

## ANALISIS PENGARUH PANJANG BAHAN BAKAR DAN RAPAT DAYA PADA TINGGI CEROBONG BWR SEDERHANA

Utaja\*  
R. Indrawanto\*\*  
Mairing. MP\*

\* Pusat Perangkat Nuklir dan Rekayasa  
\*\* Pusat Reaktor Serba Guna

### ABSTRAK

Tinggi Cerobong BWR SEDERHANA (SBWR) dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain panjang bahan bakar dan rapat daya. Telah dilakukan analisis pengaruh rapat daya dan panjang bahan bakar terhadap tinggi cerobong BWR sederhana. Tinggi cerobong akan menentukan ukuran bangunan dan dengan begitu juga harga suatu PLTN. Analisis dilakukan dengan metoda kesetimbangan antara panas yang dilepaskan bahan bakar dengan panas yang diterima air dan kesetimbangan antara gaya gesek aliran dengan gaya pemaksa aliran yang berasal dari perbedaan masa jenis dalam aliran satu dimensi. Dari analisis didapatkan hasil, bahwa makin besar rapat daya serta makin panjang bahan bakar, akan semakin tinggi cerobong yang diperlukan. Untuk itu diperlukan kompromi antara rapat daya, panjang bahan bakar dan ukuran tinggi cerobong yang kurang dari 10 meter.

### ABSTRACT

Analysis of the effect of fuel length and core power density on the chimney height of a SBWR. The SBWR's chimney height is affected by many parameters especially fuel length and core power density. The analysis was done on the effects of fuel length and power density to chimney height of SBWR. The chimney height will determine the building size and ultimately the NPP cost. The analysis is done by the balance method between the fuel heat released and the heat absorbed by water and the balance between the flow friction and the driving force caused by mass density different in one dimensional flow. From these analysis it is found that the higher the core power density and the longer the fuel length the higher chimney is required. The compromise is needed between power density, fuel length and chimney height.

### I. PENDAHULUAN

BWR sederhana menerapkan pengambilan panas dengan sirkulasi alam. Sirkulasi alam ini dibangkitkan dengan memasang cerobong (*chimney*) di atas teras dengan tinggi tertentu, sehingga dicapai kompromi terbaik antara tingkat keselamatan, daya reaktor serta harga PLTN. Dua parameter yang sangat berpengaruh pada kompromi tersebut adalah rapat daya dan panjang bahan bakar. Untuk itu dilakukan analisis pengaruh kerapatan daya dan panjang bahan bakar terhadap tinggi cerobong. Pembahasan serupa pernah diuraikan [2], tetapi analisis rinci tidak disampaikan. Pada acuan 2 ditunjukkan hasil analisis yang

berupa grafik tinggi cerobong vs rapat daya maupun panjang bahan bakar. Pada acuan 5 ditunjukkan panjang cerobong tetapi analisisnya tidak disampaikan.

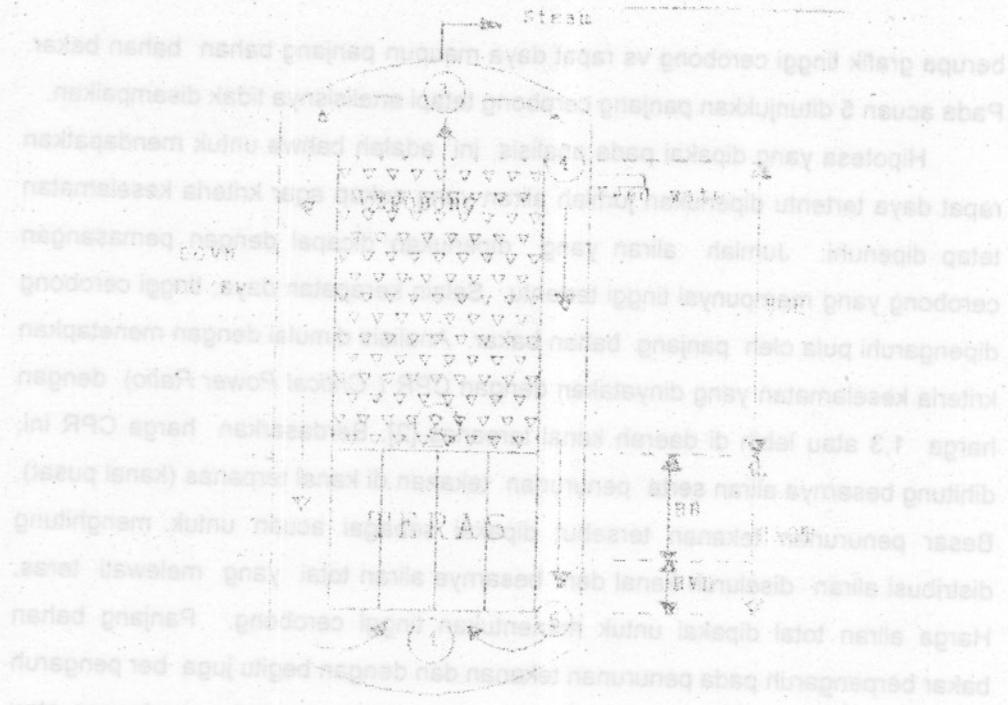
Hipotesa yang dipakai pada analisis ini adalah bahwa untuk mendapatkan rapat daya tertentu diperlukan jumlah aliran yang cukup agar kriteria keselamatan tetap dipenuhi. Jumlah aliran yang diperlukan dicapai dengan pemasangan cerobong yang mempunyai tinggi tertentu. Selain kerapatan daya, tinggi cerobong dipengaruhi pula oleh panjang bahan bakar. Analisis dimulai dengan menetapkan kriteria keselamatan yang dinyatakan dengan CPR ( *Critical Power Ratio*) dengan harga 1,3 atau lebih di daerah kanal terpanas [2]. Berdasarkan harga CPR ini, dihitung besarnya aliran serta penurunan tekanan di kanal terpanas (kanal pusat). Besar penurunan tekanan tersebut dipakai sebagai acuan untuk menghitung distribusi aliran diseluruh kanal dan besarnya aliran total yang melewati teras. Harga aliran total dipakai untuk menentukan tinggi cerobong. Panjang bahan bakar berpengaruh pada penurunan tekanan dan dengan begitu juga berpengaruh pada tinggi cerobong. Perhitungan di atas memerlukan langkah perulangan atau iterasi yang besar, sehingga diperlukan komputer. Untuk itu dibuat program yang alur logikanya diuraikan pada Bab III. Hasil analisis berupa hubungan antara tinggi cerobong dan rapat daya untuk berbagai panjang bahan bakar dan hubungan antara tinggi cerobong dan panjang bahan bakar untuk berbagai rapat daya.

## II. DASAR TEORI TERMOHIDROLIKA TERAS SBWR

Dalam analisis ini diambil beberapa penyederhanaan untuk mempermudah perhitungan. Beberapa besaran yang disederhanakan yaitu :

1. Distribusi daya ke arah aksial, dianggap berbentuk sinusoida, sedangkan ke arah radial mengikuti fungsi Bessel tingkat nol.
2. Aliran di dalam teras dianggap satu dimensi.
3. Cerobong dianggap berbentuk silinder kosong.
4. Aliran yang dianalisis dalam kondisi tunak.

Susunan dasar dari SBWR, dapat dilihat pada gambar 1 berikut.



**Gambar 1. Susunan Dasar SBWR**

Rangkaian aliran bermula dari titik 1, kemudian menuju titik 2,3,4, 5 dan kembali ke 1. Dari 1 menuju 2, air menyerap panas dari bahan bakar. Di bagian subcooling sepanjang HVH, panas yang diserap dipakai untuk menaikkan suhu air sampai suhu jenuh. Sedangkan di bagian boiling sepanjang HB, panas yang diserap dipakai untuk mengubah bentuk air menjadi uap. Pada bagian cerobong (2 ke 3) tidak ada panas yang diterima, maka fraksi uap tetap. Perbedaan masa jenis pada kolom 1-3 dengan kolom 4 -5, menimbulkan tekanan pemaksa yang mengakibatkan aliran. Dalam kondisi tunak, tekanan pemaksa akan diimbangi tekanan geser yang disebabkan rugi aliran. Aliran yang melewati teras harus cukup besar agar kriteria keselamatan dapat dipenuhi. Untuk itu ditinjau kanal terpanas. Kriteria keselamatan dinyatakan dengan harga Critical Power Rasio (CPR) :

$$\text{CPR} = \frac{\text{Fluks panas kritis}}{\text{Fluks panas lokal}} \quad \dots 1)$$

Fluks panas kritis dihitung berdasarkan formula Hensch - Levy [4]:

Untuk  $X_e \leq X_{e1}$ ,

$$\frac{Q_{cr}}{10^5} = 1,0 \quad \dots 2a)$$

Untuk  $X_{e1} \leq X_{e2}$

$$\frac{Q_{cr}}{10^6} = 1,9 - 3,3 X_{e1} - 0,7 \tanh^2 \left( \frac{36}{10^6} \right) \quad \dots 2b$$

Untuk  $X_{e1} > X_{e2}$

$$\frac{Q_{cr}}{10^6} = 0,6 - 0,7 X_{e1} - 0,09 \tanh^2 \left( \frac{2G}{10^6} \right) \quad \dots 2c$$

dimana :

$$X_{e1} = 0,273 - 0,212 \tanh^2 \left( \frac{2G}{10^6} \right)$$

$$X_{e2} = 0,5 - 0,269 \tanh^2 \left( \frac{3G}{10^6} \right) + 0,0346 \tanh^2 \left( \frac{2G}{10^6} \right)$$

$X_e$  = fraksi uap setempat

G = rapat aliran (lbm/ft<sup>2</sup>.jam)

$Q_{cr}$  = fluks panas kritis (BTU/ft<sup>2</sup>.jam)

Sedangkan fluks panas lokal dihitung berdasarkan asumsi, bahwa ke arah aksial fluks panas mengikuti fungsi sinus. Selain untuk memberikan margin keselamatan dikenakan faktor kelebihan daya (over power) sebesar 1,2 dan hot spot factor sebesar 1,25.

$$f = 1,2 \times 1,25 \times f_0 \sin \left( \frac{\pi X}{HACT + EH} \right) \quad \dots 3$$

dimana :

f = fluks panas lokal (BTU/ft<sup>2</sup>.jam)

$f_0$  = fluks panas puncak (tengah tengah panjang bahan bakar)  
 (BTU/ft<sup>2</sup>.jam)

X = jarak dari ujung bahan bakar (ft)

EH = panjang migrasi neutron (ft)

Harga CPR harus lebih besar atau sama dengan 1,3. Untuk penentuan fraksi uap pada persamaan 2a, 2b dan 2c dipakai asas kesetimbangan panas,

bahwa panas yang dilepaskan bahan bakar akan diterima oleh air. Asas kesetimbangan panas dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$X_e = \frac{4 D}{HFG \cdot D_e^2 \cdot G} \int f dX - \frac{HIN - HO}{HFG} \quad \dots 4)$$

dimana :

- $D_e$  = diameter kanal (ft)
- $D$  = diameter bahan bakar (ft)
- HFG = panas penguapan air pada suhu jenuh (BTU/Lbm)
- HIN = entalpi air jenuh (BTU/lbm)
- HO = entalpi air saat masuk teras (BTU/lbm)

Penentuan rapat aliran  $G$  dilakukan dengan menyelesaikan persamaan 2, 3 dan 4 secara simultan dengan cara coba (trial and error). Penurunan tekanan pada teras atau pada kanal terpanas, dihitung berdasarkan harga rapat aliran  $G$ .

$$\Delta P_{\text{teras}} = \Delta P_{\text{gesekan}} + \sum h_i \gamma_i \quad \dots 5)$$

dimana :

- $\Delta P_{\text{teras}}$  = penurunan tekanan pada teras.
- $\Delta P_{\text{gesekan}}$  = penurunan akibat rugi-rugi aliran teras/kanal terpanas.
- $h_i \gamma_i$  = penurunan tekanan akibat hidrostatik (elevasi).

$$\Delta P_{\text{gesekan}} = \Delta P_{\text{sc}} + \Delta P_{\text{B}} + \Delta P_{\text{ACC}} + \Delta P_{\text{inout}} \quad \dots 5a)$$

dimana :

- $\Delta P_{\text{sc}}$  = tekanan oleh gaya gesek daerah subcooling
- $\Delta P_{\text{B}}$  = tekanan oleh gaya gesek searah boiling
- $\Delta P_{\text{inout}}$  = tekanan hilang pada sisi masuk dan keluar teras
- $\gamma_{\text{sc}}$  = berat jenis rata-rata air di daerah sub cooling
- $\gamma_{\text{B}}$  = berat jenis rata-rata air dan uap air daerah boiling

Suku-suku persamaan 5a dan 5b dapat dilihat pada lampiran 1. Dengan asas kesetimbangan tekanan yang menyatakan bahwa : " tekanan sisi masuk dan tekanan sisi keluar teras untuk seluruh kanal sama", maka dapat dinyatakan

bahwa harga persamaan 5 berlaku untuk seluruh kanal. Harga persamaan 5 bergantung pada rapat aliran dan daya kanal setempat. Daya kanal setempat dinyatakan dengan [1]:

$$P_{\text{kanal}} = P_o J_o \left( \frac{2.405.r}{R_e} \right) \quad \dots(6)$$

sedangkan fraksi uap pada kanal setempat dinyatakan dengan :

$$X_e = \frac{4.P_{\text{kanal}}}{G_k \pi D_k \text{HFG}} - \frac{\text{HIN} - \text{HO}}{\text{HFG}} \quad \dots(7)$$

di mana

$P_{\text{kanal}}$  = daya kanal setempat (BTU/det)

$P_o$  = daya kanal terpanas (BTU/det)

$J_o \left( \frac{2.405.r}{R_e} \right)$  = fungsi Bessel tingkat nol

$r$  = posisi kanal (ft)

$R_e$  = jari jari teras (ft)

$G_k$  = rapat aliran kanal (lbm/ft<sup>2</sup>det)

Total aliran melewati teras dinyatakan dengan persamaan :

$$G_{\text{total}} = \sum G_k \cdot N_k \cdot A_k \quad \dots(8)$$

dimana :

$G_{\text{total}}$  = total aliran (lbm / det)

$A_k$  = luas kanal setempat (ft<sup>2</sup>)

$N_k$  = banyaknya kanal seragam pada posisi ke k

Untuk menentukan tinggi cerobong dipakai asas kesetimbangan antara tekanan pemaksa aliran dengan tekanan akibat rugi-rugi aliran. Tekanan pemaksa timbul akibat perbedaan masa jenis antara kolom 1-3 dan 5 -4 dari gambar 1. Tekanan hidrostatik kolom 1 -3 dapat ditulis

$$P_{1-3} = \gamma_{dc} \text{HVH} + \gamma_B \text{HB} + \gamma_{CH} \text{HCH} \quad \dots(9a)$$

Tekanan hidrostatik kolom 5 - 4 dapat ditulis :

$$P_{5-4} = \gamma_{DC} (HVH + HB + HCH) \quad \dots 9b)$$

Tekanan pemaksa aliran adalah selisih antara  $P_{5-4}$  dengan  $P_{1-3}$ .

$$P_D = P_{5-4} - P_{1-3} \quad \dots 10)$$

dimana :

$\gamma_{CH}$  = berat jenis air + uap didaerah cerobong

$\gamma_{DC}$  = berat jenis air di daerah down comer

$\Delta P_D$  = tekanan pemaksa aliran

$HCH$  = tinggi cerobong

Harga  $\gamma_{CH}$  dipengaruhi oleh total aliran yang didapat dari persamaan 8, dan dinyatakan dengan :

$$\gamma_{ch} = \alpha_e \gamma_g + (1-\alpha_e)\gamma_f \quad \dots 11a)$$

$$\alpha_e = \frac{1}{(1-x_e) + \frac{\psi}{x_e}} \quad \dots 11b)$$

$$x_e = \frac{P_t}{G_{total}} \frac{HIN - HO}{HFG} \quad \dots 11c)$$

dimana :

$x_e$  = fraksi uap rata-rata dalam cerobong

$\psi$  = faktor yang dipengaruhi slip

$\gamma_g$  = berat jenis uap jenuh

$\gamma_f$  = berat jenis air pada suhu jenuh

$P_t$  = daya total teras

$G_{total}$  = aliran total teras

Rugi-rugi total aliran dinyatakan dengan :

$$\Delta P_f = \Delta P_{\text{gesekan}} + \Delta P_{\text{ch}} + \Delta P_{\text{dc}} + \Delta P_x \quad \dots 12)$$

dimana :

$\Delta P_{\text{CH}}$  = rugi rugi gesekan pada cerobong

$\Delta P_{\text{DC}}$  = rugi rugi gesekan pada down comer

$\Delta P_x$  = rugi rugi gesekan pada belokan

Suku-suku  $\Delta P_{\text{CH}}$ ,  $\Delta P_{\text{DC}}$  dan  $\Delta P_x$  dapat dilihat pada lampiran 1. Tinggi cerobong HCH dapat ditentukan dengan memberikan kesetimbangan :

$$\Delta P_D = \Delta P_f \quad \dots 13)$$

Pengaruh panjang bahan bakar (HACT) dan rapatnya pada tinggi cerobong dalam perhitungan diatas sangat dominan, dimana rapat daya diwakili oleh  $G_{\text{total}}$ . Tinggi cerobong HCH sebagai fungsi panjang bahan bakar ataupun rapat daya dapat dilihat pada bab IV tentang hasil dan tinjauan.

### III. PROGRAM KOMPUTER

Penyelesaian persamaan pada bab II, dilakukan dengan metoda coba-coba, dengan perulangan yang tinggi (iterasi tinggi), sehingga untuk itu diperlukan bantuan komputer. Diagram alir (flow chart) dari program dapat dilihat pada lampiran 2. Program ini dibuat dengan bahasa BASIC dan dikompile dengan Power Basic 3.0 [3] serta dirun pada Program dimulai dengan memasukkan besaran ekstrapolasi (AH), Coefisient geseran(CF), faktor puncak radial (PF), jenis formulasi dan dilanjutkan dengan pembacaan data teras. Kemudian dilanjutkan dengan menghitung beberapa besaran fisis reaktor, posisi bundel serta harga fungsi Besselnya dan pembacaan data uap. Dengan memasukkan panjang bahan bakar serta rapat daya, ditentukan rapat aliran secara coba- coba agar kriteria keselamatan  $CPR > 1,3$  di kanal terpanas dipenuhi. Bila harga rapat aliran di kanal terpanas sudah diketahui, maka dihitung penurunan tekanan kanal akibat gesekan dan tekanan hidrostatik. Langkah berikutnya menentukan aliran pada kanal lain dengan acuan penurunan tekanan pada kanal terpanas dan daya pada kanal setempat. Setelah semua aliran pada kanal diketahui, maka program diarahkan untuk menghitung fraksi uap rata rata, berat jenis campuran air dan uap dalam cerobong. Selanjutnya menentukan tinggi cerobong secara coba-coba dengan menentukan kesetimbangan antara tekanan hidrostatik sebagai

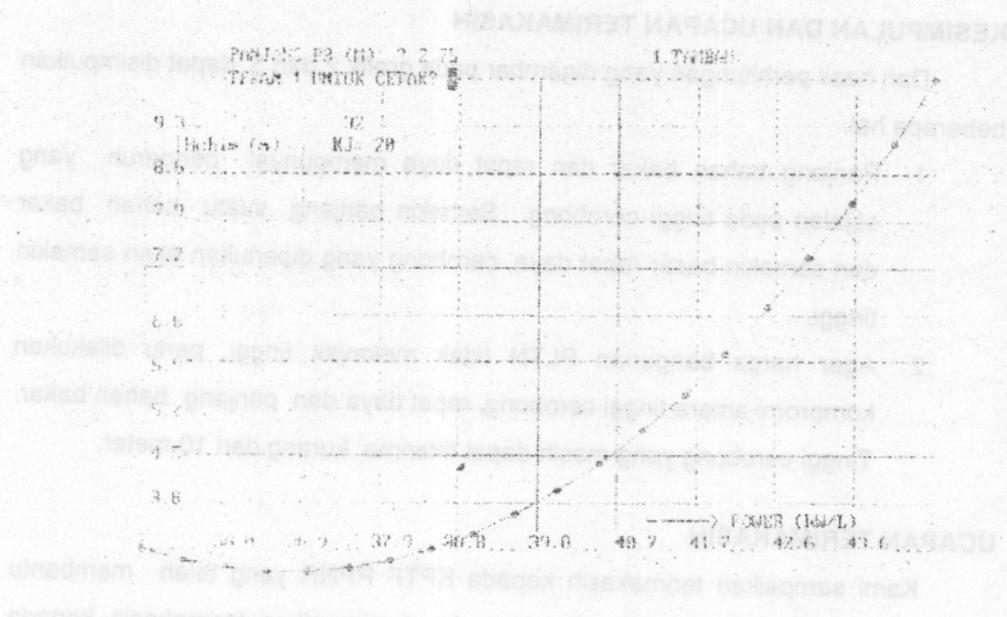
pemaksa aliran dan tekanan akibat rugi aliran pada seluruh lintasan. Proses diatas diulang untuk berbagai rapat daya, sehingga didapat pasangan harga rapat daya dan tinggi cerobong. Dari pesangan harga tersebut, dibuat grafik Rapat daya vs Tinggi cerobong untuk suatu panjang bahan bakar. Hasil pasangan harga rapat daya dan tinggi cerobong dapat dicetak, sehingga harga numeriknya dapat dibaca. Program dapat diarahkan untuk memulai proses kembali pada harga panjang bahan bakar lain.

### HASIL DAN TINJAUAN

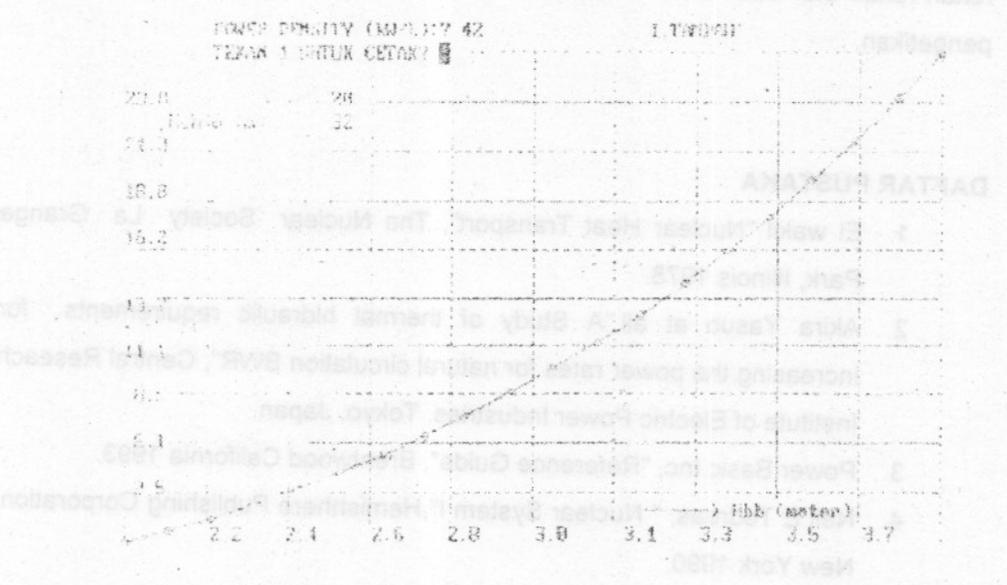
Untuk menunjukkan hasil perhitungan dengan komputer, diambil data teras sebagai berikut :

Ekstrapolasi aksial (AH)	: 0,05
Koefisien gesek (CF)	: 0,015
Radial peaking faktor (PF)	: 1,5
Formulasi fluk kritis	: Hensch - Levy
Pitch bahan bakar	: 0,019558 m
Diameter bahan bakar	: 0,01397 m
Tekanan uap	: 70 kg/cm <sup>2</sup>
Jumlah bundel bahan bakar	: 228
Matriks bahan baka	: 6 x 6
Faktor luas down coner	: 0,5
$\beta$	: 0,7
$C_{orifice}$	: 0,72

Hasil perhitungan yang berupa grafik " Tinggi cerobong Vs Rapat daya" dan "Tinggi cerobong Vs Panjang bahan bakar" dapat dilihat pada gambar 2 dan 3 dihalaman 18. Dari gambar 2 terlihat, semakin besar rapat daya suatu SBWR, cerobong yang dibutuhkan semakin tinggi. Demikian pula pada gambar 3, semakin panjang bahan bakar semakin tinggi pula cerobong yang dibutuhkan. Dalam hal ini pengaruh separator (pemisah air dengan uap) diabaikan. Untuk menentukan tinggi cerobong, panjang bahan bakar dan rapat daya diperlukan suatu kompromi. Hal yang membatasi tinggi cerobong adalah harga bangunan PLTN, semakin tinggi cerobong harga gedung akan semakin mahal.



Gambar 2. Grafik RAPAT LAYA VS TINGGI CEROBONG



Gambar 3. Grafik PANJANG BAHAN BAKAR VS TINGGI CEROBONG

Di sisi lain, semakin tinggi cerobong rapat daya teras semakin tinggi, yang berarti PLTN semakin ekonomis. Ini berarti operasi PLTN semakin murah. Untuk membatasi agar harga bangunan tidak melonjak tinggi, tinggi cerobong dibatasi kurang dari 10 m dan rapat daya di bawah 50 kW/l. Sbrw yang sedang dikembangkan GE memiliki tinggi cerobong antara 7 m sampai 9 m [5] dengan rapat daya 42 kW/L dan panjang bahan bakar 2,7 m. Berdasarkan grafik gambar 2, tinggi cerobogn sebesar 6,10 m.

## KESIMPULAN DAN UCAPAN TERIMAKASIH

Dari hasil perhitungan yang digambar pada grafik 2 dan 3, dapat disimpulkan beberapa hal.

1. Panjang bahan bakar dan rapat daya mempunyai pengaruh yang sejalan pada tinggi cerobong. Semakin panjang suatu bahan bakar dan semakin besar rapat daya, cerobong yang diperlukan akan semakin tinggi.
2. Agar harga bangunan PLTN tidak melonjak tinggi, perlu dilakukan kompromi antara tinggi cerobong, rapat daya dan panjang bahan bakar. Tinggi cerobong yang masih dapat diterima kurang dari 10 meter.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Kami sampaikan terimakasih kepada KPTF PPNR yang telah membantu menyempurnakan makalah ini. Tak lupa kami sampaikan terimakasih kepada rekan-rekan staf baik PPNR maupun di PRSG yang telah membantu melakukan pengetikan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. El wakil "Nuclear Heat Transport", The Nuclear Society La Grange Park, Illinois 1978.
2. Akira Yasuo at all, "A Study of thermal hidraulic requirements for increasing the power rates for natural circulation BWR", Central Reseach Institute of Electric Power Industries, Tokyo, Japan.
3. Power Basic Inc, "Reference Guide", Brentwood California 1993.
4. Neil E Todreas, " Nuclear System I", Hemishhere Publishing Corporation, New York 1990.
5. General Electric, "Training Manual", USA 1994

Lampiran 1.

$$\Delta P_{sc} = f \frac{HVH G^2}{D_{eq} 2g} V_{m1}$$

$$\Delta P_B = f \frac{HB G^2}{D_{eq} 2g} V_{m2} R_B$$

$$\Delta P_{ACC} = 0,5 \frac{G^2 V_{m1}}{2g} R_{ACC}$$

$$\Delta P_{CH} = f \frac{HCH G^2}{D_{eq} 2g} VM3 C_1^2$$

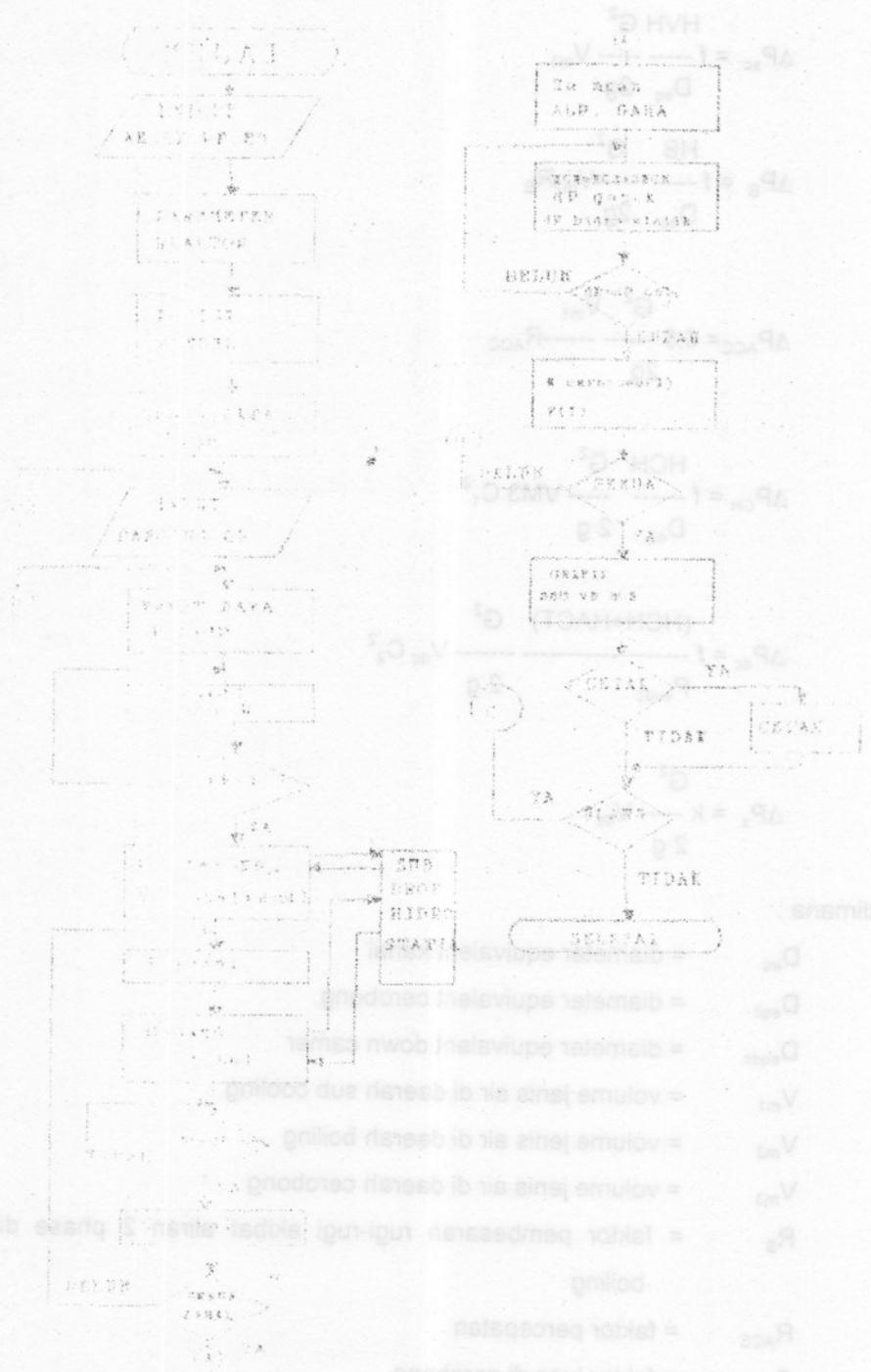
$$\Delta P_{dc} = f \frac{(HCH+HACT) G^2}{P_{eqdc} 2g} V_{dc} C_2^2$$

$$\Delta P_x = k \frac{G^2}{2g} V_{dc}$$

dimana :

- $D_{eq}$  = diameter equivalent kanal
- $D_{eqc}$  = diameter equivalent cerobong
- $D_{eqdc}$  = diameter equivalent down comer
- $V_{m1}$  = volume jenis air di daerah sub cooling
- $V_{m2}$  = volume jenis air di daerah boiling
- $V_{m3}$  = volume jenis air di daerah cerobong
- $R_B$  = faktor pembesaran rugi-rugi akibat aliran 2 phase di daerah boiling
- $R_{ACC}$  = faktor percepatan
- $C_1$  = faktor luas di cerobong
- $C_2$  = faktor luas di down comer
- $K$  = koefisien rugi-rugi lokal
- $V_{DC}$  = volume jenis air di daerah down comer
- $g$  = gravitasi (9,81 m/det<sup>2</sup>)

Lampiran 2.



Gambar 4 DIAGRAM ALIR PROGRAM

## ANALISIS DISTRIBUSI ALIRAN DAN VOID PADA TERAS BWR SIKLUS ALIRAN

### DISKUSI

#### Pertanyaan (Gunandjar) :

1. Berapa range panjang bahan bakar SBWR yang digunakan dan bagaimana pengaruhnya terhadap rapat daya dan tinggi cerobong (Chimney) apakah cukup berarti ?
2. Bagaimana pengaruh tersebut (linier atau tidak) ?

#### Jawaban :

1. Panjang bahan bakar bervariasi antara 2,5 m sampai 3,5 meter. Perubahan tinggi cerobong cukup besar (3 m menjadi 8 m)
2. Pengaruh tidak linier (grafik gambar 3)

#### ABSTRACT

The BWR stability is sensitive to the flow and void distribution. The core flow and void distribution analysis was done. The SBWR flow and void distribution analysis is done by trial and error method with computer assistance. From the analysis we get the result that the channel flow distribution is height at the center channel and diminished at the outer channel for power density 42 kW/m<sup>2</sup> or less. At the power density more than 42 kW/m<sup>2</sup>, there is a fluctuation it is increased at center channel and diminished at the outer channel. The void distribution follow the power distribution it is height at center channel and diminished at the outer channel. The height void at the center channel will decrease the peak power at the center core.

#### I. PENDAHULUAN

Pengubahan sistem siklus aliran dan sistem aliran siklus paksa menjadi sistem siklus alam pada BWR menyebabkan tanggap aliran oleh penguas daya akan berbeda. Hal ini akan menyebabkan distribusi void yang berbeda pula yang selanjutnya akan berpengaruh pada hubungan kinetika, perpindahan panas dan dinamika aliran. Pengaruh void pada reaktivitas dan distribusi void dalam teras nuklir BWR siklus paksa dapat diungkap pada acuan 1 dan 2. BWR siklus alam merupakan teknologi baru yang sedang dikembangkan sehingga belum banyak dikenal. Analisis distribusi aliran dan void didasarkan atas asas kesetimbangan panas dan kesetimbangan tekanan. Panas yang dilepas bahan bakar akan sama dengan panas yang diterima air, sedangkan tekanan akibat perbedaan berat jenis aliran akan diimbangi oleh tekanan akibat gaya gesek. Untuk analisis ini akan dilakukan dahulu aliran di kanal pusat yang dianggap kanal referensi dengan metoda coba-coba sehingga diperoleh koreksi keselamatan. Setelah aliran diketahui, dilanjutkan penentuan tekanan antara sisi