

## ANALISIS REAKTIVITAS BATANG KENDALI PADA DESAIN TERAS MOX PWR AP1000

Rokhmadi

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gedung. No. 80 Serpong 15310

E-mail : [rokh\\_rsg@batan.go.id](mailto:rokh_rsg@batan.go.id)

### ABSTRAK

**ANALISIS REAKTIVITAS BATANG KENDALI PADA DESAIN TERAS MOX PWR AP1000.** PWR tipe AP1000 merupakan salah satu kandidat reaktor daya yang akan dibangun di Indonesia dan telah dilakukan verifikasi perhitungan reaktivitas batang kendali. Sebagai kelanjutannya, perlu dilakukan pengkajian desain teras MOX PWR AP1000 dan dihitung nilai reaktivitas batang kendali untuk mengetahui apakah batang kendali masih dapat mengantisipasi terhadap keselamatan operasi reaktor. Pada penelitian ini telah dilakukan perhitungan reaktivitas batang kendali teras MOX kemudian dibandingkan dengan teras tanpa MOX menggunakan paket program Batan-3DIFF. Sebelum melakukan perhitungan teras terlebih dahulu dilakukan perhitungan tampang lintang teras menggunakan paket program PIJ (SRAC 2006) kemudian output dari SRAC digunakan sebagai input pada perhitungan teras untuk mendapatkan nilai reaktivitas batang kendali. Mula-mula mendesain teras MOX dan menghitung nilai  $k_{eff}$  nya untuk memastikan teras PWR telah optimal atau mencapai kritis. Selanjutnya menghitung nilai reaktivitas batang kendali dengan cara menentukan selisih antara teras tanpa batang kendali dengan teras berbatang kendali masing-masing dengan dan tanpa MOX, semua perhitungan dilakukan pada kondisi *cold zero power* (CZP) tanpa boron dan pengkayaan 5%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai  $k_{eff}$  berkurang akibat adanya bahan bakar MOX dalam teras reaktor. Teras MOX PWR AP1000 dapat dioperasikan dengan aman karena nilai reaktivitas padam bernilai negatif tetapi lebih sulit dikendalikan karena perubahan reaktivitas batang kendali lebih besar dibandingkan dengan teras  $UO_2$  (tanpa MOX).

Kata kunci : PWR AP1000, teras MOX, reaktivitas batang kendali, SRAC2006, Batan-3DIFF

### ABSTRACT

**ANALYSIS OF CONTROL RODS REACTIVITY ON DESIGN OF MOX CORE OF AP1000 PWR.** AP1000 PWR type is one of the power reactor candidates to be built in Indonesia and has verified the calculation of reactivity control rods, is a continuation of the previous research, the assessment needs to be done AP1000 PWR MOX design and control rod reactivity values calculated to determine whether the control rods can still be anticipate the safe operation of the reactor with MOX core. This study has been carried out calculations on the reactivity of the control rods and compared with MOX core and without MOX core. Calculations were performed using the code Batan-3DIFF then the results were compared between with and without MOX. Before performing of core calculations, calculation the cross-sections using PIJ (SRAC 2006) code then the output of the SRAC is used as input in the calculation of the core parameter values. At first MOX design and calculate the value  $k_{eff}$  to ensure optimal or PWR has reached critical. Next calculate the value of control rod reactivity, all calculations are carried out under cold zero power (CZP) without boron. The calculations show that the value of  $k_{eff}$  is reduced as a result of MOX fuel in the reactor core. MOX core of PWR AP1000 can be operated safely because the value of excess reactivity is negative but more difficult to control because of the change of control rod reactivity greater than the  $UO_2$  core (without MOX).

Keywords: PWR AP1000, MOX core, control rod reactivity, SRAC2006, Batan-3DIFF

### PENDAHULUAN

Batang kendali merupakan instrumen penting dalam suatu reaktor nuklir baik reaktor riset maupun reaktor daya (PLTN), karena fungsinya sebagai pengendali populasi neutron dalam teras sehingga reaktor dapat dioperasikan dengan aman. Nilai reaktivitas batang kendali merupakan parameter keselamatan dalam suatu reaktor yang harus diketahui besarnya dengan pasti. Reaktivitas merupakan besaran fisika teras reaktor nuklir dan reaktivitas lebih merupakan parameter yang

dibutuhkan agar reaktor dapat dioperasikan satu siklus. Pengendalian reaktivitas ditentukan oleh boron dalam moderator, perangkat bakar yang memiliki racun dapat bakar dan batang kendali. Batang kendali berfungsi untuk memadamkan dan menaikkan daya reaktor sehingga sewaktu batang kendali dimasukkan ke dalam teras maka reaktor harus dalam keadaan subkritis. Kemampuan batang kendali untuk mengendalikan populasi neutron dalam teras menjadi hal yang menarik untuk dievaluasi.

Reaktor AP1000 sebagai PWR (*Pressurized Water Reactor*) generasi lanjut memiliki sistem kendali reaktivitas yang berbeda dengan generasi sebelumnya yaitu penggunaan *integral fuel burnable absorber* (IFBA). Nilai reaktivitas batang kendali sangat berpengaruh pada konfigurasi teras, maka perhitungan reaktivitas batang kendali perlu dilakukan. Reaktor daya PWR AP1000 dikendalikan oleh 69 buah batang kendali yang terdiri dari 53 buah *rod cluster control assembly* (RCCA) serta 16 buah *gray rod control assembly* (GRCA) dengan panjang masing-masing 421,64 cm[1,2].

Penelitian ini dilakukan dengan menghitung reaktivitas batang kendali teras MOX dan merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya[3]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh MOX terhadap nilai reaktivitas batang kendali dan kemampuannya dalam pengendalian operasi PWR AP1000.

## TEORI

Persamaan difusi neutron dalam teras di rumuskan sebagai berikut [4] :

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla D_g \nabla \phi_g - \sum_{a,g} + S_g - \sum_{s,g} \phi_g + \sum_{g'} \sum_{s,g'} \phi_{g'} \quad (1)$$

dengan,

$D$  : koefisien difusi

$\phi_g$  : flux neutron

$\sum_{a,g} \phi$ : tampang lintang makroskopik

$S_g$  : suku sumber neutron

Suku sumber neutron

$$S_g = X_g \sum v_g \sum_{f,g'} \phi_{g'} \quad (2)$$

$X_g$  adalah peluang munculnya neutron fisi pada group g

Perubahan neutron yang hilang karena peristiwa absorpsi dan hamburan dapat digabungkan menjadi suku removal

$$\sum_{R,g} \phi_g = \sum_{a,g} \phi_g + \sum_{s,g} \phi_g \quad (3)$$

Jika sistem padakondisi tunak, maka persamaan (1) menjadi

$$-\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g + \sum_{R,g} \phi_g + \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'} \sum_{f,g} v_g \quad (4)$$

Persamaan (4) merupakan persamaan *eigen value*, secara sederhana dapat dirumuskan sebagai :

$$A\phi = \frac{1}{k_{eff}} F\phi \quad (5)$$

dimana,

$A$ = adalah operator transport, hamburan dan bocoran

$F$ = adalah sumber neutron fisi dan distribusinya.

$k_{eff}$  = adalah faktor multiplikasi efektif (nilai eigen)

Dan penyelesaian fluks neutron, pers (5) adalah :

$$\phi = \frac{1}{k_{eff}} A^{-1} F \phi$$

Nilai reaktivitas batang kendali (*rod worth*) adalah

$$\Delta\rho = \rho_{ex} + \rho_{sm} \quad (7)$$

$$\text{dimana } \rho_{ex} = \frac{(k_{fo}-1)}{k_{fo}} \quad (8)$$

adalah reaktivitas lebih (*excess reactivity*) yaitu reaktivitas dalam teras ketika seluruh batang kendali ditarik keatas dengan  $k_{fo}$  faktor multiplikasi teras ketika batang kendali diangkat penuh (*all out*). Sedangkan reaktivitas padam (*shut down margin reactivity*) adalah

$$\rho_{sm} = \frac{(k_{ei} - 1)}{k_{ei}} \quad (9)$$

reaktivitas negatif ketika seluruh batang kendali dimasukkan kedalam teras dengan  $k_{ei}$  faktor multiplikasi teras ketika batang kendali masuk sepenuhnya (*all in*)

## METODOLOGI

### Deskripsi PWR AP1000

AP1000 adalah reaktor PWR yang menghasilkan energi sebesar 1000 MWe atau 3400 MW<sub>th</sub>, terdiri dari 157 perangkat bahan bakar UO<sub>2</sub> dengan pendingin dan moderator air ringan (H<sub>2</sub>O). Di dalam teras reaktor terdapat 69 buah batang kendali yang terdiri dari 53 buah *rod cluster control assembly* (RCCA) dan 16 buah *gray rod control assembly* (GRCA). Tabel 1 menyajikan data desain perangkat bahan bakar PWR AP1000 dan Tabel 2 menyajikan parameter desain reaktor AP1000 yang merupakan deskripsi teras reaktor.

Tabel 1. Data desain perangkat bahan bakar <sup>[2]</sup>

Parameter	Nilai
<b>Bahan bakar UO<sub>2</sub>:</b>	
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
<b>Tabung pengarah:</b>	
Diameter dalam/luar, cm	1,123/1,224
Material tabung	ZIRLO

Tabel 2. Desain reaktor AP1000[2]

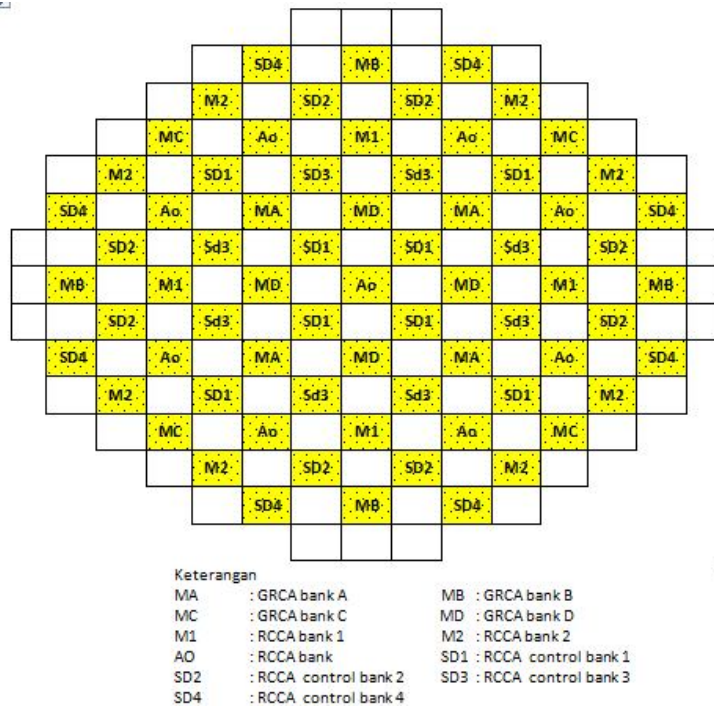
Parameter	Nilai
<b>Daya reaktor:</b>	
Daya termal, MW	3400
Daya elektrik, MW	1117
Panas yang dibangkitkan di bahan bakar, %	97,4
<b>Teras aktif:</b>	

---

Tinggi bahan bakar aktif di teras pertama, cm	426,7
Diameter ekivalen, cm	304
<b>Komposisi dan dimensi reflektor air (H<sub>2</sub>O):</b>	
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
<b>Perangkat bahan bakar:</b>	
Susunan 1 (satu) perangkat	17×17
Jumlah perangkat dalam satu teras	157
Material bahan bakar	UO <sub>2</sub> ( <i>sintered</i> )
Pengkayaan <sup>235</sup> U, w%	2,35; 3,40 dan 4,45
Jumlah batang ( <i>rod</i> ) bahan bakar	264
Jumlah tabung pengarah/ <i>instrument guide thimbles</i>	24/1
<b>Batang kendali (penyerap neutron):</b>	
Jumlah <i>Rod Cluster Control Assembly</i> (RCCA)	53
Jumlah <i>Grey Rod Control Assembly</i> (GRCA)	16
<b>Struktur teras:</b>	
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

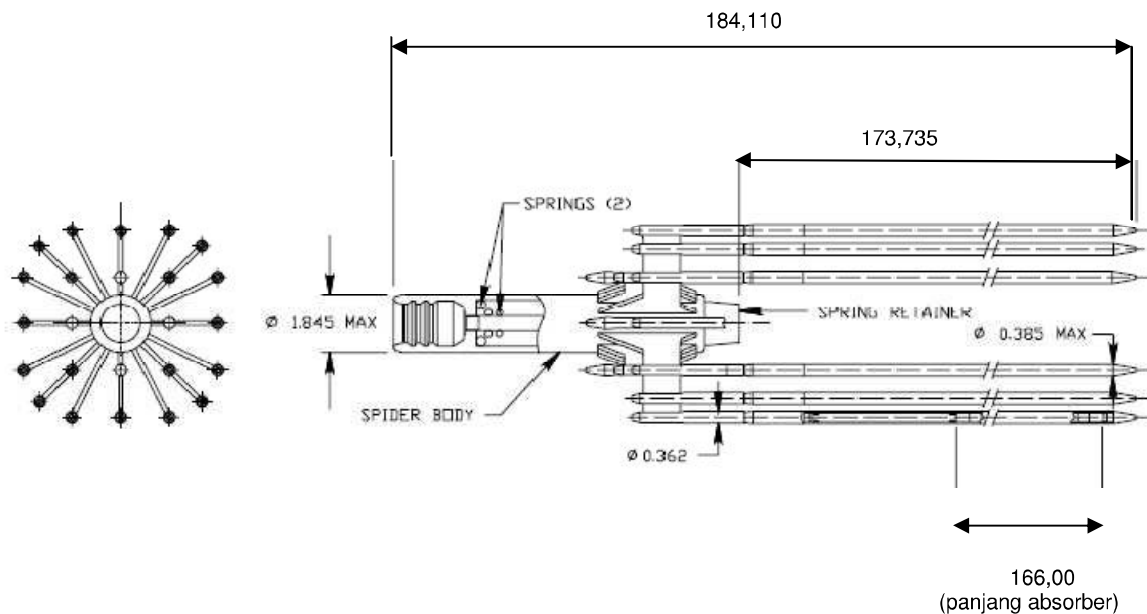
---

Sebuah perangkat bahan bakar UO<sub>2</sub> tersusun dalam matrik 17 × 17 dan ditengah-tengahnya terdapat tabung pengarah<sup>[2]</sup>. Pengendalian reaktivitas diberikan racun dapat bakar (PYREX) dan pada pelet bahan bakar dilapisi penyerap neutron (*Integral fuel burnable absorber*). Gambar 1 menunjukkan posisi batang kendali di teras AP1000 yang terdiri dari *rod cluster control assembly* (RCCA) dan *gray rod control assembly* (GRCA).

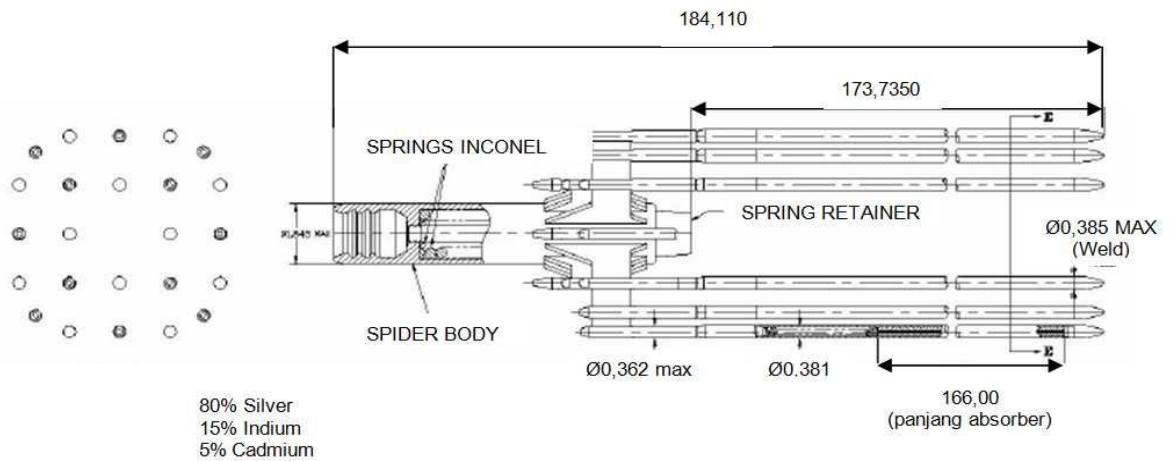


Gambar 1. Distribusi posisi batang kendali di teras AP1000

RCCA dibagi kedalam dua kategori yaitu *control* dan *shutdown* yang berfungsi untuk mengatur reaktivitas dan mematikan reaktor. GRCA merupakan penghubung dengan tabung pengarah. Gambar 2 dan 3 masing-masing menunjukkan batang kendali RCCA dan GRCA.



Gambar 2. Rod Cluster Control Assembly (RCCA)[1]



Gambar 3. Gray Rod Cluster Assembly (GRCA)[1]

### Teras MOX

Bahan bakar MOX (*mixes oxide*) merupakan campuran dari bahan bakar  $UO_2$  dan  $PuO_2$  yang diperoleh dari daur ulang bahan bakar bekas reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) jenis air ringan (PWR atau BWR). Teras reaktor PLTN yang bahan bakarnya terdiri dari  $UO_2$  dan sebagian kecil berisi bahan bakar MOX disebut teras MOX, seperti terlihat pada Gambar 4



Gambar 4. Desain teras MOX PWR AP1000[5].

### Metode Perhitungan

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan paket program SRAC2006[6] dan Batan-3DIFF[7]. Perhitungan terdiri dari dua tahap. Tahap pertama menghitung generasi tampang lintang bahan bakar dan batang kendali dengan paket program SRAC2006 modul PIJ (*probabilistic collision method*) pada kondisi *cold zero power* (CZP) tanpa boron pada teras MOX. Kemudian tahap kedua melakukan perhitungan reaktivitas batang kendali menggunakan paket program Batan-3DIFF. Paket program Batan-3DIFF merupakan sebuah program standar Batan untuk difusi neutron banyak kelompok 3-dimensi yang mampu menangani geometri reaktor X-Y-Z, hamburan neutron ( $n,2n$ ) dan koefisien difusi gayut arah[8].

Pada perhitungan teras, terlebih dahulu didesain teras MOX yaitu teras baru hasil modifikasi dari teras PWR AP1000 berbahan bakar  $UO_2$  dengan cara mengganti sebagian bahan bakarnya dengan bahan bakar MOX (*mixed oxide*), campuran dari plutonium dan uranium alam atau uranium *depleted*) sedemikian rupa sehingga teras mencapai kritis dan mempunyai karakteristik yang sama dengan PWR AP1000 berbahan bakar  $UO_2$  (tanpa MOX). Kemudian menghitung nilai kritikalitas teras pada saat ada batang kendali dan teras tanpa batang kendali dan masing-masing dilakukan pada teras MOX maupun pada teras tanpa MOX pada kondisi CZP tanpa boron. Selanjutnya dihitung reaktivitas pada saat semua batang kendali didalam (*shutdown margin reactivity*) dan pada saat semua batang kendali diluar (*excess reactivity*) serta nilai reaktivitas total dan dilanjutkan perubahan reaktivitas batang kendali MA, MB, MC, MD, M1, M2 dan baik pada teras MOX maupun pada teras  $UO_2$  (tanpa MOX).

Secara detail tahapan perhitungan seperti berikut :

a. Generasi tampang lintang teras MOX

Generasi tampang lintang bahan bakar dan batang kendali dengan program SRAC2006 modul PIJ (*probabilistic collision method*) dalam kondisi *cold zero power* (CZP) pada temperatur  $20^{\circ}C$ , tanpa boron dan pengkayaan 5%. Sebelum menghitung tampang lintang bahan bakar dan batang kendali tersebut diatas terlebih dahulu menghitung densitas atom penyusunnya, seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Densitas atom bahan bakar MOX

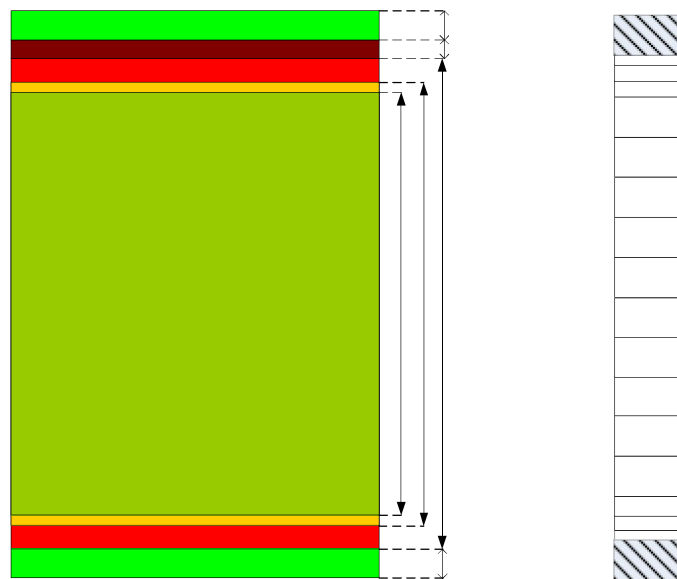
No.	Atom	densitas atom ( $10^{24}$ atom/cm <sup>3</sup> )	No.	Atom	densitas atom ( $10^{24}$ atom/cm <sup>3</sup> )
1	U-234	4,47229 E-07	9	Pu-242	1,21465 E-06
2	U-235	4,45320 E-05	10	Am-241	0,00000 E-00
3	U-236	2,21715 E-07	11.	O-16	4,64298 E-02
4	U-238	2,19401 E-02	12.	N-14	2,15407 E-05
5	Pu-238	0,00000 E-00	13.	Cr-nat	4,27932 E-05
6	Pu-239	1,15121 E-03	14.	Fe-nat	5,13463 E-05
7	Pu-240	7,22627 E-05	15.	Zr-nat	4,20495 E-02
8	Pu-241	4,87895 E-06	16.	Sn-nat	6,42202 E-04

b. Perhitungan reaktivitas batang kendali teras MOX

Teras MOX PWR AP1000 adalah suatu teras baru hasil modifikasi dari teras  $UO_2$  PWR AP1000 Westinghouse dengan cara mengganti sebagian bahan bakar  $UO_2$  dengan bahan bakar MOX sedemikian rupa sehingga dicapai teras optimal <sup>[5]</sup>.

Perhitungan reaktivitas batang kendali, reaktivitas lebih dan reaktivitas padam pada teras menggunakan program Batan-3DIFF dilakukan pada kondisi teras CZP tanpa boron. Teras dimodelkan dalam 3-dimensi dengan geometri X-Y-Z. Jumlah *node* ke arah X adalah 17, ke arah Y adalah 17 dan ke arah Z adalah 18. Untuk tiap perangkat bahan bakar jumlah *node* adalah  $2 \times 2 \times 16$ , sehingga untuk setiap perangkat ke-arah radial terdapat 4 buah *node* yang masing-masing mewakili luasan sebesar  $10,71 \text{ cm} \times 10,71 \text{ cm}$ .

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



Gambar 5. Konfigurasi teras PWR AP1000 arah aksial[2]

Setelah dicapai kritis pada teras MOX, kemudian dilanjutkan dengan menghitung  $k_{eff}$  pada saat teras tanpa batang kendali dan pada saat teras ada batang kendali dan masing-masing dihitung pada teras tanpa MOX maupun teras dengan MOX dan pada kondisi CZP tanpa boron.

Kemudian dihitung nilai reaktivitas batang kendali MA, MB, MC, MD, M1, M2 dengan cara mengurangi nilai  $k_{eff}$  teras pada saat ada batang kendali dengan teras pada saat tanpa batang kendali. Hasilnya dibandingkan antara teras ada MOX dengan teras  $UO_2$  (tanpa MOX).

## PEMBAHASAN

Desain modifikasi teras MOX PWR AP1000 seperti terlihat pada Gambar 4 diatas adalah teras optimal dan diperoleh nilai  $k_{eff}$  teras adalah 1,207388[8], sedangkan pada desain teras berbahan bakar  $UO_2$  (tanpa MOX) adalah 1,205<sup>[1]</sup> yaitu mempunyai perbedaan 2%, sehingga teras MOX hasil desain ini memenuhi syarat karakteristik teras PWR AP1000 berbahan bakar  $UO_2$  sehingga dapat dilanjutkan untuk perhitungan reaktivitas batang kendali pada teras MOX.

Nilai kritikalitas ( $k_{eff}$ ) saat semua batang kendali diluar (*all out*) dan saat semua batang kendali semua didalam (*all in*) disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai keff teras AP1000 pada kondisi CZP

Batang kendali	$k_{eff}$	
	$UO_2$	MOX
<i>All in</i>	0,986457	0,935700
<i>All out</i>	1,126669	1,205715

Nilai reaktivitas total, nilai reaktivitas lebih (*excess reactivity*) dan reaktivitas padam (*shut down margin reactivity*) dihitung dengan menggunakan persamaan (7), (8) dan (9) berdasarkan nilai  $k_{eff}$  pada Tabel 4 dan hasilnya disajikan pada Tabel 5, yaitu nilai reaktivitas batang kendali pada teras MOX dan teras tanpa MOX pada kondisi CZP dan tanpa boron.



Tabel 5. Nilai reaktivitas batang kendali PWR AP1000 kondisi CZP

No.	Parameter	Teras	
		MOX	UO <sub>2</sub>
1.	<i>Excess reactivity, <math>\rho_{ex}</math> (%<math>\Delta\rho</math>)</i>	17,06	11,24
2.	<i>Shut down margin reactivity, <math>\rho_{sm}</math> (%<math>\Delta\rho</math>)</i>	-6,87	-2,72
3.	Reaktivitas batang kendali total (% $\Delta\rho$ )	10,19	8,52

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai reaktivitas padam teras MOX adalah -6,87 % $\Delta\rho$  dan -2,72 % $\Delta\rho$  untuk teras UO<sub>2</sub> (tanpa MOX). Nilai reaktivitas padam untuk teras MOX maupun teras UO<sub>2</sub> semua bernilai negatif, sehingga reaktor dapat dikendalikan dengan baik karena populasi neutron dalam teras dapat diatur sedemikian sehingga saat batang kendali semua berada di dalam teras, reaktor dalam kondisi subkritis. Tabel 5 juga memperlihatkan bahwa nilai reaktivitas lebih (*excess reactivity*) semua mempunyai nilai positif, baik untuk teras MOX maupun teras UO<sub>2</sub>, berarti reaktor dapat dioperasikan, karena disaat semua batang kendali berada diluar teras, reaktor dalam keadaan super kritis ( $k_{eff} > 1$ ) seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai reaktivitas batang kendali (*rod worth*) atau reaktivitas total adalah 10,19 % $\Delta\rho$  untuk teras MOX dan 8,52 % $\Delta\rho$  untuk teras UO<sub>2</sub>. Nilai reaktivitas total tersebut mempunyai perbedaan 47,5 % dan 34,4 % masing-masing untuk teras MOX dan teras UO<sub>2</sub> jika dibandingkan dengan nilai reaktivitas total dari data desain yang bernilai 5,34 % $\Delta\rho$  <sup>[1]</sup>

Perubahan nilai reaktivitas batang kendali akibat batang kendali RCCA dan GRCA disajikan pada Tabel 6. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai reaktivitas batang kendali pada teras MOX lebih besar dibandingkan dengan teras UO<sub>2</sub>, berarti bahwa teras MOX akan lebih sulit dikendalikan dibandingkan dengan teras UO<sub>2</sub> (tanpa MOX) sehingga perlu modifikasi material batang kendali.

Tabel 6. Reaktivitas batang kendali RCCA dan GRCA pada kondisi CZP

No.	Batang kendali	Reaktivitas (pcm)	
		Tanpa MOX	Dengan MOX
1	MA	415,23	492,88
2	MB	177,64	186,25
3	MC	244,39	477,17
4	MD	391,71	476,01
5	M2	552,30	564,38
6	M1	391,71	914,12

## KESIMPULAN

Data generasi tampang lintang bahan bakar dan batang kendali pada kondisi operasi *cold zero power* tanpa boron, pengkayaan 5% dan reaktivitas batang kendali teras MOX PWR AP1000 telah diperoleh masing-masing dengan menggunakan paket program SRAC2006 modul PIJ dan paket program Batan-3DIFF. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai  $k_{eff}$  berkurang dengan adanya bahan bakar MOX dalam teras reaktor dan reaktivitas batang kendali teras MOX PWR AP1000

memiliki nilai reaktivitas padam (*shut down margin*) yang negatif sehingga batang kendali masih mampu mengontrol populasi neutron dalam teras dengan baik tetapi teras MOX lebih sulit dikendalikan dibandingkan teras  $UO_2$  karena perubahan reaktivitasnya lebih besar dibandingkan teras  $UO_2$  (tanpa MOX).

## SARAN

Teras MOX AP1000 agar dapat dioperasikan dengan baik perlu adanya modifikasi batang kendali *RCCA* maupun *GRCAs*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih kepada beliau Prof. Surian PINEM, M.Si dan Drs. Tukiran Surbakti atas saran dan diskusinya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Ka BFTR-PTRKN atas fasilitas penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Westinghouse AP1000 Control Document Rev.16 [internet]. US: Westinghouse;2007. Tier 2 Chapter 4 Reactor, [cited 2010 August 3]. Available from:<http://adamswebsearch2.nrc.gov/idmws/ViewDocByAccession.asp?AccessionNumber=ML071580939>
2. SEMBIRING, TM, Analisis Model Teras 3-Dimensi untuk Evaluasi Parameter Kritikalitas Reaktor PWR Maju Kelas 1000 MW, Jurnal Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA, Vol.13, No.02, Jakarta, 2011)
3. Rokhmadi dan SEMBIRING, TM, Verifikasi Perhitungan Reaktivitas Batang Kendali Teras Reaktor AP1000, Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir VI (SENPEN VI), PPEN Batan, Juni 2013.
4. AZIZ, F, "Perhitungan Benchmark Reaktivitas Elemen Kendali Reaktor Temperatur Tinggi HTR-10" (2002)
5. Tukiran, "Optimalisasi Bahan Bakar MOX pada Desain teras AP1000", makalah seminar TKPFN ke 19, Batan-UIN Yogyakarta, September 2013
6. OKUMURA, K, KUGO, T, KANEKO, K and TSUCHIHASHI, K "SRAC 2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System", JAEA-Data/Code-2007-004, Japan Atomic Energy Agency, 2007
7. LIEM P.H., and SEMBIRING, T.M, " Validation of Batan's Standard Diffusion Codes for Control Rod Worth Analysis", Atom Indonesia, **Volume 23** No.2, Jakarta, 1997.
8. <http://digilib.batan.go.id/sipulitbang/abstrak.php?id=1358>, Diakses tanggal 16 April 2013

## DISKUSI / TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Suharyana, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga)

- Mengapa ketika semua batang kendali all in, nilai  $k_{eff} \neq 0$ ?

JAWABAN : (Rokhmadi, PTRKN-BATAN)

- Sesuai dengan fungsinya bahwa batang kendali untuk mengendalikan populasi neutron dalam teras sehingga pada saat semua batang kendali berada dalam teras reaktor, maka kondisi reaktor subkritis ( $k_{\text{eff}} < 1$ ).  $K_{\text{eff}} = 0$  jika dalam teras reaktor tak ada bahan fisil (tak ada reaksi fisi).