

PENENTUAN DISTRIBUSI SUHU BAHAN BAKAR DAN KELONGSONG REAKTOR DAYA JPSR

Sudarmono
Pusat Reaktor Serba Guna

ABSTRAK

Dalam rangka efisiensi penggunaan bahan bakar dalam bentuk senyawa UO_2 , *Japan Atomic Energy Research Institute* telah mengembangkan suatu konsep reaktor daya tipe *JAERI Passive Safety Reactor (JPSR)*. Dalam pengkajian dari segi keselamatan pengoperasian reaktor, penentuan distribusi suhu bahan bakar dan kelongsong di subkanal terpanas (*typical cell* dan *thimble cell*) penting untuk dilakukan. Penentuan distribusi suhu dilakukan dengan menggunakan Program COBRA-IV-I dengan pemodelan 1/4 bagian teras simetris yang dibagi secara radial menjadi 50 subkanal dan 40 node aksial. Karakteristik fluks panas, akhir pendidihan inti, entalpi dan fraksi lompeng juga telah dilakukan. Hasil maksimum suhu pusat bahan bakar, permukaan bahan bakar dan kelongsong di *typical cell* yaitu masing-masing sebesar 1620,4 °C, 722,8 °C dan 348,6 °C pada ketinggian 1,922 m dan 2,196 m. Lebih jauh pada kondisi tidak tunak didapat hasil maksimum suhu pusat bahan bakar dan kelongsong yaitu sebesar 2015,28 °C dan 550 °C di *typical cell* pada elevasi 2,379 m yang terjadi 3,1 detik setelah pompa pendingin utama gagal.

ABSTRACT

In order to utilize of fuel rod efficiency, a concept of JAERI Passive Safety Reactor (JPSR) has been developed in Japan Atomic Energy Research Institute. In the JPSR design, UO_2 are adopted as a fuel rod. The temperature distribution in the fuel rod and cladding in the hottest channel is a potential limiting design constraint of the JPSR. In the present determination, temperature distribution of the fuel rod and cladding for JPSR were performed using COBRA-IV-I to evaluate the safety margin of the present JPSR design. In this method, the whole core was represented by the 1/4 sector and divided into 50 subchannels and 40 axial nodes. The temperature became maximum at the elevation of 1.922 and 2.196 m in the typical cell under operating condition. The maximum temperature in the center of the fuel rod, surface of the fuel rod and cladding were 1620.4 °C, 722.8 °C and 348.6 °C. The maximum results of temperature in the center of the fuel rod and cladding were 2015.28 °C and 550 °C which were observed at 3.1 second in the typical cell.

PENDAHULUAN

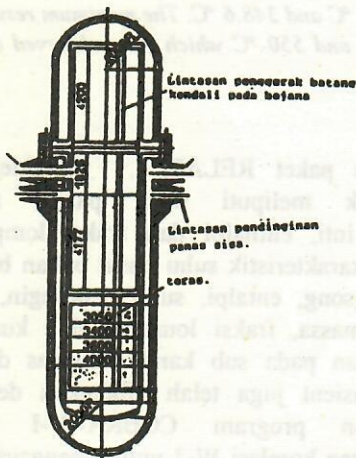
Dalam rangka efisiensi penggunaan bahan bakar UO_2 dengan bentuk silinder pada reaktor daya, *Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)* telah mengembangkan suatu konsep reaktor daya tipe *JAERI Passive Safety Reactor (JPSR)*. Pembangkitan energi konsep JPSR lebih banyak dibatasi oleh keadaan termalnya. Keadaan operasi teras JPSR dan kinerja sistem elemen bakar selalu dimonitor dengan penempatan instrumentasi yang tepat. Demikian juga dalam pemanfaatan energi yang dibangkitkan dalam reaktor JPSR, sistem perpindahan panasnya dirancang sedemikian rupa, sehingga laju pengambilan panasnya adalah sebesar-besarnya untuk menghindari kerusakan elemen bakar (pecah/meleleh). Dengan demikian, penentuan distribusi suhu bahan bakar dan kelongsong di subkanal terpanas adalah penting untuk dilakukan. Penentuan distribusi suhu dilakukan dengan menggunakan program COBRA-IV-I, termasuk didalamnya meliputi korelasi-korelasi termohidraulik *subcool void*, *bulk void model*, *rod friction coefficient* dan *heat transfer* dengan menggunakan masing-masing adalah *Levy*, *EPRI*,

Blasius dan paket RELAP 4. Karakteristik termohidrolis meliputi fluks panas, akhir pendidihan inti, entalpi dan fraksi lompeng. Lebih jauh karakteristik suhu pusat bahan bakar, suhu kelongsong, entalpi, suhu pendingin, laju alir, fluks massa, fraksi lompeng dan kualitas kesetimbangan pada sub kanal terpanas dalam kondisi transient juga telah dilakukan dengan menggunakan program COBRA-IV-I yang dikopel dengan korelasi W-3 untuk mengevaluasi keselamatan dalam pengoperasian reaktor JPSR.

DESKRIPSI KONSEP JAERI PASSIVE SAFETY REACTOR.

Dalam konsep JPSR digunakan bahan bakar dalam bentuk senyawa UO_2 , dengan pengayaan 2%-3%, yang berbentuk pellet, bentuk silinder kecil dengan diameter 0,0095 mm dan panjang 3,66 m yang dimasukkan dalam kelongsong yang terbuat dari bahan *Zircalloy*. Teras konsep JPSR berisikan 145 perangkat elemen bakar, untuk tiap-tiap perangkat elemen bakar berisikan 264 bahan bakar dan 24 batang kendali. Bejana tekan reaktor JPSR ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar 2 menunjukkan konfigurasi perangkat elemen

bakar dan teras. Teras JPSR model LWR terdiri dari 2 untai pressurized Water reactor (PWR), dengan densitas daya teras dikurangi sampai sebesar 75% dibanding pada konvensional PWR. Konfigurasi perangkat elemen bakar termasuk control rod thimbles dan an instrumentation thimble adalah sama seperti pada konvensional PWR, yaitu dengan model perangkat elemen bakar 17 x 17. Untuk mengkompensasi reaktivitas lebih akibat eliminasi dari sistem pengatur kimiawi, maka batang kendali cluster perlu dipasang pada semua perangkat elemen bakar. Sebagai pengganti sistem pendingin darurat, JPSR menggunakan sistem pasif. Sistem pasif terdiri dari dua akumulator, dua sistem injeksi secara gravitasi dan dua CMT (Core make up tank). Teras reaktor JPSR dirancang bangun dengan koefisien rapat reaktivitas besar, sehingga larutan boron dapat dieliminasi dan laju pembangkitan panas bersifat linier rendah. Hal ini digunakan untuk memperkecil efek Doppler karena perubahan densitas fluida. Demikian juga sistem tekanan JPSR dibuat 1,5 kali lebih besar dari sistem tekanan konvensional PWR.



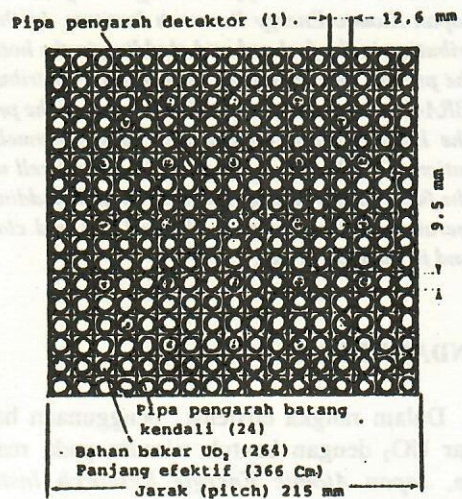
Gambar 1. Bejana tekan reaktor JPSR

TATA KERJA

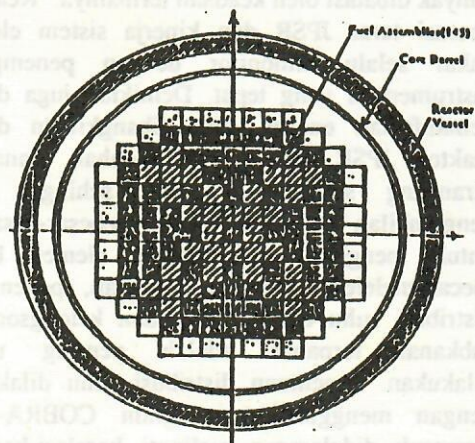
Pemodelan

Membuat pemodelan nodal subkanal dengan membagi teras menjadi 1/4 bagian teras yang simetris dan dibagi dalam 50 sub kanal dan 40 nodal secara aksial. Gambar 3a dan 3b masing-masing adalah skematik nodal dan faktor puncak daya radial. Gambar 4 adalah nodal aksial, lokasi grid spacer dan distribusi daya aksial yang digunakan sebagai data masukan paket program. Besarnya faktor puncak daya

radial diperoleh berdasarkan perhitungan neutronik yaitu dengan nilai faktor puncak daya radial akibat efek batang kendali jatuh yaitu sebesar 1,616, engineering hot channel factor sebesar 1,03, nuclear uncertainty faktor sebesar 1,05 dan faktor puncak daya radial merata batang bahan bakar terpanas untuk batang bahan bakar terpanas didalam perangkat terpanas yaitu sebesar 1,2 sehingga didapat hasil faktor puncak daya radial dalam batang bahan bakar terpanas $F(r)$ yaitu sebesar $[F(r)] = 2,097$. Subkanal 1 dan 6 pada Gambar 3b adalah subkanal terpanas. Subkanal 6 dinamakan thimble cell yang dikelilingi oleh sebuah batang kendali, dua buah batang bahan bakar, dan satu batang bahan bakar terpanas. Subkanal 1 dinamakan typical cell yang dikelilingi 3 batang bahan bakar dan satu batang bahan bakar terpanas. Dalam perhitungan, besarnya faktor puncak daya aksial sebesar 1,29 juga ditentukan dari perhitungan neutronik.



Konfigurasi perangkat elemen bakar



Konfigurasi teras.

Gambar 2. konfigurasi perangkat elemen bakar dan konfigurasi teras

Parameter-parameter geometri

- A. Panjang kanal pendingin yaitu sebesar 3,66 meter.
- B. Luas tampang lintang aliran untuk semua kanal pendingin di *typical cell*, *thimble cell*, *side cell* dan perangkat elemen bakar masing-masing sebesar 0,1362 in², 0,1184 in², 0,1184 in² dan 37,58 in².
- C. Perimeter kering untuk setiap kanal, di *typical cell*, *thimble cell*, *side cell* dan perangkat elemen bakar masing-masing sebesar 1,175 in, 0,881 in, 0,588 in dan 310,2 in.
- D. Perimeter basah untuk setiap kanal di *typical cell*, *thimble cell*, *side cell* dan perangkat elemen bakar masing-masing sebesar 1,175 in; 1,258 in; 1,084 in dan 347,9 in.
- E. Lebar gap antara batang bahan bakar dan dinding perangkat elemen bakar, lebar gap antara dua batang bahan bakar, dan lebar gap antara dua perangkat batang bahan bakar adalah masing-masing sebesar 0,093 in, 0,122 in dan 0,0315 in.

Pusat teras						
14 0.60	13 (1.37)	12 (0.72)	11 (0.54)	10 (0.54)	9 (0.60)	
21 1.37	20 (1.41)	19 (1.18)	18 (0.65)	17 (0.63)	16 (0.64)	15 (1.40)
28 0.72	27 (1.18)	26 (0.96)	25 (1.17)	24 (0.83)	23 (0.75)	22 (1.35)
35 0.54	34 (0.65)	33 (1.17)	32 (1.37)	31 (1.27)	30 (0.89)	29 (1.10)
41 0.54	40 (0.63)	39 (0.83)	38 (1.27)	37 (0.91)	36 (1.17)	
46 0.60	45 (0.64)	44 (0.75)	43 (0.89)	42 (1.17)		
50 1.60	49 (1.40)	48 (1.35)	47 (1.16)	(1/4 bagian teras)		

Jumlah sub kanal
(faktor daya)

Gambar 3.a. Skematik nodal model 1/4 bagian teras dan faktor radial

Koefisien campuran turbulen

Berdasarkan sensitivitas studi oleh Reddy dan Fighetti (10), koefisien campuran turbulen pengaruhnya dominan pada efek kondisi aliran lokal. Dalam perhitungan ini, ia sebesar 0,038 adalah sama seperti yang digunakan pada analisis keselamatan reaktor daya Takahama no.3 dan 4.

Konduktivitas termal bahan bakar

Data masukan konduktivitas termal diperoleh dengan formulasi sebagai berikut :

$$K_{UO_2}(T) = K_{UO_2}(T_0) \{ 1 + C_1(T-T_0) + C_2(T-T_0)^2 + C_3(T-T_0)^3 \}$$

dimana :

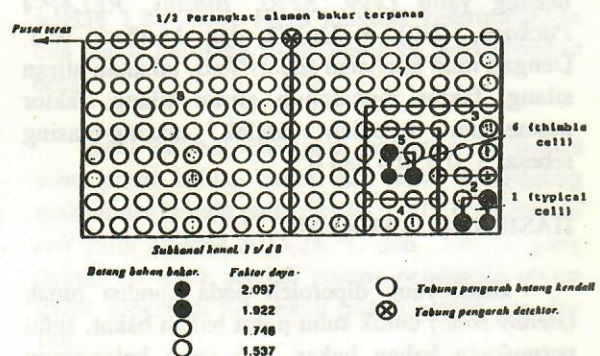
$K_{UO_2}(T_0)$ adalah konduktivitas termal bahan bakar pada suhu 1898 °F, yaitu sebesar 2,89 Btu/hr.ft. °F, C_1 , C_2 dan C_3 adalah konstanta yang besarnya masing-masing adalah $-3,7379 \times 10^{-4}$, $2,3302 \times 10^{-7}$ dan $-2,9043 \times 10^{-11}$.

Koefisien perpindahan panas celah antara bahan bakar dan kelongsong (h_{gap}).

Data masukan koefisien perpindahan panas gap antara bahan bakar dan kelongsong diperoleh dari model TRAC-PF1 dengan menggunakan formulasi sebagai berikut :

$$h_{gap} = h_{gas} + h_{kontak} + h_{rad}$$

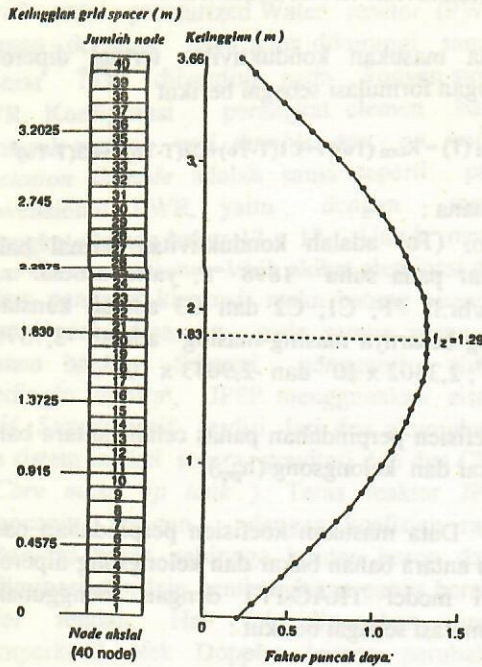
dimana koefisien perpindahan panas gas (h_{gas}), koefisien perpindahan panas kontak (h_{kontak}), dan koefisien perpindahan panas (h_{rad}) adalah masing-masing sebesar 2743,5 w/m².k; 0 w/m².k, dan 71,7 w/m².k. Sehingga h_{gap} diperoleh sebesar 495,8 Btu/hr.ft². °F.



Gambar 3.b. Skematik nodal radial dan faktor puncak radial

Kondisi awal

Data masukan kondisi awal yang digunakan dalam program COBRA-IV-I adalah sistem tekanan, suhu pendingin, laju aliran massa pendingin, dan fluks panas permukaan merata yang masing-masing sebesar 2269,2 Psi, 545,3 °F, 1,678 Mlb/hr.ft², dan 0,4433 MWt/m².



Gambar 4. Nodal aksial, lokasi grid spacer, Distribusi daya aksial

Korelasi termohidrolik

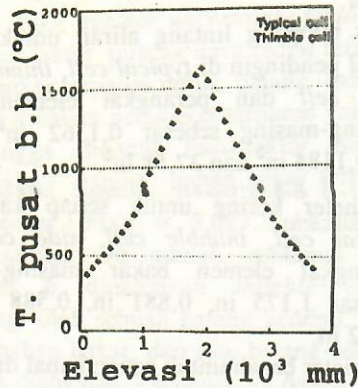
Korelasi termohidrolik yang digunakan masing-masing adalah model *subcool void*, *model bulk void*, *Koefisien rod friction*, *Blasius*, Korelasi perpindahan panas, Kecepatan aliran secara aksial dan Korelasi fluks panas kritis dengan masing-masing yaitu *Levy*, *EPRI*, *Blasius*, *RELAP-4 Package*, $(U(j) + U(i))/2$ dan korelasi *W-3*. Dengan nilai koefisien *spacer loss*, tahanan aliran silang, faktor momentum aliran silang, faktor momentum turbulen adalah masing-masing sebesar 1; 0,5; 0,5 dan 0.

HASIL DAN BAHASAN

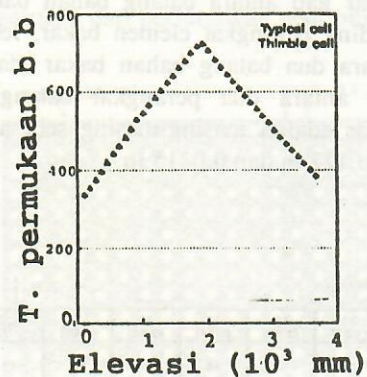
Hasil yang diperoleh pada kondisi tunak (*steady state*) untuk suhu pusat bahan bakar, suhu permukaan bahan bakar, dan suhu kelongsong bahan bakar terhadap elevasi di *typical cell* dan *thimble cell* dengan menggunakan program COBRA-IV-I adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7.

Hasil suhu maksimum masing-masing di *typical cell* yaitu sebesar 1620,4 °C, 722,8 °C dan 348,6 °C pada ketinggian 1,922 dan 2,196 m. Hasil yang diperoleh di *thimble cell* yaitu sebesar 1620,5 °C, 723,17 °C dan 348,7 °C pada ketinggian 1,922 m dan 2,105 m. Besar suhu maksimum yang diperoleh masih jauh lebih kecil

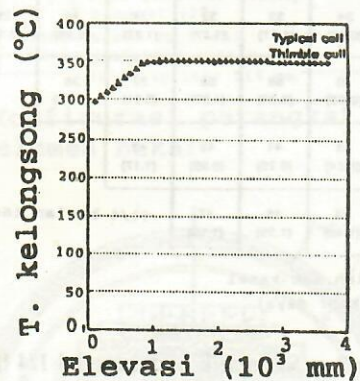
dari batas maksimum yang diijinkan yaitu sebesar 2840 °C⁹.



Gambar 5. Hasil T pusat BB vs elevasi



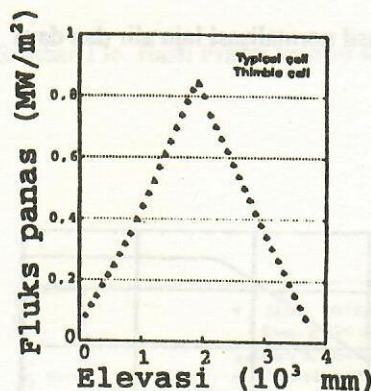
Gambar 6. Hasil T permukaan BB vs elevasi



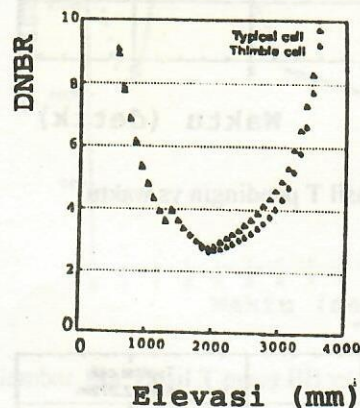
Gambar 7. Hasil T kelongsong BB vs elevasi

Hasil karakteristik fluks panas, akhir pendidihan inti, dan enthalpi yang diperoleh dengan menggunakan program COBRA IV-I ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10. Untuk distribusi fraksi lompeng di sepanjang aksial batang bahan bakar terpanas tidak terjadi. Hasil maksimum fluks panas di *typical cell* yaitu sebesar 0,8367 Mw / m² pada elevasi 1,922 m. Hasil maksimum yang diper-

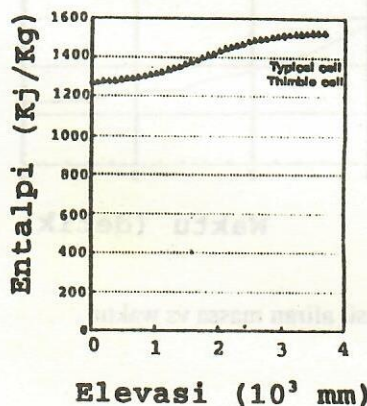
oleh di *thimble cell* yaitu sebesar 0,8350 Mw / m² pada elevasi 1,922 m. Hasil minimum akhir pendidihan inti di *typical cell* yaitu sebesar 2,602 pada 1,922 m. Hasil minimum yang diperoleh di *thimble cell* yaitu sebesar 2,694 pada elevasi 1,922 m. Hasil ini masih jauh lebih besar dari batas minimum yang diijinkan yaitu 1,3 pada konvensional PWR dan juga hasil maksimum enthalpi di *typical cell* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 yaitu sebesar 1517,61 Kj/Kg pada elevasi 3,660 m. Hasil maksimum yang diperoleh di *thimble cell* yaitu sebesar 1523,54 Kj/Kg pada elevasi 3,660 m.



Gambar 8. Hasil fluks panas vs elevasi



Gambar 9. Hasil DNBR vs elevasi



Gambar 10. Hasil Entalpi vs elevasi

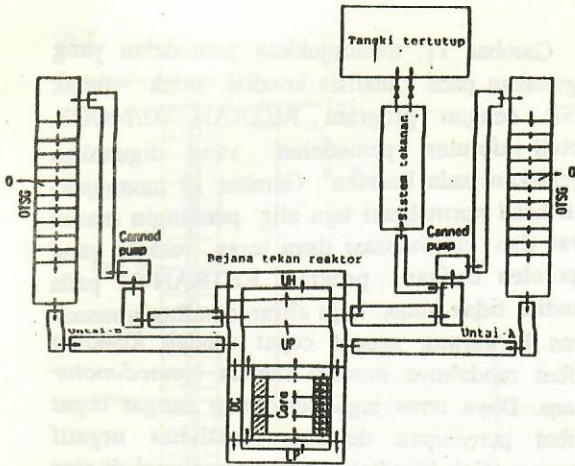
Gambar 11, menunjukkan pemodelan yang digunakan pada analisis kondisi tidak tunak JPSR dengan program RETRAN 02/MOD3. Detail informasi pemodelan yang digunakan dijelaskan pada Pustaka⁸. Gambar 12 menunjukkan hasil normalisasi laju alir pendingin masuk teras dan normalisasi daya teras reaktor yang diperoleh dengan program RETRAN-02 pada kondisi tidak tunak. Laju aliran pendingin masuk teras berkurang sangat cepat setelah kejadian akibat rendahnya momen inersia *canned-motor pump*. Daya teras juga berkurang sangat cepat akibat penyisipan densitas reaktivitas negatif segera setelah kejadian. Hasil normalisasi di atas digunakan sebagai data masukan di dalam Program COBRA-IV-I. Selama kondisi tidak tunak bertambahnya tekanan di dalam sistem pendingin utama adalah kecil, yaitu kurang dari pada 0,2 MPa, akibat besarnya ukuran sistem tekanan. Demikian juga perubahan suhu masuk teras juga kecil selama selang waktu 10 detik, sehingga data masukan untuk parameter tekanan dan suhu pendingin masuk teras dianggap konstan.

Hasil entalpi, suhu pendingin, laju alir, aliran massa, fraksi lompong, dan kualitas kesetimbangan yang terjadi di sub kanal terpanas ditunjukkan pada Gambar 13a sampai dengan Gambar 13f. Hasil tersebut menunjukkan bahwa besarnya entalpi di subkanal bertambah akibat tidak adanya kesesuaian antara daya dan pendingin, dan suhu pendingin menjadi jenuh setelah 1,88 detik. Hasil kualitas kesetimbangan dan fraksi lompong yang diperoleh juga semakin besar.

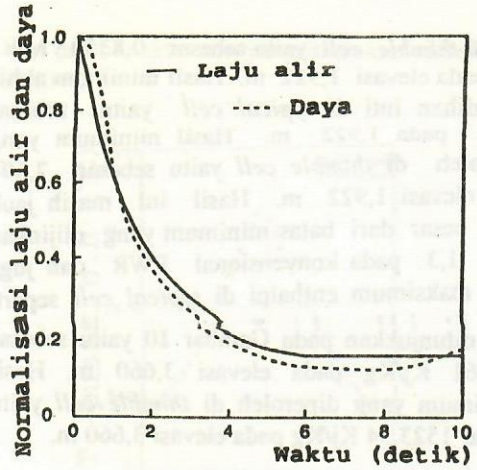
Hasil tersebut lebih jauh menunjukkan bahwa suhu pusat bahan bakar dan suhu kelongsong maksimum berada pada elevasi 2,379 m di *typical cell* yaitu sebesar 2015,28 °C dan 550 °C yang terjadi 3,1 detik setelah pompa pendingin utama gagal, seperti di tunjukkan pada Gambar 14a dan 14b.

SIMPULAN

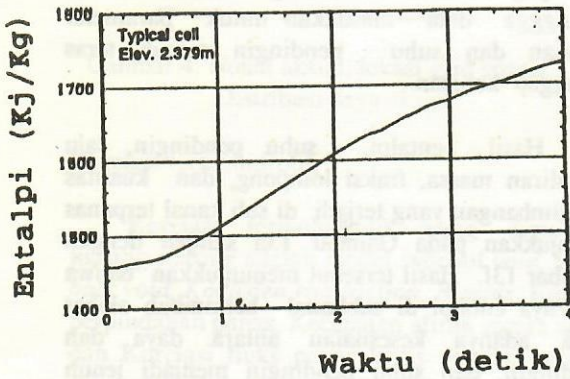
Hasil maksimum suhu pusat bahan bakar dan kelongsong pada kondisi tunak yaitu sebesar 1620,4 °C dan 348,6 °C di *typical cell*. Pada kondisi tidak tunak (pompa pendingin utama gagal) diperoleh besarnya suhu pusat bahan bakar dan kelongsong yaitu sebesar 2015,28 °C dan 550 °C yang terjadi 3,1 detik pada elevasi 2,379 m di *typical cell*. Hal ini disebabkan oleh selain pengaruh injeksi pendingin dari *core make up tank* (CMT) yang cukup juga akibat laju



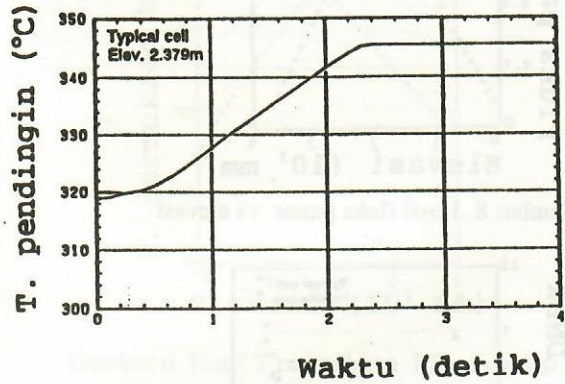
Gambar 11. Pemodelan yang digunakan



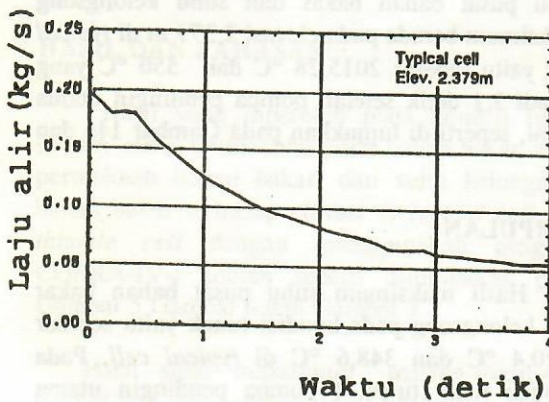
Gambar 12. Hasil normalisasi laju alir dan daya



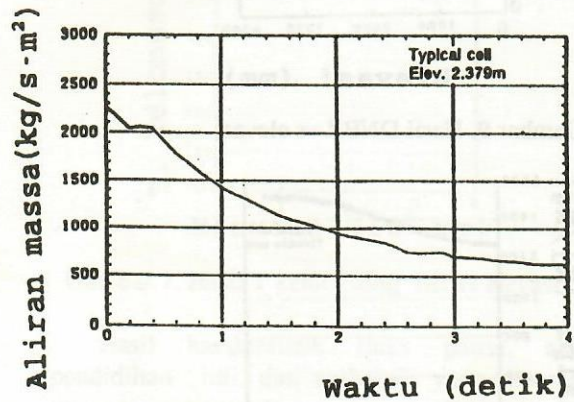
Gambar 13a. Hasil entalpi vs waktu



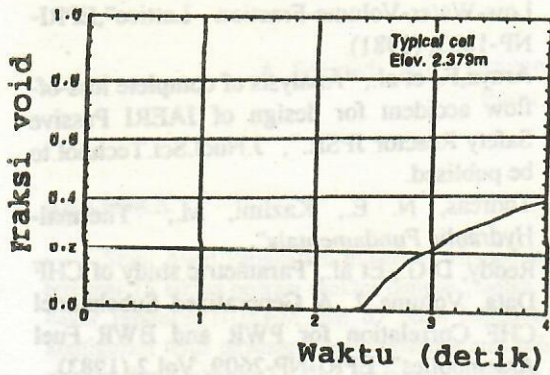
Gambar 13b. Hasil T pendingin vs waktu



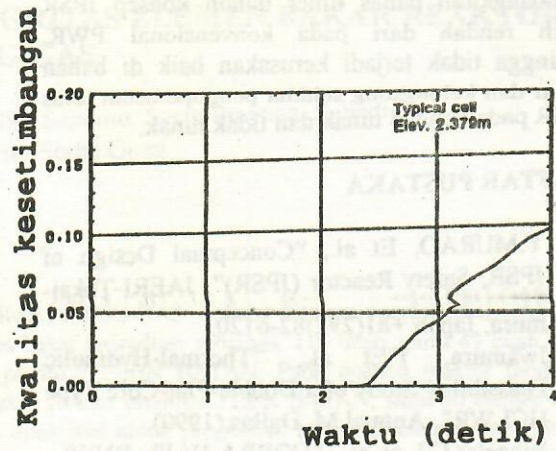
Gambar 13c. hasil Laju alir vs waktu



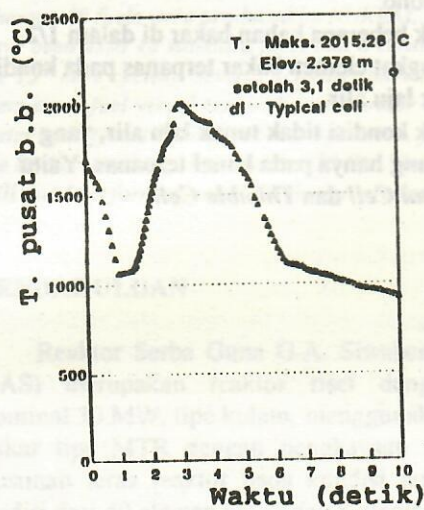
Gambar 13d. hasil aliran massa vs waktu



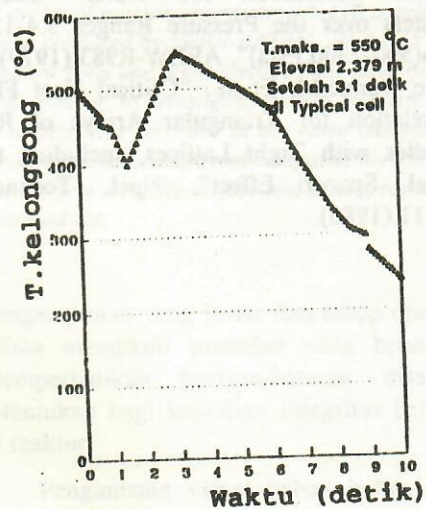
Gambar 13e. Hasil Fraksi void vs waktu



Gambar 13f. Hasil Kwalitas kesetimbangan vs waktu



Gambar 14a. Hasil T pusat BB vs Waktu



Gambar 14b. Hasil T kelongsong BB vs waktu

pembangkitan panas linier dalam konsep JPSR lebih rendah dari pada konvensional PWR, sehingga tidak terjadi kerusakan baik di bahan bakar dan kelongsong selama pengoperasian teras JPSR pada kondisi tunak dan tidak tunak.

DAFTAR PUSTAKA

1. Y.MURAO, Et al., "Conceptual Design of JPSR, Safety Reactor (JPSR)", JAERI-Tokaimura, Japan +81(292)82-6120.
2. Iwamura, T.Et al., "Thermal-Hydraulic Feasibility Study of a Double-Flat-Core Type HCLWR", Annual M. Dallas,(1990).
3. Wheeler,C.L.et al., "COBRA-IV-I", BNWL-1962,(1976).
4. Iwamura,T.Et al., "Evaluation of DNBR under Operational and Accident Conditions for Double-Flat-Core Type HCLWR", J.Nucl.Sci. Technol.,28[1],45,(1991).
5. Bowring,R.W., "WSC-2 : A Subchannel Dryout Correlation for Water -Cooled Clusters over the Pressure Ranges 3.4-15.9 Mpa(500-2300 Psia)", AEEW-R983,(1979).
6. Dalle Donne,M. Et al., "Critical Heat Flux Correlation for Triangular Arrays of Rod Bundles with Tight Lattices, Including the Spiral Spacer Effect", Nucl. Technol., 71,111,(1985).
7. Le Tourneau,B.W.et al., "Critical Heat Flux and Pressurized Water Reactor Design with a Low-Water-Volume-Fraction Lattice",EPRI-NP-1833, (1981).
8. Araya,F., et al., "Analysis of complete loss-of-flow accident for design of JAERI Passive Safety Reactor JPSR.", J.Nucl.Sci.Technol.to be publised.
9. Todreas, N. E., Kazimi, M., "Thermal-Hydraulic Fundamentals".
10. Reddy, D.G., Et al.,"Parametric study of CHF Data, Volume 2. A Generalized Subchannel CHF Correlation for PWR and BWR Fuel Assemblies", EPRI-NP-2609, Vol.2,(1983).

TANYA JAWAB

1. Amil Mardhan:

- Apakah yang anda hitung itu untuk satu bahan bakar saja ?
- Apakah dengan variasi bahan bakar ?

Soedarmono:

- Untuk beberapa bahan bakar di dalam 1/2 perangkat elemen bakar terpanas pada kondisi tunak laju alir.
- Untuk kondisi tidak tunak laju alir, yang dihitung hanya pada kanal terpanas. Yaitu *Typical Cell* dan *Thimble Cell*.