

OPTIMALISASI BAHAN BAKAR MOX PADA DESAIN TERAS AP1000

Tukiran S

PTRKN – BATAN, Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan Email:
tukiran@batan.go.id

ABSTRAK

OPTIMALISASI BAHAN BAKAR MOX PADA DESAIN TERAS AP1000. Bahan bakar MOX adalah bahan bakar baru yang sudah dapat digunakan di dalam suatu PLTN. Penggunaan bahan bakar ini dapat mengurangi konsumsi uranium dari alam sekitar 2 % per tahun karena plutonium yang digunakan dapat diambil dari bahan bakar bekas yang telah digunakan di suatu PLTN. Meskipun demikian dalam penggunaan bahan bakar MOX pada teras AP1000 perlu dianalisis parameter desainnya. Salah satu parameter desain yang penting dalam keselamatan adalah kritikalitas teras. Dalam mengevaluasi parameter kritikalitas teras AP1000 berbahan bakar MOX pengkayaan yang digunakan menjadi sangat penting. Pada penelitian ini digunakan pengkayaan yang bervariasi yaitu 2,5 %, 3,0 %, 4,5 % dan 5,0% pada kondisi *cold zero power (czp)*. Perhitungan dilakukan dengan SRAC2006 dan Batan3-DIFF. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan model teras 3-dimensi AP1000 dengan jumlah perangkat bakar yang mengandung PuO_2 optimal. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa komposisi bahan bakar MOX yang terbaik adalah jika bahan bakar UO_2 pengkayaan 2,35% pada teras AP1000 diganti dengan 5,0% PUO_2 . Meskipun menggunakan bahan bakar MOX namun kritikalitas teras tidak berubah sehingga teras AP1000 dapat dioperasikan untuk satu siklus operasi. Dengan demikian teras yang diusulkan dapat digunakan sebagai acuan untuk evaluasi parameter teras lainnya.

Kata kunci: AP1000, kritikalitas, kondisi CZP, bahan bakar MOX

ABSTRACT

OPTIMALIZATION OF MOX FUEL IN THE AP1000 CORE DESIGN. *The MOX fuel is a new fuel and can be used in the NPP. Utilization of this fuel can reduce uranium isotope in the nature around 2 % in a year because plutonium isotope that used in the fuel taken from ex-fuel in a NPP. However, the use of MOX fuel in the AP1000 core is needed to evaluate its design parameter. One important parameter in criticality safety is core criticality parameters. In evaluating the core criticality parameters of the AP1000 core using MOX fuel is that the fuel enrichment become important thing. In this research, MOX fuel with variable enrichments namely 2.5%, 3.0%, 4.5 % and 5.0 % has been used at cold zero power condition. The calculation is done by using SRAC2006 and Batan3-DIFF codes. , the aim of this research is to get the 3-D AP1000 core model which the number of PuO_2 were optimal in the core. The result of calculation showed that the best composition of MOX fuel in the core is if 2.35% enrichment of UO_2 fuel of the AP1000 core were exchanged to 5.0% PUO_2 fuel. Even though the core is using MOX fuel but it can be operated for a cycle of length. Therefore, the core that proposed can be used as a reference to evaluate other core parameters.*

Keywords: AP1000, criticality, CZP condition, MOX fuel

PENDAHULUAN

Bahan bakar MOX adalah campuran bahan bakar uranium oksida (UO_2) dan plutonium oksida (PuO_2) dapat digunakan pada teras reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Keunggulan bahan bakar ini adalah plutonium yang merupakan sisa bahan bakar bekas dari suatu PLTN dapat digunakan kembali setelah diolah dengan uranium susut kadar (*depleted uranium*) menjadi bahan bakar baru yang disebut bahan bakar MOX. Setiap bahan bakar PLTN jenis PWR selalu menggunakan U-235 dan U-238. Kemudian isotop U-238 yang jumlahnya lebih banyak dibanding dengan U-235 akan berubah menjadi Pu-239 setelah menangkap neutron. Pu-239 ini merupakan bahan dapat belah (fisil) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar di teras reaktor PLTN sehingga dapat mengurangi limbah bahan bakar nuklir[1].

Konsumsi uranium dapat dihemat sampai 30% jika semua PLTN jenis air ringan di seluruh dunia memakai MOX. Selain itu, saat ini di dunia terdapat lebih dari 70 ton plutonium yang terkandung dalam bahan bakar bekas per tahun dan dua pertiganya merupakan isotop dapat belah yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir[2] sehingga sangat bermanfaat jika digunakan. Saat ini sudah lebih dari 2000 ton bahan bakar MOX telah digunakan dalam PLTN komersial. Karakteristik bahan bakar MOX dan UO_2 dalam hal derajat bakarnya tidak jauh berbeda namun untuk meningkatkan pengkayaan UO_2 sangat mahal maka digunakanlah bahan bakar MOX dengan pengkayaan yang lebih tinggi. Untuk menggunakan bahan bakar MOX pada teras AP1000 maka perlu dilakukan evaluasi parameter desainnya. Salah satu parameter desain adalah kritikalitas. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi parameter kritikalitas dengan komposisi bahan bakarnya menggunakan bahan bakar baru yaitu MOX. Selama ini desain teras AP1000 menggunakan bahan bakar UO_2 dengan pengkayaan 2,35 %; 3,4 % dan 4,45% dan dalam desain MOX diganti dengan PuO_2 dengan formasi pengkayaan 2,5 %; 3,0%; 4,5% dan 5,0% . Dicari konfigurasi bahan bakar pengkayaan mana di teras yang paling optimal dengan pertimbangan nilai k_{eff} maksimumnya seoptimal mungkin pada saat perangkat bahan bakar PuO_2 ada di dalam teras.

Perhitungan dilakukan dengan program komputer SRAC2006 dan Batan3-DIFF. Program SRAC2006 digunakan untuk menggenerasi tampang lintang makroskopik bahan bakar MOX teras AP1000 dan Batan 3DIFF digunakan untuk perhitungan teras. Dengan menganalisis kritikalitas teras kemudian membandingkannya dengan hasil desain teras AP1000 maka akan diperoleh teras AP1000 menggunakan bahan bakar MOX yang optimum.

DESKRIPSI TERAS REAKTOR AP1000 MOX

AP1000 MOX adalah desain reaktor Westinghouse Electric Company dan merupakan reaktor Generasi-III+ yang menerima persetujuan desain (*final design*) dari US NRC [3]. 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 MOX diharapkan dapat menghasilkan daya termal sebesar 3400 MW yang dibangkitkan dari 157 perangkat bahan bakar UO_2 dan PuO_2 dengan pendingin dan moderator air ringan (H_2O). Tabel 1 menyajikan parameter desain reaktor AP1000 MOX yang merupakan deskripsi teras reaktor.

Tabel 1. Desain reaktor AP1000 MOX [3]

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 (H_2O):	
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
Pengkayaan MOX, w%	2,5; 3,0; 4,5 dan 5,0
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 UO₂ dan tabung pengarah (guide tube) disusun dalam 17×17 [4]. 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, sehingga diacu dari Natesan dan Soppet [5], yaitu dengan densitas 6,44 g/cm³ dan komposisi nuklida adalah 1w% Sn, 1w%Nb, 0,1w%Fe dan sisanya Zr.

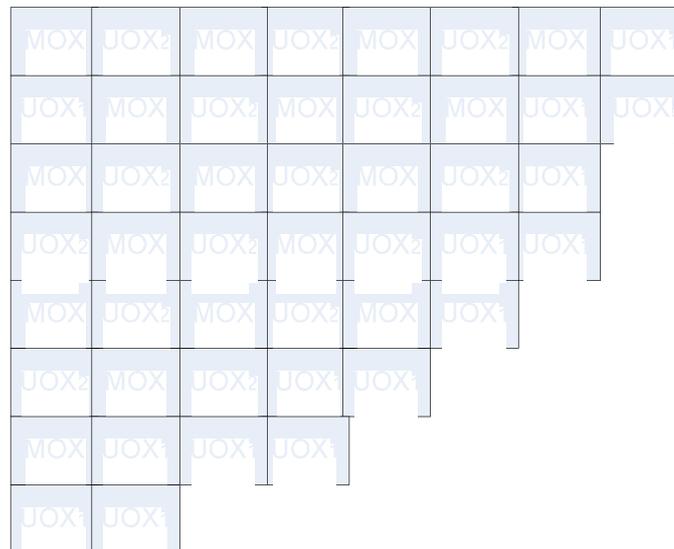
Tabel 2. Data desain perangkat bahan bakar [6]

Parameter	Nilai
Bahan bakar UO₂:	
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 MOX 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%Δk/k), maka diperlukan dua jenis pengendali reaktivitas parsial [5], yaitu: a) 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. b) 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 factor*), 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.



Ket: UOX1 pengkayaan 3,4 % dan UOX2 Pengkayaan 4,5 % serta MOX pengkayaan 5 %

Gambar 1. Konfigurasi teras AP1000 MOX OPTIMAL

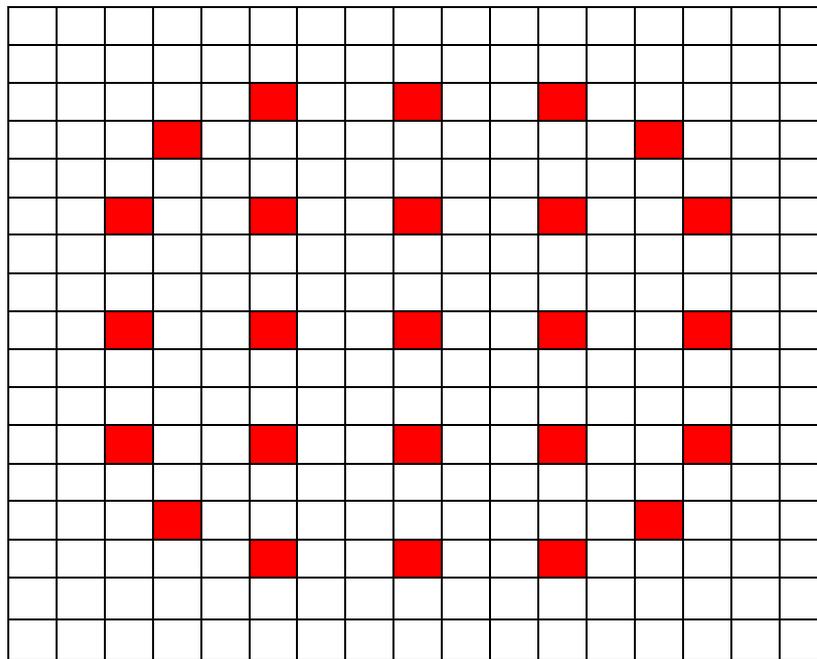
Tabel 3. Deskripsi data desain PYREX dan IFBA [2]

Parameter	Nilai
PYREX (teras pertama):	
Jumlah di teras	1558
Diameter luar, cm	0,968
Diameter luar tabung dalam, cm	0,461
Material kelongsong	<i>Stainless Steel</i>
Material tabung dalam	<i>Stainless Steel</i>
Kandungan ¹⁰ B, g/cm	6,24×10 ⁻³
Tinggi, cm	368,3
IFBA (teras pertama):	
Jumlah di teras	8832
Kandungan ¹⁰ B, g/cm	7,72 ×10 ⁻³
Tinggi, cm	386,1

METODE PERHITUNGAN

Konfigurasi teras AP1000 yang dipilih dalam penelitian ini adalah teras pertama (*first core*), kondisi dingin, yaitu semua meterial teras memiliki temperatur 20°C atau 293 K, daya rendah (*zero power*) dan tanpa xenon. Kondisi teras ini sering disebut CZP (*cold zero power*) dan HZP (*hot zero power*). Perangkat bahan bakar MOX dalam susunan pin 17 × 17 tersaji dalam Gambar 2. Dalam

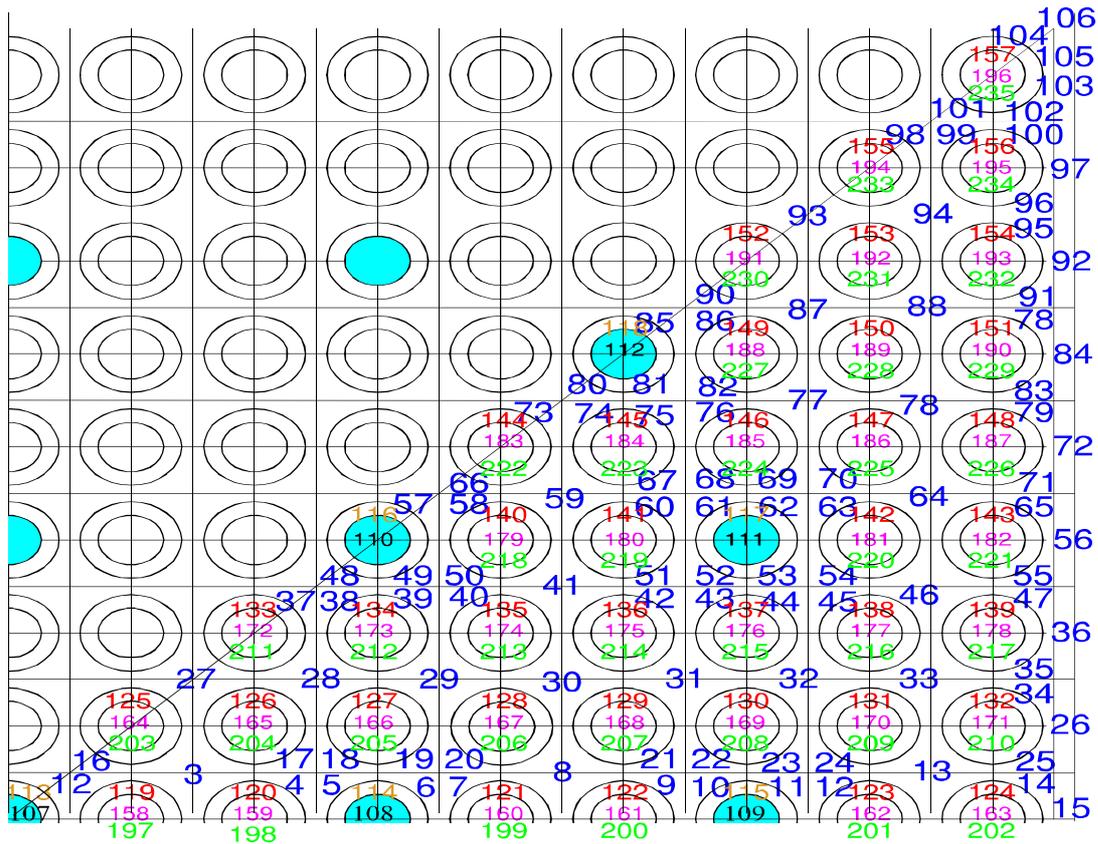
Gambar 2 tampak jelas ada 25 tabung pengarah dan tabung pengarah di tengah diperuntukkan untuk masuknya instrumen.



- Tabung pengarah
- Sel UO₂

Gambar 2. Susunan pin pada perangkat bahan bakar MOX

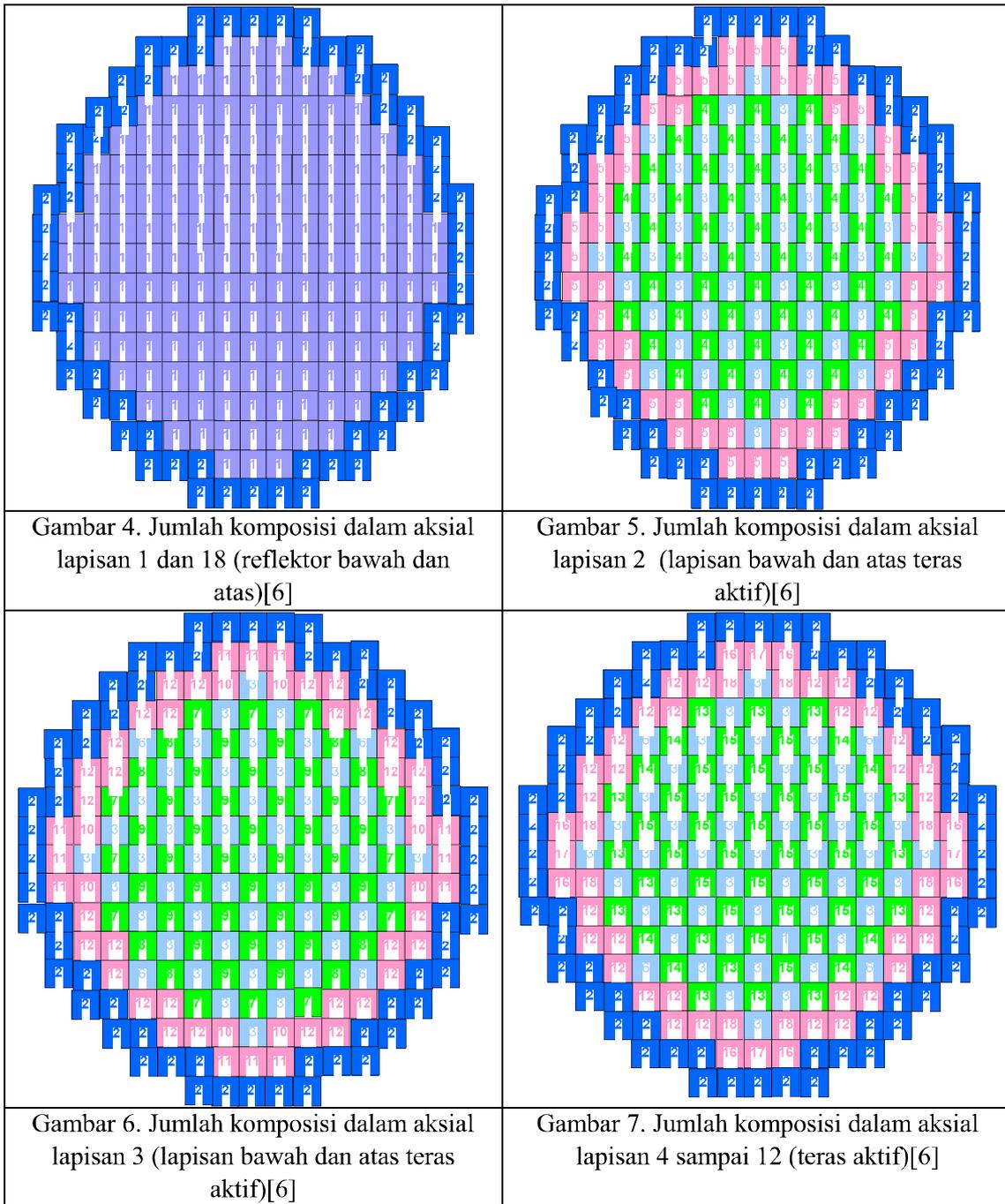
Setelah *input* selesai dibuat, maka dilakukan perhitungan sel untuk seluruh pengkayaan perangkat bahan bakar. Sebelum mengolah hasil keluarannya (*output*), dilakukan terlebih dahulu pemeriksaan hasil *plot* geometri *input* untuk dapat mendapatkan kepastian bahwa input yang dipakai adalah benar. Gambar 3 menunjukkan bahwa input yang dibuat sudah sesuai dengan konfigurasi perangkat bahan bakar MOX.



Gambar 3. Sub-region $\frac{1}{4}$ perangkat bahan bakar AP-1000

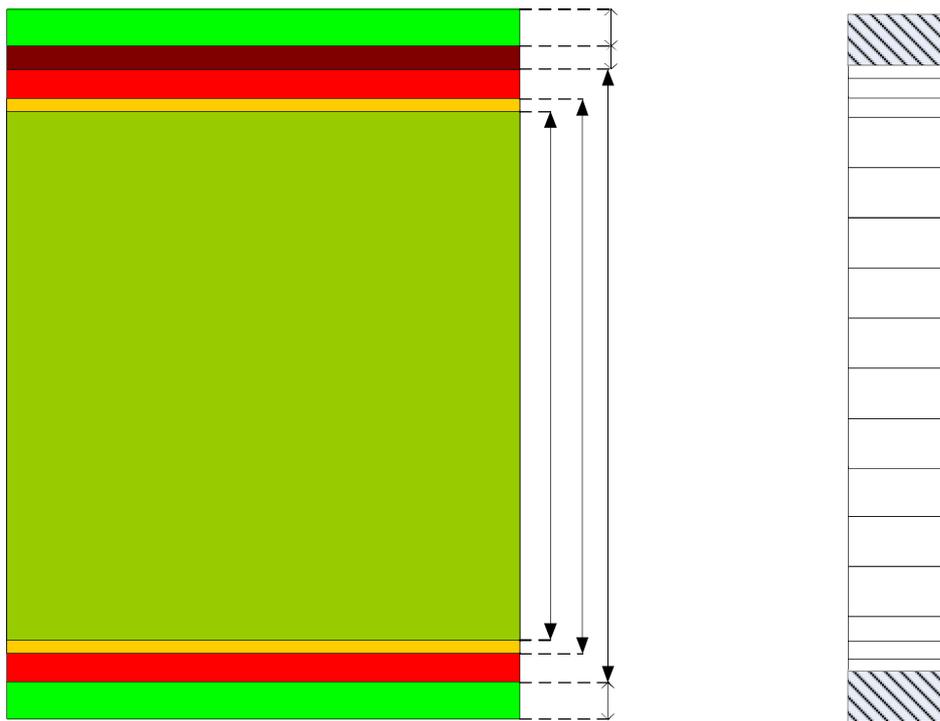
Perhitungan Teras

Dalam geometri teras terdapat 18 komposisi yang berbeda dan hal ini berhubungan dengan data tampang lintang yang digenerasi. Konfigurasi teras PWR AP1000 dengan berbagai komposisi dalam arah aksial dan radial ditunjukkan dalam Gambar 4 – 7. Dalam kegiatan riset ini, paket program BATAN-3DIFF digunakan untuk perhitungan parameter teras seperti faktor multiplikasi efektif, ppf dan reaktivitas batang kendali. Perhitungan parameter tersebut dilakukan pada kondisi *cold zero power* (20°C) dan *hot zero power* (565°C) tanpa boron.



Teras dimodelkan dalam 3-dimensi dengan geometri X-Y-Z. Jumlah *node* ke arah X, Y, dan Z masing-masing adalah 17, 17 dan 18. Untuk tiap perangkat bahan bakar jumlah *node* adalah $2 \times 2 \times 16$. Sehingga tiap perangkatnya ke-arah radial terdapat 4 buah *node* yang masing-masing mewakili luasan sebesar $10,71 \text{ cm} \times 10,71 \text{ cm}$.

Tampak jelas pada Gambar 8, teras dimodelkan ke arah aksial dalam 18 lapisan. Lapisan ke-1 dan ke-18 adalah reflektor dengan ketebalan 24,5 cm. Bagian teras yang lain, dari bawah ke atas, dibagi atas 16 lapisan masing-masing dengan ketinggian 20,3 cm (2 lapisan), 8,9 cm (2 lapisan), 30,7 cm (11 lapisan) dan 30,6 cm.



Gambar 8. Konfigurasi teras PWR AP1000 MOX arah radial[6]

HASIL DAN PERHITUNGAN

Hasil generasi tampang lintang perangkat bahan bakar (FA) AP-1000 disajikan pada Tabel 4. Setelah dilakukan proses maka diperoleh data tampang lintang makroskopis FA AP-1000 untuk tiap pengkayaan dalam 2 (dua) kelompok tenaga neutron.

Tabel 4. Tampang lintang makroskopik bahan bakar MOX

Pengkayaan	G	$D_g(\text{cm})$	$\Sigma_a(\text{cm}^{-1})$	$v\Sigma_f(\text{cm}^{-1})$	$\Sigma_f(\text{cm}^{-1})$	$\Sigma_{g \text{ to } g=1}(\text{cm}^{-1})$	$\Sigma_{g \text{ to } g=2}(\text{cm}^{-1})$
2,5%	g=1	1.57546E+00	9.76223E-03	6.69518E-03	2.35499E-03	1.86872E-01	1.49912E-02
	g=2	3.54955E-01	1.60096E-01	2.75192E-01	9.64226E-02	6.86846E-04	7.78301E-01
3,0%	g=1	1.57883E+00	1.01650E-02	7.41946E-03	2.60355E-03	1.86324E-01	1.46852E-02
	g=2	3.52790E-01	1.79848E-01	3.13290E-01	1.09652E-01	7.62080E-04	7.64237E-01
4,5%	g=1	1.58462E+00	1.11910E-02	9.33630E-03	3.26095E-03	1.85285E-01	1.39264E-02
	g=2	3.45034E-01	2.28523E-01	4.06219E-01	1.41958E-01	9.36208E-04	7.36627E-01
5,0%	g=1	1.58643E+00	1.14484E-02	9.93096E-03	3.46461E-03	1.84962E-01	1.37053E-02
	g=2	3.42381E-01	2.42189E-01	4.32275E-01	1.51018E-01	9.81786E-04	7.30353E-01

Tabel 4 menunjukkan bahwa tampang lintang makroskopis yang digenerasi sudah akurat karena dapat dibuktikan dengan tampang lintang $v\Sigma_f$ bernilai semakin tinggi dengan naiknya pengkayaan FA. Perlu dicatat bahwa tampang lintang serapan, Σ_a , sudah dikoreksi dengan $\Sigma_{n,n}$ untuk mendapatkan nilai yang akurat.

Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan perubahan nilai k_{eff} teras untuk kondisi tanpa boron akibat perubahan pengkayaan dalam perangkat bahan bakar MOX. Nilai k_{eff} desain tanpa boron adalah

1,20, sedangkan hasil perhitungan BATAN-3DIFF tanpa boron adalah 1,20694. Dari nilai k_{eff} yang diperoleh bahwa jika perangkat bahan bakar UO_2 diganti dengan perangkat PuO_2 dengan pengkayaan yang sama maka nilai keff turun. Sehingga dicari nilai yg paling optimal pada pengkayaan berapa dan jumlah serta posisi perangkat bahan bakar yang dimasukkan. Setelah dilakukan perhitungan maka diperoleh bahwa jika digantikan perangkat UO_2 pengkayaan 2,35 % dengan perangkat PuO_2 pengkayaan 5,0% dengan posisi pada nomor 3 material teras desain AP1000. Jika hal ini dilakukan akan menghasilkan nilai k_{eff} sebesar 1,213602 dan pada kondisi hot tanpa boron $k_{eff} = 1,29743$. Hal ini disebabkan oleh karena tampang lintang makroskopik Pu-241 lebih besar dari U-235. Hasil perhitungan BATAN-3DIFF menunjukkan bahwa nilai keff teras berbahan bakar MOX lebih rendah dibanding teras tanpa bahan bakar MOX seperti terlihat di Tabel 5. Perbedaan tersebut sama dengan perubahan reaktivitas positif di dalam teras. Semakin rendahnya nilai keff teras dengan bahan bakar MOX diakibatkan relatif tingginya tampang lintang serapan neutron untuk isotop Plutonium dibanding dengan Uranium. Permasalahan ini timbul karena tampang lintang mikroskopis serapan isotop Pu-239 (1011,3 barn) dan Pu-241 (1377 barn) jauh lebih besar jika dibanding isotop 235-U(680 barn).

Pada Tabel 5 juga dapat dilihat bahwa nilai k_{eff} turun dengan naiknya temperatur bahan bakar di teras. Hal ini disebabkan perubahan nilai k_{eff} akibat temperatur bahan bakar memberikan pengaruh yang besar dibanding pengaruh kerapatan moderator dan temperatur bahan bakar dan sifatnya spontan (*prompt reactivity feedback*). Perubahan temperatur moderator, tanpa perubahan kerapatan, mengakibatkan bertambahnya serapan resonansi dan tangkapan-pembelahan (η). Bertambahnya serapan resonansi membuat nilai k_{eff} berkurang sedangkan tangkapan pembelahan membuat nilai k_{eff} bertambah. Penambahan ini lebih kecil dibanding efek Doppler akibat naiknya temperatur bahan bakar. Secara total yang dapat dirasakan teras reaktor dengan bertambahnya temperatur akan menyebabkan turunnya nilai k_{eff} teras. Sehingga terlihat dalam hal nilai koefisien reaktivitas yang negatif.

Tabel 6 menunjukkan bahwa jika penggantian dua jenis perangkat bahan UO_2 dengan dua perangkat PuO_2 maka akan menghasilkan nilai yang tidak baik walaupun pengayaannya lebih besar. Hal ini ditunjukkan dengan nilai keff = 1,2 sehingga untuk teras AP1000 tidak diperkenankan untuk mengganti perangkat UO_2 ke PuO_2 dengan jumlah yang lebih dari 50 % pengantiannya, hanya 1/3 jumlah perangkat bahan bakar yang diperkenankan.

Tabel 5. Nilai keff hasil perhitungan dengan satu pengkayaan yang diganti

Model	Konfigurasi $UO_2 \rightarrow PuO_2$	k_{eff} (CZP)	k_{eff} (HZP)
1	2,35% \rightarrow 2,5%	1,92284	1,124247
2	2,35% \rightarrow 3,0%	1,98420	1,125356
3	2,35 % \rightarrow 4,5%	1,210466	1,126187
4	2,35 % \rightarrow 5,0%	1,213602*)	1,129743
5	3,40% \rightarrow 2,5%	1,194639	1,124564
6	3,40% \rightarrow 3,0%	1,195595	1,125356
7	3,40% \rightarrow 4,5%	1,198427	1,127335
8	3,40% \rightarrow 5,0%	1,199083	1,127955
9	4,45% \rightarrow 2,5%	1,205715	1,125513
10	4,45% \rightarrow 3,0%	1,205879	1,125911
11	4,45% \rightarrow 4,5%	1,206232	1,126187
12	4,45% \rightarrow 5,0%	1,206324	1,126263

Tabel 6. Nilai Keff hasil perhitungan dengan dua pengkayaan yang diganti

Model	Konfigurasi UO ₂ → PuO ₂	k _{eff} (CZP)	k _{eff} (HWP)
1	2,35% → 2,5% & 3,40% → 3,0%	1,176921	1,110248
2	2,35% → 2,5% & 4,45% → 4,5%	1,184499	1,111354
3	2,35% → 2,5% & 4,45% → 5,0%	1,184632	1,111185
4	3,40% → 3,0% & 2,35% → 3,0%	1,182706	1,111744
5	3,40% → 2,5% & 2,35% → 4,5%	1,195949	1,112565
6	3,40% → 2,5% & 2,35% → 5,0%	1,199437	1,112535
7	2,35% → 5,0% & 4,45% → 2,5%	1,194226	1,112334
8	4,45% → 2,5% & 3,40% → 5,0%	1,125787	1,001955
9	2,35% → 5,0% & 3,40% → 5,0%	1,201804	1,123690

Perhitungan reaktivitas padam dilakukan pada kondisi teras CZP tanpa boron Tabel 7 menyajikan hasil perhitungan reaktivitas padam total untuk batang kendali semua di bawah yaitu sebesar -19,2 %Δk/k. Hanya berbeda 0,92 % dengan adanya perangkat PuO₂ (MOX) di dalam teras. Dari 7 jenis batang kendali terlihat bahwa reaktivitas negatif yang paling besar adalah batang kendali SD1 sehingga digunakan untuk pemadaman reaktor.

Tabel 7. Nilai Keff hasil perhitungan batang kendali

Batang kendali	k _{eff} tanpa MOX	k _{eff} ada MOX	Perbedaan
M1	0,929129	0,932166	0,33%
M2	0,928759	0,931007	0,24%
MA	0,933024	0,935653	0,28%
MB	0,933867	0,936087	0,24%
MC	0,934272	0,936753	0,27%
MD	0,933385	0,935964	0,28%
SD1	0,925282	0,927469	0,24%
Semua batang kendali di dalam teras	0,838919	0,846641	0,92%

KESIMPULAN

Jika dibandingkan nilai desain maka model teras AP1000 yang diusulkan dapat menggunakan bahan bakar MOX dan diperoleh akurasi yang sangat tinggi untuk penentuan kritikalitas teras pertama dengan kondisi tanpa boron. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa reaktor AP1000 memiliki kemampuan pengendalian kritikalitas yang sangat tinggi, karena reaktivitas padam total sebesar -19,2 % Δk/k cukup tinggi untuk mengkopor nilai reaktivitas lebih teras. Teras AP1000 mencapai nilai optimal jika diganti perangkat bahan bakarnya dari UO₂ ke PuO₂ dengan pengkayaan dari 2,35% ke 5,0% dari 1/3 jumlah total perangkat bahan bakar. Teras yang diusulkan dapat digunakan sebagai acuan untuk perhitungan parameter teras lainnya atau paket program lainnya dalam rangka mengevaluasi desain reaktor AP1000 berbahan bakar MOX.

DAFTAR PUSTAKA

1. Jean-Luc Provost, Michel Debes., MOX and UOX PWR Fuel Performances EDF Operating, EDF Generation, 1 place Pleyel, 93282, Saint-Denis, France Version of record first published: 05 Jan 2012.
2. Tomasz K, Thomas J. Downar, OECD/NEA And U.S NRC PWR MOX/OU2 Core Transient Benchmark, Purdue University West Lafayette, Indiana USA, 2003
3. 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
4. Huda MQ., Rahman MM., Imtiaz MA., Nguyen KC. Design studies of a typical PWR core using advanced computational tools and techniques. Vol 38, issue 9, *Annals of Nuclear Energy* September 2011, pages 1939-1949.
5. Natesan K., Soppet WK. Hydrogen effects on air oxidation of Zirlo alloy. US NRC Report, NUREG/CR-6851. Washington DC : US NRC; 2010.
6. Surian P. Dkk, Evaluasi dan Verifikasi Parameter Keselamatan PLTN PWR 1000 dari Aspek Neutronik. Laporan Teknis PTRKN Program Insentif PKPP 2011.

DISKUSI / TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Hendro Tjahjono, PTRKN-BATAN)

- Perlu lebih ditegaskan lagi bahwa pernyataan MOX lebih baik dibandingkan UO₂ adalah baru terbatas dari sifat-sifat neutronik (reaktivitas). Keunggulan MOX ini perlu dikonfirmasi lagi dengan sifat-sifat lainnya, seperti sifat termal dan mekaniknya.

JAWABAN : (Tukiran S, PTRKN-BATAN)

- Perhitungan ini memang baru dari segi neutroniknya. Perlu dilanjutkan lagi dari bidang termodinamikanya. Terima kasih atas sarannya.

PERTANYAAN : (Agung Abadi Kiswando, Program S3-Kimia UGM)

- Masihkah ada limbah pada pembakaran saat kita menggunakan bahan bakar MOX?
- Apakah parameter yang digunakan untuk mengatakan hasil bahan bakar MOX tersebut optimal?

JAWABAN : (Tukiran S, PTRKN-BATAN)

- Limbah bahan bakar masih tetap ada, namun sudah berkurang karena bahan bakar sisa dapat digunakan sebagai bahan bakar kembali dengan mengambil plutoniumnya.
- Parameter yang dilihat adalah kritikalitas reaktor atau nilai faktor multiplikasi efektif dari teras dan koefisien reaktivitas suhu bahan bakar teras negatif.