

ANALISIS TERMOHIDROLIKA DISAIN ELEMEN BAKAR MINI  $U_3Si_2$ -AlEndiah Puji Hastuti, Kurnia Putranta \*  
Supardjo \*\*

\*Pusat Reaktor Serba Guna

\*\*Pusat Elemen Bakar Nuklir

## ABSTRAK

**ANALISIS TERMOHIDROLIKA DISAIN ELEMEN BAKAR MINI  $U_3Si_2$ -Al.** Dengan adanya rencana iradiasi elemen bakar mini PEBN di teras RSG GAS maka keselamatan dari segi neutronik dan termohidraulika perlu dianalisis. Setiap model elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al terdiri atas 4 (empat) macam tingkat muat dan berisi 7 (tujuh) segmen, dimasukkan ke dalam sebuah *stringer* yang akan diiradiasi di posisi iradiasi (*irradiation position*) D-9. Elemen bakar mini akan diiradiasi selama 7 siklus untuk memperoleh fraksi bakar (*burnup*) maksimum dan analisis kekuatan bahan pada setiap akhir siklus. Analisis keselamatan disain elemen bakar mini dari segi termohidraulika dilakukan dengan menganggap bahwa seluruh pelat elemen bakar mini memiliki tingkat muat terbesar, yaitu  $5,20 \text{ gU/cm}^3$  dan menggunakan asumsi faktor puncak daya dan laju alir di setiap elemen bakar pada teras kerja tipikal. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan paket program COOLOD-N sedangkan analisis dilakukan pada kondisi terburuk (*worst case condition*).

## ABSTRACT

*The thermallyhydraulic analysis of the  $U_3Si_2$ -Al mini fuel element design. The thermallyhydraulic analysis of the mini fuel element that will be irradiated in RSG-GAS, was done. The mini fuel element consists of mini fuel plates assembled in 7 segments with 4 different uranium loadings. The element will be placed in a stringer to be positioned at irradiation position D-9. The thermallyhydraulic safety analysis was carried out by assuming that all mini fuel plates were loaded at the highest uranium loading (i.e.  $5.20 \text{ g/cm}^3$ ). Mini fuel element will be irradiated along 7 cycles to get maximum burnup and strength material. The nuclear peaking factors and flow rates of the mini fuel element were assumed to be the same with the designed value stated in the SAR of RSG-GAS. The calculation was done by using the computer code COOLOD-N and the analysis was conducted at the worst condition.*

## PENDAHULUAN

Elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al tingkat muat  $2,96 \text{ gU/cm}^3$  dengan pengayaan  $19,75\% U^{235}$  berhasil diproduksi di PEBN, dan telah diiradiasi di RSG-GAS hingga fraksi bakar  $50\%$ . Unjuk kerja elemen bakar selama diiradiasi dan hasil uji pasca iradiasi cukup memuaskan, sehingga mendorong penelitian lanjut untuk pengembangan ke tingkat muat uranium yang lebih tinggi agar reaktivitas teras reaktor dapat ditingkatkan minimal sama seperti penggunaan bahan bakar dengan pengayaan tinggi ( $> 90\% U^{235}$ ).

Pemakaian paduan  $U_3Si_2$  sebagai bahan bakar dispersi dapat mempertinggi tingkat muat hingga  $5,20 \text{ gU/cm}^3$ . Tingkat muat tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan tingkat muat yang dapat dicapai oleh bahan bakar  $U_3O_8$ -Al yang mempunyai tingkat muat maksimum hanya  $3,20 \text{ gU/cm}^3$ .

Percobaan pembuatan dan karakterisasi pelat elemen bakar dispersi  $U_3Si_2$ -Al (uranium terdepleksi) dengan tingkat muat antara  $3,60$  s/d  $5,20 \text{ gU/cm}^3$  telah dilakukan, dan data yang diperoleh memenuhi kriteria elemen bakar RSG-GAS. Pengujian karakteristik iradiasi akan dilakukan pada penelitian

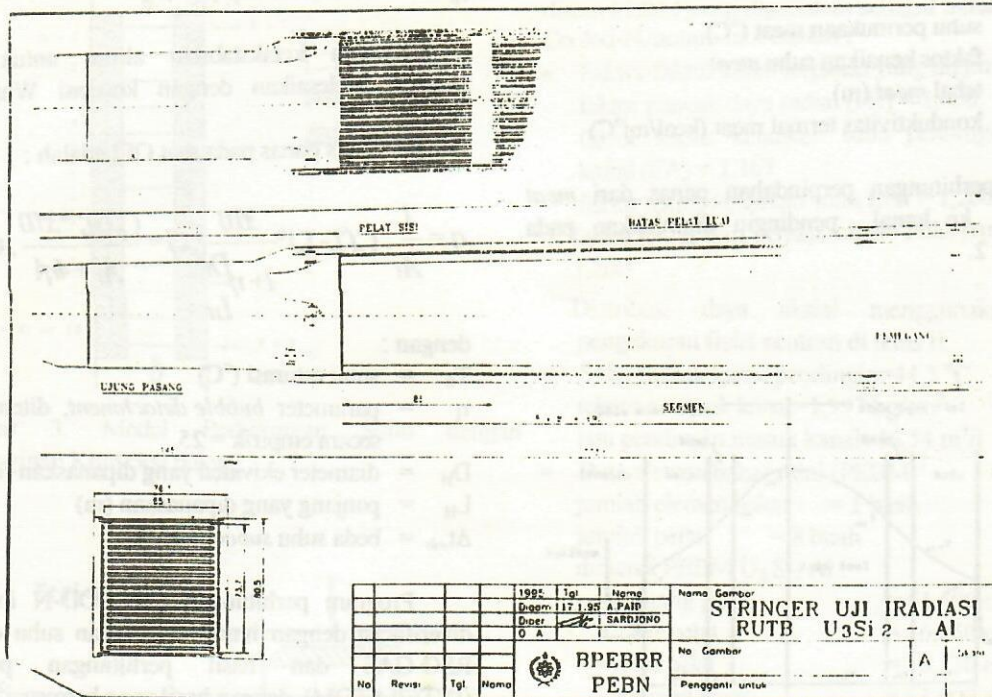
ini dengan menggunakan pelat elemen bahan bakar berukuran mini. Disain pelat elemen bakar mini dengan tingkat muat  $3,60$ ;  $4,20$ ;  $4,80$  dan  $5,20 \text{ gU/cm}^3$ , disusun dan dimasukkan ke dalam *stringer* seperti ditunjukkan pada Gambar 1<sup>3</sup>. Setiap *stringer* berisi 7 segmen dan direncanakan akan diiradiasi di teras reaktor pada posisi D-9<sup>6</sup>.

Untuk keselamatan pengoperasian RSG-GAS maka disain elemen bakar mini ini perlu ditinjau dari aspek neutronik dan termohidraulikanya, mengingat keterbatasan pendingin yang mengalir setiap kisi teras RSG-GAS. Analisis dilakukan dengan memilih tingkat muat  $5,2 \text{ gU/cm}^3$  menggunakan faktor puncak daya dan laju alir di posisi elemen bakar seperti yang ditunjukkan oleh Safety Analysis Report (SAR-RSG). Analisis dilakukan pada kondisi tunak (*steady state*) serta dengan mempertahankan daya total yang terbangkit di teras sebesar  $30 \text{ MW}$  (*nominal power*). Analisis dilakukan dengan menggunakan paket program COOLOD-N.

## PROGRAM PERHITUNGAN COOLOD-N

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) mengembangkan paket perhitungan





Gambar 1. Disain Susunan Pelat Elemen Bakar Mini.

COOLOD untuk menganalisis termohidrolika teras reaktor riset tipe MTR pada kondisi tunak. COOLOD-N yang merupakan pengembangan program COOLOD mempunyai kemampuan tambahan untuk menghitung termohidrolika teras dengan pendinginan konveksi bebas<sup>2</sup>.

Suhu pelat elemen bakar dihitung dengan mengasumsikan pembangkitan panas di dalam *meat*, konstan sepanjang arah radial. Perhitungan perpindahan panas didasarkan pada pemecahan persamaan konduksi panas satu dimensi ke arah radial, dengan jumlah maksimum titik (*nodes*) ke arah aksial sebanyak 21 titik dan jumlah titik di *meat* ke arah radial sebanyak 5 titik.

COOLOD-N memiliki paket perhitungan perpindahan panas yang dikembangkan untuk reaktor riset elemen bakar pelat dengan tekanan dan suhu operasi rendah. Paket perpindahan panas berisi korelasi-korelasi untuk menghitung koefisien perpindahan panas, suhu pada saat terjadinya awal perpindahan inti (*onset nucleate boiling = ONB*), fluks panas saat akhir pendidihan inti (*Departure from nucleate boiling = DNB*) dan fluks panas pada saat ketakstabilan aliran (*onset of flow instability = OFI*). Korelasi-korelasi tersebut diperoleh dari hasil percobaan yang dilakukan di JAERI.

Korelasi yang digunakan antara lain adalah :

Suhu pendingin yang di rumuskan sebagai :

$$T_b = T_n + F_b * 1 / (G A C_p * 300) \int_0^L Q(z) dz \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

- $T_n$  = suhu masuk kanal (°C)
- $F_b$  = faktor kenaikan suhu pendingin
- $G$  = laju aliran masa ( $kg/m^2 s$ )
- $A$  = luas aliran ( $m^2$ )
- $C_p$  = panas jenis
- $Q(z) dz$  = laju pembangkitan panas sepanjang arah aksial ( $kcal/m^2h$ ).

Selanjutnya suhu permukaan kelongsong dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_w = T_b + F_f q / h \dots \dots \dots (2)$$

dengan :

- $F_f$  = faktor kenaikan suhu film
- $q$  = fluks panas ( $kcal/m^2 h$ )
- $h$  = koefisien perpindahan panas ( $kcal/m^2h^{\circ}C$ )

dan suhu maksimum *meat* diselesaikan dengan persamaan :

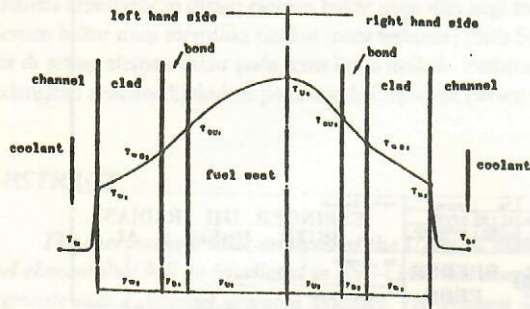


$$T_{Uo} = T_{BU} + F_U [(q/\gamma_U)/2k_U] \gamma_U^2 \dots\dots\dots(3)$$

dengan :

- $T_{BU}$  = suhu permukaan meat ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $F_U$  = faktor kenaikan suhu *meat*
- $\gamma_U$  = tebal *meat* (m)
- $K_U$  = konduktivitas termal meat (kcal/mj $^{\circ}\text{C}$ )

Model perhitungan perpindahan panas dari *meat* hingga ke kanal pendingin ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model Perhitungan Suhu Pelat.

Fluks panas pada saat terjadi pendidihan inti (ONB) diselesaikan dengan korelasi Bergles-Rohsenow, yaitu :

$$q = 911 P^{1.55} (9/5(T_{ONB} - T_s)) (2.16/P^{0.0234}) \dots\dots\dots(4)$$

dengan :

- $P$  = tekanan teras (kg/cm $^2$  abs)
- $T_{ONB}$  = suhu awal pendidihan inti ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_s$  = suhu saturasi ( $^{\circ}\text{C}$ )

Fluks panas saat akhir pendidihan inti (DNB) dengan aliran pendingin ke bawah (*down flow*) dievaluasi dengan persamaan (5), (6) dan (7).

$$q_{DNB,1} = 0,005 | G^* |^{0,611} \dots\dots\dots(5)$$

$$q^*_{DNB,2} = A/\alpha_H \_ h_i/h_{fg} | G^* | \dots\dots\dots(6)$$

dengan:

$$q^*_{DNB} = 07(A/A_c) \{ (\gamma_g/\sigma)^{1/2} \}^2 / \{ 1 + (\gamma_g/\gamma)^{1/4} \} \dots\dots\dots(7)$$

- $G^*$  = laju aliran massa (tak berdimensi)
- $A_H$  = luas yang dipanaskan (m $^2$ )
- $h_i$  = entalpi pendingin *subcooled* masuk kanal (kcal/kg)
- $h_{fg}$  = panas laten penguapan (kcal/kg)

- $W$  = lebar kanal (m)
- $\gamma_l$  = berat jenis cairan (kg/m $^3$ )
- $\gamma_g$  = berat jenis uap (kg/m $^3$ )

Kriteria ketakstabilan aliran untuk kanal persegi diselesaikan dengan korelasi Whittle &

Forgan. Fluks panas pada saat OFI adalah :

$$q = \frac{1}{A_t} \cdot C_p(T_s - T_{in})^* \frac{300}{1 + \eta \frac{D_H}{L_H}} \cdot G = \frac{C_p \Delta T_s^* 300}{A_t + 4\eta A} \cdot G \dots\dots(8)$$

dengan :

- $T_s$  = suhu saturasi ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\eta$  = parameter *bubble detachment*, ditentukan secara empirik = 25.
- $D_H$  = diameter ekivalen yang dipanaskan (m)
- $L_H$  = panjang yang dipanaskan (m)
- $\Delta T_{sub}$  = beda suhu *subcooled* ( $^{\circ}\text{C}$ )

Program perhitungan COOLOD-N ini telah diverifikasi dengan hasil pengukuran suhu di teras RSG-GAS dan hasil perhitungan pemasok (INTERATOM), dengan hasil yang bersesuaian<sup>2</sup>.

## METODA PERHITUNGAN

### Model Perhitungan

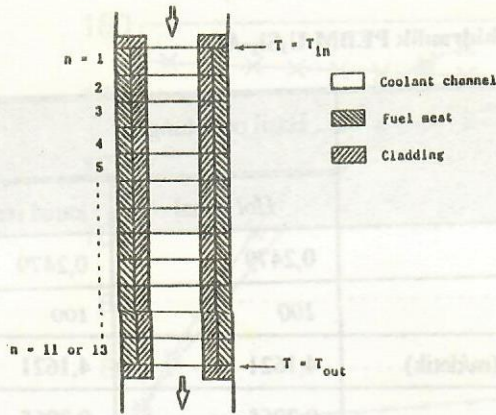
Untuk melakukan analisis keselamatan disain elemen bakar mini dari segi termohidrolika, akan dihitung parameter suhu permukaan pelat elemen bakar, ONB, OFIR dan DNBR.

Pada analisis keselamatan disain elemen bakar ini, COOLOD-N dimodelkan untuk dapat menyelesaikan perhitungan perpindahan panas di dalam sebuah elemen bakar dengan pendinginan konveksi paksa. Seluruh segmen dianggap menjadi satu kesatuan elemen bakar dengan panjang total 61,5 cm. Perhitungan dilakukan pada daya 30 MW (100%) menggunakan asumsi kanal terpanas, di mana pada kanal terpanas terdapat titik terpanas. Model perhitungan kanal terpanas yang dipakai mengacu pada model yang telah dibuat oleh pemasok.

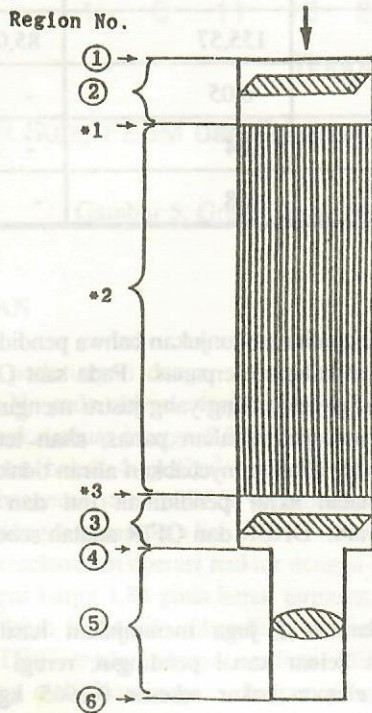
Perhitungan suhu dengan pendinginan konveksi paksa sepanjang elemen bakar dimodelkan seperti yang terlihat pada Gambar 3. Pada model perhitungan ini, laju alir di dalam elemen bakar menggunakan data hasil eksperimen pengukuran laju alir di teras 11 sebesar 46,54 m $^3$ /jam $^5$ . Distribusi suhu dihitung dengan cara membagi pelat elemen bakar menjadi 21 titik pengamatan (*nodes*) pada arah aksial, lebar *meat* PEBM dianggap sama dengan lebar *meat* elemen bakar standart RSG yaitu sebesar 6,050 cm. Kanal pendingin dipanaskan dari satu sisi seperti disain pelat elemen



bakar mini (PEBM) dengan arah aliran dari atas ke bawah.



Gambar 3. Model Perhitungan Suhu dengan Pendinginan Konveksi paksa.



Gambar 4. Model Perhitungan Tekanan dengan Pendinginan Konveksi Paksa

Perhitungan rerugi tekanan di dalam elemen bakar dimodelkan seperti terlihat pada Gambar 4. Tekanan masuk kanal dianggap sama dengan tekanan masuk teras yaitu sebesar  $1,997 \text{ kg/cm}^2$ . Pembesaran dan pengecilan luas area kanal diperhitungkan dengan cara membagi panjang elemen bakar menjadi 6 daerah aliran. Rerugi tekanan hidrostatis sepanjang gap antara segmen sepanjang 15 mm pada pendinginan konveksi paksa dianggap sangat kecil, dibandingkan tekanan hisap pompa sirkulasi teras, sehingga seluruh segmen dapat dianggap sebagai satu kesatuan.

#### Data Masukan Yang Digunakan

Data parameter termohidraulika teras RSG dan disain PEBM yang digunakan sebagai masukan program Coolod-N, antara lain adalah :

- Faktor-faktor kanal terpanas yang digunakan<sup>1</sup>.  
faktor puncak daya radial (FR) = 2,600  
faktor teknis kenaikan suhu pendingin sepanjang kanal (FA) = 1,167  
faktor teknis kenaikan suhu film = 1,260  
faktor teknis dari ketidak rataan fluks panas ( $Fq''$ ) = 1,200

Distribusi daya aksial menggunakan hasil pengukuran fluks neutron di teras II.

- Suhu masuk kanal pendingin =  $44,5^\circ\text{C}$   
tekanan masuk kanal =  $1,997 \text{ kg/cm}^2$   
laju pendingin masuk kanal =  $46,54 \text{ m}^3/\text{j}$
- Data elemen bakar mini (PEBM)<sup>3</sup>  
jumlah elemen bakar = 1 buah  
jumlah pelat = 8 buah  
dimensi PEBM  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$  :

- panjang pelat = 61,500 cm
- lebar pelat = 6,050 cm
- tebal pelat = 0,130 cm
- panjang meat = 61,000 cm
- lebar meat = 1,600 cm
- tebal meat = 0,051 cm

Dimensi kanal pendingin =  $0,242 \times 6,51 \text{ cm}$

- Sifat material PEBM dengan tingkat muat 5,20 gr  $\text{U/cm}^3$   
- konduktivitas panas =  $0,30 \text{ W/cm.K}$   
- densitas pelat e.b =  $4,00 \text{ g/cm}^3$   
- porositas = 9,83 %

#### HASIL DAN BAHASAN

Hasil perhitungan perpindahan panas pada disain PEBM dengan data masukan seperti yang telah diuraikan, disarikan dalam Tabel 1.

Parameter disain PEBM yang berpengaruh pada karakteristik termohidraulika antara lain adalah pembangkitan panas di dalam elemen bakar yang merupakan fungsi dari densitas elemen bakar, dimensi kanal pendingin dan konduktivitas termal material. Konduktivitas termal yang rendah dan densitas uranium yang tinggi menyebabkan suhu meat meningkat. Densitas uranium silisida yang besar pada tingkat muat yang lebih tinggi akan meningkatkan pembangkitan fluks panas di dalam disain PEBM. Pelat yang berisi meat hanya 8 buah sehingga kanal pendingin hanya dipanasi dari satu sisi, maka panas yang dilepaskan oleh PEBM (disebelahnya adalah *dummy plate*), relatif kecil dibandingkan apabila kedua dinding kanal berisi meat.



Tabel 1. Hasil Perhitungan Karakteristik Termohidraulik PEBM  $U_3Si_2-Al$

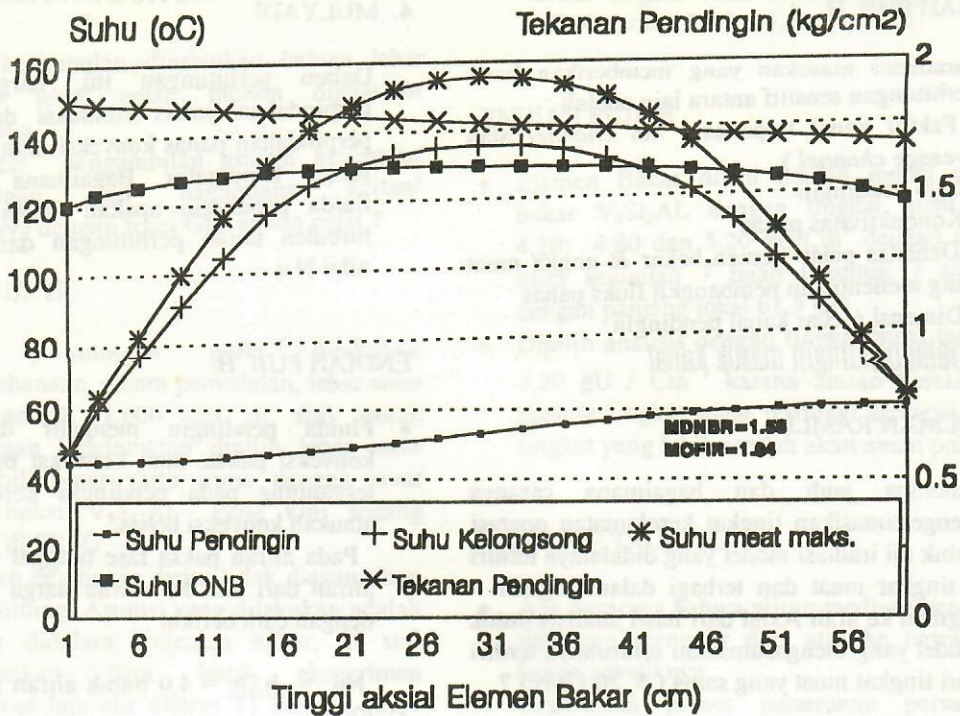
Parameter	Hasil perhitungan	
	Hot kanal	kanal rerata
Daya total PEBM ( MW )	0,2479	0,2479
Prosentase pembangkitan panas di dalam PEBM (%)	100	100
Kecepatan alir pendingin di dalam kanal elemen bakar (m/detik)	4,1621	4,1621
Penurunan tekanan sepanjang elemen bakar (kg/Cm <sup>2</sup> )	0,2965	0,2965
Suhu pendingin masuk kanal (°C)	44,5	44,5
Suhu pendingin keluar kanal (°C)	49,08	49,08
Suhu maksimum permukaan kelongsong °C	135,72	77,41
Suhu maksimum <i>meat</i> °C	155,57	85,04
$DT_{ONB} = T_{ONB} - T_{kelongsong}$ (°C)	- 6,05	-
Batas keselamatan terhadap ketakstabilan aliran, OFIR	1,84	-
Batas keselamatan terhadap akhir pendidihan inti, DNBR	1,58	-

Dimensi kanal pendingin yang terbentuk di antara susunan dua buah plat dan kecepatan pendingin berpengaruh pada besarnya panas yang dipindahkan dari kelongsong ke pendingin. Disain kanal pendingin berdimensi 0,242 cm x 6,51 cm sedangkan elemen bakar  $U_3Si_2-Al$  yang kini digunakan RSG adalah 0,240 cm x 6,71 cm. Grafik suhu kelongsong PEBM dan tekanan sebagai fungsi tinggi aksial PEBM dapat dilihat pada Gambar 5. Distribusi suhu kelongsong, suhu *meat* maksimum, suhu ONB, suhu jenuh pendingin dan suhu *bulk* pendingin sepanjang arah aksial pebm pada kondisi terpanas dan tekanan ditunjukkan pada Gambar 5. Perhitungan analisis disain PEBM yang menggunakan distribusi daya aksial yang diukur pada teras II. Suhu maksimum kelongsong dan *meat* adalah 135,72 °C dan 155,57 °C pada puncak daya aksial dimana  $F_z = 1,628$ . Suhu batas ONB mencapai harga minimum pada puncak daya ini dengan suhu ONB sebesar 129,66 °C. Hasil

perhitungan ini menunjukkan bahwa pendidihan inti telah terjadi pada kanal terpanas. Pada saat ONB terbentuk gelembung-gelembung yang justru menguntungkan dari segi proses perpindahan panas, akan tetapi pecahnya gelembung akan menyebabkan aliran tidak stabil. Batas keselamatan akhir pendidihan inti dan ketakstabilan aliran yaitu DNBR dan OFIR adalah sebesar 1,58 dan 1,84.

Gambar 5 juga menunjukkan hasil perhitungan tekanan keluar kanal pendingin, rugi tekanan total keluar elemen bakar sebesar 0,2965 kg/cm<sup>2</sup>. Suhu pendingin, kelongsong dan *meat* merupakan fungsi kecepatan pendingin. Apabila  $T_{in}$  dan  $P_{in}$  mempunyai harga yang tetap maka kecepatan pendingin merupakan faktor dominan penyebab kenaikan suhu kelongsong.





Grafik Suhu PEBM dan Tekanan Pendingin sebagai fungsi tinggi aksial.

Gambar 5. Grafik Suhu PEBM dan Tekanan sebagai fungsi tinggi aksial.

## SIMPULAN

Dari perhitungan dengan menggunakan program COOLOD-N pada kanal terpanas, iradiasi PEBM dengan tingkat muat hingga  $5,2 \text{ grU/Cm}^3$  dan densitas pelat elemen bakar  $4 \text{ gr/Cm}^3$  serta lebar meat sama dengan lebar meat standar RSG, memberikan beberapa hasil perhitungan antara lain bahwa:

1. Batas keselamatan operasi reaktor dengan nilai OFIR mencapai harga 1,84 pada kanal terpanas, harga ini masih lebih besar bila dibandingkan dengan OFIR pada TWC tanpa adanya iradiasi PEBM, yang dihitung oleh Kaminaga dengan program yang sama.
2. Laju aliran pendingin sebesar  $4,1621 \text{ m/detik}$  dengan rerugi tekanan sebesar  $0,2965 \text{ kg/cm}^2$ .
3. Perlu dicatat bahwa dalam perhitungan ini pemanasan hanya dilakukan dari satu sisi pelat, untuk pembuatan prototipe dengan perkayaan  $5,20 \text{ gr U/Cm}^3$  perlu dilakukan analisis termohidrolika lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Tenaga Atom Nasional, *Safety Analysis Report*, Sept., 1989.

2. Kaminaga, *COOLOD-N : A Computer Code, For the Analysis of steady-state Thermal-Hydraulics In Plate-Type Research Reactors*, February 1990.
3. Supardjo dkk, *Pengaruh Tingkat Muat Uranium Terhadap Produk Pelat Elemen bakar  $U_2Si_2-Al$* , PEBN-BATAN, April 1994.
4. Kurnia Putranta dkk, *Analisis Termohidraulika Teras RSG-GAS pada kondisi tunak menggunakan bahan bakar silisida*, Laporan penelitian PRSG-TA-1994-1995.
5. Kurnia Putranta dkk, *Laporan pengukuran distribusi laju alir teras 11 RSG-GAS*, RSG-EFT-94-03-T11.01-L.
6. As Natio Lasman, Tagor Sembiring, komunikasi pribadi.

## TANYA JAWAB

### 1. BAMBANG GALUNG SUSANTO

- Dalam analisis ini telah digunakan paket program COOLOD-N untuk memperoleh informasi yang bisa disimpulkan. *Input* (parameter) apa saja yang dimasukkan ke dalam program yang memberikan hasil perhitungan sensitif terhadap perubahan hasil keluaran komputer



#### ENDIAH PUJI H.

- Parameter masukan yang memberikan hasil perhitungan sensitif antara lain adalah :
  - Faktor kanal terpanas ( *hot channel* atau *oversage channel* )
  - Laju pendingin
  - Konduktivitas panas
  - Densitas pelat elemen bakar & angka muat yang menentukan pembangkit fluks panas
  - Dimensi / lebar kanal pendingin
  - Suhu pendingin masuk kanal

#### 2. HILMAN RAMLI

- Seberapa jauh dan bagaimana caranya mengestimasi tingkat keselamatan operasi untuk uji iradiasi model yang didalamnya terdiri 4 tingkat muat dan terbagi dalam segmen - segmen ke arah Axial dari hasil analisis untuk model yang mengasumsikan seluruhnya terdiri dari tingkat muat yang sama ( 5, 20 Gr/cc ) ?

#### ENDIAH PUJI H.

- Model terdiri dari 4 tingkat muat dari 3,6 ; 4,2; 4,8; dan 5,2 Gr/cm<sup>3</sup> , tingkat muat ini menentukan pembagian fluks panas. Untuk mengestimasi tingkat keselamatan operasi yang maksimum dilakukan analisis dengan asumsi iradiasi dilakukan pada kanal terpanas dengan menggunakan parameter-parameter tertentu.

#### 3. ABDUL HAFID

- Dikatakan bahwa analisis dilakukan pada kondisi terburuk, mohon penjelasan cara penentuan dari penelitian hingga dapat diperoleh kondisi terburuk

#### ENDIAH PUJI H.

- Analisis dilakukan pada kondisi terburuk menggunakan asumsi kanal terpanas , di mana pada kanal terpanas terdapat titik terpanas dengan menggunakan faktor - faktor kanal terpanas yang dihitung dengan menggunakan program IAFUAL oleh kelompok netronik. Selain itu juga digunakan parameter suhu masuk kanal pendingin maksimum dan laju pendingin masuk kanal minimum, parameter terakhir ini berasal dari penelitian/ pengukuran.

#### 4. MULYADI

- Dalam perhitungan ini, harga koefisien perpindahan panas konduksi dan koefisien perpindahan panas konveksi dianggap sebagai fungsi temperatur. Bagaimana pola aliran fluida pendingin apakah aliran bebas atau turbulen untuk perhitungan dan bagaimana nilai Nu

#### ENDIAH PUJI H.

- Fluida pendingin mengalir dengan cara konveksi paksa, atau konveksi bebas, hal ini tergantung pada pendingin konveksi paksa ataukah konveksi bebas.

Pada aliran paksa fase tunggal dengan arah aliran dari atas ke bawah harga Nu dihitung dengan cara berikut :

$$Nu = \frac{h \cdot De}{k} = 4,0 \text{ untuk aliran laminar ( } Re < 2000)$$

$$Nu = 0,023 Re_b^{0,8} Pr_b^{0,4} \text{ untuk aliran turbulen ( } Re \geq 2500)$$

(Korelasi Dittus-Boelter)

Sedangkan untuk aliran konveksi bebas dievaluasi dengan interpolasi antara kedua persamaan tersebut.

#### 5. LILI SUPARLINA

- Tadi dijelaskan bahwa parameter konduktivitas termal berpengaruh pada karakteristik termohidrolika, bagaimana cara menghitung harga tersebut dengan tingkat muat yang beragam ?

#### ENDIAH PUJI H.

- Harga k diperoleh dari data bahan bakar proses fabrikasi, dari data tersebut diperoleh proses volume bb yang merupakan perbandingan volume bb dan volume total

$$VU_3 Si_2 = \frac{V_{bb}}{V_{total}}$$

- Selanjutnya dihitung proses volume total *meat* plat bb yang tak ditempati oleh aluminium

$$V_{non Al} \text{ untuk } V_3 Si_2 = VU_3 Si_2 + V_{Pori}$$

- Konduktivitas panas diperoleh dengan menggunakan grafik konduktivitas panas sebagai fungsi persen volume ( bb + Pori )



## 6. HASBULLAH NASUITON

- Dalam kesimpulan disebutkan bahwa lebar *meat* = lebar pelat, mohon dijelaskan maksudnya
- Apa dasar pengambilan asumsi kecepatan pendinginan dan bagaimana kaitan/korelasinya dengan tebal Gap antara pelat ?

### ENDIAH PUJI H.

- Dalam perhitungan perlu dilakukan penyederhanaan dalam pemodelan, lebar *meat* PEBN adalah 1,600 cm di sini untuk perhitungan keselamatan dipilih lebar *meat* yang lebih besar yaitu sama dengan *meat* elemen bakar  $V_3Si_2Al$  yang kini sedang diiridasi di PRSG
- Kecepatan pendingin disini tidak diasumsikan tetapi dihitung. Asumsi yang dilakukan adalah laju alir didalam elemen bakar, di sini menggunakan data hasil eksperimen pengukuran laju alir teras 11 sebesar  $46,54 \text{ m}^3/\gamma$  yang merupakan laju alir pendingin minimum di posisi elemen bakar di seluruh teras RSG

## 7. AMIL MARDHA

- Apakah yang dimaksud dengan elemen bakar mini ?  
Alasan apa anda melakukan perhitungan dengan tingkat muat  $5,20 \text{ gU/cm}^3$  ?  
Kenapa anda tidak melakukan analisis dengan

variasi tingkat muat seperti yang anda tulis pada Abstrak ( 3,60 ; 4,20; 4,80; 5,20 )

### ENDIAH PUJI H.

- Elemen Bakar disini adalah model elemen bakar  $V_3Si_2Al$  dengan tingkat muat 3,60; 4,20; 4,80 dan  $5,20 \text{ gU/cm}^3$  dengan ukuran mini sejumlah 7 buah ( untuk 7 siklus ) dengan panjang lokal 61,5 Cm
- Dipilih analisis dengan tingkat muat tertinggi  $5,20 \text{ gU/cm}^3$  karena alasan keselamatan apabila tingkat muat tertinggi tercapai, tentu tingkat yang lebih rendah akan aman pula.

## 8. AGUNG TRIANTO

- Apa dasarnya bahwa aliran medium pendingin dianggap mengalir dari atas ke bawah dan bukan sebaliknya
- Bagaimana proses penurunan persamaan-persamaan No. 1-8

### ENDIAH PUJI H.

- Analisis dilakukan pada kondisi di mana arah aliran di dalam RSG-GAS adalah dari atas ke bawah, sedangkan arah aliran sebaliknya terjadi pada pendinginan konveksi bebas
- Persamaan - persamaan yang digunakan adalah persamaan empiris