

---

## PEMETAAN DISTRIBUSI SUHU DAN DNBR PADA PERANGKAT BAHAN BAKAR AP1000-EU

Muh. Darwis Isnaini  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN

Diterima editor 12 April 2010  
Disetujui untuk dipublikasi 20 Mei 2010

### ABSTRAK

**PEMETAAN DISTRIBUSI SUHU DAN DNBR PADA PERANGKAT BAHAN BAKAR AP1000-EU.** Telah dilakukan suatu pemetaan distribusi suhu dan DNBR minimum pada perangkat bahan bakar AP1000-EU. Untuk meningkatkan kemampuan SDM dalam memahami desain PLTN, diperlukan karakteristik desain yang lengkap. Dengan latar belakang bahwa, untuk mendapatkan karakteristik termohidrolika yang lengkap, maka tujuan penelitian ini melakukan pemetaan distribusi distribusi suhu meat bahan bakar, kelongsong, pendingin dan DNBR minimum serta fluks panas dari 1/8 perangkat bahan bakar AP1000-EU pada kondisi BOC daya penuh, xenon setimbang dan batang kendali terangkat dari teras. Dipilihnya objek desain AP1000-EU ini karena dokumen kontrol desain AP1000 buatan Westinghouse Amerika Serikat ini sedang dalam proses sertifikasi oleh badan regulasi Inggris (negara Eropa). Desain AP1000-EU mempunyai daya termal reaktor yang sama 3400 MWt, jumlah perangkat bahan bakar sama 157 buah, tekanan operasi 15,1 MPa. Perangkat bahan bakar AP1000-EU terdiri atas 264 rod bahan bakar dengan ukuran diameter sebesar 0,95 cm dengan panjang 426,72 cm. Perhitungan dilakukan dengan code COBRA-EN pada 1/8 perangkat bahan bakar posisi G-9 dengan faktor daya bervariasi dari 1,124 sampai 1,396, dan hasilnya dibuat peta distribusi. Dari hasil pemetaan menunjukkan bahwa suhu maksimum tengah *meat* sebesar 1032,95 °C jauh lebih rendah dibanding batas maksimum desain, dan DNBR minimum 4,395 jauh lebih besar dibanding batas minimum desain. Hasil pemetaan distribusi suhu, DNBR dan fluks panas pada kondisi operasi normal, daya penuh pada awal siklus, cukup untuk menjawab peta distribusi di akhir siklus bahan bakar.

Kata kunci : Pemetaan, distribusi suhu, DNBR, AP1000-EU.

### ABSTRACT

**THE MAPPING OF DNBR AND TEMPERATURE DISTRIBUTION FOR EU-AP1000'S FUEL ROD ASSEMBLY.** *The mapping of DNBR and temperature distribution for EU-AP1000's fuel assembly was carried out. The development of the human resources capability to understand the NPP design, requires comprehensive characteristic design. The background of this research, is that in order to find the comprehensive NPP characteristic design, to carry out the thermohydraulics distribution mapping during NPP operation, involving the coolant, cladding and meat temperatures, DNBR and heat flux distribution for one eighth EU-AP1000 fuel assembly on the condition of near beginning of life, hot full power, equilibrium xenon and unrodded core. The EU-AP1000 was chosen as a research object, because of the AP1000 originally was designed by Westinghouse US, however the design control document (DCD) is on approval process by UK regulatory (representative European countries). The design of EU-AP1000 has thermal power of 3400 MWt, the number of fuel assemblies of 157, operation pressure 15.1 MPa. Each EU-AP1000 fuel assembly consists of 264 fuel rods which has 0.95 cm rod diameter and 426.72 cm rod length. The calculation was done using COBRA-EN code for 1/8 of fuel assembly of G-9 position, which has variation rodwise power factor of 1.124 to 1.396, and then from the output was made be a map. The mapping result shows that the maximum meat temperature of 1032.95 °C was much lower than the maximum limit design, and the safety margin of minimum DNBR of 4.395 was much higher than the minimum limit design. The heat flux, DNBR and temperature distribution mapping result on normal operation, hot full power and near beginning of life condition were sufficient to response to the distribution mapping ones on the end of life of fuel assembly.*

*Keywords: Mapping, DNBR, temperature distribution, EU-AP1000.*

## PENDAHULUAN

Salah satu cara untuk menambah peran partisipasi nasional (konten dalam negeri) untuk mendukung rencana pemerintah untuk membangun suatu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) adalah dengan meningkatkan kemampuan sumber daya manusia dalam memahami desain PLTN yang akan dipilih. Untuk dapat memahami desain lebih rinci, maka diperlukan karakteristik desain yang lengkap dari suatu PLTN. Salah satu karakteristik desain yang harus dipahami adalah yang berkaitan dengan karakteristik termohidrolika dari *rod* bahan bakar. Dengan latar belakang bahwa untuk mendapatkan karakteristik desain yang lengkap, maka perlu dilakukan pembuatan peta (pemetaan) distribusi sifat-sifat fisika yang berkaitan dengan kondisi termohidrolika *rod* bahan bakar selama PLTN beroperasi. Pemetaan distribusi sifat termohidrolika ini sangat penting untuk dilakukan, agar pemerintah dan masyarakat lebih mudah dalam memahami karakteristik desain dengan melihat peta distribusi termohidrolika *rod* bahan bakar seperti suhu *meat* bahan bakar, suhu kelongsong, suhu pendingin, DNBR dan fluks panas

Dalam rangka untuk menunjang pemenuhan kebutuhan energi yang mencapai 100 GW[1] di tahun 2025, pemerintah Republik Indonesia berencana membangun PLTN. Sebagai bahan dalam mengambil keputusan dalam memilih jenis PLTN, maka perlu dilakukan *review* terhadap data teknis tersebut baik secara global maupun secara rinci. Dari ratusan PLTN yang beroperasi di dunia, yang paling banyak adalah jenis reaktor air tekan (*Pressurized Water Reactor-PWR*). Dari desain PLTN jenis PWR yang ada di dunia, diambil salah satu desain yang ada untuk diambil sebagai objek penelitian yakni desain AP1000-EU. Dipilihnya desain AP1000-EU ini sebagai objek penelitian karena desain PLTN jenis AP1000 orisinal yang dibuat Westinghouse Amerika Serikat ini, dokumen kontrol desainnya sedang disertifikasi oleh badan regulasi Inggris (negara Eropa). Pada Tabel 1 disajikan data teknis dari AP1000-EU.

Tabel 1. Data teknis desain AP1000-EU.[2]

Jenis PLTN	AP1000-EU
Desainer	Westinghouse
Daya Termal (MW)	3400
Laju alir efektif (kg/jam)	$48,44 \times 10^6$
Tekanan operasi (MPa)	15,10
Suhu <i>inlet</i> pendingin ( $^{\circ}\text{C}$ )	279,44
Suhu <i>outlet</i> pendingin ( $^{\circ}\text{C}$ )	324,66
Diameter teras (cm)	304,04
Tinggi teras (cm)	426,72
Desain perangkat bahan bakar	
Jumlah perangkat	157
Tipe	17 x 17
Ukuran perangkat (cm x cm)	21,40 x 21,40
Jumlah <i>rod</i> /perangkat	264
Jarak antar pusat <i>rod</i> (cm)	1,26
Diameter <i>rod</i> (cm)	0,950
Diameter pelet (cm)	0,819
Fluks panas rerata ( $\text{kW/m}^2$ )	628,71
Fluks panas maksimum ( $\text{kW/m}^2$ )	1634,71

Pada penelitian sebelumnya<sup>[3]</sup> telah dilakukan analisis desain termohidrolika subkanal PWR1000 tipikal dengan menggunakan *code* Cobra IV-I, dengan diperoleh hasil antara lain suhu maksimum kelongsong berkisar antara 344,3 – 349,3 °C, suhu maksimum tengah *meat* berkisar antara 1030,2 – 2103,3 °C dan DNBR minimum berkisar antara 4,29 – 1,83. Penelitian lainnya<sup>[4]</sup> telah dilakukan verifikasi desain termohidrolika teras PWR1000 tipikal dengan *code* THAL, diperoleh hasil antara lain suhu maksimum pelat sebesar 346,64 °C dan suhu maksimum *meat* sebesar 2037,06 °C dengan DNBR minimum 1,45. Sedangkan penelitian lainnya<sup>[5]</sup> telah dilakukan verifikasi desain geometri *rod* bahan bakar PWR 1000 tipikal buatan Mitsubishi dan Westinghouse dengan *code* COBRA-EN, dengan diperoleh hasil suhu maksimum permukaan luar kelongsong berkisar antara 331,35 – 333,45 °C, suhu maksimum tengah *meat* berkisar antara 880,05 – 953,85 °C dan DNBR minimum berkisar antara 5,461 – 4,835 untuk PWR 1000 tipikal Westinghouse. Adapun untuk desain terburuk diperoleh suhu maksimum kelongsong dan tengah *meat* masing-masing 346,35 °C dan 1710,5 °C, dan DNBR minimum sebesar 2,207.

Dari ketiga penelitian sebelumnya dapat dijelaskan bahwa *code* THAL menggunakan pemodelan 1 *rod* tunggal untuk perhitungan termohidrolika, sedangkan *code* Cobra IV-I dan COBRA-EN menggunakan pemodelan banyak *rod* bahan bakar. Adapun perbandingan antara *code* Cobra IV-I dan COBRA-EN yang dimiliki oleh PTRKN, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan pemodelan pada *code* Cobra IV-I dan COBRA-EN<sup>[3,4,5]</sup>.

Code Cobra IV-I	Code COBRA-EN
<ul style="list-style-type: none"> <li>Dikembangkan dari Cobra 3C</li> <li>Dipakai untuk analisis sub kanal saja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dikembangkan dari Cobra 3C</li> <li>Dapat dipakai untuk analisis sub kanal (beberapa <i>rod</i> dalam perangkat bahan bakar) dan analisis teras.</li> <li>Mempunyai korelasi yang lebih lengkap dibanding Cobra IV-I</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Tingkat kerumitan Cobra IV-I terdapat pada pembuatan data geometri <i>rod</i> (data masing-masing <i>rod</i>, luas sub kanal, perimeter basah dan panas, dan koneksi masing-masing sub kanal), data faktor kanal panas aksial dan radial dipisah.</li> <li>Sub kanal persegi dimodelkan menjadi 2 sub kanal berbentuk segitiga, tidak bisa dimodelkan langsung dengan persegi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tingkat kerumitan Cobra EN terdapat pada pembuatan distribusi daya linier masing-masing <i>rod</i> (daya linier x faktor aksial x faktor radial) mis. 45 <i>rod</i> dengan 42 aksial berarti ada 1800 data yang harus diinputkan, maka <i>input file</i> menjadi lebih banyak dibanding Cobra IV-I</li> <li>Sub kanal berbentuk persegi dapat dimodelkan langsung dengan sub kanal persegi, sesuai kondisi PWR.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Korelasi DNBR (ada 2)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Korelasi B&amp;W-2</li> <li>Korelasi W-3</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Korelasi DNBR (ada 7)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Korelasi B&amp;W-2</li> <li>Korelasi W-3</li> <li>Korelasi EPRI</li> <li>Korelasi Macbeth (12 koefisien)</li> <li>Korelasi Macbeth (6 koefisien)</li> <li>Korelasi Biasi</li> <li>Korelasi Barnet dimodifikasi</li> </ul> </li> </ul>

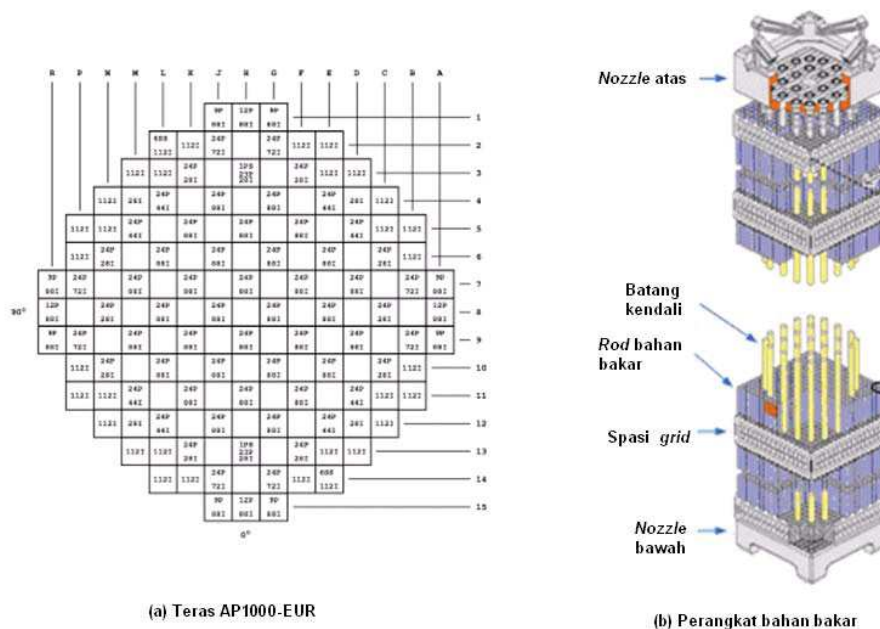
Karena *code* COBRA-EN memiliki kelebihan di dalam pemodelan sub kanal dibanding *code* Cobra IV-I dan THAL, maka hasil perhitungan dengan *code* COBRA-EN lebih valid (lebih mendekati) dengan data pada dokumen desain. Oleh sebab itu untuk ke depan perhitungan analisis sub kanal dan analisis teras ditekankan untuk menggunakan *code* COBRA-EN.

Penelitian di dalam makalah ini bertujuan untuk membuat pemetaan distribusi suhu maksimum tengah *meat*, suhu maksimum kelongsong, suhu *outlet* pendingin, DNBR dan fluks panas maksimum pada 1/8 perangkat bahan bakar AP1000-EU dengan menggunakan *code* COBRA-EN. Selain itu juga akan disajikan perbandingan hasil perhitungan untuk *rod* terpanas operasional dan *rod* untuk kondisi desain terburuk dari AP1000-EU.

## TEORI

### Code COBRA-EN[6]

*Code* COBRA-EN dikembangkan dari COBRA-3C yaitu *code* untuk analisis sub kanal dan analisis teras. Selain dikembangkan menjadi COBRA-EN, *code* COBRA-3C juga dikembangkan menjadi COBRA-3C/MIT (modul termohidrolika dari *code* kinetika teras MEKIN), COBRA-IV-I (untuk analisis sub kanal), NORMA (untuk simulator reaktivitas) dan QUARK (untuk analisis dinamika teras), semua *code* di atas digunakan untuk perhitungan pada reaktor daya air ringan (jenis BWR dan PWR).



Gambar 1. (a) Gambar teras reaktor dan (b) perangkat bahan bakar AP1000-EU[2]

Sebagaimana lazimnya dalam seri *code* COBRA, analisis termohidrolika dikerjakan dalam susunan kanal paralel yang dibatasi dengan *rod* bahan bakar silinder dan celah terbuka. Arah aksial (sumbu *z*) diasumsikan paralel dengan kanal dan berorientasi dari aliran masuk ke keluar, yang secara umum vertikal dan mengalir ke atas di dalam teras reaktor daya air tekan (PWR), seperti terlihat pada Gambar 1 untuk reaktor AP1000-EU..

Beberapa persamaan yang digunakan di dalam *code* COBRA-EN, antara lain:

a. Konveksi paksa Satu Fase

Untuk kondisi aliran turbulen (konveksi paksa satu fase) digunakan korelasi Dittus-Boelter:

$$h_T = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \left( \frac{k}{D_h} \right) \quad (1)$$

Sedangkan untuk aliran laminar:

$$h_L = 8,0 \frac{k}{D_h} \quad (2)$$

Dengan bilangan Nusselt diasumsikan sebesar 8,0. Koefisien perpindahan panas konveksi paksa satu fase merupakan nilai maksimum dari korelasi laminar dan turbulen:

$$H_{SPFC} = \max(h_T, h_L) \quad (3)$$

dengan,

- k = konduktivitas termal pendingin (W/m.°C),
- D<sub>h</sub> = diameter hidraulik ekuivalen (m),
- Re = bilangan Reynolds (=GD<sub>h</sub>/μ),
- Pr = bilangan Prandtl (=C<sub>p</sub>μ/k),
- G = fluks massa pendingin (kg/m<sup>2</sup>.s),
- μ = viscositas dinamis (kg/m.s),
- C<sub>p</sub> = panas jenis (kJ/kg.°C)

Semua sifat dievaluasi untuk kondisi air atau uap pada suhu pendingin *bulk*.

b. Pendidihan inti *subcooled* dan saturasi

Korelasi Thom dituliskan sebagai:

$$q''_{Thom} = 0,05358 \cdot e^{P/630} \cdot (T_w - T_{sat})^2 \quad (4)$$

- P = tekanan sistem (KPa),
- T<sub>w</sub> = suhu permukaan *rod* bahan bakar (°C),
- T<sub>sat</sub> = suhu saturasi pendingin (°C),
- T<sub>b</sub> = suhu bulk pendingin (°C),
- q'' = fluks panas pendingin (W/m<sup>2</sup>).

Opsi *default* dalam COBRA-EN untuk koefisien perpindahan panas pendidihan inti adalah jumlahan korelasi perpindahan panas konveksi paksa fase cair dan korelasi Thom:

$$H_{NB} = H_{SPFC} + q''_{Thom} / (T_w - T_b) \quad (5)$$

Dalam bentuk fluks panas dituliskan sebagai:

$$q'' = H_{SPFC} (T_w - T_b) + 0,05358 e^{P/630} \Delta (T_w - T_{sat})^2 \quad (6)$$

atau

$$0,05358 e^{P/630} \Delta T_w^2 + H_{SPFC} \Delta T_w + H_{SPFC} (T_{sat} - T_b) - q'' = 0$$

dengan ΔT<sub>w</sub> = T<sub>w</sub> - T<sub>sat</sub>.

c. Pendidihan transisi

Digunakan korelasi Condie-Bengtson yang dimodifikasi, sebagai berikut:

$$q''_{TB} = C_1 e^{-\frac{1}{2}\sqrt{T_w - T_{sat}}} (T_w - T_{sat}) \quad (7)$$

dengan,

$$C_1 = \frac{q''_{CHF} - q''_{FB}}{T_{CHF} - T_{sat}} e^{\frac{1}{2}\sqrt{T_{CHF} - T_{sat}}} \quad (8)$$

$q''_{CHF}$  = fluks panas kritis ( $W/m^2$ ),  
 $q''_{FB}$  =  $h_{FB}(T_{CHF} - T_{sat})$  = fluks panas pendidihan pada suhu fluks panas kritis ( $W/m^2$ ),

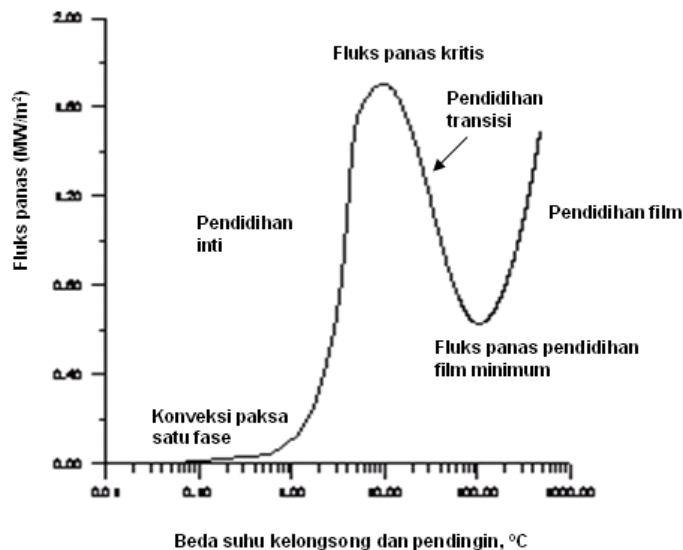
$q''_{TB}$  = fluks panas pendidihan transisi ( $W/m^2$ )

Adapun untuk  $T_w = T_{CHF}$ , maka

$$q''_{TB} = q''_{CHF} - q''_{FB} \quad (9)$$

#### d. Korelasi Fluks Panas Kritis (CHF)

Terdapat 7 korelasi fluks panas kritis yang dapat digunakan di dalam COBRA-EN, yaitu korelasi BA&W-2, W-3, EPRI, Macbeth (12 koefisien), Macbeth (6 koefisien), Biasi dan Barnett dimodifikasi. Adapun korelasi CHF yang digunakan di dalam desain AP1000-EU adalah korelasi WRB-2M, meskipun juga disebut korelasi W-3 sebagai pembanding.



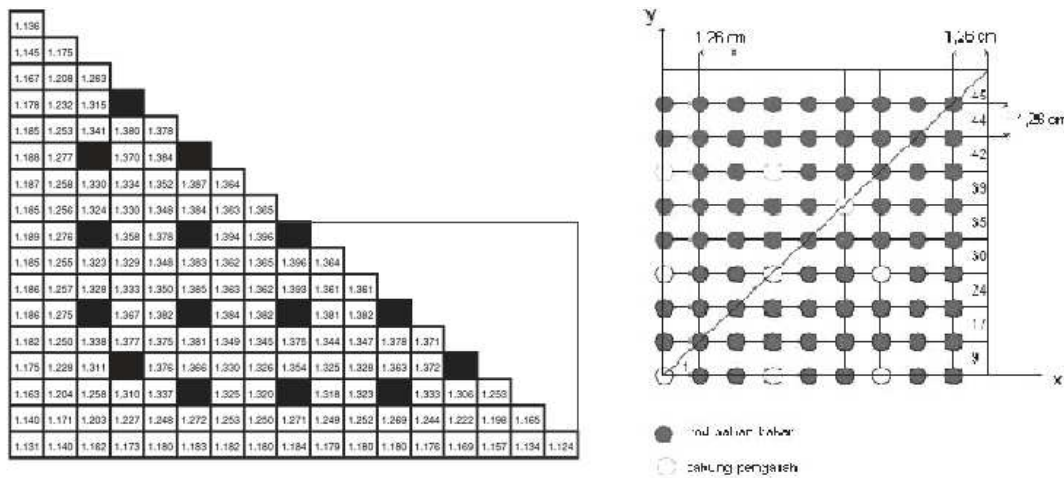
Gambar 2. Grafik fluks panas sebagai fungsi beda suhu kelongsong dan pendingin (skala semilogaritma) [2]

Secara ringkas, besarnya nilai koefisien perpindahan panas dari persamaan yang digunakan dirangkum dalam grafik fluks panas sebagai fungsi beda suhu kelongsong dan pendingin, seperti terlihat pada Gambar 2.

**TATA KERJA**

Reaktor AP1000-EU mempunyai daya termal yang sama 3.400 MWt, teras tersusun atas 157 perangkat bahan bakar, dimana tiap perangkat tersusun atas matriks 17 x 17 yang terdiri dari 264 batang bahan bakar, 24 tabung pengarah (*guide thimble*) untuk batang kendali, dan 1 tabung pengarah instrumentasi. Data spesifikasi teknis PWR Tipikal tertera pada Tabel 1.

Sebagai model dalam pemetaan distribusi suhu *meat*, kelongsong, pendingin, DNBR dan fluks panas dipilih sebuah perangkat bahan bakar PLTN jenis AP1000-EU posisi G-9 pada kondisi awal siklus, daya penuh, xenon setimbang dan batang kendali di luar teras (*unrodded core*), dengan distribusi faktor daya seperti tertera pada Gambar 3a. Sebagai bahan perhitungan dengan menggunakan *code* COBRA-EN, diambil 1/8 bagian perangkat bahan bakar yang merupakan *rod* bahan bakar dengan nilai faktor daya bervariasi antara 1,124 sampai 1,396 pada operasi normal, dan dimodelkan seperti pada Gambar 3b.



Gambar 3. (a). Distribusi faktor daya *rod* bahan bakar di dalam 1/2 perangkat bahan bakar posisi G-9 (kiri) dan (b). Model perhitungan 1/8 perangkat bahan bakar dengan *code* COBRA-EN (kanan).

Namun sebagai langkah awal, terlebih dahulu akan dilakukan validasi desain AP1000-EU dengan menggunakan *code* COBRA-EN, yakni kondisi di mana terjadi penarikan batang kendali di salah satu posisi yang tidak diimbangi dengan penarikan batang kendali di posisi lain, sehingga menyebabkan faktor daya meningkat sampai 2,60. Meskipun hal itu biasanya di dalam desain sudah dilengkapi pengaman otomatis, yakni begitu terjadi penarikan batang kendali yang tidak seimbang sebagai batasan desain, maka secara otomatis batang kendali tersebut akan turun atau reaktor langsung padam (*scram*). Meskipun demikian, desain untuk kondisi terburuk tersebut biasanya dijadikan sebagai batas desain yang dituliskan di dalam dokumen kontrol desain[2].

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan *code* COBRA-EN untuk kondisi *steady state*. Dalam melakukan analisis desain termohidrolika, digunakan batasan keselamatan sebagaimana spesifikasi teknis umum dari AP1000-EU, antara lain :

- a. Marjin keselamatan terhadap pelepasan pendidihan inti (DNBR) minimum harus lebih besar dari 2,80 (korelasi WRB-2).

- b. Suhu maksimum pusat *meat* bahan bakar sekitar 1800 °C, sehingga memberikan margin yang cukup terhadap suhu pelelehan bahan bakar 2594 °C.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan untuk kondisi desain ekstrim yakni kondisi yang diakibatkan ketidakseimbangan posisi batang kendali, sehingga *rod* mencapai faktor daya  $F_Q$  sebesar 2,60 dengan data teknis masukan seperti pada Tabel 1, disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil validasi termohidrolika untuk AP1000-EU.

	AP1000-EU		
	Desain	COBRA-EN	Deviasi
Data masukan :			
Daya reaktor (MW)	3400	3400	
Laju alir efektif (kg/j)	$48,44 \times 10^6$	$48,44 \times 10^6$	
Suhu <i>inlet</i> pendingin (°C)	279,44	279,44	
Faktor daya, $F_Q$	2,60	2,60	
Hasil :			
Suhu maksimum T (°C)			
▪ Tengah <i>meat</i>	-	1645,2	-
▪ Permukaan <i>meat</i>	-	612,1	-
▪ Kelongsong bagian dalam	-	422,5	-
▪ Kelongsong bagian luar	-	346,4	-
▪ Pendingin keluar kanal	324,66	326,8	0,66%
Kecepatan massa (kg/m <sup>2</sup> .s)	3458,33	3454,73	-0,10%
Fluks panas rerata $q''$ (kW/m <sup>2</sup> )	628,71	627,35	-0,22%
Fluks panas maksimum $q''$ (kW/m <sup>2</sup> )	1634,71	1631,10	-0,22%
Koef.hantaran panas h (W/m <sup>2</sup> .K)	-	36855,68	-
DNBR minimum	2,80 (WRB-2M)	2,356 (W-3)	-

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa deviasi antara data desain dengan hasil perhitungan dengan *code* COBRA-EN pada suhu pendingin keluar kanal, kecepatan massa pendingin dan fluks panas, diperoleh perbedaan dalam rentang kurang dari 1 %. Adapun data suhu *meat* dan kelongsong, serta koefisien hantaran panas tidak ditampilkan pada dokumen data desain.

Adapun nilai DNBR minimum yang berbeda, pada data desain ditetapkan 2,80 (korelasi WRB-2M) sedangkan hasil perhitungan dengan COBRA-EN sebesar 2,356 (korelasi W-3), hal ini dikarenakan penggunaan korelasi perhitungan fluks panas kritis yang berbeda. Di dalam dokumen desain, meski disebut dapat digunakan korelasi W-3, tetapi dalam kenyataannya yang digunakan dalam desain adalah korelasi WRB-2M, di mana korelasi WRB-2M tersebut tidak terdapat di dalam *code* COBRA-EN. Karena nilai DNBR minimum tidak dapat dibandingkan secara langsung, namun jika dilihat dari besaran nilai masing-masing DNBR minimum yang dihitung pada kondisi yang sama, maka dapat dikatakan bahwa nilai DNBR korelasi W-3 lebih konservatif dibanding nilai DNBR korelasi WRB-2M.

Dari perbandingan nilai antara hasil desain dengan hasil perhitungan termohidrolika dengan *code* COBRA-EN yang memiliki deviasi kurang dari 1 % tersebut, hal ini menunjukkan, bahwa model dan hasil perhitungan menggunakan *code* COBRA-EN terhadap data desain AP1000-EU sudah valid.



Adapun hasil pemetaan distribusi suhu maksimum tengah *meat*, suhu kelongsong, suhu *outlet* pendingin, DNBR minimum dan fluks panas maksimum untuk masing-masing *rod* di dalam 1/8 perangkat bahan bakar AP1000-EU posisi G-9 pada kondisi awal siklus, daya penuh, Xenon setimbang dan batang kendali teras diangkat, dengan variasi faktor daya 1,124 – 1,396, disajikan pada Gambar 4.

								1,124 890,7 349,5 321,9 5,466 705,14
							1,165 912,3 351,1 322,1 5,272 730,86	1,134 896,1 350,0 322,0 5,417 711,41
						1,252 957,5 353,4 322,3 4,902 786,07	1,198 929,5 352,1 322,3 5,127 751,56	1,157 908,2 350,9 322,2 5,309 725,84
			0,000 - 321,3 321,2 - -	1,306 984,5 354,6 322,2 4,704 819,31	1,222 941,8 352,9 322,4 5,026 766,62	1,169 914,5 351,4 322,4 5,254 733,37		
		1,371 1018,7 357,1 321,5 4,480 860,09	1,372 1018,6 356,5 321,1 4,477 860,72	1,333 998,2 355,1 322,0 4,609 836,25	1,244 952,8 353,2 322,4 4,937 780,42	1,176 918,1 351,6 322,4 5,223 737,76		
		0,000 - 322,8 322,5 - -	1,378 1022,7 357,8 322,5 4,456 864,49	1,363 1014,5 356,9 321,3 4,505 855,07	0,000 - 321,6 321,3 - -	1,269 965,5 353,6 322,2 4,841 796,10	1,180 920,2 351,7 322,4 5,205 740,27	
	1,361 1015,2 358,6 323,2 4,507 853,82	1,381 1025,4 358,6 322,8 4,440 866,99	1,347 1007,4 357,6 323,1 4,556 845,03	1,328 997,2 356,6 321,9 4,622 833,12	1,323 993,7 355,6 321,5 4,642 829,98	1,252 957,1 353,6 322,3 4,906 785,44	1,180 920,3 351,8 322,5 5,205 740,27	
	1,364 1016,9 358,9 324,7 4,497 855,70	1,361 1015,2 358,7 324,1 4,444 853,82	1,381 1025,0 358,7 323,8 4,444 866,36	1,344 1006,0 357,7 323,7 4,567 843,15	1,325 995,8 356,7 322,8 4,632 831,23	1,318 991,2 355,5 322,4 4,659 826,84	1,249 955,6 353,5 322,6 4,917 783,56	1,179 919,8 351,9 322,6 5,209 739,64
0,000 - 323,8 323,7 0,00 0,00	1,396 1033,0 359,5 324,4 4,395 875,78	1,393 1031,4 359,3 323,5 4,405 873,89	0,000 - 323,3 323,1 -	1,375 1021,6 358,2 323,5 4,464 862,60	1,354 1010,4 357,1 322,2 4,534 849,43	0,000 - 322,0 321,7 -	1,271 966,6 353,9 322,4 4,833 797,36	1,184 922,3 351,9 322,6 5,187 742,78

Keterangan :

$F_Q$	: Faktor daya <i>rod</i> bahan bakar
$T_m$	: Temperatur maksimum tengah <i>meat</i> bahan bakar, °C
$T_{c,m,a}$	: Rata-rata temperatur maksimum kelongsong, °C
$T_{f,o}$	: Temperatur pendingin keluaran kanal, °C
DNBR	: Marjin keselamatan DNBR minimum
$q''_{maks}$	: Fluks kalor maksimum, kW/m <sup>2</sup>

Gambar 4. Peta distribusi faktor daya, suhu, DNBR minimum dan fluks panas maksimum perangkat bahan bakar pada operasi daya nominal.

Dari Gambar 4, hasil pemetaan distribusi faktor daya, suhu, DNBR minimum dan fluks panas maksimum perangkat bahan bakar AP1000-EU posisi G-9 pada operasi daya nominal, hasil perhitungan dengan COBRA-EN pada variasi faktor daya 1,124 – 1,396, dapat dilihat bahwa pada *rod* bahan bakar diperoleh:

- Suhu pendingin keluar kanal bervariasi antara 321,14 – 324,68 °C.
- Suhu maksimum permukaan luar kelongsong bervariasi antara 334,45 – 340,35 °C, sedangkan suhu permukaan 6 tabung pengarah bervariasi antara 321,55 – 323,75 °C hampir sama dengan suhu pendingin, hal ini dikarenakan pada tabung pengarah tidak ada pembangkitan panas karena tidak ada bahan bakar di dalamnya. Adapun suhu maksimum permukaan dalam kelongsong bervariasi antara 364,55 – 378,65 °C
- Suhu maksimum permukaan *meat* bahan bakar bervariasi antara 444,35 – 478,25 °C, sedangkan suhu maksimum tengah *meat* bervariasi antara 890,65 – 1032,95 °C.
- Fluks panas bervariasi antara 705,14 – 875,78 kW/m<sup>2</sup>, sedangkan daya linier maksimum bervariasi antara 21,04 – 26,14 kW/m.
- DNBR minimum menggunakan korelasi W-3 bervariasi antara 5,486 – 4,395.

Jika dibandingkan antara hasil pemetaan distribusi suhu, DNBR dan fluks panas dengan batasan desain AP1000-EU, diperoleh bahwa:

- Nilai suhu maksimum tengah *meat* pada kondisi operasi normal sebesar 1032,95 °C jauh lebih kecil dibanding suhu maksimum dalam batas desain 1800 °C, demikian juga DNBR minimum jauh lebih besar dibanding batas desain 2,80. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi operasi normal daya penuh, perangkat bahan bakar AP1000-EU memiliki tingkat keselamatan yang tinggi, dan cukup untuk mengantisipasi kondisi desain yang buruk.
- Secara umum perhitungan pada kondisi operasi normal, daya penuh pada awal siklus sudah mencukupi untuk menjawab peta distribusi suhu *meat*, kelongsong dan merjin keselamatan DNBR, karena pada kondisi awal siklus mempunyai variasi faktor daya yang tinggi yakni 1,124 – 1,396 dibanding dengan kondisi operasi normal, daya penuh pada akhir siklus yang mempunyai variasi faktor daya sebesar 0,930 – 1,029[2]. Pada kondisi faktor daya yang lebih rendah, maka secara perhitungan akan diperoleh suhu maksimum tengah *meat* dan kelongsong yang lebih rendah pula, sebaliknya DNBR nya akan menjadi lebih tinggi.

## KESIMPULAN

Dari hasil pemetaan distribusi suhu dan DNBR pada perangkat AP1000-EU dengan menggunakan *code* COBRA-EN dapat disimpulkan bahwa:

- Perhitungan untuk data desain pada kondisi ekstrim diperoleh perbedaan kurang dari 1%, hal ini menunjukkan model dan hasil perhitungan dengan *code* COBRA-EN terhadap data desain AP1000-EU sudah valid.
- Marjin keselamatan terhadap DNBR dengan korelasi W-3 memberikan hasil yang lebih konservatif dibanding data desain yang menggunakan korelasi WRB-2.
- Hasil pemetaan distribusi suhu, DNBR dan fluks panas pada perangkat bahan bakar AP1000-EU menunjukkan bahwa nilai suhu maksimum tengah *meat* dan fluks panas maksimum jauh lebih kecil dibanding batas maksimum desain, sedangkan DNBR minimum jauh lebih besar dibanding batas minimum desain.
- Hasil pemetaan distribusi suhu, DNBR dan fluks panas pada kondisi operasi normal, daya penuh pada awal siklus, cukup untuk menjawab peta distribusi di akhir siklus.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. PPEN – BATAN. Energi alternatif ramah lingkungan dan ekonomis di masa depan. Presentasi kebijakan energi PIE-DESDM. Jakarta; September 2003.
2. [http://www.ukap1000application.com/doc\\_pdf\\_library.aspx](http://www.ukap1000application.com/doc_pdf_library.aspx)
3. Muh. Darwis Isnaini. Analisis desain termohidrolika sub kanal pada 24 batang bahan bakar PWR-1000. Prosiding Seminar Teknologi Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir ke- 14. PTRKN-BATAN dan UNPAD. Bandung; 2008.
4. Muh. Darwis Isnaini dan Pudjijanto, MS. Verifikasi desain termohidrolika teras PWR kelas 1000 MWe. Prosiding Seminar Nasional TKPFN ke-15. PTRKN-BATAN dan UNS. Surakarta; 2009.
5. Muh. Darwis Isnaini. Verifikasi desain geometri rod bahan bakar PWR1000 tipikal buatan Mitsubishi dan Westinghouse. Seminar Nasional TKPFN ke-16, PTRKN-BATAN dan ITS. Surabaya; Juli 2010.
6. Basile, D., et al. COBRA-EN: an Upgraded version of the COBRA-3C/MIT code for thermal-hydraulic transient analysis of LWR fuel assemblies and cores; 2008