

ANALISIS MODEL TERAS 3-DIMENSI UNTUK EVALUASI PARAMETER KRITIKALITAS REAKTOR PWR MAJU KELAS 1000 MW ^{*)}

Tagor M. Sembiring

PTRKN – BATAN, Kawasan PUSPIPEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan
Indonesia

Email: tagorms@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS MODEL TERAS 3-DIMENSI UNTUK EVALUASI PARAMETER KRITIKALITAS REAKTOR PWR MAJU KELAS 1000 MW. Setelah kejadian Fukushima, penggunaan sistem keselamatan pasif menjadi persyaratan yang penting untuk PLTN. PLTN jenis PWR maju kelas 1000 yang didesain oleh Westinghouse, AP1000, memiliki fitur keselamatan pasif disamping sederhana dan modular. Sebelum memilih suatu PLTN, maka perlu dilakukan suatu evaluasi terhadap parameter desainnya. Salah satu parameter yang penting dalam keselamatan adalah kritikalitas teras. Permasalahan pokok dalam mengevaluasi parameter kritikalitas teras AP1000 tidak adanya data komposisi material SS304 dan H₂O di daerah reflektor dan diameter penyerap SS304. Dengan demikian tujuan penelitian ini adalah mendapatkan model teras 3-dimensi AP1000 dan siap diaplikasikan dalam evaluasi parameter kritikalitas teras. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa komposisi terbaik SS304 dan H₂O di reflektor teras bagian atas dan bawah masing-masing 50 vol%, sedangkan diameter penyerap SS304 adalah 0,960 cm. Evaluasi konsentrasi boron kritis menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan nilai desain. Meskipun penyebab utama dari perbedaan ini belum diketahui, akan tetapi dapat dibuktikan bahwa konsentrasi boron kritis sangat sensitif dengan densitas UO₂. Untuk reaktivitas padam, reaktor AP1000 memiliki margin subkritikalitas teras yang besar untuk satu siklus operasi. Dengan demikian teras yang diusulkan dapat digunakan sebagai acuan untuk evaluasi parameter teras lainnya atau perangkat analitis lainnya dalam rangka mengevaluasi desain reaktor AP1000.

Kata kunci: AP1000, kritikalitas, konsentrasi boron kritis, reaktivitas padam

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE 3-DIMENSIONAL CORE MODEL FOR EVALUATION OF CRITICALITY PARAMETERS OF THE ADVANCED PWR 1000 MW CLASS. After the Fukushima accident, the use of passive safety system becomes an important requirement for the nuclear power plant (NPP). The advanced PWR NPP with 1000 MW (electric) class, designed by Westinghouse, AP1000, a reactor with the passive safety features as well as simple and modular. Before selecting a nuclear power plant, there should be an evaluation of the design parameter. One important parameter in criticality safety is core criticality parameters. Main problem in evaluating the core criticality parameters of the AP1000 is that the material composition data SS304 and H₂O in the reflector (top and bottom of core) and the diameter of SS304 absorber are not provided. Therefore the objective of this research is to obtain a three-dimensional model of AP1000 core and it can be applied in the evaluation of the core criticality parameters. The calculation results show that the optimum composition of SS304 and H₂O in the top and bottom reflector is 50 vol%, respectively, while the diameter of the SS304 absorber is 0.960 cm. Evaluation of the critical boron concentration showed a significant difference to the design value. Although the main cause of this difference is not clear, but it can be proved that the critical boron concentration is very sensitive to the density of UO₂. For shutdown reactivity, AP1000 has a large subcriticality margin for one operating cycle. It can be concluded that the proposed 3-dimensional core model of AP1000 can be used as a reference for other core parameter calculation or other analytical tools in order to evaluate the AP1000 reactor design.

Key words: AP1000, criticality, critical boron concentration, shutdown reactivity

PENDAHULUAN

Setelah kejadian Fukushima Daichi di Jepang yang menyebabkan teras reaktor mengalami rusak parah (*core damage*) akibat tidak berfungsinya pendingin darurat karena gagal pasokan daya darurat oleh terpaan tsunami, membuat seluruh jenis PLTN harus memiliki sistem keselamatan pasif. Indonesia sebagai negara yang ingin membangun PLTN karena kebutuhan energi listrik, perlu memilih jenis reaktor yang memiliki sistem keselamatan pasif tetapi juga memiliki keluaran daya elektrik besar, misal kelas 1000 MW (elektrik). Salah satu jenis yang memiliki persyaratan tersebut adalah reaktor PWR (*Pressurized Water Reactor*) kelas 1000 MWe yang didesain oleh Westinghouse dengan nama dagang AP1000 [1]. Dibanding dengan reaktor PWR Generasi-III, reaktor AP1000 didesain dengan prinsip konstruksi yang sederhana (*simplicity*) dan modular untuk menekan biaya pembangunan dan mendapatkan biaya elektrik yang relatif murah [1]. Dengan demikian reaktor AP1000 dapat dijadikan salah satu kandidat untuk PLTN pertama di Indonesia. Walaupun demikian evaluasi terhadap parameter keselamatan desain reaktor AP1000 perlu dilakukan sebelum memutuskan pilihan jenis PLTN pertama di Indonesia.

Salah satu parameter keselamatan yang penting adalah kritikalitas yaitu kemampuan mengendalikan populasi neutron sepanjang reaktor beroperasi. Untuk reaktor PWR, parameter kritikalitas yang penting adalah reaktivitas lebih, konsentrasi boron saat kritis (*critical boron concentration*) dan total reaktivitas padam (*shutdown reactivity*). Misal, dipersyaratkan batang kendali harus mampu memadamkan reaktor sepanjang reaktor dioperasikan. Dengan demikian analisis parameter kritikalitas hasil desain reaktor AP1000 perlu dilakukan.

Permasalahan yang dihadapi dalam menganalisis parameter kritikalitas AP1000 adalah sebagian data teras tidak tersedia di dokumen desain yang telah disiapkan untuk publik oleh badan regulasi nuklir Amerika Serikat, US NRC [2]. Salah satu bagian yang tidak lengkap akan tetapi penting dalam perhitungan teras adalah komposisi bahan struktur di atas dan di bawah teras (ke arah aksial). Dalam kaitannya dengan pengendalian reaktivitas, dokumen desain tidak menyediakan data diameter penyerap SS304 untuk batang kendali GRCA (*gray rod control assembly*). Disamping itu, teras AP1000 juga sangat kompleks konfigurasinya karena terdiri dari beberapa jenis perangkat bahan bakar yang memiliki keragaman dalam pengkayaan, pola dan posisi penyerap dapat bakar dan ketinggian aksial dari bagian bahan bakar. Oleh karena itu kegiatan penelitian ini berkaitan dengan analisis sensitivitas komposisi bagian teras dan dimensi komponen teras untuk dipakai dalam evaluasi parameter kritikalitas teras AP1000.

Perangkat analitis (*analytical tool*) yang dipakai dalam penelitian ini adalah paket program metode Monte Carlo, MCNP5 versi 1.4 [3]. Keakuratan paket program ini dalam menganalisis teras berjenis PWR sudah terbukti dari beberapa penelitian sebelumnya [4-7]. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan MCNP sangat sesuai dengan hasil perhitungan *design code* HELIOS [4], hasil perhitungan MCNP dijadikan sebagai acuan untuk menguji akurasi paket program deterministik [5], dan hasil perhitungan MCNP juga akurat jika dibandingkan dengan hasil eksperimen [6-7]. Hasil yang memuaskan tersebut diperoleh karena paket program MCNP menggunakan pendekatan matematis dalam membentuk geometri sehingga model geometri yang detail dapat dibentuk. Disamping itu, tampang lintang neutron yang digunakan merupakan fungsi kontinu dengan energi neutron.

Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan suatu model teras 3-dimensi AP1000 yang detail dan siap diaplikasikan dalam evaluasi parameter kritikalitas. Hasil penelitian ini akan dapat dimanfaatkan dalam analisis parameter teras lainnya, seperti perhitungan faktor puncak

daya atau perhitungan parameter kinetika teras, karena model perhitungan teras AP1000 yang valid sudah diperoleh. Disamping itu, model teras yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk perangkat analitik lainnya dalam menganalisis desain AP1000.

Nilai desain AP1000 dinyatakan dalam 3 (tiga) kondisi yaitu CZP (*cold zero power*), HZP (*hot zero power*) dan HFP (*hot full power*). Oleh karena data tampang lintang MCNP5 terbatas temperaturnya, maka objek penelitian hanya dibatasi pada parameter kritikalitas teras dalam kondisi CZP. Analisis sensitivitas komposisi di daerah reflektor teras dilakukan untuk bagian atas dan bawah teras aktif dengan memvariasi komposisi volume SS304 dan H₂O. Setelah mendapatkan komposisi terbaik, model teras dipakai untuk mengevaluasi kritikalitas teras dan konsentrasi boron kritis. Penentuan diameter penyerap SS304 digunakan untuk analisis reaktivitas padam seluruh batang kendali.

DESKRIPSI TERAS REAKTOR AP1000

AP1000 adalah desain reaktor Westinghouse Electric Company dan merupakan reaktor Generasi-III+ yang menerima persetujuan desain (*final design*) dari US NRC [8]. Reaktor AP1000 adalah reaktor PWR dengan dua-untai (*two-loop*) yang menghasilkan energi listrik sebesar 1154 MW. Parameter desain yang utama untuk reaktor AP1000 menyerupai reaktor PWR lainnya. Reaktor AP1000 menghasilkan daya termal sebesar 3400 MW yang dibangkitkan dari 157 perangkat bahan bakar UO₂ dengan pendingin dan moderator adalah air ringan (H₂O). Tabel 1 menyajikan parameter desain reaktor AP1000 yang merupakan deskripsi teras raktor.

Tabel 1. Desain reaktor AP1000 [2]

Parameter	Nilai
Daya reaktor:	
Daya termal, MW	3400
Daya elektrik, MW	1117
Panas yang dibangkitkan di bahan bakar, %	97,4
Teras aktif:	
Tinggi bahan bakar aktif di teras pertama, cm	426,7
Diameter ekuivalen, cm	304
Komposisi dan dimensi reflektor air (H₂O):	
Bagian atas (<i>top</i>) - air dan SS304, cm	~25,4
Bagian bawah (<i>bottom</i>) - air dan SS304, cm	~25,4
Bagian samping (<i>side</i>) - air dan SS304, cm	~38,1
Perangkat bahan bakar:	
Susunan 1 (satu) perangkat	17×17
Jumlah perangkat dalam satu teras	157
Material bahan bakar	UO ₂ (<i>sintered</i>)
Pengkayaan ²³⁵ U, w%	2,35, 3,40 dan 4,45
Jumlah batang (rod) bahan bakar	264
Jumlah tabung pengarah/ <i>instrument guide thimbles</i>	24/1

Batang kendali (penyerap neutron):	
Jumlah <i>Rod Cluster Control Assembly</i> (RCCA)	53
Jumlah Grey Rod Control Assembly (GRCA)	16
Struktur teras:	
Material <i>core barrel</i>	SS304
Diameter <i>core barrel</i> , ID/OD, cm	339,72 / 349,88
Material <i>baffle</i>	SS304
Ketebalan <i>baffle</i> , cm	2,2

Dalam satu perangkat bahan bakar (*fuel assembly*, FA) AP1000, batang bahan bakar UO_2 dan tabung pengarah (*guide tube*) disusun dalam 17×17 [2]. Tabung pengarah yang ada di tengah dipakai sebagai instrument guide thimbles. Tabel 2 menyajikan material dan dimensi batang bahan bakar dan tabung pengarah di FA. Khusus material kelongsong ZIRLO, komposisi material tidak dijelaskan di dokumen desain [2], sehingga diacu dari Natesan dan Soppet [9], yaitu dengan densitas $6,44 \text{ g/cm}^3$ dan komposisi nuklida adalah 1w% Sn, 1w%Nb, 0,1w%Fe dan sisanya Zr.

Tabel 2. Data desain perangkat bahan bakar [2]

Parameter	Nilai
Bahan bakar UO_2:	
Jarak antar rod (<i>pitch</i>), cm	1,260
Diameter pelet, cm	0,81915
Tebal celah, cm	0,01645
Tebal kelongsong, cm	0,0572
Material kelongsong	ZIRLO
Tabung pengarah:	
Diameter dalam/luar, cm	1,123/1,224
Material tabung	ZIRLO

Seperti terlihat di Gambar 1, teras AP1000 disusun oleh 157 FA yang memiliki tiga jenis pengkayaan. Susunan teras tersebut didesain sedemikian rupa sehingga:

- distribusi pembangkitan panas ke arah radial masih dalam batas desain dan
- memiliki kecukupan reaktivitas untuk satu siklus operasi.

Akan tetapi karena reaktivitas lebih teras pertama AP1000 cukup tinggi ($17,01\% \Delta k/k$), maka diperlukan dua jenis pengendali reaktivitas yang parsial [2], yaitu:

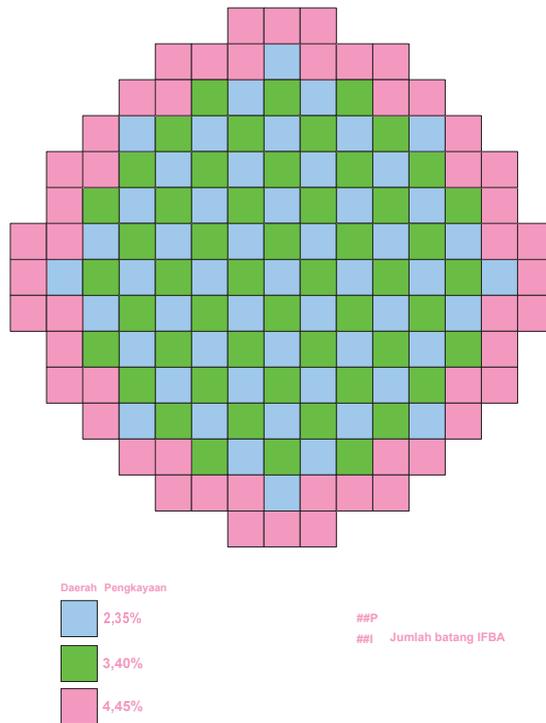
1. ditematkannya racun dapat bakar *discrete burnable absorber rods*, yang terbuat dari *borosilicate glass* atau sering disebut PYREX, di beberapa posisi teras melalui posisi tabung pengarah,
2. ditematkannya bahan bakar (*pellet*) yang sudah dilapisi penyerap neutron, *boride coating*, yang disebut *integral fuel burnable absorber* (IFBA).

Susunan PYREX dan IFBA dalam FA di teras diatur sedemikian untuk:

- menyediakan kendali reaktivitas parsial yang cukup untuk satu siklus operasi,
- membatasi nilai faktor puncak daya (*power peaking faktor*),

- menyediakan koefisien reaktivitas moderator agar tidak positif sepanjang operasi.

Seperti terlihat dalam Gambar 1, jumlah PYREX dalam perangkat bahan bakar ada tiga pola yaitu berjumlah 9, 12 dan 24. Sedangkan IFBA hanya ada di perangkat bahan bakar berpengkayaan 4,45% dengan lima pola yaitu 28, 44, 72, 88 dan 112, kecuali 4 posisi FA berpengkayaan 2,35%. Tabel 3 menggambarkan dimensi PYREX dan IFBA.

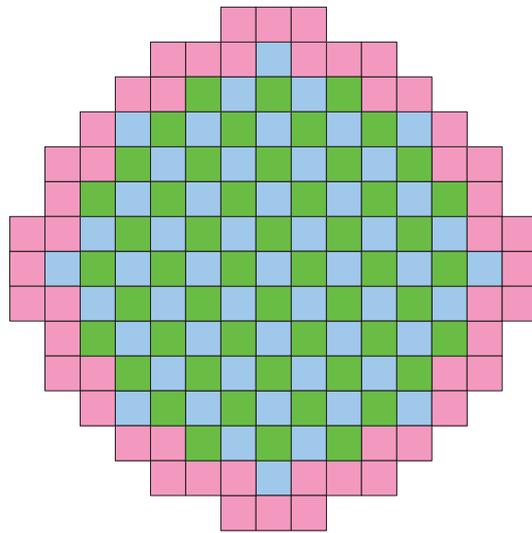


Gambar 1. Konfigurasi teras AP1000 dengan PYREX dan IFBA [2]

Tabel 3. Deskripsi data desain PYREX dan IFBA [2]

Parameter	Nilai
PYREX (teras pertama):	
Jumlah di teras	1558
Diameter luar, cm	0,968
Diameter luar tabung dalam, cm	0,461
Material kelongsong	Stainless Steel
Material tabung dalam	Stainless Steel
Kandungan ¹⁰ B, g/cm	$6,24 \times 10^{-3}$
Tinggi, cm	368,3
IFBA (teras pertama):	
Jumlah di teras	8832
Kandungan ¹⁰ B, g/cm	$7,72 \times 10^{-3}$
Tinggi, cm	386,1

Gambar 2 menunjukkan posisi batang kendali di teras AP1000 yang terdiri dari *rod cluster control assembly* (RCCA) dan *gray rod control assembly* (GRCA) dengan jumlah masing-masing adalah 53 dan 16 [2]. Komposisi material dan dimensi dapat dilihat di dokumen desain [2].



Keterangan:

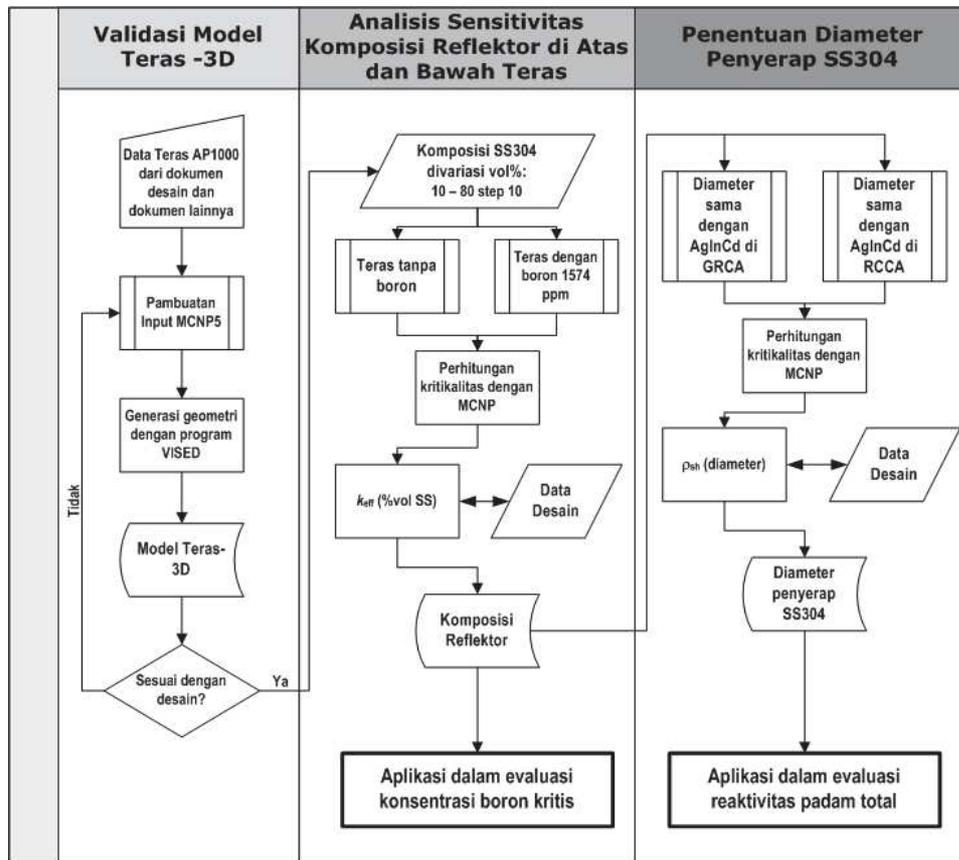
MA	GRCA, Bank A (<i>shim rod</i>), 4 buah	AO	RCCA, <i>control bank</i> , 9 buah
MB	GRCA, Bank B (<i>shim rod</i>), 4 buah	SD1	RCCA, Bank 1(pemadam), 8 buah
MC	GRCA, Bank C (<i>shim rod</i>), 4 buah	SD2	RCCA, Bank 2(pemadam), 8 buah
MD	GRCA, Bank D (<i>shim rod</i>), 4 buah	SD3	RCCA, Bank 3(pemadam), 8 buah
M1	RCCA, Bank 1 (<i>shim rod</i>), 4 buah	SD4	RCCA, Bank 4(pemadam), 8 buah
M2	RCCA, Bank 1 (<i>shim rod</i>), 8 buah		

Gambar 2. Distribusi posisi batang kendali di teras AP1000 [2]

METODE PERHITUNGAN

Konfigurasi teras AP1000 yang dipilih dalam penelitian ini adalah teras pertama (*first core*), kondisi dingin, yaitu semua material teras memiliki temperatur 20°C atau 293 K, daya rendah (*zero power*) dan tanpa xenon. Kondisi teras ini sering disebut CZP (*cold zero power*). Gambar 3 menyajikan diagram alir (*flowchart*) perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini. Tampak jelas dari diagram alir bahwa evaluasi konsentrasi boron kritis dan

penentuan diameter penyerap SS304 dilakukan setelah ditemukannya komposisi SS304 dan H₂O di reflektor bagian atas dan bawah daerah aktif.



Gambar 3. Diagram alir pemodelan teras 3-D AP1000 dan evaluasi parameter kritikalitas

Pemodelan Teras 3-Dimensi

Sebelum memodelkan teras, perlu diketahui dengan detail dimensi beberapa material teras (berkaitan dengan bahan bakar) yang tidak disajikan dengan lengkap di dokumen desain yaitu PYREX dan IFBA. Untuk PYREX, data geometri dan material diacu dari penelitian Wagner dan Parks [10]. Hasil penelitian Wagner dan Parks juga diacu untuk penentuan komposisi material penyusun IFBA. Tabel 4 menyajikan deskripsi data geometri dan material penyusun PYREX dan IFBA yang digunakan dalam perhitungan teras.

Tabel 4. Data detail geometri dan material PYREX dan IFBA [2,8,10]

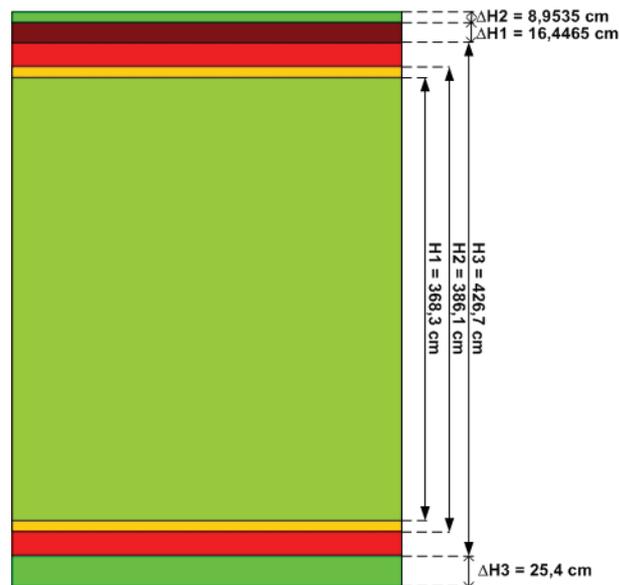
Parameter	Nilai
PYREX (teras pertama):	
Material	B ₂ O ₃ -SiO ₂
Komposisi	0,699 w% ¹⁰ B, 3,27 w% ¹¹ B, 53,902 w% O, 1,167 w% Al, 37,856 w% Si, 0,332 w% K dan 2,837 w%Na
Material kelongsong dalam	SS304
Material kelongsong luar	SS304
Diameter dalam (ID) kelongsong dalam, cm	0,42799
Diameter luar (OD) kelongsong dalam, cm	0,46101
Diameter dalam (ID) kelongsong luar, cm	0,87376
Diameter luar (OD) kelongsong luar, cm	0,96774
Diameter dalam (ID) PYREX, cm	0,4826
Diameter dalam (OD) PYREX, cm	0,85344
IFBA (teras pertama):	
Material	ZrB ₂
Ketebalan pelapisan, cm	0,00256 [8]

Perhitungan teras menggunakan ketebalan reflektor air di sisi samping (radial) berukuran 25,06 cm, tidak seukuran 38,1 cm seperti data desain (Tabel 1). Hal ini disebabkan karena jika menggunakan ketebalan sesuai desain, maka akan melebihi batas permukaan dalam bejana tekan yang berukuran 201,93 cm [11].

Langkah-langkah yang digunakan dalam memodelkan teras AP1000 adalah:

1. Teras dimodelkan secara utuh (*whole core*), detail dan 3-dimensi. Model 3-dimensi teras AP1000 dibentuk ke arah radial dan aksial masing-masing Gambar 1 dan Gambar 4.

Tabel 5 menunjukkan komposisi tiap zona ke arah aksial teras. Seperti sudah disebut di atas, komposisi ΔH2 dan ΔH3 yang divariasikan persentase volume untuk SS304 dan H₂O. Untuk daerah atas teras, reflektor dibagi dua zona yaitu *upper plenum* dan reflektor atas. Berdasarkan data desain, daerah *upper plenum* adalah setinggi 16,4465 cm [2].



Gambar 4. Model teras AP1000 ke arah aksial

Tabel 5. Pembagian zona aksial teras AP1000

Zona	Tinggi, cm	Komposisi
H1	368,3	PYREX + IFBA + UO ₂
H2	386,1	Zona H1 + IFBA (bagian atas dan bawah)
H3	426,7	Zona H1 + H ₂ + UO ₂ (bagian atas dan bawah)
ΔH1	16,4465	Upper plenum (ZIRLO + H ₂ O)
ΔH2	8,9535	Reflektor atas (SS304 +H ₂ O)
ΔH3	25,4	Reflektor bawah (SS304 +H ₂ O)

- Model teras harus simetris untuk ke arah radial dan aksial teras. Misal ke arah radial, teras utuh dapat dimodelkan dalam bentuk ¼ bagian yang identik. Simetrisitas berarti juga harus menjaga orientasi pola posisi PYREX. Misal untuk PYREX yang berjumlah 12, orientasi polanya akan berbeda di bagian kiri, kanan atas atau bawah teras (Gambar 1) untuk mendapatkan bentuk teras yang simetris.
- Generasi gambar dari data masukan (*input*) dilakukan dengan program VISED dan dibandingkan dengan geometri desain dan asumsi yang digunakan.

Analisis Sensitivitas Komposisi SS304 dan H₂O di Reflektor

Parameter teras yang dihitung adalah faktor perlipatan efektif teras saat tanpa dan dengan boron di pendingin air. Komposisi SS304 dan H₂O di reflektor bagian atas dan bawah teras aktif diasumsikan sama. Komposisi SS304 dan H₂O dinyatakan dalam variasi persentase volume, vol%. Seperti dinyatakan dalam Gambar 3, analisis sensitivitas dilakukan dengan menetapkan komposisi SS304 dalam rentang 10 vol% - 80 vol% dengan perubahan tiap 10 vol% sebagai *parametric survey*. Jika komposisi SS304 sebesar 10 vol% maka

komposisi H₂O sebesar 90 vol%. Komposisi reflektor akan ditetapkan melalui perbandingan hasil perhitungan dan nilai desain untuk kondisi dengan dan tanpa boron.

Komposisi reflektor ke arah radial, yang terletak di luar *core barrel*, diasumsikan terdiri dari 10 vol% SS304 dan 90 vol% H₂O. Asumsi ini dipilih karena berdasarkan dokumen desain bahwa material struktur di sepanjang teras aktif dan di luar *core barrel* sangat sedikit, dengan demikian diasumsikan reflektornya didominasi oleh H₂O [2].

Seluruh perhitungan dilakukan dengan jumlah neutron sebanyak 10000 (104) per siklus. Sejumlah 100 siklus dilompati sebelum perhitungan k_{eff} dimulai dari total 600 siklus yang digunakan. Sumber neutron diatur posisinya dengan kartu (*card*) *ksrc* yang terdistribusi ke arah aksial dan radial. Jumlah posisi sumber neutron adalah 340 titik.

Penentuan Diameter Batang Kendali

Perhitungan yang dilakukan adalah menghitung reaktivitas batang kendali (RCCA dan GRCA) saat masuk ke teras. Sesuai dengan data desain [7], tinggi batang kendali AP1000 adalah 166 inch atau 421,64 cm. Agar terjadi simetrisitas ke arah aksial, maka batang kendali ditempatkan di tengah, sehingga kalau dibanding dengan posisi IFBA, maka daerah batang kendali lebih tinggi 17,77 cm ke arah atas dan bawah.

Pemodelan GRCA AP1000 sulit sekali dilakukan karena tidak adanya informasi lengkap tentang diameter penyerap SS304 di dalam dokumen desain. Yang ada dalam dokumen desain adalah pernyataan bahwa diameter AgInCd (12 batang/ perangkat) adalah 0,406 cm dengan ketebalan kelongsong 0,047 cm. Oleh karena itu dalam penelitian ini dipakai 2 (dua) model penyerap SS304 menentukan model yang terbaik dalam perhitungan teras dengan cara memvariasi diameternya seperti ditunjukkan dalam Tabel 6 dan Gambar 3.

Tabel 6. Ukuran diameter penyerap SS304 di GRCA untuk model A dan B

Model	Penyerap AgInCd		Penyerap SS304
	Diameter, cm	Ketebalan kelongsong, cm	Diameter, cm
A	0,406	0,047	0,50
B	0,406	0,047	0,960*

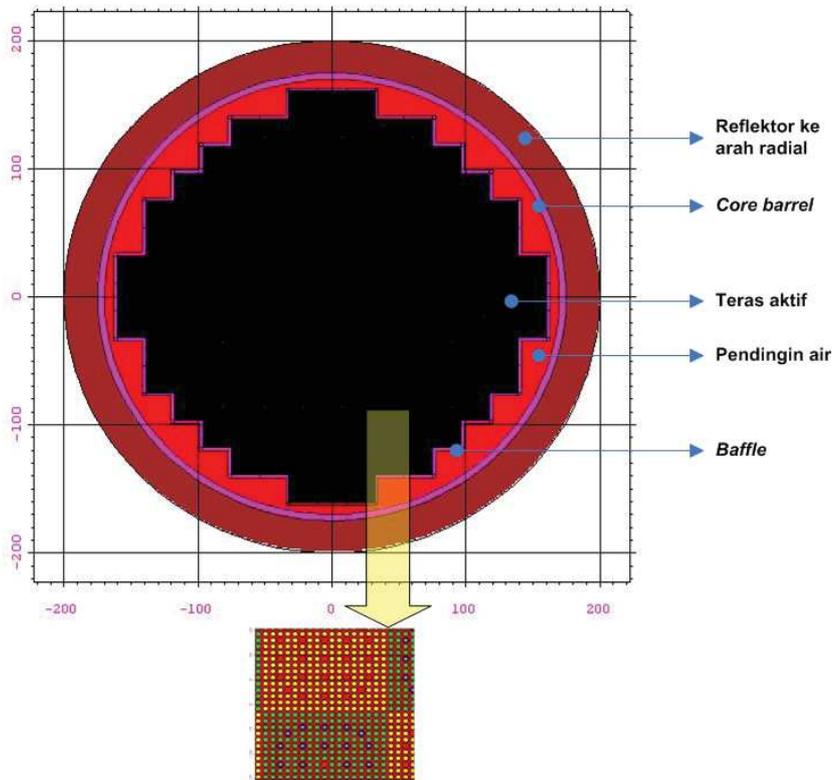
Keterangan *: sama dengan diameter penyerap AgInCd di RCCA

Dalam perhitungan reaktivitas pada kondisi pemodelan, yaitu jumlah neutron dan posisi sumber, sama dengan perhitungan kritikalitas tanpa batang kendali.

HASIL DAN PEMBAHASAN

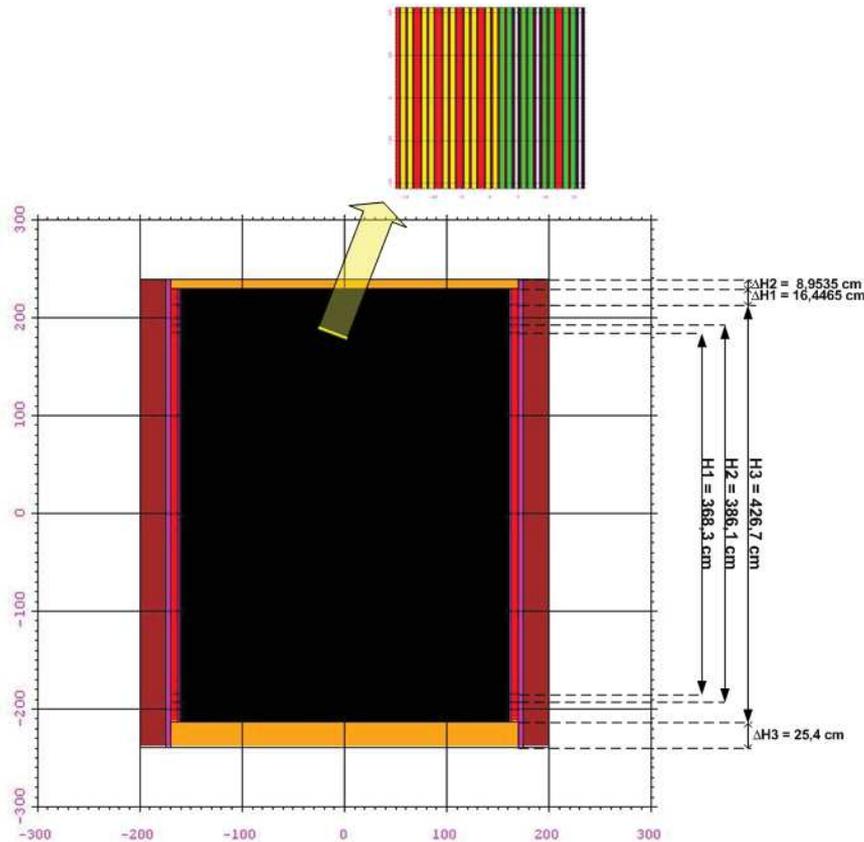
Validasi Model Geometri Teras AP1000

Gambar 5 dan 6 masing-masing menyajikan model detail 3-dimensi teras AP1000 ke arah radial dan aksial. Gambar tersebut digenerasi dari paket program VISED [12] untuk bidang XY (radial) dan bidang XZ (aksial). Untuk bidang XY di Gambar 5, tampak jelas bahwa model geometri MCNP sudah sesuai dengan Gambar 1-2. Terlihat jelas daerah teras aktif tampak hitam, akan tetapi kalau dilakukan zoom di suatu posisi maka tampak jelas merupakan kumpulan silinder yang mewakili batang bahan bakar. Dimensi yang ditampilkan juga sudah sesuai dengan data desain dan asumsi yang digunakan, yaitu jari-jari luar *core barrel* berukuran 174,94 jika ditambah dengan reflektor radial setebal 25,06 cm akan memiliki jari-jari berukuran 200 cm.



Gambar 5. Model detail 3-dimensi teras AP1000 dalam bidang XY (radial)

Gambar 6 menunjukkan bahwa model teras 3-dimensi dan ukuran tiap zona ke arah aksial juga sama seperti yang digambarkan pada Gambar 4 dan Tabel 5. Jika dilakukan zoom di daerah aktif teras berwarna hitam, akan terlihat jelas kumpulan batang bahan bakar ke arah aksial.



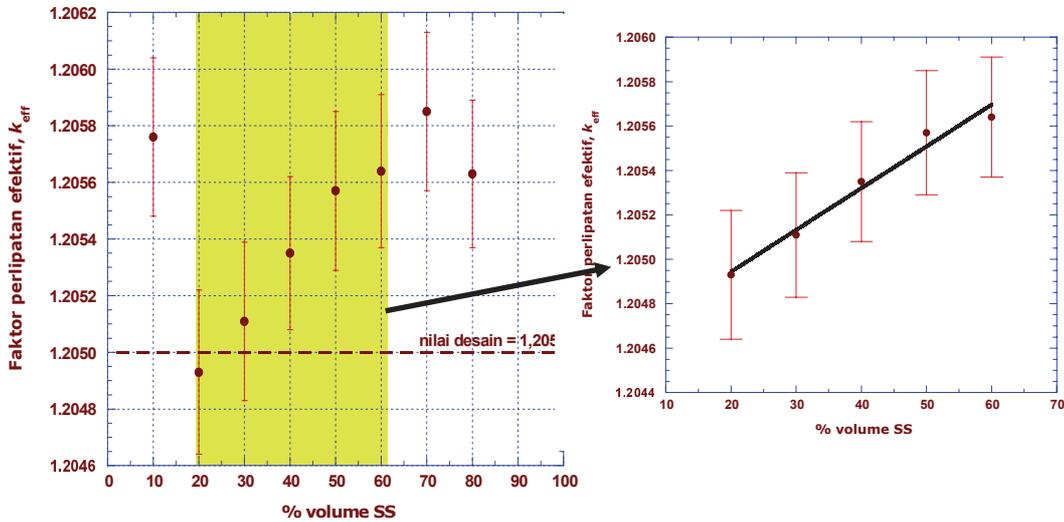
Gambar 6. Model detail 3-dimensi teras AP1000 dalam bidang XZ (aksial)

Penentuan Komposisi SS304 dan H₂O

Komposisi SS304 dan H₂O di reflektor bagian atas dan bawah teras ditentukan dari hasil perhitungan teras untuk tanpa boron dan dengan boron berkonsentrasi 1574 ppm [2]. Gambar 7 menunjukkan hasil perhitungan perubahan nilai k_{eff} teras untuk kondisi tanpa boron akibat perubahan volume SS304 dalam rentang 10 vol% - 80 vol%. Selisih nilai k_{eff} maksimum dan minimum untuk seluruh rentang volume SS304 adalah 0,00092. Jika dibanding dengan nilai rerata k_{eff} sebesar 1,20548, maka selisih k_{eff} maksimum dan minimum sangat tidak signifikan. Dengan demikian perubahan komposisi volume SS304 tidak signifikan terhadap perubahan nilai k_{eff} . Hal ini dapat dilihat dengan terjadinya tumpang-tindih (*overlap*) galat 1σ untuk tiap data terhadap data sebelum/sesudahnya, kecuali pada komposisi 10%.

Nilai desain untuk k_{eff} pada kondisi tanpa boron adalah 1,205, maka secara matematis nilai ini dapat dibulatkan dari rentang 1,20460 - 1,20549 jika memakai lima desimal seperti hasil dari MCNP. Oleh karena itu daerah yang diarsir dalam Gambar 7, masuk dalam rentang

1,20460 - 1,20549, dengan demikian untuk kondisi tanpa boron, komposisi yang memenuhi nilai desain adalah dalam rentang 20 vol% - 60 vol%. Dalam rentang tersebut, perbedaan maksimum dengan nilai desain terjadi pada komposisi 60 vol% dengan perbedaan relatif sebesar 0,05%.



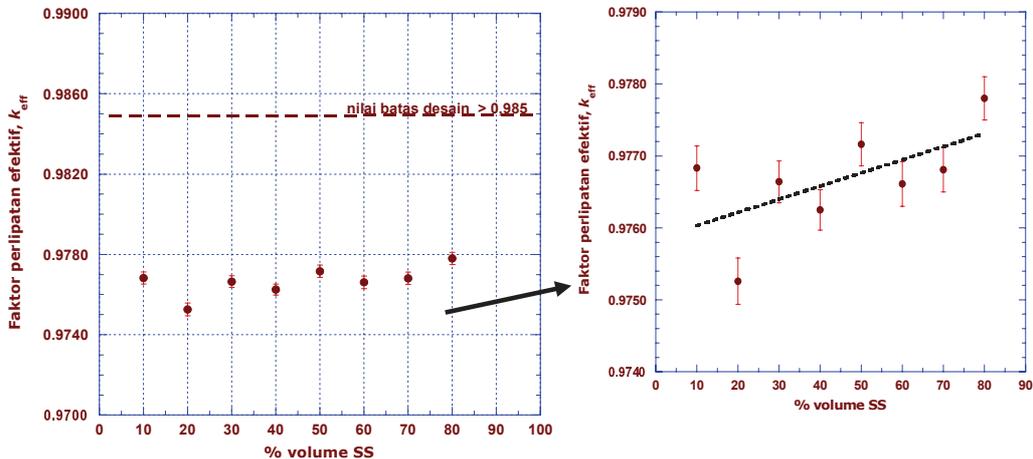
Gambar 7. Nilai k_{eff} teras vs. volume (%) SS304 untuk tanpa boron

Tabel 7. Nilai hitungan k_{eff} vs volume (%) SS304 untuk kondisi tanpa dan dengan boron

Volume SS304 (%)	Volume H ₂ O (%)	k_{eff} MCNP tanpa boron (Nilai desain, $k_{eff} = 1,205$)	k_{eff} MCNP dengan boron 1574 ppm (Nilai desain, $k_{eff} = 0,99$)
10	90	1.20576 ± 0.00028	0.97683 ± 0.00031
20	80	1.20493 ± 0.00029	0.97526 ± 0.00028
30	70	1.20511 ± 0.00028	0.97664 ± 0.00028
40	60	1.20535 ± 0.00027	0.97625 ± 0.00028
50	50	1.20557 ± 0.00028	0.97716 ± 0.00030
60	40	1.20564 ± 0.00026	0.97661 ± 0.00031
70	30	1.20585 ± 0.00028	0.97681 ± 0.00031
80	20	1.20563 ± 0.00026	0.97780 ± 0.00030

Meskipun demikian, komposisi harus juga ditentukan juga untuk kondisi boron. Berdasarkan Tabel 7 dan Gambar 7, untuk kondisi dengan boron 1574 ppm, nilai k_{eff} hasil perhitungan dalam rentang 0,97526 - 0,97780 untuk rentang volume SS304 10 vol% - 80 vol%. Kalau dilihat dari selisih nilai k_{eff} maksimum dan k_{eff} minimum, maka pada kondisi dengan boron memiliki selisih 2,8 kali yang diperoleh pada kondisi tanpa boron. Dengan demikian dibanding kondisi tanpa boron, kritikalitas kondisi dengan boron dipengaruhi oleh komposisi reflektor atas dan bawah dengan pengaruh maksimum sekitar 0,3% $\Delta k/k$ atau 300 pcm $\Delta k/k$. Nilai ini sangat signifikan. Hal ini disebabkan saat ditambahkan komposisi SS304, maka komposisi H₂O berkurang dan ini mengakibatkan berkurangnya boron. Berkurangnya boron mengakibatkan serapan neutron berkurang sehingga nilai k_{eff} teras naik dengan bertambahnya komposisi SS304 seperti terlihat di Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan bahwa seluruh nilai perhitungan masih jauh dari nilai kritikalitas desain, yaitu $k_{eff}=0,99$. Secara matematis, ditetapkan $k_{eff}=0.98500$ sebagai batas bawah, akan tetapi tidak ada satupun nilai hasil perhitungan yang memenuhi batas bawah tersebut. Perbedaan relatif hasil perhitungan dengan nilai batas bawah adalah dalam rentang 0,7% - 0,9%. Akan tetapi jika dibanding dengan nilai desain $k_{eff}=0,99$ perbedaan relatif hasil perhitungan dalam rentang 1,2% - 1,5%. Diantara 8 buah komposisi maka volume dengan 80 vol% yang paling dekat dengan hasil desain, kemudian disusul dengan 50 vol%.



Gambar 8. Nilai k_{eff} teras vs. volume (%) SS304 untuk dengan boron 1574 ppm

Hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa penentuan komposisi SS304 yang terbaik adalah 50 vol%, karena untuk kondisi tanpa boron dan dengan boron 1574 ppm relatif paling dekat dengan hasil desain dibanding dengan komposisi lainnya. Hal ini juga didukung dengan kondisi bahwa banyaknya air dalam 1 (satu) kisi bahan bakar adalah sebesar 55,4% (volume). Karena reflektor di atas dan bawah teras merupakan penopang (*supporting*) dari tiap batang bahan bakar, maka komposisi H₂O di reflektor menyerupai kondisi kisi bahan bakar. Dengan demikian pilihan komposisi 50 vol% SS304 (50 vol% H₂O) menyerupai komposisi H₂O di kisi batang bahan bakar sebesar 55,4 vol%.

Dengan dipilihnya komposisi tersebut, perbedaan relatif hasil perhitungan k_{eff} teras, untuk kondisi tanpa dan dengan boron, dengan nilai desain masing-masing adalah 0,04% dan 1,3%. Hal ini menunjukkan bahwa untuk kondisi tanpa boron, hasil perhitungan sangat memuaskan, akan tetapi untuk kasus dengan boron (1574 ppm) hasil perhitungan agak berbeda dengan nilai desain.

Evaluasi Konsentrasi Boron Kritis

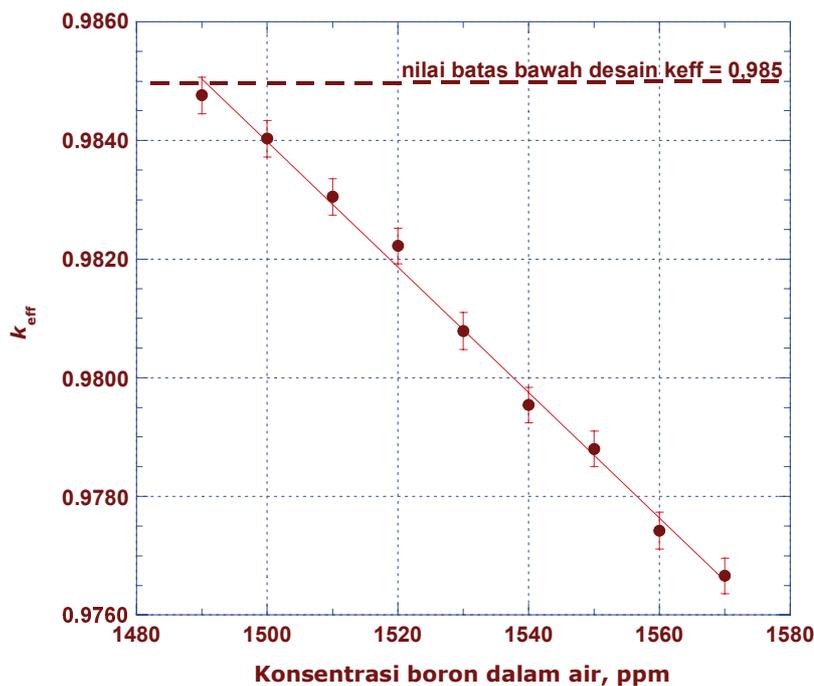
Seperti dibahas sebelumnya, konsentrasi boron kritis dalam H₂O saat kondisi CZP (*cold zero power* dalam desain AP1000 adalah 1574 ppm. Akan tetapi hasil perhitungan k_{eff} pada konsentrasi tersebut adalah $0,97716 \pm 0,00030$ yang memiliki perbedaan relatif dengan nilai desain ($k_{eff}=0,99$) sebesar 1,3%. Untuk mengetahui seberapa besar signifikansi perbedaan sebesar 1,3%, maka perlu dihitung konsentrasi boron kritis.

Gambar 9 menunjukkan pengaruh konsentrasi boron dalam H₂O terhadap nilai perhitungan k_{eff} teras AP1000. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada saat konsentrasi boron mengecil maka serapan neutron berkurang dan mengakibatkan nilai k_{eff} akan naik.

Pada saat konsentrasi boron mencapai 1490 ppm, maka nilai batas bawah desain, sebesar $k_{eff}=0,98500$, dicapai dalam rentang galat 1σ . Hasil perhitungan MCNP menunjukkan bahwa konsentrasi boron kritis dalam kondisi CZP untuk reaktor AP1000 adalah sebesar 1490 ppm. Nilai ini lebih kecil 84 ppm dari nilai desain.

Perbedaan hasil perhitungan dengan nilai desain sebesar 84 ppm adalah sangat signifikan, karena nilai ini melebihi konsentrasi boron dalam mengantisipasi kondisi dingin ke panas, yaitu 72 ppm [7]. Dengan demikian perbedaan 1,3% dalam reaktivitas sama dengan perbedaan pada konsentrasi boron kritis sebesar 5,3%. Jika dibanding dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tahara dan Sekimoto [13], yang mendapatkan perbedaan perhitungan dan eksperimen untuk penentuan konsentrasi boron kritis sebesar 0,8%, maka perbedaan 5,3% yang diperoleh dalam penelitian ini adalah signifikan.

Penyebab perbedaan tersebut tidak mudah untuk diketahui. Salah satunya penyelesaiannya dapat dilakukan dengan menggunakan data nuklir terbaru, tetapi ini tidak menjadi fokus dalam penelitian ini. Investigasi lain adalah dengan analisis sensitivitas densitas UO_2 . Dalam desain AP1000 [7], densitas UO_2 yang digunakan adalah sebesar 10,34 g/cm³. Sedangkan pada penelitian lain [13], densitas UO_2 yang digunakan adalah sebesar 10,4 g/cm³ atau berbeda 0,06 g/cm³. Dengan densitas tersebut, nilai k_{eff} hasil perhitungan menjadi 0,98684 \pm 0,00030 atau terjadi kenaikan 0,00208. Dengan kenaikan k_{eff} sebesar itu, maka dapat diprediksi konsentrasi boron kritis menjadi 1510 ppm. Dengan kata lain, kenaikan densitas sebesar 0,06 g/cm³ dapat merubah perkiraan kondisi kritis boron sebesar 20 ppm, atau perbedaan dengan nilai desain menjadi berkurang kira-kira 25%. Fakta ini menunjukkan signifikansi pengaruh signifikan densitas bahan bakar terhadap prediksi konsentrasi boron kritis.



Gambar 9. Nilai perhitungan k_{eff} vs konsentrasi boron (ppm)

Penentuan Diameter Batang Kendali dan Evaluasi Reaktivitas Padam Total

Perhitungan reaktivitas padam dilakukan pada kondisi teras CZP dan dengan konsentrasi boron 1490 ppm, yaitu pada kondisi kritis, $k_{eff} = 0,98476 \pm 0,00031$. Tabel 8 menyajikan hasil perhitungan reaktivitas padam total untuk Model A dan B dengan masing-masing sebesar 7,48 % $\Delta\rho$ dan 7,60 % $\Delta\rho$. Nilai reaktivitas padam model B lebih besar 1,2% daripada yang dimiliki model A, karena diameter penyerap model B lebih besar 92% dibanding diameter model A. Kenyataan ini menunjukkan bahwa pengaruh penambahan diameter SS304 di GRCA tidak terlalu signifikan dalam meningkatkan nilai reaktivitas padam, karena tampang lintang serapan neutron SS304 tidak sebesar yang dimiliki boron atau AgInCd. Hal ini juga yang menyebabkan alasan digunakannya SS304 dalam GRCA untuk dipakai sebagai shim rod.

Tabel 8. Reaktivitas padam total (RCCA + GRCA) untuk dua jenis diameter penyerap SS304

Model	Diameter penyerap SS304, cm	k_{eff} teras	Reaktivitas padam total*, % $\Delta\rho$
A	0,50	0.91720 \pm 0.00034	7,48 \pm 0,05
B	0,960	0.91618 \pm 0.00031	7,60 \pm 0,05

Keterangan: % $\Delta\rho = [(k_1 - k_2) \times 100\%] / (k_1 \times k_2)$, dengan k_1 adalah k_{eff} tanpa batang kendali dan k_2 adalah k_{eff} dengan batang kendali

Di dalam dokumen desain AP1000, nilai batang kendali adalah 12,69 % $\Delta\rho$. Jika dibanding dengan Tabel 8, maka ada perbedaan yang sangat besar yaitu 5,09 % $\Delta\rho$. Setelah dilakukan kajian pada data desain, maka nilai 12,69 % $\Delta\rho$ sudah memasukkan nilai *total control* sebesar 4,16 % $\Delta\rho$ yang merupakan penjumlahan dari *total power defect*, *adverse xenon* dan *rod insertion allowance*. Hal ini diyakini penulis oleh karena:

1. Nilai margin padam pada dokumen desain dikoreksi dengan nilai *total control* sebesar 4,26 % $\Delta\rho$ [2].
2. Perbedaan sebesar itu tidak mungkin diakibatkan oleh pergeseran spektrum saat temperatur dan komposisi bahan bakar berubah. Seperti tertera di dokumen desain, perubahan spektrum di awal dan akhir siklus mengakibatkan berkurangnya reaktivitas padam sebesar 1,80 % $\Delta\rho$ [2].

Kalau nilai perhitungan dikoreksi dengan nilai *total control* tersebut, maka nilai reaktivitas padam hasil perhitungan menjadi 11,64 \pm 0,05 % $\Delta\rho$ dan 11,76 \pm 0,05 % $\Delta\rho$ masing-masing untuk model A dan B. Dengan demikian perbedaan relatif antara hasil perhitungan dengan nilai desain untuk reaktivitas padam total menjadi 8,3% dan 7,3% masing-masing untuk model A dan B. Perbedaan yang agak besar ini kemungkinan disebabkan karena nilai desain memakai kondisi panas dan perhitungan memakai kondisi dingin sehingga terjadi pergeseran spektrum neutron yang merubah nilai reaktivitas padam. Dengan demikian penelitian sensitivitas temperatur terhadap parameter kritikalitas perlu dilakuakn untuk lebih menjelaskan perbedaan yang timbul dalam penelitian ini.

KESIMPULAN DAN SARAN

Model 3-dimensi teras AP1000 telah dikembangkan sehingga komposisi SS304 dan H₂O serta diameter penyerap SS304 di GRCA yang tidak disajikan di dokumen desain dapat ditentukan. Model teras 3-D yang diusulkan memiliki komposisi SS304 dan H₂O masing-

masing 50 vol% di daerah reflektor bagian atas dan bawah teras. Sedang untuk diameter penyerap SS304 (GRCA) ditetapkan sebesar 0,96 cm yang sama dengan diameter AgInCd di RCCA. Dengan model teras yang diusulkan diperoleh akurasi yang sangat tinggi untuk penentuan kritikalitas teras pertama dengan kondisi tanpa boron jika dibandingkan nilai desain. Akurasi hasil perhitungan berkurang saat penentuan konsentrasi boron kritis dan penentuan reaktivitas padam. Penyebabnya tidak diketahui, akan tetapi hasil penelitian menunjukkan parameter konsentrasi boron sangat sensitif dengan densitas UO_2 yang dipakai dan untuk reaktivitas padam kemungkinan karena perbedaan kondisi temperatur dengan nilai desain.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa reaktor AP1000 memiliki kemampuan pengendalian kritikalitas yang sangat cukup, karena reaktivitas padam total sebesar $7\% \Delta\rho$ (kontribusi batang kendali) membuat subkritikalitas teras sebesar 0.91618 ± 0.00031 . Meskipun demikian teras yang diusulkan dapat digunakan sebagai acuan untuk perhitungan parameter teras lainnya atau paket program lainnya dalam rangka mengevaluasi desain reaktor AP1000.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi yang telah memberikan dana dalam Program Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perakayasa Tahun 2011 sehingga penelitian ini dapat dilakukan. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Prof. Liem Peng Hong (*Tokyo Institute of Technology*) atas sumbang sarannya dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Schulz TL. Westinghouse AP1000 advanced passive plant. Nuclear Engineering and Design. 2006;236:1547-57.
2. Westinghouse AP1000 Control Document Rev.16 [internet]. US: Westinghouse;2007. Tier 2 Chapter 4 Reactor. Available from: <http://adamswebsearch2.nrc.gov/idmws/ViewDocByAccession.asp?AccessionNumber=ML071580939>; Accessed 2010 August 3.
3. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A general Monte Carlo n-particle transport code, Version 5. LA-UR-03-1987. Los Alamos:Los Alamos National Laboratory; 2003
4. Douglass S., Rahnema F., Margulies J. A stylized three-dimensional PWR whole-core benchmark problem with Gadolinium. Annals of Nuclear Energy. 2010;37:1384-1403
5. Huda MQ., Rahman MM., Imtiaz MA., Nguyen KC. Design studies of a typical PWR core using advanced computational tools and techniques (will be published in Annals of Nuclear Energy 2011).
6. Rokhmadi, Sembiring TM. Perhitungan kritikalitas MCNP4C-2 pada teras benchmark kisi bahan bakar PWR dengan lubang air dan *perturbing* rod. Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir; 28 Juli 2010; Surabaya, Indonesia. Tangerang Selatan, PTRKN-BATAN; 2010. p 44 – 50.

7. Sembiring TM. Pengaruh data nuklir terbaru dalam perhitungan faktor puncak daya di teras *benchmark* kisi bahan bakar PWR UO₂. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Penegetahuan dan Teknologi Nuklir; 20 Juli 2010; Yogyakarta, Indonesia. Yogyakarta:PTAPB-BATAN; 2010. p 71 - 9
8. Ames DE., Tsvetkov PV., Rochau GE., Rodriguez S. High fidelity nuclear energy system optimization towards an environmentally benign, sustainable, and secure energy source. Sandia Report, SAND2010-6684. Livermore: Sandia National Laboratories; 2010: p 50
9. Natesan K., Soppet WK. Hydrogen effects on air oxidation of Zirlo alloy. US NRC Report, NUREG/CR-6851. Washington DC : US NRC; 2010.
10. Wagner JC, Parks CV. Parametric study of the effect of burnable poison rods for PWR burnup credit. US NRC Report, NUREG/CR-6771. Washington DC : US NRC; 2002.
11. Westinghouse AP1000 Control Document Rev.16 [internet]. US: Westinghouse;2007. Tier 2 Chapter 5 Reactor Coolant System and Connected Systems, p 5.3-36. Available from: <http://adamswebsearch2.nrc.gov/idmws/ViewDocByAccession.asp? Accession Number=ML071580939>; Accessed 2010 August 3
12. Carter LL., Schwarz RA. MCNP Visual Editor computer code manual. Richland, Visual Editor Consultant; 2005.
13. Tahara Y., Sekimoto H. Transport equivalent diffusion constants for reflector region in PWRs. Journal of Nuclear Science and Technology. 2002;39:716-28.