

ANALISIS TERMOHIDROLIKA ELEMEN BAKAR PWR-1000 DALAM MATRIKS 2-2

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

ABSTRAK

ANALISIS TERMOHIDROLIKA ELEMEN BAKAR PWR-1000 DALAM MATRIKS 2 × 2. Telah dilakukan suatu analisis termohidrolika elemen bakar PWR-1000 dengan menggunakan 4 buah batang bahan bakar yang dimodelkan dalam matriks 2 × 2, yang dibedakan besar faktor radialnya, yaitu masing-masing 1,011, 2,07, 1,014 dan 1,021 yang di kelilingi oleh 9 kanal aliran. Dari hasil perhitungan menggunakan *Code* (program perhitungan komputer) COBRA IV-I dari versi AXP diperoleh temperatur kelongsong maksimum untuk batang bahan bakar ke 1, 2, 3, dan 4 masing-masing sebesar 650,0, 658,8, 652,3 dan 649,3 °F dan temperatur meat bahan bakar masing-masing sebesar 1698,0, 2835,0, 1704,3 dan 1709,1 °F, dan DNBR minimum 1,86 pada subkanal 3. Dengan batasan bahwa temperatur *meat* maksimum sebesar 5080 °F dan DNBR minimum sebesar 1,30, disimpulkan bahwa disain PLTN jenis PWR-1000 masih dalam batas keselamatan.

ABSTRACT

THERMALHYDRAULICS ANALYSIS OF PWR-1000 FUEL ELEMEN, IN MATRIKS 2 × 2. Thermalhydraulics analysis of PWR-1000 fuel elemen using 4 fuel pin rods in matrix 2 × 2 has been carried out. The model consists of 4 fuel pin rods in matrix 2 × 2 that surrounding by 9 flow subchannels, and different radial factors by 1.011, 2.07, 1.014 and 1.021, respectively. The calculation was done using COBRA IV-I code (computer program) AXP version, gave results the maximum cladding temperature for rod each 1, 2, 3 and 4, were 650.0, 658.8, 652.3 and 649.3 °F, respectively, and the maximum meat temperature were 1698.0, 2835.0, 1704.3 dan 1709.1 °F, respectively, and the minimum departure from nucleate boiling ration (DNBR) 1.86 in subchannel 3. By design limits that the maximum meat temperature was not over than 5080 °F and the minimum DNBR was not less than 1.30, said that the PWR-KSNP design was in the range of safety.

PENDAHULUAN

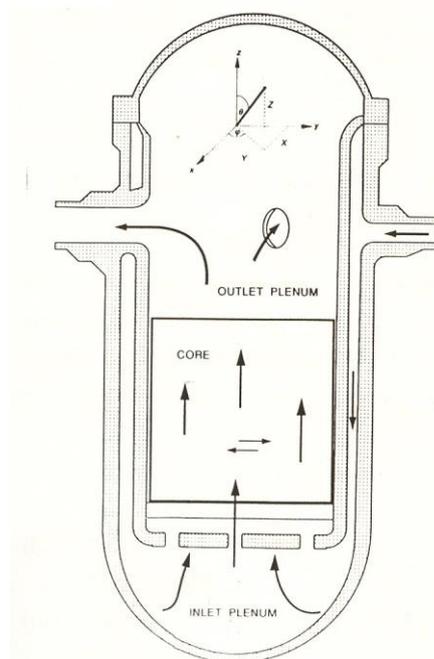
Berdasarkan Program Jangka Panjang Energi Nasional (PJPEN), untuk mendukung pertumbuhan ekonomi maka dibutuhkan jumlah energi listrik yang sangat besar mencapai 25 MW. Untuk itu diperlukan pemenuhan energi dari berbagai sumber penghasil listrik, yang salah satunya adalah opsi nuklir yaitu berupa pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), yang dalam rencana Program Energi Nuklir Nasional (PENN), PLTN pertama akan mulai dioperasikan di Indonesia sekitar tahun 2016. Untuk mendukung program pemerintah tersebut, BATAN sebagai lembaga litbang yang ditugasi pemerintah sebagai lembaga yang mempromosikan penggunaan PLTN membuat rencana strategi (RENSTRA) yang harus mampu meyakinkan kepada pemerintah, DPR dan masyarakat tentang PLTN baik ditinjau dari aspek ekonomi maupun keselamatan. Untuk dapat melaksanakan hal tersebut, tentunya dituntut kemampuan yang lebih tinggi dari staf BATAN untuk dapat memahami karakteristik dari PLTN tersebut khususnya dari segi keselamatannya, harus

ditunjang dengan data dukung teknis dari berbagai jenis PLTN yang ada di dunia, dan juga kemampuan di dalam membuat pemodelan dalam perhitungan dan menganalisis hasilnya. Arahan Pimpinan BATAN, bahwa pilihan PLTN yang harus lebih ditekuni untuk dikaji adalah jenis Reaktor Tekan Air Ringan atau *Pressurized Water Reactor (PWR)* sebanyak 80% dan Reaktor Tekan Air Berat atau *Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR)* sebanyak 20%. Dari 2 jenis PLTN PWR dan PHWR saja, terdapat beberapa tipe daya yang dibangkitkan mulai dari 600 MW sampai dengan 1300 MW. Dengan latar belakang untuk mendukung program pemerintah dan program BATAN, maka dilakukan penelitian secara bertahap tentang analisis termohidrolika sub kanal elemen bakar PWR-1000, yang diawali dari 1 buah elemen bakar dalam matriks 1×1 pada tahun 2006, dan secara bertahap dikembangkan untuk matriks 2×2 , 4×4 sampai 8×8 pada tahun 2009. Di dalam makalah ini akan disajikan hasil analisis termohidrolika sub kanal dari elemen bakar PWR-1000 dalam matriks 2×2 , sebagai kelanjutan dari penelitian yang dilakukan tahun sebelumnya yang dilakukan dengan program perhitungan (*code*) COBRA IV-I yang dijalankan pada *mainframe* AXP. Dari hasil penelitian ini diharapkan kemampuan staf BATAN dapat meningkat dari tahun ke tahun dalam melakukan pemodelan input dan perhitungan, dan didapatkan hasil analisis termohidrolika sub kanal khususnya karakteristik distribusi temperatur pendingin, temperatur kelongsong dan temperatur bahan bakar di dalam teras reaktor PWR.

PWR-1000^[1] adalah salah satu jenis PLTN yang ada di dunia dengan daya terbangkit sekitar 1000 MWe. Salah satu PLTN jenis PWR dengan daya sekitar 1000 Mwe adalah PWR hasil disain Korean Standard Nuclear Plants atau disingkat PWR-KSNP. Perangkat elemen bakar PWR tersusun di dalam matriks 17×17 , untuk dapat melakukan analisis secara keseluruhan karakteristik termohidrolikanya diperlukan suatu pemodelan yang sangat rumit dan tentu dibutuhkan suatu pengalaman perhitungan yang sangat teliti dan lama. Untuk mendapatkan suatu pengalaman yang memadai, diperlukan suatu latihan pemodelan perhitungan dari yang sederhana yang diawali perhitungan untuk 1 batang bahan bakar dan secara bertahap dikembangkan dalam matriks 2×1 dan seterusnya 2×2 , serta pada tahap yang akan datang dalam bentuk matriks 4×4 dan seterusnya. Untuk melakukan perhitungan ini dipergunakan program perhitungan komputer (*code*) COBRA IV-I yang merupakan akronim dari COolant Boiling in Rod Arrays.

DASAR TEORI

Paket program COBRA IV-I^[2] adalah suatu paket program yang dikembangkan dari program COBRA III-C, yang dilakukan oleh *Battelle, Pacific Northwest Laboratories* pada tahun 1976, dengan biaya dari *the Energy Research and Development Administration (ERDA)* dan *Nuclear Regulatory Commission (NRC)*, merupakan suatu program perhitungan untuk menganalisis termohidrolika teras dan elemen bakar nuklir yang berbentuk *rod bundle* (perangkat bahan bakar berbentuk silinder) untuk menghitung distribusi entalpi, aliran, temperatur dan batas keselamatan terhadap pelepasan pendidihan inti (*departure from nucleate boiling – DNB*) di dalam perangkat elemen bakar dan teras baik untuk kondisi tunak (*steady state*) dan transien. Program COBRA menggunakan konsep dasar analisis subkanal, di mana perangkat elemen bakar atau teras reaktor dibagi dalam beberapa subkanal yang mempunyai batasan-batasan yang didefinisikan oleh permukaan elemen bakar sebelahnya. Subkanal secara aksial dibagi menjadi volume-volume kontrol yang *discrete* dimana persamaan-persamaan konservasi massa, energi dan momentum ditulis, dan variable laju aliran massa, tekanan, entalpi dan densitas didefinisikan sebagai harga rerata secara volume.



Gambar 1. Konfigurasi hidraulika reaktor daya

Pada reaktor daya berpendingin air ringan jenis PWR^[1-3], konfigurasi hidrolika reaktor dapat disederhanakan seperti terlihat pada Gambar 1, di mana teras reaktor yang terdiri atas

elemen bakar dan pendingin tersusun secara heterogin, dengan kanal-kanal pendingin saling terhubung satu dengan yang lain secara kontinyu sepanjang kanal mulai dari ruang masukan (*inlet plenum*) sampai ruang keluaran (*outlet plenum*). Di dalam disain reaktor daya terdapat aliran pendingin yang di-*bypassed* mengelilingi teras dengan tujuan untuk mempertahankan temperatur struktur penopang teras dan perisai panas untuk tetap mendekati temperatur pendingin masukan. Aliran *bypass* tersebut dicampur kembali dengan aliran teras di keluaran teras. Adapun dalam perhitungan makalah ini, teras reaktor hanya diperhatikan sebagai susunan heterogin kanal-kanal pendingin yang saling terhubung secara kontinyu di dalam aliran sejajar (*parallel flow*), tanpa memperhatikan adanya aliran *bypass*.

Beberapa persamaan yang dipergunakan di dalam analisis subkanal, antara lain :

- Persamaan konservasi massa

Persamaan konservasi massa untuk subkanal i adalah sebagai berikut :

$$A_{fi} \frac{\partial \langle \rho_i \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta \dot{m}_i}{\Delta z} = - \sum_{j=1}^J [W_{ij} + W_{i \leftrightarrow j}^{iD}] \dots\dots\dots(1)$$

dimana j adalah jumlah subkanal tetangga.

- Persamaan konservasi energi

Persamaan konservasi energi untuk subkanal i adalah sebagai berikut :

$$A_{fi} \frac{\partial \langle \rho h \rangle_i}{\partial t} + \frac{\Delta [\dot{m}_i h_i]}{\Delta z} = \langle \dot{q}_i \rangle_{rb} - \sum_{j=1}^J W_{ij}^{*H} [h_i - h_j] - \sum_{j=1}^J W_{ij} \{h^*\} + A_{fi} \left\langle \frac{Dp_i}{Dt} \right\rangle \dots\dots\dots(2)$$

- Persamaan momentum ke arah aksial

Persamaan momentum ke arah aksial untuk subkanal i adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial \langle \dot{m}_i \rangle}{\partial t} + \sum_{j=1}^J W_{ij} \{v_z^*\} + \frac{\Delta (\dot{m}_i v_{zi})}{\Delta z} = -A_{fi} \langle \rho \rangle g_z - A_{fi} \frac{\Delta \langle p \rangle}{\Delta z} - \sum_{j=1}^J W_{ij}^{*M} (v_{zi} - v_{zj}) - \left\{ \frac{F_{iz}}{\Delta z} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

- Persamaan momentum ke arah lateral

Untuk tiap volme kontrol, aliran ke arah lateral hanya ditinjau ke arah satu dimensi. Subkanal-subkanal yang berdekatan dihubungkan melalui laju aliran lateral W_{ij} satu dimensi yang melewati celah.

Persamaan konservasi momentum ke arah lateral diberikan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (W_{ij}^x) + \frac{\Delta}{\Delta z} (W_{ij}^x \{v_z\}) = - \frac{s_{ij}^y}{l} (\Delta \{p\}) - \left\{ \frac{F_{ix}}{l \Delta z} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

pada kondisi tunak, kedua suku sebelah kiri dari persamaan (4) diabaikan, sehingga diperoleh

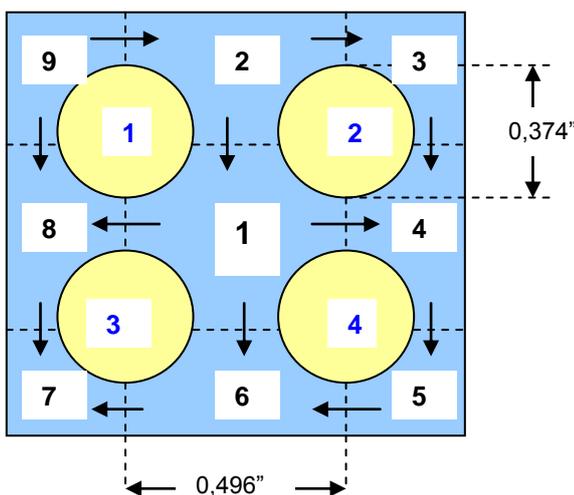
$$\frac{s_{ij}^y}{l}(\Delta\{p\}) + \left\{ \frac{F_{ix}}{l\Delta z} \right\} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

MODEL PERHITUNGAN

Model Subkanal

Sebagai acuan perhitungan, digunakan data PWR-KSNP yaitu suatu reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) jenis reaktor air tekan (*pressurized water reactor –PWR*) yang mempunyai daya termal 2815 MW, merupakan reaktor nuklir standar Korea (*Korean Standard Nuclear Plant*) yang dioperasikan oleh Korea Hydro & Nuclear Power Company. Teras reaktor terdiri atas 177 buah perangkat elemen bakar yang disusun dalam kisi 17 □ 17, dengan jumlah batang bahan bakar sebanyak 46.728 buah. Adapun spesifikasi data dari PWR-KSNP tertera pada Tabel 1.

Dalam perhitungan ini, dimodelkan sebuah perangkat elemen bakar yang terdiri atas 4 buah batang bahan bakar yang disusun dalam matriks 2 □ 2 yang dikelilingi oleh 9 subkanal, seperti tertera pada Gambar 2.



Gambar 1 Model perhitungan termohidrolika subkanal dalam matriks 2 □ 2.

Tabel 1. Data Teknis dari PWR-KSNP ^[1]

Reaktor	
Tipe	PWR
Panas keluaran teras reaktor (MWt)	2815
Laju Alir Pendingin Total (lb/hr)	121,5 × 10 ⁶
Temperatur pendingin masukan (°F)	564,5
Temperatur rerata keluaran (°F)	621,2
Temperatur maksimum operasi (°F)	625
Tekanan pada masukan teras (psia)	2302
Teras Reaktor	
Jumlah perangkat elemen bakar	177
Panjang aktif (in)	150
Diameter ekuivalen teras (in)	123
Berat total Uranium (lb)	167.420
Bahan kelongsong bahan bakar	Zircaloy
Tingkat pengkayaan awal	
Teras initial	2.44 w/o
Teras setimbang	4.24 w/o
Pemaparan pemuatan rerata	
Teras awal rerata (MWD/ST)	29.409
Teras setimbang rerata (MWD/ST)	50.000
Rapat Daya Teras rerata (kW/liter)	96,4
Fluks panas maksimum (BTU/ft ² sec)	119,9
Fluks panas kritis atau batas DNBR pada 130% daya lebih	1,30
Temperatur puncak bahan bakar (batas garis tengah pada 165% daya lebih) (°F)	5080
Data Elemen bakar*	
Diameter terluar (in)	0,374
Diameter pellet (in)	0,3225
Tebal kelongsong (in)	0,0225
Tebal gap (in)	0,00325

Catatan : * Data elemen bakar diambil dari data AP-600^[4], karena tidak terdapat pada data Design KSNP.

Batas Keselamatan

Dalam melakukan perhitungan termohidrolika subkanal dari PWR-KSNP, digunakan batasan keselamatan antara lain :

- Batas minimum terhadap pelepasan pendidihan inti (DNBR) sebesar 1,30
- Temperatur maksimum dari pusat bahan bakar adalah 5080 °F

HASIL DAN PEMBAHASAN

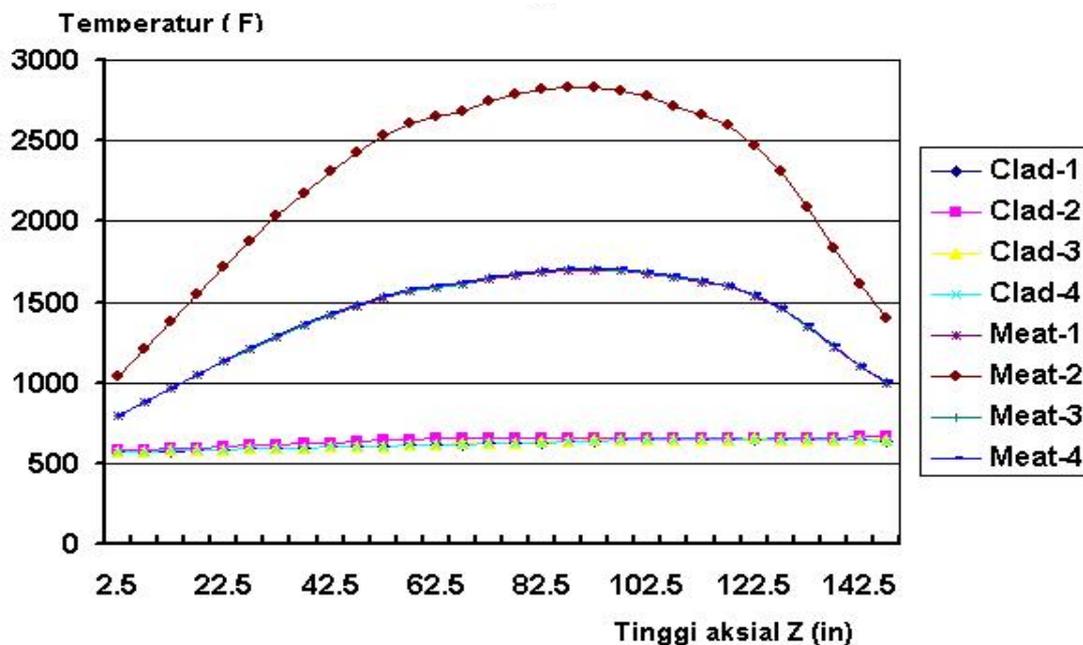
Hasil perhitungan menggunakan program COBRA-IV-I pada 4 batang bahan bakar dalam matriks 2×2 diperoleh hasil seperti tertera pada Tabel 2 serta Gambar 3 dan 4. Dari Tabel 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa, pada batang bahan bakar no. 2, akan didapatkan temperatur kelongsong, temperatur permukaan *meat* dan temperatur tengah *meat* tertinggi dibanding batang bahan bakar yang lain. Hal ini disebabkan karena batang bakar no. 2 mempunyai faktor radial tertinggi yaitu 2,07 yang berarti pembangkitan panas pada batang bakar no. 2 lebih tinggi dibanding yang lain, terlihat dari besarnya fluks panasnya lebih tinggi dibanding dari fluks panas batang bakar yang lain.

Dari Tabel 2 menunjukkan pula bahwa, temperatur kelongsong dari batang bahan bakar no. 4 mempunyai nilai terkecil, padahal faktor radialnya lebih besar dari batang bahan bakar no. 1 dan 3. Hal ini bisa terjadi, karena batang bahan bakar no. 1 dan 3 lebih dekat dengan batang bahan bakar no. 2 (batang bahan bakar terpanas) dibanding batang no. 4, sehingga batang bahan bakar no 1 dan 3 mendapat sumbangan panas dari batang bahan bakar no. 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan termohidrolika batang bahan bakar PLTN jenis PWR-KSNP.

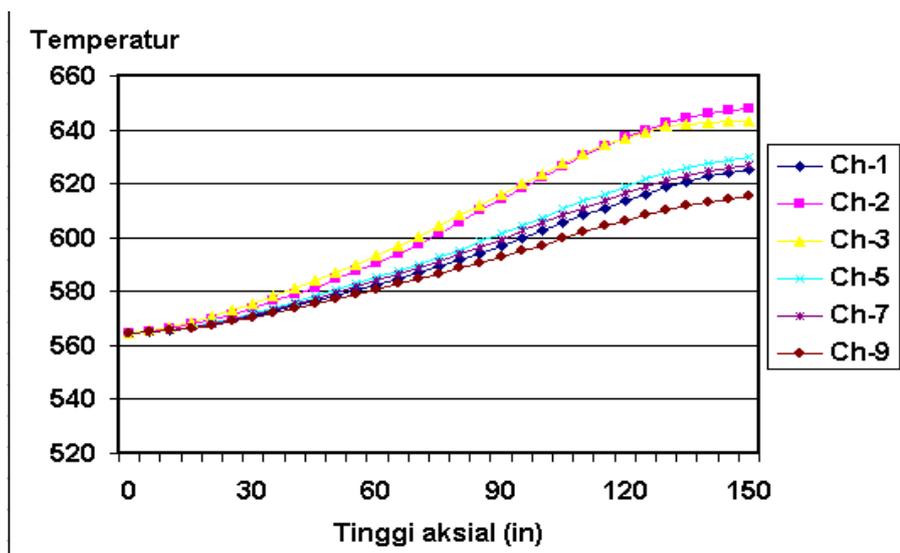
	Batang bahan bakar (Pin Rod)			
	No. 1	No. 2	No.3	No.4
Temperatur pendingin masukan (°F)	564,5	564,5	564,5	564,5
Faktor Radial	1,011	2,070	1,014	1,021
Temperatur (°F)				
Kelongsong maksimum	650,0	658,8	652,3	649,3
Permukaan <i>meat</i> maksimum	844,9	1079,7	847,9	846,6
Tengah <i>meat</i> maksimum (pada posisi ketinggian)	1698,0 (92,5 in)	2835,0 (87,5 in)	1704,3 (87,5 in)	1709,1 (92,5 in)
Fluks panas (MBtu/jam.ft ²)				
Maksimum	0,2154	0,4411	0,2161	0,2176
Rerata	0,1594	0,3264	0,1560	0,1610
Marjin keselamatan terhadap DNBR minimum	4,118	1,856	4,102	4,106

Sedangkan dari Gambar 4 menunjukkan bahwa, temperatur pendingin pada subkanal no. 2 dan no. 3 lebih tinggi dibanding temperatur pada subkanal yang lain. Hal ini disebabkan karena subkanal no. 2 dan 3 mengelilingi batang bahan bakar no.2 yang merupakan batang bahan bakar terpanas.



Gambar 3. Grafik Distribusi Temperatur Kelongsong dan Pusat *Meat* Bahan Bakar

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa temperatur maksimum *meat* bahan bakar PLTN jenis PWR-KSNP sebesar 2835,0°F dan margin keselamatan terhadap DNBR minimum sebesar 1,856. Dari batasan disain yang ada dapat disimpulkan bahwa PLTN jenis PWR-KSNP masih berada dalam batas keselamatan.



Gambar 4. Grafik Distribusi Temperatur Pendingin

KESIMPULAN

Dari hasil analisis terhadap elemen bakar PLTN tipe PWR-KSNP dapat disimpulkan bahwa :

1. Program komputer COBRA IV-I versi AXP dapat dipakai untuk melakukan perhitungan termohidrolika subkanal dari reaktor PLTN.
2. Batang bahan bakar no.2 memiliki temperatur kelongsong, permukaan batang bahan bakar dan *meat* tertinggi dibanding batang bahan bakar yang lain.
3. Temperatur pendingin pada subkanal no. 2 dan 3 lebih tinggi dibanding pada subkanal yang lain, karena subkanal no. 2 dan 3 mengapit batang bahan bakar terpanas.
4. Dari batasan disain yang ada dapat disimpulkan bahwa PLTN jenis PWR-KSNP masih berada dalam batas keselamatan.

DAFTAR ACUAN

1. Anonim, "General Design Data of NSSS System and Components on KSNP", Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., July 2004.
2. Wheeler, C.L. et. al. ,"COBRA IV-I: An Interim Version of COBRA for Thermal-hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores" , Battelle, Pacific Northwest Laboratories Richland, Washington 99352, USA, 1976.
3. K. Putranta, "Komputasi Termohidrolika Teras Reaktor", Diklat Aspek Neutronik dan Termohidraulika PLTN I, BATAN, Jakarta, 1994.
4. Anonim, "AP600 Standard Safety Analysis Report", U.S. Department of Energy, San Francisco Operations Office, DE-AC03-09SF18495, June 26, 1992.