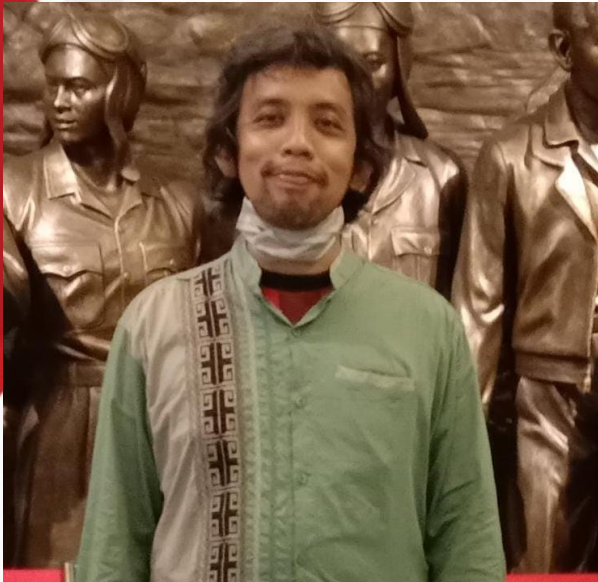


TEORI IRADIATOR

SAEFURROCHMAN

Pelatihan Petugas Iradiator PT. Gajah Tunggal, Tbk

Direktorat Pengembangan Kompetensi BRIN - 2026



Saefurrochman

Peneliti Muda

Pusat Riset dan Teknologi
Akselerator

* Memiliki SIB Operator MBE



- Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, S2
Teknik Elektro



- BATAN Accelerator School
- Regional Accelerator School
- The 2nd Particle Physics School in South-East Asia
- Osaka Prefecture University-BNCT International Training Course for Indonesia
- Coaching Sumber Tegangan Tinggi Akselator
- Workshop Perancangan Trafo Frekuensi Tinggi
- Workshop Sains Dasar dan Teknologi Linac
- NKM Sistem Vakum Akselerator
- NKM Sistem Instrumen dan Kendali Akselerator



1

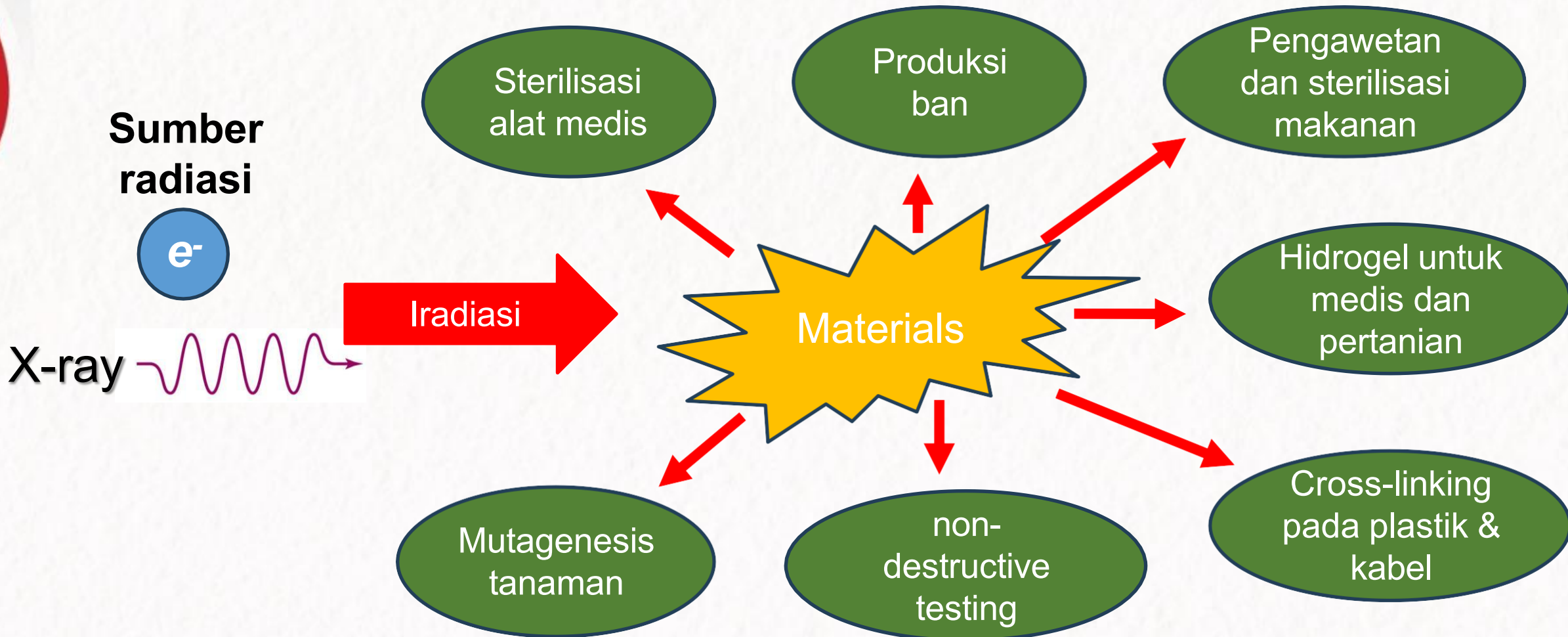
PENDAHULUAN



PENDAHULUAN



Pemanfaatan teknologi nuklir saat ini makin berkembang dan sudah merambah berbagai bidang seperti pertanian, peternakan, kesehatan, industri, lingkungan, energi dan lain-lain.



PENDAHULUAN



- ❑ **Untuk pemanfaatan teknologi nuklir tidak lepas dari penggunaan radiasi dan untuk penggunaan radiasi diperlukan iradiator.**
- ❑ **Iradiator** adalah peralatan yang menggunakan Sumber Radioaktif atau pembangkit radiasi pengion untuk mengiradiasi bahan dengan tujuan polimerisasi, pengawetan, atau sterilisasi.
- ❑ Pada pengoperasian iradiator, maka keselamatan dan efektifitas proses iradiasi sangat bergantung kepada kompetensi pekerja iradiator yang melaksanakan atau kepada personel yang bertanggung jawab terhadap proses iradiasi.
- ❑ **Setiap pekerja iradiator yang bertugas mengoperasikan dan merawat peralatan iradiator harus mempunyai lisensi atau surat izin bekerja (SIB) sebagai pekerja iradiator.**
- ❑ **SIB tersebut diperoleh melalui proses sertifikasi, salah satu persyaratan sertifikasi adalah telah mengikuti dan lulus Pelatihan Pekerja Iradiator.**
- ❑ **Teori Iradiator merupakan materi utama yang diajarkan dalam Pelatihan Pekerja Iradiator.**

Pendahuluan



Kompetensi Dasar: Peserta mampu menjelaskan teori iradiator berbasis Mesin Berkas Elektron

Indikator keberhasilan:

Pada akhir pembelajaran peserta mampu:

1. Menjelaskan prinsip kerja mesin berkas elektron
2. Menjelaskan jenis-jenis mesin berkas elektron
3. Menjelaskan pembangkitan sinar-x

PENDAHULUAN



Manfaat:

Memiliki peluang untuk memiliki SIB iradiator

Mempermudah dalam pengoperasian dan perawatan iradiator

Mampu mengoptimalkan pemanfaatan iradiator

Pokok Bahasan:

Pengertian Iradiator dan Prinsip Kerja Akselerator

Sumber Elektron/ Electron Gun

Sistem Pemercepat

Sistem Transport Berkas Elektron

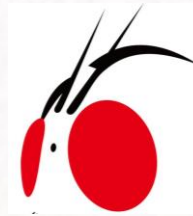
Pembangkitan Sinar-X

2

Pengertian Iradiator dan Prinsip Kerja Akselerator

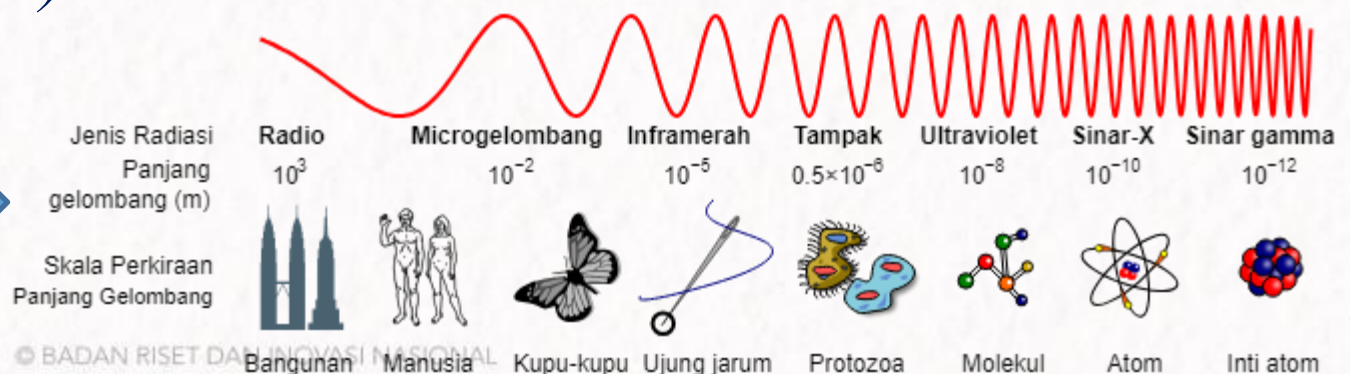


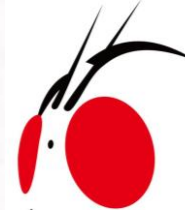
Pengertian Irradiator dan Prinsip Kerja Akselerator



- **Irradiator** : Suatu peralatan/fasilitas berisi sumber radiasi yang digunakan untuk proses iradiasi terhadap bahan dengan tujuan polimerisasi, pengawetan, atau sterilisasi.
- **Sumber radiasi**: peralatan/fasilitas untuk menghasilkan radiasi
- **Radiasi**: energi yang terpancar dari materi (atom) dalam bentuk panas, partikel atau gelombang elektromagnet (foton).
- **Radiasi pengion**: radiasi yang dapat menyebabkan proses ionisasi (terbentuknya ion positif dan ion negatif) apabila berinteraksi dengan materi → *partikel bermuatan, partikel tidak bermuatan, gelombang elektromagnetik (sinar x dan gamma)*
- **Radiasi non-pengion**: radiasi yang tidak menyebabkan efek ionisasi apabila berinteraksi dengan materi → *gelombang elektromagnetik (sinar infra merah, sinar ultra violet, gelombang mikro, gelombang radio)*

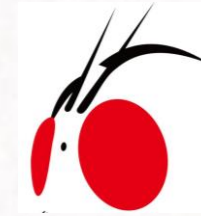
Spektrum gelombang elektromagnetik





SUMBER RADIASI PENGION

No	Jenis Radiasi Pengion	Sumber Radiasi	Contoh
1.	Partikel bermuatan		
	▪ Partikel alpha (α)	Radioisotop pemancar α	Am-241 ($T_{1/2} = 432$ th, $E = 5,486$ keV, produk peluruhan)
	▪ Partikel beta (β)	Radioisotop pemancar β	Xe-135 ($T_{1/2} = 9,1$ jam, $E = 1,16$ keV, produk fisi nuklir)
	▪ Ion (positif, negatif)	Sumber ion (pos, neg)	Sumber ion tipe tumbukan elektron
	▪ Elektron (berenergi)	Sumber elektron	Sumber elektron termionik
2.	Partikel tak bermuatan		
	▪ Neutron (n)	Sumber neutron	Generator neutron, sumber neutron isotopik, reaktor nuklir
3.	Gelombang elektromagnet		
	▪ Sinar gamma (γ)	Radioisotop pemancar γ	Co-60 ($T_{1/2} = 5,27$ th, $E = 1,17$ dan $1,33$ MeV, produk aktivasi neutron)
	▪ Sinar X	Mesin Berkas Elektron (MBE)/ Pesawat sinar X	Berkas elektron mengalami perlambatan (bremsstrahlung) atau bertumbukkan dengan Tungsten (W) atau Molybdenum (Mo).



Pengertian Iradiator dan Prinsip Kerja Akselerator

SUMBER RADIASI PENGION

Jenis iradiator berdasarkan jenis radiasi yang digunakan:

1. **Iradiator gamma** → menggunakan sinar gamma, dicirikan oleh: aktivitas sumber gamma (A), energi gamma (E) dan dosis radiasi gamma (D)
2. **Iradiator berbasis akselerator:**
 - a. **Iradiator elektron** → menggunakan berkas elektron
 - b. **Iradiator ion** → menggunakan berkas ion
 - c. **Iradiator neutron** → menggunakan berkas neutron

} elektron, ion dan neutron dicirikan oleh: arus (I), energi (E) dan profil berkas



Perbandingan Irradiator Gamma dengan Irradiator Berbasis Akselerator

Fitur	Irradiator Gamma (Co-60, Cs-137)	Irradiator Berbasis Akselerator (E-beam/Sinar-X)
Sumber Radiasi	Isotop radioaktif fisik yang dihasilkan dari peluruhan radioaktif	Energi listrik yang diubah ke partikel berenergi
Kemampuan On/Off	Tidak bisa, selalu aktif	Ya, bisa dinyalakan dan dimatikan
Daya Tembus	Sangat Tinggi	Rendah (E-beam), Tinggi (Sinar-X)
Kecepatan Proses	Lambat (beberapa jam)	Sangat Cepat (detik hingga menit)
Keamanan & Sekuriti	Kompleks (risiko radiasi & material nuklir)	Lebih Aman (tidak ada radiasi saat mati)
Logistik Sumber	Rumit (transportasi & pembuangan limbah radioaktif)	Sederhana (hanya butuh pasokan listrik)



Prinsip Kerja Akselerator

Akselerator partikel adalah suatu alat yang digunakan untuk **mempercepat atau meningkatkan energi partikel bermuatan** dengan menggunakan **medan listrik**

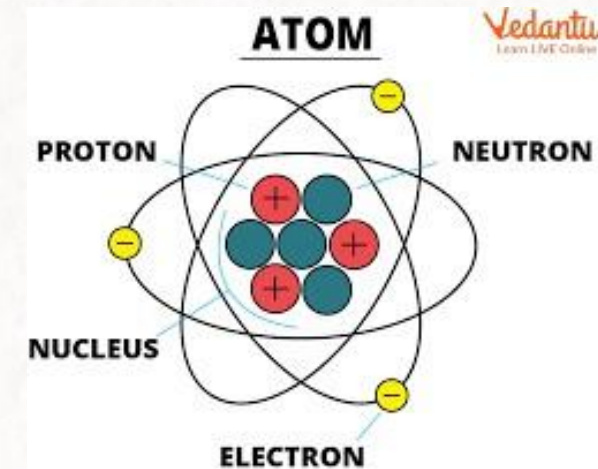
Partikel **bermuatan** : Elektron, Ion Positif, atau Ion Negatif

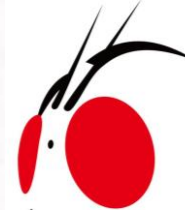
Gaya Lorentz (F_L) : $F_L = qE + q(v \times B)$

q = muatan partikel dalam satuan coulomb atau bisa dinyatakan dalam satuan muatan elektron ($1 e = 1,6 \times 10^{-19}$ coulomb),
 E = medan listrik dalam satuan V/m,
 v = kecepatan partikel dalam satuan m/detik,
 B = medan magnet dalam satuan tesla (T)

Usaha (W) atau perubahan energi partikel (ΔE_k): $W = \Delta E_k = E_k(t) - E_k(0) = F_L \cdot ds$

ds = perubahan posisi partikel (m)





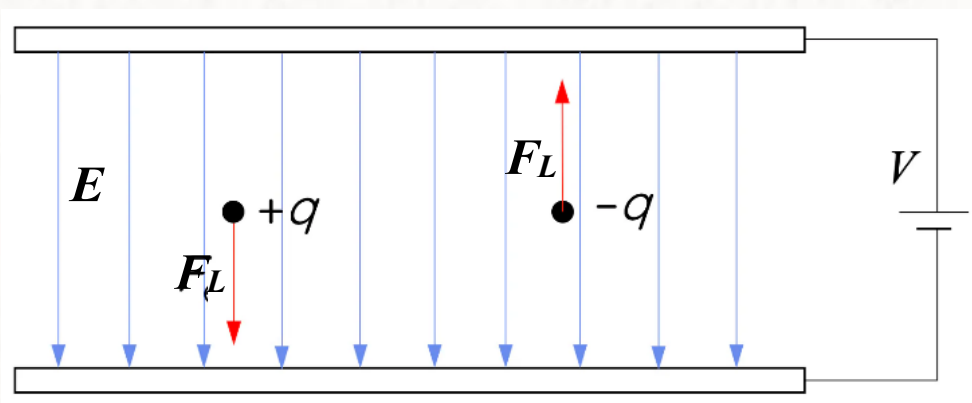
Pengaruh E dan B pada partikel

Usaha (W) atau perubahan energi partikel (ΔE_k): $W = \Delta E_k = E_k(t) - E_k(0) = F_L \cdot ds$

ds = perubahan posisi partikel (m)

Pengaruh E

$$F_L = qE$$

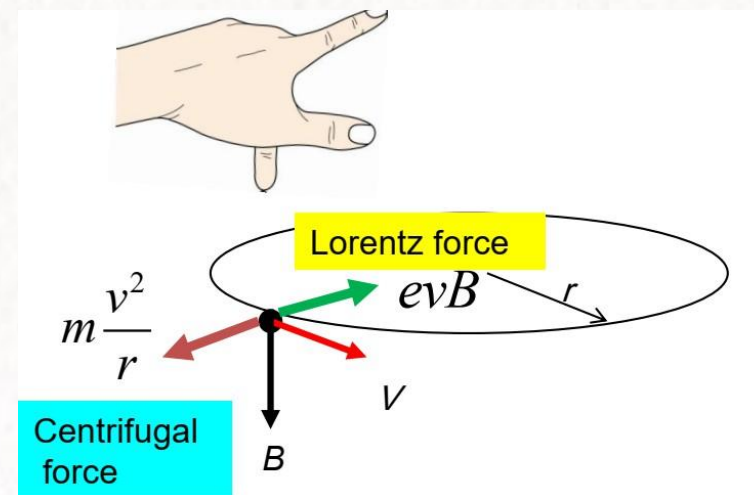


$$W = \Delta E_k = qE \cdot ds, \text{ satuan } e \frac{V}{m} = eV$$

Beda potensial (V) = 500.000 Volt,
Maka Energi partikel = 500.000 eV = 500 keV

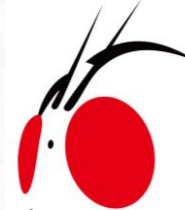
Pengaruh B

$$F_L = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

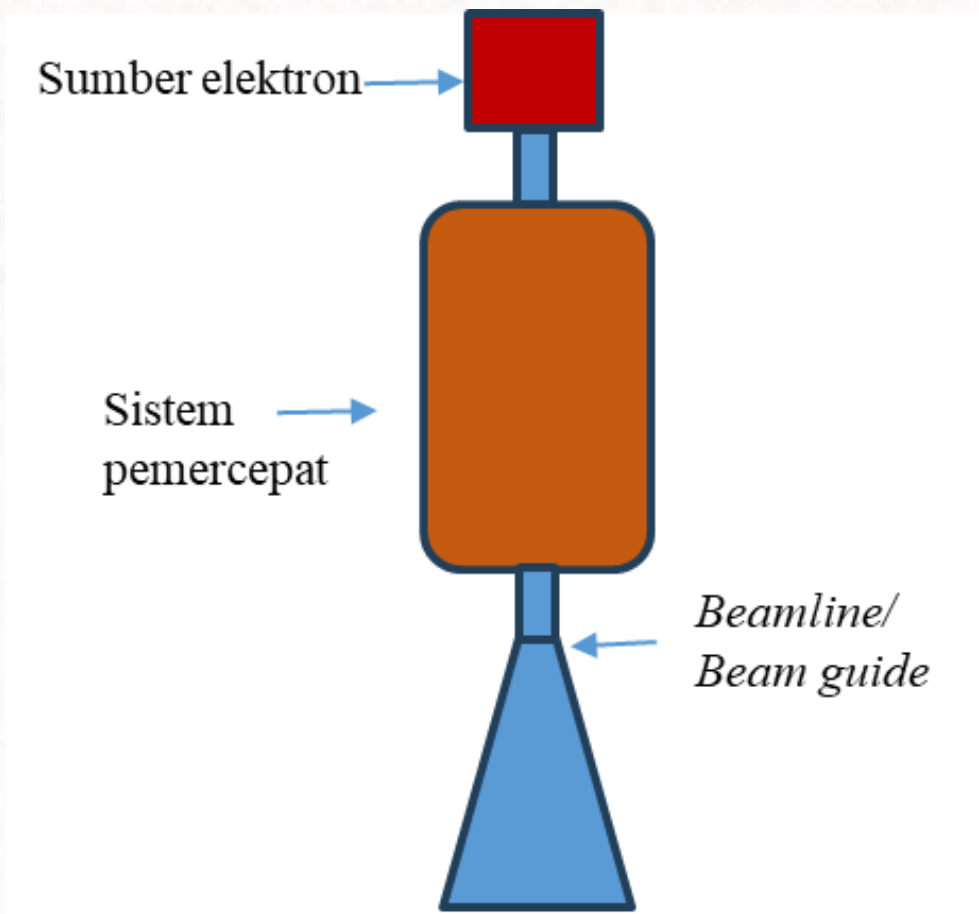


Perkalian titik dari dua buah vektor, $F_L \cdot ds$, akan bernilai nol jika arah F_L tegak lurus dengan arah ds .

$$W = \Delta E_k = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot ds = 0 \text{ (tidak menambah energi partikel)}$$



Prinsip Kerja Akselerator

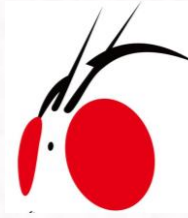


Sumber Elektron (e-gun): untuk menghasilkan berkas elektron.

Sistem Pemercepat: untuk mempercepat partikel.

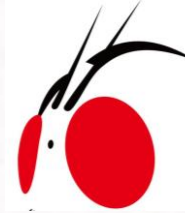
Beamline/ Beam Guide: untuk memfokuskan, mengarahkan, dan menyapukan berkas partikel

Proses pemercepatan berkas partikel/elektron tersebut harus dilakukan dalam ruang vakum tinggi $> 5 \times 10^{-6}$ mbar



Iradiator Elektron (Mesin Berkas Elektron)

1. Iradiator pada umumnya menggunakan berkas elektron sebagai radiasi pengionnya.
2. Berkas elektron berasal dari Mesin Berkas Elektron (MBE)
3. MBE: akselerator partikel yang menghasilkan berkas elektron berenergi tinggi.
4. Proses radiasi menggunakan MBE mempunyai keunggulan:
 - Proses radiasi dengan kapasitas besar dapat dilakukan dalam waktu yang singkat (orde detik) karena MBE mampu memberikan dosis yang tinggi.
 - Daerah bahan yang diradiasi dapat dikendalikan dengan seksama melalui parameter-parameter sistem pemayaran berkas elektron.
 - Efisiensi pemanfaatan energi radiasi sangat tinggi karena berkas elektron memberikan energinya secara langsung pada bahan yang diradiasi.
 - Keselamatan radiasi sangat tinggi, karena berkas elektron dapat dikendalikan dengan cara menghidupkan dan mematikan MBE (sistem ON/OFF), disamping itu berkas elektron tidak menimbulkan kontaminasi radioaktif.



Komponen Utama MBE

- Pompa vakum untuk memvakum ruang dalam MBE
- Sumber elektron/e-gun sebagai penghasil berkas elektron
- Sistem pemercepat elektron:
 1. MBE elektrostatik menggunakan tabung elektroda pemercepat dan generator tegangan tinggi(contoh: Cockroft Walton, Trafo)
 2. MBE linac menggunakan tabung cavity/rongga microwave, modulator, dan microwave source (Magnetron/Klystron)
 3. MBE Rhodotron menggunakan cavity RF dan sumber RF (tetrode/solid-state)
- Sistem pemayar untuk memayarkan (*scanning*) berkas elektron melalui corong pemayar
- Sebelum sistem pemayar terdapat sistem pemokus/pengarah
- Jendela (window) membatasi ruang vakum MBE dengan atmosfer

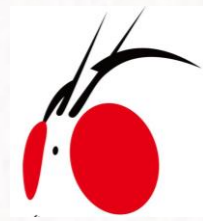


3

Sumber Elektron/E-gun

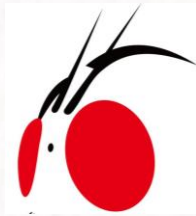


Sumber Elektron/ E-gun

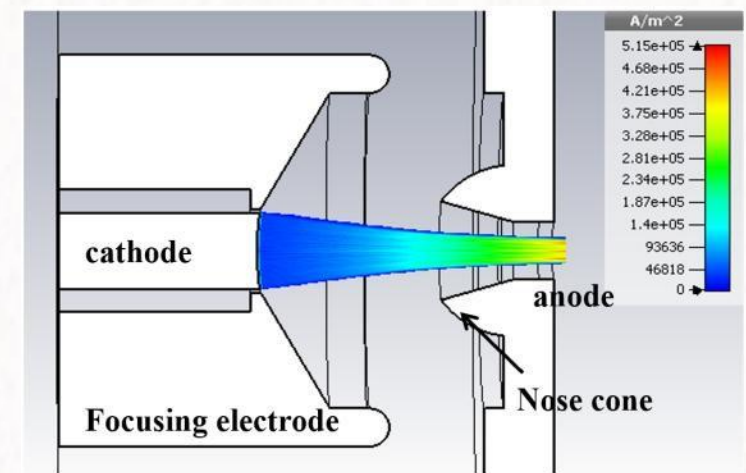
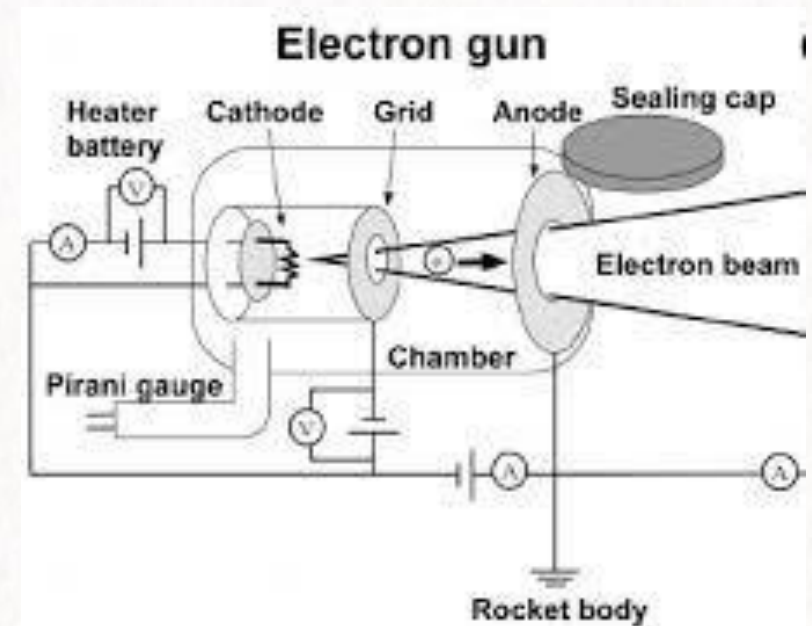


- Merupakan komponen utama MBE
- Berfungsi untuk menghasilkan berkas elektron yang akan dipercepat, kemudian diiradiasikan pada suatu target
- Berdasarkan cara pembangkitan elektron, ada 2 golongan sumber elektron:
 1. Sumber elektron katode filamen
 2. Sumber elektron katode plasma
- Secara umum sumber elektron terdiri dari 2 bagian pokok:
 1. Bagian pemancar elektron
 2. Bagian pembentuk berkas elektron

Sumber Elektron/ E-gun



- Pada umumnya sumber elektron yang digunakan pada mesin/akselerator berkas elektron untuk iradiator adalah tipe termionik.
- Prinsip kerja sumber elektron termionik didasarkan pada fenomena emisi termionik, yaitu pelepasan atau "penguapan" elektron dari suatu permukaan material ketika dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi.
- Kelebihan:
 1. Kuat dan Andal: Sangat toleran terhadap kondisi vakum yang kurang sempurna.
 2. Arus Tinggi: Mampu menghasilkan arus berkas elektron yang sangat tinggi (miliampere hingga ampere).
 3. Biaya Rendah: Teknologinya sudah matang dan relatif lebih murah.



Sumber Elektron/ E-gun

□ Persamaan Richardson-Dushman

$$J = AT^2 \exp \left[-\frac{\Phi}{k_B T} \right]$$

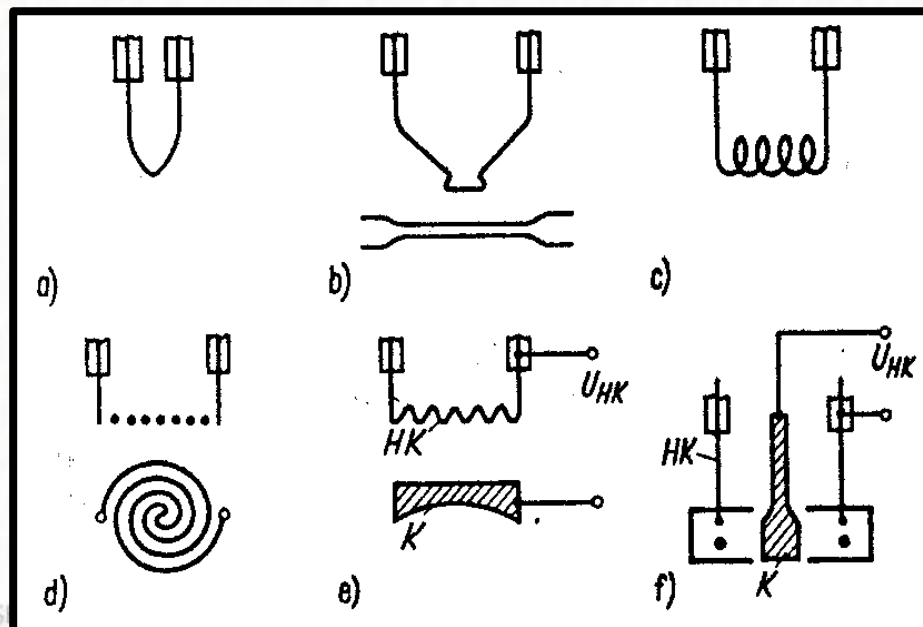
J = Rapat Arus Emisi (Ampere/m²),
T = Suhu Absolut (°C)
Φ = Fungsi Kerja (Work Function) (eV)
k_B = Konstanta Boltzmann.
A = Konstanta Richardson



□ Beberapa bahan yang sering dipakai untuk emisi termionik

Material	Φ (eV)	T (°C)	J (A/cm ²)
LaB ₆	2,36	1400 - 1700	10 - 100
Ta	4,12	2200 - 2500	0,1 - 0,5
W	4,5	2500 - 2800	1 - 10
Dispenser (BaO-SrO-CaO on W)	1,1 - 1,5	1000 - 1200	10

□ Emisi elektron dipengaruhi juga oleh luas permukaan emisi, bentuk filamen dan cara pemanasannya.



- a) Hairpin
- b) Strip
- c) Helix
- d) Spiral
- e) Block
- f) Bolt



Sistem Pemercepat





Sistem Pemercepat

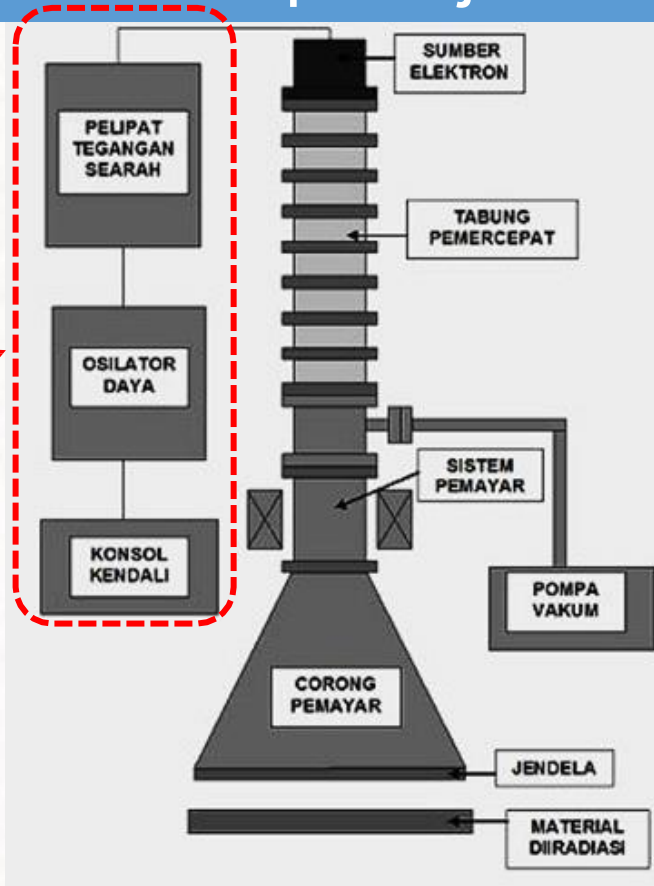
- Berfungsi untuk mempercepat berkas elektron sampai energi yang cukup tinggi sesuai dengan yg dibutuhkan. Oleh karena itu di dalam tabung pemercepat harus dihasilkan suatu medan listrik sedemikian rupa sehingga berkas elektron ketika melewati tabung pemercepat dipercepat ke arah jendela MBE.
- Sistem pemercepat elektrostatik menggunakan tabung elektroda pemercepat
- Sistem pemercepat elektromagnetik menggunakan rongga pemercepat gelombang Radio Frekuensi (RF) seperti Linac dan Rodhotron
- Penentuan jenis generator tegangan tinggi untuk MBE berdasarkan pada pertimbangan-pertimbangan dari aspek *penggunaan, ekonomi dan teknologi*.



Tipe-Tipe Percepatan Partikel (1 dari 3) Pemercepat Elektrostatik

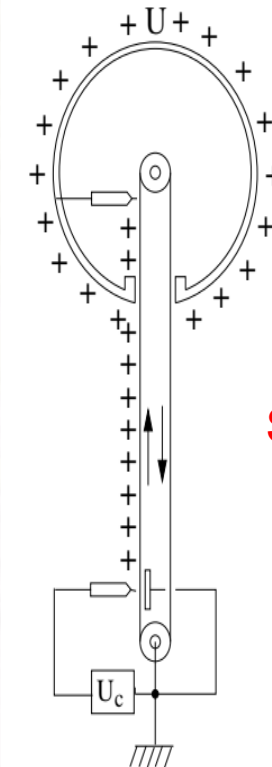
Prinsip Kerja

Sumber
tegangan
tinggi

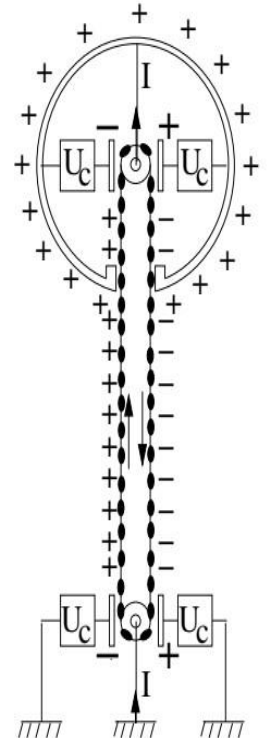


Sumber Tegangan Tinggi

Van de Graaff



Pelletron



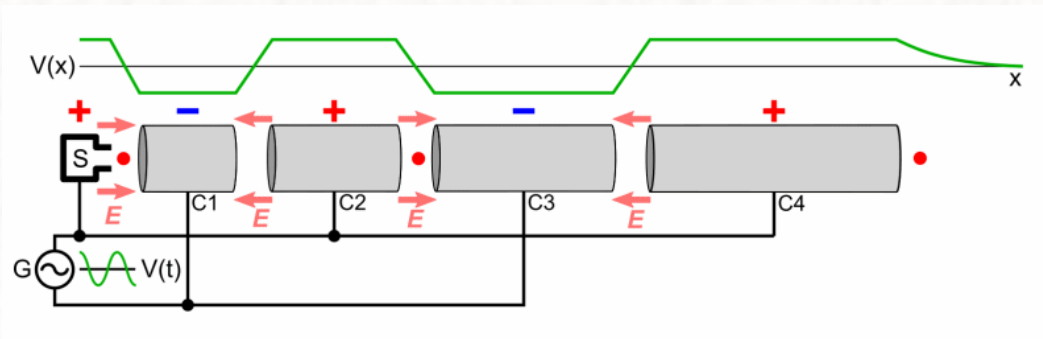
Stabilitas tegangan
sangat baik



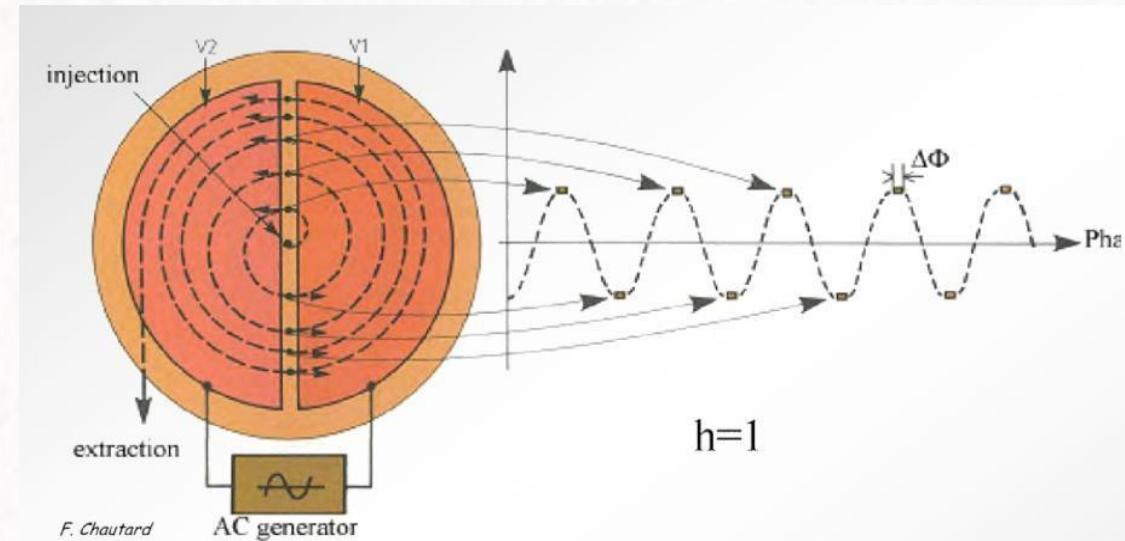
Type-Type Percepatan Partikel (2 dari 3)

Pemercepat Gelombang Elektromagnetik

Linier Accelerator (Linac)



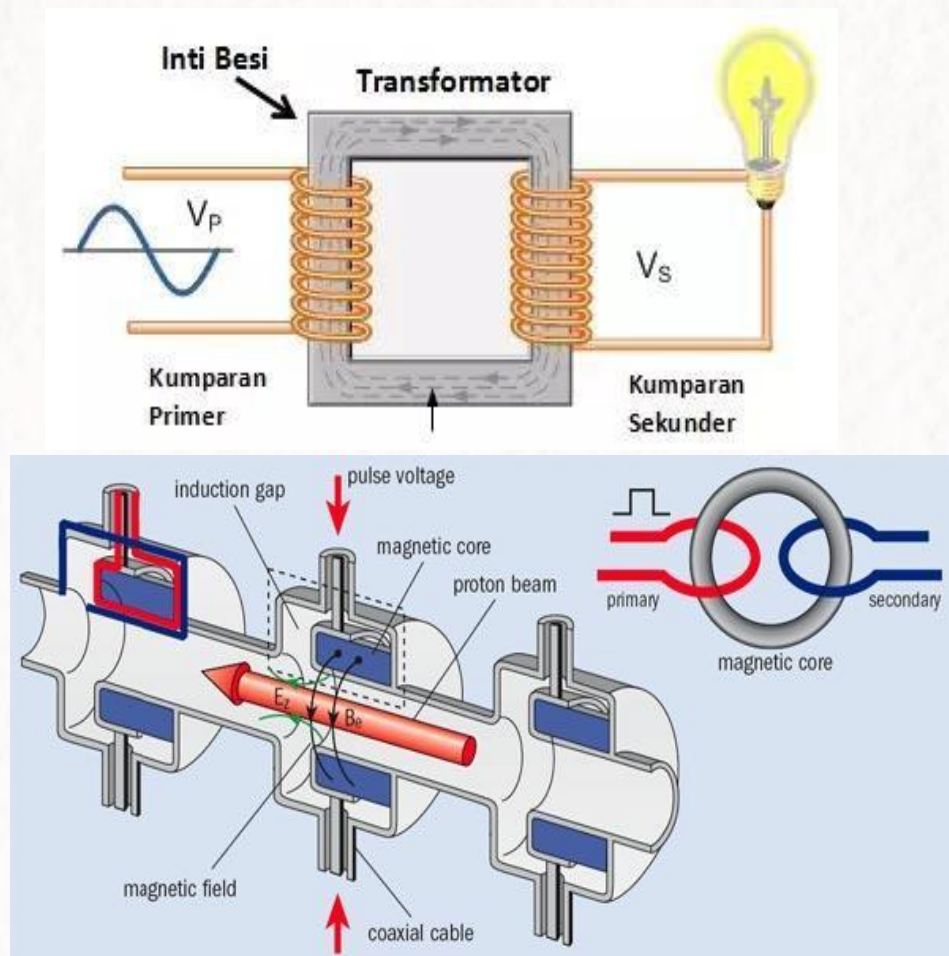
Siklotron (Siklik)



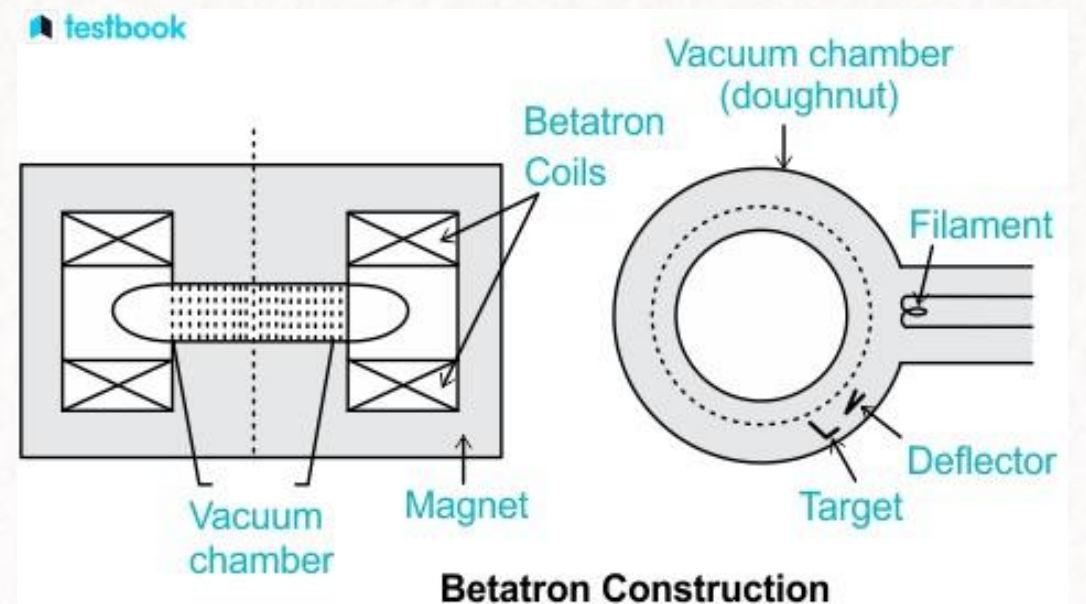


Tipe-Tipe Percepatan Partikel (3 dari 3) Pemercepat Induksi

Linier induksi



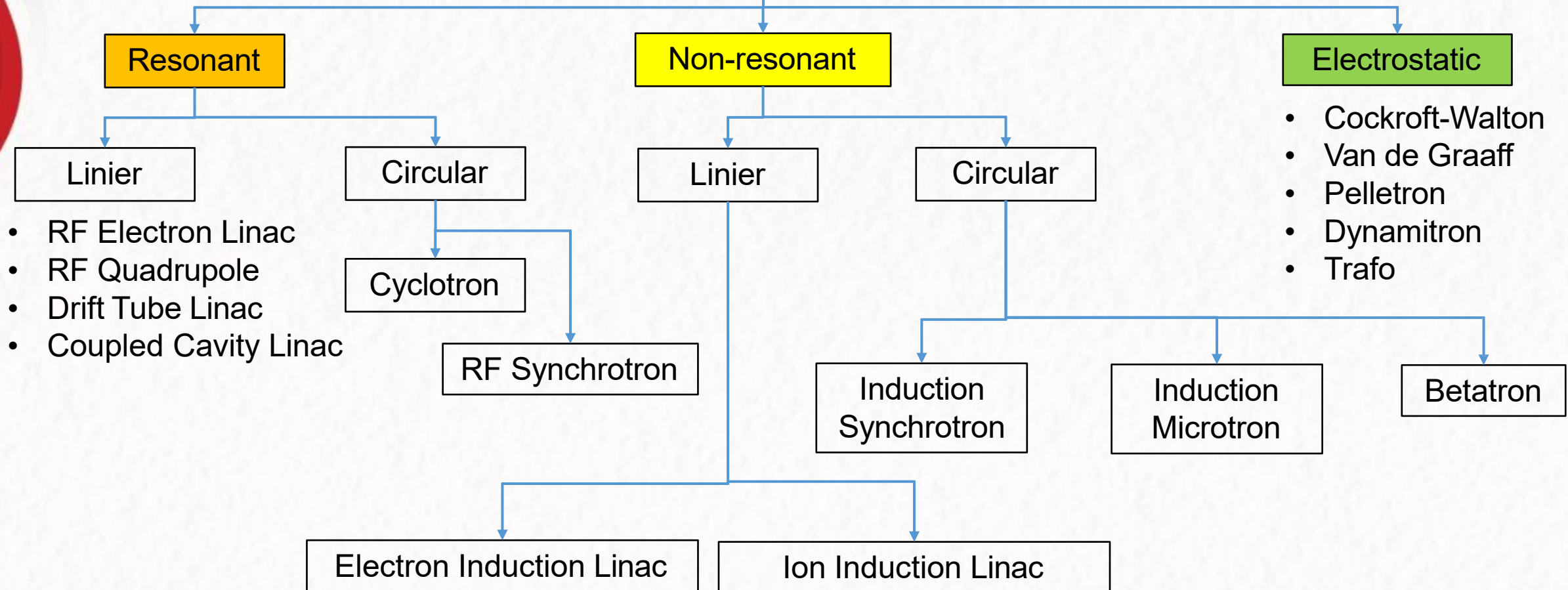
Betatron (siklik)





Klasifikasi Akselerator

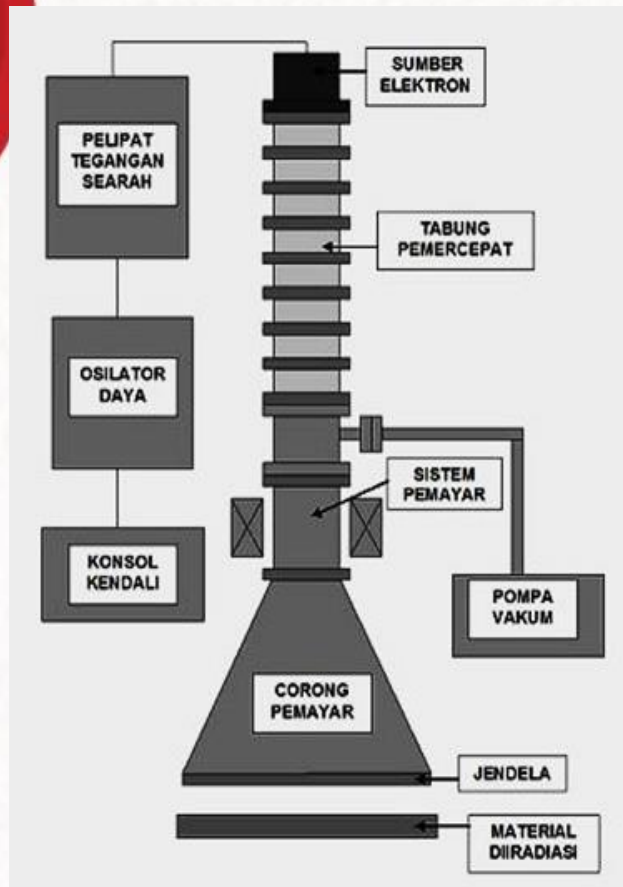
Particle Accelerators



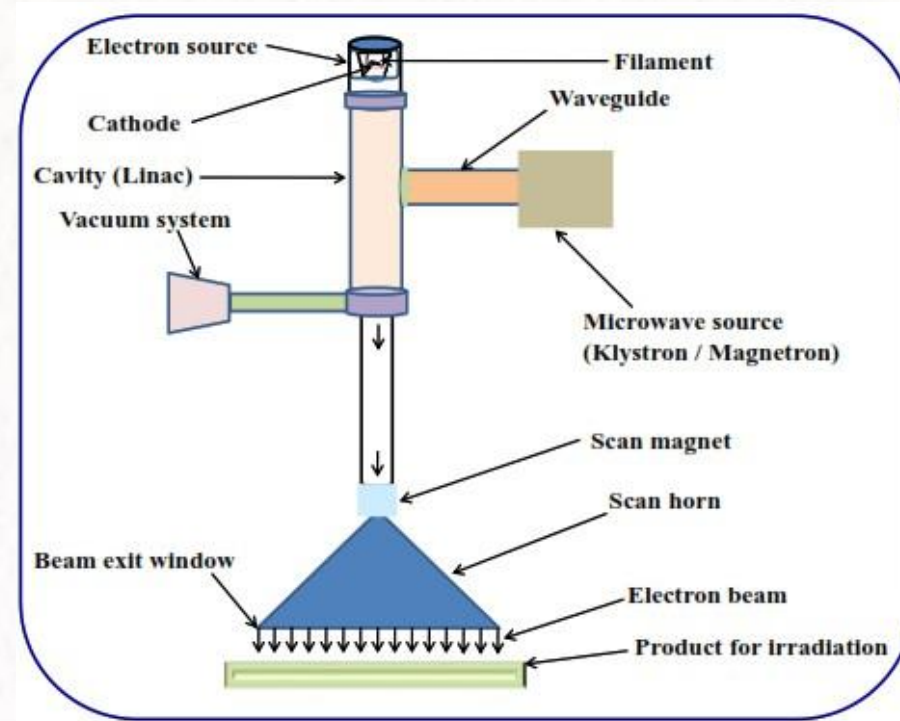


Jenis-Jenis Irradiator elektron (MBE) yang umum digunakan

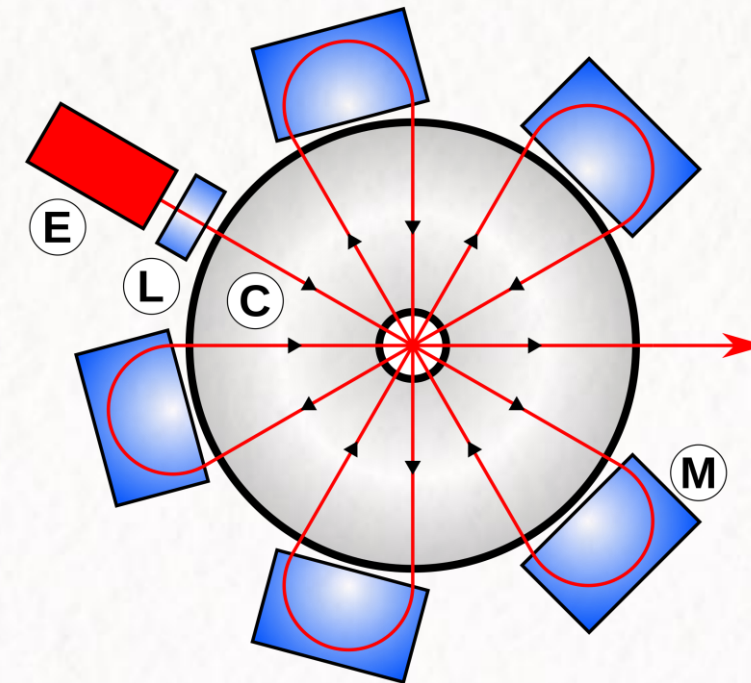
MBE Elektrostatik



MBE Linac RF



MBE Rhodotron

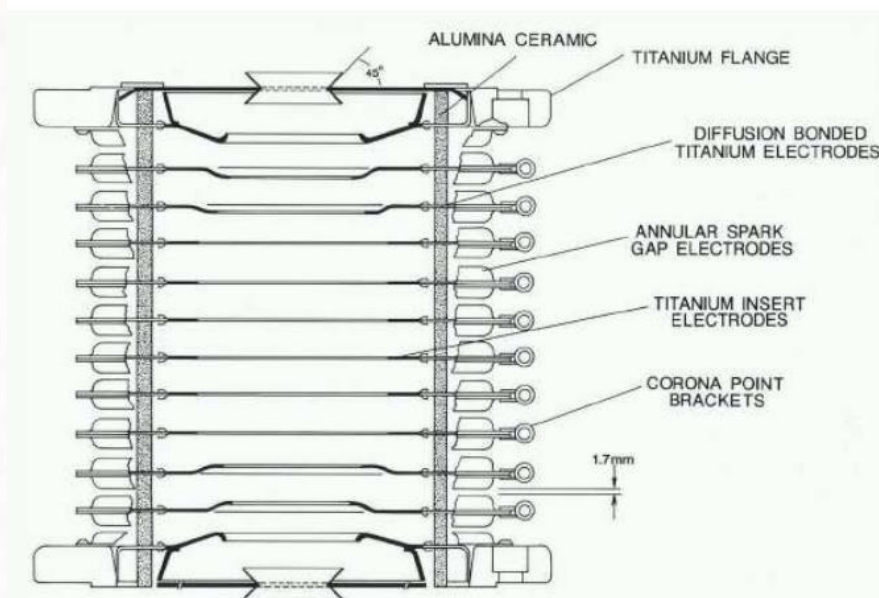
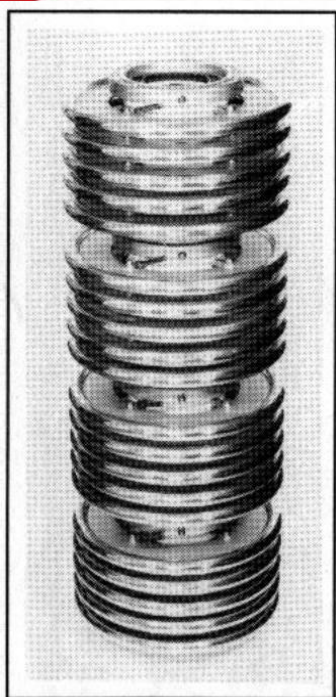




Tabung Akselerator Elektrostatik

Tabung Akselerator

- Tabung akselerator terdiri dari elektrode dan tabung isolator.
- Tegangan tinggi terdistribusi secara merata pada elektrode-elektrode sepanjang tabung akselerator.
- Pembagi tegangan: resistor Ohm tinggi ($M\Omega$) antar 2 elektrode.



Fungsi elektrode:

- Menghasilkan medan pemercepatan
- Memberikan efek pemfokusan berkas elektron.

Persyaratan bahan elektrode:

- Kerapatan tinggi (cepat divakumkan).
- Laju *outgassing* rendah (dapat mencapai vakum tinggi).
- Konduktivitas listrik tinggi (medan listrik kuat).
- Konduktivitas panas tinggi (panas cepat terdistribusi).
- Ekspansivitas panas rendah (tidak mudah mengembang bila terkena panas).
- Tahan terhadap korosi.

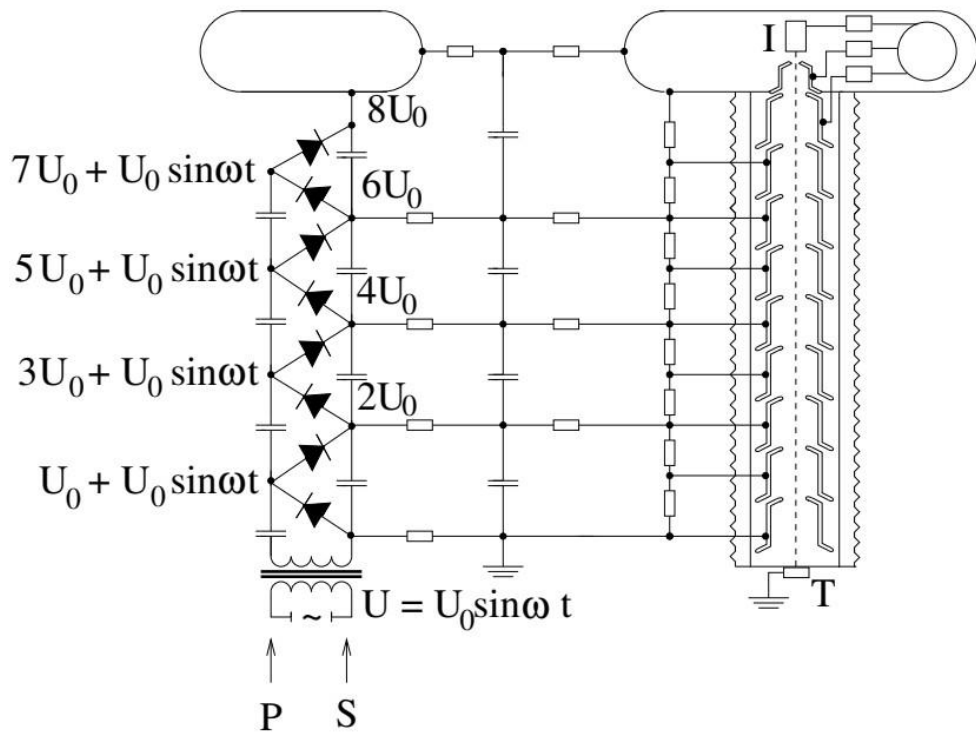
Generator tegangan tinggi elektrostatik untuk MBE:

- ✓ Transformator bertingkat
- ✓ Generator Cockroft-Walton
- ✓ Deltatron
- ✓ Dynamitron
- ✓ Coreless Transformer



Tegangan Tinggi Cockcroft-Walton (CW)

HV



Total tegangan:

$$U = 2NU_0 - \Delta U \pm \delta U$$

Drop tegangan:

$$\Delta U = \frac{1}{fC} \left(\frac{2}{3} N^3 + \frac{3}{4} N^2 + \frac{1}{12} N \right)$$

Ripple tegangan:

$$\delta U = \frac{1}{fC} \frac{N(N+1)}{2}$$

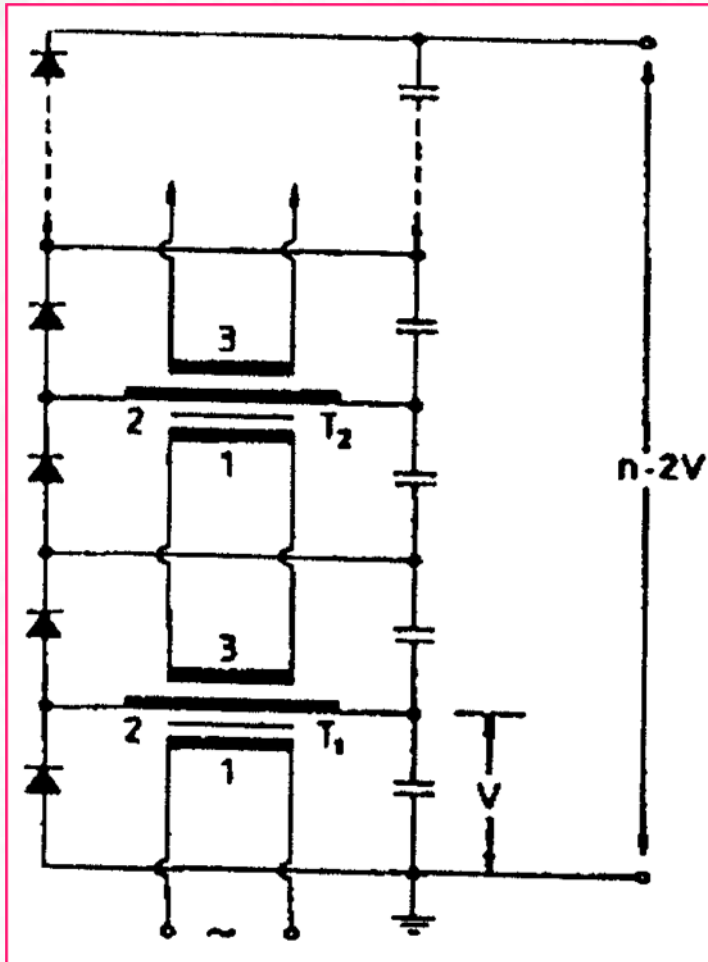
f = frekuensi tegangan AC
(0.5 s.d. 10 kHz)



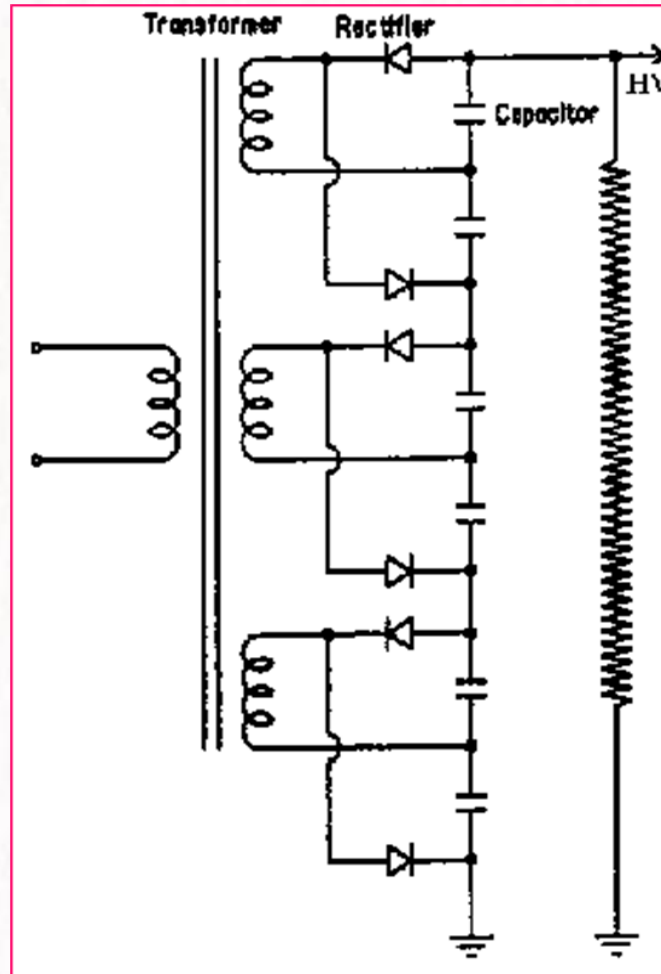


Tegangan Tinggi Coreless Transformer

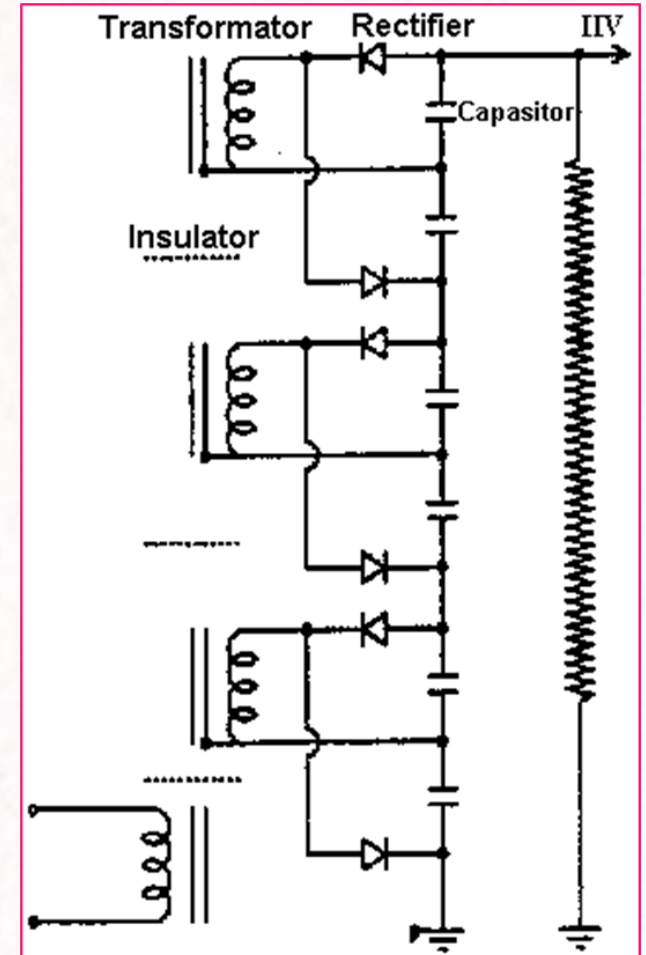
Transformator bertingkat

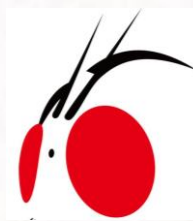


Transformator inti ditanahkan

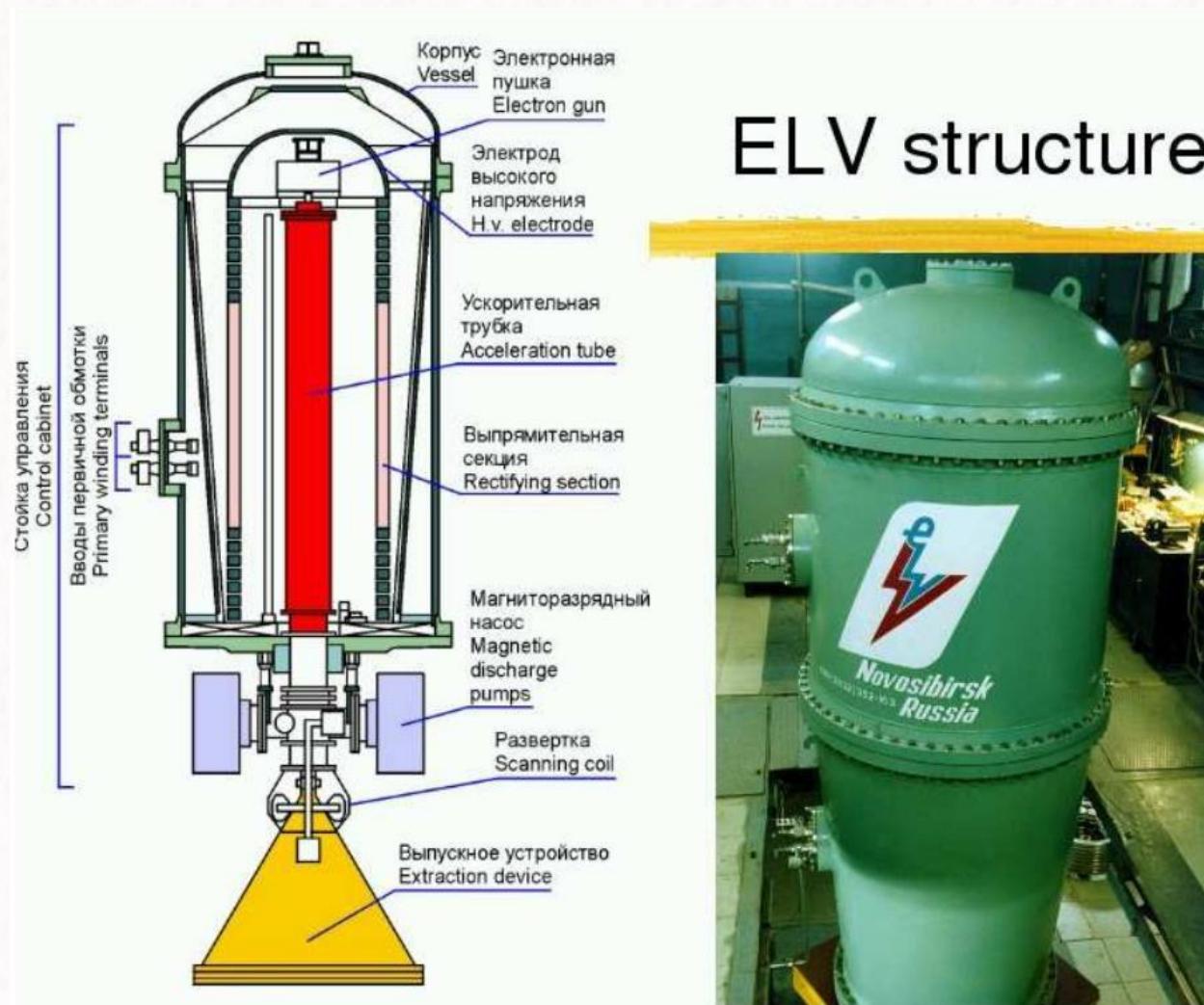


Transformator inti terisolasi





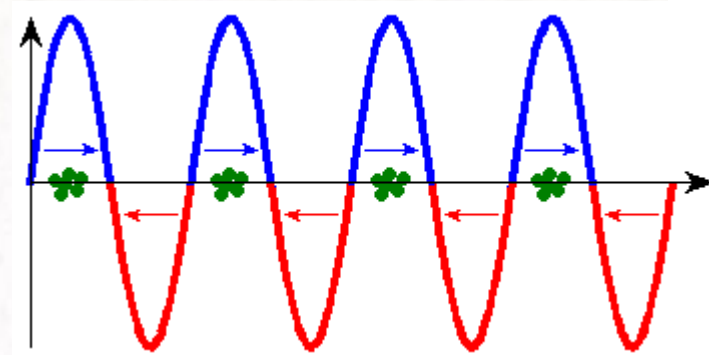
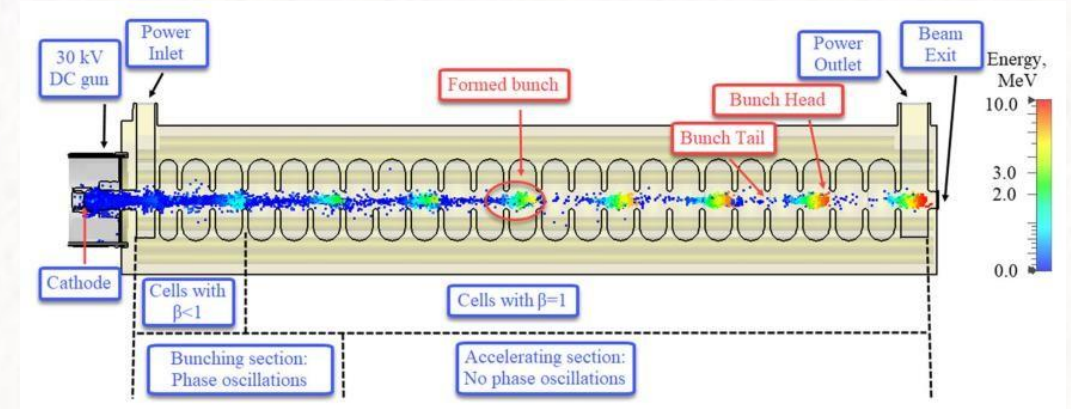
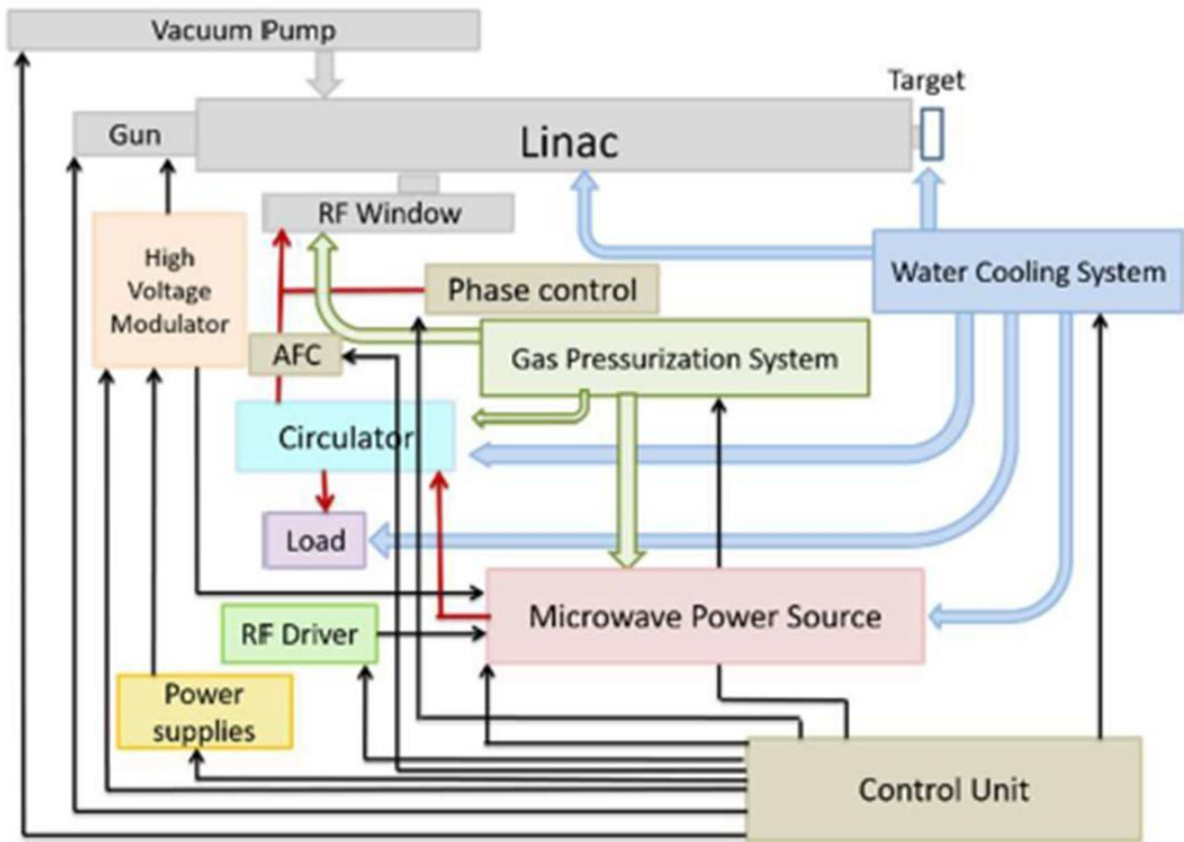
Tegangan Tinggi Coreless Transformer





Sistem Pemercepat

Tipe MBE linac RF (1 dari 2) Linac Elektron Gelombang Berjalan



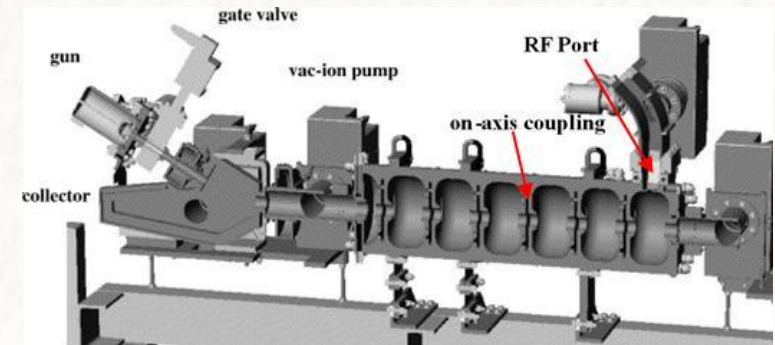
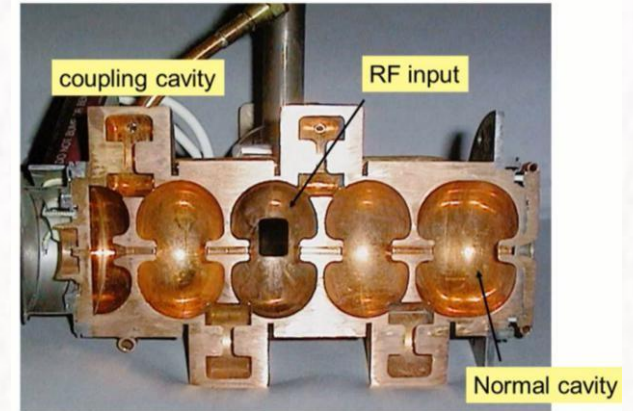
- Constant Impedance
- Constant Gradient

Sistem Pemercepat

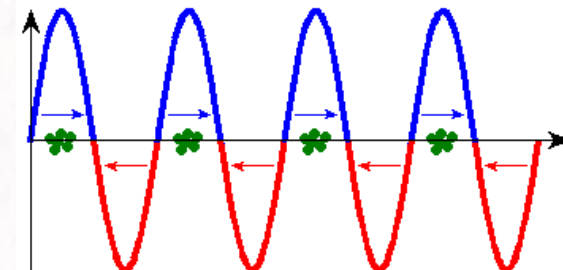
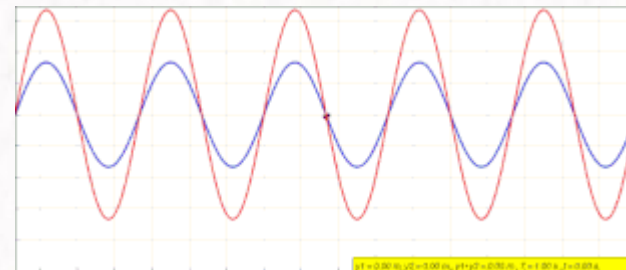
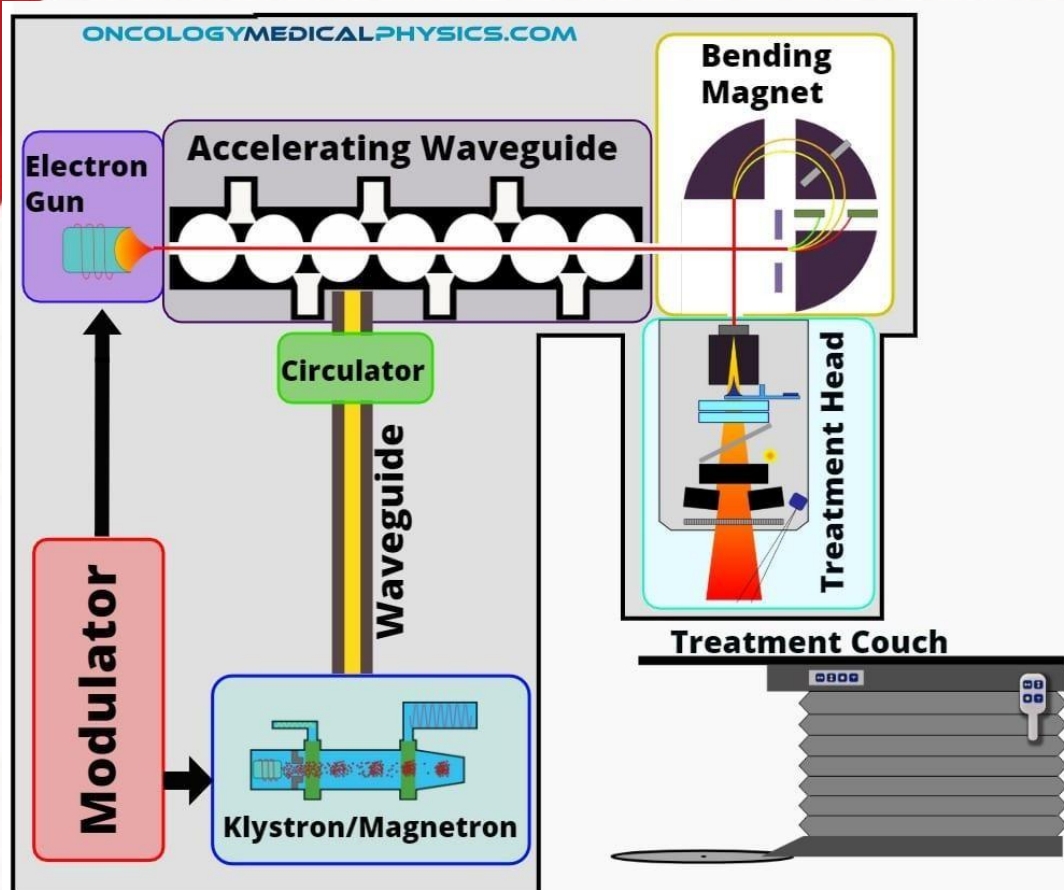


Tipe MBE linac RF (2 dari 2)
Linac Elektron Gelombang Berdiri

Side Coupling Cavity



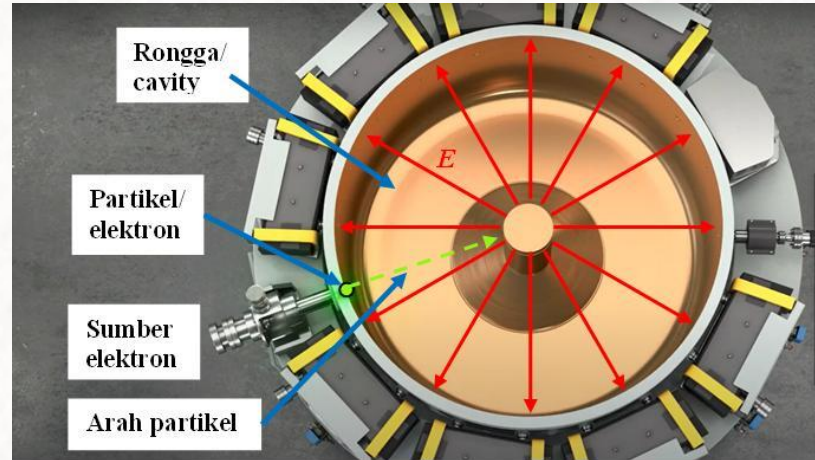
On-axis Coupling Cavity



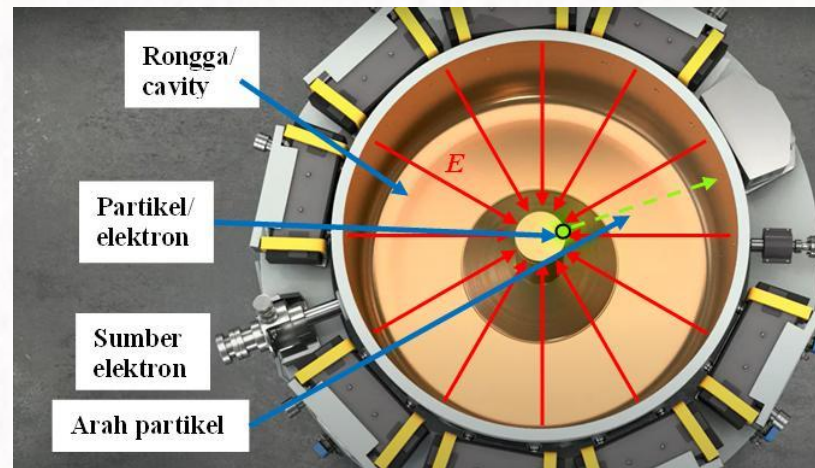


Sistem Pemercepat

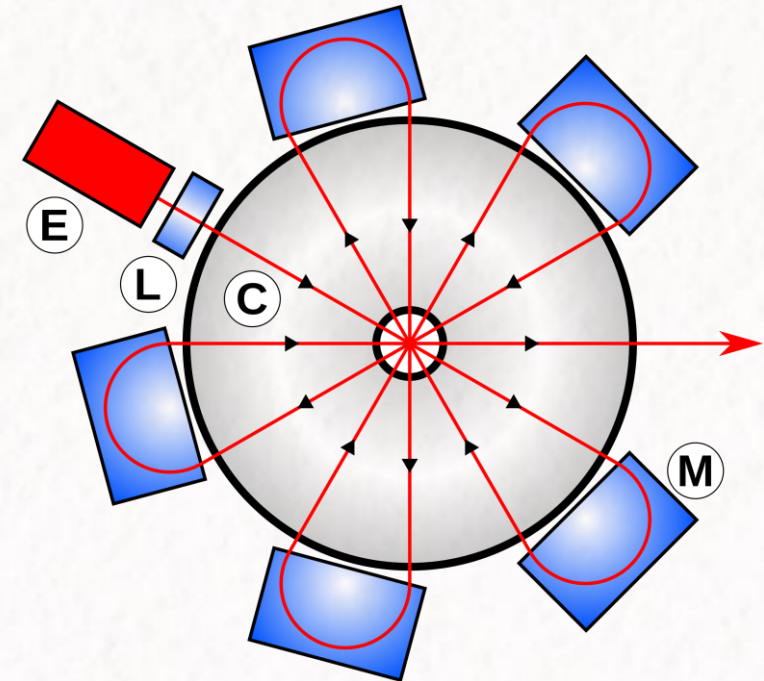
Tipe MBE Rhodotron



medan listrik saat $t = \frac{1}{2} T$



Lintasan partikel

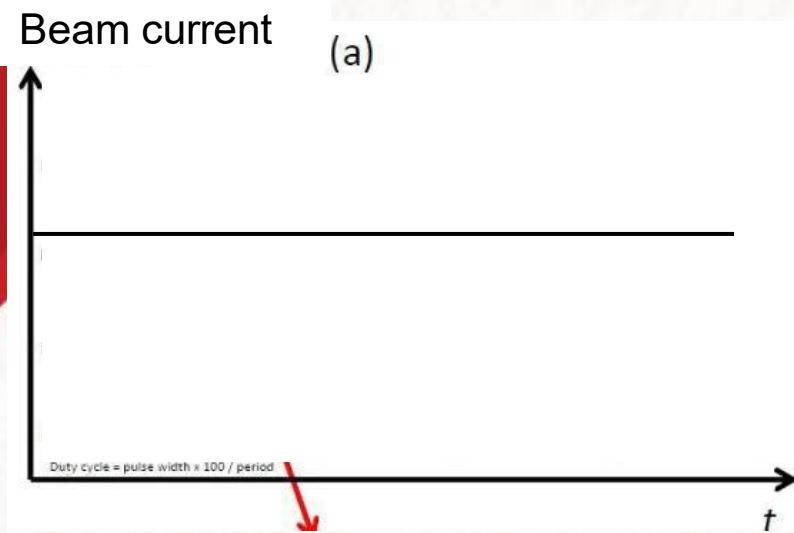


Sistem Pemercepat

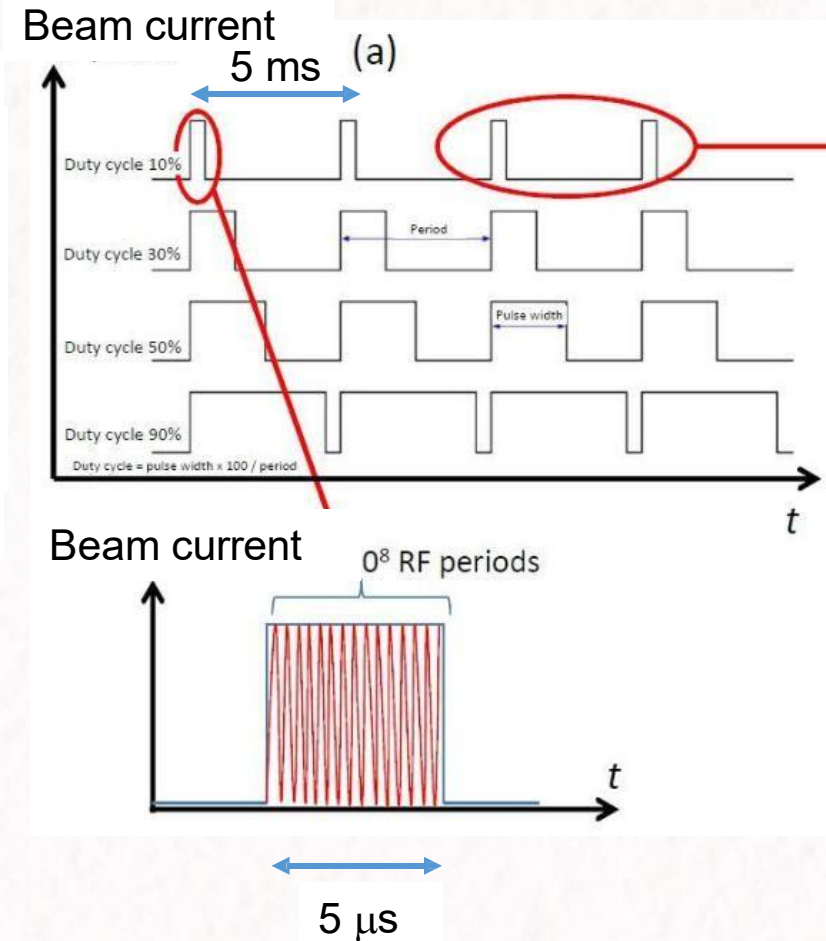


Output Berkas MBE

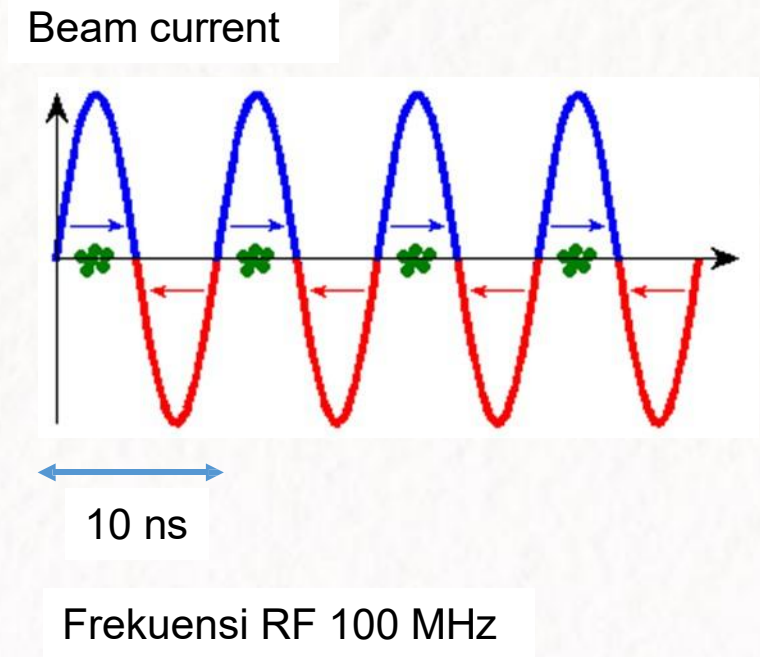
MBE Elektrostatik



MBE Linac RF



MBE Rhodotron





5

Sistem Transport Berkas Elektror

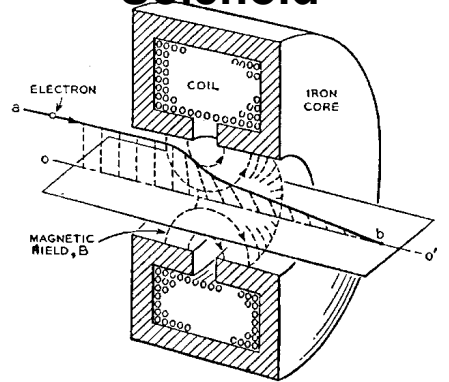


Sistem Transport Berkas Elektron

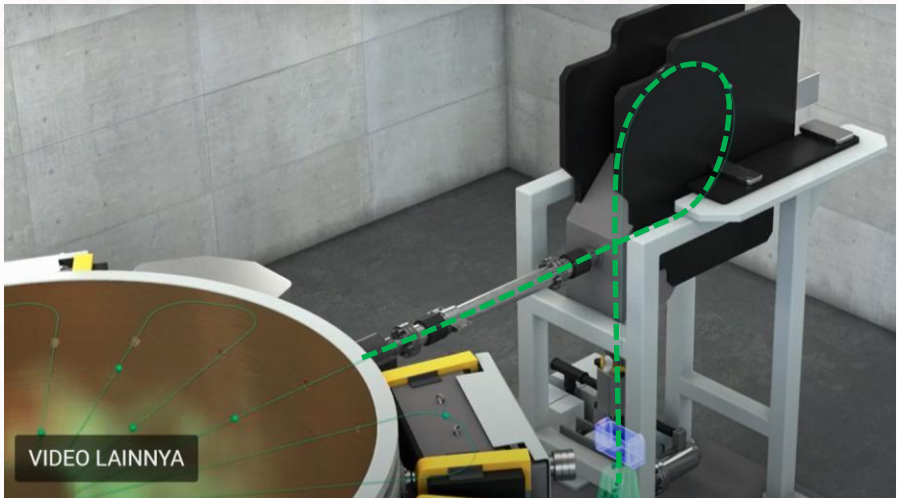
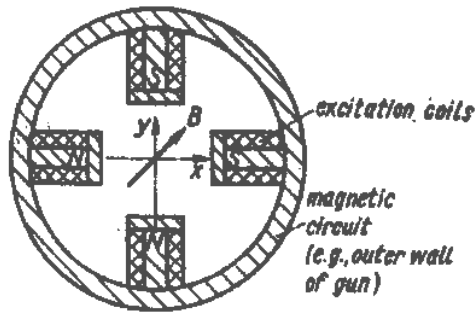
- **Sistem Pemokus:** untuk memfokuskan berkas elektron sesudah keluar dari tabung pemercepat.
- **Sistem Pengarah:** untuk mengarahkan berkas elektron agar menuju target yang diinginkan sesudah mengalami percepatan.

- **Sistem Pemayar :** untuk menyimpangkan berkas elektron sedemikian rupa sehingga berkas elektron dapat mengenai seluruh permukaan material yang diiradiasi.

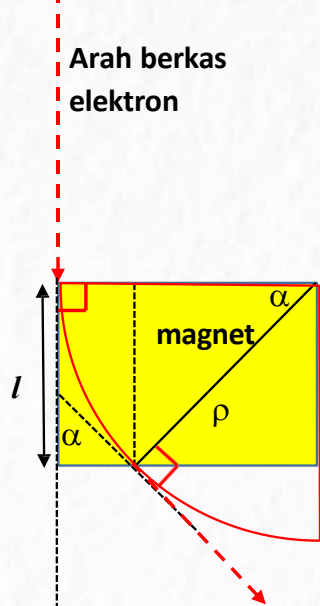
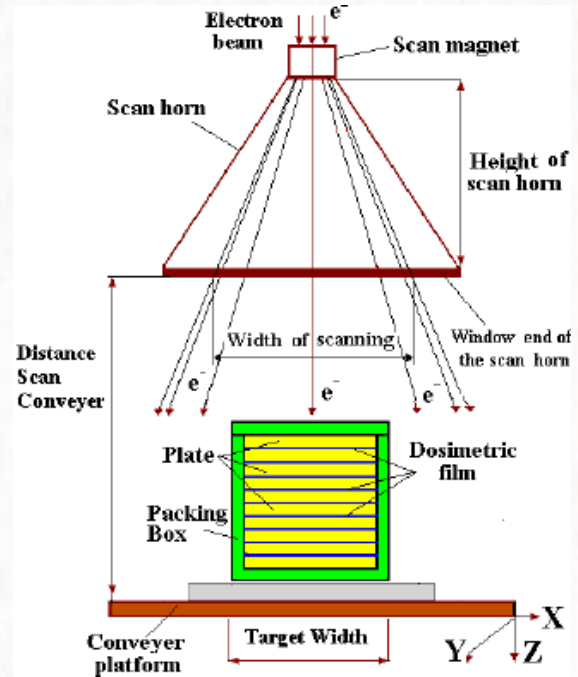
Solenoid



Quadrupole



Sudut pembelokan



$$B = \frac{mv \sin \alpha}{ql}$$

6

Pembangkitan Sinar-X



Pembangkitan Sinar-X

Berkas Elektron

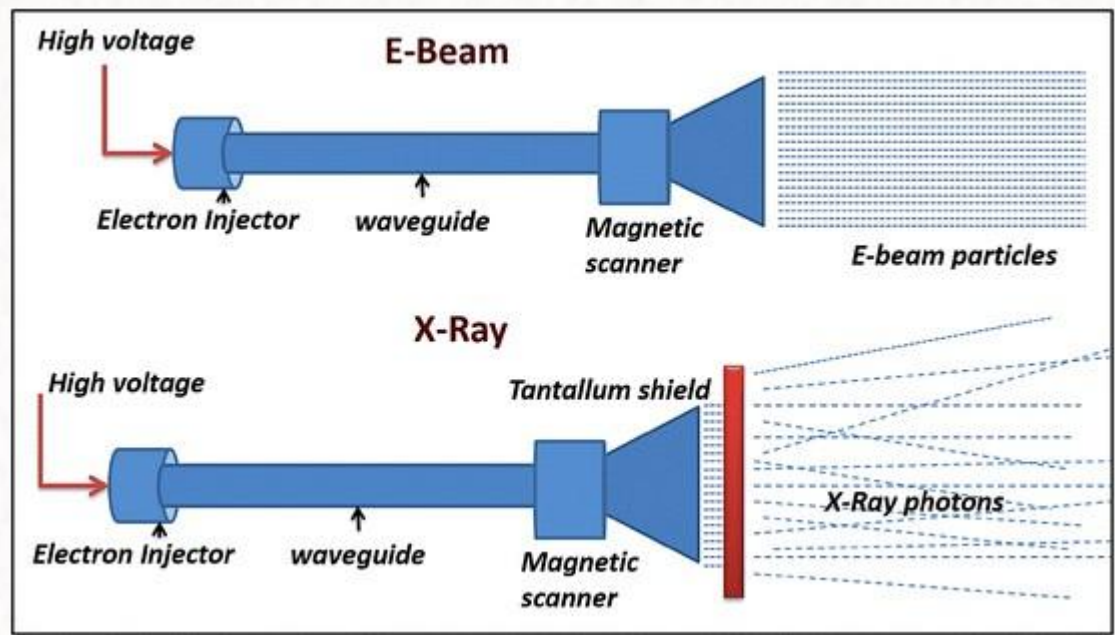
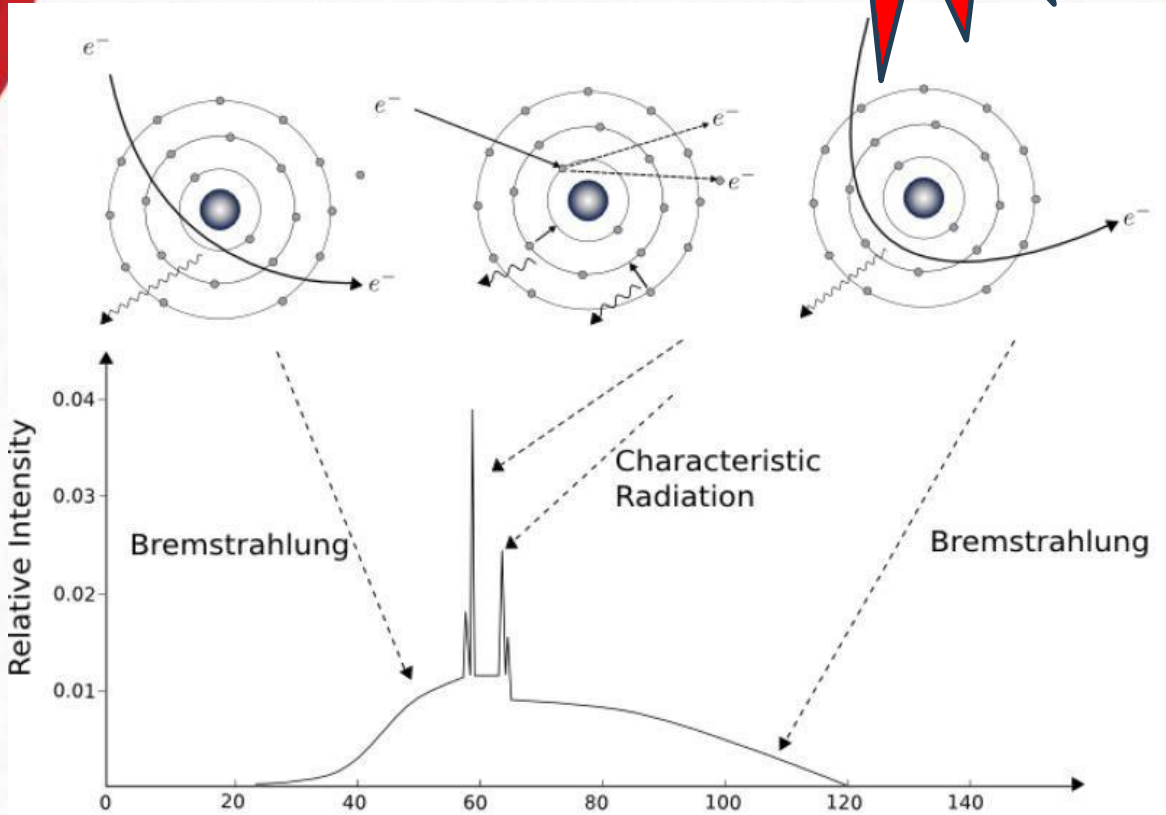
Material atom berat



Bremstrahlung

X-ray characteristic

Material:
tantalum,
tungsten, atau
molybdenum

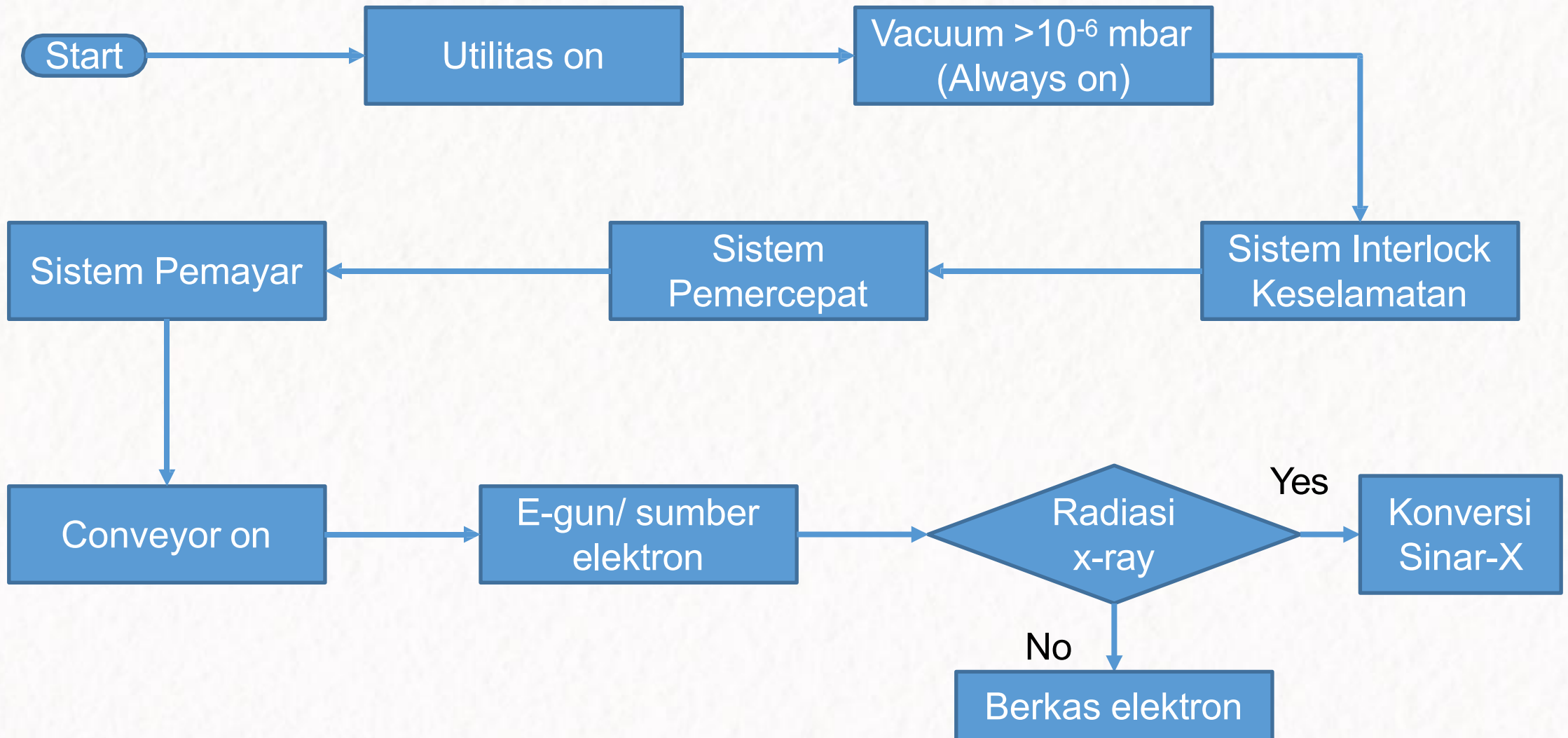
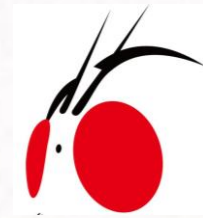


6

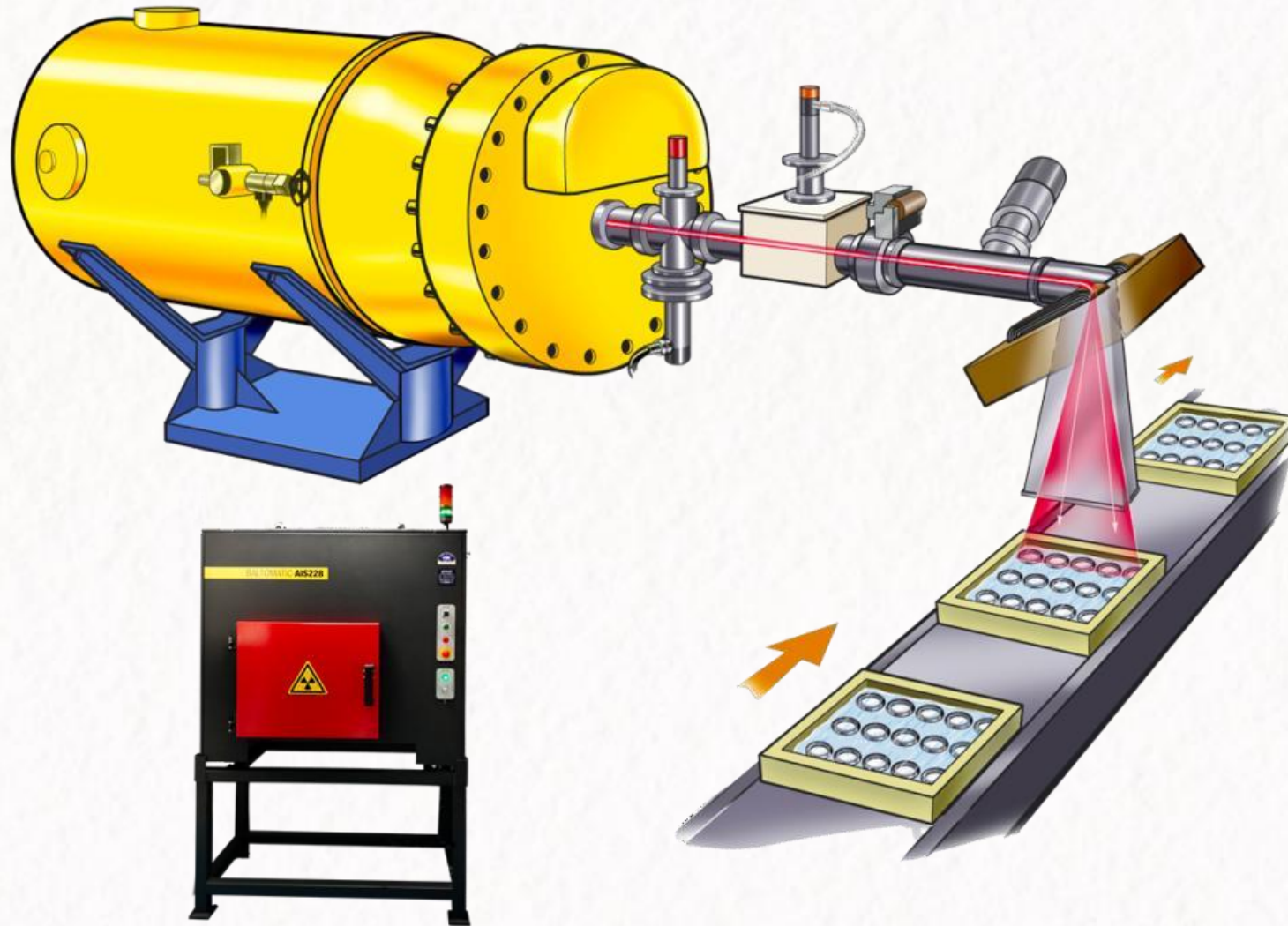
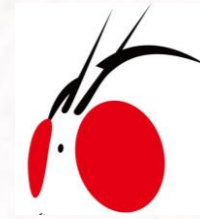
Flowchart Pengoperasian Mesin Berkas Elektron



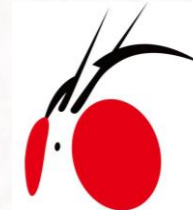
Prosedur Umum Pengoperasian MBE



Skema Proses Iradiasi Iradiator

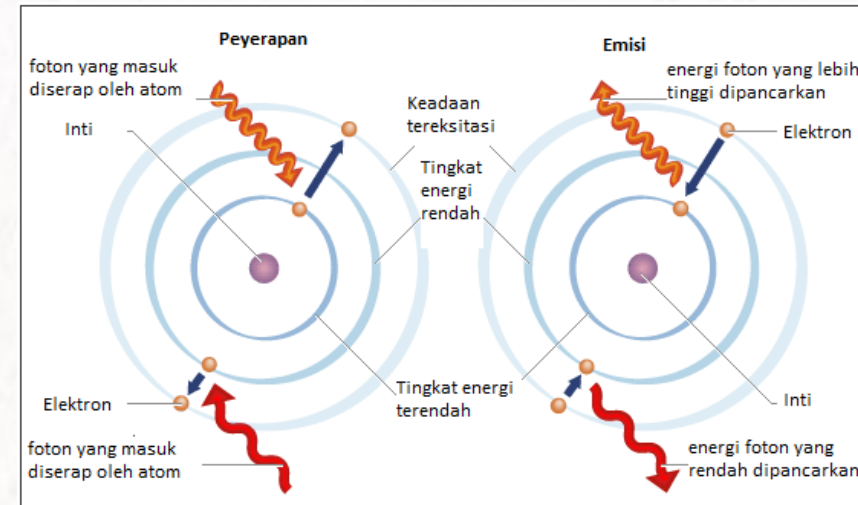


Interaksi Elektron dengan Materi

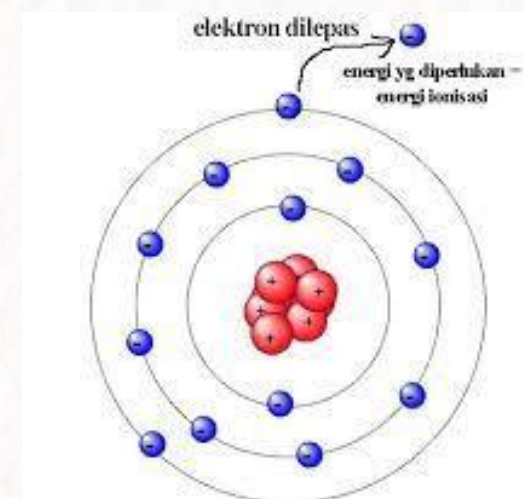


Eksitasi

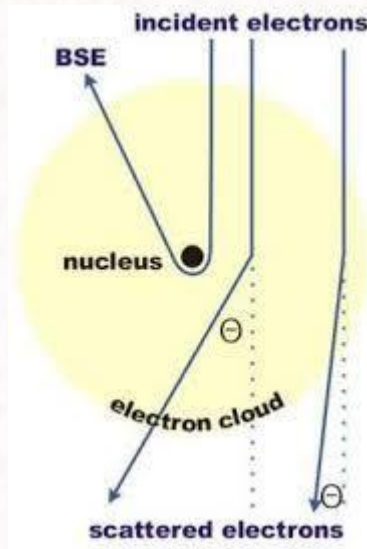
Jenis Interaksi	Contoh Efek	Rentang Energi Elektron
Eksitasi	elektron valensi naik level	eV
Ionisasi	elektron sekunder, X-ray karakteristik	10 eV - keV
Elastic scattering	defleksi, backscattering	semua energi
Bremsstrahlung	radiasi X, energy loss signifikan	>10 keV (kuat di MeV-GeV, Z besar)



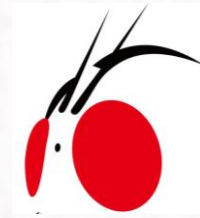
Ionisasi



Tumbukan elastik



DOSIS RADIASI TERSERAP



Banyaknya energi yang terserap per satuan massa bahan yang diiradiasi (D)

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Satuan : Gray (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Laju dosis terserap (D') adalah banyaknya dosis persatuan waktu

$$D' = \frac{dD}{dt}$$

Satuan: Gy/detik

Homogenitas atau keseragaman distribusi dosis radiasi di dalam bahan dinyatakan dari indikator perbandingan harga D_{maks} dan D_{min} . ($D_{\text{maks}} / D_{\text{min}}$)



CP: Saefurrochman

0857 85035170



B.J. Habibie Building
Jl. M.H. Thamrin 8, Jakarta 10340, Indonesia



www.brin.go.id



Brin Indonesia



@brin_indonesia



@brin.indonesia



Bridging Sciences
Empowering Talents

@dpk brin

Terima Kasih

Atas Perhatian Anda



B.J. Habibie Building
Jl. M.H. Thamrin 8, Jakarta 10340, Indonesia



www.brin.go.id



Brin Indonesia



@brin_indonesia



@brin.indonesia



Bridging Sciences
Empowering Talents

@dpk brin