enam keadaan siklotron yang perlu diketahui dan difahami diantaranya adalah Keadaan *Total Stop* (atau keadaan off), Keadaan *Maintenance*, Keadaan *Standby*, Keadaan *Access*, Keadaan *Beam On* (atau keadaan Aktif) dan Keadaan *Fault*.

a. Keadaan *Total Stop*

Keadaan *Total Stop* biasa disebut juga kondisi *off* atau keadaan berhenti total yaitu merupakan suatu keadaan dimana keseluruhan sub-sistem siklotron dimatikan, termasuk sub-sistem vakum dan sub-sistem pendingin. Biasanya keadaan *Total Stop* ini diperlukan untuk suatu

perbaikan yang besar dan menyeluruh (*overhaul*) yang dapat dilakukan sekali atau dua kali setahun.

b. Keadaan *Maintenance*

Yaitu suatu keadaan yang digunakan untuk melakukan perawatan dasar seperti misalnya penggantian foil *stripper*, penggantian katoda atau anoda sumber ion dan lain-lain. Dalam keadaan *maintenance* ini hanya sistem pompa vakum dan pendingin pompa vakum diffusi yang aktif (ON). Dalam kondisi seperti ini sistem vakum dalam keadaan *standby*, yaitu pompa vakum aktif, tetapi *vacuum chamber* dikosongkan (*venting*).

c. Keadaan *Standby*

Yaitu suatu keadaan dimana siklotron sedang tidak digunakan atau ketika tidak ada iradiasi atau tidak ada permintaan *beam*. Dalam keadaan *standby* ini, *chamber* siklotron masih dipertahankan dalam keadaan vakum tinggi sedangkan semua sub-sistem dimatikan, kecuali sub-sistem vakum dan sub-sistem pendingin.

d. Keadaan *Access*

Siklotron dalam keadaan *access*, yaitu suatu keadaan dimana medan magnet (catu daya magnet utama) dan medan RF pemercepatan dalam keadaan aktif dan teregulasi. Tetapi sumber ion tidak diberikan catu daya (OFF), sehingga tidak menghasilkan berkas (*beam*). Pada keadaan *access* ini, secara umum jalan masuk menuju ke *vault* siklotron terkunci (*interlocked*) dengan sistem RF, yaitu sistem RF ini akan mati jika pintu dibuka paksa. Demikian juga sebaliknya, sistem RF tidak bisa diaktifkan manakala pintu akses masih terbuka. Jadi keadaan *access* ini terpenuhi jika pintu *vault* ditutup, dan jika siklotron dalam keadaan *access* maka akses ke *vault* dilarang. Keadaan ini digunakan untuk penghentian *beam*, sementara magnet dan RF dalam keadaan aktif.

e. Keadaan *Beam On*

Yaitu suatu keadaan dimana semua sistem siklotron dalam keadaan

beroperasi (ON) dan menghasilkan berkas (*beam*).

f. Keadaan *Fault*

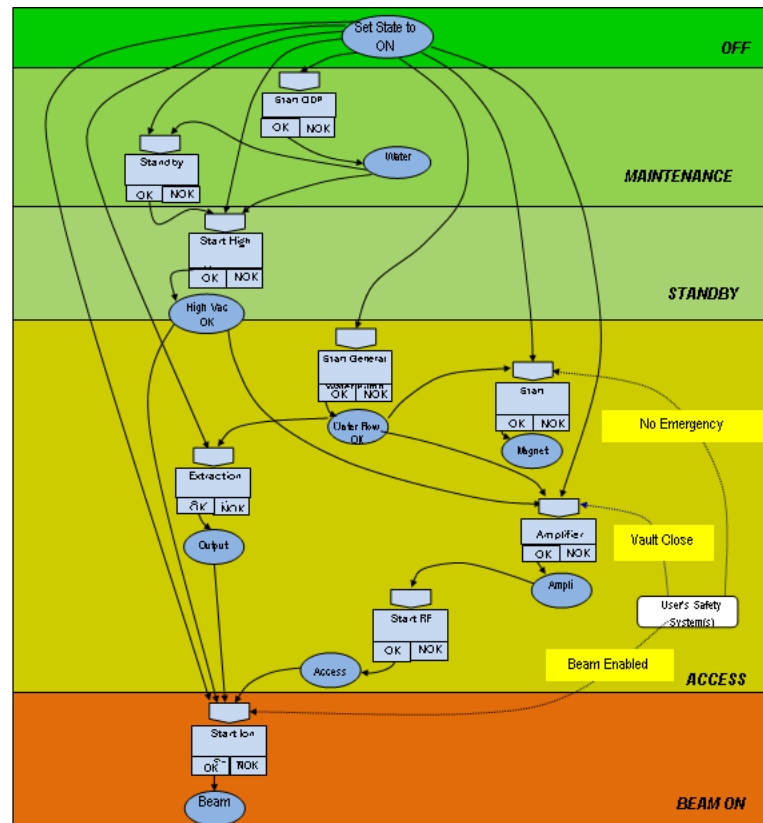
Yaitu suatu keadaan dimana siklotron secara otomatis *shut-down* yang disebabkan adanya *malfunction* atau adanya *error* dalam pengoperasian siklotron.

Untuk beberapa jenis dan tipe siklotron keadaan sistem siklotron ini pada umumnya sama atau hampir sama. Pada siklotron *Cyclone 18/9*, terdapat lima keadaan siklotron yang perlu diketahui, yaitu diantaranya adalah Keadaan *Total Stop*, Keadaan *Maintenance*, Keadaan *Standby*, Keadaan *Access* dan Keadaan *Beam On*. Kelima keadaan tersebut secara rinci dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah. Sedangkan diagram keadaannya ditunjukkan pada Gambar 14.

Tabel 2. Keadaan sistem siklotron Cyclone 18/9

	ODP Water Cooling	Cyclotron Water Cooling	Standby Vacuum	High Vacuum	Magnet	RF	Stripper	Ion Source
Total Stop	off	off	off	Off	off	off	rest position	off
Maintenance	ON		ON	off (vented)	off	off	rest position	off
Standby	ON	off	ON	ON	off	off	indifferent	off
Access	ON	ON	ON	ON	ON	ON	Selected	off
(Beam) ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	Selected	ON

Sumber : *Cyclone 18/9 and 18- Twin Series*
System Description, IBA



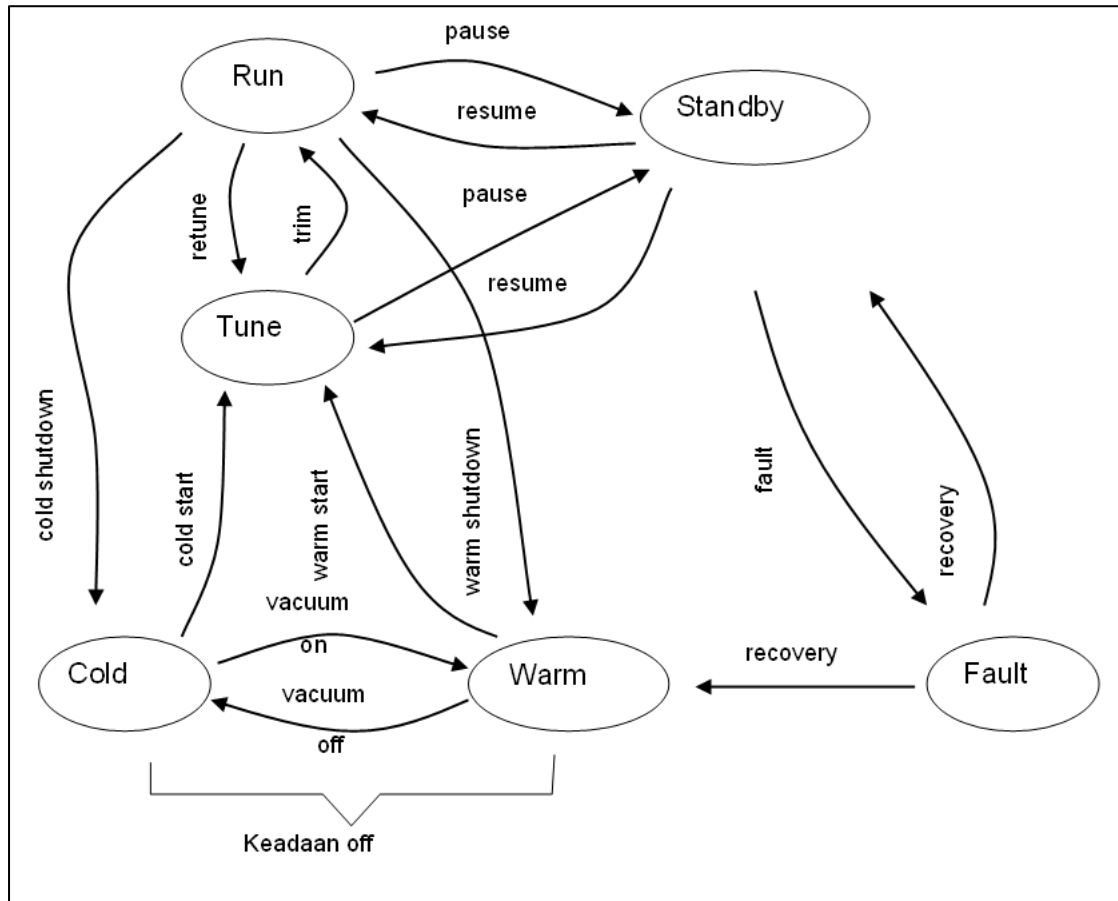
Sumber : Cyclone 18/9 and 18- Twin Series
System Description, IBA

Gambar 14. Diagram Keadaan Sistem Siklotron Cyclone 18/9

Untuk siklotron CS-30 terdapat juga rumusan keadaan dan transisi, dimana rumusan keadaan ini secara umum dapat dikelompokkan menjadi empat tipe keadaan, yaitu :

1. Keadaan *Off* : Semua *equipment* (perangkat) siklotron dalam “off”.
2. Keadaan *Aktif* : Siklotron menghasilkan berkas.
3. Keadaan *Standby* : Berkas dalam keadaan “Off sementara”, atau di hentikan sementara atau di *block* sementara.
4. Keadaan *Fault* : *Equipment* (perangkat) “*shut-down* secara otomatis yang disebabkan adanya *malfunction* atau adanya *error* dalam pengoperasian.

Secara lengkap definisi keadaan sistem siklotron CS-30 ini ditunjukkan pada Tabel 3 sedangkan transisi antar keadaan pada siklotron CS-30 ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Transisi antar keadaan pada siklotron CS-30
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Tabel 3. Definisi keadaan sistem pada siklotron CS-30

Tipe	Nama	Definisi	Keterangan
Kondisi Aktif	→ <i>Tune</i> → <i>Run</i>	Semua perangkat (<i>equipment</i>) pada keadaan <i>tune</i> untuk mendapatkan berkas. Berkas stabil pada target (beam on target).	Ketika melakukan pengaturan (<i>adjusting</i>) perangkat (<i>equipment</i>). Ketika tidak lagi melakukan pengaturan.
Kondisi Off	→ <i>Cold</i> → <i>Warm</i>	Semuanya dalam keadaan off. Semuanya off kecuali "air dan "vakum".	Di perlukan hanya untuk <i>maintenance</i> saja.
Kondisi Standby	→ <i>Short pause</i> → <i>Long pause</i> → <i>Shutter pause</i>	APS off, tetapi yang lain semuanya dalam keadaan on. APS off Sumber ion off Gas off, tetapi yang lain semuanya dalam keadaan on. Berkas berada pada beam stop (shutter).	Dibawah 10 menit. 10 – 30 menit. Indefinite time.
Kondisi Fault	→ <i>Interlock not ready</i> → <i>Interlock ready.</i> → <i>Circuit breaker.</i> → <i>Fuse</i>	Sedikitnya satu catu daya not ready. Catu daya ready. <i>Power supply circuit breaker tripped.</i> <i>Fuse blown</i> (putus).	<i>Refer to the CS-30 Individual equipment manuals.</i>

Pada siklotron CS-30, keadaan sistem siklotron dapat dijelaskan sebagai berikut :

- **Keadaan Off (atau Stop):** Keadaan *Off* (atau *Stop*) terdapat dua keadaan yaitu Keadaan *Off Warm* (atau *Stop Warm*) dan Keadaan *Off Cold* (atau *Stop Cold*). Keadaan *Off Warm* (*Stop Warm*) adalah merupakan keadaan yang normal pada sistem siklotron, sedangkan Keadaan *Off Cold* (*Stop Cold*) hanya digunakan selama dilaksanakannya perawatan (*maintenance*), yaitu dilakukan pada saat membuka *vacuum tank* atau pada saat dilakukannya perbaikan dan atau penggantian komponen sistem vakum atau juga memperbaiki dan atau melakukan penggantian komponen sistem pendingin. Pada kondisi normal, siklotron selalu dipertahankan pada keadaan STOP WARM selama 24 jam sehari. Pada kondisi ini sistem vakum dan pendingin vakum dalam keadaan aktif dan sub-sub sistem yang lain dalam keadaan tidak aktif (*off*). Pada pengoperasian rutin, siklotron selalu dioperasikan dari Keadaan *Stop Warm*.
- **Keadaan Standby:** Keadaan ini digunakan operator untuk melakukan interupsi sementara pada pengoperasian siklotron (*pause*) pada saat *Tune* atau *Run*. Setelah *pause*, siklotron biasanya dikembalikan pada kondisi yang sama sebelum *pause*.
- **Keadaan Aktif:** Ketika *Tune*, adalah melakukan pengaturan (*adjusting*) parameter operasi siklotron melalui meja kontrol untuk memperoleh *beam* yang stabil pada target. Keadaan *Tune* ini dilakukan dengan menggunakan arus berkas yang kecil, yaitu beberapa μA . Sedangkan ketika *Run*, adalah pada saat melakukan iradiasi yaitu *beam on target* dengan arus yang optimal sesuai yang diperlukan. Dalam pengoperasian siklotron, urutan pengoperasian secara normal biasanya dimulai dari Keadaan *Stop* (yaitu selalu dari *Stop Warm*), kemudian *Tune*, dan selanjutnya *Run*. Untuk melakukan pemindahan *beam* dari target satu ke target lainnya, maka yang harus dilakukan pertama kali adalah mengembalikan pada keadaan *Tune*.
- **Keadaan Fault:** *Interlock fault* maka secara otomatis siklotron akan

shutdown. Di dalam sistem siklotron, setiap *power supply* mempunyai *hardware interlock* yang akan mematikan (*shut-off*) power bila terjadi sesuatu yang dapat menyebabkan suatu kerusakan alat atau membahayakan personel (sebagai contoh, jika air pendingin tidak terpenuhi atau pintu *power supply* terbuka). Untuk proteksi tambahan, adalah *circuit breaker* dan *fuse*, dimana *circuit breaker* dan *fuse* ini dapat melindungi peralatan dari kemungkinan memperoleh beban yang berlebih dari utilitas *power supply*. Bila *fault* telah dibetulkan, maka siklotron akan kembali pada keadaan *Stop* atau keadaan Aktif, tergantung dari *fault* yang terjadi.

2. Kemungkinan Terjadinya *Interlock Fault* pada Sistem

a. Fault pada Circuit Breaker dan Fuse

Jika *circuit breaker* mengalami *trip* atau *fuse* putus (terbakar), hal ini mengindikasikan adanya sesuatu yang salah pada perangkat sistem dan perlu dilakukan perbaikan. Untuk kasus seperti ini, maka yang perlu dilakukan adalah *shutdown* dan periksa perangkat sistem, kemudian lakukan perbaikan bila telah ditemukan permasalahannya, ganti *fuse* dan lakukan pengetesan bila diperlukan, kemudian hidupkan kembali perangkat tersebut bila telah siap.

b. Interlock Fault Pada Saat Start-Up

Jika *interlock trip* pada saat *start-up*, hal ini kemungkinan disebabkan adanya kesalahan dalam melakukan urutan pengoperasian perangkat sistem tersebut. Untuk kasus seperti ini, sebenarnya tidak ada masalah apa-apa pada perangkat sistem. Jadi yang perlu diperiksa pada kasus ini adalah *interlock* yang ada pada perangkat tersebut atau yang berhubungan dengan perangkat tersebut. Untuk memperbaiki kesalahan (*fault*) tersebut, maka yang perlu dilakukan adalah :

1. Mematikan *power supply* pada sistem dimana *fault* terjadi,
2. Melakukan sesuatu apabila diperlukan agar persyaratan *interlock* terpenuhi,

3. Menghidupkan kembali *power supply* dimana *fault* terjadi, setelah persyaratan *interlock* tersebut terpenuhi.

Jika terjadi *interlock trip*, dan ditemukan adanya masalah pada perangkat sistem, maka yang perlu dilakukan adalah mematikan (*shut-down*) perangkat sistem dimana *interlock trip* terjadi, kemudian memeriksa perangkat sistem tersebut dan memperbaikinya apabila telah ditemukan permasalahan yang terjadi.

c. *Interlock Fault* Pada Keadaan Aktif atau *Standby*

Interlock Fault pada keadaan aktif atau *standby*, hal ini dapat disebabkan adanya suatu kelainan pada perangkat (*equipment*), dan ini tergantung dari *interlock*-nya. *Interlock trip* yang disebabkan oleh terbukanya pintu, biasanya pemulihannya dapat dilakukan dengan menutup pintu tersebut. Sedangkan untuk *Interlock trip* yang disebabkan oleh adanya penyesatan berkas (*beam stray*), biasanya pemulihannya dilakukan dengan pengaturan berkas (*beam tuning*) pada *beam line*. Namun demikian untuk *interlock-interlock* yang lain perlu dilakukan pemeriksaan dan perlakuan yang sama seperti *fault* pada *circuit breaker* atau *fuse*.

Apabila terjadi *Door Interlock Fault*, ini berarti bahwa pintu *power supply* terbuka. Maka untuk memulihkan kondisi ini, pertama adalah mematikan *power supply*, kemudian tutup kembali pintu *power supply*, dan hidupkan lagi *power supply*.

Sedangkan apabila terjadi *interlock fault* akibat penyesatan berkas, ini berarti terlalu banyak berkas yang dikendalikan menyimpang dari arah yang dikehendaki atau berkas terarah ke tempat yang salah dan dapat mengenai bagian dari komponen saluran berkas (*beam line*). Beberapa komponen saluran berkas ada yang dilengkapi dengan air pendingin, sehingga masih dapat menahan walaupun terkena berkas secara penuh, seperti komponen *beam slits*, *beam shutter*, *beam collimator* dan *target*. Sedangkan untuk komponen yang lain tidak dapat menahan terlalu banyak berkas, seperti misalnya komponen *switching magnet*, *bending magnet*, *steering magnet*, *quadrupole magnet*, *drift tube*. Oleh karena itu *interlock* penyesatan berkas ini perlu ditempatkan pada daerah yang

paling sensitif terhadap berkas dan daerah yang paling memungkinkan terjadinya penyesatan berkas, sehingga *interlock* akan mematikan *power* atau menahan berkas dengan *shutter* manakala arus penyesatan berkas ini terlampaui tinggi melebihi nilai *setting*-nya (biasanya nilai *setting* untuk penyesatan berkas berkisar antara 3 sampai dengan 10 μA).

Untuk memulihkan kondisi dari adanya *interlock fault* akibat penyesatan berkas ini yang perlu dilakukan adalah :

1. Mematikan power supply,
2. Melakukan *start-up* siklotron ulang, tetapi dengan arus berkas yang rendah (dilakukan dengan mengatur *arc current* sumber ion yang rendah),
3. Melakukan *tuning*, yaitu pada saat tuning ini perhatikan besar arus penyesatan berkas pada monitor sambil melakukan pengaturan (*tuning*) komponen *beam line* seperti *steering magnet*, *quadrupole magnet* sehingga diperoleh arus penyesatan berkas yang se-minimal mungkin dan arus berkas pada target yang se-maksimal mungkin.

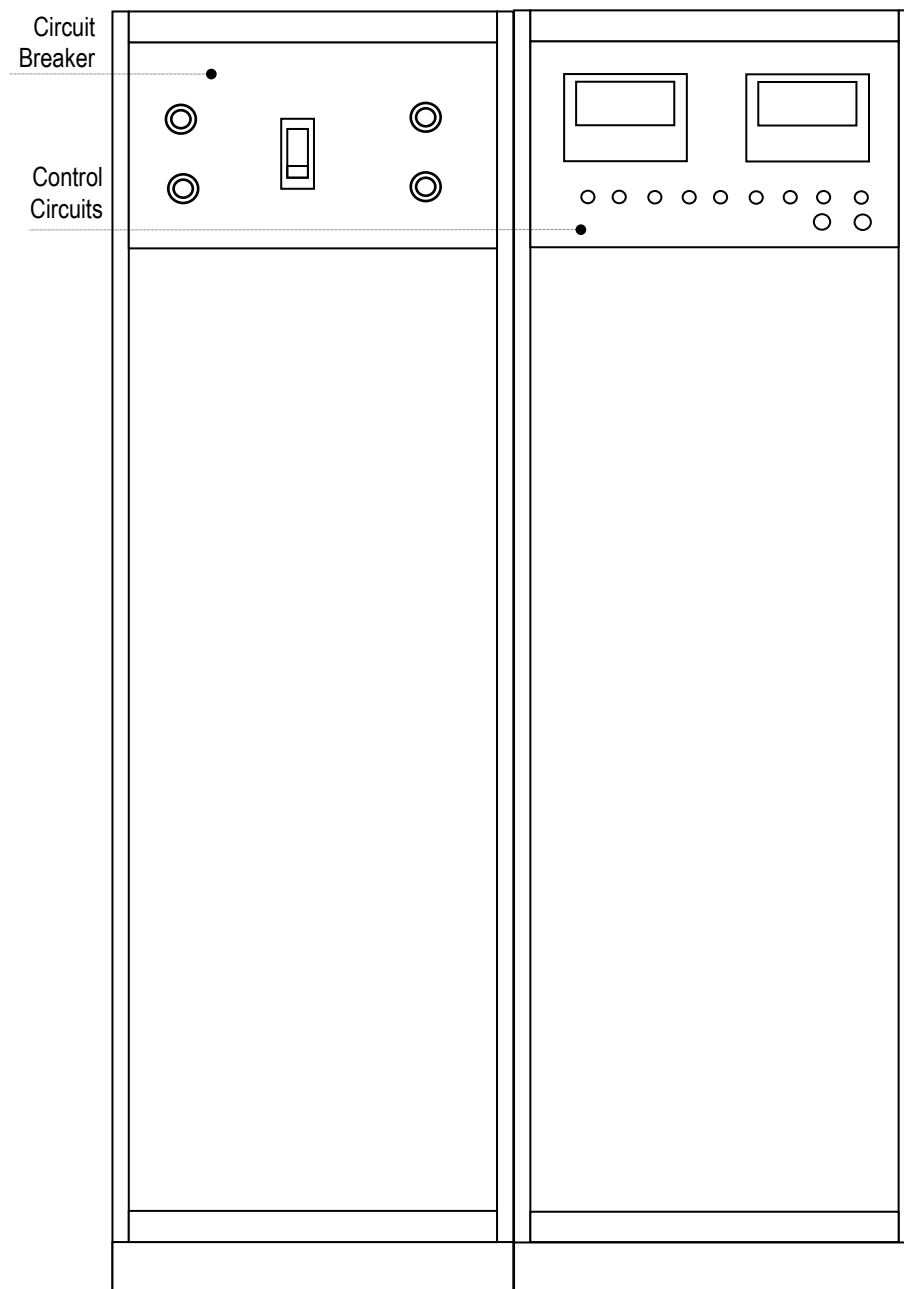
B. Pra-operasi Siklotron

Pre-start siklotron merupakan kegiatan sebelum dimulainya kegiatan *start-up* siklotron. Hal ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa semua kondisi sistem dukung dan sub-sub sistem siklotron yang diperlukan dalam pengoperasian sistem siklotron telah benar-benar siap dan memenuhi syarat untuk dapat dimulainya *start-up* siklotron.

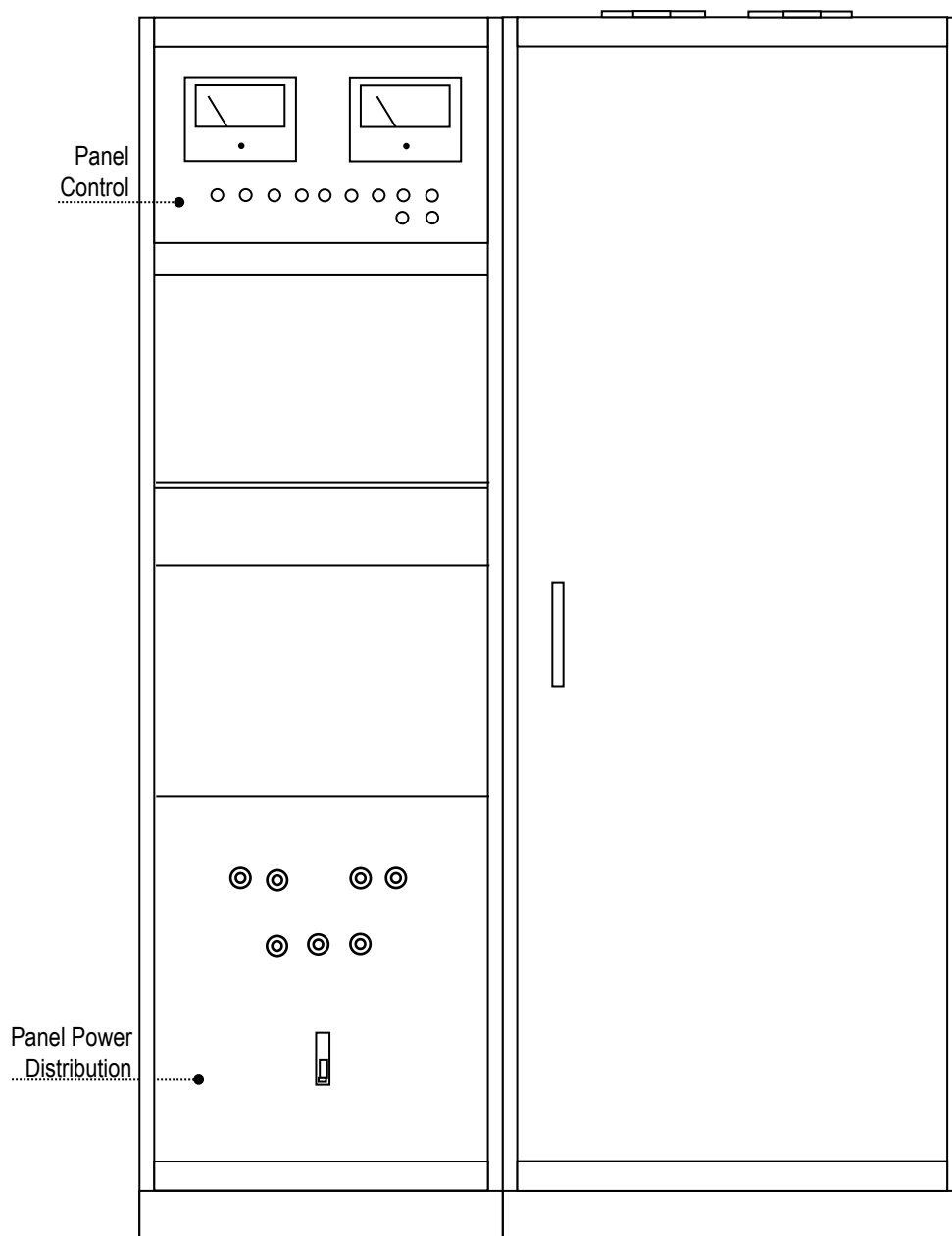
Kegiatan ini diantaranya meliputi :

1. Pengecekan kondisi ruang siklotron, ruang target dan ruang kontrol, yaitu apakah pada ruangan-ruangan tersebut suhu dan humidity ruangan telah terpenuhi untuk melakukan pengoperasian siklotron.
2. Pengecekan sistem air pendingin, yaitu apakah sistem air pendingin dapat beroperasi dengan baik, apakah volume air pendingin pada *reservoir* mencukupi, apakah suhu dan konduktivitas air pendingin tersebut telah memenuhi syarat untuk operasi siklotron.

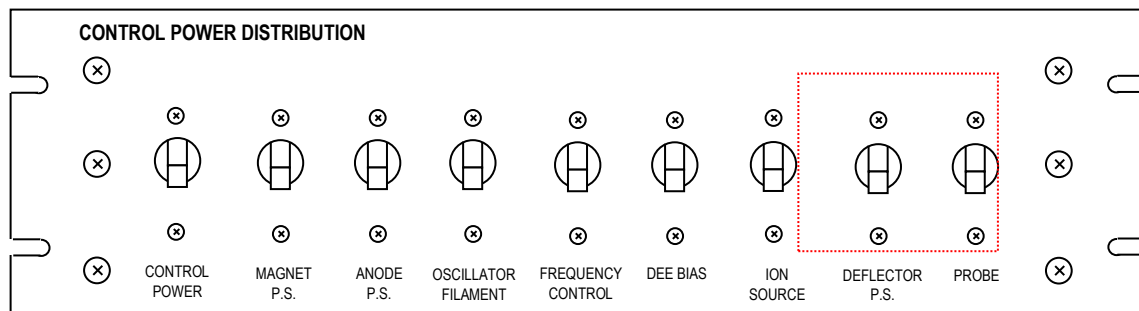
3. Pengecekan udara bertekanan, yaitu apakah tekanan dari sistem udara bertekanan telah memenuhi syarat untuk pengoperasian siklotron maupun *beam line*.
4. Pengecekan *power supply*, yaitu apakah semua *breaker power supply* sub-sub sistem siklotron dan *beam line* sudah pada posisi ON, apakah semua lampu indikator pada *power supply* sub-sub sistem siklotron dan *beam line* tidak ada masalah.
5. Pengecekan tingkat kevakuman, yaitu apakah tingkat kevakuman pada *chamber* siklotron maupun tingkat kevakuman *beam line* telah memenuhi syarat untuk operasi siklotron.
6. Pengecekan semua komponen *beam line*, diantaranya *combo magnet*, *vacuum valve*, *steering magnet*, *quadrupole magnet*, *beam profile monitor*, *beam shutter*, *switching magnet*.
7. Menghidupkan *circuit breaker* pada kabinet “*Main Magnet Power Supply*” dan “*Anode Power Supply*” (Lihat Gambar 16 dan Gambar 17).
8. Menghidupkan “*Control Power Distribution*” yang terdapat pada meja kontrol (Gambar 18).



Gambar 16. Main Magnet Power Supply



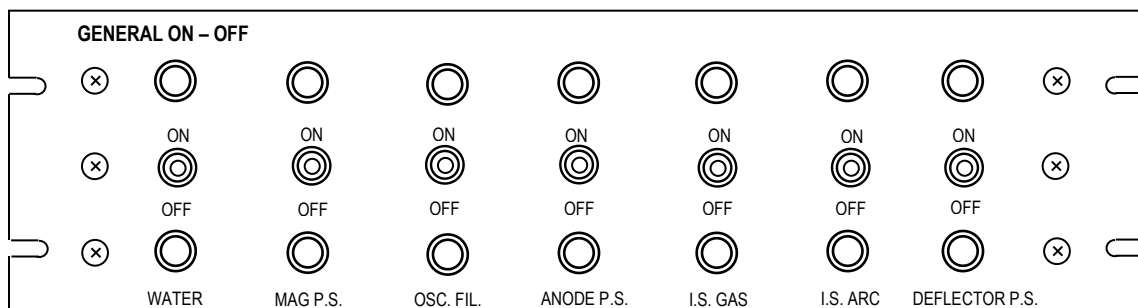
Gambar 17. Anode Power Supply, 1 sampai 10 KV dc pada 6 A



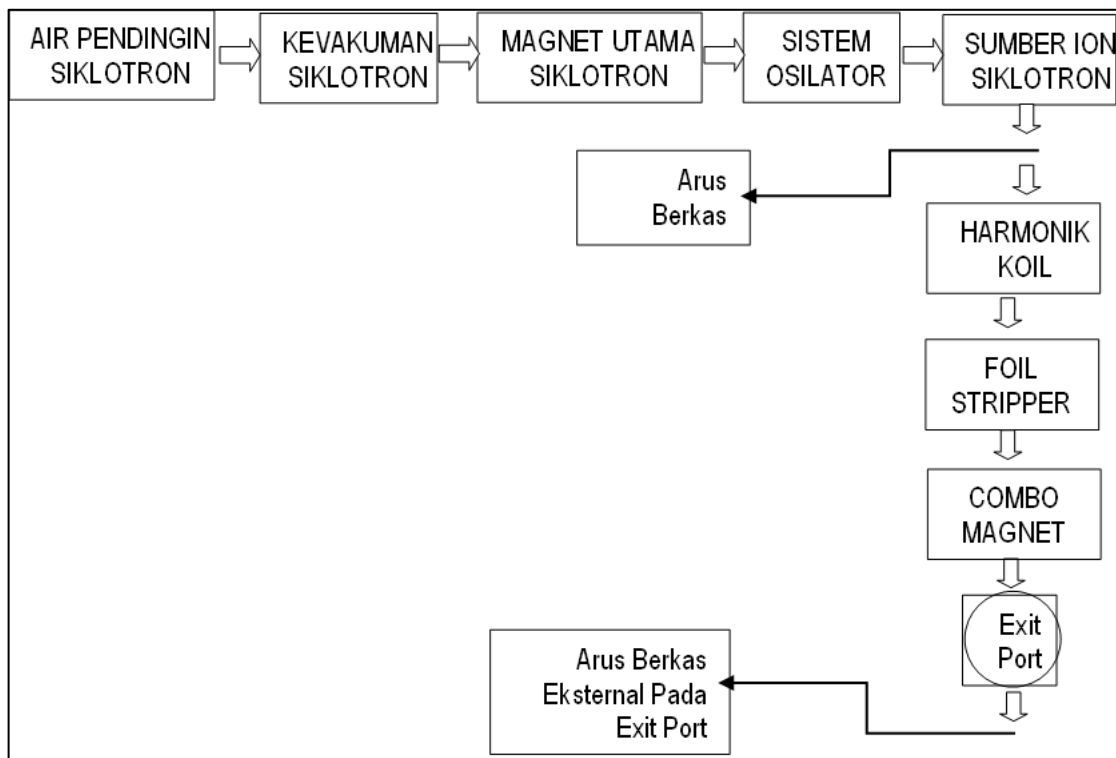
Gambar 18. Panel *Control Power Distribution*.

C. Operasi Siklotron (Start-up)

Pada saat Start-Up ini operator perlu melihat data *RUN* atau *RUN SHEET* operasi siklotron sebelumnya dan melakukan setting parameter operasi siklotron sesuai dengan parameter operasi siklotron dari data *RUN* atau *RUN SHEET* siklotron tersebut. Untuk melakukan kegiatan ini, operator terlebih dahulu perlu menghidupkan panel “*General ON-OFF*” yang terdapat pada meja kontrol (Gambar 19) dengan urutan Start-Up seperti diagram kotak pada Gambar 20.



Gambar 19. Panel *General On-Off*

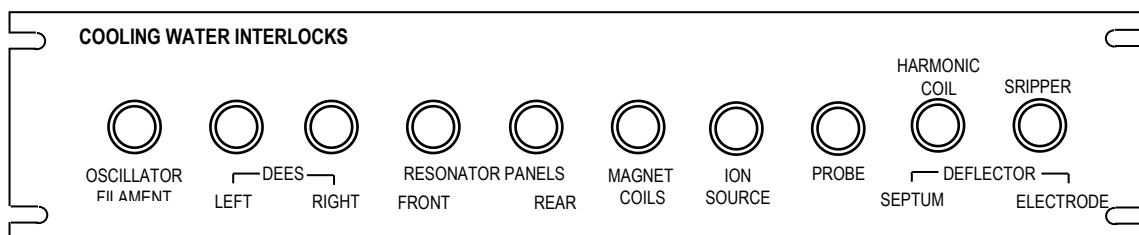


Gambar 20. Tahap Pengoperasian Siklotron
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

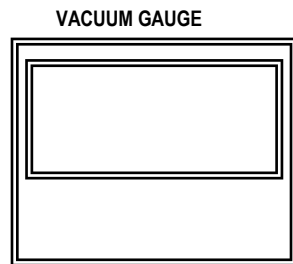
Tahapan Pengoperasian/ Start-Up Siklotron :

1. Menghidupkan pompa air pendingin (pompa air besar) dengan : Water “ON”, kemudian diamati panel “*Cooling Water Interlocks*” (Gambar 21) yang memberikan informasi tentang status “*interlock water flow*”, bila lampu indikator pada panel semuanya nyala, maka berarti bahwa flow air pendingin telah mencukupi.
2. Menghidupkan meter vakum (*vacuum gauge*), yang terdapat pada panel kontrol. Panel meter vakum ini dapat juga dihidupkan pada saat *Pre-start* siklotron (Gambar 22).
3. Menghidupkan *power supply* magnet : Magnet *Power Supply* “ON”, naikan dial COARSE (lihat Gambar 23) untuk beberapa strip kemudian menunggu “*time delay*” dari *power supply*, apabila *time delay* ini sudah tercapai yang ditandai dengan naiknya meter arus dan kemudian turun lagi pada nilai tertentu, kemudian dilanjutkan dengan menaikkan dial COARSE *power supply* sesuai dengan nilai pada RUN SHEET sebelumnya. Start-Up magnet utama ini harus diselesaikan dahulu sebelum menghidupkan APS.

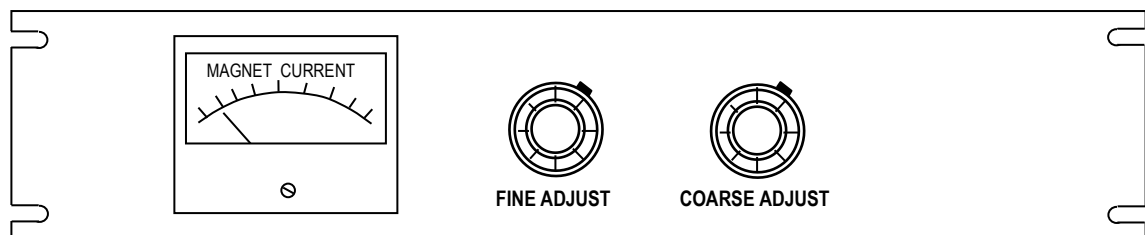
4. Menghidupkan *Oscillator Filament* (Osc. Fillament ON). Untuk operasi berkas proton, maka posisi Anode Inductor dioperasikan pada posisi IN (lihat Gambar 24).
5. Anode Power Supply ON, dan kemudian menaikkan tegangan Dee, sampai pada nilai yang terdapat pada RUN SHEET sebelumnya. Amati frekuensi osilator pada panel "*Frequency Counter*". Pada awal tegangan Dee dinaikkan, meter frekuensi mungkin akan menunjukkan frekuensi yang tidak stabil dan ini merupakan kejadian yang normal. Apabila tegangan Dee dinaikkan lagi maka frekuensi osilator akan stabil.
6. Untuk tuning mendapatkan arus berkas internal, posisikan *beam probe* pada radius sekitar 15 sampai 20 cm.
7. Menghidupkan Sumber Ion : Ion Source "ON" , setel aliran gas (*gas flow*) pada sekitar 5 sccm, *Arc-current* sumber ion dapat diatur antara 0 sampai dengan 5 A.
8. Untuk tuning siklotron pada arus berkas internal, dilakukan dengan memberikan *Arc-current* sumber ion yang kecil, sedemikian rupa sehingga arus berkas pada beam probe antara 2 sampai dengan 10 μ A.
9. Pembacaan arus berkas internal dilakukan dari panel meter arus berkas ("*Beam Current*") dengan memposisikan *INPUT* pada *Beam Probe*. Untuk memudahkan pembacaan, meter arus ini dapat diatur dengan memilih jangkauan pembacaan arus ("*range*") yang sesuai (Gambar 25).



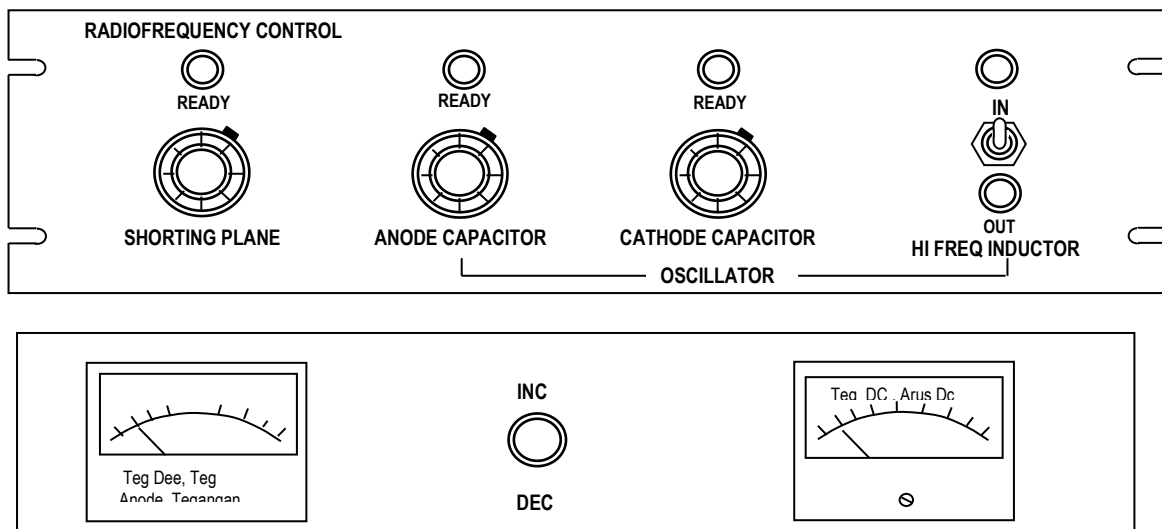
Gambar 21. Panel *Cooling Water Interlock*



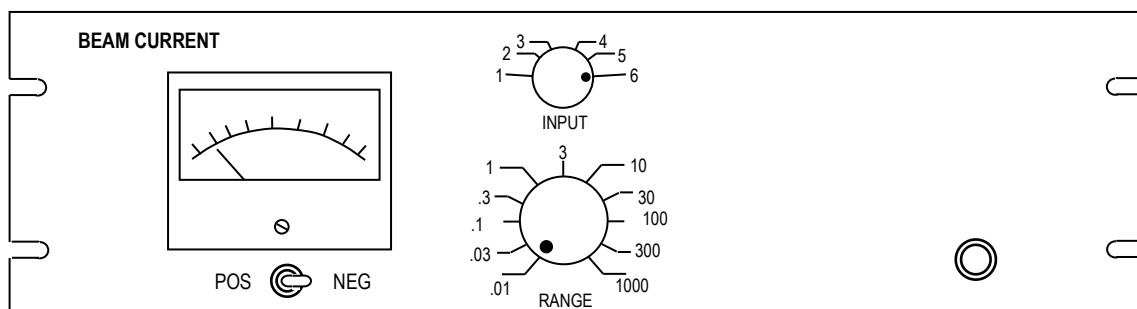
Gambar 22. Panel *Vacuum Gauge*



Gambar 23. Panel kontrol arus magnet.

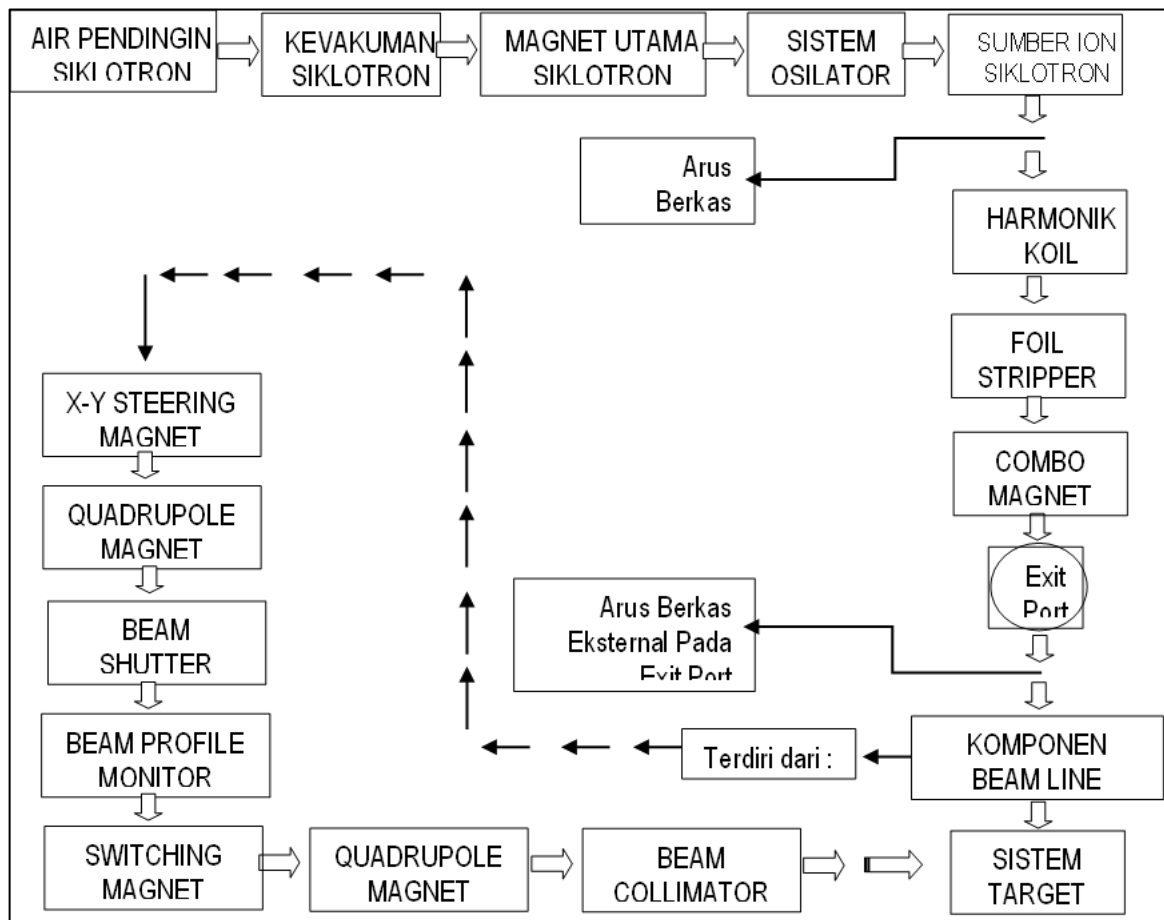


Gambar 24. Panel kontrol radiofrekuensi

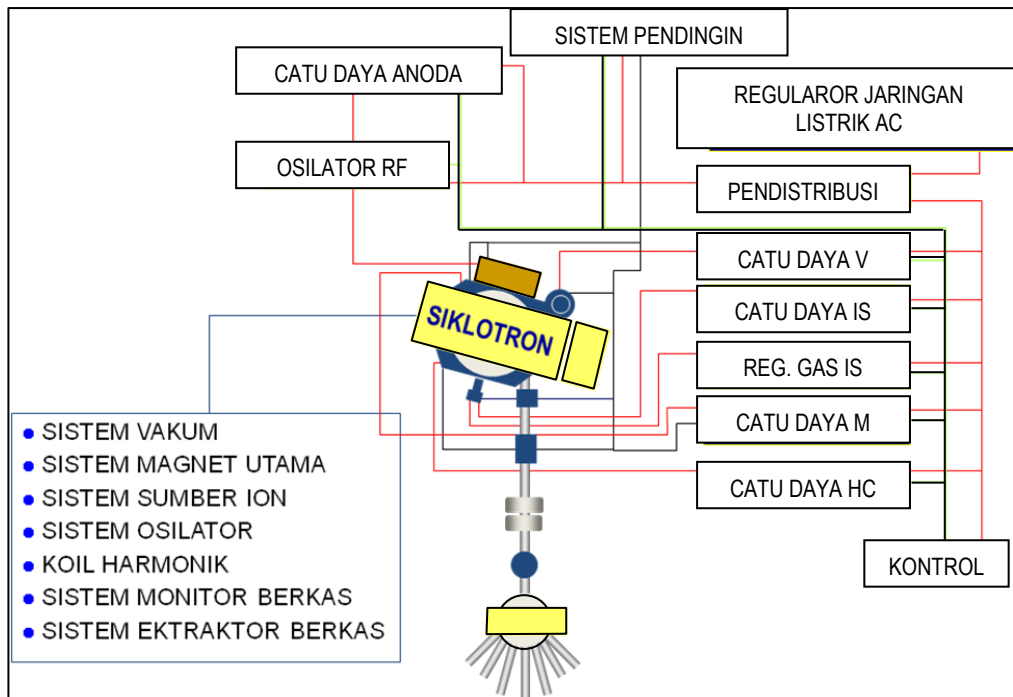


Gambar 25. Panel meter *Beam Current*

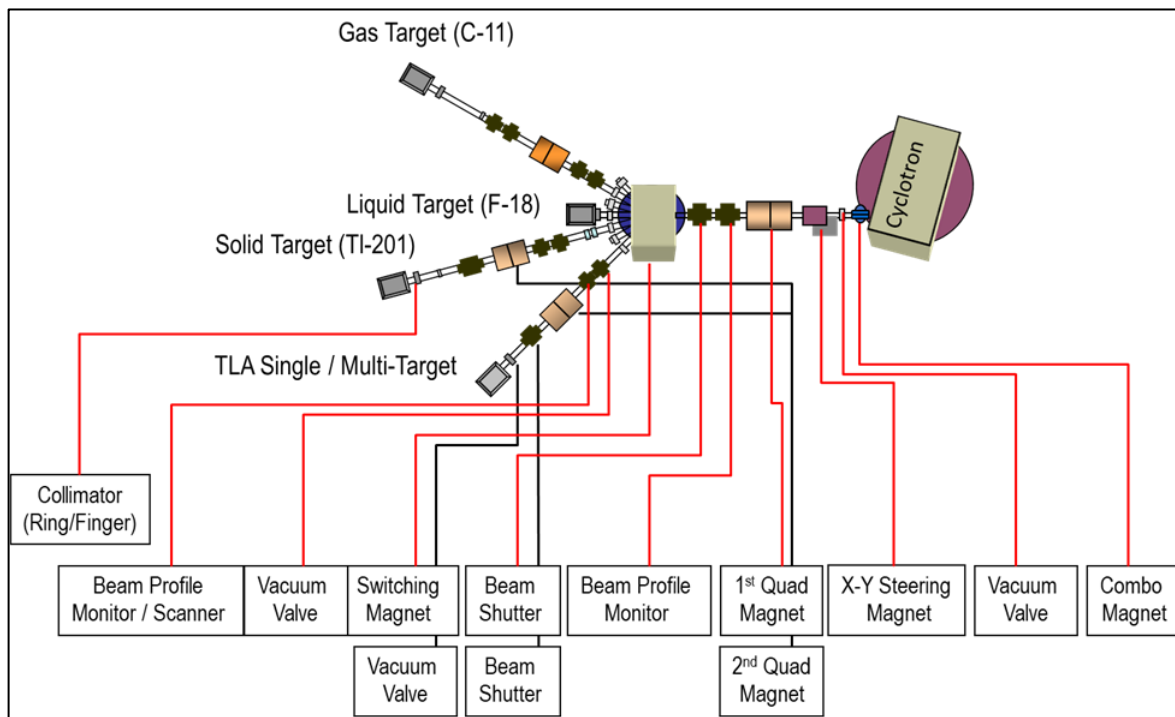
Urutan start-up pengoperasian siklotron CS-30 secara keseluruhan sampai beam pada target ditunjukkan pada diagram kotak Gambar 26. Sedangkan jalur pengontrolan pada siklotron CS-30 BRIN dan *beam line* (sistem transport berkas) ditunjukkan pada Gambar 27 dan Gambar 28.



Gambar 26. Urutan Start-Up Siklotron CS-30 secara keseluruhan dari sampai beam pada target
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN



Gambar 27. Jalur pengontrolan pada siklotron CS-30 gedung 11
 . Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN



Gambar 28. Jalur pengontrolan transport berkas pada siklotron CS-30 gedung 11
 Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

D. Pasca-operasi Siklotron

Pada pasca-operasi siklotron CS-30 gedung 11 KST B. J. Habibie, Serpong, berikut adalah tahapan yang harus dilakukan, yaitu:

1. Menurunkan *Arc-current* dan mematikan sumber ion
2. Mematikan Anode Power Supply
3. Mematikan *Oscillator Filament*
4. Mematikan sistem magnet utama siklotron
5. Melakukan transfer target yang telah di iradiasi ke dalam hotcell
6. Mematikan sistem vakum target padat
7. Mematikan sistem vakum beam transport
8. Melakukan proses pendinginan sistem sekitar 25 menit untuk memastikan pendinginan optimal.
9. Mematikan sistem vakum siklotron
10. Mematikan sistem pendingin siklotron
11. Mematikan sistem udara bertekanan

E. Rangkuman

Dalam pengoperasian sistem siklotron untuk menghasilkan berkas ion energetik untuk iradiasi target dalam berbagai keperluan, dan juga pada pengoperasian sub-sub sistem siklotron dalam rangka mempertahankan kesiapan fungsi operasi sistem siklotron secara keseluruhan, pada umumnya terdapat enam keadaan siklotron yang perlu diketahui dan dipahami diantaranya adalah

1. Keadaan *Total Stop* (atau keadaan off),
2. Keadaan *Maintenance*,
3. Keadaan *Standby*,
4. Keadaan *Access*,
5. Keadaan *Beam On* (atau keadaan Aktif) , dan
6. Keadaan *Fault*.

Pre-start siklotron merupakan kegiatan sebelum dimulainya kegiatan start-up siklotron. Hal ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa semua kondisi sistem dukung dan sub-sub sistem siklotron yang diperlukan dalam pengoperasian sistem siklotron telah benar-benar siap dan memenuhi syarat.

Pada saat Start-Up ini operator perlu melihat data *RUN* atau *RUN SHEET* operasi siklotron sebelumnya dan melakukan setting parameter operasi siklotron sesuai dengan parameter operasi siklotron dari data *RUN* atau *RUN SHEET* siklotron, agar saat mengoperasikan siklotron berjalan lancar dan aman.

Pada saat pasca-operasi (start-up) siklotron merupakan kegiatan untuk melakukan pengiriman target setelah selesai dilakukan iradiasi dan memastikan bahwa sistem siklotron telah di offkan dan dilakukan pendinginan.

F. Evaluasi

1. Suatu keadaan dimana semua sistem siklotron dalam keadaan beroperasi (ON) dan menghasilkan berkas (*beam*). Keadaan seperti ini pada umumnya disebut sebagai ...
 - a. Keadaan *Standby*
 - b. Keadaan *Access*
 - c. Keadaan beam on
 - d. Keadaan *Fault*

Jawaban: c

2. Suatu kegiatan yang dilakukan sebelum dimulainya pengoperasian siklotron yang diperlukan untuk meyakinkan bahwa semua kondisi sistem dukung dan sub sistem siklotron telah benar-benar siap dan memenuhi syarat untuk dapat dimulainya pengoperasian siklotron, disebut sebagai kegiatan
 - a. Rutin
 - b. *Start-up* Siklotron
 - c. Preventive Maintenance
 - d. *Pre-start* siklotron

Jawaban: d

3. Urutan start-up siklotron yang tepat adalah ...
 - a. Sistem Vakum→ Sistem Pendingin→ Sistem Magnet→Sistem Osilator→ Sistem Sumber Ion
 - b. Sistem Magnet → Sistem Vakum → Sistem Pendingin → Sistem Osilator → Sistem Sumber Ion
 - c. Sistem Sumber Ion→ Sistem Osilator→ Sistem Magnet→ Sistem Vakum → Sistem Pendingin
 - d. Sistem Pendingin→ Sistem Vakum → Sistem Magnet → Sistem Osilator → Sistem Sumber Ion

Jawaban: d

4. Suatu keadaan dimana chamber siklotron mempunyai tingkat kevakum tinggi sedangkan semua sub-sistem dimatikan (kecuali sub-sistem vakum dan sub-sistem pendingin) dan siklotron sedang tidak digunakan atau tidak ada iradiasi. Keadaan seperti ini pada umumnya disebut sebagai ...
- a. Keadaan *Standby*
 - b. Keadaan *Access*
 - c. Keadaan *Maintenance*
 - d. Keadaan *Fault*

Jawaban: a

MATERI POKOK 3:

PEMANFAATAN SIKLOTRON

Indikator Hasil Belajar: menyebutkan pemanfaatan siklotron

A. Pemanfaatan di Bidang Medis

Pemanfaatan siklotron dalam bidang medis telah berkembang pesat dan memberikan dampak signifikan pada peningkatan kualitas diagnostik dan terapi di dunia kesehatan, terutama kedokteran nuklir. Siklotron adalah alat akselerator partikel yang dapat mempercepat ion atau partikel subatomik hingga mencapai energi tinggi, sehingga memungkinkan produksi radioisotop medis yang sangat diperlukan dalam *imaging* diagnostik dan pengobatan kanker. Berikut ini tabel beberapa manfaat siklotron di bidang medis yang dikelompokkan berdasarkan energi partikel yang dipercepat. (Tabel 4).

Tabel 4. Pengelompokan manfaat siklotron di bidang medis berdasarkan energi partikel

Energi partikel yang dipercepat	Jenis Pemanfaatan	Deskripsi pemanfaatan	Contoh radioisotop/terapi
Rendah (5-20 MeV)	Produksi Radioisotop untuk Imaging Diagnostik	Menghasilkan radioisotop dengan energi rendah yang ideal untuk teknik imaging seperti PET dan SPECT	Fluor-18, Carbon-11, Nitrogen-13, Oxygen-15
Sedang (20-70 MeV)	Produksi Radioisotop untuk Terapi dan Diagnostik	Digunakan untuk memproduksi radioisotop yang digunakan dalam terapi kanker atau untuk aplikasi diagnostik khusus	Iodin-123, Gallium-67, Thallium-201
Tinggi (>70 MeV)	Terapi Proton (Proton Therapy)	Memanfaatkan proton yang dipercepat hingga energi tinggi untuk menghancurkan sel kanker dengan lebih presisi	Proton (untuk terapi kanker)
Sangat (120-250 MeV)	Hadron Therapy (Termasuk Proton dan Ion Karbon)	Terapi yang menggunakan ion berat, seperti proton dan ion karbon, untuk meningkatkan efektifitas dalam terapi kanker	Proton dan Ion Karbon

Siklotron energi rendah (5-20 MeV) dan sedang (20-70 MeV) memiliki peran penting dalam produksi radioisotop untuk diagnostik medis, terutama dalam bidang pencitraan nuklir seperti Positron Emission Tomography (PET) dan Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT). Kedua modalitas pencitraan tersebut memanfaatkan radiasi sinar gamma yang dipancarkan dari proses peluruhan radionuklida dengan menggunakan kamera gamma, namun ada beberapa perbedaan penting dalam kedua modalitas tersebut. Dalam modalitas PET, radionuklida yang digunakan adalah radionuklida pemancar partikel positron (β^+) sedangkan dalam modalitas SPECT, radionuklida yang digunakan adalah radionuklida pemancar gamma. Lalu bagaimana sinar gamma bias dideteksi dari radionuklida pemancar positron? Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut: partikel positron adalah antimateri dari elektron yang sangat tidak stabil dan cenderung untuk berinteraksi dengan elektron disekitarnya. Akibat interaksi positron dan elektron, terjadilah anihilasi (penggabungan) antara kedua partikel tersebut. Selanjutnya dari anihilasi ini dihasilkan dua sinar gamma dengan energi 511 keV yang arahnya saling berlawanan. Sinar gamma dari proses anihilasi inilah yang kemudian ditangkap oleh kamera gamma untuk modalitas PET.

Beberapa radioisotop PET yang dapat diproduksi dengan siklotron energi rendah beserta energi ambang yang diperlukan untuk memproduksinya dan kegunaannya di bidang medis ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Beberapa radionuklida pemancar positron yang dapat digunakan untuk diagnosis dengan modalitas PET

Radio-nuklida	Mode reaksi nuklir	Energi ambang (MeV)	Waktu paruh	Kegunaan
O-15	$^{15}\text{N}(\text{p},\text{n})^{15}\text{O}$	9.3	122,24 detik	Pencitraan otak
C-11	$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$	3.1	20,36 menit	Pencitraan penyakit Alzheimer's dan Parkinson
N-13	$^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{13}\text{N}$	5.6	9,96 menit	Pencitraan hati
F-18	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	3.7	109,77 menit	Pencitraan tumor, kanker metastatis, otal, Alzheimer's, Parkinson, hati, tumor neuroendokrin, kanker prostat, kanker payudara, dan lain-lain
Cu-64	$^{64}\text{Ni}(\text{p},\text{n})^{64}\text{Cu}$	2.7	12,70 jam	Pencitraan kanker prostat, payudara,

Radio-nuklida	Mode reaksi nuklir	Energi ambang (MeV)	Waktu paruh	Kegunaan
				penyakit Wilson's
Y-86	$^{86}\text{Sr}(p,n)^{86}\text{Y}$	6,3	14,74 jam	Radiosinovektomi
I-124	$^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$	4.0	4,18 hari	Pencitraan kanker tiroid, payudara, kolorektal, ovarium dan neuroblastoma
I-123	$^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$	11,52	13,22 jam	Pencitraan kanker tiroid, payudara, kolorektal, ovarium dan neuroblastoma
Ga-67	$^{67}\text{Zn}(p,n)^{67}\text{Ga}$	1.98	3,26 hari	Penyakit infeksi, studi darah
Co-57	$^{58}\text{Ni}(p,2p)^{57}\text{Co}$	8.3	271,74 hari	Studi anemia
Ga-68	$^{68}\text{Zn}(p,n)^{68}\text{Ga}$	3.94	67,71 menit	Pencitraan tumor neuroendokrin, kanker prostat
Zr-89	$^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$	4,25	78,41 jam	Pencitraan tumor, kanker
Y-86	$^{86}\text{Sr}(p,n)^{86}\text{Y}$	6,3	14,74 hari	Pencitraan tumor, kanker

Dalam modalitas SPECT digunakan radionuklida pemancar gamma dengan rentang energi gamma antara 80 sampai dengan 250 keV untuk menghasilkan citra yang optimal. Saat ini, lebih dari 80% kedokteran nuklir di dunia menggunakan Tc-99m untuk pencitraan berbagai kelainan organ tubuh. Beberapa radionuklida pemancar gamma yang digunakan dalam modalitas SPECT beserta kegunaannya diberikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Beberapa radionuklida pemancar gamma yang dapat digunakan untuk diagnosis dengan modalitas SPECT

Radio-nuklida	Mode reaksi nuklir	Energi ambang (MeV)	Waktu paruh	Energi gamma (keV)	Kegunaan
I-123	$^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$	11,5	13,2 jam	158,97	Pencitraan tiroid, ginjal, studi darah
In-111	$^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$	11,1	2,8 hari	171,28; 245,35	Pencitraan tumor neuroendokrin, kanker prostat
Tc-99m	$^{100}\text{Mo}(p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$	7,8	6 jam	89,6	Pencitraan otak, stroke, perfusi paru-paru, ginjal, tumor neuroendokrin, tiroid, studi darah, jantung, kanker payudara, kanker servik, penyakit infeksi

Untuk tujuan terapi, dapat digunakan radionuklida yang dalam proses peluruhannya memancarkan beta, alfa, maupun elektron Auger, meskipun diketahui bahwa radionuklida pemancar alfa mempunyai daya rusak yang lebih besar terhadap sel target (kanker) dan tidak merusak sel jaringan normal disekitarnya karena jangkauan partikel alfa sangat pendek, sehingga radionuklida pemancar alfa sangat tepat digunakan untuk *targeted therapy*. Beberapa radionuklida yang digunakan untuk terapi tersebut dapat diproduksi dengan siklotron energi sedang seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 7. Beberapa radionuklida untuk terapi yang dapat diproduksi dengan siklotron energi sedang

Radio-nuklida	Mode reaksi nuklir	Energi ambang (MeV)	Waktu paruh	Partikel yang dipancarkan
Pd-103	$^{103}\text{Rh}(p,n)^{103}\text{Pd}$	1,46	17 hari	Elektron Auger
At-211	$^{211}\text{Bi}(\alpha,2n)^{211}\text{At}$	19,36	7,2 jam	α
Ac-225	$^{226}\text{Ra}(p,2n)^{225}\text{Ac}$	6,85	10 hari	α
Cu-67	$^{70}\text{Zn}(p,\alpha)^{67}\text{Cu}$	0	2,6 hari	β
Y-90	$^{90}\text{Rb}(p,n)^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$	0	64 jam	β
Re-186	$^{186}\text{W}(p,n)^{186}\text{Re}$	1,43	3,72 hari	β

Dalam konteks terapi proton, siklotron digunakan untuk menghasilkan proton dengan energi tinggi yang kemudian diarahkan ke tumor pasien untuk menghancurkan sel kanker secara presisi. Keunggulan terapi proton di antaranya adalah:

1. Presisi Tinggi: Proton memiliki sifat *Bragg Peak*, di mana sebagian besar energinya dilepaskan pada kedalaman tertentu, sehingga memungkinkan kerusakan minimal pada jaringan sehat di sekitar tumor.
2. Efek Samping Rendah: Dibandingkan dengan radiasi konvensional (seperti sinar X), terapi proton lebih aman untuk jaringan sensitif, seperti mata, otak, atau area dekat organ vital.
3. Efisiensi Energi: Siklotron mampu menghasilkan aliran proton dengan energi stabil, ideal untuk aplikasi medis.

Siklotron dengan energi sangat tinggi (120–250 MeV) digunakan dalam terapi hadron, khususnya untuk terapi proton dan terapi ion karbon. Teknologi ini

memanfaatkan partikel bermuatan (proton atau ion berat) dengan energi yang cukup tinggi untuk menembus jaringan tubuh dan mencapai tumor yang berada jauh di dalam tubuh, sekaligus menghasilkan efek destruktif pada sel kanker dengan kerusakan minimal pada jaringan sehat. Terapi hadron adalah bentuk terapi radiasi yang menggunakan partikel bermuatan (proton atau ion berat seperti karbon, helium, atau oksigen) untuk menghancurkan sel kanker.

Beberapa manfaat penting dari terapi hadron dengan energi tinggi (120-250 MeV) antara lain:

1. Penetrasi yang dalam. Energi tinggi memungkinkan partikel menembus jaringan tubuh hingga kedalaman 30 cm, menjadikannya efektif untuk mengobati tumor yang terletak di area dalam seperti otak, tulang belakang, atau organ vital lainnya.
2. Presisi tinggi dengan Bragg Peak. Fenomena *Bragg Peak* memungkinkan partikel melepaskan energi maksimal di lokasi tertentu dalam tubuh. Ini meminimalkan kerusakan pada jaringan sehat di sekitar tumor.
3. Efek biologis tinggi. Pada terapi ion karbon, ion berat menghasilkan kerusakan DNA yang lebih sulit diperbaiki oleh sel kanker dibandingkan proton, menjadikannya lebih efektif untuk tumor yang resisten terhadap terapi konvensional.

B. Pemanfaatan di Bidang Industri

Pemanfaatan teknologi siklotron di industri non-medis semakin menunjukkan potensi besar untuk mendukung berbagai sektor. Siklotron, sebagai alat akselerator partikel yang mampu mempercepat ion hingga kecepatan tinggi, pada awalnya dikembangkan untuk kepentingan penelitian fisika partikel dan medis. Namun, perkembangan teknologi ini membawa peluang baru dalam aplikasi di luar bidang kesehatan. Industri-industri seperti pertambangan, manufaktur, pertanian, dan lingkungan mulai merasakan manfaat dari teknologi siklotron, terutama dalam hal analisis material, modifikasi material, dan peningkatan keamanan serta efisiensi proses produksi.

Dalam sektor pertambangan dan manufaktur, siklotron dapat digunakan untuk analisis material melalui teknik analisis aktivasi neutron (NAA) dan fluoresensi

sinar-X. Ini memungkinkan identifikasi unsur-unsur kimia dengan tingkat akurasi tinggi, sehingga membantu dalam eksplorasi sumber daya dan kontrol kualitas produksi. Di bidang pertanian, siklotron berperan dalam penelitian pemuliaan tanaman, khususnya dalam mempercepat proses mutasi yang berguna untuk mengembangkan varietas tanaman unggul. Di sektor lingkungan, siklotron digunakan untuk mendeteksi dan mengukur tingkat polutan dalam air atau tanah, membantu dalam pelestarian lingkungan dan pengendalian pencemaran.

Pemanfaatan siklotron dalam industri non-medis tidak hanya membuka peluang inovasi baru, tetapi juga menawarkan pendekatan yang lebih efektif dan ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional. Dengan teknologi ini, berbagai sektor industri dapat meningkatkan produktivitas, menurunkan biaya operasional, dan mencapai tujuan yang lebih berkelanjutan.

Berikut ini adalah tabel pemanfaatan siklotron di bidang industri non medis berdasarkan energi partikel yang dipercepat. (Tabel 8)

Tabel 8. Pengelompokan manfaat siklotron di bidang industri berdasarkan energi partikel

Energi partikel (MeV)	Jenis partikel yang dipercepat	Pemanfaatan industri	Contoh aplikasi
>10	Proton, Deuteron	Analisis material	Analisis lapisan tipis, pengujian material
10-30	Proton, Deuteron	Modifikasi material	Doping silikon, pengembangan semikonduktor
30-50	Proton, Deuteron, Partikel alfa	Modifikasi material, radiasi polimer	Cross-linking polimer, pengerasan plastik
50-100	Proton, Deuteron	Radiasi lingkungan, keamanan nuklir	Deteksi bahan peledak, pengujian struktur logam
>100	Proton	Produksi isotop industri	Produksi isotop untuk sensor dan pemancar industri

Penjelasan Pemanfaatan:

1. **Analisis Material:** Siklotron dengan energi rendah digunakan untuk menganalisis karakteristik material, seperti ketebalan lapisan atau komposisi kimia, terutama untuk industri elektronik dan manufaktur.

2. **Modifikasi Material:** Energi menengah memungkinkan modifikasi sifat fisik dan kimia material, seperti perubahan sifat mekanik polimer dan proses implantasi ion untuk pembuatan semikonduktor.
3. **Produksi Isotop Industri:** Energi tinggi pada siklotron dapat memproduksi isotop stabil yang digunakan untuk keperluan industri, seperti pelacakan dan pengujian korosi.

Pemanfaatan siklotron ini terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi akselerator dan kebutuhan industri.

C. Rangkuman

Siklotron dapat dimanfaatkan di bidang medis dan industri. Di bidang medis, siklotron digunakan untuk memproduksi radioisotop yang mendukung diagnosis dan terapi, terutama dalam kedokteran nuklir. Teknologi ini memfasilitasi teknik *imaging* seperti PET dan SPECT, serta terapi kanker melalui terapi proton dan hadron (ion karbon). Radioisotop dihasilkan sesuai energi partikel: rendah (5-20 MeV) untuk imaging diagnostik (misalnya, Fluor-18), sedang (20-70 MeV) untuk terapi kanker (Iodin-123), dan tinggi (>70 MeV) untuk terapi proton.

Siklotron mendukung sektor industri seperti pertambangan, manufaktur, dan lingkungan. Teknologi ini membantu dalam analisis material, modifikasi sifat material, serta produksi isotop industri. Siklotron berenergi rendah digunakan untuk analisis material (misalnya, analisis lapisan tipis), sementara energi menengah memfasilitasi modifikasi material (seperti doping silikon). Energi tinggi memungkinkan produksi isotop yang digunakan di berbagai aplikasi industri. Siklotron berperan dalam meningkatkan efisiensi proses produksi, keamanan, serta ramah lingkungan dalam berbagai industri.

D. Evaluasi

1. Sebutkan manfaat siklotron di bidang medis
2. Sebutkan manfaat siklotron di bidang industri
3. Siklotron yang mempercepat berkas proton 11 MeV dapat dimanfaatkan untuk apa saja?

Jawaban:

1. Manfaat siklotron di bidang medis, yaitu produksi radioisotop untuk Imaging Diagnostik, Terapi Diagnostik, dan Terapi Proton.
2. Manfaat siklotron di bidang industri, yaitu analisis material, modifikasi material, radiasi polimer, dan radiasi lingkungan.
3. Siklotron yang mempercepat berkas proton 11 MeV dapat dimanfaatkan untuk pencitraan tiroid, ginjal, studi darah, dan pencitraan tumor.

MATERI POKOK 4:

KESELAMATAN DALAM PENGOPERASIAN SIKLOTRON

Indikator Hasil Belajar: menjelaskan prinsip keselamatan dalam pengoperasian siklotron

Siklotron merupakan salah satu mesin pemercepat partikel bermuatan. Pada awalnya mesin jenis ini digunakan untuk mempelajari problem fisika seperti misalnya uji material dan untuk penghasil neutron cepat. Dalam perkembangannya, siklotron lebih banyak dibuat untuk tujuan produksi radioisotop khususnya untuk tujuan medis.

Fasilitas siklotron di Gedung 11 KST BJ HABIBIE Serpong adalah tipe CS_30. Pada awalnya siklotron CS-30 dapat menghasilkan empat macam partikel bermuatan dengan energy tertentu, yaitu proton (26 Mev), deuteron (15 Mev), helium-3 (38 Mev) dan helium-4 (30 Mev). Tetapi setelah mengalami modifikasi pada tahun 1996 oleh perusahaan IBA, siklotron hanya mempercepat partikel bermuatan berupa ion negative. Percepatan partikel bermuatan yang kemudian menumbuk senyawa sasaran maupun komponen pembentuk siklotron akan menimbulkan medan radiasi tinggi, bahkan setelah proses iradiasi tersebut selesai paparan radiasi dalam ruang dan system siklotron masih cukup tinggi. Inilah yang disebut dengan radiasi residu. Pengalaman pada siklotron CS-30 menunjukkan bahwa aktivasi oleh sasaran berkas proton dengan arus berkas 30 μ A dapat menghasilkan paparan radiasi disekitar stasiun target sebesar 800 R/jam. Medan radiasi ini turun sampai sekitar 100 mR/jam pada lima hari sesudah aktivasi sasaran.

Sebagai fasilitas nuklir, konstruksi gedung siklotron maupun instalasi dan operasional fasilitas siklotron dirancang dan dilaksanakan dengan memperhatikan aspek keselamatan. Rancangan sistem keamanan dan keselamatan yang diterapkan pada fasilitas siklotron ini mencakup tiga hal utama, yang pertama berkaitan dengan desain dan konstruksi system infrastruktur atau bangunan gedung, yang kedua berkaitan dengan keamanan dan keselamatan operasional mesin siklotronnya sendiri (sistem keselamatan internal) dan yang ketiga adalah

system keamanan dan keselamatan yang berhubungan dengan personil serta pengendalian persyaratan operasional siklotron(sistem keselamatan eksternal).

Rancangan keamanan dan keselamatan konstruksi bangunan/gedung merupakan sistem keselamatan yang meliputi pengaturan tata ruang, ketebalan dinding ruangan sebagai perisai radiasi yang menjamin keselamatan para pekerja dari paparan radiasi, pembuangan limbah radioaktif, pengaturan tata udara (pengaturan suhu ruangan, relative humidity dan arah aliran udara). Sistem keselamatan internal merupakan sistem keselamatan yang bertujuan untuk menjamin keselamatan alat, komponen dan juga personil melalui kegagalan fungsi operasi siklotron apabila terjadi kelainan pada persyaratan operasi siklotron tersebut. Dimana kerja dari sistem keselamatan ini dikendalikan atau dikoordinasikan dalam suatu sistem yang disebut sistem *interlock*, yaitu suatu sistem perangkat keras yang akan mematikan atau mencegah hidupnya catu daya suatu peralatan atau sistem peralatan bila salah satu syarat operasi tidak dipenuhi. Sedangkan sistem keselamatan eksternal meliputi sistem kendali di luar sistem keselamatan internal dimana orientasi sistem tersebut adalah pada jaminan keselamatan personil serta pengendalian persyaratan operasional siklotron sebelum, sedang dan setelah dioperasikannya sistem siklotron. Sistem keselamatan eksternal ini dikendalikan melalui *interlock* sistem kendali *access* yang diintegrasikan dengan sistem *interlock* yang melekat pada sistem siklotron.

Pengetahuan tentang sistem keselamatan yang digunakan dalam fasilitas siklotron ini penting untuk dikaji bagi para calon operator maupun calon perawat siklotron agar dapat digunakan sebagai acuan atau sebagai dasar dalam pelaksanaan kerja di fasilitas siklotron pada khususnya maupun fasilitas pemercepat partikel pada umumnya.

- **Pengertian dalam pemanfaatan Siklotron**

Sistem Keselamatan Siklotron: Suatu metode untuk mengurangi atau menghilangkan bahaya yang timbul dari akibat pengoperasian mesin siklotron.

Siklotron: mesin pemercepat partikel bermuatan dengan gerak partikel melingkar/siklis.

Sistem Keselamatan Internal: sistem keselamatan yang berkaitan dengan keamanan dan keselamatan mesin siklotron

Sistem Keselamatan Eksternal: sistem keselamatan yang berhubungan dengan keamanan dan keselamatan personil

Sistem Interlock: serangkaian perangkat keras yang saling berhubungan yang digunakan untuk mencegah berfungsinya suatu peralatan bila salah satu atau lebih syarat operasi tidak terpenuhi

Cave: daerah radiasi yang meliputi *cave* siklotron, *cave* target, *cave physics* dan *cave* PET

A. Prosedur dan Peralatan

1. Bahaya dan Risiko Pada Pengoperasian Sistem Siklotron

Setiap personil atau pekerja yang berhubungan dengan operasi, pemeliharaan dan perawatan siklotron akan berhadapan dengan bahaya dan resiko yang ditimbulkan oleh radiasi nuklir, tegangan tinggi, frekuensi radio dengan daya tinggi, temperatur tinggi dan lain sebagainya. Medan radiasi atau paparan radiasi ini dapat berasal dari radionuklida yang diproduksi oleh siklotron dan dapat berasal dari hasil peluruhan radioaktivitas yang ditimbulkan oleh struktur atau komponen siklotron akibat interaksi dengan partikel dipercepat, dimana medan radiasi yang ditimbulkan tersebut sangat bergantung dari jenis dan energi partikel, intensitas berkas dan target yang akan diiradiasi.

Struktur atau komponen siklotron yang menjadi radioaktif karena berinteraksi dengan partikel dipercepat antara lain:

- Pada sistem utama (sistem pemercepat): elektroda "*dee*"; *beam probe*; komponen sumber ion; komponen ekstraktor dan dinding ruang pemercepat.
- Pada sistem *beam transport*: *beam shutter*; *vacuum valve*; *switching magnet*; *steering magnet*; *quadrupole magnet*; dinding *beam line*.
- Pada stasiun target: *beam shutter*; *target*; komponen *target chamber*.

Dengan energi proton yang dihasilkan siklotron sebesar 26 MeV, maka material Cu akan menghasilkan radionuklida ^{62}Zn , ^{63}Zn , ^{65}Zn dan ^{64}Cu dengan reaksi nuklir yang terjadi berturut-turut $^{62}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$, $^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$ dan $^{65}\text{Cu}(p,pn)^{64}\text{Cu}$. Radionuklida

radionuklida tersebut memancarkan sinar- γ dengan umur paro berturut-turut 9,1 jam, 38,1 menit, 244 hari dan 12,7 jam. Sedangkan material Al akan menghasilkan radionuklida ^{31}Si dengan reaksi nuklir yang terjadi $^{27}\text{Al}(p,x) ^{31}\text{Si}$. Radionuklida tersebut memancarkan sinar- γ dengan umur paro 2,68 jam.

Risiko bahaya tegangan tinggi dapat berasal dari tegangan AC (*AC line*) yang memasok seluruh catu daya sistem siklotron, catu daya anoda (*Anode Power Supply*) yang mempunyai *input* 480 VAC 150 KV-A dengan *output* DC 12 KV/6A, catu daya magnet utama yang mempunyai *input* 480 VAC 125 KV-A dengan daya *output* sebesar 115 KW dan arus maksimum sebesar 500 A atau dari catu daya sistem vakum yang mempunyai *input* total sebesar 480 VAC 15 KV-A. Risiko bahaya frekuensi radio berasal dari pengoperasian elektroda *dee* yang merupakan komponen pemercepat siklotron. Elektroda *dee* tersebut dihubungkan dengan osilator daya tinggi frekuensi radio (RF) yang dicatu dari *output* yang dihasilkan oleh *Anode Power Supply* (APS). *Output* RF yang dihasilkan pada elektroda *dee* sebesar 25 KV. Osilator ini berada di dalam *cave* siklotron yang akan dapat menimbulkan potensi bahaya sewaktu pelaksanaan perawatan atau perbaikan pada komponen sistem osilator tersebut. Sistem osilator tersebut sebenarnya berada dalam suatu *oscillator box*, bila osilator tersebut dalam keadaan operasi, maka *oscillator box* tersebut harus tertutup oleh *cover box*. Namun untuk kepentingan perawatan atau perbaikan, osilator tersebut juga dapat dioperasikan dalam keadaan tanpa *cover box*. Sedangkan potensi bahaya temperatur tinggi berasal dari pengoperasian sistem pemanas pompa vakum difusi pada tangki siklotron yang dicatu dengan daya 2 x 2,2 KW sedangkan untuk pompa vakum difusi yang terpasang pada *beam line* dan sistem target mempunyai daya masing-masing 1,5 KW.

2. Sistem Keamanan dan Keselamatan Fasilitas Siklotron

Sistem keamanan dan keselamatan siklotron pada dasarnya mencakup tiga hal, yaitu pertama berkaitan dengan desain dan konstruksi struktur bangunan/gedung, yang kedua berkaitan dengan keamanan dan keselamatan operasional mesin siklotronnya sendiri (sistem keselamatan

internal) dan yang ketiga adalah sistem keamanan dan keselamatan yang berhubungan dengan personil serta pengendalian persyaratan operasional siklotron (sistem keselamatan eksternal). Berkaitan dengan usaha untuk melindungi personil dan lingkungan dari bahaya radiasi yang timbul oleh pengoperasian sistem siklotron dan efek-efek sekundernya, maka fasilitas siklotron dilengkapi dengan sistem keselamatan yang handal dan terkendali. Sedangkan untuk sistem keselamatan yang berhubungan dengan keselamatan operasional siklotron merupakan sistem yang menyatu dan merupakan kelengkapan dari perangkat siklotronnya.

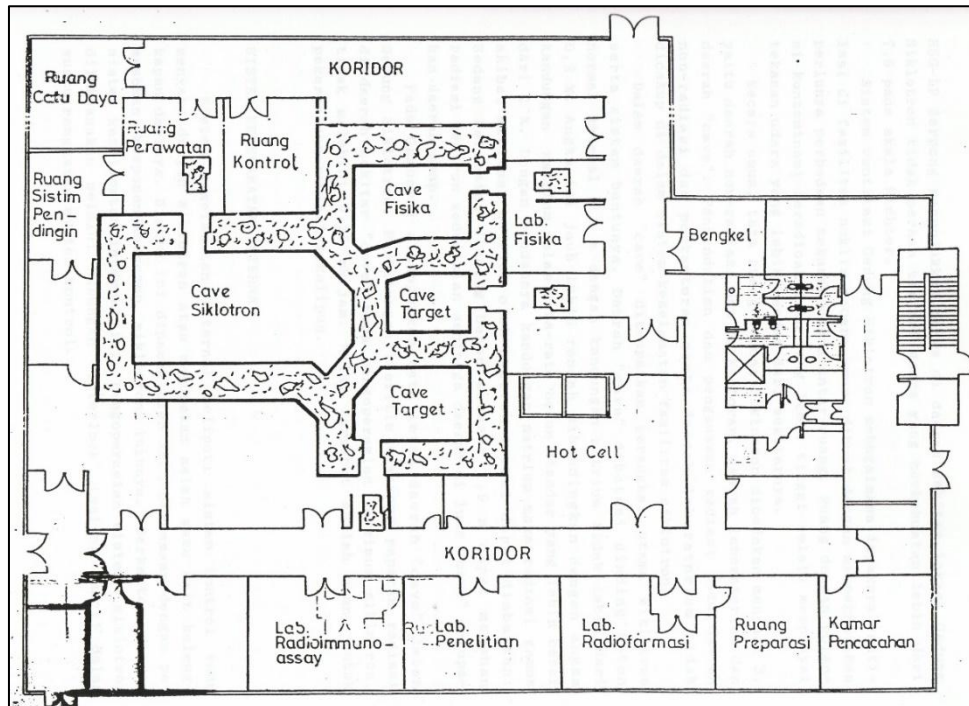
a. Sistem Keamanan dan Keselamatan Konstruksi Bangunan/Gedung

Yang dimaksud dengan sistem keamanan konstruksi adalah sistem keselamatan yang menyatu atau merupakan bagian dari konstruksi gedung siklotron. Sistem ini menjamin keselamatan para pekerja terutama dari bahaya radiasi. Rancangan bangunan/gedung fasilitas sistem siklotron dibuat dengan memperhatikan beberapa hal antara lain:

- Mencegah tersebarnya material radioaktif ke lingkungan dan mengurangi paparan radiasi pada lingkungan sampai ambang batas yang aman. Untuk keperluan tersebut konstruksi tembok pada daerah aktif yaitu pada ruang siklotron, ruang target, ruang fisika dan ruang PET dibuat setebal 1,9 meter. Dari perhitungan teoritis besarnya paparan radiasi di sekitar *cave* pada pengoperasian maksimum sistem siklotron, tidak melebihi 0,25 mR/jam. Nilai tersebut aman untuk pekerja non radiasi sekalipun.
- Menyediakan tata udara yang memenuhi persyaratan baik untuk peralatan, sistem siklotron maupun untuk personilnya. Persyaratan tersebut meliputi pengaturan suhu ruangan harus berada pada rentang 18°C - 22°C dan besarnya relative humidity harus berada di bawah 50% untuk daerah aktif (*cave*) dan antara 40% - 70% untuk daerah non aktif sedangkan untuk besarnya tekanan udara di dalam daerah aktif dibuat lebih rendah daripada di luar ruangan sehingga arah aliran udara pada daerah aktif harus menuju ke dalam ruangan. Kecepatan aliran udara ditetapkan sekitar 714 m³/menit.

- Menyediakan daya listrik yang cukup, baik untuk pengoperasian semua peralatan sistem siklotron dan sistem bantunya serta sistem lain yang memerlukan ditambah untuk penerangan pada daerah aktif maupun daerah kerja personil. Daya yang terpasang untuk fasilitas sisten siklotron sebesar 2500 KVA.
- Menyediakan sistem drainase yang baik untuk pembuangan limbah cair pada setiap ruangan yang memerlukan. Limbah cair pada daerah aktif (cave) dibuang melalui saluran pemipaan menuju tangki limbah yang terbuat dari bahan stainless steel yang mempunyai volume 26,79 m³.
- Menyediakan sistem udara bertekanan yang cukup untuk mengoperasikan peralatan sistem siklotron dan yang memerlukan. Udara yang dihasilkan harus kering dan bebas debu. Kompresor udara yang digunakan harus mempunyai kecepatan 98 l/detik dengan tekanan maksimum sebesar 10 Bar. Kandungan kontaminasi partikel dalam udara tidak boleh lebih dari 0,6 mikron.
- Mempunyai pintu untuk keluar masuk yang mudah, hal ini penting bila suatu saat terjadi keadaan darurat.
- Menyediakan Alat Pelindung Diri baik untuk pegawai maupun pengunjung.
- Mampu menahan berbagai beban tanpa mengalami keretakan/kerusakan (tahan terhadap bencana alam).
- Menyediakan alat komunikasi untuk berhubungan baik antar ruangan maupun keluar gedung. Untuk ruangan aktif alat komunikasinya merupakan kelengkapan pengoperasian sistem siklotron.

Denah Fasilitas Siklotron CS-30 Lantai 1 dapat dilihat pada Gambar 29.



Gambar 29. Fasilitas Siklotron CS-30 Lantai 1

Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

b. Sistem Keselamatan Internal

Sistem keselamatan internal dirancang bertujuan untuk menjamin keselamatan alat atau komponen siklotron pada saat dioperasikannya sistem siklotron dan juga keselamatan personil melalui penggagalan fungsi operasi siklotron apabila terjadi anomali pada persyaratan operasi. Sistem keselamatan internal meliputi sistem kendali yang menyatu dengan sistem kendali siklotron atau merupakan salah satu unit kelengkapan darinya.

Berkaitan dengan sistem keselamatan internal tersebut, maka pengoperasian sistem siklotron dilaksanakan melalui hubungan *interlock* dalam suatu rangkaian sistem kendali. Sistem siklotron dapat dioperasikan apabila seluruh sistem telah memenuhi persyaratan operasi. Sebaliknya operasi siklotron akan berhenti atau gagal secara otomatis apabila ada gangguan pada sistem yang menyebabkan gagalnya pencapaian persyaratan operasi. Mekanisme kegagalan

operasi siklotron tersebut berbeda-beda tergantung pada jenis gangguan yang terjadi. Pada umumnya berkaitan dengan terputusnya catu daya atau tertutupnya saluran berkas oleh penutup berkas (*beam shutter*) baik melalui gagalnya hubungan *interlock* yang melekat pada sistem siklotron maupun gagalnya hubungan *interlock* kendali *access* (*Access Control*) yang terkait dengan sistem keselamatan eksternal.

c. Sistem Keselamatan Eksternal

Sistem keselamatan eksternal meliputi sistem kendali di luar sistem keselamatan internal dimana orientasi sistem tersebut adalah pada jaminan keselamatan personil serta pengendalian persyaratan operasional siklotron sebelum, sedang dan setelah dioperasikannya sistem siklotron. Sistem keselamatan eksternal ini dikendalikan melalui *interlock* sistem kendali *access* yang diintegrasikan dengan sistem *interlock* yang melekat pada sistem siklotron. Pada dasarnya sistem keselamatan eksternal mempunyai fungsi utama sebagai berikut:

- Mendeteksi dan memberikan informasi tingkat radiasi di dalam *cave*.
- Mencegah pengoperasian siklotron apabila ada pintu *cave* yang terbuka.
- Mencegah akses atau pembukaan pintu *cave* apabila paparan dalam *cave* melebihi batas ambang (*setting point*) yang ditentukan atau apabila siklotron dalam keadaan operasi.
- Mencegah kemungkinan terperangkapnya personil di dalam *cave*.

Untuk dapat memenuhi fungsi-fungsi tersebut, sistem keselamatan eksternal tersusun atas enam bagian utama, yaitu diantaranya: panel keselamatan pada ruang kendali; monitor luapan berkas (*beam spill monitor*); monitor radiasi; kendali operasi pintu *cave*; tombol darurat (*emergency botton*) dan cahaya kedip (*flashing light*). Disamping lima bagian utama tersebut di atas adapula panel yang menunjukkan status fungsi pengoperasian siklotron yang terpasang di atas setiap pintu masuk *cave*.

- **Panel Keselamatan di Ruang Kendali**

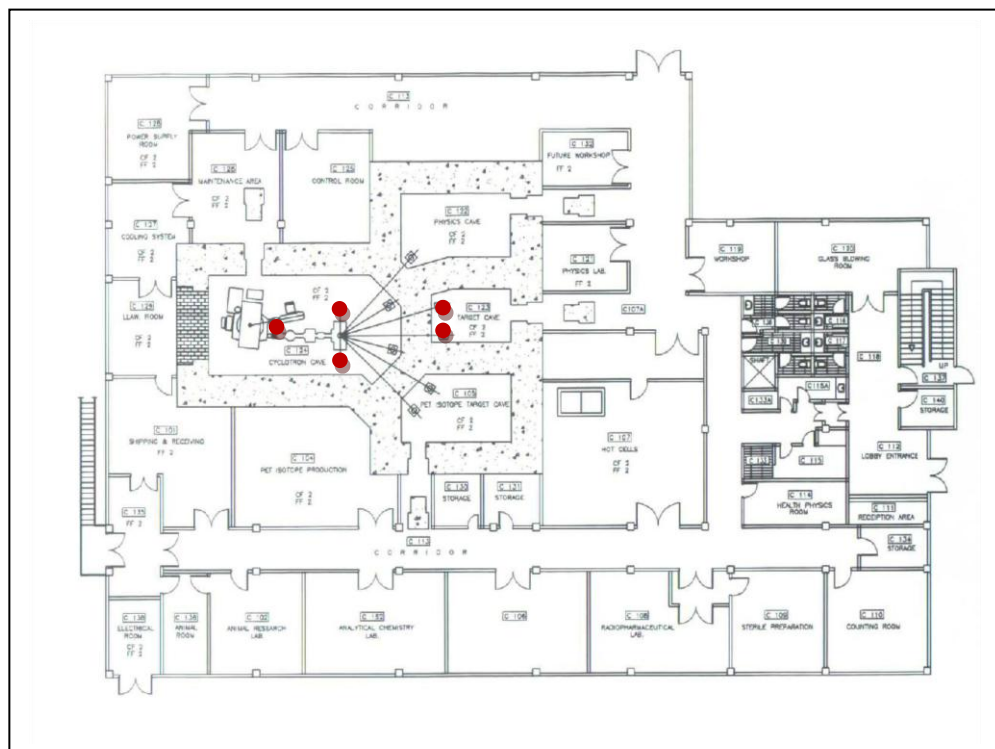
Panel keselamatan harus berada pada ruang kendali siklotron. Panel keselamatan tersebut memberikan informasi status persyaratan keselamatan pada *cave* siklotron maupun *cave* target, baik yang berhubungan dengan sistem *interlock* maupun paparan radiasi didalam *cave* sebelum, pada saat dan sesudah operasi siklotron. Panel keselamatan pada sistem kendali ini juga memberikan informasi *trip* radiasi tinggi, *trip* darurat, peringatan radiasi rendah dan status operasi komponen utama siklotron, yaitu status operasi osilator frekuensi radio (RF) dan status operasi sumber ion. Disamping itu juga disediakan tombol tekan (*Push button*) yang digunakan untuk memberikan status diijinkan atau tidak diijinkan kemungkinan menghidupkan masing-masing osilator frekuensi radio (RF) dan sumber ion secara terpisah atau bersama sama. Panel keselamatan ruang kendali dapat di lihat pada Gambar 30.



Gambar 30. Panel Keselamatan di Ruang Kendali
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

- **Monitor Luapan Berkas**

Pada sistem siklotron dipasang lima buah monitor luapan berkas (*beam spill monitor*) yang masing-masing dihubungkan dengan detektor dari jenis *ion chamber*. Tiga buah detektor diantaranya difungsikan di dalam *cave* siklotron dan dua buah lainnya difungsikan di dalam *cave* target. Sistem monitor ini ter *interlock* dengan sistem operasi siklotron dan akan memberikan dua sinyal, yaitu sinyal peringatan radiasi tinggi/rendah dan sinyal untuk *trip* operasi. Sinyal untuk *trip* operasi akan menghentikan operasi siklotron manakala terjadi radiasi sangat tinggi yang melebihi batas *setting point* nya. Kelima monitor tersebut masing masing mempunyai empat *decade* pembacaan yaitu 1, 10, 100 dan 1000 R/h dan meter pembacaan ini ditempatkan di ruang kendali siklotron. Denah penempatan monitor luapan berkas serta monitor luapan berkas dapat dilihat pada Gambar 31 dan Gambar 32.



Gambar 31. Penempatan Detektor Luapan Berkas
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN



Gambar 32. Monitor Luapan Berkas
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

- **Monitor Radiasi**

Satu buah detektor radiasi beta-gamma dari jenis *Geiger Muller* ditempatkan di samping setiap pintu keluar (dinding bagian dalam) *cave* yang akan memberikan informasi radiasi sisa pada masing-masing *cave* yang bersangkutan. Jika *level* radiasi melebihi *setting point* nya maka akan membunyikan *alarm* dan kunci untuk membuka *cave* yang bersangkutan tidak dapat diambil dari tempatnya (*access* ke *area* tidak diijinkan). Meter pembacaan dari detektor tersebut semula ditempatkan di samping setiap pintu masuk (dinding bagian luar) *cave* yaitu pada *Area Safety Unit (ASU)*, tetapi pada tahun 2009 dilakukan penggantian monitor radiasi digital yang ditempatkan pada panel keselamatan. Untuk menghindari kerusakan detektor yang disebabkan paparan radiasi yang sangat tinggi maka detektor tersebut secara otomatis akan *On* manakala operasi berkas pada area yang bersesuaian dalam keadaan *Off*. Salah satu jenis monitor radiasi dapat dilihat pada Gambar 33.



Gambar 33. Monitor Radiasi
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

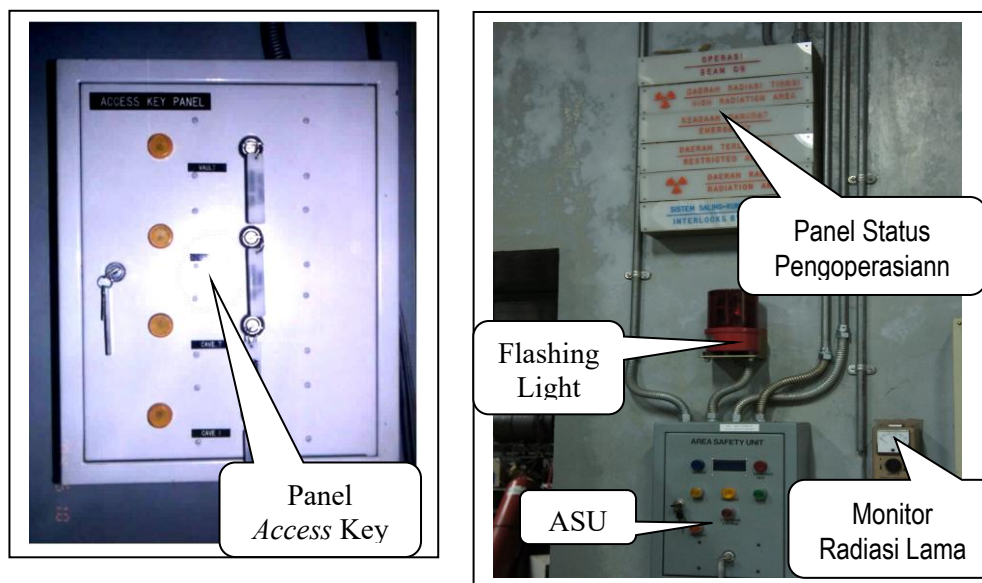
- **Kendali Operasi Pintu Cave**

Kendali operasi pintu *cave* digunakan untuk mengatur tahapan dan persyaratan membuka dan menutup pintu *cave*. Kendali ini dilakukan melalui panel *Access Key*; *Area Safety Unit* (ASU) dan *Watchman Station*. Panel *Access Key* terletak di ruang kendali operasi siklotron, panel ASU terletak disamping setiap pintu masuk *cave* sedang *Watchman Station* terletak disamping pintu masuk *cave* siklotron dan di dinding sebelah dalam pada setiap *cave*. Panel *Access Key* digunakan untuk menempatkan 4 buah kunci pintu *cave*. Dengan syarat keselamatan yang ditetapkan kunci-kunci pintu *cave* tersebut dapat diambil dan digunakan untuk memfungsikan tombol *Open* dan tombol *Close* yang terdapat pada ASU dari masing masing pintu *cave* yang bersesuaian untuk keperluan membuka dan menutup pintu *cave*. Pengambilan kunci-kunci tersebut ter *interlock* dengan sistem kendali siklotron. Pengambilan salah satu atau seluruh kunci pintu *cave* dari panel *Access Key* harus seijin operator siklotron dengan syarat syarat keselamatan harus dipenuhi terlebih dahulu. Sistem keselamatan akan mengijinkan pengambilan kunci apabila :

1. Monitor radiasi dalam keadaan *On*.
2. *Level* radiasi pada *cave* yang bersangkutan dibawah *setting point*.

3. Siklotron dalam keadaan *Off* (*Radio Frekuensi System* dan *Ion Source System* dalam keadaan *Off*).

Penutupan pintu *cave* siklotron dimulai dengan menekan dua tombol *Watchman Station* oleh masing-masing satu personil (sedangkan untuk *cave target*, Physics dan PET cukup satu personil). Tombol-tombol tersebut ditempatkan sedemikian rupa sehingga memudahkan penglihatan atau pengawasan keseluruhan ruangan. Ketika kedua tombol *Watchman Station* telah ditekan, maka *alarm HI-LO* akan berbunyi selama 10 detik. Selama interval waktu tersebut pekerja radiasi harus sudah menekan tombol "*Close*" pada ASU dari *cave* yang bersangkutan, sehingga pintu *cave* akan menutup. Apabila dalam interval 10 detik ini pekerja radiasi belum menekan tombol *Close*, maka proses penutupan pintu *cave* harus diulang dari awal. Setelah pintu *cave* tertutup dengan sempurna maka semua kunci *cave* harus diletakkan kembali ke panel *Access Key*. Bila keempat kunci pintu *cave* telah berada pada panel *Access Key*, maka hal ini mengindikasikan bahwa salah satu sistem keselamatan eksternal dalam keadaan *OK* (semua pintu *cave* dalam keadaan tertutup). Kendali operasi pintu *Cave* dapat dilihat pada Gambar 34.



Gambar 34. Kendali Operasi Pintu Cave
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

- **Tombol Darurat**

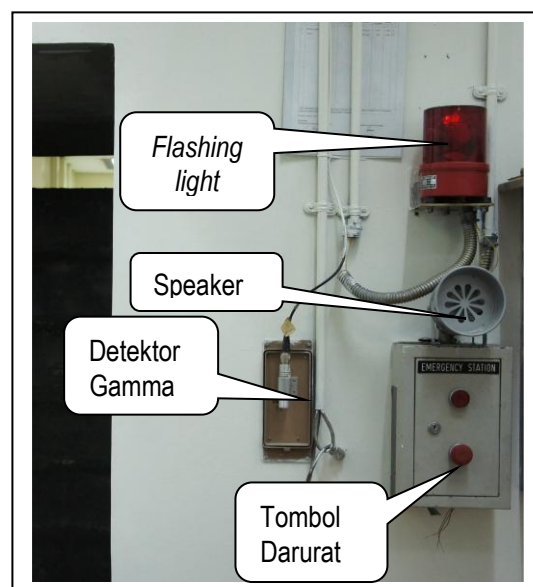
Sistem keselamatan eksternal juga dilengkapi dengan tombol darurat yang dipasang pada dinding di samping tiap-tiap pintu keluar cave. Fasilitas ini berfungsi untuk mencegah terperangkapnya personil di dalam cave. Personil yang lalai dan terjebak di dalam cave dapat menekan tombol darurat tersebut yang mengakibatkan terhentinya secara paksa fungsi operasi siklotron diikuti dengan terbukanya pintu cave secara otomatis..

- **Flashing light**

Flashing light dihubungkan dengan sistem interlock kendali access dan sistem penutupan pintu cave. Cahaya akan berkedip bila terjadi peristiwa:

1. Penutupan pintu cave bersangkutan.
2. Alarm tingkat radiasi rendah (*Low radiation level alarm*).
3. Alarm tingkat radiasi tinggi (*High radiation level alarm*).

Lampu *Flashing light* ini dipasang pada setiap ASU dan Watchman Station yang ada di setiap cave. Gambar Tombol Darurat, *Flashing light*, Speaker, Detektor Gamma dapat dilihat pada Gambar 35.



Gambar 35. Tombol Darurat, *Flashing light*, Speaker, Detektor Gamma
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

c. Sistem Keselamatan Radiasi pada Produksi Radioisotop berbasis Siklotron

- **Hand and Foot Monitor**

Hand and Foot Monitor adalah alat ukur radiasi yang digunakan untuk mendeteksi kontaminasi radioaktif pada tangan dan kaki pekerja radiasi (dapat dilihat pada Gambar 36). Alat ini mampu mendeteksi radiasi beta, dan gamma sehingga memastikan bahwa pekerja tidak membawa kontaminasi ke area lain.

Hand and Foot Monitor ini ditempatkan di area keluar daerah pengendalian. Setiap pekerja radiasi yang hendak meninggalkan area radiasi wajib melakukan pengukuran tingkat kontaminasi dengan menggunakan *Hand and Foot Monitor* ini. Jika pekerja radiasi terdeteksi terkontaminasi, maka pekerja wajib mendekontaminasi bagian tubuh yang terkontaminasi. Terkadang juga dibutuhkan peralatan yang dapat digerakkan dengan bebas, seperti monitor kontaminasi *handheld/* portabel yang digunakan untuk memeriksa kontaminasi pada bagian luar tubuh apapun. Jika yang terkontaminasi adalah alas kaki, Pemegang izin biasanya akan menyediakan alas kaki pengganti untuk mempermudah pekerja radiasi melakukan proses peluruhan atau proses dekontaminasi.

Dalam operasi rutin kondisi lingkungan pada lokasi *hand and foot monitor* ditempatkan juga perlu diperhatikan. Sebaiknya *hand and foot monitor* dijauhkan dari cacah latar radiasi yang tinggi, suhu/kelembaban yang ekstrim, dan potensi apapun yang menyebabkan detektor radiasi basah. Selain itu, perlu diberikan himbauan kepada para pekerja radiasi yang menggunakan *hand and foot monitor* untuk tidak menggunakan benda yang dapat melukai detektor pada *hand and foot monitor* seperti sepatu dengan hak tinggi dan tajam



Gambar 36. Hand, Foot and Monitor yang digunakan untuk melakukan pemeriksaan terhadap kaki, dan tangan dari kontaminan alfa, beta dan gamma

Sumber: <https://www.mirion.com/products/technologies/health-physics-radiation-safety-instruments/contamination-clearance/hand-foot-monitors/handfoot-fibre-hand-and-foot-monitor>

- **Stack Monitor**

Stack Monitor adalah perangkat yang digunakan untuk memantau aktivitas radionuklida berupa partikel atau gas yang dikeluarkan dari fasilitas melalui cerobong. Fasilitas produksi radioisotop berbasis siklotron memerlukan *stack monitor* ini sebagai langkah pengendalian risiko. Alat ini memastikan gas atau partikulat radioaktif yang dilepaskan ke lingkungan tidak melebihi batas yang diizinkan oleh regulasi.

BAPETEN mengatur berapa batasan minimal yang diperbolehkan terlepas ke lingkungan. Untuk zat radioaktif yang tidak terdapat dalam daftar, dapat dilakukan perhitungan ulang menggunakan perangkat lunak tertentu dengan mempertimbangkan risiko yang serupa seperti Pembatas Dosis Masyarakat, Nilai Batas Dosis Masyarakat, faktor-faktor penyebaran di lingkungan, lokasi fasilitas dan kepadatan penduduk. Untuk mencegah lepasan yang berlebihan diperlukan pengendalian berupa optimalisasi sistem filtrasi dengan memasang

kombinasi filter Medium dan HEPA, penggantian filter secara berkala, dan perencanaan operasi produksi yang terkontrol.

- ***Radiation Area Monitor***

Radiation Area Monitor adalah alat yang digunakan untuk memantau tingkat paparan radiasi di suatu area tertentu. Alat ini berfungsi sebagai pengawas agar paparan radiasi tidak melebihi batas yang dapat membahayakan pekerja.

Biasanya peralatan ini dipasang di daerah pengendalian dengan potensi paparan radiasi yang tinggi seperti di dekat pintu keluar ruangan mesin siklotron, di ruang target dan di dekat *hotcell*, Diharapkan jika ada perubahan tingkat radiasi dapat dideteksi secara dini sehingga dapat mengurangi dosis berlebih bagi pekerja radiasi.

3. Prosedur Access Daerah Radiasi (Cave)

Untuk *access* ke dalam *cave*, ada beberapa prosedur kendali *access* yaitu diantaranya:

- a. Memasuki *cave* (siklotron, physics, PET atau target), harus mengikuti prosedur yang telah ditetapkan.
- b. *Survey* dan buat peta daerah radiasi pada *cave*.
- c. *Survey* radiasi bila membuka tangki siklotron.
- d. Kelengkapan atau alat pelindung diri (APD) yang diperlukan untuk memasuki daerah *cave* harus terpenuhi.
- e. Perawatan dan perbaikan di dalam *cave* harus mengikuti prosedur.
- f. Penutupan atau penguncian *cave* harus mengikuti prosedur.

a. Prosedur Memasuki Cave

1. Sebelum memasuki *cave*, terlebih dahulu siklotron harus dimatikan (*shutdown*) dan target padat harus dipindahkan ke dalam *hot cell*.
2. Hidupkan monitor radiasi *area* dan tunggu sampai paparan radiasi mencapai tingkat aman, kemudian hubungi *surveyor* dari Bidang Keselamatan.

3. Bila paparan radiasi telah mencapai tingkat aman, yaitu di bawah 50 mR/h, maka pintu *cave* dapat dibuka. Untuk melakukan pembukaan pintu *cave* tersebut harus seijin operator siklotron guna mengambil kunci *cave* yang bersangkutan dari panel *Access Key*. Pengambilan kunci harus dilakukan oleh 2 personil, satu personil (operator siklotron) menekan tombol pada panel kendali keselamatan sementara satu orang lainnya melepaskan kunci yang berada pada panel *Access Key*.
4. Kunci digunakan untuk mengaktifkan panel ASU pada *cave* yang bersangkutan. Pembukaan pintu *cave* dilakukan dengan menekan tombol *Open* yang ada pada ASU dan pertahankan sampai pintu *cave* terbuka.
5. Untuk memasuki *cave*, personil harus menunggu diluar *cave* sampai *surveyor* selesai melakukan *tugasnya* dan mengijinkan personil untuk masuk.

b. Prosedur Survey di Dalam Cave

Setelah pintu *cave* terbuka, *surveyor* dari Bidang Keselamatan mengecek paparan radiasi dan membuat peta hasil *survey*, yaitu:

1. Peta hasil *survey* paparan radiasi di dalam *cave*.
2. Peta hasil *survey* paparan radiasi di seputar tangki siklotron.
3. Peta hasil *survey* paparan radiasi di dalam *cave* yang lain bila diperlukan.

Kemudian peta hasil *survey* tersebut harus ditempelkan pada dinding masuk *cave* yang bersangkutan. *Survey* paparan radiasi tersebut meliputi:

1. *Survey* radiasi di atas lantai setinggi saluran berkas (*beam line*).
2. *Swipe* lantai dan stasiun target kemudian cek radioaktivitasnya.
3. *Swipe* komponen-komponen di dalam tangki siklotron dan cek radioaktivitasnya.

• Kelengkapan yang Diperlukan Untuk Memasuki Cave

Sebelum memasuki *cave*, personil diharuskan mengenakan :

1. *Shoes Cover* dan jas laboratorium.

2. *TLD - badge* dan *pencil chamber*, tulis waktu dan dosis pada sebelum dan sesudah keluar dari *cave*.
3. Sarung tangan bila memegang komponen siklotron atau komponen *beam line*.
4. Masker

c. Prosedur Pemeliharaan, Perawatan dan Perbaikan di Dalam Cave

Untuk melaksanakan pemeliharaan, perawatan atau perbaikan di dalam *cave* perlu memperhatikan hasil pada peta daerah radiasi yang telah dibuat oleh *surveyor*. Secara umum dapat dibagi menjadi dua yaitu :

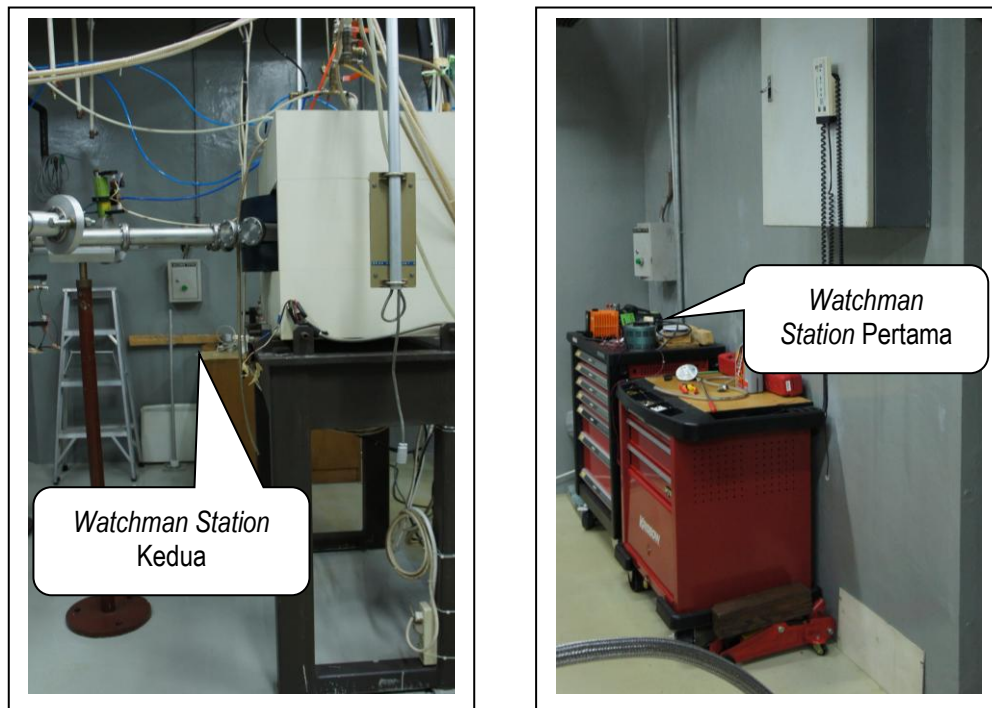
1. Bila paparan radiasi sudah berada pada level aman maka pemeliharaan, perawatan atau perbaikan dapat dilakukan dengan prosedur normal.
2. Bila paparan radiasi sudah berada pada level tidak aman maka pemeliharaan, perawatan atau perbaikan harus dilakukan dengan memperhatikan besarnya batas paparan radiasi personil yang diperbolehkan. Sedangkan untuk pelaksanaannya harus dilakukan oleh dua personil atau lebih tergantung dari besar paparan radiasinya. Cara pengerjaannya harus bergantian dengan durasi waktu yang telah diperhitungkan. Selain itu dalam pelaksanaannya harus diawasi oleh personil dari bidang keselamatan agar besarnya paparan radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi dapat terkontrol dengan baik dan bila terjadi kontaminasi dapat langsung diambil tindakan dekontaminasinya.

d. Penutupan Cave

Untuk melakukan penutupan *cave* siklotron diperlukan dua personil. Personil pertama menekan *Watchman Station* pertama yang berada dekat pintu keluar *cave* sambil menahan tombol *Watchman Station*. Personil pertama juga harus memastikan bahwa tidak ada personil lain yang masuk dalam *cave*. Sementara personil kedua menekan tombol *Watchman Station* kedua sambil mengelilingi ruang *cave* searah jarum jam untuk memastikan tidak ada personil yang masih berada di dalam *cave*. Selanjutnya kedua personil keluar dan personil kedua menekan

tombol *Close* pada panel ASU sampai pintu *cave* tertutup. Penempatan *watchman station* dapat dilihat pada gambar Gambar 37 dan Gambar 38.

Prosedur untuk melaksanakan penutupan pintu *cave* target, physics dan PET cukup dilakukan oleh satu personil. Personil tersebut bertanggung jawab memastikan bahwa tidak ada peronil lain terjebak didalam *cave* dan menutup pintu *cave* dengan menekan tombol *close* pada ASU. Setelah selesai penutupan pintu *cave*, semua kunci *cave* harus dikembalikan ke panel *Access Key* yang berada di ruang kendali siklotron.



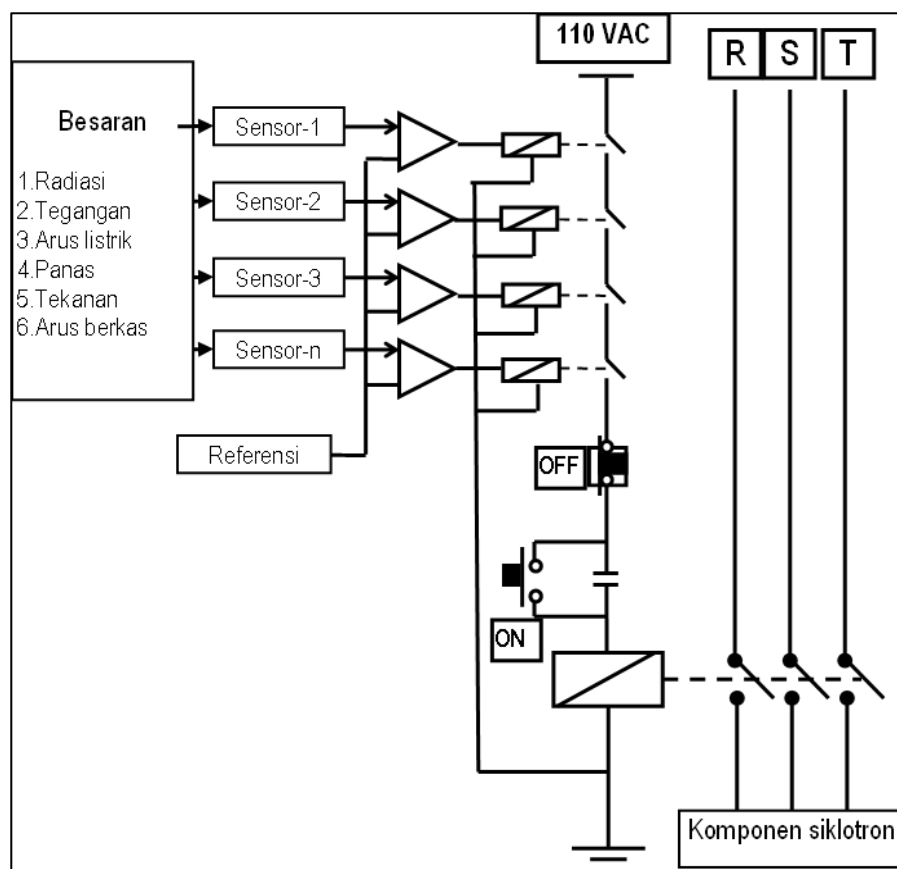
Gambar 37. *Watchman Station Cave* Siklotron
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN



Gambar 38. *Watchman Station Cave*
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

4. Sistem Interlock Siklotron Secara Umum

Diagram sistem *interlock* secara umum yang terdapat pada siklotron CS-30 dapat digambarkan pada Gambar 39 sebagai berikut :



Gambar 39. Diagram Sistem Interlock Siklotron Secara Umum
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Untuk sistem keamanan dan keselamatan, keberadaan sistem *interlock* pada siklotron sangat penting. Sistem ini menggambarkan adanya suatu persyaratan yang harus dipenuhi oleh sistem yang lain agar komponen utama pada siklotron dapat bekerja. Persyaratan tersebut ditampilkan oleh suatu besaran (radiasi, tegangan, arus, panas, tekanan dan arus berkas) yang dideteksi oleh sebuah sensor dan kemudian dibandingkan dengan suatu referensi dengan nilai batas persyaratan operasi tertentu untuk dapat menggerakkan relay sehingga catu daya komponen utama dapat menyambung sehingga komponen utama tersebut dapat bekerja. Sebaliknya akan memutus hubungan tersebut apabila nilai besaran tersebut tidak sesuai dengan persyaratan operasi (terjadi *interlock fault*). Ditinjau dari sistem operasi, maka adanya besaran syarat tersebut akan memungkinkan berpindahnya status catu daya dari keadaan yang satu ke keadaan lainnya dari tiga keadaan, yaitu:

1. *Not Ready* berarti masih ada *interlock fault* sehingga catu daya masih belum bisa difungsikan,
2. *Ready* berarti semua besaran syarat dalam batas persyaratan.
3. *On* berarti catu daya sudah berfungsi.

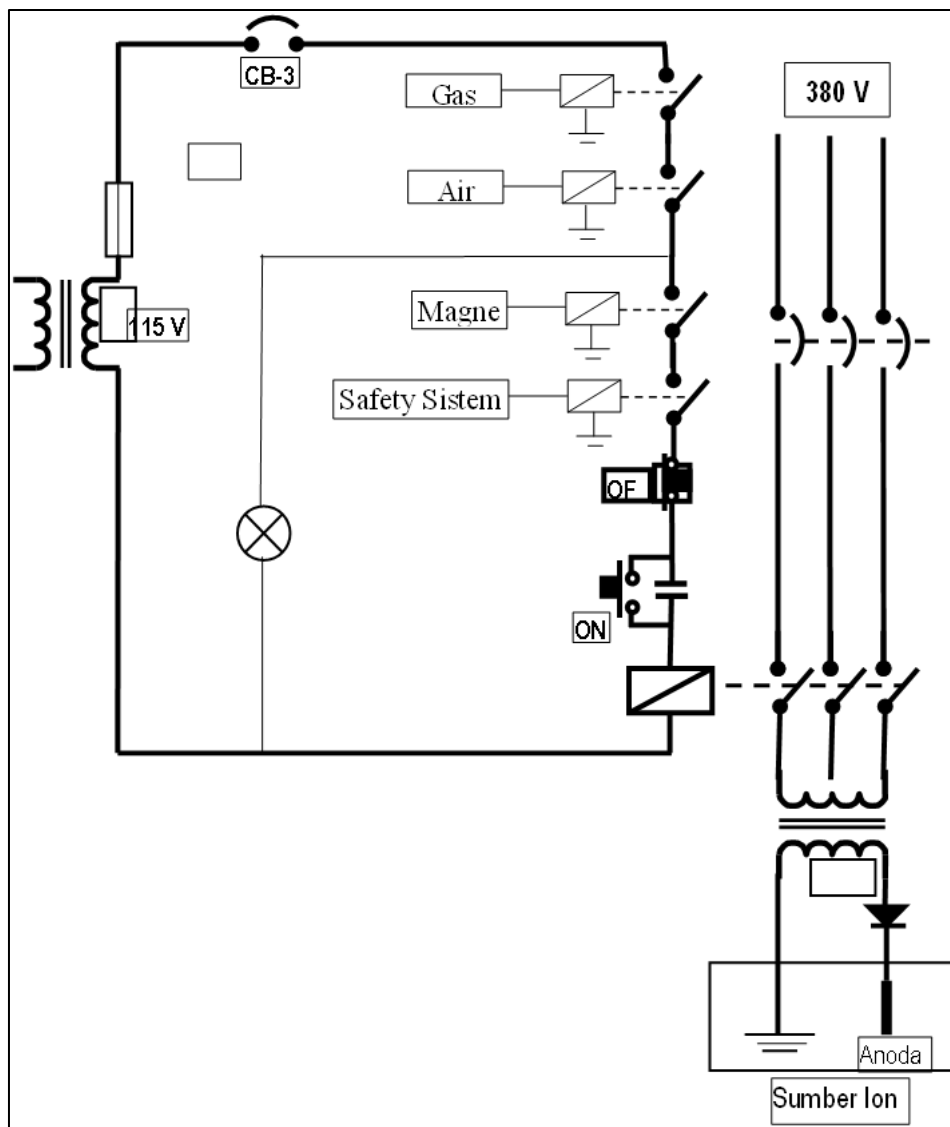
a. Sistem *Interlock* Sumber Ion

Sumber ion siklotron memerlukan catu daya untuk memberikan tegangan antara katoda dan anoda, agar dapat terjadi proses ionisasi hingga terbentuknya ion yang akan dipercepat. Sistem *interlock* pada sumber ion terdiri dari :

1. Kontaktor pendingin dalam kondisi tertutup; berarti aliran air pendingin untuk sumber ion telah tercukupi.
2. Kontaktor Magnet Yoke dalam kondisi tertutup; berarti kumparan magnet telah mendapat aliran arus (medan magnet telah dibangkitkan).
3. Kontaktor gas dalam kondisi tertutup; berarti gas telah dimasukkan ke dalam sumber ion.

4. Kontaktor *safety* sistem dalam kondisi tertutup; berarti sistem keselamatan eksternal telah terpenuhi, personil tidak dapat masuk ke dalam *cave*.

Rangkaian sistem *interlock* pada catu daya sumber ion dapat dilihat pada Gambar 40.



Gambar 40. Sistem interlock Sumber Ion
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

b. Sistem Interlock Anoda Power Supply (APS)

Anode power supply (APS) adalah sistem yang dapat memberikan tegangan tinggi DC ke tabung trioda osilator radio frekuensi siklotron. Catu daya anoda tersebut merupakan suatu penyearah tegangan tinggi dengan *input* tegangan AC 480V / 96A / 3 fase / 60 Hz, sedang *output* nya tegangan DC teregulasi 12 KV/6A. Sistem ini dilengkapi dengan sistem kendali dan sistem proteksi yang dapat dikendalikan melalui panel kendali yang ada di ruang kendali siklotron. Sistem proteksi berupa rangkaian proteksi terhadap beban lebih yaitu *overload circuit*, sedangkan sistem proteksi terhadap terjadinya loncatan listrik (*spark*) pada *dees* adalah *crobar chassis*. Diagram kotak catu daya anoda ini dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Gambar 41. Diagram Kotak Catu Daya Sistem APS
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Tegangan keluaran sistem APS tidak langsung di catukan (*supplied*) ke anoda tabung trioda, melainkan dilewatkan pada suatu untai *interlock* yang juga berfungsi sebagai sistem proteksi terhadap terjadinya kerusakan pada anoda tabung trioda.

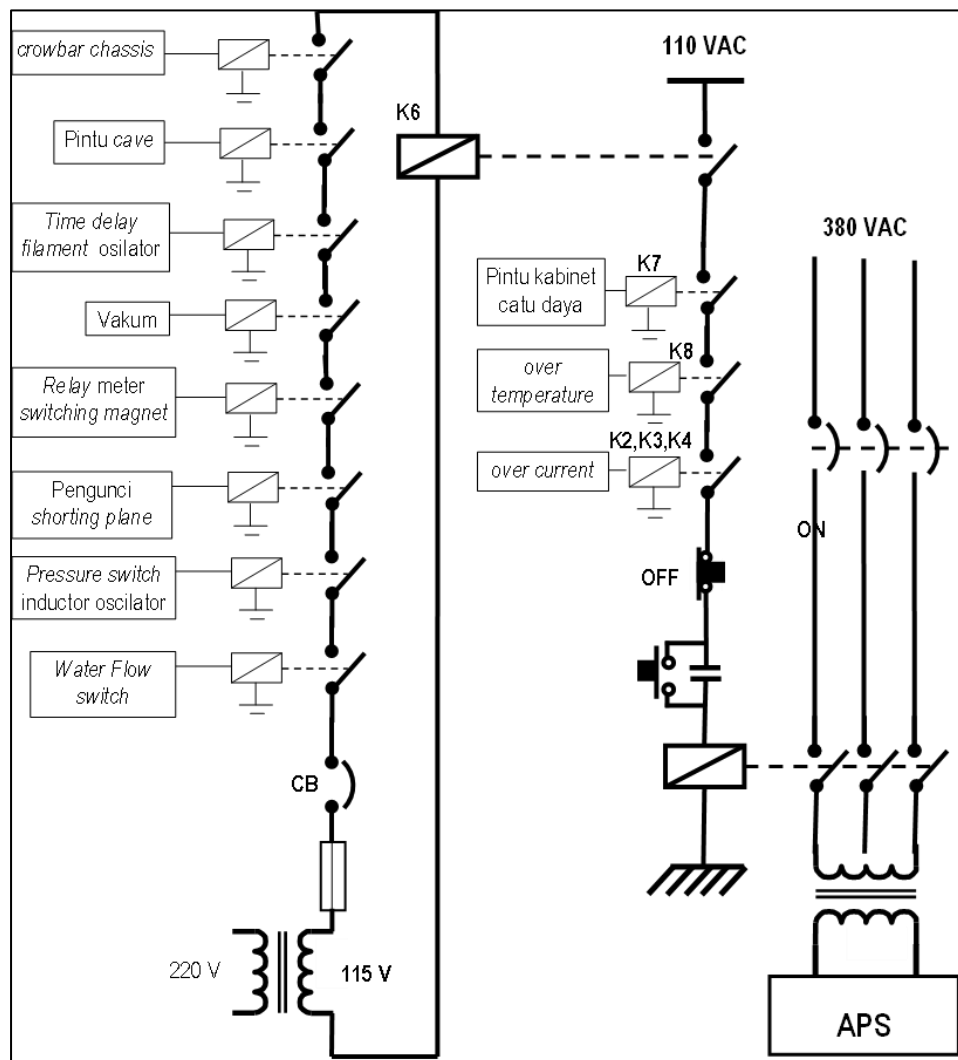
Sistem *interlock* pada APS dapat dilihat pada Gambar 42, sedangkan prinsip kerjanya dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Saklar aliran (*flow switch*) yang digerakkan oleh air pendingin yang mengalir pada *dee right*, *dee left*, *front resonator*, *rear resonator*, *striper*, *harmonic coil* dan *probe* harus tertutup, berarti air pendingin pada sistem tersebut telah mencukupi.
2. Saklar tekanan (*pressure switch*) pada induktor bekerja, yang mengindikasikan bahwa induktor pada osilator pada posisi difungsikan (*in*) atau tidak difungsikan (*out*).
3. Pengunci pada *shorting plane* harus tertutup; berarti frekuensi osilator selama operasi tidak dapat dirubah.
4. *Relay* pada meter *switching magnet* harus tertutup; berarti tidak terjadi penyesatan / penyimpangan arah berkas pada *switching magnet*.
5. Kontaktor pada sistem vakum harus tertutup; berarti tingkat kevakuman telah mencukupi.
6. Kontaktor *time delay* harus tertutup; berarti waktu tunda telah mencukupi (waktu tunda dimulai pada saat *filament* pada osilator dihidupkan, selama 20 detik setelah air pendingin mengalir).
7. Pintu *cave* siklotron (*safety sistem*) harus tertutup; berarti sistem keselamatan eksternal telah terpenuhi, personil tidak dapat masuk ke *cave* siklotron dan *cave target*.
8. Kontaktor pada *crowbar chassis* harus tertutup; berarti *crowbar chassis* atau sistem pencegahan terjadinya *spark* telah mendapat daya.

Dengan terpenuhinya delapan persyaratan diatas maka kumparan *relay* K6 akan aktif, yang berarti kontaktor K6B akan tertutup. Dengan tertutupnya kontaktor K6B berarti ada persyaratan lain yang harus dipenuhi selama siklotron beroperasi yaitu:

1. Kontaktor K7B tertutup; berarti pintu kabinet panel catu daya / *door interlock* telah tertutup.
2. Kontaktor K8B pada kondisi tertutup; berarti sensor *over temperature* pada kondisi tertutup; berarti tidak terjadi panas berlebih pada sistem catu daya.
3. Kontaktor K2A, K3B, K4A dalam kondisi tertutup; berarti tidak terjadi arus *input / output* yang melampaui batas (*over current*).

Apabila semua persyaratan terpenuhi maka lampu indikator *Ready* pada APS akan "On".



Gambar 42. Sistem *Interlock* APS
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

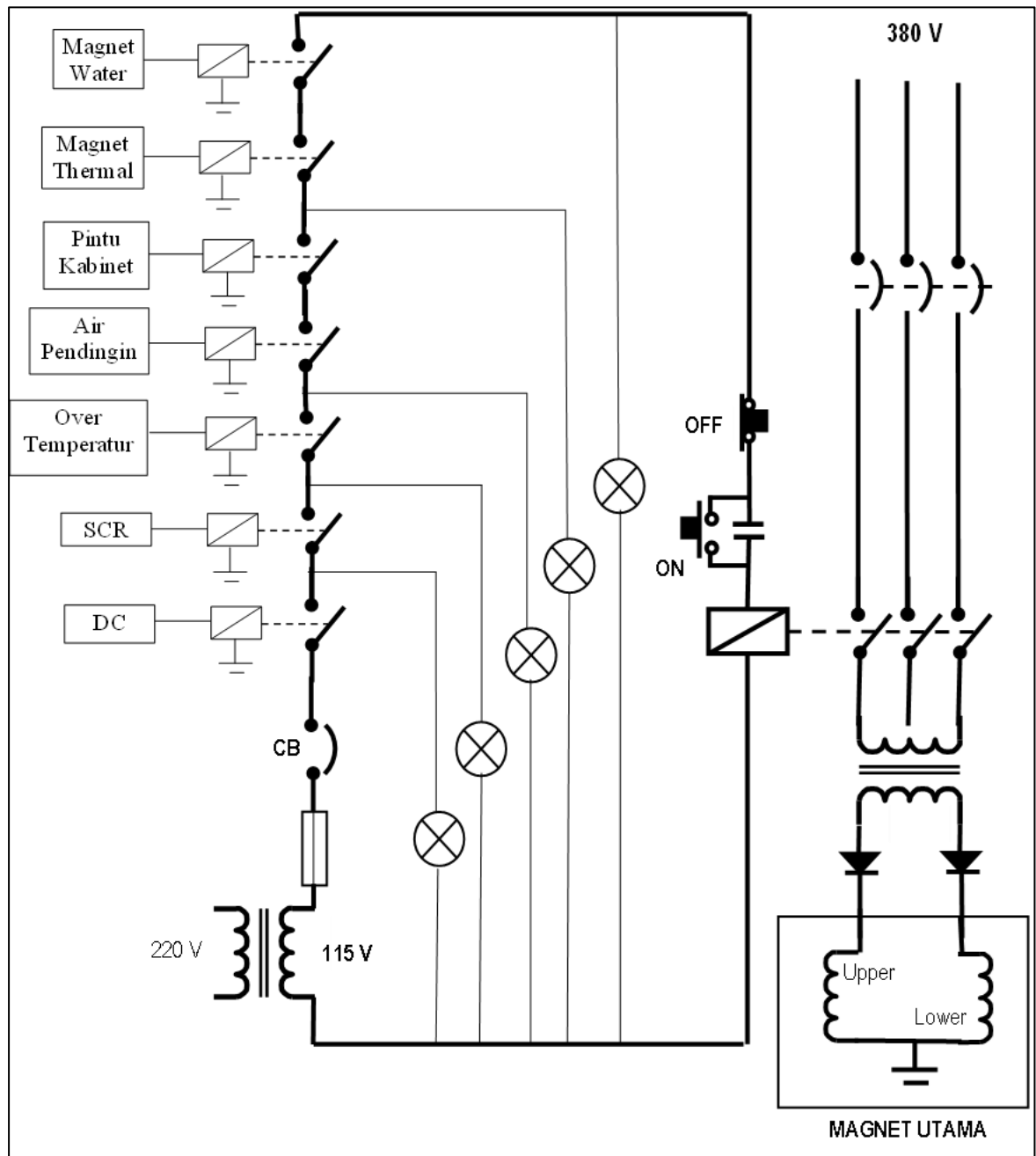
c. Sistem *Interlock* Magnet Utama

Catu daya magnet utama memasok arus DC teregulasi ke kumparan magnet. Regulasi arus tersebut dilakukan dengan pengendalian fase dari sistem *semi-converter* SCR, yang menghasilkan regulasi arus sebesar 5×10^{-4} dari arus operasi. *Input* dari catu daya sistem magnet ini adalah sumber AC 480 volt 3 fase yang dihubungkan dengan suatu *over load protection circuit breaker* dan kontaktor penghubung AC480 volt dengan kumparan primer trafo daya. Kontaktor tersebut akan aktif (tertutup) apabila seluruh persyaratan unsur *interlock* dipenuhi. Diagram sistem catu daya magnet utama beserta sistem *interlock* dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.** Adapun cara kerja sistem *interlock* c atu daya magnet utama ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kontaktor DC pada kondisi tertutup; berarti arus yang mengalir pada kumparan magnet tidak melebihi 500 A (arus keluaran catu daya maksimum).
2. Kontaktor SCR pada kondisi tertutup; berarti sistem kendali arus SCR telah mendapat daya ; yang berarti pula besar arus yang mengalir pada kumparan magnet dalam keadaan terkendali.
3. Kontaktor *temperature* pada kondisi tertutup; berarti sensor *over temperature* tidak aktif; yang berarti pula tidak terjadi panas berlebih pada sistem catu daya.
4. Kontaktor *water* harus tertutup; berarti air pendingin pada catu daya sistem magnet utama telah mencukupi.
5. Kontaktor *door* harus tertutup; berarti pintu kabinet panel catu daya telah tertutup.
6. Kontaktor *magnet thermal* pada kondisi tertutup; berarti temperatur pada kumparan magnet tidak melampaui batas.
7. Kontaktor *magnet water* pada kondisi tertutup; berarti aliran air pendingin pada kumparan magnet telah mencukupi.

Dengan terpenuhinya tujuh persyaratan unsur *interlock* di atas, bila tombol *On* ditekan maka *coil* K mendapatkan daya, kontaktor

penghubung catu daya menutup, magnet utama mendapat daya (bekerja).



Gambar 43. Sistem *Interlock* Magnet Utama

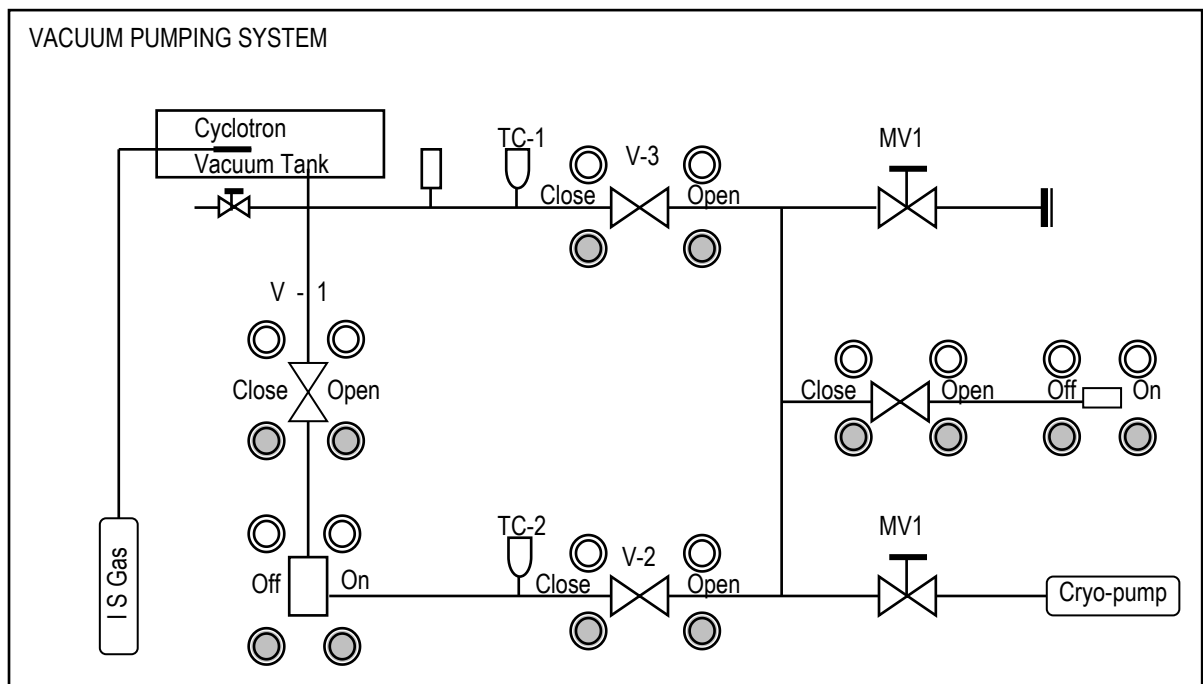
Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

d. Sistem *Interlock* Pada Pengoperasian Vakum Tangki Siklotron

Sistem vakum dilengkapi dengan untai *interlock* yang berfungsi selain sebagai pengaman pompa diffusi juga merupakan tata urutan membuka dan menutup *valve* pada instalasi sistem vakum tinggi. Skema tata urutan pengoperasian sistem vakum dapat dilihat pada Gambar 44, sedangkan Rangkaian *interlock* pada sistem vakum tangki siklotron dapat dilihat pada Gambar 45. Hubungan “interlock” pengendalian keselamatan internal dapat dilihat pada Tabel 9.

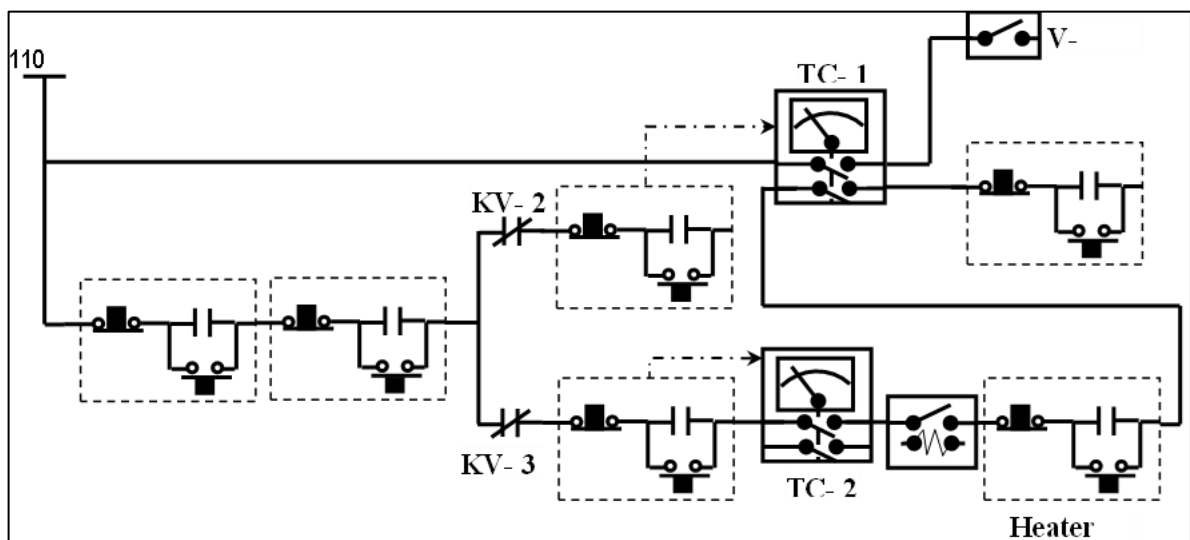
Adapun cara kerja sistem *interlock* tersebut adalah sebagai berikut :

1. Saklar termal (*thermal switch*) merupakan unsur *interlock* dari pemanas pompa diffusi; pemanas pompa diffusi akan *Off* jika pompa terlalu panas.
2. Pemanas pompa diffusi, *foreline valve* (V2), *rough valve* (V3) dan TC-1 merupakan unsur *interlock* dari *butterfly valve* (V1); *butterfly valve* (V1) akan tertutup jika pemanas pompa diffusi *Off* atau jika *foreline valve* (V2) ditutup atau jika *rough valve* (V3) dibuka atau TC-1 > 50 mikron Hg.
3. *Foreline valve* (V2) dan *rough valve* (V3) dikendalikan melalui *relay time delay*, maka salah satu *valve* harus tertutup sempurna sebelum yang lainnya dibuka.
4. *Set point* dari TC-2 merupakan unsur *interlock* dari pemanas pompa diffusi; pemanas pompa diffusi akan *Off* jika tekanan pada *foreline* terlalu tinggi (TC-2 > 200 mikron Hg).
5. *Set point* dari TC-1 merupakan unsur *interlock* dari VAT *valve* pompa *Cryogenic*, VAT *valve* belum bisa dibuka apabila TC-1 > 50 mikron Hg.



Gambar 44. Skema tata urutan pengoperasian sistem vakum tinggi

Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN



Gambar 45. Sistem interlock pada vakum

Sumber: Milik ITRR-DPFK, BRIN

Tabel 9 Hubungan “interlock” pengendalian keselamatan internal siklotron – CS 30 BRIN.

Komponen Utama	Persyaratan Pengoperasian
1. Magnet Utama	1. Aliran air pendingin untuk catu daya telah mencukupi. 2. Aliran air pendingin untuk kumparan magnet telah memenuhi. 3. Pintu unit catu daya tertutup sempurna. 4. Arus pada kumparan magnet tidak melebihi 500 A. 5. Temperatur catu daya dan kumparan magnet tidak melebihi batas.
2. Osilator frekuensi radio	1. Pintu catu daya menutup sempurna. 2. Aliran air pendingin untuk catu daya telah mencukupi. 3. Aliran air pendingin untuk Dee, resonator, beam probe telah mencukupi. 4. Frekuensi osilator telah memenuhi dan tidak berubah lagi. 5. Keselamatan eksternal telah terpenuhi. 6. Tidak terjadi penyesatan arah berkas pada dinding magnet. 7. Kevakuman ruang vakum siklotron telah memenuhi. 8. Waktu tunda (“delay time”) untuk hidupnya tabung osilator telah terpenuhi. 9. Temperatur dan arus pada catu daya tidak melebihi batas.
Sumber ion	1. Penutup catu daya menutup sempurna. 2. Aliran air pendingin pada catu daya dan sumber ion telah memenuhi. 3. Kuat medan magnet utama telah mencukupi. 4. Gas untuk partikel penembah telah mengalir pada sumber ion. 5. Tidak terjadi arus berlebihan pada catu daya.
Sistem vakum	1. Temperatur pompa difusi tidak melebihi batas. 2. Katup-katup (“valves”) pada rangkaian system vakum berada dalam keadaan yang seharusnya.

B. Tugas dan Tanggung Jawab

Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) No. 6 Tahun 2020 Tentang Keselamatan Radiasi dalam Produksi Radioisotop untuk Radiofarmaka, tugas dan tanggung jawab personil di fasilitas Produksi Radioisotop untuk Radiofarmaka, adalah sebagai berikut:

1. Operator Produksi Radioisotop berbasis siklotron:

- a. mengetahui, memahami, dan melaksanakan semua ketentuan keselamatan kerja radiasi;
- b. mengetahui dan memahami pengoperasian peralatan produksi Radioisotop;
- c. menggunakan perlengkapan Proteksi Radiasi sesuai prosedur;
- d. menyiapkan target untuk produksi Radioisotop;
- e. melaporkan setiap kejadian Kecelakaan Radiasi kepada Petugas Proteksi Radiasi;
- f. melakukan rekaman terhadap jenis dan jumlah Radioisotop dan Radiofarmaka yang tidak digunakan;
- g. melakukan rekaman terhadap jenis dan aktivitas produk Radioisotop hasil produksi; dan
- h. melakukan dekontaminasi daerah kerja di bawah pemantauan Petugas Proteksi Radiasi apabila terjadi kontaminasi.

2. Supervisor Produksi Radioisotop berbasis siklotron:

- a. melaksanakan semua ketentuan proteksi dan Keselamatan Radiasi;
- b. menyusun dan mengembangkan prosedur produksi Radioisotop;
- c. menyusun jadwal produksi Radioisotop;
- d. menyusun program perawatan fasilitas produksi Radioisotop;
- e. mengawasi jalannya proses produksi Radioisotop;
- f. melakukan evaluasi dan koreksi apabila terdapat ketidaksesuaian pengoperasian dan perawatan fasilitas produksi Radioisotop untuk Radiofarmaka;
- g. menggunakan perlengkapan Proteksi Radiasi sesuai prosedur;

3. Petugas Perawatan Fasilitas Produksi Radioisotop berbasis Siklotron:

- a. mengetahui, memahami, dan melaksanakan semua ketentuan keselamatan kerja radiasi;
- b. melaksanakan pemeriksaan fungsi dan perawatan berkala pada peralatan produksi Radiosiotop sesuai prosedur yang diberikan oleh pabrikan dan prosedur kerja dari Pemegang Izin;
- c. melakukan perbaikan pada peralatan produksi Radiosiotop;
- d. menggunakan perlengkapan Proteksi Radiasi sesuai prosedur;
- e. memastikan bahwa fasilitas produksi Radioisotop berfungsi dengan baik dan memenuhi ketentuan proteksi dan Keselamatan Radiasi; dan
- f. membuat laporan hasil perawatan, analisis kerusakan, dan tindakan perbaikan terhadap peralatan produksi Radioisotop.

4. Supervisor Perawatan Fasilitas Produksi Radioisotop berbasis Siklotron:

- a. melaksanakan semua ketentuan proteksi dan Keselamatan Radiasi;
- b. menyusun dan mengembangkan prosedur pengoperasian dan perawatan fasilitas produksi Radioisotop;
- c. menyusun program perawatan fasilitas produksi Radioisotop;
- d. menggunakan perlengkapan Proteksi Radiasi sesuai prosedur;
- e. melakukan evaluasi dan koreksi apabila terdapat ketidaksesuaian pengoperasian dan perawatan fasilitas produksi Radiosiotop;
- f. melaporkan setiap kejadian Kecelakaan Radiasi kepada Petugas Proteksi Radiasi;
- g. memantau pelaksanaan perawatan fasilitas produksi Radioisotop; dan
- h. melaporkan kepada Pemegang Izin mengenai semua ketidaksesuaian pengoperasian dan perawatan fasilitas produksi Radioisotop.

C. Rangkuman

1. Bahaya dan Risiko Operasional: Pengoperasian siklotron memiliki berbagai risiko seperti paparan radiasi, potensi kontaminasi, dan kegagalan sistem mekanis atau elektronik. Oleh karena itu, perlu diketahui bahaya dan risiko dari pengoperasian siklotron tersebut sehingga dapat memperkecil terjadinya kerugian.
2. Sistem keselamatan internal meliputi sistem kendali yang menyatu dengan sistem kendali siklotron yang dapat menggagalkan operasi saat adanya anomali persyaratan operasi.
3. Sistem keselamatan eksternal sistem kendali diluar sistem internal siklotron yang masih terhubung dengan sistem siklotron. Contohnya adalah area monitor laju dosis radiasi, interlock sistem pintu cave, pengendalian pintu cave.
4. Akses ke area radiasi (cave) hanya diperbolehkan saat siklotron dalam keadaan aman, yaitu semua berkas radiasi dalam keadaan OFF. Pintu akses dilengkapi dengan sistem interlock yang memutus operasi jika pintu terbuka secara paksa.
5. Operator produksi, supervisor produksi, petugas perawatan dan supervisor perawatan memiliki tanggung jawab untuk memastikan bahwa semua prosedur keselamatan dijalankan, termasuk pemantauan sistem secara berkala, pengoperasian sesuai dengan standar, dan penanganan situasi darurat.

D. Evaluasi

1. Bagaimana cara mengurangi risiko paparan radiasi?
 - a. Menggunakan peralatan pelindung diri dan mematuhi prosedur keselamatan
 - b. Mematikan sistem pendingin
 - c. Menurunkan daya magnet utama
 - d. Membuka akses ke area radiasi selama operasi

Jawaban: a

2. Apa yang terjadi jika sistem interlock aktif saat operasi?
 - a. Operasi dilanjutkan dengan parameter rendah
 - b. Semua pintu akan terkunci
 - c. Sistem otomatis berhenti untuk mencegah bahaya lebih lanjut
 - d. Tidak ada dampak pada sistem

Jawaban: c

3. Kapan akses ke area radiasi diperbolehkan?
 - a. Saat siklotron dalam keadaan aktif
 - b. Saat sistem RF aktif
 - c. Setelah siklotron dalam keadaan aman dan sistem nonaktif
 - d. Ketika sistem pendingin dimatikan

Jawaban: c

4. Apa tugas utama operator siklotron?
 - a. Mengatur keuangan operasional
 - b. Memastikan operasi aman dan selamat sesuai SOP
 - c. Merancang desain siklotron baru
 - d. Mengawasi pengisian bahan bakar

Jawaban: b

5. Apa peran petugas perawatan siklotron?
- a. Mengembangkan sistem baru
 - b. Melatih personel baru
 - c. Menulis laporan keuangan
 - d. Memperbaiki kerusakan dan memastikan kondisi sistem stabil

Jawaban: d

MATERI POKOK 5: PRAKTIKUM PENGOPERASIAN SIKLOTRON

Indikator Hasil Belajar: mampu mengoperasikan siklotron

A. Pendahuluan

1. Latar belakang

Seorang petugas siklotron yang bertugas sebagai operator harus memiliki keahlian dan ketrampilan dalam pengoperasian sistem siklotron. Dengan memahami prinsip pengoperasian siklotron, sebagai operator dapat menyiapkan kondisi siklotron siap untuk di operasikan dan sekaligus mengoperasikannya.

Pembuatan panduan ini bertujuan untuk memberikan petunjuk kepada peserta dalam persiapan dan melakukan pengoperasian siklotron. Panduan ini juga menjelaskan langkah-langkah apa yang perlu dilakukan dan diperhatikan sebelum melakukan pengoperasian mesin siklotron.

2. Rincian kegiatan praktikum

Pada praktikum ini, peserta akan melakukan 3 kegiatan, yaitu

- a. Pevakuman *Chamber/* Tangki Siklotron
- b. *Pre-start* siklotron
- c. *Start-up* siklotron

3. Tujuan pembelajaran

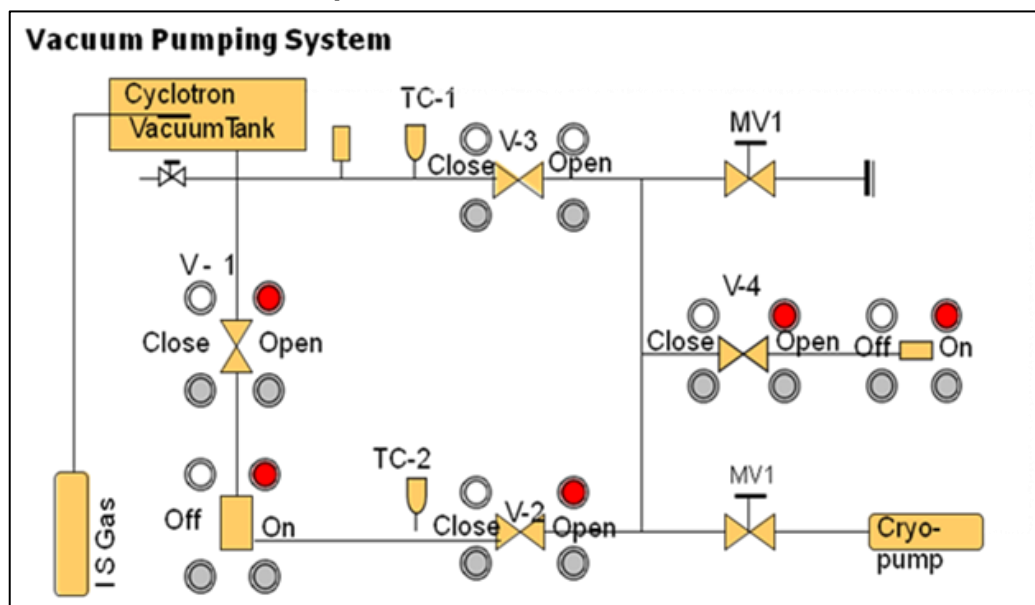
Setelah mengikuti pelatihan ini peserta dapat menjadi operator siklotron yang terlatih dan handal serta dengan memahami prinsip pengoperasian siklotron, sebagai operator dapat mengoperasikan mesin siklotron secara aman untuk menjaga keselamatan personil maupun peralatan mesin siklotron, dengan indikator keberhasilan:

- a. Mampu memvakum *chamber/* tangki siklotron
- b. Mampu melakukan pre-start siklotron
- c. Mampu melakukan start-up siklotron

B. Teori

Dalam pengoperasian sistem siklotron untuk menghasilkan berkas ion energetik untuk iradiasi target dalam berbagai keperluan, dan juga pada pengoperasian sub-sub sistem siklotron dalam rangka mempertahankan kesiapan fungsi operasi sistem siklotron secara keseluruhan, pada umumnya terdapat enam keadaan siklotron yang perlu diketahui dan difahami diantaranya adalah Keadaan *Total Stop* (atau keadaan off), Keadaan *Maintenance*, Keadaan *Standby*, Keadaan *Access*, Keadaan *Beam On* (atau keadaan Aktif) dan Keadaan *Fault*.

Sistem Pemvakuman Pompa



Gambar 46. Skema Sistem Pemvakuman Pompa

a. Pompa Mekanik

1. Pompa Mekanik dihubungkan melalui *valve-valve electro-pneumatic* ke *foreline* pompa diffusi dan *chamber siklotron*, seperti terdapat pada Gambar 46.
2. Penggunaan pompa mekanik adalah untuk pemvakuman awal *chamber siklotron* sampai pada tingkat kevakuman operasi pompa diffusi.
3. Pada kondisi normal pompa vakum mekanik ini dapat mencapai 1×10^{-3} torr.

4. Setelah mencapai tingkat operasi pompa vakum diffusi, pompa mekanik ini digunakan untuk memvakumkan foreline pompa diffusi

b. Pompa Diffusi

1. Pompa diffusi ini digunakan untuk mevakumkan *chamber* siklotron sampai pada tingkat operasi pompa vakum *criogenic*.
2. Pada kondisi normal pompa diffusi ini dapat mencapai 1×10^{-7} torr.
3. Pompa diffusi ini dihubungkan ke *chamber* siklotron melalui *butterfly valve* yang digerakkan secara *electro-pumatic*.

c. Pompa cryogenic

Dilakukan pemvakuman dengan pompa *criogenic* untuk mencapai kevakuman yang lebih tinggi.

C. Peralatan dan Bahan

1. Alat Tulis
2. Kertas
3. Jas lab
4. Peralatan Mekanik dan elektronik
5. Mesin siklotron

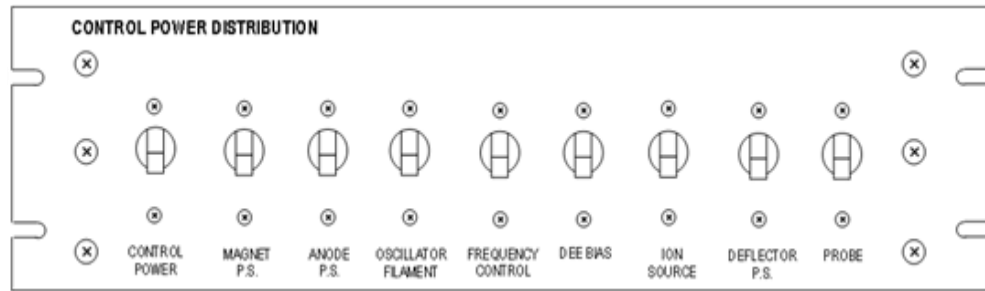
D. Langkah Kerja

1. Melakukan persiapan peralatan yang akan digunakan.
2. Melakukan pemvakuman chamber siklotron
 - a. Pastikan udara bertekanan telah mencapai tekanan yang disyaratkan untuk spesifikasi operasi sistem vakum.
 - b. Hidupkan sistem pompa pendingin.
 - c. Hidupkan saklar utama untuk sistem vakum.
 - d. Hidupkan saklar meter vakum pada panel sistem control vakum
 - e. Hidupkan pompa mekanik
 - f. Vakumkan ruang pompa cryo dengan pompa mekanik sampai tekanan minimal 4×10^{-2} Torr, tutup valve dari pompa mekanik ke ruang pompa

cryo.

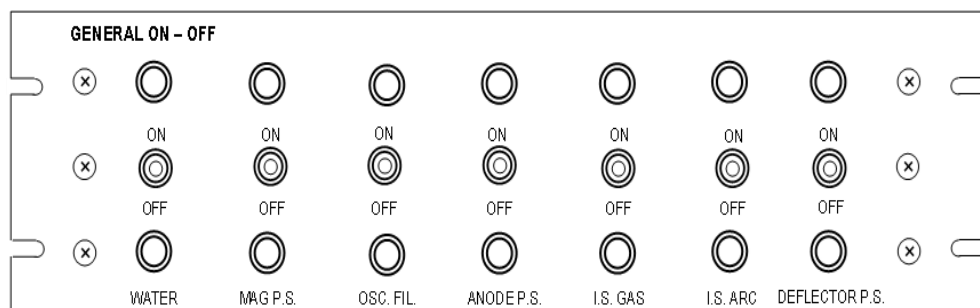
- g. Hidupkan Kompresor pompa cryo, tunggu sekitar 2 jam untuk mencapai tekanan pompa cryo 14 K.
 - h. Buka Valve V4 dan V3 (Roughing Valve) untuk memvakumkan ruang yang hendak divakumkan.
 - i. Ketika Manometer TC1 menunjukkan tekanan sekitar 10-3 Torr, tutup katup V3 dan bukalah katup V2 (Backing Valve) untuk memvakumkan fore line pompa diffusi, Setelah Manometer TC2 menunjukkan tekanan sekitar 10-3 torr, hidupkan heater pompa diffusi.
 - j. Sambil menunggu heater pompa diffusi panas, tutuplah V2 dan buka kembali V3 untuk memperbaiki kevakuman pada ruang yang hendak divakumkan.
 - k. Setelah sekitar 35 menit, filament pada heater telah panas, pompa diffusi siap dioperasikan, untuk itu tutuplah katup V3 dan buka V2 dan V1 (HVH = High Vacuum Valve)
 - l. Setelah sekitar 2 jam Kompresor pompa cryo beroperasi atau tekanan 14 K, buka VAT pompa cryo.
 - m. Setelah manometer penning menunjukkan tingkat kevakuman sekitar 10-7 Torr, ini berarti ruang / sistem yang divakumkan telah mencapai kevakuman tinggi.
3. Melakukan pre-start yang bertujuan untuk melihat kondisi ruangan dan system siklotron siap untuk dioperasikan dengan melengkapi data pada formulir 1.
 4. Melakukan Start-Up siklotron dengan melengkapi data pada formulir 2. Pada Langkah ini operator perlu melihat data RUN atau RUN SHEET pengoperasian siklotron sebelumnya dan menyesuaikan parameter operasi siklotron sesuai dengan parameter operasi siklotron dari data RUN atau RUN SHEET siklotron tersebut.

a. Hidupkan *Panel Control Power Distribution*,



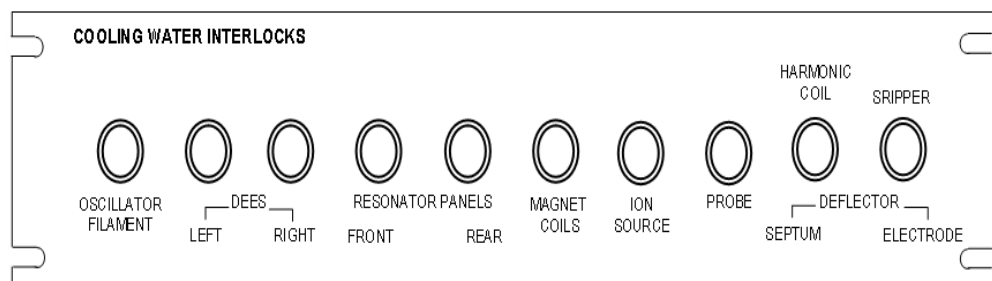
Gambar 47. Panel Kontrol Power Distribusi

b. Hidupkan *Panel General On-Off*,



Gambar 48. *Panel General ON-OFF*

c. Hidupkan sistem air pendingin, maka lampu indicator akan menyala,



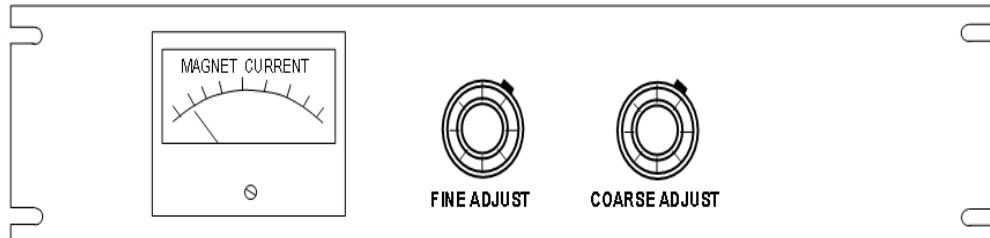
Gambar 49. *Panel Cooling Water Interlocks*

d. Lihat meter vakum. meter vakum minimal menunjukkan orde minus 6 torr,



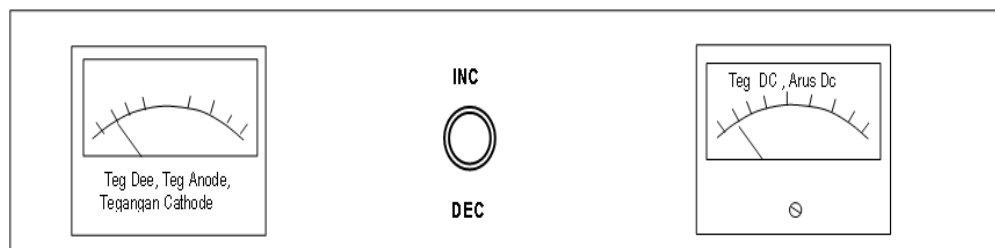
Gambar 50. Panel Meter Vakum

- e. Hidupkan *Magnet Power Supply*, naikan *dial coarse adjust* secara perlahan, perhatikan kenaikan arus magnet, atur *Coarse* pada dial 721 dan arus magnet 310 A,



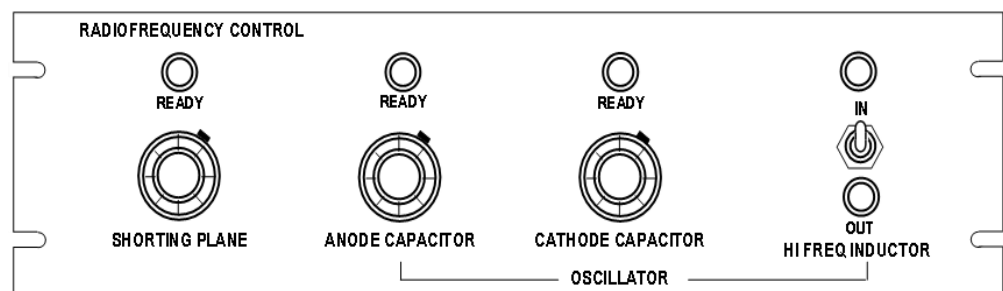
Gambar 51. Panel *Magnet Power Supply*

- f. Hidupkan *Osc. Filamen*
 g. Hidupkan Anode Power Supply (APS), setelah lampu indicator menyala
 h. Naikkan switch Frequency control setelah lampunya nyala. Naikkan tegangan dee pada tegangan operasinya.



Gambar 52. Panel Menaikkan Tegangan Dee

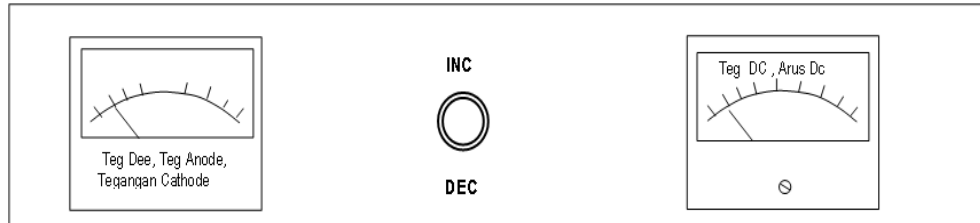
Amati perbandingan antara tegangan DC dan arus DC ($V_{dc}:I_{dc} = 2-2,5$ Ohm), apabila perbandingan belum sesuai atur perlahan dial Anode Capacitor sehingga diperoleh perbandingan yang memenuhi syarat



Gambar 53. Panel Kontrol Radiofrekuensi

- i. Hidupkan Sumber Ion (I.S Gas "on", I.S Arc. "on"). Atur *Arc. Voltage/ Arc.Current* pada harga operasinya (konsultasikan dengan asisten dilapangan).
 j. Lakukan *tune* untuk memperoleh berkas pada *beam probe* pada radius

20 cm dan tarik *beam probe* keluar sedikit demi sedikit dan lakukan tuning setiap kali menarik *beam probe* keluar. Lakukan sampai dengan *beam probe* pada posisi terluar yaitu pada radius sekitar 40 cm



Gambar 54. Panel Arus Berkas

k. Didalam melakukan *tune*:

- Atur posisi sumber ion (cw/ccw ; up/down ; rt/lt ; in/out)
 - Atur *Gas Pressure* (inc./dec.)
 - Atur *inner harmonic coil* x – y, dengan pengatur *harmonic coil* x-y.
 - Atur *outer harmonic coil* x-y, dengan pengatur *harmonic coil* x-y untuk *radius beam probe* mendekati radius ekstraksi.
 - Atur besar arus magnet dengan perubahan yang kecil melalui tombol *fine adjust* pada panel kontron arus megnet.
 - Naikkan tegangan Dee sesuai petunjuk asisten di lapangan
5. Melakukan kegiatan pasca start-up untuk memastikan target hasil iradiasi telah dikirim ke hotcell dan pendingin sistem siklotron.
 6. Setelah selesai praktikum membuat laporan

E. Data Praktikum

1. Data *pre-start* Siklotron

Tabel 10. Lembar Data *pre-start* Siklotron

1. Pengecekan kondisi ruang Siklotron							
Ruang		Humidity (RH %)		Temperatur (°C)			
Cyclotron							
Control							
Power Supply							
Cyclotron							
2. Pengecekan Air Pendingin							
Tinggi air reservoir		cm		Presurre		 bar	
Temperatur		 °c		Conductivity		 µS	
3. Pengecekan Udara Bertekanan							
Pressure		 bar					
4. Pengecekan Power Supply							
A.C Line Regulator		L1 = V		L2 = V		L3 = V	
Panel Distribusi		Magnet PS		APS		HC PS	
OK	NOK	OK	NOK	OK	NOK	OK	NOK
5. Pengecekan Tingkat Kevakuman							
TC1		 Torr					
Silotron		 Torr					
6. Keselamatan Eksternal							
Ion Source				RF System			
OK		NOK		OK		NOK	

2. Data Pengoperasian Siklotron (*Run Sheet*)

Tabel 11. Lembar Data Pengoperasian Siklotron (*Run Sheet*)

<i>Date</i>	:		<i>Run Number</i>	:	.....
<i>Operator</i>	:	1.	<i>Purpose</i>	:	.....
	:	2.	<i>Particle</i>	:	.....
	:	3.	<i>Energy</i>	:	.....
<i>RF System Data</i>			<i>Dee Bias</i>		
<i>Frequency</i>	:	 MHz	<i>Voltage</i>	:	 kV
<i>V Dee</i>	:	 kV	<i>Current</i>	:	 mA
<i>V Anode</i>	:	 kV	<i>Lifetime</i>		
<i>V Cathode</i>	:	 kV	<i>Osc. Filament</i>	:	 hours
<i>V DC</i>	:	 kV	<i>Ion Source</i>	:	 hours
<i>I DC</i>	:	 Amps	<i>Stripper Position</i>		
<i>Oscillator Dial Setting</i>			<i>Radial</i>	:	.....
<i>Shorting Plane</i>	:	.....	<i>Azimuth</i>	:	.....
<i>Anode Capacitor</i>	:	.....			
<i>Cathode Capacitor</i>	:	.....			
<i>Anode Inductor</i>	:	 IN			

Main Magnet System Data			Beam Data		
Dial Coarse	:	.....	Internal BP	:	 μA
Dial Fine	:	.....	Extract Radius	:	 cm
Current	:	 A	Stripper	:	 μA
Vacuum System			Extraction Efficiency	:	 %
Cyclotron Tank	:		MBS	:	 μA
• Before gas	:	 Torr	TS	:	 μA
• After gas	:	 Torr	Target	:	 μA
Main Beam Line	:	 mBar	BL Transmission	:	 %
Target Chamber	:	 Torr	Collimator LT	:	 μA
Operation Time			Collimator RT	:	 μA
Tuning	:	 hours	Collimator T	:	 μA
Operation	:	 hours	Collimator B	:	 μA
Dose	:	 μA	Irradiation Data		
	:		Count	:	 hours
	:		Scale	:	 hours
	:		Irradiation Time	:	 hours
	:		Current Average	:	 μA
Ion Source Data			Harmonic Coil Data		
Gas Flow	:	 sccm	Inner X	:	.....
Arc Voltage	:	 kV	Inner Y	:	.....
Arc Current	:	 A	Outer X	:	.....
Dial	:	.....	Outer Y	:	.....

Ion Source Position		
<i>In/ Out</i>	:	.....
<i>RT/ LT</i>	:	.....
<i>UP/ DN</i>	:	.....
<i>CW/ CCW</i>	:	.....

Beam Transport System					
Combination Magnet			Mainline Quadrupole		
<i>Voltage</i>	:	 kV	<i>Front Element (upper)</i>	:	
<i>Current</i>	:	 A	• <i>Voltage</i>	:	 V
XY Steering Magnet			• <i>Current</i>	:	 A
<i>Right</i>			<i>Rear Element (lower)</i>	:	
• <i>Voltage</i>	:	 V	• <i>Voltage</i>	:	 V
• <i>Current</i>	:	 A	• <i>Current</i>	:	 A
<i>Left</i>			Second Quadrupole		
• <i>Voltage</i>	:	 V	<i>Front Element (upper)</i>		
• <i>Current</i>	:	 A	• <i>Voltage</i>		 V
<i>Up</i>			• <i>Current</i>		 A
• <i>Voltage</i>	:	 V	<i>Rear Element (lower)</i>		
• <i>Current</i>	:	 A	• <i>Voltage</i>		 V
<i>Down</i>			• <i>Current</i>		 A
• <i>Voltage</i>	:	 V			
• <i>Current</i>	:	 A			

Switching Magnet		
<i>Current</i>	:	 A
<i>Dial Coarse</i>	:	.....
<i>Dial Fine</i>	:	.....
Comment		
Failure Records		
Corrective Action Plans		

Mengetahui,
 Penanggung Jawab

(.....)

F. Tugas

1. Bila arus berkas ion negatif (H-) pada *beam probe* terdalam (20 cm) sebesar 60 μA dan pada *beam probe* terluar (40 cm) sebesar 56 μA . Maka efisiensi akselerasinya adalah
2. Bila arus berkas tersebut pada soal no. 1 setelah diekstraksikan menjadi ion positif (H+) atau proton menjadi 27 μA . Maka besar efisiensi ekstraksinya adalah

Jawaban:

1. $\eta = (\text{Arus berkas terluar probe} / \text{Arus berkas Terdalam probe}) \times 100 \%$
 $= (56/60) \times 100 \% = 93,33\%$
2. $\eta = (2 \times \text{Arus Berkas Terakstrasi} / \text{Arus berkas terluar probe}) \times 100 \%$
 $= (2 \times 27 / 56) \times 100 \%$
 $= (54/56) \times 100 \% = 96,64 \%$

Catatan:

Semua gambar yang tidak disebutkan sumbernya, merupakan milik ITRR-DPFK, BRIN.

DAFTAR PUSTAKA

- Ion Beam Applications (IBA). (2009). *Cyclone 18/9 and 18 Twin Series System Description*. Ion Beam Applications (IBA).
- David Stout. (2010). *Cyclotrons & Radiochemistry, Lecture 2 and 3 Cyclotrons Explained*, Eclipse Cyclotron.
- Hari Suryanto. (2007). *Prosedur Overhaul Siklotron CS-30, Presentasi Persiapan Pelaksanaan Overhaul Siklotron*, PRR-BATAN.
- Hari Suryanto. (2008). *Analisis Penyebab Kegagalan Fungsi Operasi Siklotron dan Upaya Pemulihannya*, Presentasi Ilmiah Peneliti Madya, PRR-BATAN.
- International Atomic Energy Agency (IAEA).(2008). *IAEA Technical Reports Series No. 465. Cyclotron-Produced Radionuclides: Principles and Practices*. International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2009). *IAEA Technical Reports Series No. 468. Cyclotron-Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods*. International Atomic Energy Agency.
- John J. Livingood. (1960). *Argonne National Laboratory, Principles of Cyclic Particle Accelerator*, D. Van Nostrand Company, INC, New York.
- Log Book Overhaul Siklotron. (2008). PRR-BATAN,
- The Cyclotron Corporation (TCC). (1996). *Negative Hydrogen Ion Production and Dissociation.*, The Cyclotron Corporation (TCC), Berkeley, California, USA.
- The Cyclotron Corporation (TCC). (1982). *Operating and Service Manual for CP-42 Cyclotron*, The Cyclotron Corporation (TCC), Berkeley, California, USA.
- Computer Technology and Imaging (CTI). 1985. *Operating and Service Manual for CS-30 Cyclotron*, Computer Technology and Imaging (CTI), Berkeley, California, USA.
- OHARA, Y. (2000). *Ion Source*, Advanced Radiation Technology Center, Takasaki Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute.

BAPETEN. 2020. Peraturan BAPETEN Nomor 6 Tahun 2020 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Produksi Radioisotop untuk Radiofarmaka. BAPETEN

RDS 111 Operating Instructions.(2000). CTI, Inc. 810 Innovation Drive Knoxville, TN 37932 USA, 2000

Rachid Ayad. (2010). IBA Training Cyclone 18/9, IBA Customer Services, Ion Beam Applications (IBA)

.