

KOMPONEN- KOMPONEN IRADIATOR (Akselerator)

Disampaikan pada:
Diklat SIB Iradiator/Akselerator

Suprpto
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator
Badan Tenaga Nuklir Nasional



Setelah mengikuti materi ini maka akan memiliki :

- 1. Kompetensi dasar mampu untuk menjelaskan komponen-komponen utama iradiator (akselerator).**
- 2. Indikator keberhasilan:**
 - Paham & tahu shg dpt menjelaskan komponen-komponen akselerator,
 - Pengembangan selanjutnya, mampu melakukan perawatan khususnya komponen-komponen akselerator.

IRADIATOR dibagi menjadi 2 (dua) yaitu:

Iradiator Gamma (misalnya Co 60)

Iradiator Akselerator (Ion, Elektron & Sinar-X)
Sinar-X dihasilkan dengan akselerator elektron yaitu dengan cara menumbukkan berkas elektron energi tinggi dari akselerator dengan materi (tungsten).

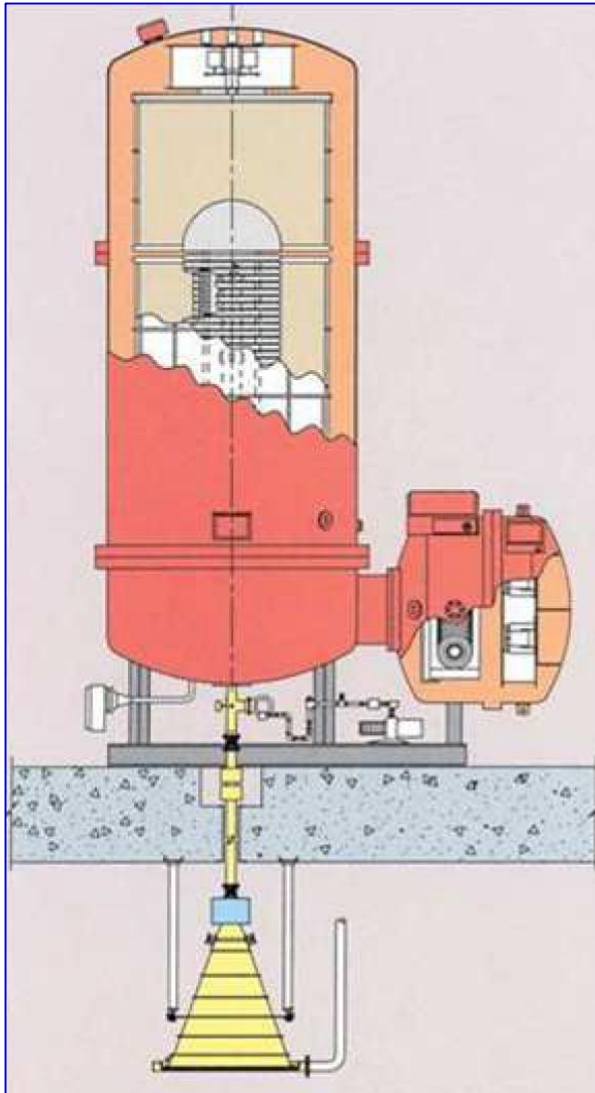
Akselerator

Didasarkan sistem pemercepat dibagi menjadi 2 yaitu:

Akselerator Elektrostatik (pemercepat tegangan tinggi DC)
Contoh: Akselerator Elektron (Cockroft-Walton, Dynamitron), Implantor Ion (termasuk Akselerator Tandem)

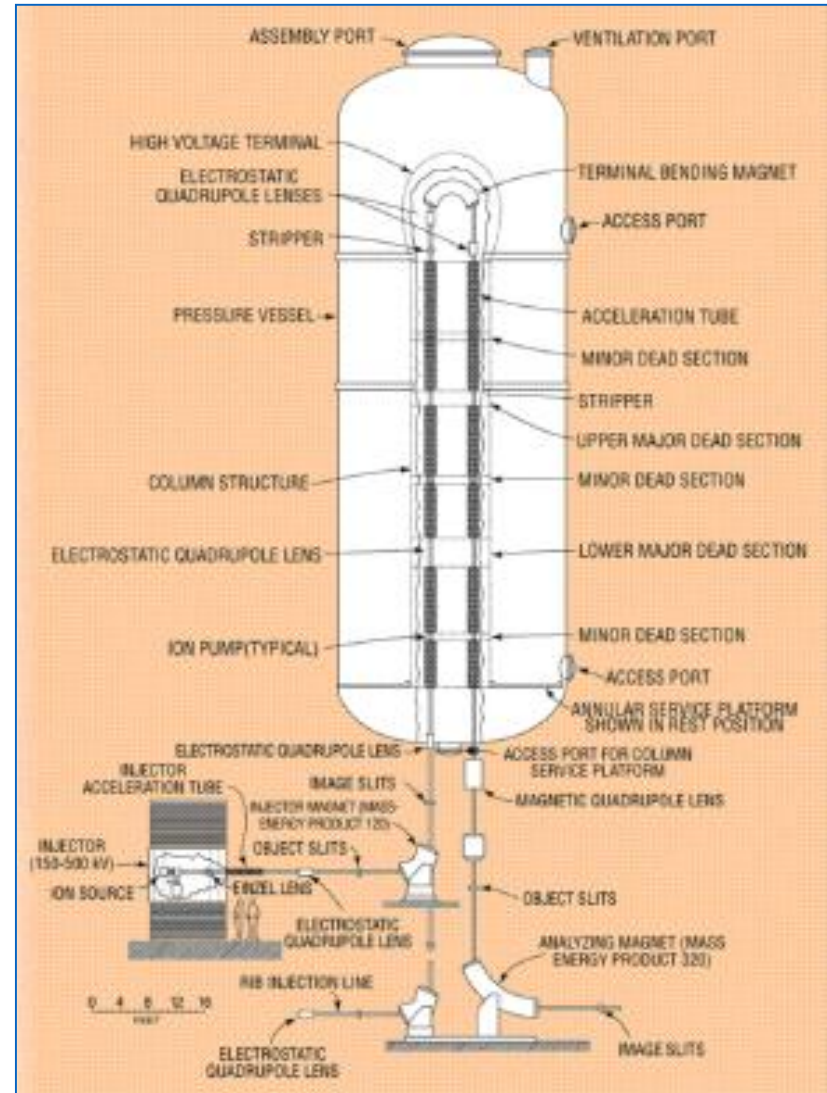
Akselerator *Cyclic* (pemercepat gelombang radio frekuensi)
Contoh: Sikloron, Akselerator Linier (*Linear Accelerator*), Rhodotron.

Contoh: Akselerator Elektrostatik (pemercepat tegangan tinggi DC)



Akselerator Elektron (Dynamitron)

www.batan.go.id

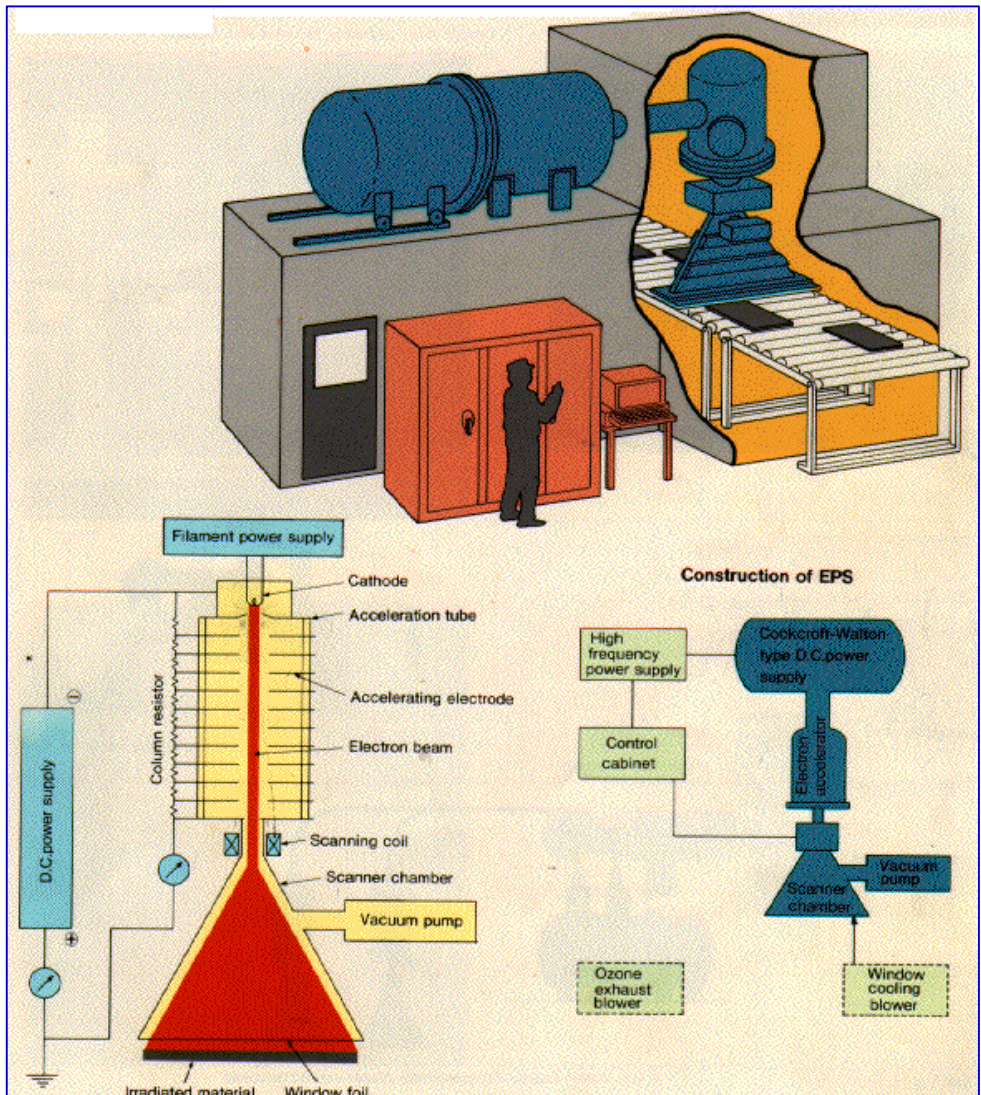


Akselerator Ion (Tandem)

Contoh: Akselerator elektrostatik (pemercepat tegangan tinggi DC)



Akselerator Elektron PSTA (Cockcroft-Walton)



Akselerator Elektron (Nissin High Voltage)

Contoh: Akselerator *Cyclic* (pemercepat gelombang radio frekuensi)

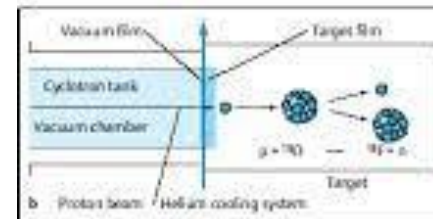
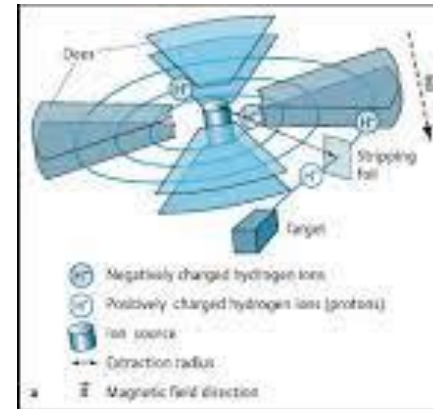
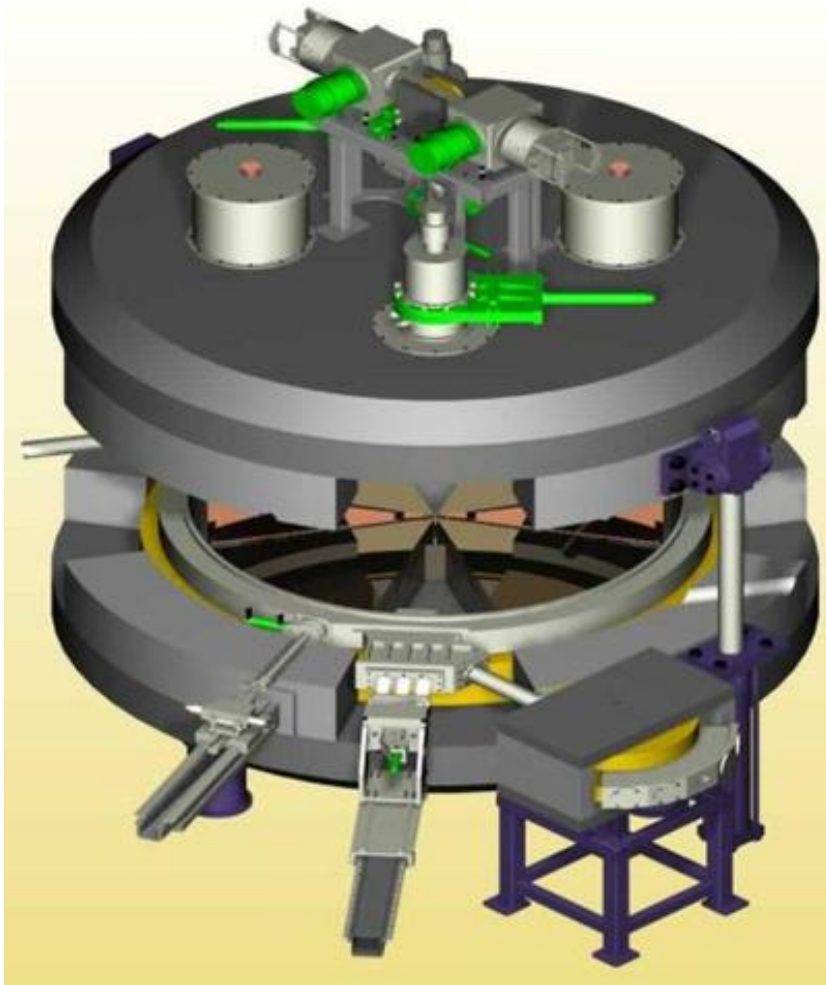


Linear Accelerator



Rhodotron Accelerator

Contoh: Akselerator Cyclic (pemercepat gelombang radio frekuensi)



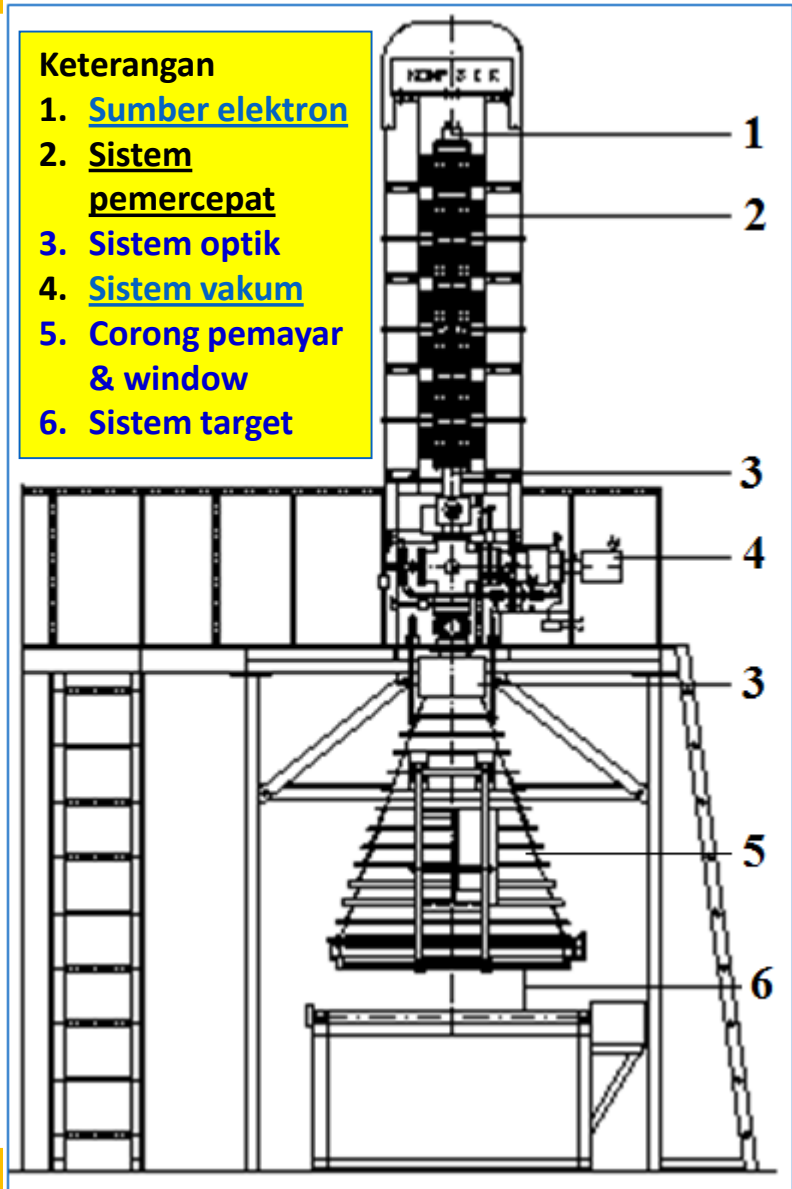
**Akselerator Siklotron
(utk produksi radio isotop & radio farmaka)**

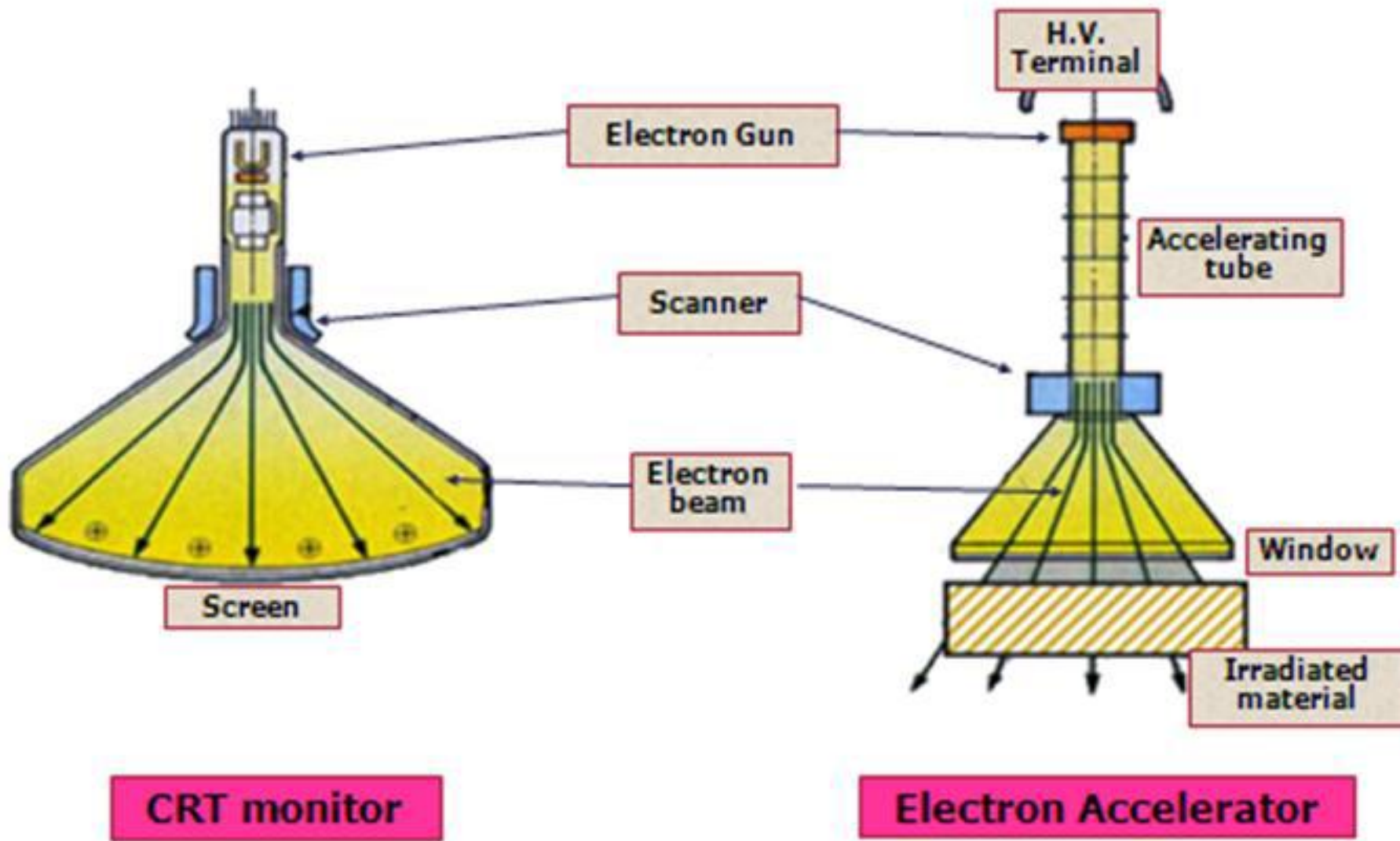
Bagian-bagian Utama

1. Sumber partikel bermuatan (ion/elektron)
2. Sistem pemercepat
3. Sistem optik
4. Sistem Vakum
5. Corong pemayar & *window*
6. Sistem iradiator (target)

Keterangan

1. Sumber elektron
2. Sistem pemercepat
3. Sistem optik
4. Sistem vakum
5. Corong pemayar & window
6. Sistem target





Skema akselerator elektron (Mesin Berkas Elektron)

Bagian-bagian Iradiator (Akselerator)

- Sumber partikel bermuatan (sumber ion/elektron)
- Sistem pemercepat (tabung & tegangan pemercepat)
- Sistem optik (pemfokus, pengarah, pemayar & *window*, serta pembelok)
- Sistem vakum (pompa vakum, komponen vakum, alat ukur kevakuman)

Bagian-bagian Iradiator (Akselerator)

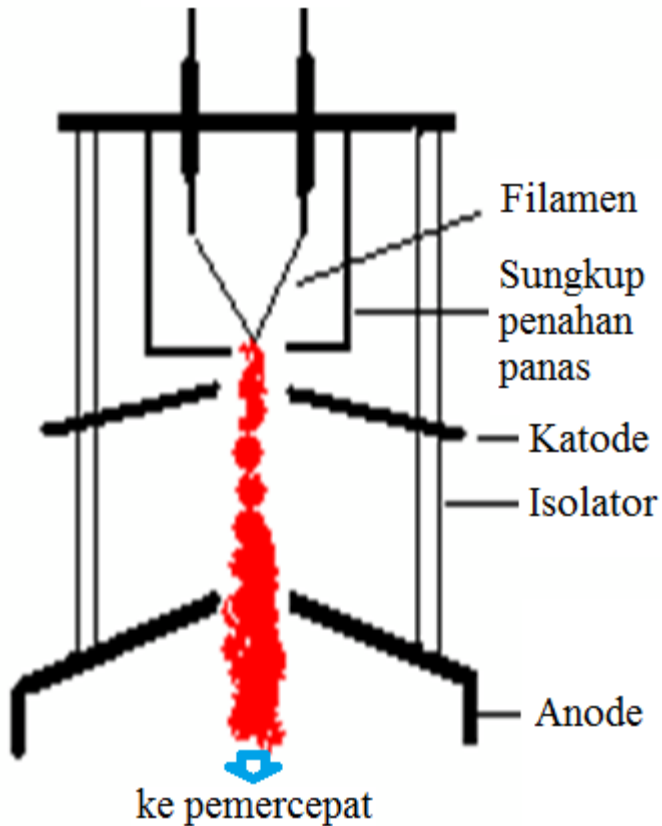
- Sumber partikel bermuatan (sumber ion/elektron)
- Sistem pemercepat (tabung & tegangan pemercepat)
- Sistem optik (pemfokus, pengarah, pemayar & *window*, serta pembelok)
- Sistem vakum (pompa vakum, komponen vakum, alat ukur kevakuman)

SUMBER ELEKTRON



Prinsip kerja

- Filamen dipanaskan dengan dialiri arus listrik hingga mengemisikan (memancarkan) elektron
- Elektron tersebut di ekstraksi dan dibentuk menjadi berkas elektron oleh katode dan anode
- Berkas elektron selanjutnya dimasukkan ke sistem pemercepat
- Di dalam sistem pemercepat, berkas elektron dipercepat (diberi tambahan energi) hingga mencapai kebutuhan energi untuk iradiasi
- Fungsi sungkup penahan panas untuk mengurangi perpindahan panas dari filamen ke dinding (isolator)



Struktur dasar sumber elektron

- Merupakan komponen utama akselerator elektron (misal: MBE, Linac, Rhodotron)
- Berfungsi untuk menghasilkan berkas elektron yang akan dipercepat, kemudian diiradiasikan pada suatu target

Berdasarkan cara pembangkitan elektron, ada 2 golongan sumber elektron yaitu:

- Sumber elektron berbasis emisi termionik
- Sumber elektron berbasis plasma

SUMBER ELEKTRON (SE)



Secara umum SE terdiri dari 2 bagian pokok yaitu:

- Bagian pembangkit elektron
- Bagian pembentuk berkas electron

Sumber elektron berbasis emisi termionik:

Karakteristik berkas elektron yg dihasilkan ditentukan oleh geometri dan suhu filamen, geometri pembentuk berkas, medan listrik pada elektrode pembentuk berkas

Sumber elektron berbasis plasma:

Karakteristik berkas elektron yg dihasilkan ditentukan oleh geometri ruang plasma & rapat plasma, geometri pembentuk berkas, medan listrik pada elektrode pembentuk berkas

FILAMEN SUMBER ELEKTRON



- Sebagai pemancar elektron bebas
- Pancaran elektron secara emisi termionik
- Rapat arus jenuh emisi elektron: tergantung pada jenis bahan filamen dan suhu filamen

Pers. Richardson-Dushman (rapat arus jenuh):

$$j = AT^2 e^{\left(-\frac{\phi}{kT}\right)}$$

Pers. Child-Langmuir (ekstraksi berkas):

$$J_e = \chi \frac{V_a^{3/2}}{Z_{ka}^2} \quad \text{dan} \quad \chi = \left(\frac{4\epsilon_0}{9}\right) \sqrt{2e/m}$$

Nilai maksimum J_e sama dengan J

Konstanta Richardson (A)

No.	Elemen atau senyawa	Konstanta Richardson (A)
1.	W	70
2.	Ta	55
3.	LaB ₆	120



BEBERAPA JENIS BAHAN KATODA (FILAMEN)

No.	Bahan	ϕ (eV)	No.	Bahan	ϕ (eV)
1.	B	4,5	7.	Re	5,1
2.	Ba	2,29	8.	Ta	4,12
3.	Gd	3,05	9.	W	4,5
4.	La	3,3	10.	Y	3,3
5.	Mo	4,27	11.	B ₂ O ₃	4,47
6.	Al ₂ O ₃	4,47	12.	LaB ₆	2,36

JENIS BAHAN YANG SERING DIGUNAKAN

LaB ₆	1750 - 2100 (°K)	10 - 100 (A/cm ²)
Ta	2200 - 2350 (°K)	0,1 - 0,5 (A/cm ²)
W	2600 - 3000 (°K)	1 - 10 (A/cm ²)

- Terdiri dari elektrode pendorong (katode) dan ekstraktor (anode).
- Berkas elektron dengan divergensi yang kecil dapat diperoleh dengan susunan elektrode PIERCE.
- Katode pembentukberkas membentuk sudut $67,5^\circ$ terhadap sumbu optik sumber elektron.
- Potensial V antara katode dan anode harus memenuhi persamaan disamping

$$\frac{d^2V}{dz^2} = \frac{j_e}{\epsilon_o \sqrt{2\eta V}}$$

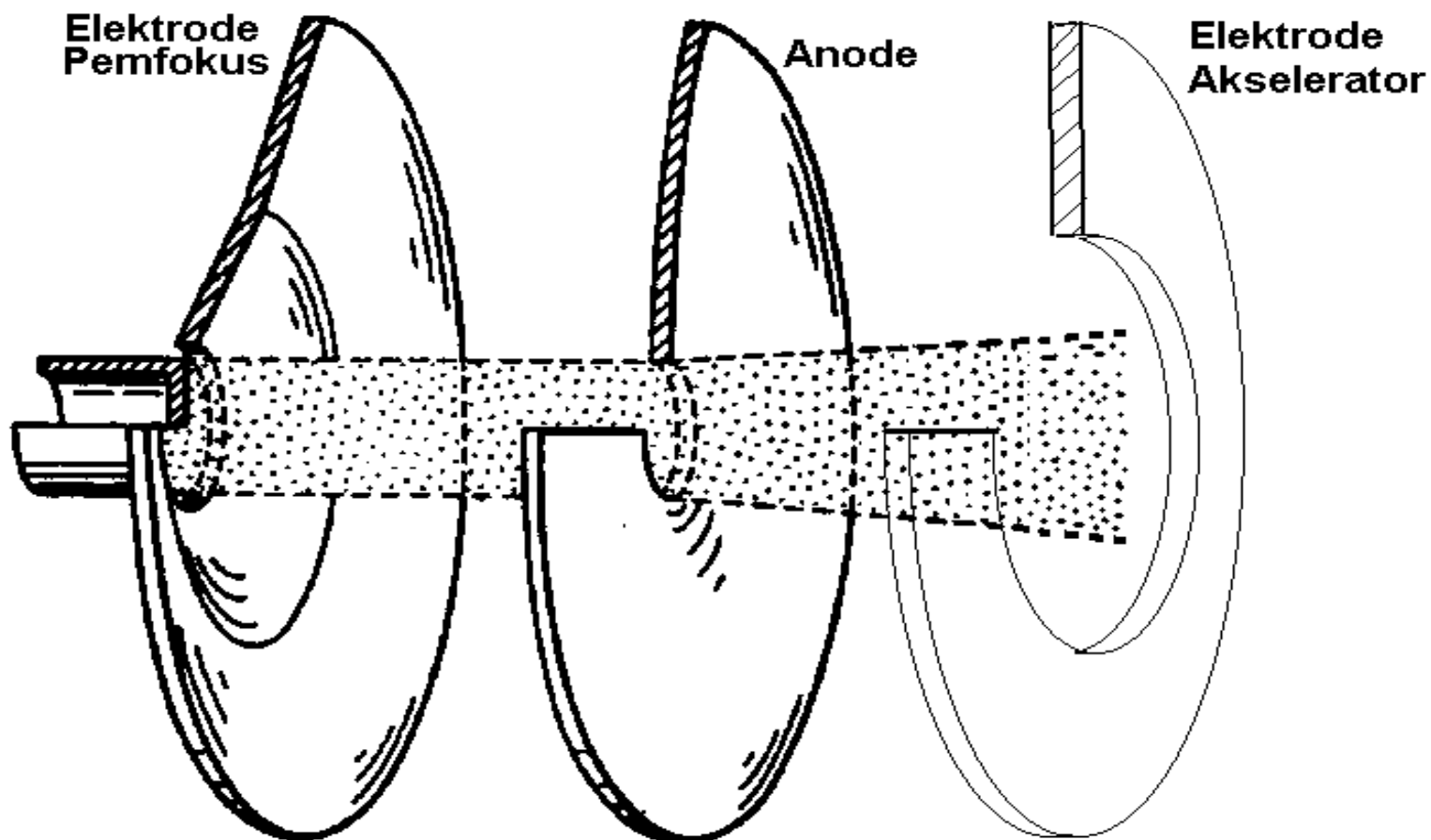
Dengan syarat batas:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \text{ dan } V = f(z)$$

Maka:

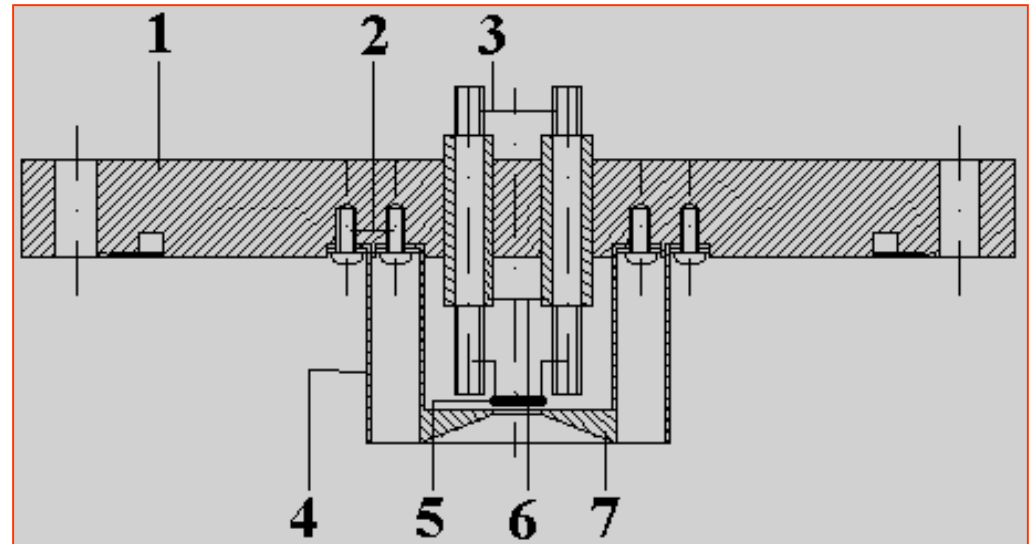
$$V = f(z) = \left(\frac{9j_e}{4\epsilon_o \sqrt{2\eta}} \right)^{2/3} z^{4/3}$$

GAMBARAN BENTUK ELEKTRODE PEMBENTUK BERKAS



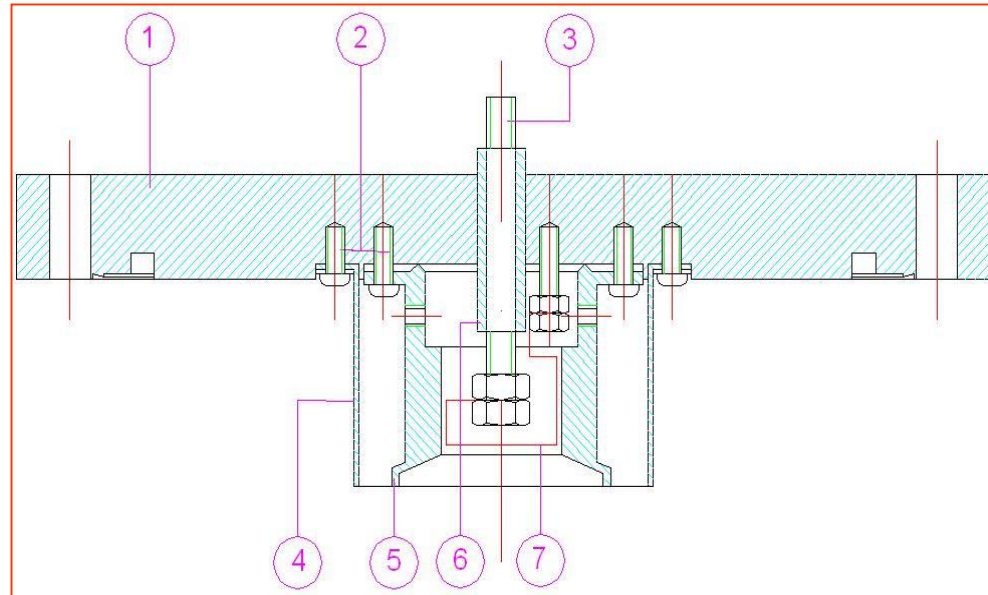
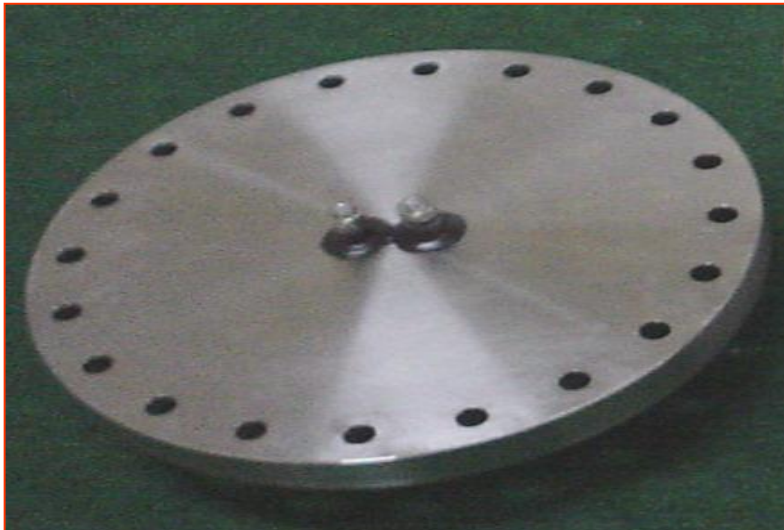
Untuk berkas elektron bulat

Sumber Elektron MBE Generasi III di PSTA



1	Flange Dudukan Katode
2	Baut Pengikat
3	Terminal Catudaya
4	Perisai Radiasi Termal
5	Katode
6	Isolator
7	Elektrode Pemfokus

Sumber Elektron MBE Generasi IV di PSTA

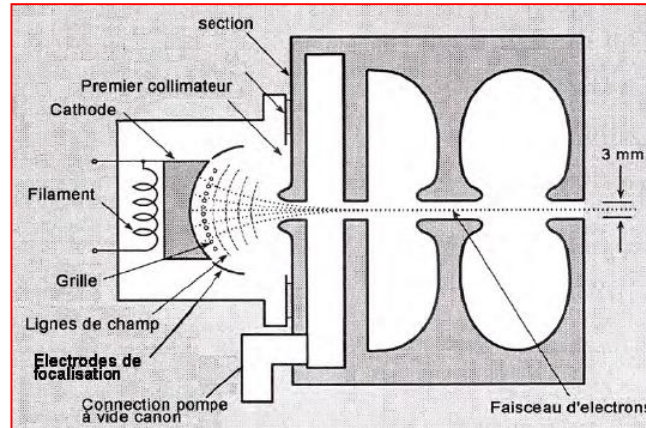


1	Flange Dudukan Katode
2	Baut Pengikat
3	Terminal Catudaya
4	Perisai Radiasi Termal
5	Elektrode Pemfokus
6	Isolator
7	Katode

Perbandingan Sumber Elektron (PSTA & NEC)



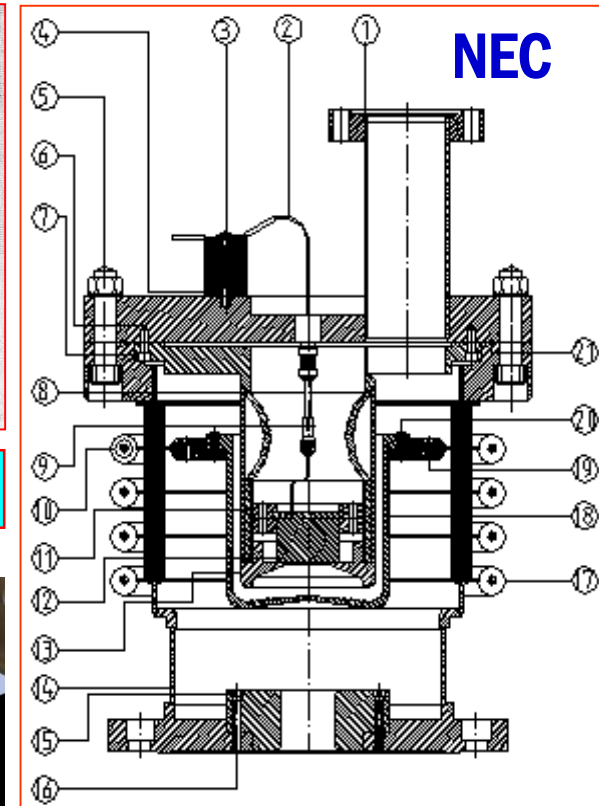
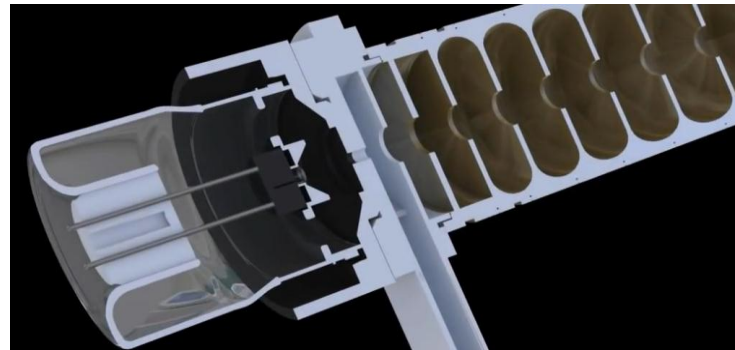
Sumber elektron MBE PSTA



Sumber elektron Linac Varian

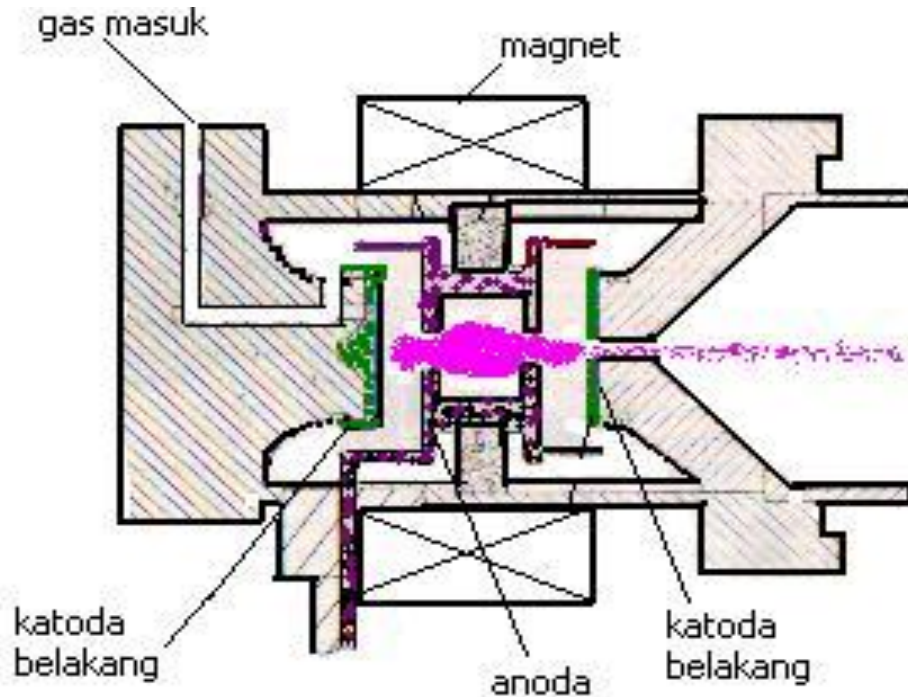


Sumber elektron Linac Electa



Sumber elektron buatan
NEC

SUMBER ION



Prinsip kerja

- Gas dimasukkan ke ruang ionisasi & diionisasi
- Ion-ion yang terbentuk di ekstraksi dan dibentuk menjadi berkas ion oleh katode dan anode
- Berkas ion selanjutnya dimasukkan ke sistem pemercepat
- Di dalam sistem pemercepat, berkas ion dipercepat (diberi tambahan energi) hingga mencapai kebutuhan energi untuk iradiasi

Skema sumber ion jenis Penning

Dibagi menjadi 2 bagian pokok yaitu:

- **Bagian penghasil ion atau ionisator**
- **Bagian pembentuk berkas ion**

Pembentukan ion positif

- **Tergantung pada jenis bahan yang diionisasi sehingga menentukan proses ionisasi dan jenis sumber ionnya**

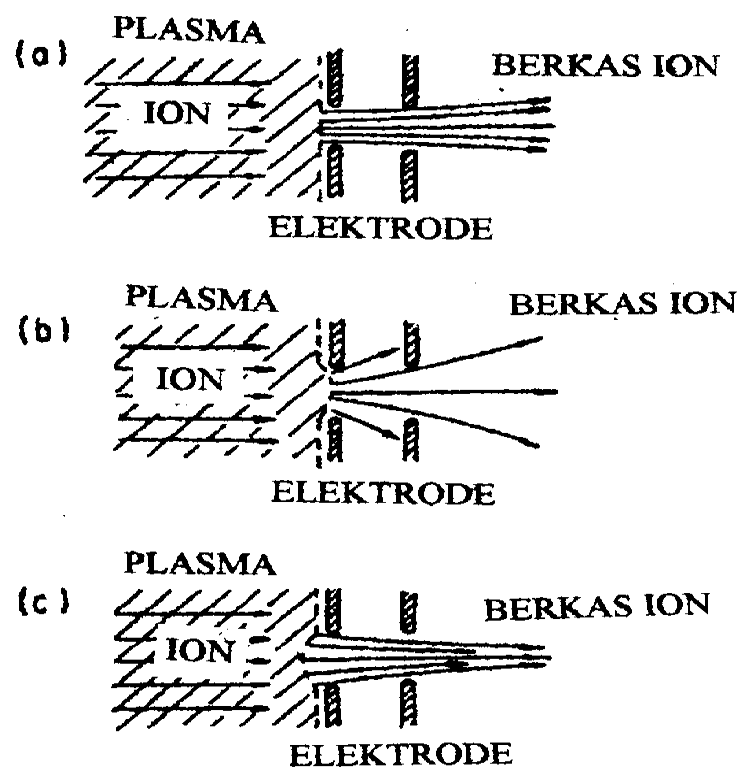
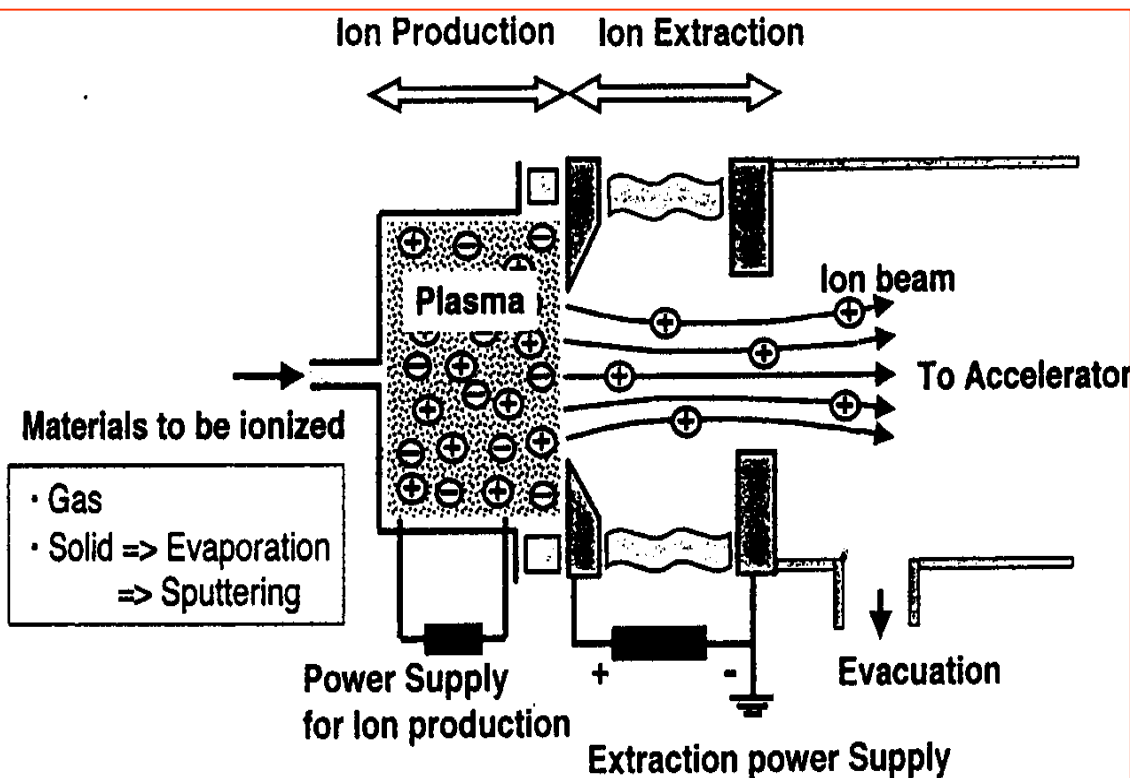
Proses ionisasi

- **Proses tumbukan elektron dengan atom/molekul,**
- **Proses tumbukan atom dengan atom/molekul,**
- **Proses ionisasi permukaan,**
- **Proses serapan foton,**
- **Interaksi dengan laser,**
- **Proses ionisasi karena lucutan gas dan**
- **Proses sputtering**

Yang dibahas hanya proses tumbukan elektron dengan atom/molekul

Sumber ion dibagi menjadi 2 bagian utama yaitu:

- Bagian penghasil ion atau ionisator
- Bagian pembentuk berkas ion



Ekstraksi berkas ion dari ruang ionisasi

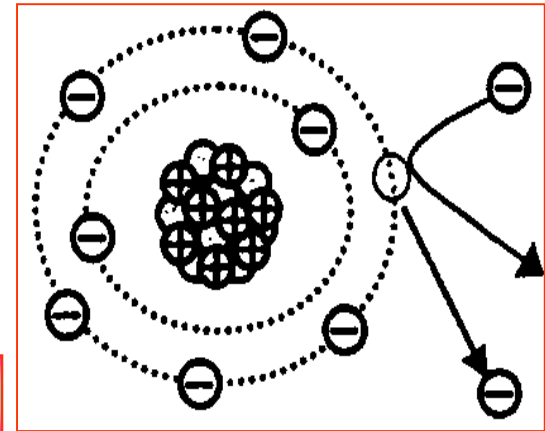
Bentuk-bentuk berkas ion

Proses ionisasi tumbukan elektron dengan atom/molekul

Tumbukan tak elastik antara elektron bebas dengan atom/molekul netral sehingga mengakibatkan elektron terlepas dari ikatannya dan terbentuk ion positif.



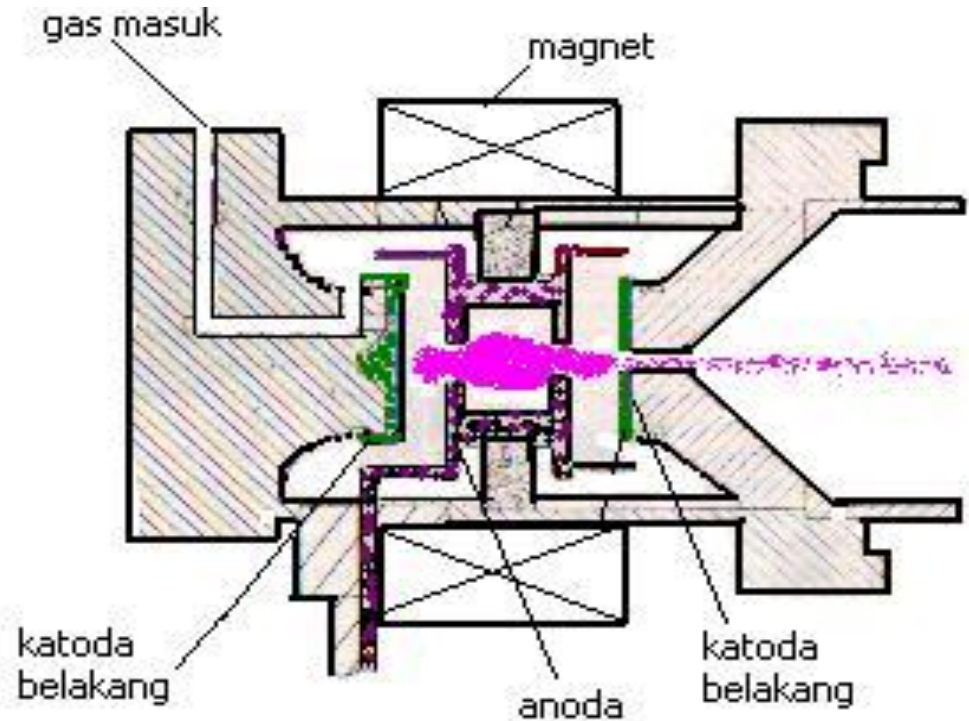
bila $E_e > E_i$



bila $E_e < E_i$ (keadaan tereksitasi)

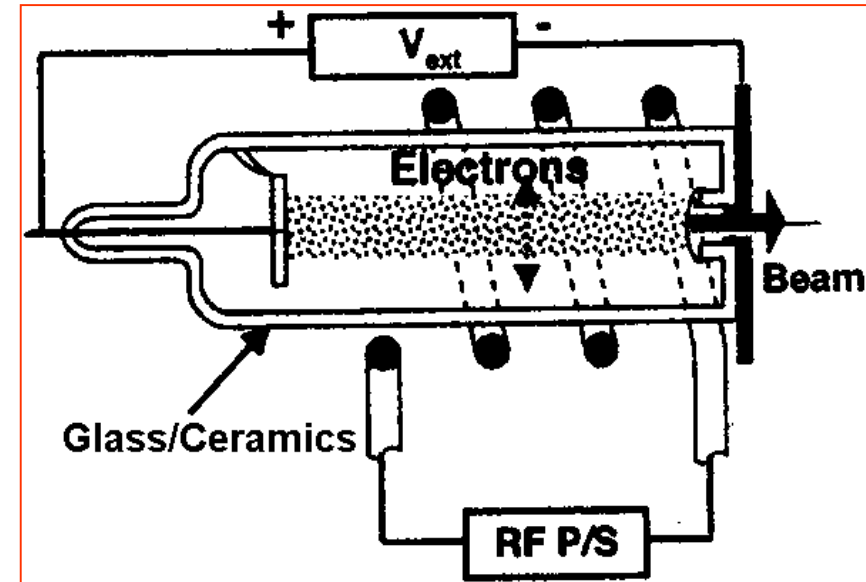
Sumber ion tipe penning

- Prinsip kerja ini didasarkan pd efek cermin magnetik, elektron-elektron bebas dipercepat ke arah anoda.
- Gerakan radial elektron ke arah permukaan dinding sumber ion dibatasi oleh medan magnet aksial shg menyebabkan lintasan elektron diperpanjang dgn gerakan-gerakan spiral.
- Gerakan ini akan mengionisasi atom-atom gas dan ion-ion ditarik keluar dengan tegangan puller.



Sumber ion tipe Radio Frekuensi (RF)

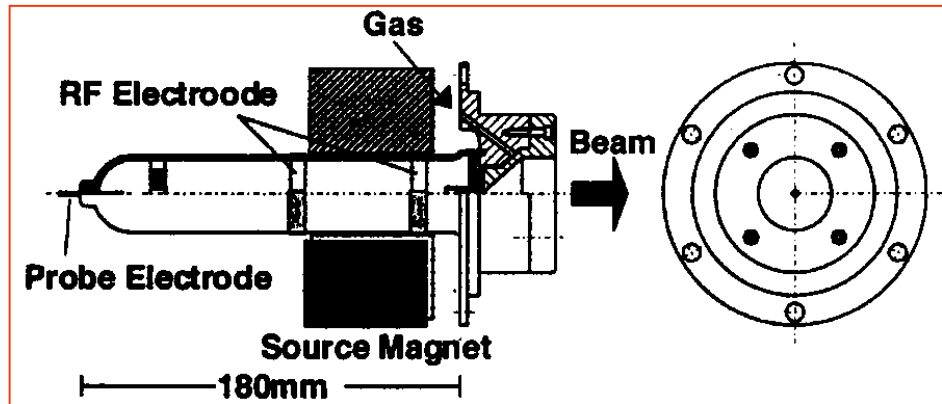
- Prinsip kerja ini didasarkan pd efek gelombang radio frekuensi/RF (tegangan AC dengan amplitudo sinusoidal), elektron-elektron bebas diberikan energi oleh gelombang RF hingga terjadi pergerakan sesuai medan listrik akibat gelombang RF tersebut.
- Gerakan elektron bebas akibat medan listrik dari gelombang RF menumbuk atom-atom yang diionisasi sehingga atom-atom tersebut terionisasi dan membentuk plasma.
- Ion-ion yang terbentuk akibat proses ionisasi diekstraksi/ditarik keluar dengan tegangan ekstraksi dan dibentuk menjadi berkas ion.
- Berkas ion yg terbentuk dimasukkan ke sistem pemercepat utk dipercepat (diberi tambahan energi) hingga mempunyai energi tertentu untuk proses iradiasi.



$f = 100 \text{ MHz s/d. } 150 \text{ MHz}$, $P = 10 \text{ watt s/d. } 1.000 \text{ watt}$, kerapatan plasma antara $(10^8 \text{ s/d. } 10^{11}) \text{ cm}^{-3}$ dan berkas ion mencapai puluhan mA

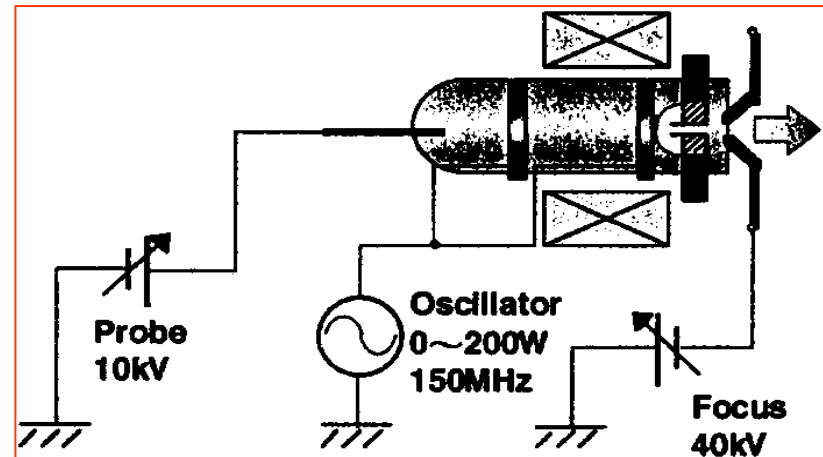
Sumber ion RF juga dapat dilengkapi elektromagnet untuk meningkatkan proses ionisasi dan pemfokuskan/mengungkung plasma (pasangan ion-elektron pada kuasi netral) yang terbentuk

Konstruksi sumber ion radio frekuensi (RF) lengkap dengan bagian-bagiannya



Rangkaian catu daya

- Catu daya pendorong (10 kV)
- Catu daya pemfokus dan ekstraksi (40 kV)
- Catu daya gelombang radio frekuensi (0-200 watt/150MHz)



Bagian-bagian Iradiator (Akselerator)

- Sumber partikel bermuatan (sumber ion/elektron)
- **Sistem pemercepat (tabung & tegangan pemercepat)**
→ dibahas di tayangan 2
- Sistem optik (pemfokus, pengarah, pemayar & *window*, serta pembelok)
- Sistem vakum (pompa vakum, komponen vakum, alat ukur kevakuman)

Sistem pemercepat terdiri dari 2 bagian pokok yaitu: (1) tabung pemercepat dan (2) tegangan pemercepat

- 1. Tabung pemercepat: Peralatan untuk memberikan tambahan energi (mempercepat) pada partikel bermuatan (elektron atau ion).**
- 2. Tegangan pemercepat: Sumber energi untuk memberikan tambahan energi (mempercepat) pada partikel bermuatan (elektron atau ion).**
- 3. Tegangan pemercepat: berupa tegangan tinggi DC untuk akselerator elektrostatik atau AC (radio frekuensi/gelombang sinusoidal) untuk akselerator *cyclic*.**

Akselerator (didasarkan sistem pemercepat)

Akselerator Elektrostatik (tegangan pemercepatnya adalah tegangan tinggi DC)

Contoh: Akselerator Elektron (Cockroft-Walton, Dynamitron), Implantor Ion (termasuk Akselerator Tandem)

Akselerator *Cyclic* (tegangan pemercepatnya adalah tegangan AC yaitu radio frekuensi (RF) dengan gelombang sinusoidal)

Contoh: Sikloron, Akselerator Linier (*Linear Accelerator*), Rhodotron.

1. Tabung pemercepat elektrostatik

Sumber energi pemercepat yang digunakan adalah tegangan tinggi DC, dan digunakan sebagai tegangan pemercepat misalnya untuk Akselerator Elektron (Cockroft-Walton, Dynamitron), Implantor Ion (termasuk Akselerator Tandem).

2. Tabung pemercepat radio frekuensi (RF)

Sumber energi pemercepat yang digunakan adalah gelombang radio frekuensi (RF), dan digunakan sebagai tegangan pemercepat misalnya untuk Sikloron, Akselerator Linier (*Linear Accelerator*), Rhodotron.

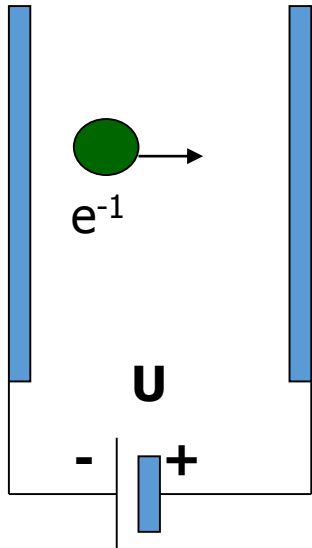
Tabung pemercepat elektrostatis

- Berkas partikel bermuatan yang dipercepat secara kontinu dan menggunakan tegangan tinggi DC
- Kemampuannya berkaitan dengan tegangan dadal isolator yang terjadi di sekitar tabung
- Media isolator di sekitar tabung berupa gas antara lain udara, SF_6 , campuran CO_2 dan N_2 dan lain-lain (lihat hubungan tekanan gas sebagai fungsi tegangan dadal)
- Sesuai untuk energi rendah dan medium
- Efisiensi cukup tinggi.

Definisi 1 eV (elektron volt)



Satuan energi luaran dari akselerator baik elektron maupun ion adalah elektron volt (eV)



Apabila elektron dengan muatan

$e = 1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb (A-s) melewati celah tegangan $U = 1$ volt, maka energinya akan bertambah karena kecepatannya bertambah

$$E_e = e \times U = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$$

$P = U \times I_e \rightarrow U$ teg pemercepat, P daya & I_e arus

Atau

$$P = E_e \times n_e \text{ (per satuan waktu)}$$

$$\text{Sedangkan } n_e = I_e/e$$

Sehingga

$$P = E_e \times I_e/e$$

$$= e \times U \times I_e/e$$

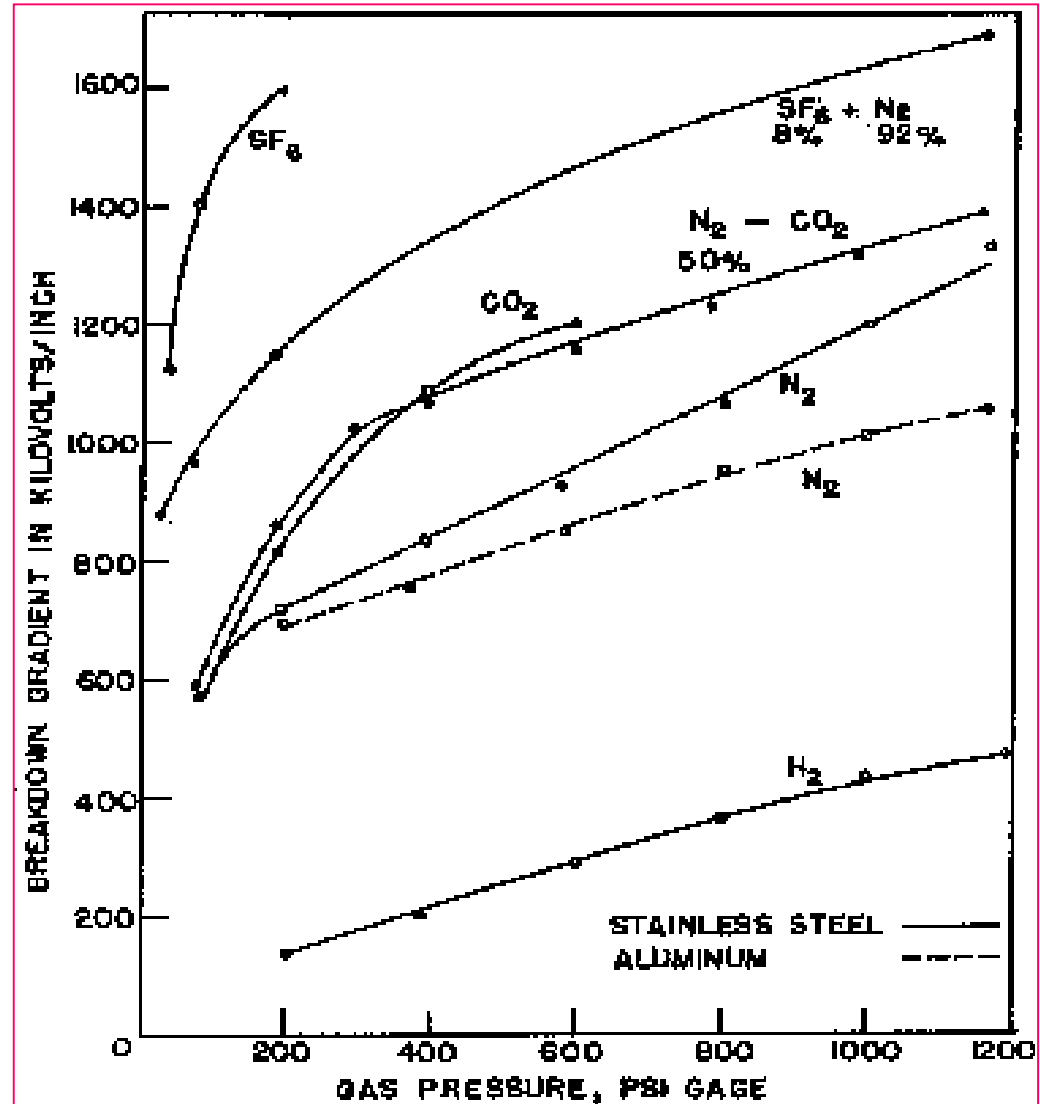
$$P = U \times I_e$$

Media isolator tegangan tinggi



Tegangan dadal untuk masing-masing jenis gas berbeda-beda. Berdasarkan hubungan tegangan dadal sebagai fungsi tekanan gas, untuk masing-masing gas yang banyak digunakan sebagai isolator tegangan tinggi, gas sulfurheksaborid (SF_6) mempunyai tegangan dadal yang paling tinggi pada tekanan yang relatif rendah.

Hubungan tegangan dadal sebagai fungsi tekanan

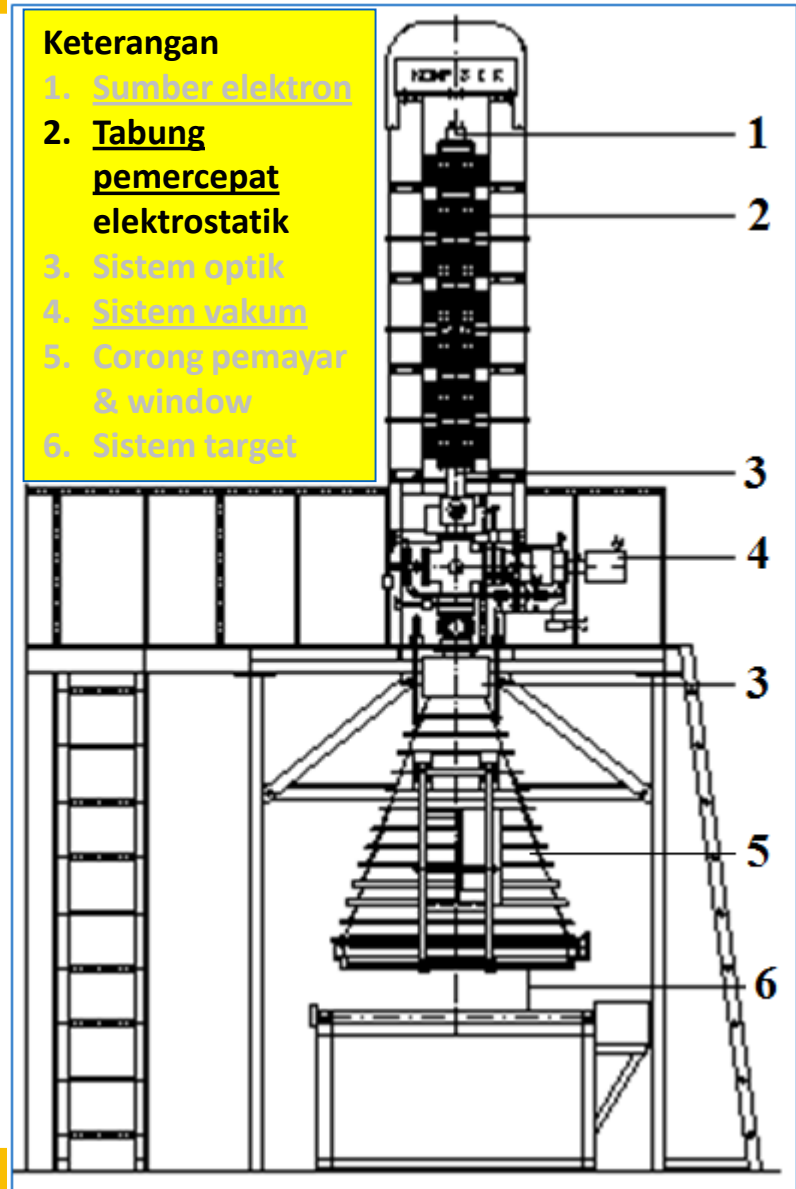


Bagian-bagian Utama

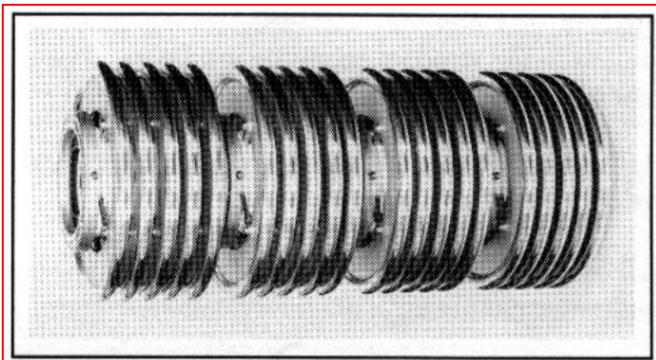
1. Sumber partikel bermuatan (ion/elektron)
2. Tabung pemercepat elektrostatik
3. Sistem optik
4. Sistem Vakum
5. Corong pemayar & *window*
6. Sistem iradiator (target)

Keterangan

1. Sumber elektron
2. Tabung pemercepat elektrostatik
3. Sistem optik
4. Sistem vakum
5. Corong pemayar & window
6. Sistem target

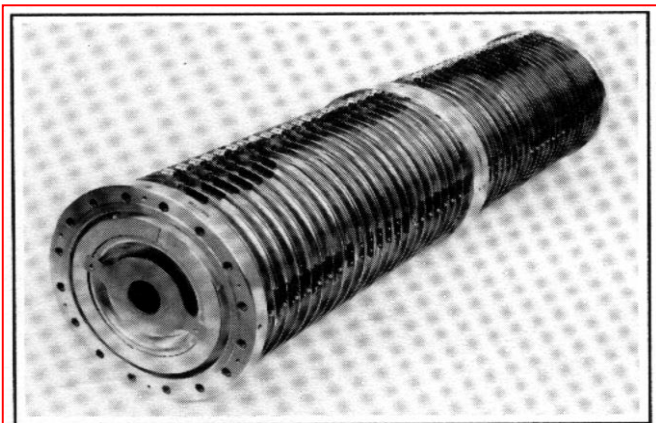


Tabung Pemercepat Elektrostatik



a. tipe *general purpose*

(4 pcs disusun menjadi 1 kesatuan)



b. tipe *high gradient*

(2 pcs disusun menjadi 1 kesatuan)

Berfungsi untuk pemercepat elektron (akselerator elektron) maupun ion (akselerator ion)

Spesifikasi

- Pemercepatan 75 kV/pcs di lingkungan udara terbuka
- Pemercepatan 200 kV/pcs dilingkungan SF₆ pada tekanan 2 atm

Biasanya untuk pemercepat ion (akselerator ion yaitu akselerator tandem)

Spesifikasi

- Pemercepatan 335 kV/pcs dilingkungan SF₆ pada tekanan 80 psi (5,44 atm atau 5,52 bar)

Tabung Pemercepat Radio Frekuensi (RF)



Bending magnet

Target

Accelerator Wave guide

Electron gun

Carrousel with flattening filters and foils

Transmission Ion Chambers

MLC's

Bending magnet: Untuk membelokkan berkas elektron setelah dipercepat & sekaligus memfilter energi sehingga berkas elektron yang dihasilkan mempunyai energi yang seragam

Target: Untuk mengubah berkas elektron menjadi sinar-X

Accelerator wave guide: Untuk mempercepat berkas elektron dari sumber elektron hingga mencapai energi tertentu yang dimanfaatkan untuk iradiasi (tegangan pemercepat yang digunakan gelombang radio frekuensi/RF)

Electron gun: Untuk menghasilkan elektron (berkas elektron) dan diinjeksikan ke sistem pemercepat untuk dipercepat hingga mempunyai energi yang sesuai untuk iradiasi.

Flattering filter: Untuk menyebarkan dan meratakan berkas elektron agar *beam spot* sesuai dengan ukuran target yang diiradiasi

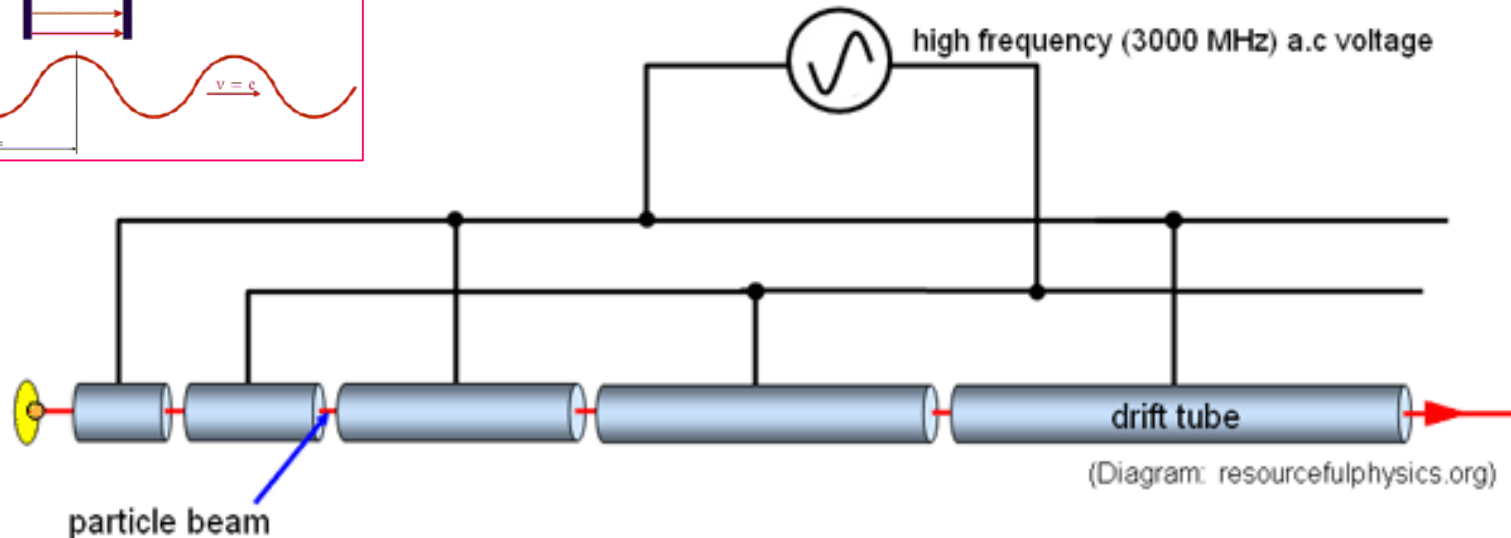
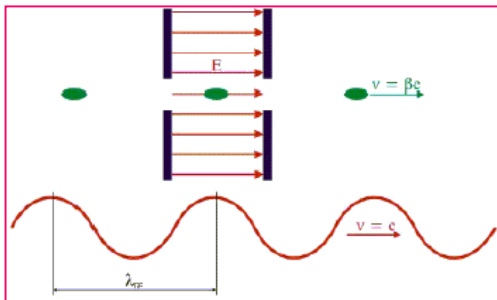
Ions chamber: Untuk mengukur dosis sinar-X

MLC's (Multi Leaf Collimators): Untuk membentuk profil berkas elektron agar sesuai dengan target yang diiradiasi (digunakan pada **linear accelerator** untuk kemo terapi/terapi kanker)

BAGIAN-BAGIAN LINEAR ACCELERATOR

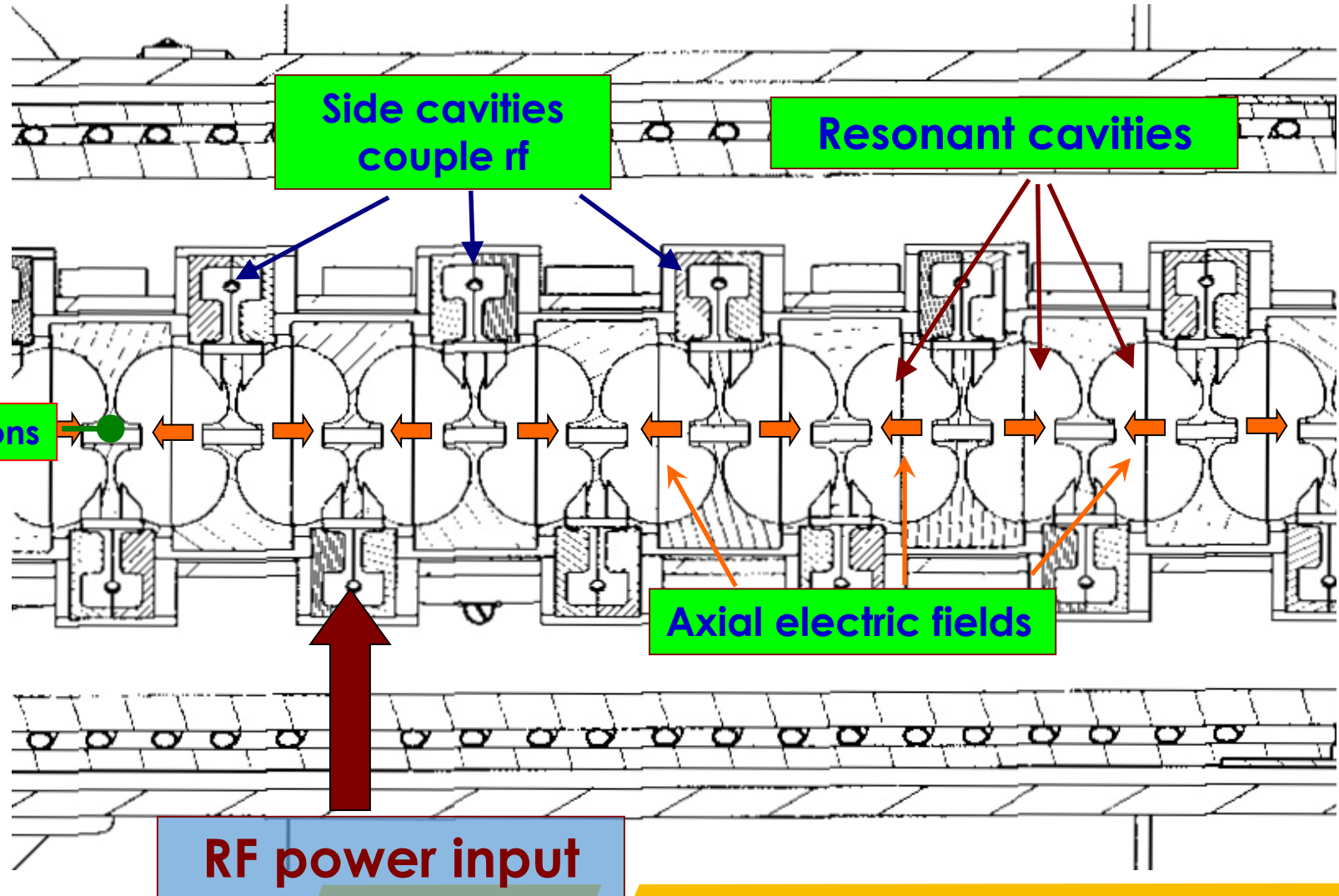
Proses pemercepatan: dilakukan secara berulang-ulang/bertahap menggunakan tegangan pemercepat gelombang radio frekuensi (sekitar 3 GHz).

Energi yang dihasilkan: energi yang dihasilkan merupakan perkalian amplitudo tegangan pemercepat dikalikan dengan jumlah pemercepatan. Misal 5 kali pemercepatan dengan amplitudo 150 kV maka energi yang diperoleh 750 keV.



Proses Pemercepatan (jenis Wideroe)

Accelerator: Side-Coupled Standing-Wave



Pemercepat Pemandu Gelombang (Accelerating Wave Guide)



Tempat penyambungan Sumber RF at 3 GHz

Pemasangan sumber elektron

Bake at 450°C
Operate at $\sim 10^{-8}$ Torr

1.5 m

Tempat penyambungan Sumber RF at 3 GHz: Untuk menghubungkan catu daya RF dengan frekuensi sekitar 3 GHz dari Klystron/ Magnetron sebagai catu daya pemercepat ke *accelerating wave guide*.
Bake at 450°C : Untuk memperbersihkan permukaan komponen yang divakumkan, saat beroperasi divakumkan hingga $\sim 10^{-8}$ Torr, pompa vakum yang digunakan jenis pompa ion.

Pemasangan sumber elektron : Sumber elektron dipasang pada ujung *accelerating wave guide*, elektron yang diemisikan oleh katode sumber elektron langsung diekstraksi dan dibentuk menjadi berkas elektron untuk dimasukkan ke *accelerating wave guide*. Selanjutnya, dipercepat di dalam *accelerating wave guide* menggunakan sumber tegangan gelombang RF.

Varian core technology



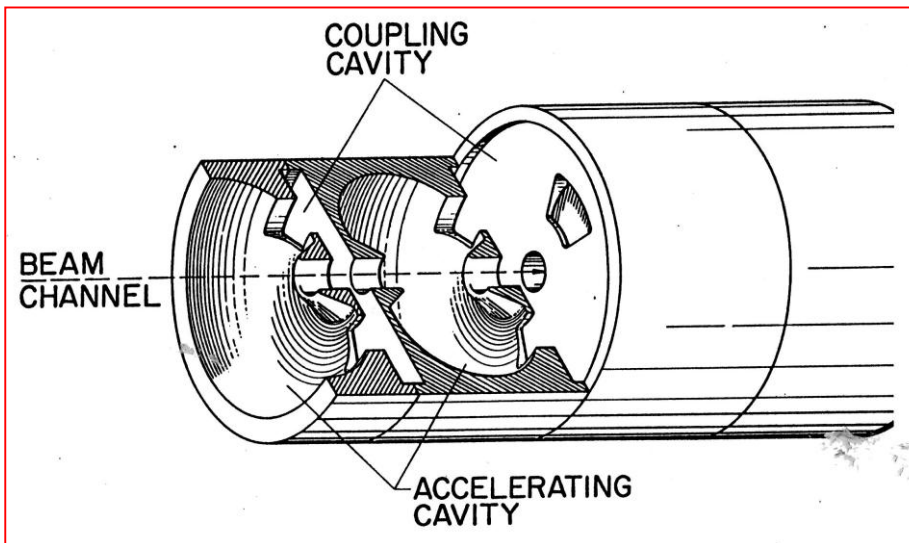
Bahan: Tembaga murni (oxygen-free high thermal conductivity (OFHC).

Konstruksi:

- Pengerjaan harus teliti dan halus terutama di bagian dalam.
- Konstruksi komponen-komponen menjadi satu kesatuan dilakukan dengan brazing

Pemanas bersihan (*Bake*):

Dilakukan diruang vakum sekitar 10^{-5} - 10^{-6} Torr pada suhu **450°C**, untuk memperbersihkan permukaan terutama pada permukaan yang berhubungan dengan kevakuman.



Komponen Pemercepat Pemandu Gelombang

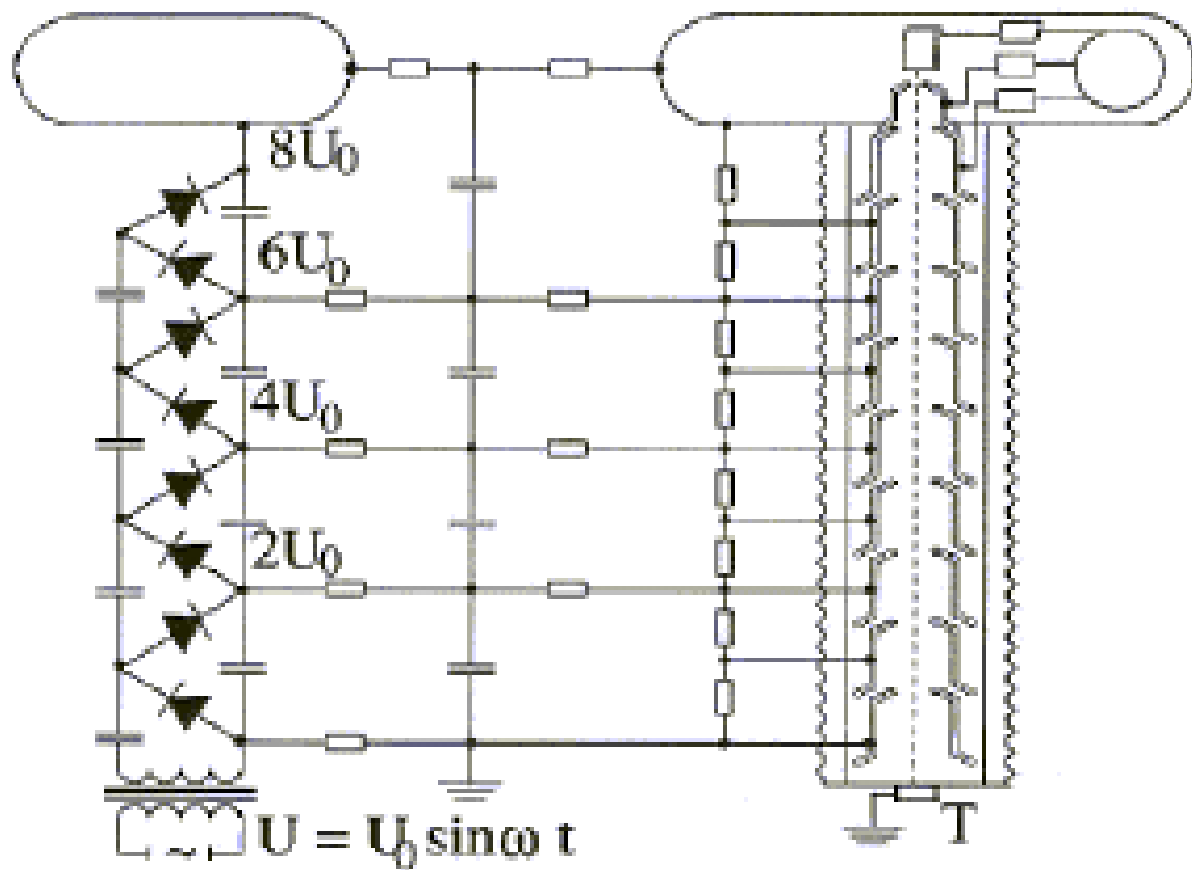
Sumber Tegangan Tinggi



Beberapa jenis sumber tegangan tinggi

- Transformator
 - Transformator bertingkat (*cascade transformer*)
 - Transformator inti ditanahkan (*grounded core type*)
 - Transformator inti terisolasi (*insulated core type*)
 - Transformator resonansi
 - Generator Van de Graaff
 - **Generator Cockroft-Walton**
 - Generator Deltatron
 - **Generator Dynamitron**
 - Generator Felici
- (yang dibahas hanya Generator Cockroft-Walton & Dynamitron)

Generator Cockroft-Walton



Konstruksi:

- Terdiri dari beberapa tingkat, setiap tingkat terdiri dari 2 kapasitor dan 2 diode

- Tegangan luaran (V_c)

$$V_c = 2nV_o - \frac{I}{2fC}(8n^3 + 9n^2 + n)$$

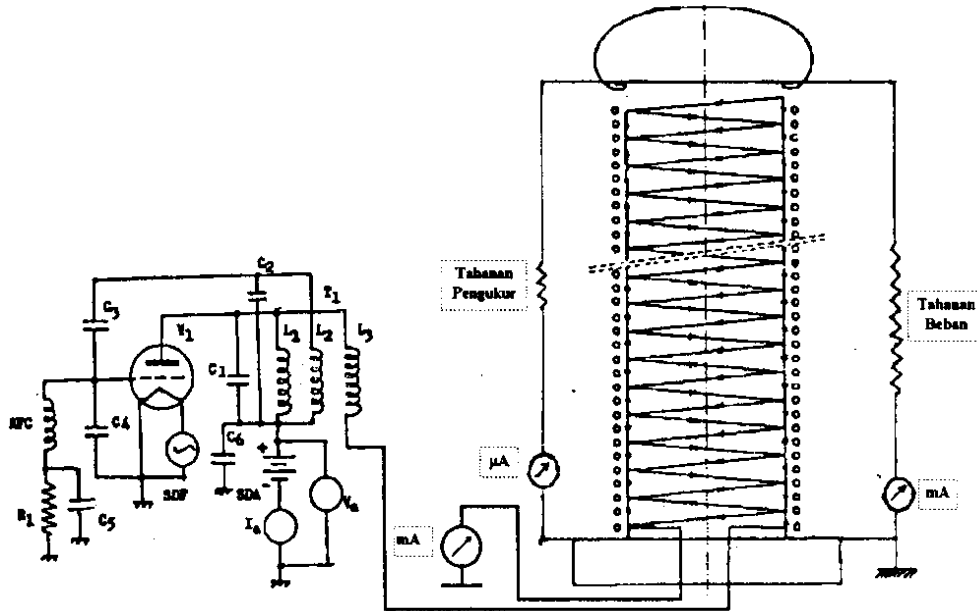
- Tegangan riak

$$\Delta V_c = \frac{I}{2fC}n(n + 1)$$

dengan V_c adalah tegangan luaran (V), n jumlah tingkat, V_o tegangan masukan (V), I arus beban (A), f frekuensi (Hz) dan C kapasitansi kapasitor (farad).

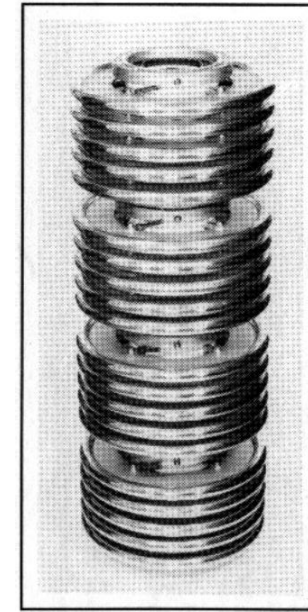
Skema pelipat tegangan generator Cockroft-Walton
(Pembahasan lebih lengkap di Teknologi Mesin Berkas Elektron)

Generator Cockroft-Walton di PSTA



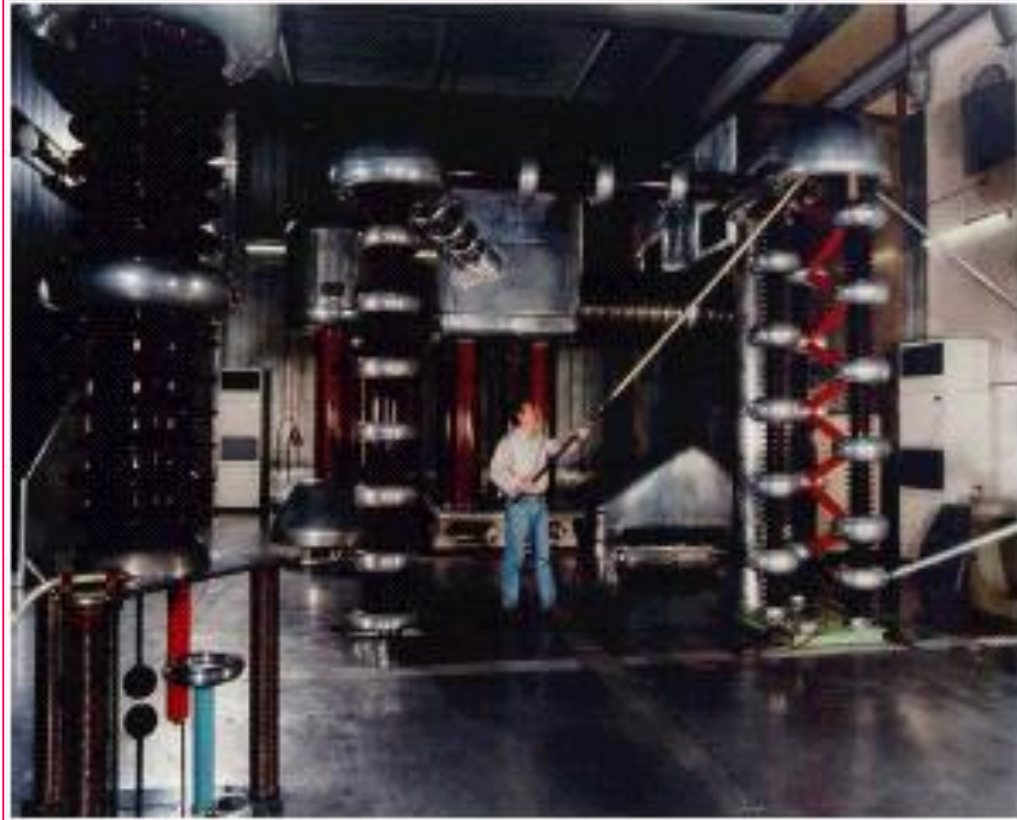
Osilator Daya
(Sumber Daya Penyangga)

Pelipat Tegangan



Tabung Pemercepat (DC)

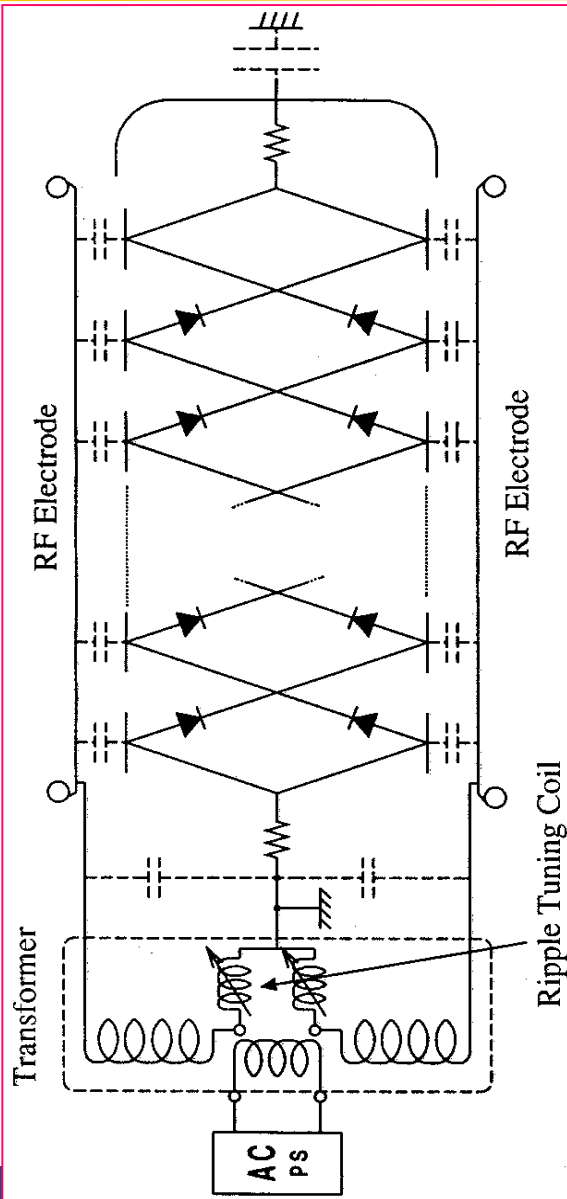
- Osilator Daya; untuk mengubah tegangan DC ke tegangan AC dalam bentuk tegangan sinusoidal dengan amplitudo V_0 dan frekuensi f sebagai tegangan masukan pelipat tegangan,
- Pelipat Tegangan; untuk menggandakan/melipatkan dan mengubah tegangan AC (sinusoidal) menjadi tegangan DC. Besar tegangan yang dihasilkan dipengaruhi oleh amplitudo tegangan (V_0), jumlah tingkat (n), frekuensi (f), arus beban (I) dan nilai kapasitansi kapasitor (C).
- Luaran tegangan DC yang dihasilkan dihubungkan ke tabung akselerator untuk mempercepat partikel bermuatan (elektron atau ion) di dalam tabung akselerator. Dengan demikian, partikel bermuatan tersebut mempunyai tambahan energi tertentu yang dapat digunakan untuk iradiasi.



- Perhatikan gambar tsb., hal ini penting sekali dilakukan terutama saat perawatan yaitu untuk meningkatkan keselamatan.
- Sebelum perawatan harus dilakukan pelucutan muatan yang tersimpan pada kapasitor sehingga tegangan sisa (muatan) yang tersimpan pada kapasitor sudah hilang.
- Tongkat yang digunakan terbuat dari bahan isolator yang diberi elektrode dan disambung dengan resistor yang ditanahkan.
- Saat elektrode tongkat menyentuh elektrode tegangan tinggi maka terjadi aliran arus melalui resistor sehingga terjadi proses pembebasan tegangan sisa (pelucutan muatan).

Instalasi generator Cockroft-Walton (Pembahasan lebih lengkap di Teknologi Mesin Berkas Elektron)

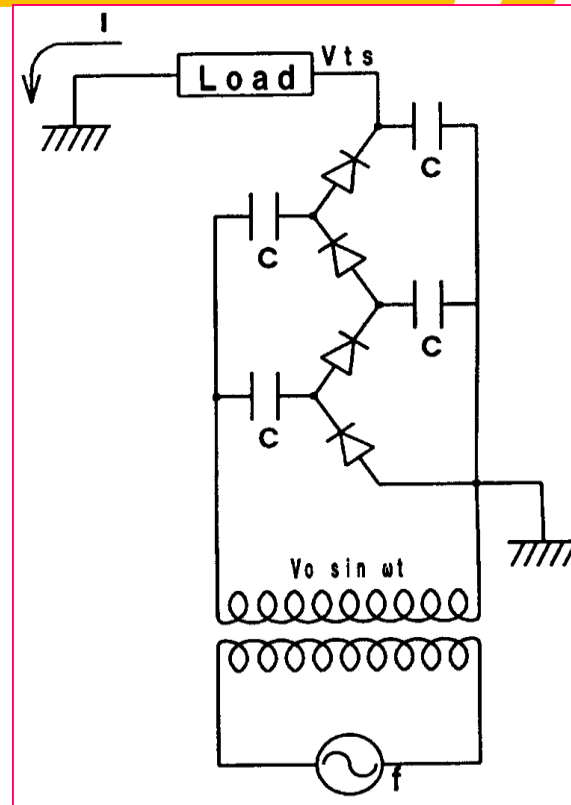
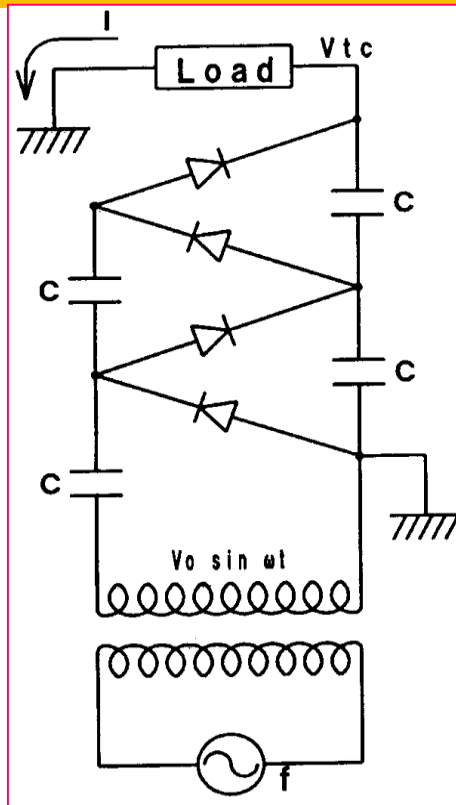
Generator Dynamitron



- Hampir sama dengan generator Cockroft-Walton
- Generator Cockroft-Walton
Rangkaian pengganda tegangan dengan umpan secara seri
- Generator Dynamitron
Rangkaian pengganda tegangan dengan umpan secara paralel
- Tegangan luaran DC s/d. 4.500 kV dan arus beban s/d. 100 mA serta efisiensi dapat mencapai 60 %
- Besar tegangan luaran

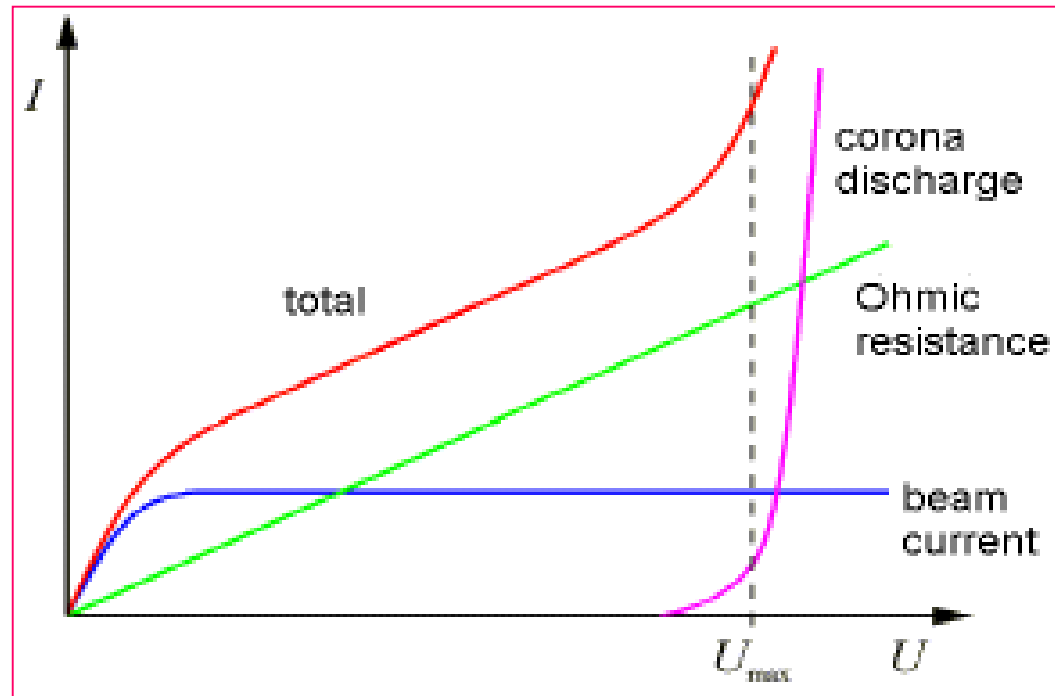
$$V_s = 2nV_o - \frac{I}{2fC} (4n - 1) \quad \text{dan} \quad \Delta V_s = \frac{I}{fC}$$

Perbandingan generator Cockcroft-Walton dan Dynamitron



No.	Besaran	Cokcroft-Walton	Dynamitron
1	Tegangan keluaran	$V_c = 2nV_o - \frac{I}{2fC} (8n^3 + 9n^2 + n)$	$V_s = 2nV_o - \frac{I}{2fC} (4n - 1)$
2	Tegangan riak	$\Delta V_c = \frac{I}{2fC} n(n + 1)$	$\Delta V_s = \frac{I}{fC}$

Beban Sumber Tegangan Pemercepat



- I_{vd} (*voltage divider*) atau *ohmic resistance current*
- I_b (*beam current*) atau arus berkas partikel
- $I_{leakage}$ (*corona/discharge*) atau arus bocor yang memercik

$$I_{total} = I_b + I_{vd} + I_{leakage}$$

Bagian-bagian Iradiator (Akselerator)

- Sumber partikel bermuatan (sumber ion/elektron)
- Sistem pemercepat (tabung & tegangan pemercepat)
- **Sistem optik (pemfokus, pengarah, pemayar & *window*, serta pembelok) → dibahas di tayangan 3**
- Sistem vakum (pompa vakum, komponen vakum, alat ukur kevakuman)

Sistem Optik

→ **Pemfokus:** hampir digunakan pada semua akselerator

→ **Pengarah:** digunakan untuk penjajaran (*alignment*) sumbu berkas

→ **Pemayar & *window*:** biasanya digunakan pada akselerator elektron

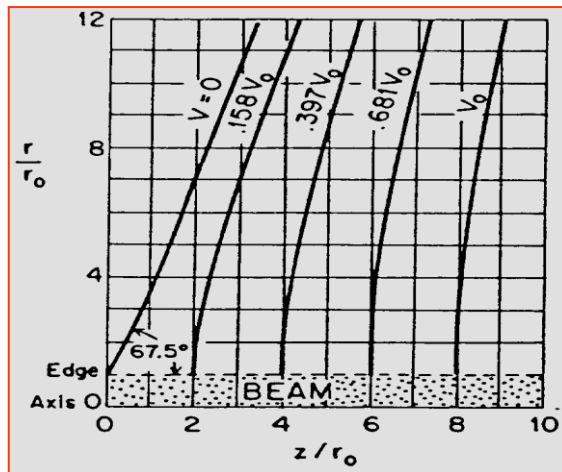
→ **Pembelok:** banyak digunakan pada akselerator elektron maupun akselerator ion

Sistem pemfokus

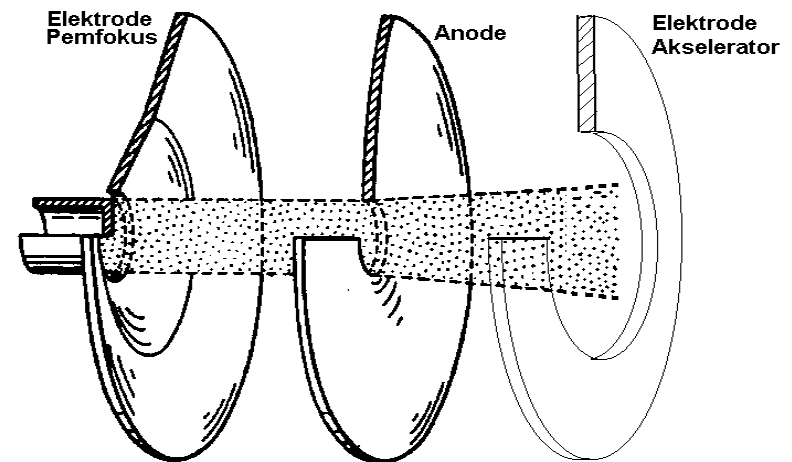
- **Sistem Pemokus ada 2 (dua) jenis:**

- (1). Sistem pemfokus elektrostatis yaitu pemfokusan menggunakan medan listrik,
- (2). Sistem pemfokus elektromagnetis yaitu pemfokusan menggunakan medan magnet.

1. Sistem pemfokus elektrostatis sebagai contoh penerapannya utk pembentukan berkas elektron dari sumber elektron yaitu utk mengekstraksi & memfokuskan berkas elektron dari sumber elektron & dimasukkan ke tabung akselerator utk dipercepat. Efek pemfokusan sangat tergantung dgn sudut elektrode pemfokus & tegangan yg terpasang



a. Bidang equipotensial

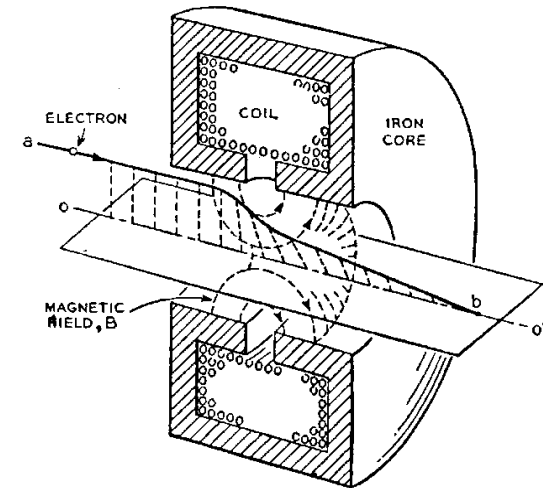


b. Berkas elektron

Contoh: Sistem pemfokus menggunakan lensa elektrostatis

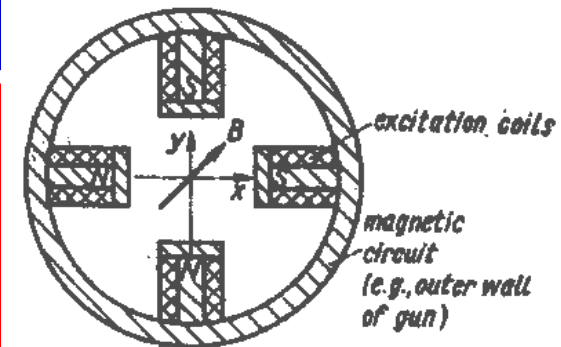
Sistem pemfokus

2. Sistem pemfokus elektromagnetis sebagai contoh penerapannya untuk memfokuskan berkas partikel (elektron atau ion) di dalam tabung hanyut (*drift tube*), biasanya berkas partikel tersebut setelah dipercepat. Efek pemfokusan sangat tergantung dengan kuat medan magnet yang terpasang.



Sistem pengarah

Sistem Pengarah: untuk mengarahkan berkas partikel (elektron maupun ion) agar bergerak sepanjang sumbu tabung hanyut (*drift tube*) sesudah mengalami percepatan di dalam tabung pemercepat atau transport berkas di dalam tabung hanyut. Har ini diperlukan agar berkas partikel bermuatan mempunyai lintasan sesuai sumbu tabung hanyut (*drift tube*) sehingga tidak menumbuk dinding tabung hanyut (*drift tube*).

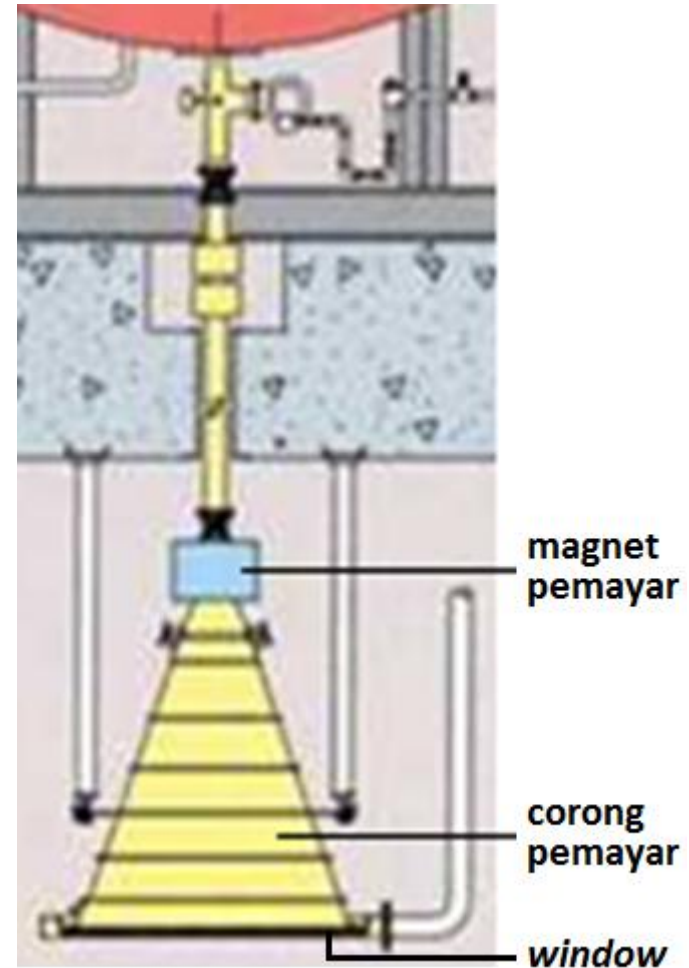


Sistem pemayar dan *window*

Sistem pemayar terdiri dari: **magnet pemayar** dan **corong pemayar**, serta digunakan untuk akselerator elektron (misalnya: Mesin Berkas Elektron, *Linear Accelerator* dan Rhodroton)

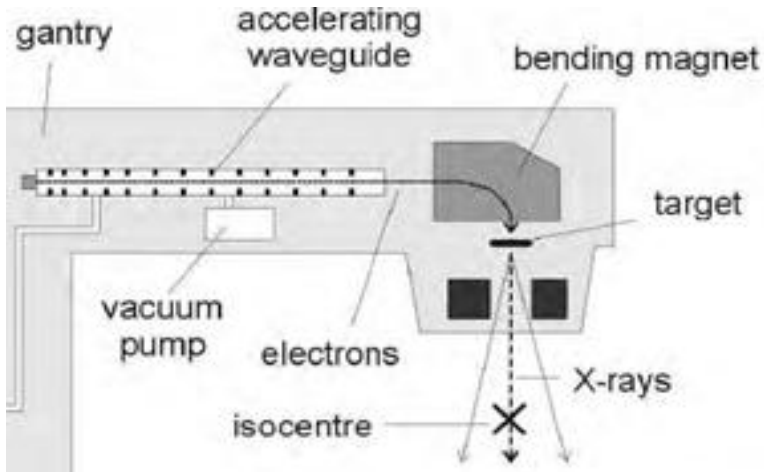
Magnet pemayar: untuk menyimpangkan berkas elektron sedemikian rupa sehingga berkas elektron dapat mengenai seluruh permukaan material yang diiradiasi sesuai ukuran cendela (*window*).

Corong pemayar & window, corong pemayar: berfungsi seperti tabung hanyut (*drift tube*) yaitu ruangan vakum yg dilintasi berkas elektron yang telah dimayarkan (disimpangkan) sedemikian rupa sehingga berkas elektron dpt mengenai seluruh permukaan material yg diiradiasi sesuai ukuran cendela (*window*). Adapun **window** dikonstruksi pd bagian bawah pemayar, biasanya dibuat dari titanium foil & berfungsi utk pembatas tekanan atmosfir & vakum serta sbg tempat utk keluarnya berkas elektron menuju target.

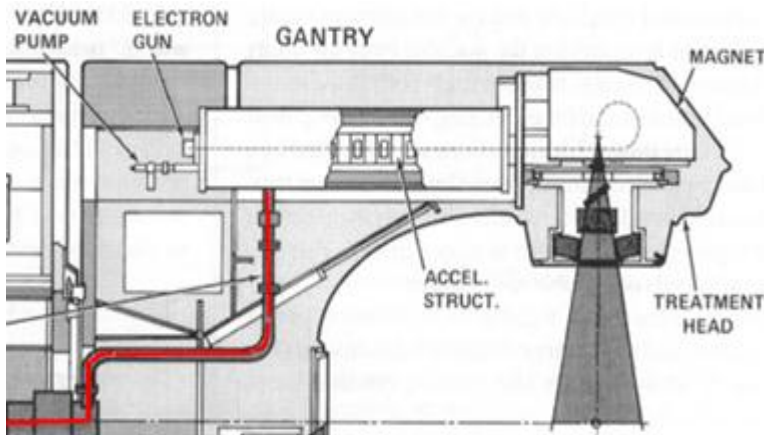


- **Berfungsi sbg analisisor massa ion (akselerator ion)**, yaitu memisahkan ion-ion yg mempunyai massa berbeda sehingga hanya massa ion tunggal (yg diperlukan) yg dapat lolos sampai ke target.
- **Berfungsi sbg analisisor energi (akselerator elektron)**, yaitu memisahkan elektron-elektron yg mempunyai energi berbeda sehingga hanya elektron yg mempunyai energi mendekati sama (yg diperlukan) yg dpt lolos sampai ke target. Elektron-elektron yang mempunyai terlalu tinggi atau terlalu rendah menumbuk dinding tabung hanyut (*drift tube*).
- **Pembelokan ion-ion oleh magnet pembelok tergantung pada:**
 1. **Kuat medan listrik pemercepat** ion-ion pada tabung pemercepat atau tegangan pemercepat: makin besar medan listrik (makin tinggi tegangan pemercepat) berarti makin cepat ion-ion bergerak sehingga makin tinggi energi ion sehingga makin kaku (*rigid*), pada medan magnet yg sama 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.
 4. **Muatan ion:** makin besar muatan ion, makin besar pembelokan.

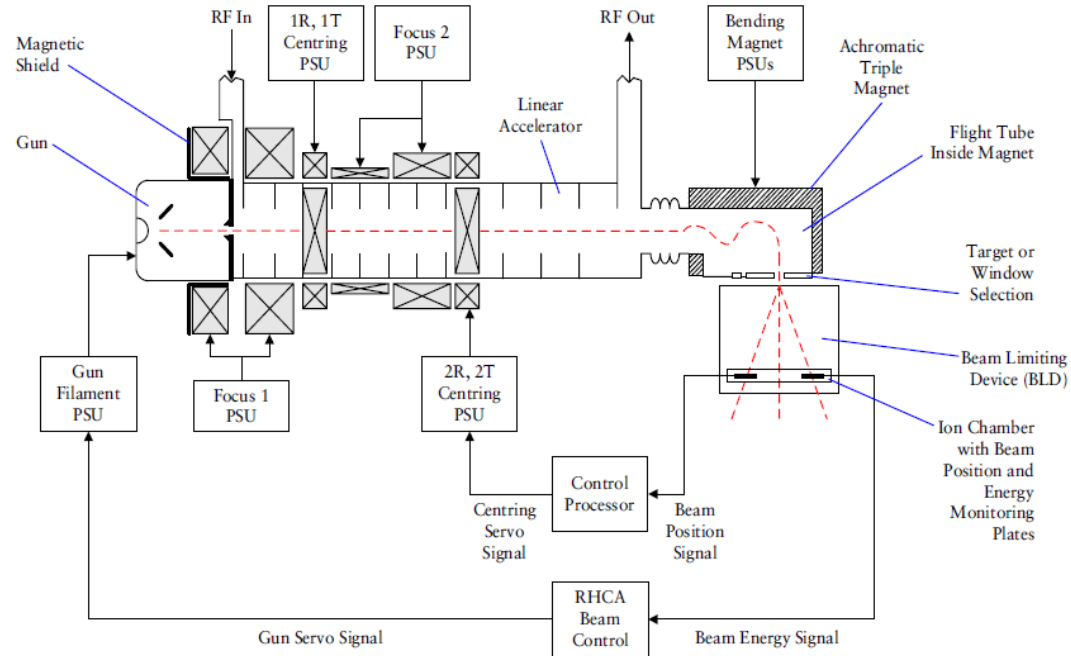
Pembelokan berkas partikel



Pembelokan 90°

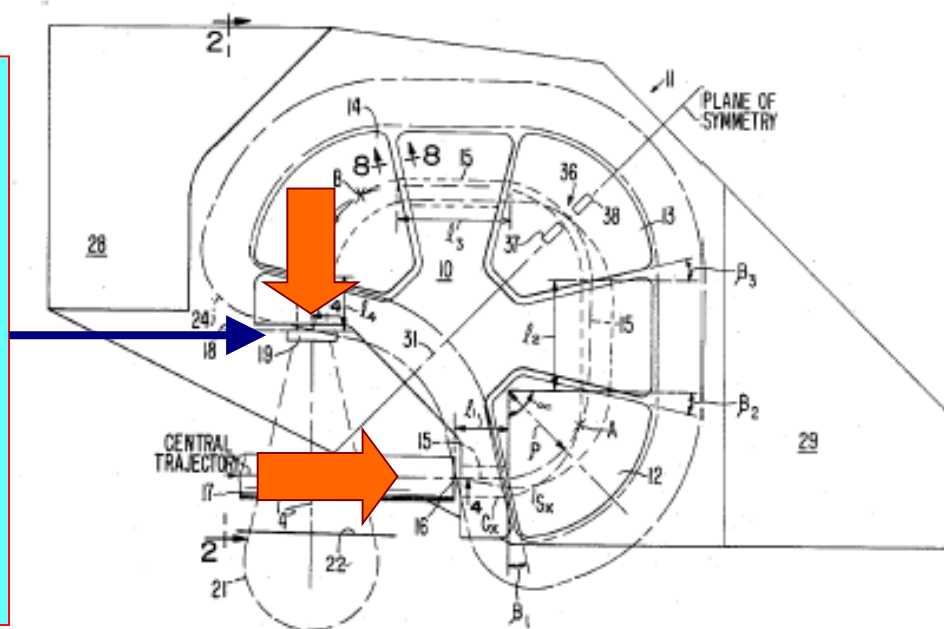


Pembelokan 270°



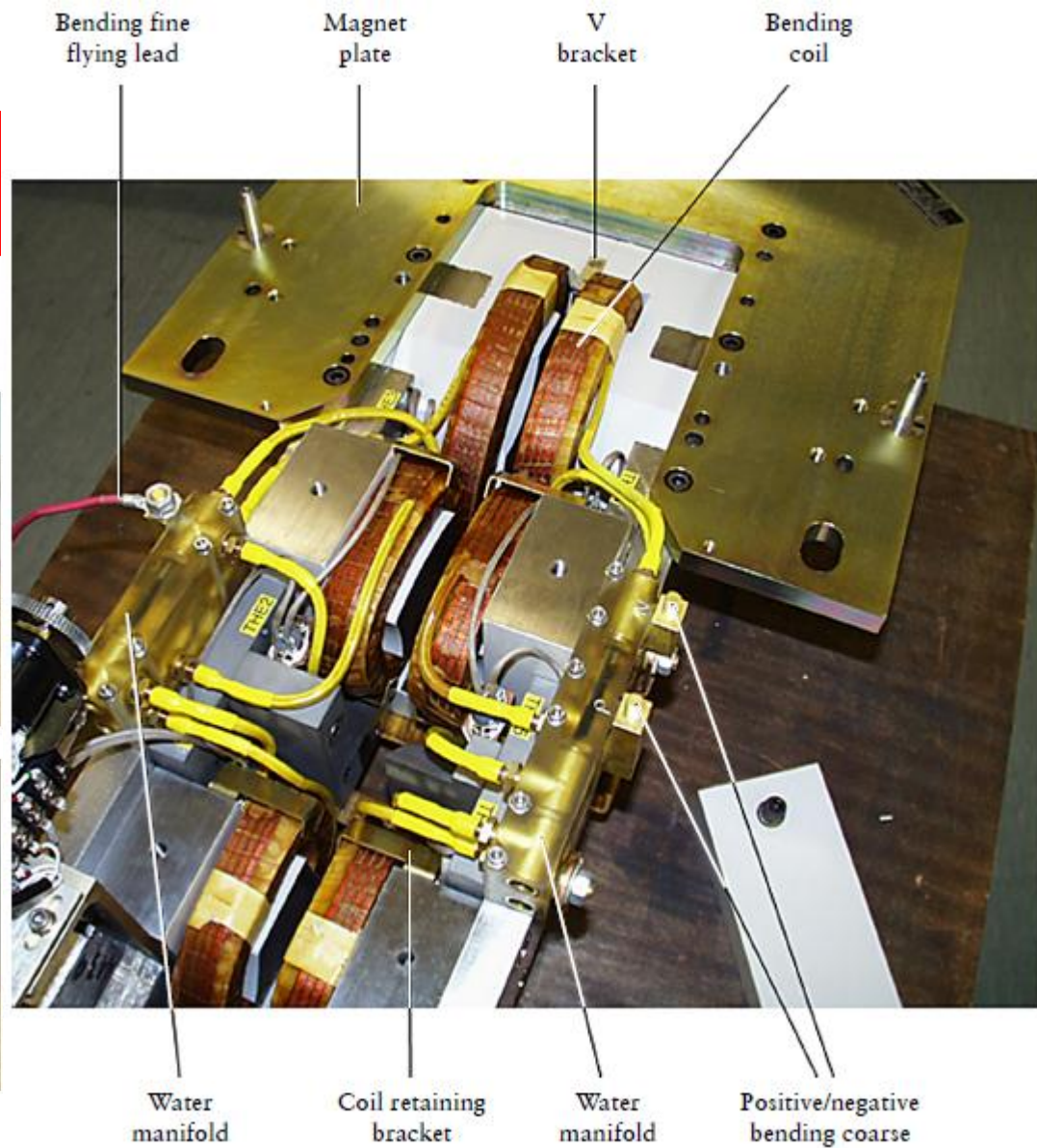
Pembelokan, $45^\circ + 90^\circ + 90^\circ + 225^\circ = 450^\circ$

- Berkas elektron dibelokkan 270° dan langsung ditumbukkan ke target untuk membangkitkan sinar X
- Atau berkas elektron langsung untuk perlakuan (*treatment*) pada pasien (kemo terapi)



Contoh magnet pembelok 270°

Contoh konstruksi magnet pembelok (elektro magnet)



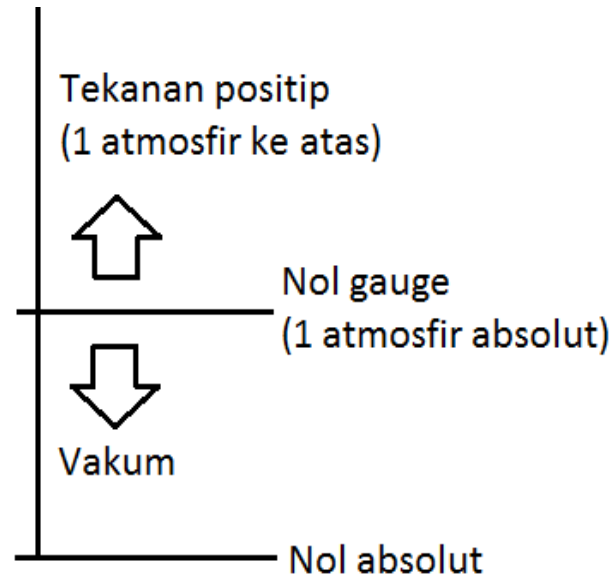
Bagian-bagian Iradiator (Akselerator)

- Sumber partikel bermuatan (sumber ion/elektron)
- Sistem pemercepat (tabung & tegangan pemercepat)
- Sistem optik (pemfokus, pengarah, pemayar & window, serta pembelok)
- Sistem vakum (pompa vakum, komponen vakum, alat ukur kevakuman)

Pengertian Sistem Vakum



- ☀ Hampa (vakum) berasal *vacua* artinya ruangan tidak ada udara (terjemahan apa adanya)
- ☀ Hampa adalah suatu ruangan yang mempunyai kerapatan gas di dalamnya sangat rendah
- ☀ Besaran suatu kehampaan dinyatakan dalam tekanan dengan satuan Torr (mmHg), Pa (N/m²), dan mbar



	Torr	kg/cm ²	Atm	psi	Pascal	mbar
Torr	1	1,36x10 ⁻³	1,315 x10 ⁻³	0,01934	133,33	1,333
kg/cm ²	735	1	0,968	14,22	0,980 x10 ⁻⁵	980
atm	760	1.033	1	14,70	1,013 x10 ⁻⁵	1.013
psi	51,75	0,0703	0,068	1	6895	68,95
Pascal	0,75 x10 ⁻²	1,02 x10 ⁻⁵	0,987 x10 ⁻⁵	0,145 x10 ⁻³	1	10 ⁻²
mbar	0,750	1,02 x10 ⁻³	0,987 x10 ⁻³	0,145 x10 ⁻¹	100	1

Tekanan dalam Torr	Jumlah melekul-molekul per cm ³
760 – 1	$10^{19} - 10^{16}$
1 - 10^{-3}	$10^{16} - 10^{13}$
$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{13} - 10^9$
$10^{-7} - 10^{-11}$	$10^9 - 10^5$

Klasifikasi tingkat kehampaan

Kehampaan rendah

s/d 1 Torr

Kehampaan sedang

< 1 Torr s/d 10^{-3} Torr

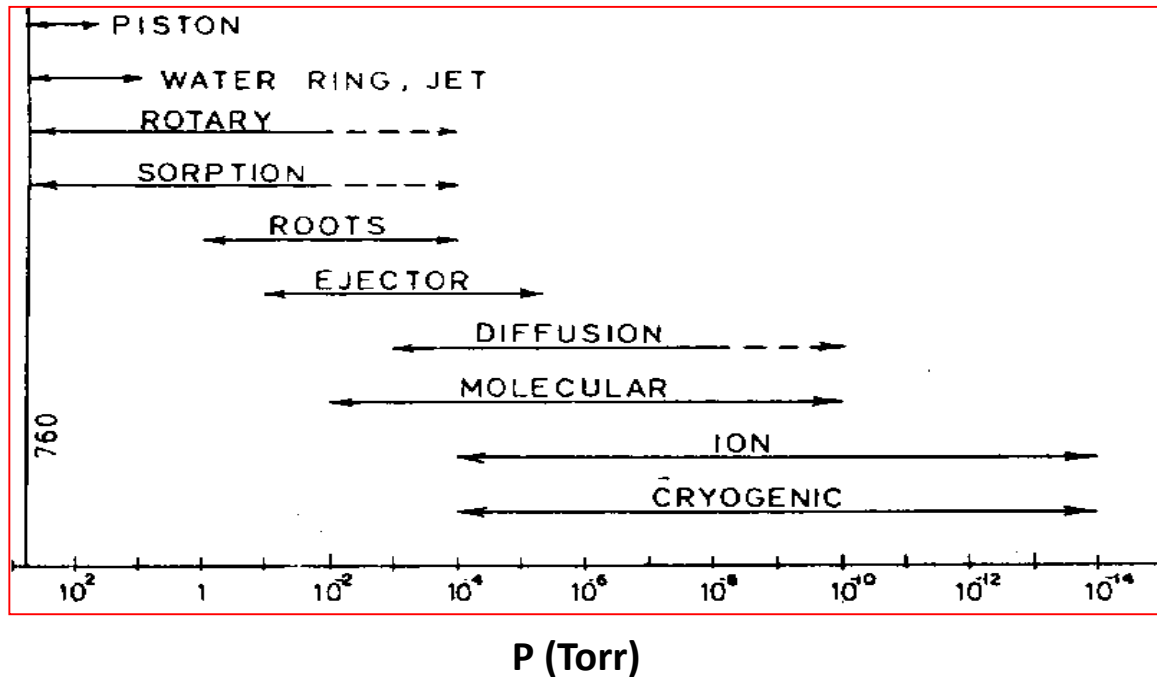
Kehampaan tinggi

< 10^{-3} Torr s/d 10^{-7} Torr

Kehampaan sangat tinggi

< 10^{-7} Torr s/d 10^{-16} Torr

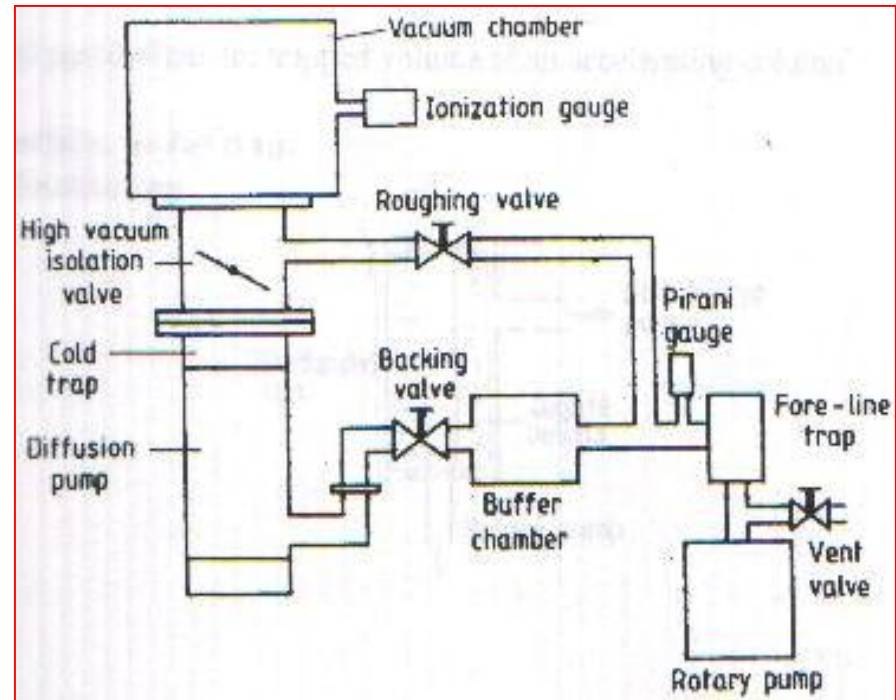
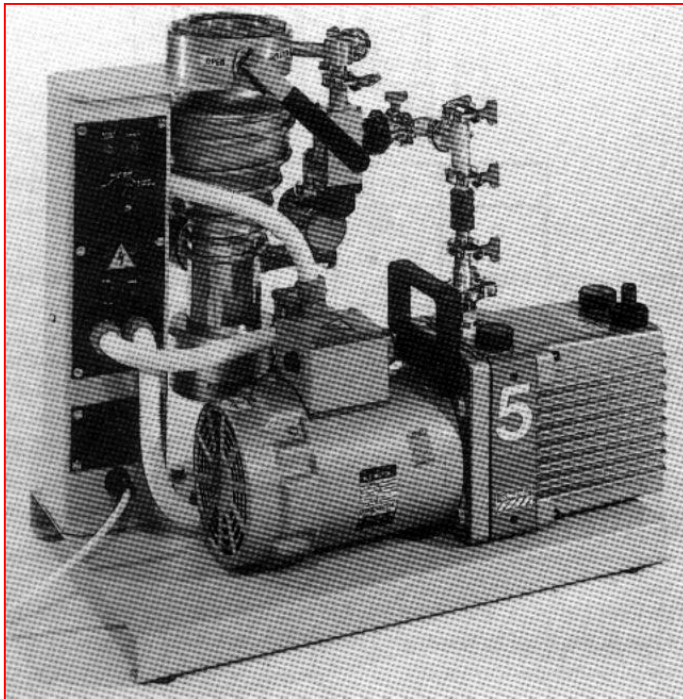
Rentang operasi pompa



Rentang operasi pompa vakum sangat penting untuk dasar menginstal pompa agar dapat dicapai tingkat kevakuman yang diinginkan dan efisien. Beberapa jenis pompa vakum tersebut (gambar diatas), pompa yang paling banyak digunakan untuk akselerator adalah pompa rotari, difusi, turbomolekular, ionik dan kriogenik.

- Instalasi pompa vakum sampai kevakuman orde 10^{-2} mbar cukup menggunakan pompa rotari 2 tingkat.
- Instalasi pompa vakum sampai kevakuman orde $>10^{-4}$ mbar harus menggunakan 2 jenis pompa misalnya pompa rotari 2 tingkat dan pompa difusi atau pompa rotari 2 tingkat dan pompa turbomolekular.
- Tingkat kevakuman yang dapat dicapai untuk pompa difusi sangat dipengaruhi oleh minyak difusi yang digunakan.

Kombinasi antara pompa rotari dan pompa difusi/turbomelekular pada instalasi sistem vakum

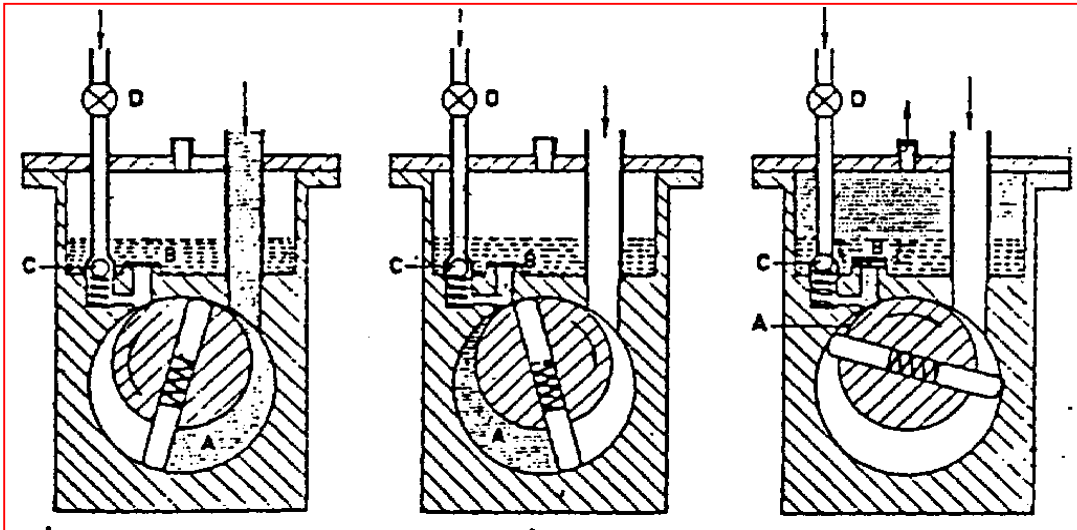


Instalasi tersebut menggunakan pompa rotari dan difusi. Jika pompa difusi diganti dengan pompa turbomelekular maka tinggal mengganti pompa difusi dengan pompa turbomolekular, sedangkan yang lainnya tetap.

Jenis-jenis Pompa Vakum

Jenis-jenis pompa vakum cukup banyak, namun dalam materi ini hanya 3 jenis pompa vakum yang akan dibahas antara lain:

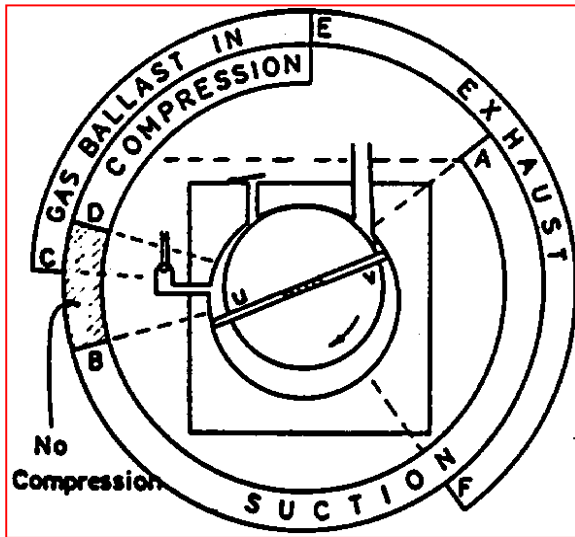
- Pompa mekanik (pompa rotari, pompa turbomolekular)
- Pompa-uap (pompa difusi)
- Pompa ionik (banyak digunakan pada *linear accelerator*)



Pompa ini pada prinsipnya terdiri dari rotor dan stator, pada rotor terdapat 2 (dua) buah sudu putar yg ditengahnya dipasang pegas sehingga saat rotor berputar di dalam stator secara eksentrik sudu putar akan meluncur dan menempel pada dinding stator

Sudu-sudu putar ini dapat bergerak bebas di celah pada rotor dan dengan bantuan minyak pelumas (minyak pelumas berfungsi sebagai pelumas, perapat & pendingin) maka baik antara rotor & sudu putar, sudu putar & stator, maupun rotor & stator akan selalu rapat. Berputarnya rotor menyebabkan ruangan pada sisi masuk diekspansikan sehingga mengisap gas dari sistem yang dihampakan dan ruangan pada sisi keluar dimampatkan sehingga menekan gas yang dipompa ke atmosfir. Dengan demikian dapat memindahkan gas dari sistem yang dihampakan ke udara sekitar (atmosfir).

Prinsip kerja pompa rotari (sudu putar)



Gas ballast: Memasukkan udara atmosfir ke pompa (saat sudu luncur pada posisi didekat *gas ballast in*) sehingga mengurangi kompresi dan kevakuman akhir yang dapat dicapai berkurang.

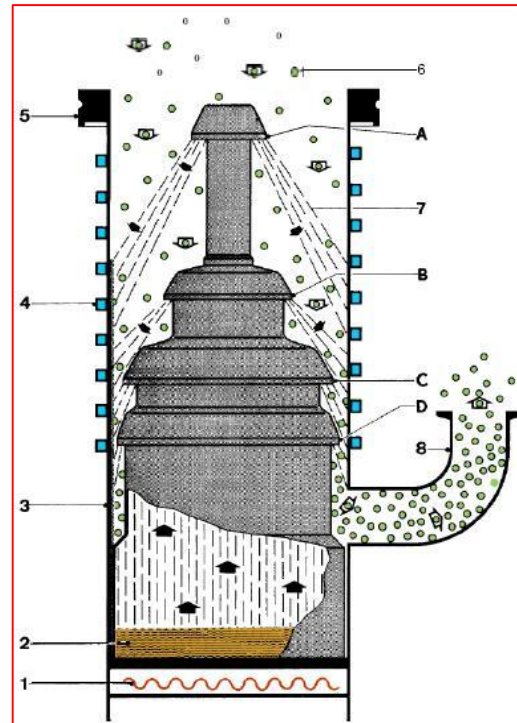
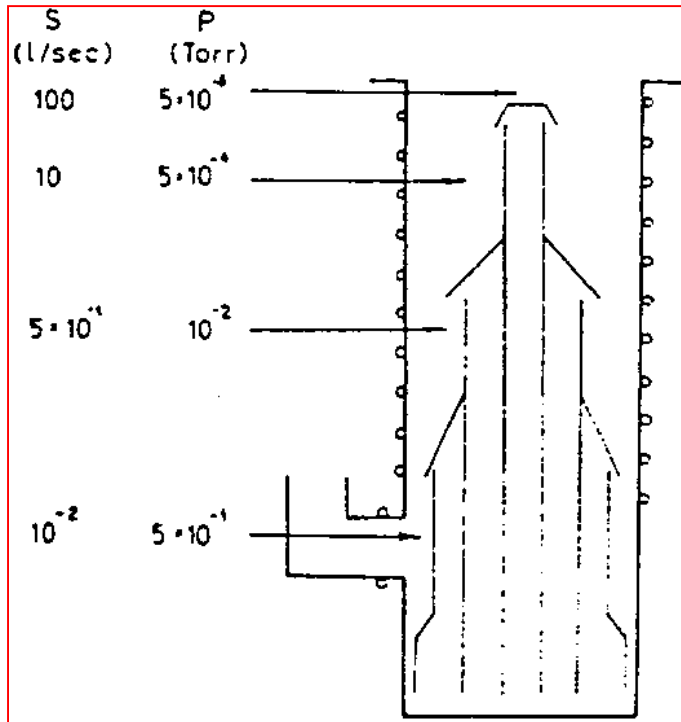
Keuntungan pemakaian *gas ballast*:

Menghindari terjadinya kondensasi uap air di dalam pompa sehingga dapat mencegah/mengurangi terjadinya kontaminasi air atau uap air pada minyak pelumas.

Kerugian

Mengurangi tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai (tekanan akhir bertambah). Karena itu, penggunaan *gas ballast* tidak menguntungkan jika tidak diperlukan. Biasanya *gas ballast* hanya digunakan pada saat pemompaan awal yaitu saat kelembaban udara yang divakumkan cukup tinggi

Gas Ballast



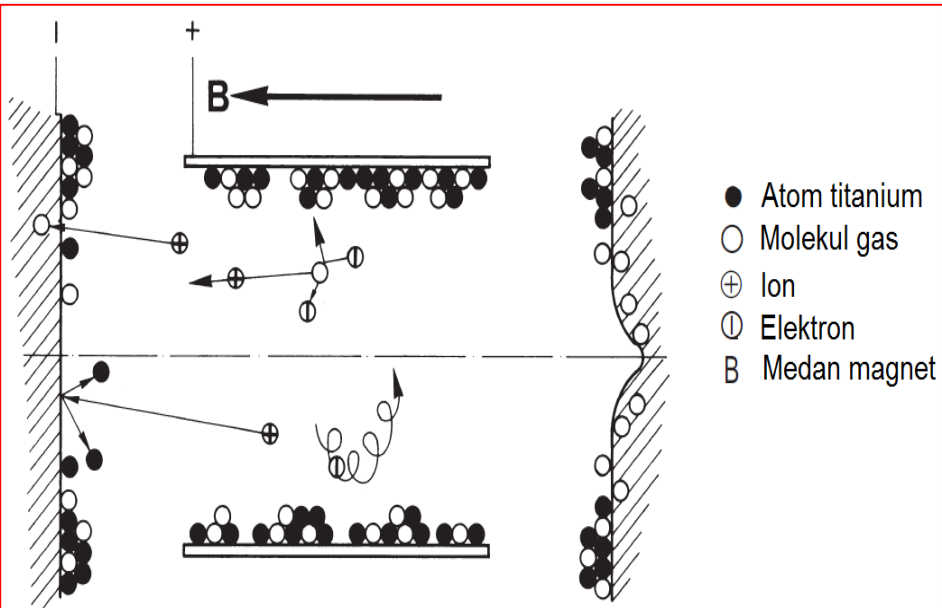
Keterangan

1. Pemanas
 2. Minyak difusi
 3. Rumah pompa
 4. Koil pendingin
 5. Flens
 6. Partikel gas
 7. Uap minyak difusi
 8. *Backing vacuum port*
- A-D. *Nozzle*

Prinsip kerja: Minyak difusi (2) dipanasi dgn pemanas (1) shg terjadi pendidihan & kenaikan tekanan serta uap minyak difusi tersebut keluar melalui *nozzle* dgn kecepatan tinggi. Uap (molekul-molekul) minyak difusi selanjutnya menumbuk molekul-molekul/atom-atom gas yg dipompa shg terjadi perpindahan momentum yg mengakibatkan molekul-molekul/atom-atom gas bergerak dari tekanan rendah ke tekanan yg lebih tinggi & selanjutnya diisap oleh pompa depan (pompa rotari). Adapun uap minyak difusi selanjutnya menumbuk dinding pompa yg didinginkan dgn pendingin (4) & kondensasi serta kembali ke posisi (2).

Pompa Difusi

Prinsip kerja pompa ionik



Banyak digunakan pada *linear accelerator*. Dioperasikan mulai kevakuman orde 10^{-4} mbar. Sebelum dioperasikan menggunakan pompa ion, sistem harus dipompa terlebih dahulu (biasanya menggunakan pompa rotari & turbomolekul atau pompa rotari & difusi) hingga mencapai tingkat kevakuman orde 10^{-4} mbar, makin tinggi tingkat kevakuman sebelum pompa ionik dioperasikan makin baik.

Prinsip kerja:

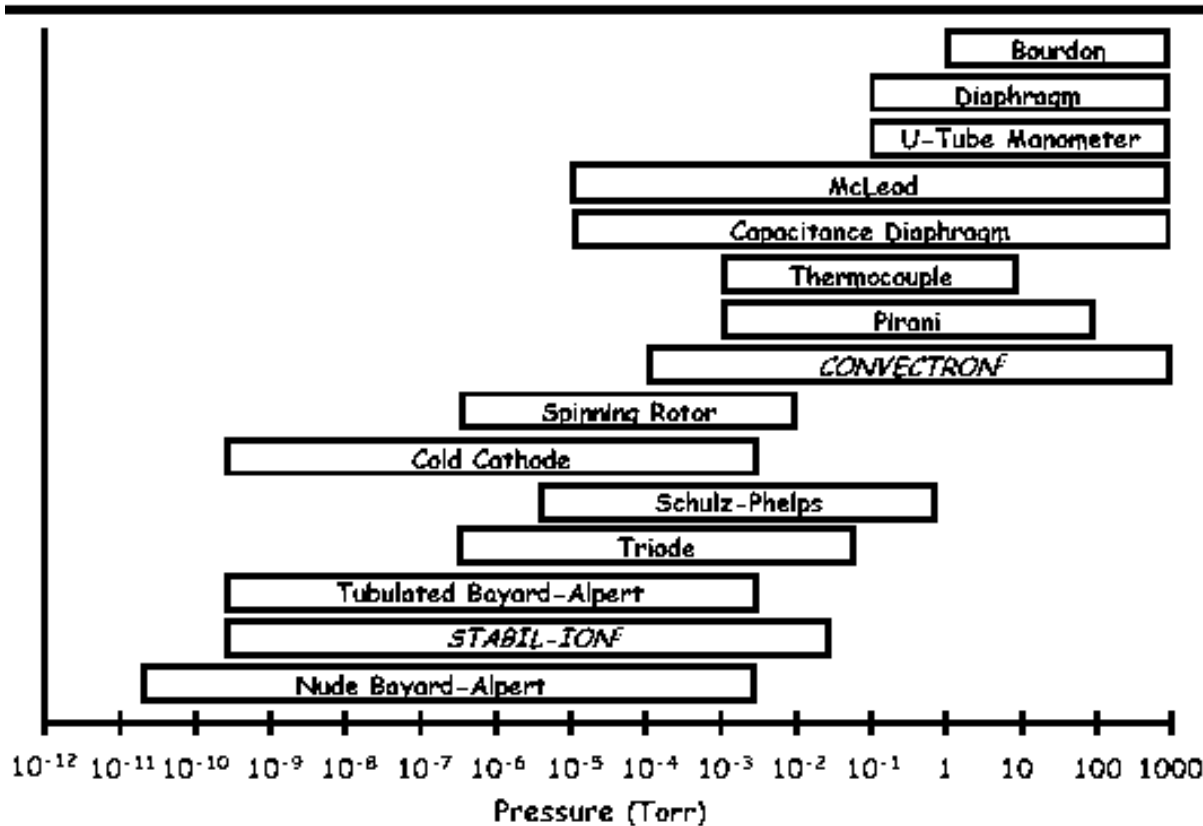
Molekul-molekul/atom-atom gas di dalam pompa diionisasikan, selanjutnya ion-ion yang terbentuk didorong ke katoda. Disamping itu, secara periodik atom-atom titanium dihamburkan dengan teknik *sputtering* sehingga menempel pada permukaan katode dan anode serta menutupi ion-ion maupun atom-atom gas yang dipompa. Pengoperasian pompa ionik tidak diperlukan pompa depan karena molekul-molekul/atom-atom gas yang dipompa tidak dikeluarkan dari pompa namun dikondensasikan/ditempelan pada katode & anode.

KEUNTUNGAN DAN KERUGIAN POMPA TURBOMOLEKULAR DAN POMPA DIFUSI



POMPA TURBOMOLEKULAR	POMPA DIFUSI
<ol style="list-style-type: none">1. Tidak terjadi aliran balik2. <i>Start-up</i> lebih cepat (sekitar 1 menit)3. Jika terjadi kerusakan perawatan susah4. Bersih dari gas hidrokarbon	<ol style="list-style-type: none">1. Terjadi aliran balik uap minyak difusi2. <i>Start-up</i> lebih lama (sekitar 30 menit)3. Jika terjadi kerusakan perawatan mudah

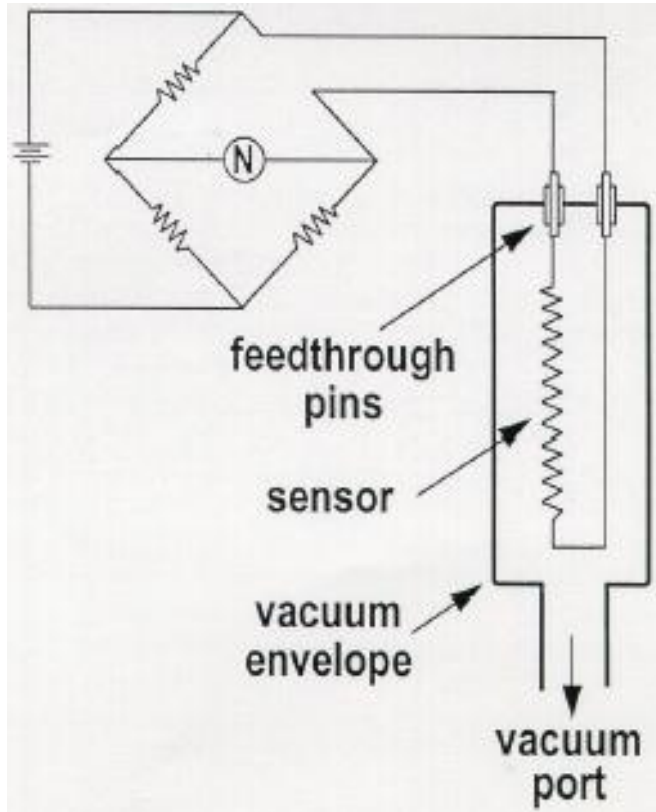
Alat Ukur Sistem Hampa



Jenis alat ukur kevakuman dan rentang pengukurannya cukup banyak (gambar disamping), namun alat ukur yang akan dibahas hanya untk **manometer pirani** dan **manometer penning**

Rentang pengukuran alat ukur kevakuman

Manometer pirani



- Dasar kerjanya dengan hantaran panas
- Penunjukannya dengan rangkaian luar secara elektronik
- Dipengaruhi jenis gas dalam penggunaannya

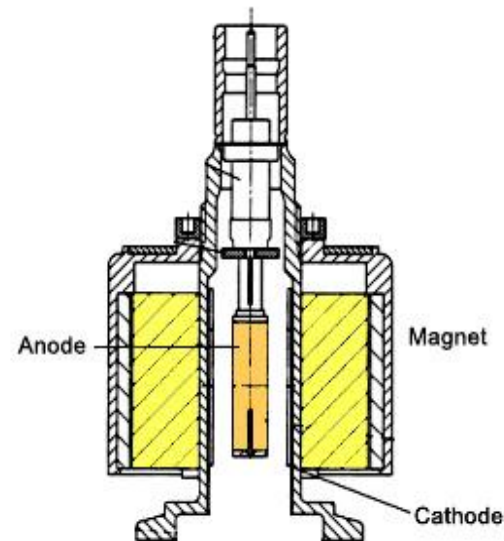
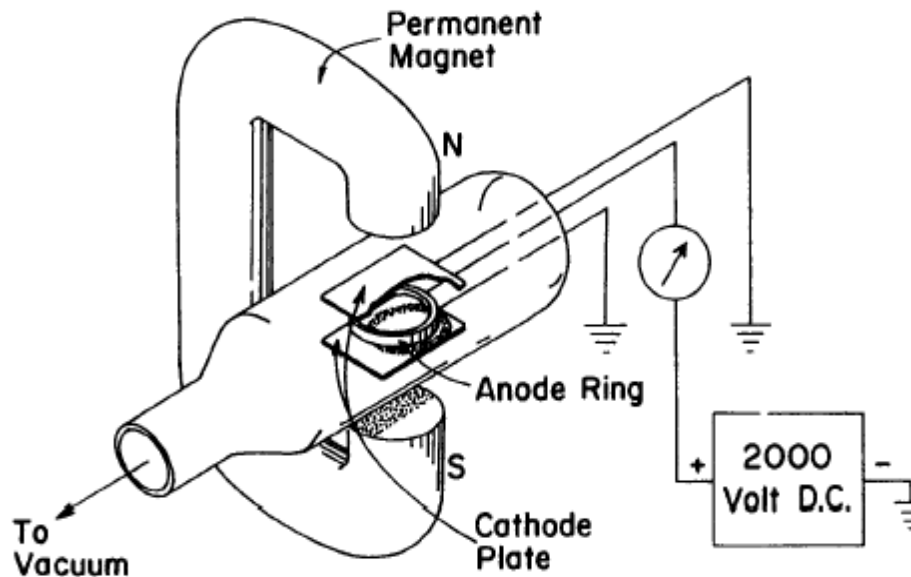
$$P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor tera}$$

a. Tampang lintang pening gauge

b. Bentuk visual

Manometer penning

- Dasar kerjanya adalah ionisasi gas menggunakan katoda dingin
- Proses penunjukan dengan rangkaian luar secara elektronik
- Jangkauan pengukuran 10^{-2} - 10^{-7} Torr
- $P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor tera}$



Faktor tera manometer hantaran panas (Manometer Pirani)

Gas	Faktor Tera		Gas	Faktor Tera
Nitrogen	1,0		Helium	1,0
Hidrogen	0,77		Neon	1,1
Karbon Monoksida	1,0		Argon	1,4
Gas Asam Arang	0,9		Krypton	2,2
Uap Air Raksa	2,9		Xenon	2,8

Faktor tera manometer ionisasi (Manometer Pening)

Gas	Faktor Tera		Gas	Faktor Tera
Nitrogen	1,0		Helium	7,2
Hidrogen	2,5		Neon	4,0
Karbon Monoksida	0,95		Argon	0,75
Gas Asam Arang	0,73		Krypton	0,56
Uap Air Raksa	0,37		Xenon	0,35
Oksigen	1,25		Uap Air	0,9

SEKIAN

TERIMA KASIH ATAS PERHATIANNYA

*Selamat sukses dalam
menempuh ujian SIB*

