

VERIFIKASI PERHITUNGAN PARAMETER DISAIN BWR-6

R. Indrawanto, Maman Mulyaman, Slamet Suprianto,
Hery Adrial, dan Djunaidi
Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

ABSTRAK

Verifikasi Perhitungan Parameter Disain BWR-6. Perhitungan penentuan parameter disain BWR-6 sangat penting untuk mendukung pembangunan PLTN yang pertama di Indonesia. Hasil perhitungan menunjukkan dengan daya 3579 MWt, teras BWR-6 terdiri dari 832 bundel bahan bakar, laju alir uap 2318,4 kg/det, laju alir pendingin 12704,4 kg/det, diameter teras 4,14 m, penurunan tekanan pada kanal pendingin 4.5×10^4 N/m².

ABSTRACT

The Verification of Design Parameters BWR-6 Calculation.

The determination of design parameters is very important to support the construction of the first nuclear power plant in Indonesian. Calculation result show with the power 3579 MWt, The Core consists of fuel element 832 bundle, and Steam flow rate is 2318.4 kg/s, cooling flow rate is 12704.4 kg/s, core equivalent diameter 4,14 m, and channel pressure drop is 4.5×10^4 N/m².

PENDAHULUAN

Dalam rangka persiapan pembangunan PLTN yang pertama di Indonesia, penguasaan teknologi dalam bidang rancang bangun PLTN mendapat perhatian utama. Sebagai langkah awal dalam pembangunan PLTN, melalui konsultan BATAN "Newjec" sedang dipersiapkan studi tapak dan studi kelayakan. Hasil studi tapak dan studi kelayakan akan diperiksa oleh tim STSK-BATAN. Diharapkan pada tahun 1996 seluruh studi tapak dan studi kelayakan dapat selesai. Untuk mendukung persiapan dan penguasaan teknologi disain PLTN, BATAN telah mengirim tenaga-tenaga ahlinya untuk ikut serta dalam program partisipasi disain di Westinghouse dan di General Electric.

Pada saat ini jumlah PLTN jenis BWR yang beroperasi diseluruh dunia sebanyak 88 unit, sedangkan jenis PWR sebanyak 238 unit. Prinsip kerja PLTN jenis BWR-6 (lihat gambar 1) adalah sebagai berikut :

Pada PLTN jenis BWR-6 pendingin masuk teras dalam kondisi sub cooled dengan temperatur $T_{in} = 277$ °C dan tekanan $P = 1025$ Psia. Pada saat keluar dari teras pendingin dalam kondisi mendidih dengan temperatur $T_{out} = 288$ °C, supaya uap yang dihasilkan dalam kondisi kering, uap dari teras dilewatkan pemisah uap (steam separator)

Dari steam separator uap yang kering lewat jenuh dilewatkan ke turbin untuk memutar generator untuk menghasilkan tenaga listrik. Setelah melewati turbin, uap diubah menjadi fase cair dengan melewati uap ke kondensor. Dari kondensor pendingin dipompa kembali menuju teras dengan sebelumnya melewati pemanas. Kegunaan pemanas untuk memanaskan pendingin menjadi 278 °C, sehingga efisiensi dari sistem dapat tetap dipertahankan.

Melalui makalah ini akan dibahas verifikasi perhitungan parameter disain BWR-6. Dimana telah dihitung kembali parameter-parameter disain yang meliputi : laju alir pendingin, laju alir uap, jumlah bundel bahan bakar, diameter

teras, distribusi temperatur bahan bakar, dan penurunan tekanan pada kanal pendingin BWR-6.

DATA-DATA DESAIN BWR-6

Dalam penghitungan verifikasi parameter disain akan digunakan data dari BWR-6 dengan data-data sebagai berikut :

Daya thermal	3579 MWt
Daya listrik	1178 MWe
Efisiensi	32,9 %
Tekanan pendingin primer	7,17 MPa
Temperatur masuk teras	278 °C
Temperatur keluar teras	288 °C
Susunan bundel bahan bakar	8x8
Pitch	16,2 mm
Diameter setiap pin bahan bakar	12,27 mm
Rapat daya teras	56,3 MW/m ³
Panas linier maksimal	44 kW/m
Panas linier rerata	19,0 kW/m

PERHITUNGAN LAJU ALIR TERAS

Besarnya laju aliran uap dihitung dengan rumus dibawah ini (lihat gambar 2).

$$q_t = m_g (h_g - h_d) \quad \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

Q_t adalah daya termal (W)

m_g adalah laju alir uap (kg/det)

h_g adalah entalphi uap (J/kg)

h_d adalah entalphi pendingin masuk ke dalam teras (J/kg)

$$Q_t = 3,58 \times 10^9 \text{ Watt}$$

$$h_g \text{ pada suhu } 288 \text{ }^\circ\text{C} = 2,77 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$h_d \text{ pada suhu } 278 \text{ }^\circ\text{C} = 1,54 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{Tekanan uap} = 7,2 \text{ MPa (1058,4 Psi)}$$

$$m_g = 2,34 \times 10^7 \text{ kg/det.}$$

Besar laju alir yang melewati teras ;

$$m_i = m_f + m_g \quad \dots\dots\dots(2)$$

dimana :

m_f adalah laju alir yang berupa air yang kembali ke teras

Sebelum menghitung m_i terlebih dahulu harus dihitung RR, Xe, a dan y.

$$\frac{m_f}{m_g} = RR \quad \dots\dots\dots(3)$$

dimana :

- ° RR adalah perbandingan resirkulasi.
- ° Xe adalah kualitas uap rata-rata keluar dari teras.
- ° a : adalah fraksi uap rata-rata keluar dari teras = 0,77 pada tekanan (P) = 1054 Psia dan suhu pendingin (T_{out}) = 288 °C.
- ° y adalah w/v_1 . S = 0,0945
- ° S adalah besaran Slip ratio, pada BWR-6 S = 1.95

$$RR = \frac{1 - X_e}{X_e} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\overline{X_e} = \frac{1}{1 + [(1 - \alpha) / \alpha] 1 / \phi} \quad \dots\dots\dots(5)$$

Dengan persamaan (4) dan (5) didapat besaran Xe = 0,24 dan RR = 3,17. Jika digunakan persamaan (3) didapat :

$$m_f = 7428,9 \text{ kg/det.}$$

- ° Laju alir pendingin total yang melewati teras :
- ° $m_i = m_f + m_g = 9772,4 \text{ kg/det.}$
- ° Dalam perhitungan ini diambil faktor keselamatan teknik $f_e = 1,3$. Jadi $m_i = f_e \times m_i = 12704,4 \text{ kg/det.}$

PERHITUNGAN JUMLAH BUNDEL BAHAN BAKAR

Dalam perhitungan ini menggunakan bahan bakar yang tersusun 8x8 dengan data-data sebagai berikut :

$$\text{Pitch} = 16,2 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter bahan bakar} = 12,27 \text{ mm}$$

$$\text{Kecepatan alir pendingin melewati teras} = 2,65 \text{ m/det.}$$

Luas aliran pendingin setiap bundel bahan bakar

$$A = (\text{Pitch})^2 - p/4 D^2 = 7,133 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$\text{Spesifik volume (Sv) (pada tekanan (P) = 1054 Psia, suhu pendingin (T_m) = 541 }^\circ\text{F}) = 0,02 \text{ ft}^3/\text{lb.}$$

$$\text{Volumependingin} / \text{detik} = \frac{m_1 \cdot S_v}{3600} = 15,86 \text{ m}^3 / \text{dt}$$

$$\text{Luaspendingin}(LP) = \frac{\text{volumependingin} / \text{dt}}{\text{kecepa tanalirpendingin}}$$

$$= 63,88 \text{ ft}^2 = 5,935 \text{ m}^2.$$

Jumlah bundel bahan bakar (N) = (LP)/A = 832 bundel.

PERHITUNGAN DIAMETER TERAS

Dengan mengetahui jumlah bahan bakar akan dapat dihitung diameter dalam dari "Pressure Vessel" BWR-6.

$$D_T = \left(\frac{\Delta N \cdot A}{\pi} \right) \dots\dots\dots(6)$$

$$D_T = 2,74 \text{ m}$$

PERHITUNGAN PANJANG BAHAN BAKAR

Jika diketahui besarnya pembangkitan panas linier setiap bahan bakar (Q') = 20,1 kW/m dan daya panas yang dibangkitkan oleh teras reaktor adalah 3,579x10⁶ kW, maka :

$$\text{Panjang total bahan bakar} = (3,579 \times 10^6) / Q' = 178059,7 \text{ m}$$

Jika digunakan bahan bakar dengan susunan 8x8 dan jumlah bundel bahan bakar = 832, maka :

$$\text{Jumlah total pin bahan bakar (JP)} = 64 \times 832 = 46848$$

$$\text{Panjang bahan bakar (L)} = \frac{\text{Panjang total bahan bakar}}{JP} = 3,8 \text{ m}$$

PERHITUNGAN PANJANG PENDIDIHAN

Dalam PLTN jenis BWR-6 pendingin masuk kedalam teras dalam kondisi "Sub Cooled". Setelah mencapai ketinggian tertentu (Z_B) pendingin mulai mendidih (lihat gambar 3).

Panjang pendidihan Z_B dihitung dengan persamaan :

$$Z_B = \frac{L}{\pi} \text{Sin}^{-1} \left[-1 + 2 \left(\frac{h_f - h_m}{h_{out} - h_{\epsilon}} \right) \right] \dots\dots\dots(7)$$

Jika diketahui :

$$\text{Suhu masukan (T}_{in}) = 278 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tekanan = 7,2 MPa

Suhu keluaran teras (T_{out}) = 288 °C

Dari tabel saturated steam diperoleh :

$$h_f = 1277,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 1492,2 \text{ kJ/kg}$$

$$C_p = 5,307 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{in} = h_f - C_p(T_f - T_{in}) = 1244,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{out} = h_f + X_{out} h_{fg} = 1495,1 \text{ kJ/kg}$$

Jika digunakan persamaan (7) diperoleh

$$Z_B = -0,793 \text{ m (lihat gambar 3)}$$

VERIFIKASI PERHITUNGAN DISTRIBUSI SUHU BAHAN BAKAR

Untuk perhitungan suhu kelongsong bahan bakar digunakan persamaan :

$$T_{kel} - T_{sat} = \frac{1,9 (Q'')^{0,25}}{e^{(P/900)}} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana :

T_{kel} ialah suhu kelongsong sebelah luar.

T_{sat} ialah suhu didih air pada tekanan P.

P ialah tekanan kerja = 1058 Psi

Jika diambil harga Q'_{maks} = 44 kW/m pada posisi aksial z = 0 (lihat gambar 3), maka diperoleh

$$Q'' = Q' / (pR) = 112,045 \text{ W/cm}^2$$

Untuk menghitung suhu permukaan kelongsong bagian dalam digunakan data sebagai berikut :

Diameter luar kelongsong = 12,52 mm

Ketebalan kelongsong = 0,86 mm

Konduktivitas UO₂ = 0,002161 kW/m °C

Konduktivitas kelongsong = 13 W/m °C

Panas yang melalui kelongsong (Q''_{kel}) :

$$Q''_{kel} = \frac{\text{diameterluarkel}}{\text{diameterluarkel} - \text{tebalkel}} Q'' \dots\dots\dots(9)$$

$$Q''_{kel} = 120,309 \text{ W/cm}^2$$

Kelongsong BWR-6 menggunakan bahan Zircaloy-2 dengan konduktivitas (K_{kel}) = 13 W/m °C.

Gradien suhu kelongsong (dengan anggapan bidang datar)

$$\Delta T_{kel} = \frac{Q''_{kel} \times \text{tebal}_{kel}}{K_{kel}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\Delta T_{kel} = 79,38 \text{ }^\circ\text{C}$$

Suhu kelongsong di sebelah dalam

$$T_{KF} = T_{kel} + DT_{kel}$$

$$T_{KD} = 296 + 79,38 = 375 \text{ }^\circ\text{C}$$

Panas yang melalui gap adalah :

$$Q''_{gap} = \frac{(diameter_{keluar} - tebal_{kel})}{(diameter_{keldalam} - tebal_{gap})} Q''_{kel} \quad (11)$$

$$Q''_{gap} = 130,48 \text{ W/cm}^2$$

Diameter kel bagian dalam = $D_{kl} - 2 \times \text{tebal gap} = 10,8 \text{ mm}$

Tebal celah = 0,005 cm

Konduktivitas Helium = $0,233 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2\text{ }^\circ\text{C}$

Penurunan temperatur pada gap:

$$\Delta T_G = \frac{Q''_{gap} \times tebal_{gap}}{K_{He}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\Delta T_G = 280 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Suhu bahan bakar luar} = T_{KD} + \Delta T_G = 655 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kenaikan suhu pellet UO_2

$$\Delta T_u = \frac{Q'' \cdot d^2}{16K} \quad (13)$$

dimana:

$$Q'' = 56,3 \text{ MW/m}^3$$

$$d = 1,08 - 0,005 = 1,07 \text{ cm} = 1,07 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$K = 0,002161 \text{ kW/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_u = 186,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Suhu pusat bahan bakar } T_{U1} = 186,4 + 655 = 841,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

VERIFIKASI PERHITUNGAN PENURUNAN TEKANAN KANAL PENDINGIN

Penurunan tekanan pada kanal BWR-6 dihitung dengan persamaan

$$\Delta P = \Delta P_{acc} + \Delta P_{gravitasi} + \Delta P_{gesekan} \quad \dots\dots(14)$$

Dalam perhitungan ini digunakan data sebagai berikut (lihat gb.4)

Susunan bahan bakar 8x8, Square Pitch

Diameter pin = 12,27 mm

Pitch = 16,2 mm

Laju lair pendingin lewat kanal = 0,29 kg/det

Panjang bahan bakar aktif = 3,81 m

Temperatur masukan = 278 °C

Teakanan = 7,2 MPa = 1058,4 Psi

Temperatur jenuh = 288 °C

Kualitas uap keluar = 14,6 %

$$\Delta P_{acc} = \left\{ \left[\frac{(1-X)^2}{(1-\alpha)\rho_f} + \frac{X^2}{\rho_g} - \left(\frac{1}{\rho_g} \right) \right] G^2 m \right. \quad (15)$$

Kenaikan suhu pelet UO_2 Dimana :

$$\text{Luas kanal (A)} = (\text{Pitch})^2 - (p/4) D^2 = 1,442 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Laju alir per satuan luas (G_m) = $1,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^2\text{dt}$

$$D_e = (4 \times A) / \text{perimeter basah} = 4A/pD = 0,01496 \text{ m}$$

$$R_e = (G_m D_e) / \mu = 2,778 \times 10^5$$

$$f = 0,184 / R_e^{0,2} = 0,0149$$

Pada kondisi masuk teras pendingin masih sub cooled pada ;

$$T = 278 \text{ }^\circ\text{C} \text{ dan } \rho_l = 752,56 \text{ kg/m}^3$$

Jika data-data tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (16);

$$\text{maka } \Delta P_{acc} = 13,6 \text{ kPa} = 0,136 \text{ Bar.}$$

$$\Delta P_{ges} = \frac{G^2 m}{D_e} \left\{ L + \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \left[X_{ave} (Z_{out} - Z_B) \right] \right. \quad 16$$

dimana :

$$\text{Panjang bahan bakar aktif (L)} = 3,81 \text{ m}$$

$$\text{Panjang mulai mendidih (Z}_B\text{)} = -0,793 \text{ m}$$

$$X_{ave} = (X_{inp} + X_{out}) / 2$$

$$X_r = (X_{out} - X_{in}) / 2$$

$$X_{out} = 0,146$$

$$f = 0,01467$$

$$D_e = 0,01496 \text{ m}$$

Sebelum persamaan (18) dihitung harus dihitung dahulu harga kualitas air pada posisi Z = 1,8 m dengan persamaan di bawah ini.

$$X(Z) = X_{inp} + \frac{h_{inp} - h_{out}}{h_{fg}} + \frac{q'}{2mh_{fg}} \left(\sin \frac{\pi Z}{L} + 1 \right) \quad (17)$$

dimana : h_{in} , h_{out} h_{fg} dihitung pada tekanan $P = 7,2$ MPa, $T = 288$ °C

$$X(z) = X_{in} = -0,03556$$

Jika besaran-besaran tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (16) didapat :

$$\Delta P_{ges} = 19,8 \text{ kPa} = 0,198 \text{ bar}$$

$$\Delta P_{gravitasi} = \rho_f gL - (\rho_f - \rho_g)g\{X_f(Z_{out} - Z_B) + (X_{ave} - \frac{X_f - X'}{X''}) \frac{L}{\pi} \frac{1}{(X'^2 - X''^2)^{1/2}} [\tan^{-1} \frac{X' \tan \frac{\pi Z_{out}}{2L} + X'}{(X'^2 - X''^2)^{1/2}}] \dots \dots \dots (18)$$

dimana : ρ_f dan ρ_g ditentukan pada tekanan $P = 7,2$ MPa dan $T = 288$ °C

$$X' = X_{ave} + \rho_g/\rho_f (1 - X_{ave}) = 0,1036$$

$$X'' = (1 - r_g/r_f) X_r = 0,0862$$

Jika besaran-besaran yang telah ada dimasukkan pada rumus (18) didapat :

$$\Delta P_{gravitasi} = 12,3 \text{ kPa} = 0,123 \text{ bar}$$

$$\Delta P = \Delta P_{acc} + \Delta P_{ges} + \Delta P_{gravitasi}$$

$$\Delta P = 0,45 \text{ bar}$$

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil perbandingan antara parameter disain BWR-6 yang dihitung, dengan parameter disain dari vendor terdapat kesamaan, dan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Dengan mengetahui perhitungan parameter disain BWR-6 didapat nilai tambah dalam penguasaan teknologi untuk PLTN jenis BWR.

Perhitungan parameter disain ini tentu saja harus dikembangkan lebih lanjut dengan analisis LOCA dengan menggunakan paket program yang ada di BATAN

No	Parameter disain BWR-6	Dari vendor (GE)	Hasil Verifikasi
1	Laju alir pendingin teras	13229,8 kg/s	12704,4 kg/s
2	Laju alir uap	1940,4 kg/s	2318,4 kg/s
3	Jumlah bundel bahan bakar	832	832
4	Diameter teras	2,74 m	2,74 m
5	Panjang bahan bakar aktif	3,8 m	3,8 m
6	Panjang mulai pendidihan	-0,793 m	-0,793 m
7	Suhu kelongsong	293 °C	296 °C
8	Penurunan tekanan pada kanal pendingin	$5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$	$4,5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$

DAFTAR PUSTAKA

- Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi "Nuclear Systems I Thermal Hydraulic Fundamentals.
- El-Wakil "Nuclear Heat Transport" Ther American Nuclear Society La Grange Park, Illinois, 1978.
- 3. Joel Weisman "Elements Of Nuclear Reactor Design" Robert E. Kriger Drive, Florida.
- 4. Erik S. Pederson, "Nuclear Power", ANN Arbor Science, Michigan, 1980

DISKUSI

Pertanyaan : **M. Saleh Kasim**

Mengapa laju alir uap ternyata berbeda jauh dibanding dengan hasil dari vendor. Parameter apa an bagaimana bisa terjadi demikian ? Mohon penjelasan.

Jawaban

Perbedaan pada laju alir uap perhitungan vendor dan kami, karena data enthalpi [ada tekanan 1054 psia T= 288 °C, yang kami gunakan dalam steam table tidak sama.

2. Pertanyaan : Pompa mana yang mengatasi $\Delta P = \Delta P_{ace} + \Delta P_{grow} + \Delta P_{gesek}$

Jawaban : **Utaja**

Dalam disain, daya pompa pendingin BWR harus dapat mengatasi ΔP di kanal pendingin bahan bakar.

3. Pertanyaan : **Tedjasari**

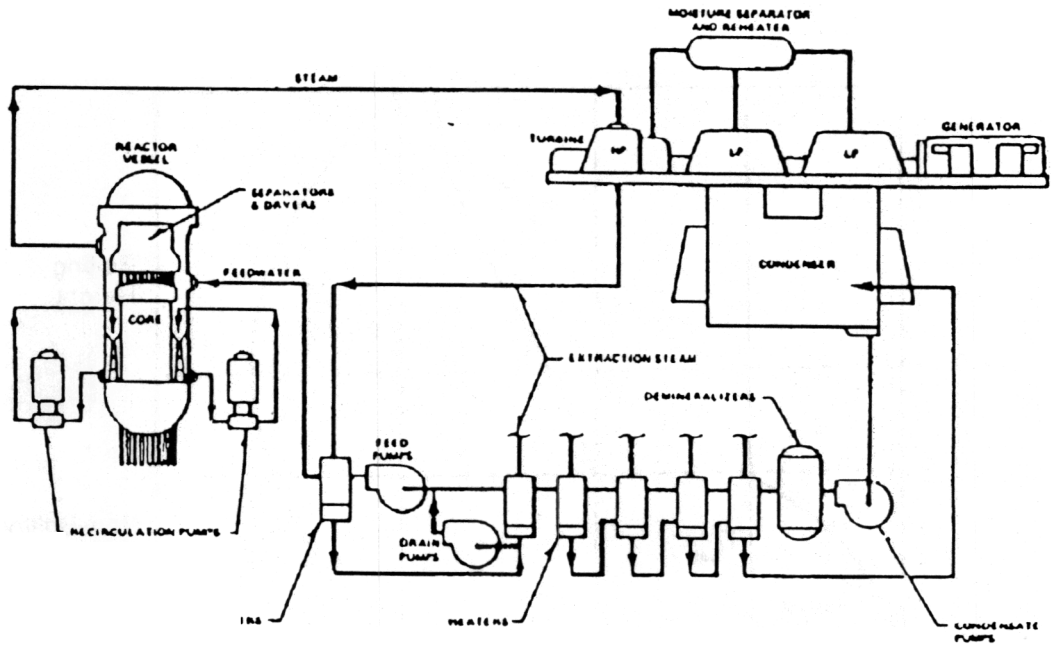
Mengapa yang dipilih disain BWR-6. Kalau PWR bagaimana?

Hasil / perbandingan dari disain BWR & PWR bagaimana ?

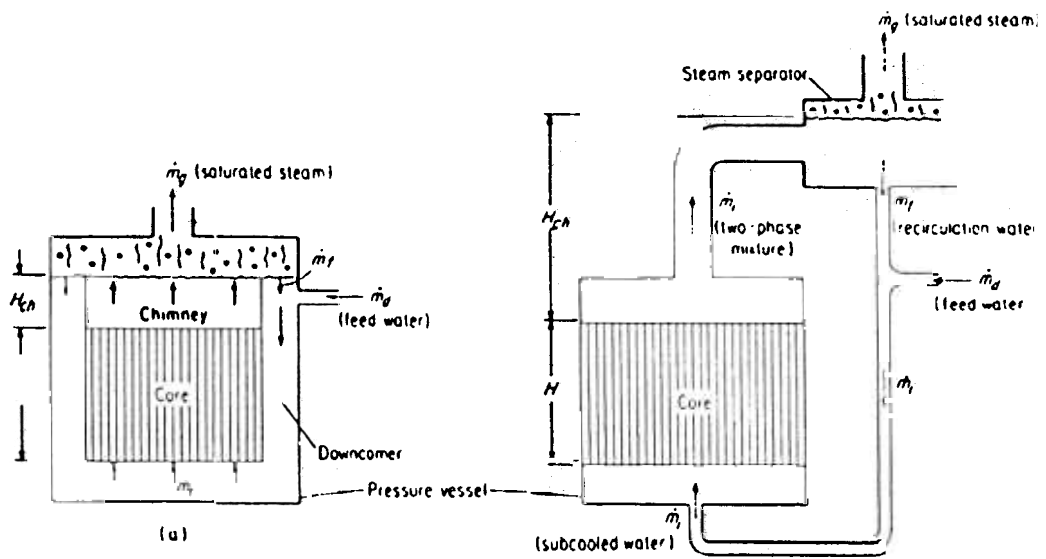
Jawaban :

Umumnya jenis PLTN yang telah beroperasi di dunia adalah jenis PWR dan BWR, kecuali di canada, dan dipilih BWR karena sebelumnya kami telah mengerjakan perhitungan verifikasi disain untuk PWR. Tentu saja ada beberapa perbedaan .

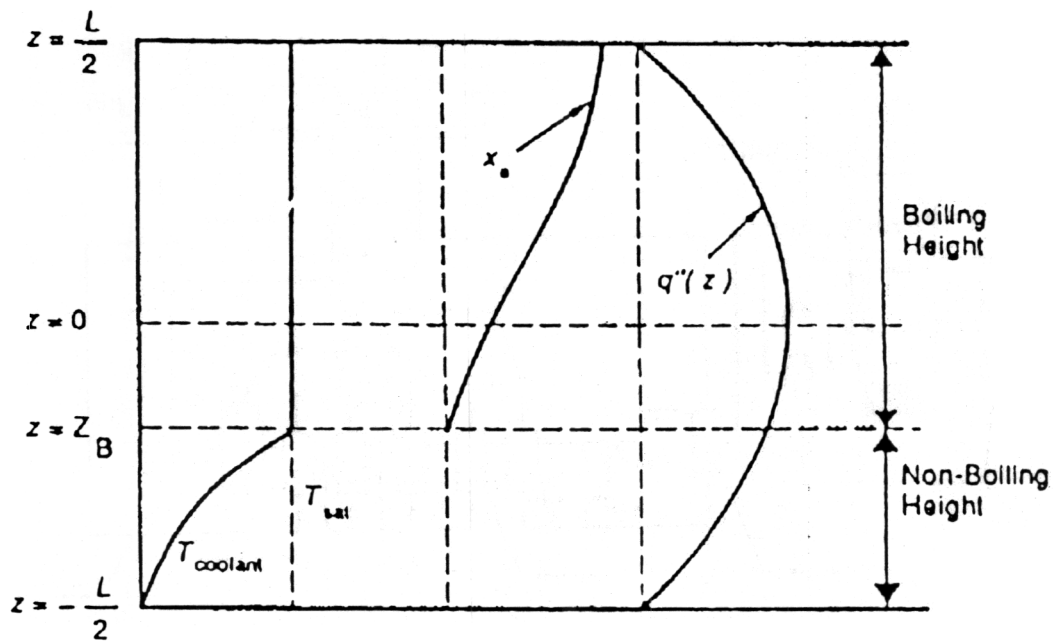
Contoh : Tekanan loop BWR = 1054 Psia, PWR = 2250 Psia.



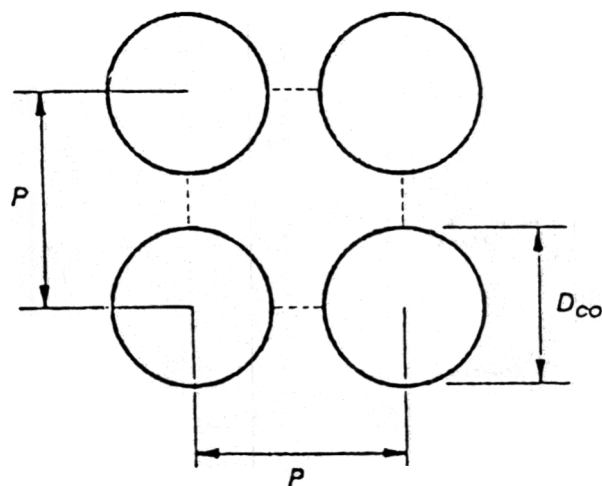
Gambar 1. Diagram alir BWR-6



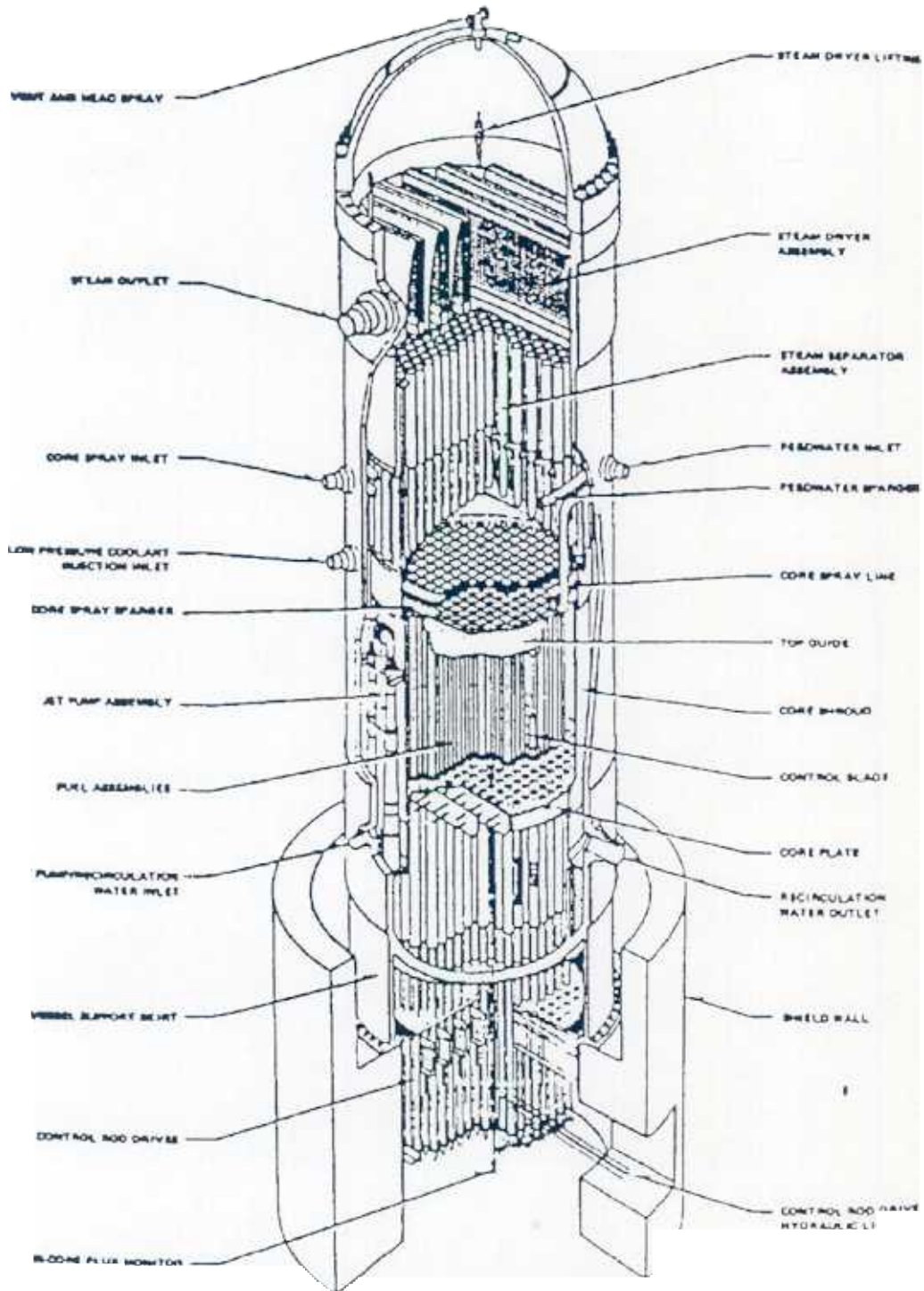
Gambar 2. Laju alir dalam BWR-6
 a. Sirkulasi dalam
 b. Sirkulasi luar



Gambar 3. Profil suhu pendingin BWR-6 dalam kondisi mendidih dan tidak mendidih



Gambar 4. Saluran pendingin yang ditinjau dalam perhitungan penurunan tekanan



Gambar Beja dan itan