

DISAIN BEJANA TEKAN SEBAGAI ISOLATOR TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA

Sutadi, Saminto, Sukidi, Suprpto

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Badan Tenaga Nuklir Nasional

ABSTRAK

DISAIN BEJANA TEKAN SEBAGAI ISOLATOR TEGANGAN TINGGI PADA MBE 300 keV/20 mA. Telah dilakukan pembuatan disain bejana tekan sebagai isolator tegangan tinggi pada MBE 300 keV/20 mA. Disain memuat analisis perhitungan untuk menentukan spesifikasi teknis serta gambar detil dari hasil rancangan bejana tekan, berdasarkan energi optimum berkas elektron serta material bejana dan gas isian yang digunakan. Berdasarkan pertimbangan teknis dipilih bahan bejana tekan dari material SS-304 dan sebagai medium isolator dipilih gas isian berupa campuran gas N₂ (50 %) dengan gas CO₂ (50 %). Sesuai hasil perhitungan maka untuk mengisolasi tegangan tinggi pada tabung pemercepat elektron, dibutuhkan ukuran diameter dalam bejana tekan 75 cm, tebal dinding 5 mm, serta tebal flange 3 cm. Berdasarkan jenis gas isian yang akan digunakan, untuk menghasilkan gradien tegangan dadal yang optimum dibutuhkan tekanan minimum 7 kg/cm² dan tekanan maksimum dibatasi 14 kg/cm² agar dinding bejana masih mampu menahan beban tekanan gas isian yang ada pada saat MBE dioperasikan. Disain bejana tekan ini berguna sebagai referensi pada tahap konstruksi bejana tekan untuk menunjang program rancangbangun MBE 300 keV/20 mA untuk industri lateks di PTAPB-BATAN.

Kata kunci : bejana tekan, isolasi tegangan tinggi, mesin berkas elektron

ABSTRACT

DESIGN OF PRESSURE TANK AS HIGH VOLTAGE INSULATOR FOR THE 300 keV/20 mA ELECTRON BEAM MACHINE (EBM). Design of pressure tank as a high voltage insulator for EBM 300 keV/20 mA has been done. The design enclosed the calculation analysis to obtain the technical specification and its engineering drawing was, based on the optimum energy, tank material and filled gas properties. Based on the technique consideration, it has been chosen the SS-304 as the material of pressure tank and the mixture of N₂ (50 %) + CO₂ (50 %) as the insulator media. According to the calculation result, for insulating the high voltage at accelerator tube, it is needed the inlet diameter of pressure tank about 75 cm, the wall thicknes about 5 mm, and the flange thicknes is about 3 cm. Based on the filled gase, for obtaining the optimum voltage gradient prevent the breakdown voltage it was needed 7 atm of minimum pressure and the maximum pressure about 14 atm in such away that the tank wall is still capable to cover the gas pressure when the EBM is operated. This design is useful as the reference for construction the pressure tank for support the 300 keV/20 mA EBM engineering at PTAPB-BATAN.

Keyword : pressure tank, high voltage insulation, electron beam machine.

PENDAHULUAN

Dalam rangka menunjang program rancang bangun mesin berkas elektron (MBE) 300 keV/20 mA untuk industri lateks di PTAPB-BATAN, dibutuhkan sistem penyungkup tegangan tinggi pemercepat pada lokasi tabung pemercepat, untuk mencegah kemungkinan terjadinya dadal listrik (*breakdown voltage*) pada saat MBE dioperasikan.

Sesuai dengan hasil rancangan dasar (*basic design*) telah dapat ditentukan spesifikasi dasar dari penyungkup tegangan tinggi pemercepat berupa suatu bejana tekan dari bahan SS-304 dengan

ukuran diameter dalam 75 cm dan tebal dinding minimal 4 mm, dan sebagai medium isolator digunakan campuran gas N₂ (50 %) dengan gas CO₂ (50 %) dengan tekanan 7 atm sampai dengan 14 atm.^[1]

Untuk merencanakan bejana tekan lebih lanjut perlu dilakukan analisis perhitungan termasuk penentuan flange, baut pengikat, gasket perapat sambungan, serta pembuatan gambar teknis.

Berdasarkan hasil disain akan diperoleh dokumen yang berisi spesifikasi teknis bejana tekan yang berguna sebagai referensi pada tahap konstruksi bejana tekan, yang dapat dipahami dan dikerjakan oleh pihak bengkel pembuat.

DASAR TEORI

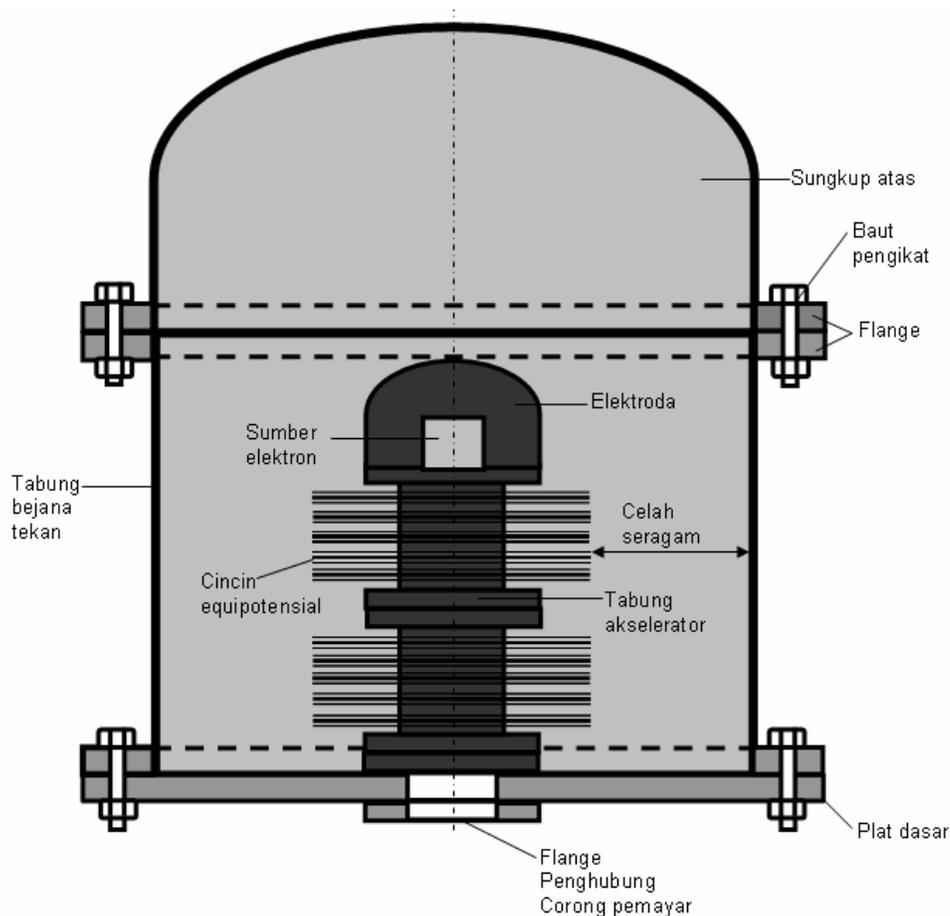
Pada operasi mesin berkas elektron (MBE) akan timbul medan listrik tegangan tinggi pada lokasi sekitar tabung pemercepat dan sumber elektron, sehingga dibutuhkan suatu sistem yang berfungsi sebagai medium isolator. Hal ini berguna untuk mencegah terjadinya *breakdown voltage* yang dapat mengganggu keamanan dan keselamatan pada saat MBE dioperasikan.^[2]

Salah satu teknik untuk mengisolasi tegangan tinggi pada MBE adalah dengan mengungkus tabung akselerator dalam suatu bejana tekan berisi gas yang bersifat sebagai medium isolator dengan tekanan tertentu sesuai dengan tingkat energi berkas elektron.^[3] Untuk memperoleh konstruksi bejana tekan yang handal, perlu dilakukan perencanaan yang mendalam meliputi : ukuran tebal dinding,

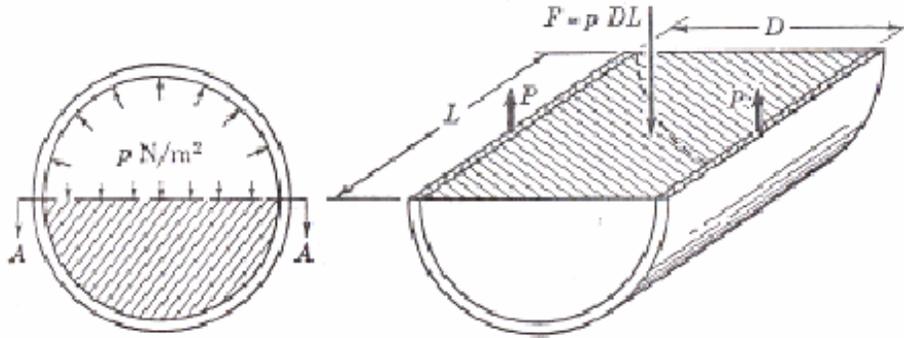
baut pengikat sambungan, flange, gasket, serta pembuatan gambar teknis detail dari bejana tekan yang dimaksud.

Adapun skema konstruksi bejana tekan sebagai penyungkup tabung akselerator untuk mengisolasi tegangan tinggi pada MBE 300 keV/20 mA dapat dilukiskan seperti Gambar 1 berikut :^[1]

Berdasarkan literatur tentang bejana tekan terdapat korelasi erat antara tekanan gas isian, ukuran diameter bejana, kekuatan tarik bahan, serta ukuran tebal dinding bejana. Pada bejana tekan gas isian akan menimbulkan gaya pecah yang bekerja di setiap titik dinding silinder baik arah melintang maupun longitudinal, di mana gaya pecah yang timbul akan mengakibatkan tegangan pada bahan bejana. Adapun penampang bejana tekan ini dapat dilukiskan seperti pada Gambar 2 berikut :^[4]



Gambar 1. Skema konstruksi bejana tekan sebagai isolator tegangan tinggi pada MBE 300 keV/20 mA.



Gambar 2. Ilustrasi gaya pecah pada penampang longitudinal bejana tekan.

Gaya pecah F akan menimbulkan tegangan pada penampang longitudinal dari luas kedua potong permukaan bejana. Besarnya tegangan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut :^[4]

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{p \cdot D \cdot L}{2 \cdot t \cdot L} \quad (1)$$

dengan :

- σ = Tegangan yang timbul pada penampang longi-tudinal akibat gaya pecah F (kg/cm²)
- F = Gaya pecah akibat tekanan gas isian (kg)
- A = Luas penampang longitudinal dinding bejana tekan (cm²)
- P = Tekanan gas isian yang berada dalam bejana tekan (kg/cm²)
- D = Diameter bejana tekan (cm)
- L = Panjang / tinggi bejana tekan (cm)
- t = Tebal dinding bejana tekan (cm)

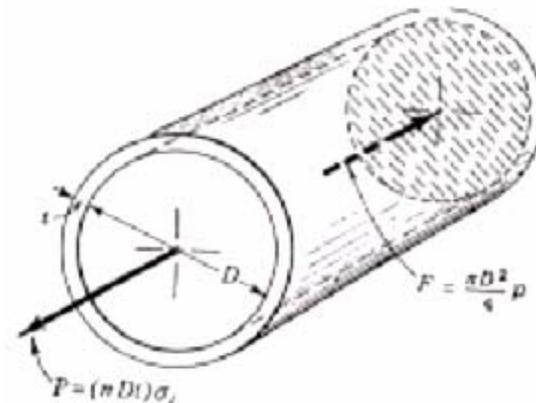
Secara empiris dapat ditentukan ukuran tebal dinding bejana tekan berdasarkan tekanan gas isian dan ukuran diameter bejana serta tegangan yang bekerja sesuai dengan persamaan :^[4]

$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot t}, \text{ atau } t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_t} \quad (2)$$

dengan :

- σ_t = Tegangan tarik pada penampang longitudinal bejana tekan (kg/cm²)
- P = Tekanan gas isian yang berada dalam bejana tekan (kg/cm²)
- D = Diameter bejana tekan (cm)
- t = Tebal dinding bejana tekan (cm)

Pada penampang transversal, terlihat bahwa gaya pecah F yang bekerja pada ujung silinder ditahan oleh resultante gaya sobekan P yang bekerja pada penampang melintang, seperti dilukiskan pada Gambar 3^[4].



Gambar 3. Ilustrasi gaya pecah pada penampang transversal bejana tekan.

Luas penampang melintang adalah tebal dinding dikalikan keliling rerata, atau $\pi(D + t)$. Apabila t relatif kecil dibanding D , maka besarnya = $\pi \cdot D \cdot t$. Dengan demikian dapat ditentukan persamaan gaya pecah pada penampang transversal sebagai berikut :^[4]

$$P = F, \text{ atau } \pi \cdot D \cdot t \cdot \sigma_t = \pi / 4 \cdot D^2 \cdot p \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{4 \cdot t} \quad (4)$$

Besarnya tegangan pada penampang transversal akan bernilai setengah dari tegangan pada penampang longitudinal, sehingga untuk tekanan kerja yang direncanakan kekuatan sambungan pada penampang longitudinal harus dinaikkan dua kali lipat.

TATA KERJA

Perhitungan Tebal Dinding

Berdasarkan literatur dan hasil kajian teknis telah diperoleh data kemampuan dari bahan bejana tekan dan gas isian yang dipilih untuk digunakan sebagai berikut :^[1]

1. Baja tahan karat (*stainless steel*) type 304 mempunyai harga batas tegangan tarik sebesar 510 MPa (5033,31 kg/cm²).
2. Gas isian campuran N₂ (50 %) + CO₂ (50 %) pada tekanan 100 Psi (7 kg/cm²) mampu menghasilkan gradien tegangan dadal sebesar 620 kV/inchi.

Sesuai dengan ukuran diameter cincin equipotensial dari tabung akselerator yang akan digunakan sebesar 35 cm^[6], dan asumsi lebar celah masing masing 20 cm, maka dapat ditentukan ukuran diameter dalam dari bejana tekan sebagai pengungkung tabung akselerator yang direncanakan adalah sebesar 35 cm + (2 × 20 cm) = 75 cm.

Untuk memberikan jaminan keselamatan diambil konstanta faktor keamanan. Adapun untuk bahan bejana diambil angka keamanan $f_b = 4$ dan untuk gas isian diambil harga angka keamanan $f_g = 2$.

Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan ukuran tebal dinding bejana tekan, di mana berdasarkan persamaan (2) dengan gas isian berupa campuran antara N₂ (50 %) + CO₂ (50 %), dapat ditentukan besaran yang ada sebagai berikut :

- Tekanan P dari gas isian (N₂ (50 %) + CO₂ (50 %)) = $P_{gas} \times f_g = 7 \text{ kg/cm}^2 \times 2 = 14 \text{ kg/cm}^2$.
- Batas tegangan tarik ijin bahan SS-304 (σ_{ti}) = $\sigma_t : f_b = 5033,31 \text{ kg/cm}^2 : 4 = 1258,33 \text{ kg/cm}^2$.
- Diameter dalam bejana tekan $D = 75 \text{ cm}$.

Sehingga berdasarkan persamaan (2) dan besaran yang telah dapat ditentukan, diperoleh ukuran tebal dinding bejana minimum sebesar $t = 0,417 \text{ cm} = 4 \text{ mm}$. Namun demikian untuk

meningkatkan faktor keselamatan, ditetapkan $t = 5 \text{ mm}$.

Perhitungan Flange, Gasket, dan Baut

Untuk menentukan ukuran *Flange*, gasket (perapat) dan baut didasarkan pada tekanan gas dalam bejana, diameter dalam bejana dan diameter luar bejana yaitu :

1. Tekanan maksimum dalam bejana yang direncanakan (P) = 200 Psi (14 atm).
2. Diameter dalam bejana (ID) = 75 cm = 29,53 inch.
3. Tebal bejana = 5 mm = 0,20 inch.
4. Diameter luar bejana (OD) = 29,53 + (2 × 0,20) inch = 29,93 inch.
5. Temperatur maksimum yang diijinkan = 300 °F

Parameter yang diperlukan untuk *flange*, gasket, dan baut adalah :

a. Flange :

- Bahan flange : SS-304.
- Tegangan maksimum yang diijinkan (σ_b) : 18742,54 psi^[4].

b. Gasket :

- Bahan : Karet Viton
- Faktor Gasket (m) : 2,75
- Tegangan tekan minimum (y) : 3700 psi^[1]

c. Baut :

- Bahan : SS-304
- Tegangan maksimum yang diijinkan (σ_b) : 18742,54 psi^[4].

Penentuan Diameter Gasket

Dengan asumsi tebal gasket = 0.236 inch (6 mm), maka diameter gasket ditentukan dengan persamaan :^[5]

$$\frac{d_o}{d_i} = \left[\frac{Y - P \cdot m}{Y - P(m+1)} \right]^{0,5} \quad (5)$$

dengan, d_o diameter luar gasket (inchi), d_i diameter dalam gasket (inchi), P tekanan gas yaitu 200 Psi, m faktor gasket (2,75) dan y tegangan dukung minimum yaitu 3700 psi.^[5]

Dari persamaan (5) diperoleh : $\frac{d_o}{d_i} = 1,01$

dengan asumsi diameter dalam gasket $d_i >$ diameter luar bejana ($\geq 0,5$ inchi)^[5], diperoleh :

$$d_i = 0,5 + OD = 0,5 + 29,93 = 30,43 \text{ inchi}$$

$$d_o = 1,01 \times d_i = 30,73 \text{ inchi}$$

sehingga diperoleh :

a. Diameter penampang gasket minimum

$$N = \frac{d_o - d_i}{2} = 0,15 \text{ inchi} = 4 \text{ mm, ditetapkan}$$

$$N = 6 \text{ mm} = 0,236 \text{ inchi.}$$

b. Lebar dudukan gasket

$$b = N = 0,236 \text{ inchi} = 6 \text{ mm}$$

c. Diameter luar gasket

$$G = 2N + d_i = (2 \times 0,236) \text{ inchi} + 30,43 \text{ inchi} = 30,90 \text{ inchi}$$

Perhitungan Ukuran Baut

a. Beban tekanan dari dalam

$$H = \frac{\pi \cdot G^2}{4} P = 0,785 \times (30,90)^2 \times 200 \text{ lb/inchi}^2 = 149905,17 \text{ lb}$$

b. Beban sambungan saat tidak operasi

$$H_p = \pi \cdot G \cdot b \cdot m \cdot P = 3,14 \times 30,90 \times 0,236 \times 2,75 \times 200 = 12593,98 \text{ lb}$$

c. Beban operasi total

$$W_m = H + H_p = 149905,17 + 12593,98 = 162499,15 \text{ lb}$$

d. Luas baut minimum

$$Am = \frac{W_m}{\sigma_b} = \frac{162499,15 \text{ lb}}{18742,54 \text{ Psi}} = 8,67 \text{ inchi}^2$$

e. Jumlah baut minimum

$$N_{min.} = \frac{Am}{Root \ area} = 23,86 \text{ biji, ditetapkan}$$

jumlah baut flange $N = 24$ biji

Adapun spesifikasi baut flange berdasarkan ASME ditunjukkan pada Tabel 1.^[5]

f. Diameter luar flange

$$A = C + 2E = 32,74 + (2 \times 0,9375) = 34,62 \text{ inchi} = 87,93 \text{ cm.}$$

Penentuan tebal flange

Untuk menentukan tebal flange mengacu pada persamaan berikut :

$$t = \sqrt{\frac{y \cdot M_{maks}}{\sigma_f \cdot B}} \quad (6)$$

M_{maks} adalah momen maksimum pada kondisi operasi, yang besarnya ini merupakan penjumlahan momen-momen yang terjadi yaitu :

$$M_{maks} = M_D + M_G + M_T \quad (7)$$

a. Momen pada kondisi operasi (M_D)

- Gaya hidrostatik pada luas bagian dalam flange

$$H_D = 0,785 \cdot B^2 \cdot P = 0,785 \cdot (29,92)^2 \cdot 200 = 140547,40 \text{ lb}$$

- Jarak radius lingkaran baut ke lingkaran di mana H_D bekerja

$$h_D = (C - B) / 2 = (32,74 - 29,92) / 2 = 1,41 \text{ inchi}$$

- Momen akibat gaya hidrostatik terhadap jarak lingkaran baut flange

$$M_D = H_D \cdot h_D = 140547,4 \text{ lb} \times 1,41 \text{ inchi} = 198171,83 \text{ lb-inchi}$$

Tabel 1. Spesifikasi baut flange untuk bejana tekan.

Ukuran baut (inchi)	Root area	$N_{min.}$	$N_{act.}$	$B_s.$	R	$N \cdot B_s/\pi$	C	E
5/8	0,419	20,86	24	3	1,25	21,8	32,7	0,9375

Keterangan :

N_{act} = jumlah baut sesungguhnya

C = diameter lingkaran baut, inchi

= $ID + 2(1,415 go + R) = 32,74$ inchi

ID = diameter dalam bejana, inchi.

B_s = Jarak baut, inchi.

go = tebal standar = 0,25 inchi.

R = Minimum radial distance, inchi

E = jarak tepi, inchi.

b. Momen akibat perbedaan beban baut flange dan tekanan dalam bejana (M_G)

- Perbedaan beban baut flange dan tekanan dalam bejana

$$H_G = W_m - H = 162499,15 \text{ lb} - 149905,17 \text{ lb} = 1253,98 \text{ lb}$$

- Jarak radius reaksi beban gasket ke lingkaran baut

$$h_G = (C - G) / 2 = (32,74 - 30,90) / 2 = 0,92 \text{ inchi}$$

- Momen akibat gaya hidrostatik terhadap jarak lingkaran baut flange

$$M_G = H_G \cdot h_G = 1253,98 \text{ lb} \times 0,92 \text{ inchi} = 11586,46 \text{ lb-inchi}$$

c. Momen akibat perbedaan gaya hidrostatik total dan gaya hidrostatik pada luas bagian dalam flange (M_G)

- Perbedaan gaya hidrostatik total dan gaya hidrostatik luasan bagian dalam flange

$$H_T = H - H_D = 149905,17 \text{ lb} - 140547,4 \text{ lb} = 9357,77 \text{ lb}$$

- Jarak radius dari lingkaran baut ke lingkaran H_T

$$h_T = (h_D + h_G) / 2 = (1,41 + 0,92) / 2 = 1,165 \text{ inchi}$$

- Momen akibat perbedaan gaya hidrostatik terhadap jarak radius lingkaran baut

$$M_T = H_T \cdot h_T = 9357,77 \text{ lb} \times 1,165 \text{ inchi} = 10901,80 \text{ lb-inchi}$$

Jadi

$$\begin{aligned} M_{maks} &= M_D + M_G + M_T \\ &= (198171,83 + 11586,46 + 10901,80) \text{ lb-inchi} \\ &= 220660,09 \text{ lb-inchi} \end{aligned}$$

Tegangan ijin flange (σ_f) = 66717 Psi, diameter luar bejana (B) = 29,93 inch, y adalah tergantung nilai $K = A/B = 34,62/29,93 = 1,16$ dari grafik (Gambar 12.22)⁽⁵⁾ diperoleh harga $y = 12$

Jadi berdasarkan hasil perhitungan diperoleh tebal flange (t) = 1,15 inch = 29,21mm.

Pengelasan

- Jenis las melintang : Las tumpul
- Alur sambungan : Bentuk V

- Las flange dengan bejana : Las sudut
- Jenis elektrode las : Titania kapur
- Tegangan tarik maksimum elektrode : 61114,27 Psi (421,3 Mpa)
- Angka faktor keamanan : 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Disain bejana tekan ini memuat analisis perhitungan tentang suatu bejana tekan berisi gas isian yang diimplementasikan sebagai penyungkup tegangan tinggi pemercepat pada MBE dengan energi tertentu, guna mencegah terjadinya dadal listrik.

Untuk memberikan jaminan keselamatan pada perancangan bejana tekan ini, dalam analisis perhitungan ditetapkan angka faktor keamanan yang antara lain meliputi :

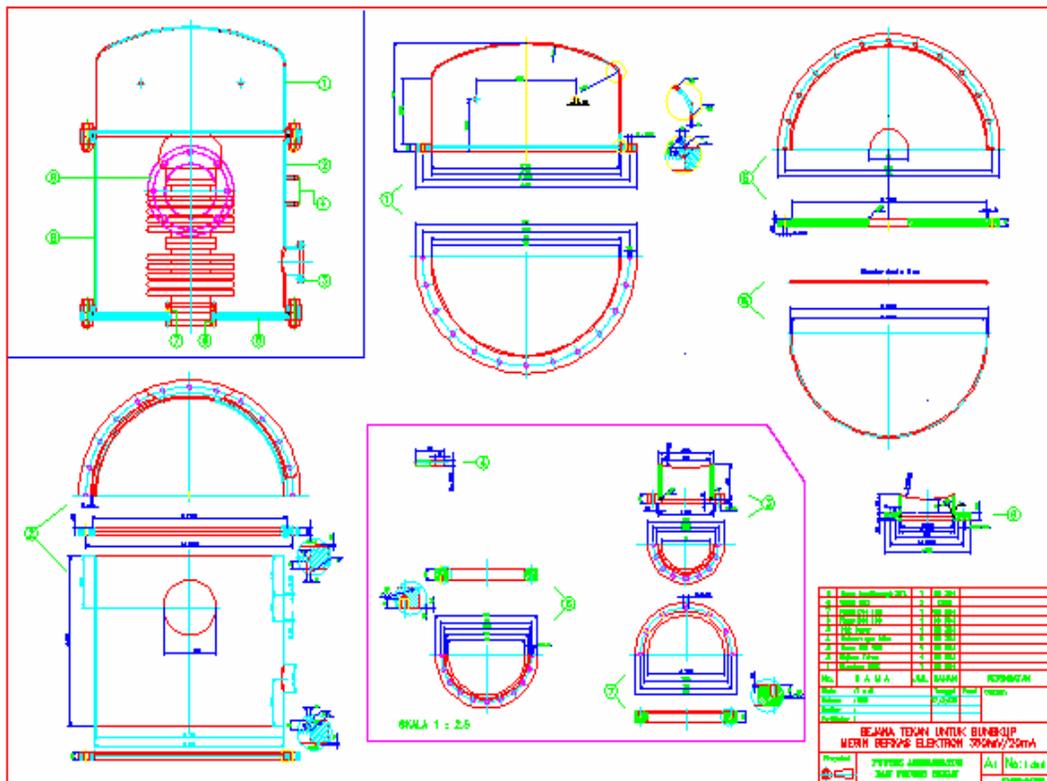
- Angka faktor keamanan dari bahan bejana tekan terhadap batas tegangan maksimal yang diijinkan, berdasarkan pertimbangan teknis ditetapkan sebesar 4 kali, dengan tujuan untuk mengantisipasi efek penuaan (*aging*) dan ketidakseragaman struktur dari material bejana ditinjau dari kekuatan mekanis.
- Angka faktor keamanan dari bahan gas isian terhadap karakteristik isolasinya yang berdasarkan pertimbangan teknis ditetapkan sebesar 2 kali. Hal ini dibutuhkan untuk mengantisipasi efek ketidakmurnian dari gas isian yang akan dimasukkan dalam bejana tekan, sehingga dapat mempertahankan unjuk kerja isolasinya.

Berdasarkan hasil rancangan telah dapat ditentukan spesifikasi teknis dari bejana tekan sebagai penyungkup tegangan tinggi pada MBE dengan bahan SS-304 dan tekanan maksimum gas isian 14 Atm, di mana berdasarkan hasil analisis perhitungan diharapkan sudah memenuhi syarat keselamatan untuk mengisolasi tegangan tinggi pada tabung pemercepat untuk MBE 300 keV/20 mA. Adapun spesifikasi teknis bejana tekan dari hasil disain ditampilkan pada Tabel 2.

Sesuai dengan hasil disain selanjutnya dapat dibuat gambar teknis detil dari bejana tekan, sebagai dokumen dan referensi pada tahap konstruksi. Adapun gambar teknis detil dari rancangan bejana tekan disajikan pada Gambar 4.

Tabel 2. Spesifikasi bejana tekan untuk MBE 300 keV/20 mA.

Komponen Bejana	Spesifikasi
Dinding bejana	Silinder berdiameter dalam 75 cm, tebal 5 mm
Flange	Diameter 89 cm, tebal 3 cm (SS-304)
Gasket	Oring seal ukuran diameter 6 mm (karet viton)
Sungkup atas	Silinder bertutup parabola, tinggi 42 cm, diameter 75 cm
Baut pengikat	Ukuran M 16 × panjang 8 cm (SS-304)
Nipel	Diameter ½ inchi, tebal 3 mm, panjang 5 cm (SS-304)
Tekanan operasi maksimum	14 atm.
Material bejana	SS-304



Gambar 4. Disain teknis bejana tekan untuk MBE 300 keV/20 mA.

Dalam gambar teknis rancangan detail bejana tekan ini dilengkapi dengan tambahan fasilitas flange untuk sumber tegangan tinggi dan sistem instrumentasi kendali, serta nepel-nepel untuk fasilitas valve isian gas, manometer tekanan, dan sensor tekanan gas isian.

KESIMPULAN

Dari hasil disain bejana tekan untuk MBE 300 keV/20 mA ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis dan pertimbangan teknis dipilih bahan bejana tekan dari material *Stainless Steel* type 304, dengan alasan : kuat dan lentur, tahan terhadap korosi dan suhu tinggi, relatif mudah dalam pengerjaan, serta mudah diperoleh di pasaran lokal.
2. Ukuran tebal dinding bejana tekan untuk mengisolasi tegangan tinggi pada MBE ditentukan oleh beberapa faktor antara lain : tekanan gas isian, diameter bejana, serta jenis bahan bejana yang digunakan, sesuai dengan energi optimum berkas elektron dan jenis gas isian yang akan dipergunakan.
3. Sesuai dengan bahan bejana dan gas isian yang akan digunakan, maka untuk mengisolasi tegangan tinggi pemercepat pada MBE 300 keV/20 mA, dibutuhkan ukuran diameter bejana 75 cm, tebal dinding bejana 5 mm, dan tebal flange 3 cm guna mencegah dadal listrik namun dinding bejana masih mampu menahan beban tekanan gas isian pada saat MBE dioperasikan.
4. Berdasarkan hasil disain telah diperoleh spesifikasi teknis dari bejana tekan yang berguna sebagai acuan pada tahap konstruksi lebih lanjut, dalam rangka menunjang program rancang bangun MBE 300 keV/20 mA di PTAPB-BATAN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Prof. Drs. Darsono, M.Sc. dan Ir. Djasiman atas segala masukan dan sarannya, serta bantuan dari rekan-rekan staf BTAFN sehingga dapat terselesaikan penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dokumen No. C7 B2/03/RD-7/05, *Rancangan Dasar Bejana Tekan Untuk MBE 300 keV/20 mA*, P3TM-BATAN, 2005.
- [2] J.D. CRAGGS, *High Voltage Laboratory Technique*, Butter worths Scientific, 1954.
- [3] M.S. LIVINGSTONE, *Particle Accelerator*, Mc. Graw Hill, 1962.
- [4] S. DARWIN, *Kekuatan Material*, Erlangga, Jakarta, 1985.

- [5] L.E. BROWNELL, *Vessel Design*, Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1979.

TANYA JAWAB

Sudaryadi

- Mengingat tekanannya 14 atm, apakah sudah diperhitungkan faktor keselamatannya?

Sutadi

- Pada disain bejana tekan ini sudah diperhitungkan faktor keselamatannya dimana dengan memberikan faktor keamanan 4× untuk kekuatan material bejana yang dipilih maka untuk tekanan kerja 14 atm bejana tekan sudah mempunyai faktor keselamatan sebesar 4× sehingga dijamin aman.

Apri Susanto

- Apakah mungkin bejana tekan ini bisa menggunakan MBE yang sudah ada?
- Kapasitas yang dihasilkan dari bejana tekan sampai seberapa besar?
- Bisakah MBE ini dikembangkan dengan tenaga yang lebih tinggi?
- Bisakah MBE ini dapat diaplikasikan oleh industri dengan harga ekonomis? Terjangkau oleh masyarakat umum.

Sutadi

- Secara teknis bisa karena tingkat energinya masih sama.
- Kapasitas berdasarkan tekanan mampu untuk menumpu tekanan s/d 15 atm. Kapasitas berdasarkan gradien tegangan dadal mampu untuk mengkaver tegangan tinggi s/d 400 kV.
- Bisa, tergantung kapasitas tabung akselerator dan tegangan tinggi, serta sumber elektron yang akan digunakan.
- Secara masal bisa, tergantung jenis aplikasinya.