

# TEORI IRADIATOR



**Pelatihan Pekerja Iradiator**  
**Pusat Pendidikan dan**  
**Pelatihan**  
**BATAN**

Djoko Slamet Pudjorahardjo  
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator  
Email: [s\\_pujoharjo@batan.go.id](mailto:s_pujoharjo@batan.go.id)



# Deskripsi Iradiator



- **Iradiator** adalah peralatan atau fasilitas berisi sumber radiasi yang digunakan untuk proses iradiasi terhadap obyek atau bahan, baik berupa benda hidup maupun benda mati.
- Jenis iradiator berdasarkan jenis radiasi yang digunakan:
  1. **Iradiator gamma** → sinar gamma, dicirikan oleh aktivitas sumber gamma (**A**), energi gamma (**E**) dan dosis radiasi gamma (**D**)
  2. **Iradiator elektron**
  3. **Iradiator ion**
  4. **Iradiator neutron**

} Berkas partikel dicirikan arus (**I**), energi (**E**) dan profil berkas



# Perbedaan Iradiator Gamma Dengan Iradiator Lainnya



## Iradiator gamma:

- Menggunakan radiasi gamma yang berasal dari radioisotop pemancar gamma (misal Co-60, Cs-137)
- Radiasi gamma dihasilkan oleh proses peluruhan radioaktif.
- Selama peluruhan radioaktif masih berlangsung, radiasi gamma akan terus dipancarkan oleh radioisotop tersebut.

## Iradiator elektron, ion dan neutron:

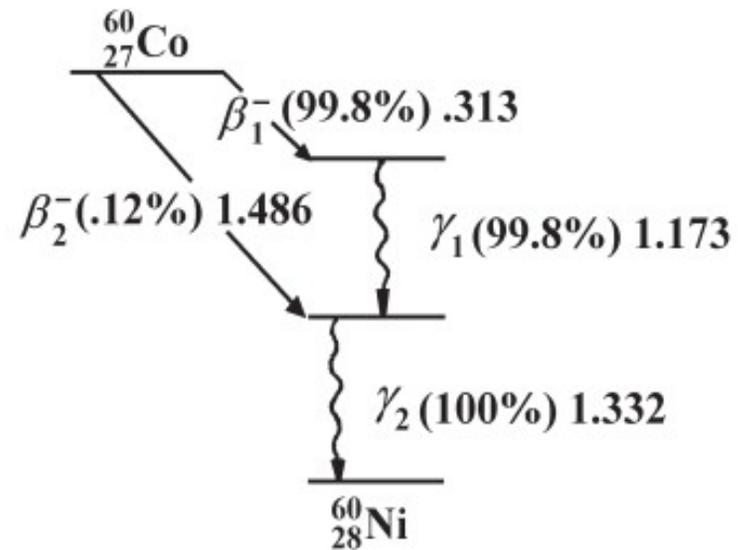
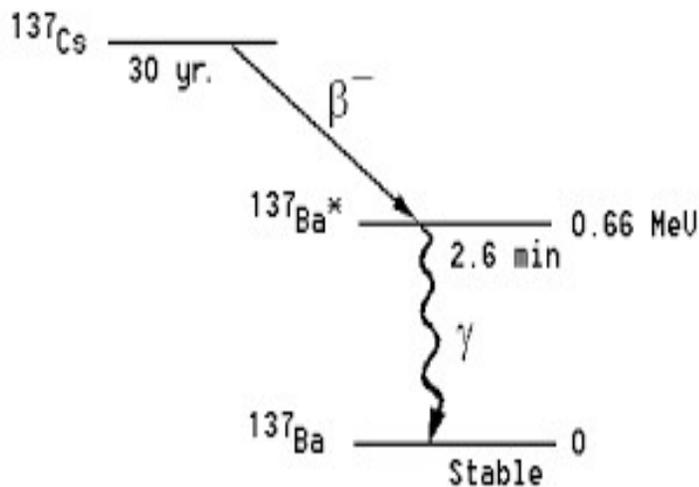
- Iradiator berbasis akselerator
- Radiasi dihasilkan melalui proses pemercepatan (*acceleration*) menggunakan medan listrik.
- Radiasi yang dihasilkan mempunyai energi yang tinggi sesuai dengan energi yang diperlukan untuk proses iradiasi
- Radiasi dapat dihentikan



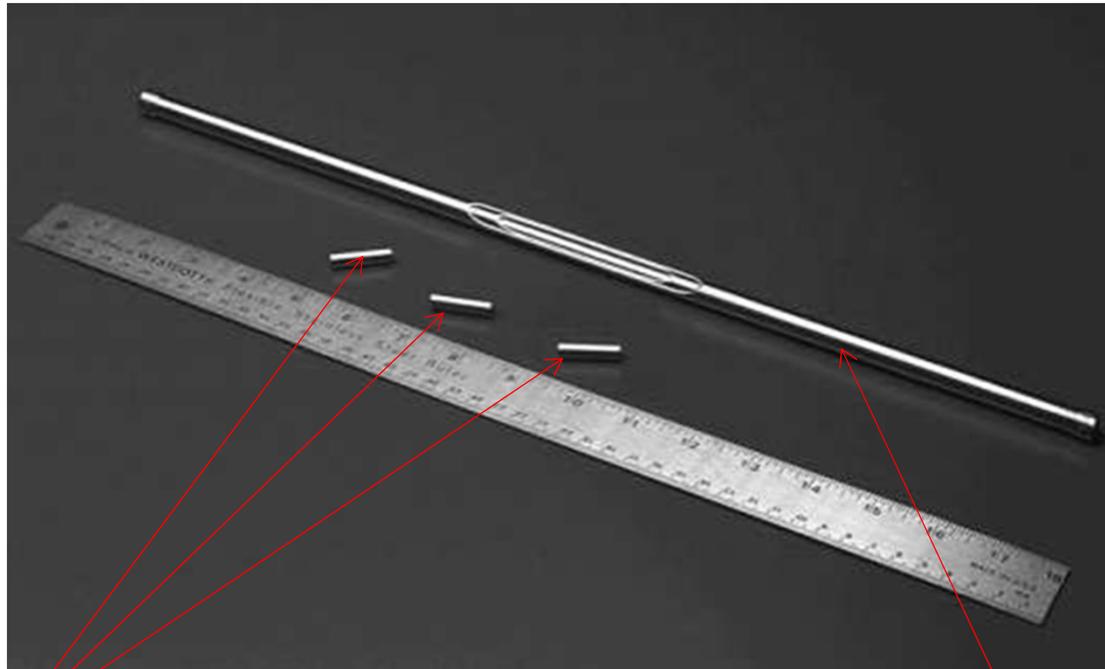
# Iradiator Gamma



- Menggunakan radiasi gamma sebagai radiasi pengion
- Radiasi gamma berasal dari radioisotop pemancar gamma (Co-60 atau Cs-137, krn waktu paruhnya cukup panjang)  $\rightarrow T_{1/2}$  (Co-60) = 5,27 th,  $T_{1/2}$  (Cs-137) = 30,1 th
- Co-60 paling banyak digunakan, baik untuk industri maupun untuk medis.



# Sumber Gamma Co-60 Pada Iradiator Gamma



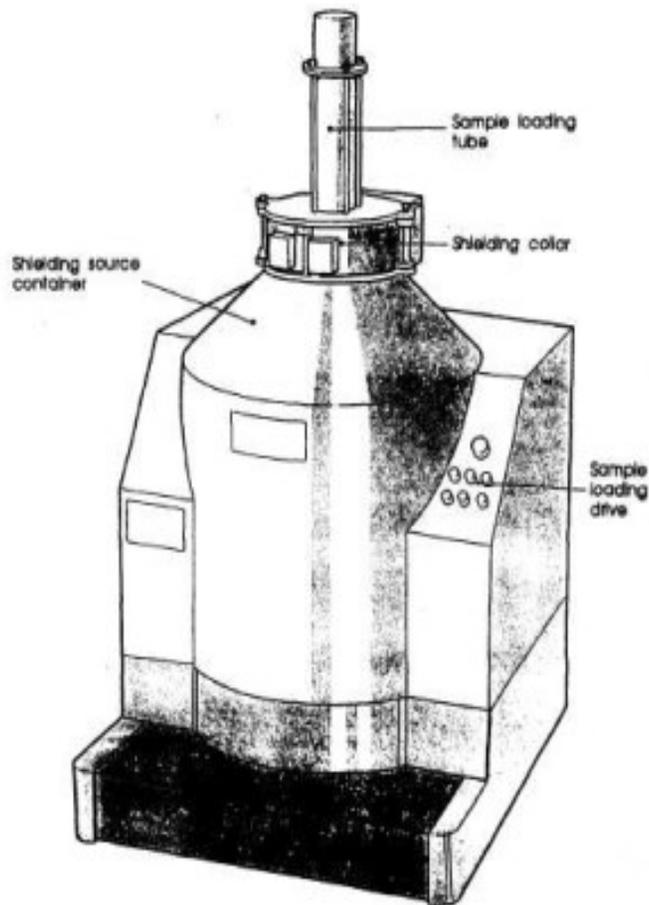
Kapsul-kapsul zircaloy berisi pellet Co-60

Silinder SS berisi kapsul-kapsul zircaloy, disebut pensil



# Klasifikasi Iradiator Gamma Menurut IAEA

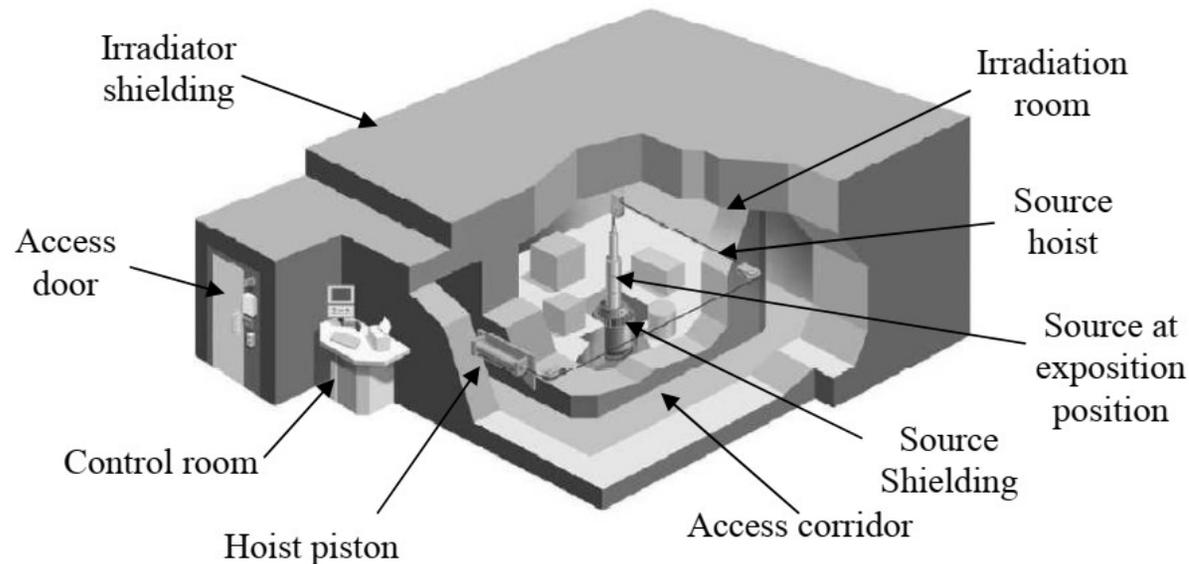
## 1. Iradiator Gamma Kategori I (*Self-Contained*)



- Sumber radiasi gamma ditempatkan di dalam tempat penyimpanan kering (*dry storage*) yang terbuat dari material padat dan berfungsi juga sebagai perisai radiasi sumber.
- Sample loading tube: untuk menempatkan cuplikan yang akan diiradiasi, dapat digerakkan ke sumber
- Shielding collar: merupakan sistem keselamatan, hanya dapat dibuka ketika sample loading tube berada pada posisi di atas.
- Shielding source container: merupakan perisai sumber
- Sample loading drive: merupakan panel kendali iradiator

# Klasifikasi Iradiator Gamma Menurut IAEA

## 2. Iradiator Gamma Kategori II (*Panoramic, Dry Storage*)

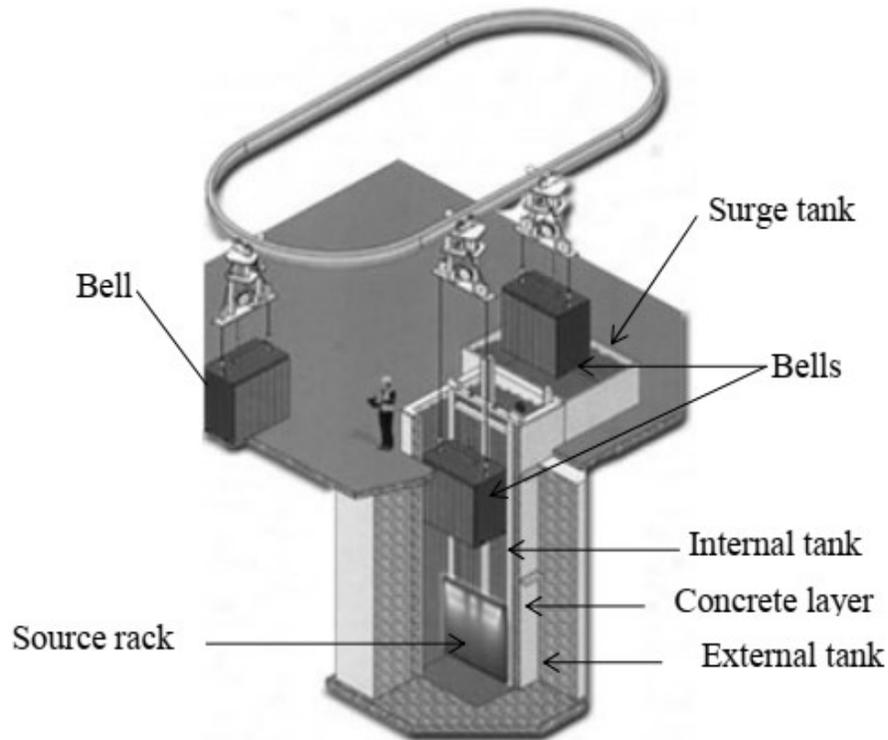


- Iradiator gamma yang memungkinkan akses personil ke dalam ruang iradiasi sehingga harus dikendalikan.
- Ketika sumber radiasi tidak digunakan untuk mengiradiasi material, maka ia harus disimpan di dalam tempat penyimpanan kering (dry storage) berperisai dan terbuat dari material padat.
- Ketika akan digunakan untuk iradiasi material, maka sumber diangkat ke atas (ke ruang iradiasi).

# Klasifikasi Irradiator Gamma Menurut IAEA



## 3. Irradiator Gamma Kategori III (*Self-contained in Water*)

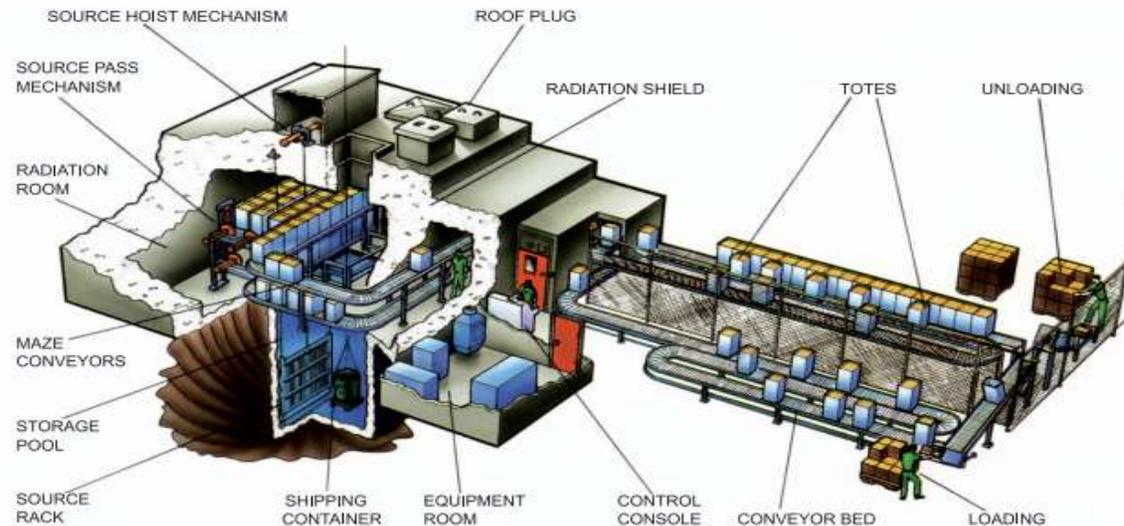


- Sumber radiasi gamma dalam posisi diam di dasar sebuah tangki atau kolam berisi air. Material yang akan diirradiasi harus didekatkan ke sumber radiasi tersebut.
- Ada 3 fungsi air yang ada dalam tangki tersebut, yaitu:
  1. Sebagai perisai radiasi untuk sumber radiasi gamma
  2. Untuk membatasi akses personil ke daerah sumber dan dibawah ruang iradiasi
  3. Untuk mendisipasi panas yang ditimbulkan oleh sumber radiasi (melalui aliran konveksi alamiah)



# Klasifikasi Iradiator Gamma Menurut IAEA

## 4. Iradiator Gamma Kategori IV (*Panoramic, Wet Storage*)



- Iradiator gamma yang memperbolehkan personil masuk ke dalam ruang iradiasi, sehingga harus ada sistem kendali.
- Sumber radiasi gamma disusun dalam rak (source rack) dan berada di dalam tangki berisi air di bawah ruang iradiasi.
- Fungsi air sebagai perisai radiasi sumber apabila personil berada di dalam ruang iradiasi misalnya untuk melakukan perawatan atau inspeksi rutin.
- Iradiator juga dilingkupi dengan perisai radiasi berbahan padat tebal.

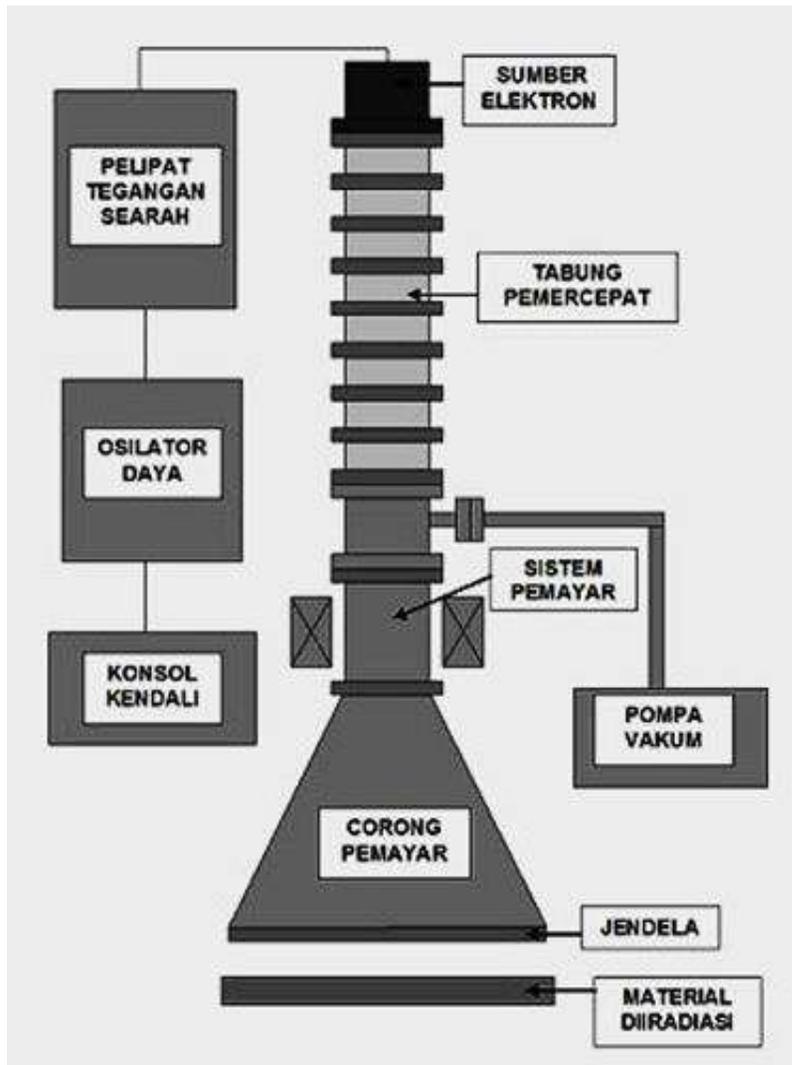
# Iradiator Elektron (MBE)



1. Irradiator yang menggunakan berkas elektron sebagai radiasi pengionnya.
2. Berkas elektron berasal dari mesin berkas elektron (MBE)
3. MBE: akselerator partikel yang menghasilkan berkas elektron.
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.



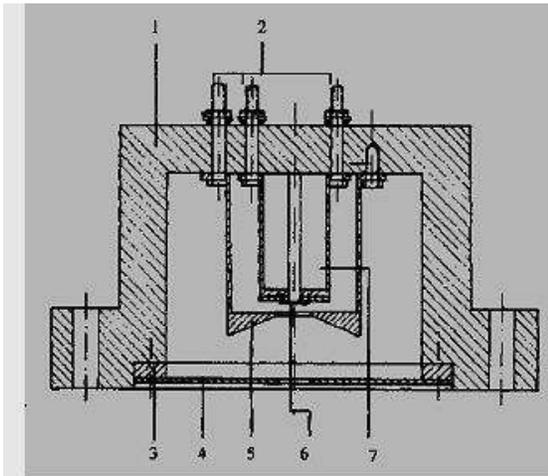
# Komponen-komponen MBE



- Sumber elektron sebagai penghasil berkas elektron
- Osilator daya & pelipat tegangan searah merupakan generator tegangan tinggi searah jenis Cockroft Walton
- Tabung pemercepat & generator tegangan tinggi merupakan sistem pemercepat berkas elektron
- Sistem pemayar untuk memayarkan (*scanning*) berkas elektron melalui corong pemayar
- Sebelum sistem pemayar terdapat sistem pemokus
- Jendela (window) membatasi ruang vakum MBE dengan atmosfer
- Pompa vakum untuk memvakum ruang dalam MBE



# Sumber Elektron

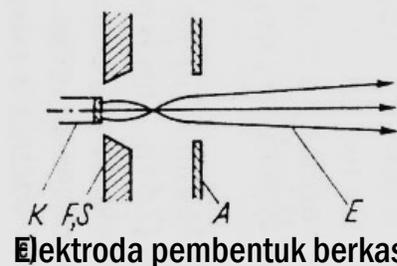


## Keterangan:

1. *Body* sumber elektron
2. Terminal catu daya
3. Cincin anode
4. Anode
5. Katode
6. Filamen
7. Pemegang filamen



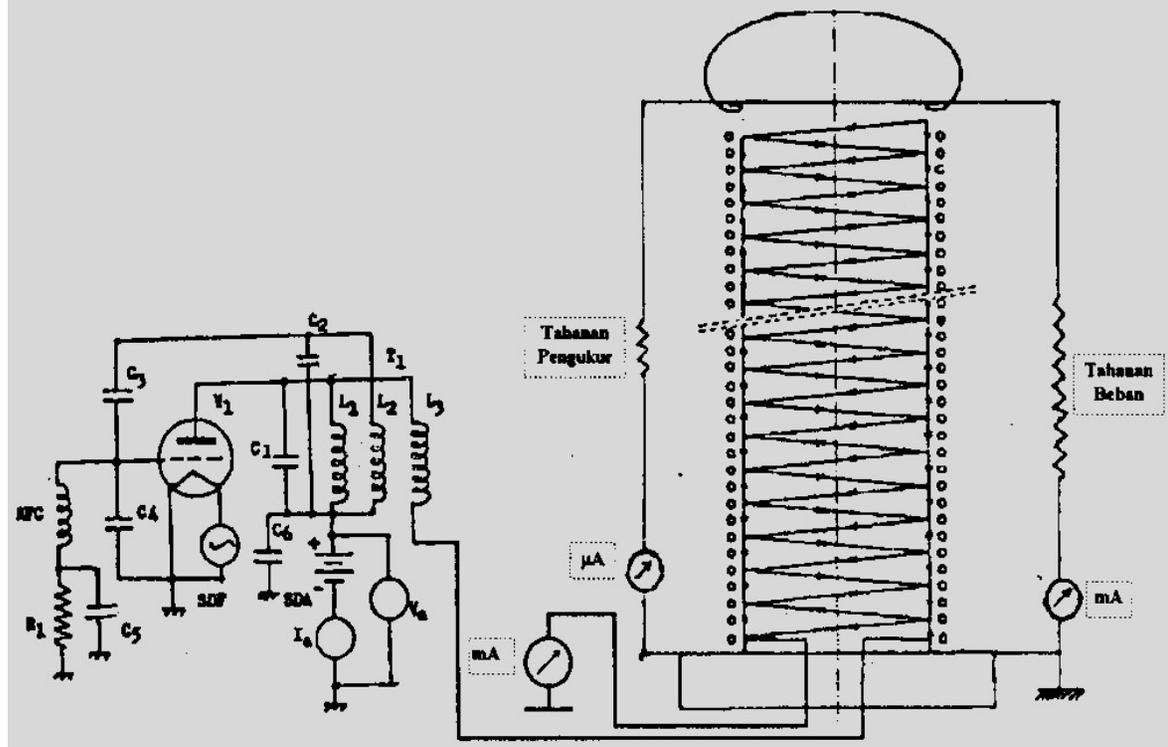
Filamen spiral



- Terdiri dari 2 bagian pokok: bagian pemancar elektron & bagian pembentuk berkas elektron
- Bagian pemancar elektron: untuk menghasilkan elektron bebas, berupa filamen, dipanaskan dengan dialiri arus listrik, terjadi emisi termionik.
$$J\left(\frac{A}{m^2}\right) = 1,2 \cdot 10^{-6} T^2 \exp\left(\frac{-\phi}{kT}\right)$$
- Bagian pembentuk berkas elektron: terdiri dari katoda sebagai elektroda pemokus dan anoda sebagai celah, untuk membentuk berkas elektron dan mengeluarkan (ekstraksi) berkas elektron dari sumber elektron

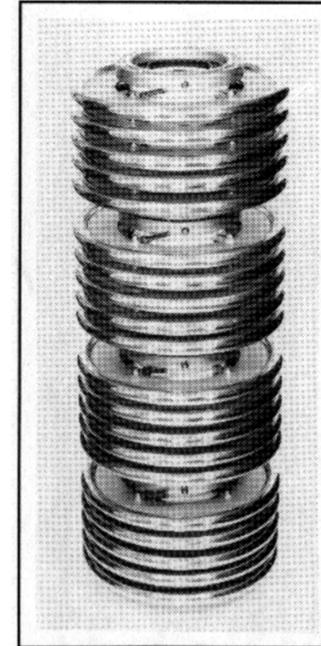


# Sistem Pemercepat



Sumber Daya Penyangga

Pelipat Tegangan



Tabung Pemercepat

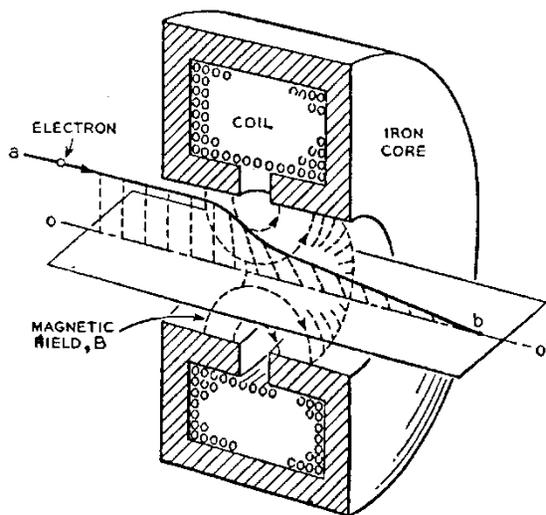
- Berfungsi untuk mempercepat berkas elektron sampai energi yang cukup tinggi sesuai dengan yg dibutuhkan. Oleh karena itu di dalam tabung pemercepat harus dihasilkan suatu medan listrik sedemikian rupa sehingga berkas elektron ketika melewati tabung pemercepat dipercepat ke arah jendela MBE.
- Medan listrik dalam tabung pemercepat dihasilkan dengan pemasangan tegangan listrik searah (DC) pada tabung pemercepat melalui elektrode-elektrode pada tabung pemercepat. Elektron akan memperoleh energi yang sebanding dengan tegangan yang terpasang pada elektrode-elektrode tabung pemercepat.



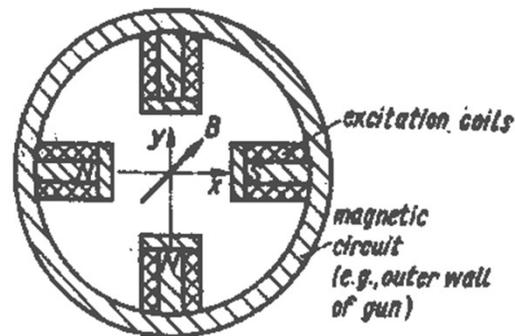
# Sistem Optik



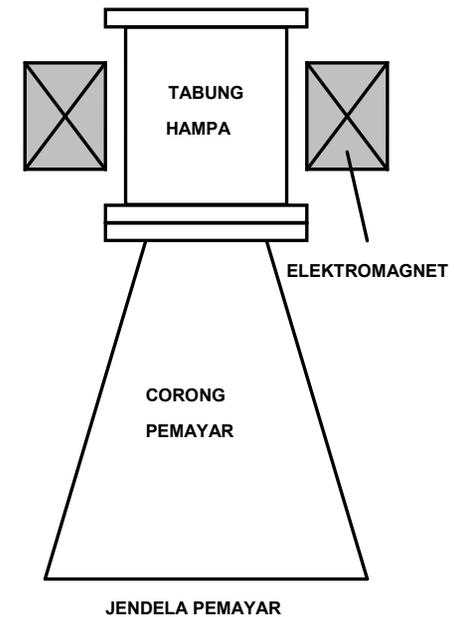
- **Sistem Pemokus:** untuk memfokuskan berkas elektron sesudah keluar dari tabung pemercepat.



- **Sistem Pengarah:** untuk mengarahkan berkas elektron agar bergerak sepanjang sumbu optik MBE sesudah mengalami percepatan di dalam tabung pemercepat. .



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



# Aplikasi MBE di PSTA



## Aplikasi MBE Untuk Pelapisan Permukaan:

- Untuk meningkatkan kualitas permukaan suatu material sehingga sesuai dengan yang diinginkan.
- Misal: proses pengeringan pada pelapisan (curing of coating) permukaan kayu untuk lantai sehingga menjadi lebih keras, teksturnya menarik, dll.

## Aplikasi MBE Untuk Pengawetan Bahan Pangan:

- Iradiasi tepung terigu: masih pada tahap awal, untuk mempelajari proses iradiasi tepung terigu menggunakan soft electron dari MBE dengan tujuan untuk memperpanjang umur simpan tepung terigu.

## Aplikasi MBE Untuk Pravulkanisasi Lateks Karet Alam:

- Untuk kajian eksperimental iradiasi lateks karet alam dengan berkas elektron.
- Ikatan silang (*crosslinking*) merupakan reaksi yang paling dominan yang terjadi selama proses iradiasi dengan elektron.
- Sifat-sifat fisika dari karet alam akan berubah dengan terbentuknya ikatan silang, yaitu bertambahnya ketahanan terhadap bahan pelarut (*solvent*), meningkatnya kekuatan regangan dan kekerasan, berkurangnya tingkat kemuluran dan tahan terhadap panas (deformasi termal).



# Iradiator Ion



- **Iradiator ion adalah iradiator yang menggunakan berkas ion untuk proses iradiasi.**
- **Berkas ion adalah berkas partikel bermuatan listrik, baik muatan listrik positif maupun negatif.**
- **Iradiator ion lebih umum dinamakan akselerator ion, karena seluruh proses di dalam iradiator ion mulai dari produksi ion di dalam sumber ion sampai menjadi berkas ion yang siap digunakan untuk proses iradiasi melibatkan proses pemercepatan (acceleration) menggunakan medan listrik.**
- **Disamping itu, seringkali akselerator ion juga menggunakan medan magnet untuk memperoleh karakteristik berkas ion yang sesuai untuk suatu proses iradiasi berkas ion.**



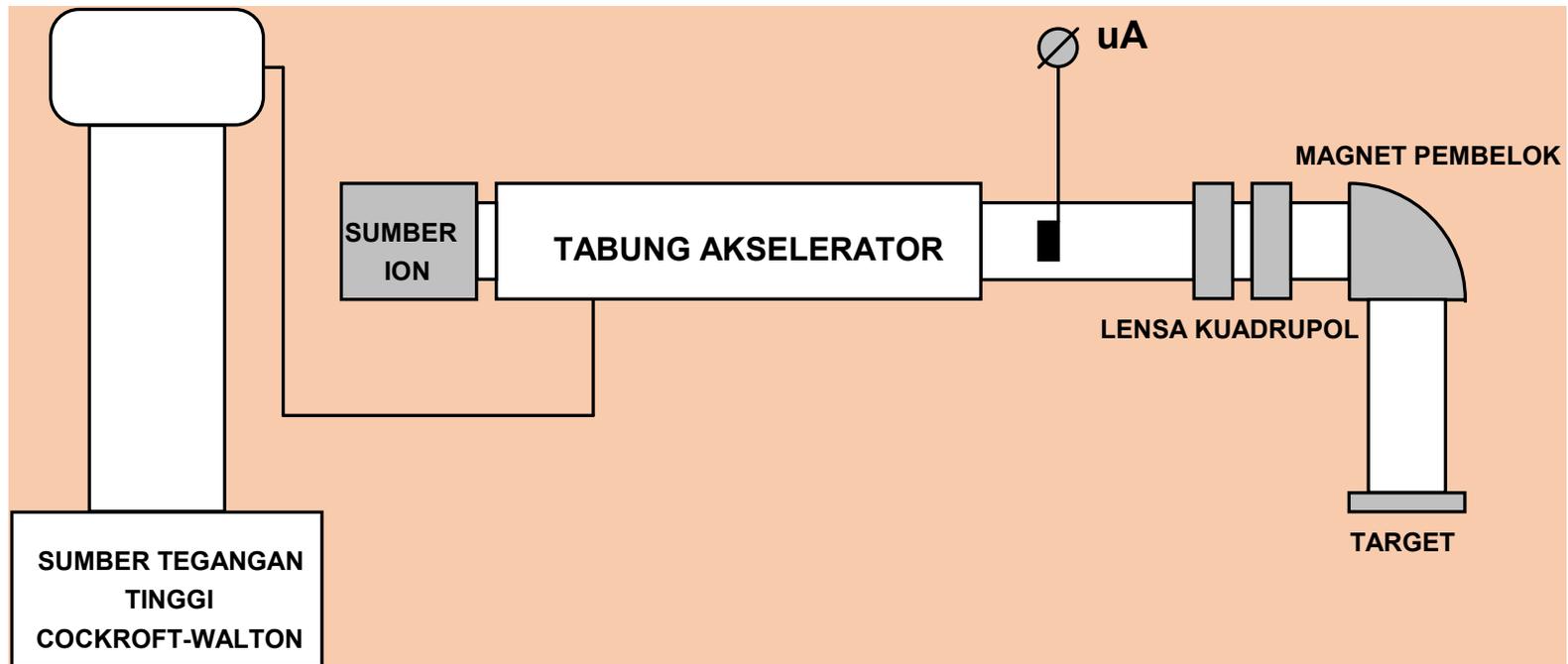
Pada prinsipnya didalam suatu akselerator partikel terdapat 3 proses mendasar yang berlangsung terkait dengan perjalanan berkas partikel bermuatan dari awal terbentuknya di dalam sumber partikel bermuatan hingga keluar dari akselerator untuk diiradiasikan pada suatu bahan.

1. Pembentukan partikel bermuatan, yaitu suatu proses pembentukan proton, ion dan elektron dari suatu bahan dengan cara tertentu.
2. Percepatan partikel bermuatan, yaitu suatu proses menaikkan energi kinetik partikel bermuatan sehingga mencapai energi tertentu yang diperlukan iradiator.
3. Penanganan berkas partikel bermuatan, yaitu suatu proses untuk mempertahankan kualitas berkas partikel bermuatan dan mengarahkannya padatarget (bahan yang diiradiasi).

# Implantor Ion



- ❑ Salah satu jenis akselerator ion adalah mesin implantor ion.
- ❑ Akselerator ion jenis ini berfungsi untuk mengimplantasi ion-ion pada permukaan suatu bahan.



# Komponen-komponen Implantor Ion



## Komponen Utama:

- Sumber tegangan tinggi jenis Cockroft-Walton
- Sumber ion
- Tabung pemercepat
- Lensa kuadrupol
- Magnet pembelok (analisisator massa)

## Komponen pendukung:

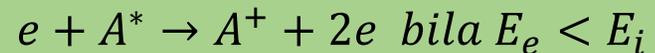
- Sistem catudaya
- Sistem instrumentasi & kendali
- Sistem vakum, dll.



# Sumber Ion

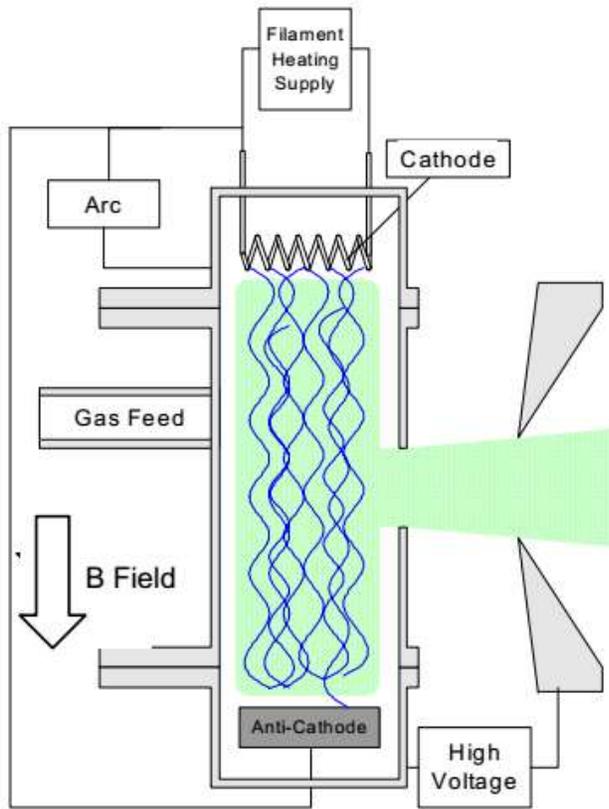


- Sumber ion untuk menghasilkan ion-ion dopan yang akan diimplantasikan pada suatu bahan
- Jenis sumber ion yang dipergunakan tergantung pada jenis bahan dopan yang akan diionkan.
  - ✓ Untuk bahan dopan yang berupa gas (misal hidrogen, fosfor, boron, nitrogen) dipergunakan sumber ion tipe Penning. Proses ionisasinya adalah tumbukan elektron
  - ✓ Untuk bahan dopan yang berupa padatan (misal besi, nikel, aluminium) dipergunakan sumber ion tipe katoda panas. Bahan dopan padat diuapkan dahulu, setelah menjadi uap diionisasi dengan tumbukan elektron juga

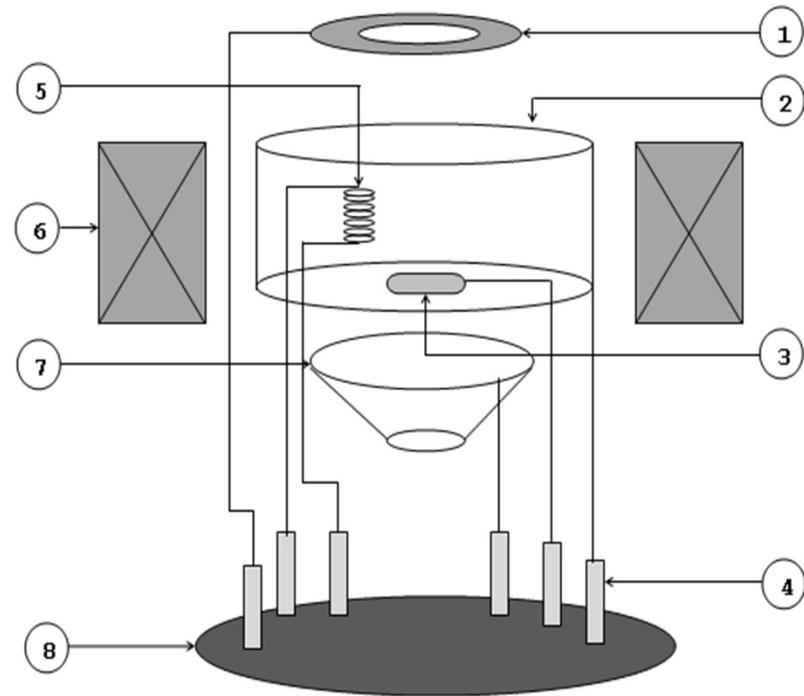


$E_e$ : energi elektron penumbuk;  $E_i$ : energi ionisasi





**Sumber ion tipe Penning**



**Sumber ion tipe katoda panas**

# Sistem Pemercepat



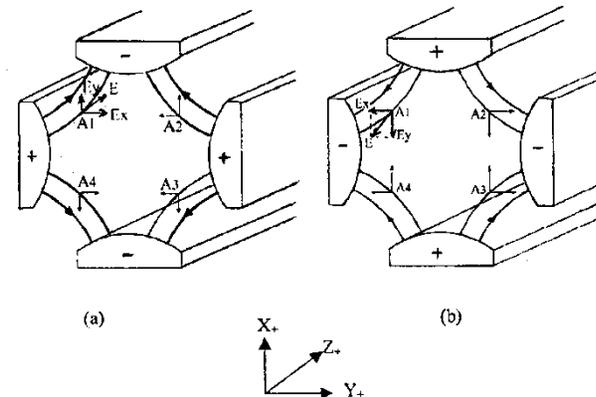
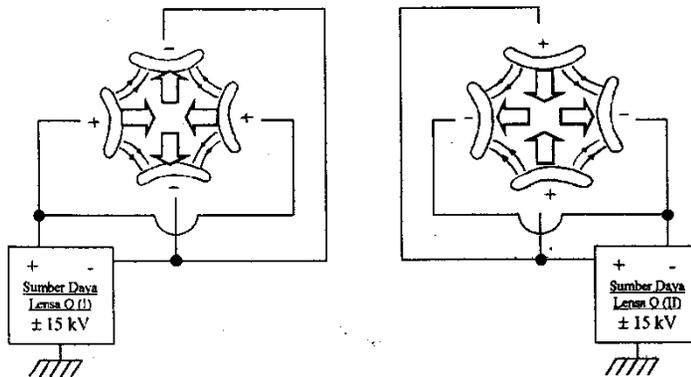
- Sistem pemercepat implantor ion menggunakan medan listrik elektrostatik dari generator tegangan tinggi searah Cockroft-Walton (seperti pada MBE).
- Tegangan tinggi dari generator Cockroft-Walton diaplikasikan pada tabung akselerator/pemercepat untuk mempercepat ion-ion dopan. Tegangan pemercepat maksimum 150 kV.



# Lensa Kuadrupol



- Berfungsi untuk memfokuskan berkas ion agar dapat sampai pada bahan target secara optimal.
- Apabila berkas ion dapat terfokus hingga mencapai ukuran spot minimum, maka kerapatan ion yang mengenai bahan target dapat optimum sehingga diperoleh dosis ion terimplantasi yang optimum
- Kerugian dosis ion akibat berkas ion yang menyebar (divergen) dapat ditekan serendah mungkin.
- Lensa kuadrupol elektrostatis terdiri dari 4 buah lempeng elektrode berbentuk hiperbolik yang tersusun secara berpasangan. Masing-masing pasangan elektrode tersebut terhubung dengan sumber daya tegangan yang dapat divariasikan antara 0 hingga  $\pm 15$  kV.



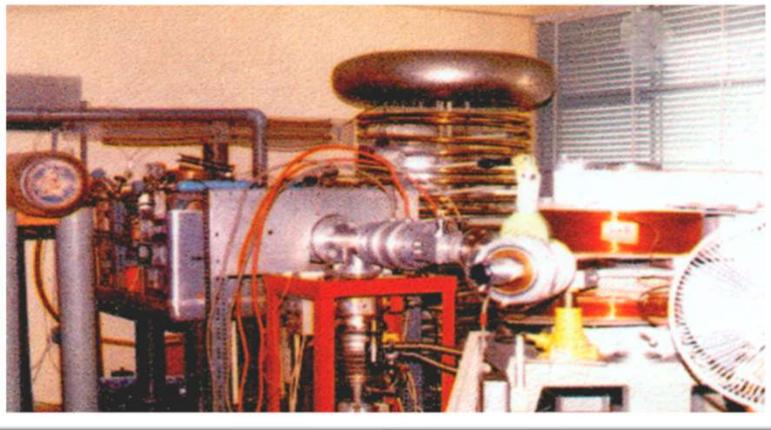
# Magnet Pembelok (Analisis Massa)



- ✓ Berfungsi sebagai analisator massa, yaitu memisahkan ion-ion dopan yang berbeda massa sehingga hanya massa ion dopan yang diperlukan saja yang dapat lolos sampai ke target (bahan yang diimplantasi).
- ✓ Pembelokan ion-ion oleh magnet pembelok tergantung pada:
  1. Kuat medan listrik yang mempercepat ion-ion pada tabung pemercepat: makin besar medan listrik berarti makin cepat ion-ion bergerak, maka pembelokan ion makin kecil.
  2. Kuat medan magnet pembelok: makin besar kuat medan magnet, makin besar pembelokan ion-ion.
  3. Massa ion: makin besar massa ion, makin kecil pembelokan ion
  4. Muatan ion: makin besar muatan ion, makin besar pembelokan ion.



# Aplikasi Implantor Ion PSTA



Mesin implantor ion PSTA - BATAN merupakan hasil litbang rancangbangun akselerator ion pertama yang dilakukan akhir tahun 70-an hingga awal tahun 80-an. Hingga saat ini mesin implantor ion telah banyak dimanfaatkan terutama untuk litbang ilmu bahan, baik bahan semikonduktor maupun bahan non semikonduktor atau logam.

## Implantasi ion pada bahan semikonduktor:

- Bahan semikonduktor di doping dengan atom-atom B, P, As dll untuk mendapatkan kondisi ketakmurnian (*impurity*) dalam bahan semikonduktor.
- Untuk mempelajari kelakuan atom-atom dopan di dalam bahan semikonduktor yang telah diimplantasi.
- Untuk pembuatan sel surya.

## Implantasi ion pada bahan metal

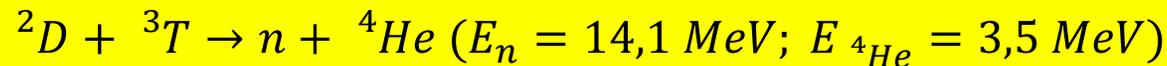
- Untuk memodifikasi sifat bahan metal. Implantasikan atom-atom tertentu (N, Cr, B, Ti, Cr) ke dalam metal akan terbentuk lapisan tipis paduan metal pada permukaan bahan dengan konsentrasi dan kedalaman tertentu sehingga diperoleh bahan unggul dan ekonomis (sangat keras, tahan korosi, dan tahan keausan).



# Generator Neutron



- ❖ Irradiator neutron lebih dikenal dengan sebutan generator neutron, yaitu jenis akselerator ion penghasil neutron cepat.
- ❖ Pada generator neutron, ion-ion yang dipercepat adalah ion deutron (d atau  $H^{2+}$ ) dengan energi 100 hingga 400 keV.
- ❖ Neutron cepat dapat dihasilkan dari reaksi fusi D-D atau D-T, tergantung pada jenis bahan target yang ditembak dengan ion deutron.



- ❖ Energi neutron cepat yang dihasilkan oleh masing-masing reaksi fusi tersebut adalah 2,45 MeV dan 14,1 MeV



- Pada generator neutron, ion-ion deutron dihasilkan oleh sumber ion tipe RF yang mampu menghasilkan arus ion deutron sekitar 1 mA.
- Ion-ion tersebut kemudian dikeluarkan dari sumber ion menggunakan tegangan ekstraktor. Ion-ion deutron yang telah diekstraksi kemudian dipercepat dalam tabung pemercepat dan akhirnya ditembakkan ke target deuterium atau tritium.
- Agar ion-ion deutron dapat sebanyak mungkin mengenai target, maka diperlukan sistem pemokus berkas ion yang ditempatkan di antara tabung pemercepat dengan target.
- Sistem pemokus yang digunakan adalah lensa kuadropol seperti pada mesin implantor ion.

# Komponen-komponen Generator Neutron



## Komponen Utama:

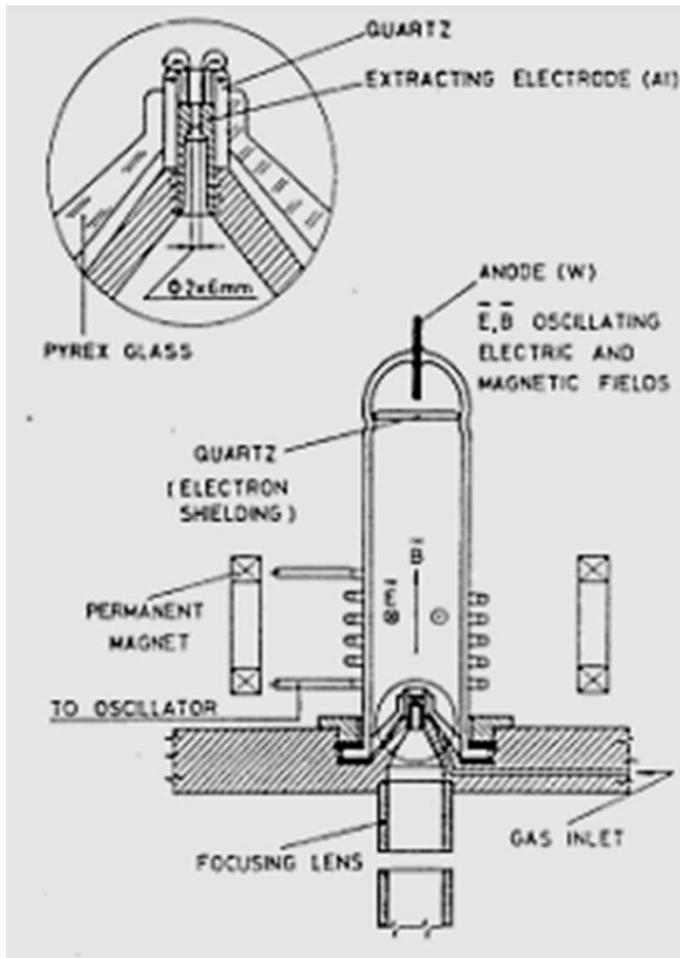
- Sumber ion RF
- Sistem pemercepat
- Lensa kuadrupol
- Sistem target

## Komponen Pendukung:

- Sistem vakum
- Sistem Instrumentasi & kendali



# Sumber Ion RF



- Untuk menghasilkan ion-ion deutron; gas deuterium diionisasi di dalam tabung lucutan menggunakan daya RF sehingga terjadi lucutan gas (glow discharge).
- Arus berkas ion deutron maksimum dapat mencapai 2,5 mA.
- Ion-ion deutron yang terjadi di ekstraksi keluar tabung lucutan untuk kemudian dipercepat.

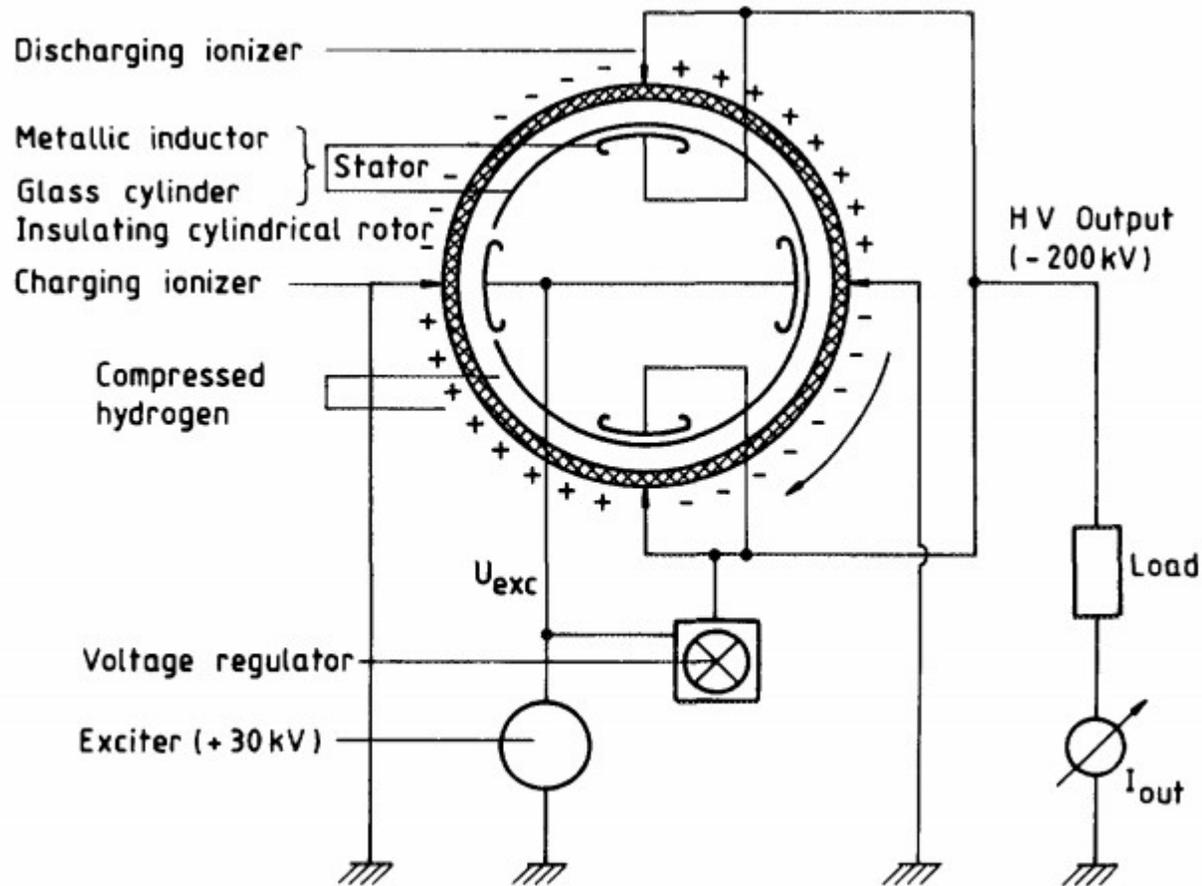
# Sistem Pemercepat



- Sistem pemercepat berupa tabung pemercepat di mana terdapat elektroda-elektroda bertegangan tinggi yang dihasilkan oleh generator tegangan tinggi elektrostatis tipe Felici buatan SAMES, Perancis.
- Kapasitas tegangan yang dihasilkan adalah 150 kV.
- Felici termasuk generator tegangan tinggi searah (elektrostatis) dengan sistem pembawa muatan seperti pada generator Van de Graaff dan pelletron.



# Generator FELICI



Bagian-bagian utama generator Felici terdiri dari:

- ✓ Sumber DC pemacu (exciter) sebagai sumber pemberi muatan
- ✓ Rotor berupa silinder berbahan isolator yang dapat berputar sebagai pembawa muatan
- ✓ Stator berupa induktor metal dan silinder gelas
- ✓ Elektrode ionizer berupa jarum metal yang sangat tipis sebagai pemuat dan pengumpul muatan
- ✓ Terminal sebagai penampung muatan.



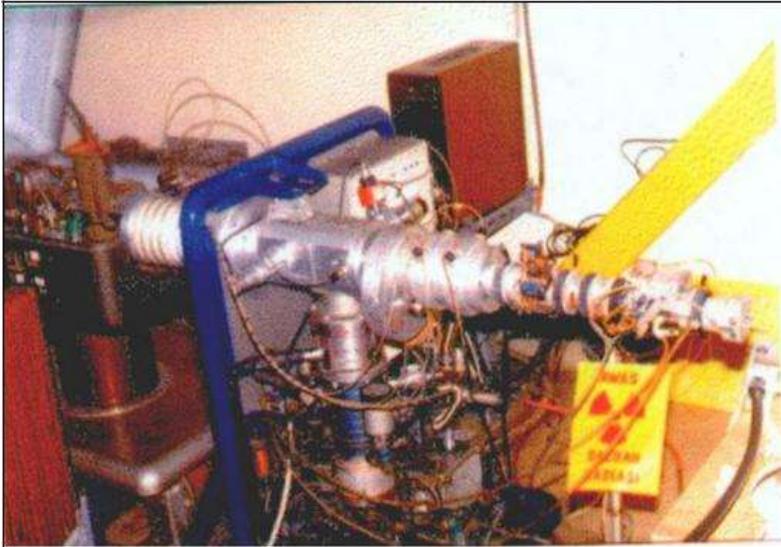
# Sistem Target



- Sistem target pada generator neutron terdiri dari unsur utama target (D atau T), logam penguat (Al atau Cu) dan unsur perantara antara logam penguat dengan unsur utama target (Ti).
- Pada proses pembuatan sistem target biasanya logam penguat di sputtering dengan unsur perantara.
- Selanjutnya unsur utama target diimplantasikan pada unsur perantara yang telah di sputtering pada logam penguat.
- Akibatnya terbentuk titanium hydrate (TiD atau TiT).
- Fluks neutron yang dihasilkan dapat mencapai  $10^8$  n/cm<sup>2</sup>s pada kondisi target masih baru.



# Aplikasi Generator Neutron PSTA



Generator neutron J-25 buatan SAMES Perancis dengan bagian-bagian terdiri dari:

- Sumber ion RF
- Generator tegangan tinggi jenis Felici
- Tabung pemercepat
- Sistem optik ion (lensa kuadropol)
- Sistem vakum
- Sistem target dengan pendingin
- Sistem transfer pneumatik.

## Aplikasi:

- Penelitian analisis aktivasi neutron cepat (AANC) unsur-unsur ringan sampai medium. Contoh: cuplikan dari produk-produk industri, pertanian dan material polutan lingkungan untuk:
  - ✓ Analisis kandungan protein pada produk-produk pertanian seperti beras, kedelai, jagung, kacang, dll.
  - ✓ Analisis kandungan nitrogen, fosfor dan potassium pada pupuk kimiawi dan pupuk kompos.
  - ✓ Analisis komposisi unsur-unsur polutan lingkungan (aerosol, sedimen).
- Pengukuran data nuklir terkait dengan tampang lintang aktivasi nuklir, dengan maksud untuk mendapatkan data yang lebih sistematis terutama untuk reaksi-reaksi nuklir  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  dan  $(n,2n)$ .

# TERIMA KASIH

