

EVALUASI KRITIKALITAS TERAS PWR1000 MWe JENIS OPTIMAZED POWER REACTOR

Tukiran Surbakti

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, BATAN
Kawasan Puspipstek Gedung 80 Tangerang Selatan, Banten 15310
e-mail: tukiran@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI KRITIKALITAS TERAS PWR1000 MWe JENIS OPTIMAZED POWER REACTOR. Evaluasi kritikalitas teras reaktor PWR1000 telah dilakukan dengan menggunakan komputer (Monte Carlo N-Partikel) MCNP4C dengan tujuan untuk memahami karakteristik salah satu desain teras PWR1000 MWe yaitu teras OPR. Teras OPR1000 (Optimizied Power Reaktor) merupakan PLTN tipe PWR dengan keselamatan pasif. Salah satu parameter yang penting untuk memahami karakteristik desain adalah kritikalitas teras. Evaluasi perhitungan desain dilakukan untuk teras reaktor OPR yang menggunakan bahan bakar UO_2 solid fuels dengan daya 2825 MWt. Komposisi pengayaan elemen bakar 1,60%, 3,28% dan 2,78% dengan gadolinia sebagai racun dapat bakar. Teras OPR1000 menggunakan perangkat bahan bakar dengan grid 16x16 dan jumlah rod 236 buah serta tabung pengarah dan tabung instrumen masing-masin 4 dan 1 buah. Jumlah perangkat bahan bakar di dalam teras adalah 177 buah yang tersusun dengan matriks 15x15. Program MCNP4C merupakan program perhitungan teras reaktor dengan metode Monte Carlo yang telah tervalidasi dengan baik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai k_{eff} teras OPR1000 adalah 1,17912 lebih kecil dari nilai k_{eff} PWR lainnya. Sehingga teras reaktor OPR1000 merupakan teras reaktor yang Low Boron Concentration yaitu untuk membuat subkritis membutuhkan konsentarsi boron yang kecil. .

Kata kunci: teras PWR1000, konsentrasi boron, kritikalitas teras, desain neutronik

ABSTRACT

CRITICALITY EVALUATION OF PWR1000 CORE AT OPTIMIZED POWER REACTOR TYPE.

Criticality evaluation of the PWR1000 core at optimized power reactor been done using (Monte Carlo N-Partikel) MCNP4C computer code. The aim of calculation is to know the characteristic one of the cores of PWR 1000 MWe namely OPR1000 core. The OPR1000 reactor is one of PWR types NPP with passive safety condition. One of the important parameter to understand the design characteristic is a core criticality. Evaluation of the design calculation was done for the OPR core which used solid fuels UO_2 with power thermal 2825 MWt. The enrichment fuel compositions were 1.60%, 3.28% and 2.78% with gadolinia as a burnable poison. The OPR core used 16x16 grids of fuel assemblies with 236 pin rods, 4 guide tubes and 1 instrument tube. The OPR reactor has 177 fuel assemblies in the core in matrix of 15 x15. MCNP4C code is one of the core calculation code used Monte Carlo method which has good validation. The result of calculation showed that the value of k_{eff} for OPR1000 core is 1,17912 it is lower than other k_{eff} value of PWR cores. So the core of OPR1000 reactor is a low boron concentration that means the reactor need low boron concentration become the core subcritical condition.

Keywords: OPR1000 core, Boron Concentration, core criticality, neutronic design

1. PENDAHULUAN

Batan saat ini terus mengkaji Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang layak digunakan di Indonesia. Kajian dilakukan baik dari sisi ekonomi, budaya dan keselamatan terhadap PLTN yang telah beroperasi di dunia. Namun kajian tersebut dilakukan secara bertahap dan kontinyu karena kajian satu tipe PLTN meliputi banyak hal, mulai dari unjuk kerja bahan bakar hingga unjuk kerja teras reaktor secara keseluruhan sehingga dapat dipahami karakteristik teras reaktor PLTN khususnya tipe PWR.

Untuk mendukung kajian tersebut di atas telah dilakukan analisis dan dipublikasikan karakteristik perangkat bahan bakar teras PWR 1000^[1]. Sehingga pada makalah ini dilakukan evaluasi kritikalitas teras PWR1000 jenis OPR1000 MWe. Saat ini reaktor OPR1000 telah memasuki generasi ke III dimana reaktor PLTN OPR1000 telah menggunakan keselamatan pasif. Evaluasi kritikalitas dilakukan agar dapat dipahami karakteristik salah satu teras reaktor PWR1000 yaitu teras OPR1000 (*Optimized Power Reactor*). Desain teras OPR1000 dilakukan oleh KHNP (*Korean Hydro and Nuclear Power*). Dalam makalah ini akan dibahas evaluasi kritikalitas teras OPR1000 desain KHNP, karena reaktor OPR1000 mempunyai kelebihan diantaranya adalah efisiensi tinggi. Sehingga reaktor OPR1000 sangat diminati di Korea, sudah beroperasi 8 jenis dan ada 4 jenis reaktor OPR1000 lagi yang sedang dibangun yang mempunyai berbagai jenis karakteristik teras. Karakteristik teras secara neutronik sangat tergantung dari jenis bahan bakar dan pengkayaan serta dimensi dan jumlah pin bahan bakar pada perangkat bahan bakar yang digunakan. Evaluasi kritikalitas teras OPR1000 dilakukan dengan menggunakan program MCNP4C yang merupakan program komputer perhitungan teras reaktor dengan metode Monte Carlo^[2]. Program ini telah divalidasi dengan perhitungan benchmark teras ANS-IAEA dengan baik^[3].

Teras OPR1000 sebagai objek dalam penelitian ini menggunakan bahan bakar *solid fuel* UO_2 dengan daya 2825 MWt^[4]. Komposisi pengayaan elemen bakar 1,60%, 3,28% dan 2,78% dengan gadolinia sebagai racun dapat bakar. Teras OPR1000 menggunakan perangkat bahan bakar dengan matrik 16x16 dan jumlah batang bahan bakar 236 buah serta tabung pengarah dan tabung instrumen masing-masing 4 dan 1 buah. Jumlah perangkat bahan bakar di dalam teras adalah 177 buah yang tersusun dengan matriks 15x15. Evaluasi dilakukan pada kondisi teras semua batang kendali berada pada posisi ditarik keatas dimana tabung pengarah dan tabung instrument berisi air. Perhitungan teras dilakukan dengan model teras 3 dimensi dan perangkat elemen bakar dengan model *bach* dengan susunan *square pitch*. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan batasan parameter yang ditinjau.

2. DESKRIPSI TERAS REAKTOR DAYA OPR1000

Reaktor daya OPR adalah reaktor daya jenis air tekan (*Pressurized Water Reactor*) yang didesain oleh KHNP, Korea. Pada awalnya desain teras OPR didesain oleh Westinghouse. Reaktor OPR1000 merupakan reaktor PWR generasi ke III memiliki keselamatan pasif dan konfigurasi teras seperti yang dilampirkan pada Gambar 1. Teras OPR pada awal siklus (BOC) disusun atas 3 jenis pengkayaan yaitu 1,60%; 3,28% dan 2,78% dengan gadolinia sebagai racun dapat bakar. Jumlah perangkat bahan bakar yang menyusun teras reaktor OPR adalah 177 buah dengan kondisi seperti Tabel 1. Densitas isotop material bahan bakar, kelongsong dan pendingin dinyatakan dalam Tabel 2.

Reaktor OPR1000 mempunyai bahan bakar jenis pelet silinderis dengan bahan bakar UO_2 dan kelongsongnya Zircalloy-4. Di dalam kelongsong bahan bakar baik dibagian atas maupun bagian bawah terdapat ruang yang dimanfaatkan untuk menampung gas-gas hasil produk fisi.

Setiap perangkat bahan bakar terdiri dari 16 x 16 *grids* dengan jumlah *pin rod* 236 buah elemen bakar dan 4 buah elemen *guide thimble* dan satu *instrumentation tube*. Bahan bakar juga dilengkapi

perangkat kendali yang jumlahnya 4 buah pada satu perangkat bahan bakar yang sering disebut RCCA (*rod cluster control assemblies*). Material utama dari pembentuk elemen kendali adalah B4C, sedangkan kelongsongnya adalah material *stainless steel* (SS). Perangkat elemen kendali RCCA digunakan untuk mengontrol perubahan reaktivitas dan distribusi daya aksial. Selain RCCA ada juga perangkat elemen kendali GRCA (*gray rod cluster assemblies*) pada teras reaktor OPR yang digunakan untuk mengatur reaktivitas teras sesuai dengan perubahan beban.

Air ringan digunakan sebagai pendingin dan moderator yang dicampur dengan boron cair yang berfungsi sebagai penyerap neutron. Konsentrasi boron cair bervariasi jumlahnya sesuai dengan perubahan reaktivitas yang berubah karena perubahan fraksi bakar di dalam teras.

3. METODOLOGI

Perhitungan evaluasi kritikalitas teras OPR1000 dilakukan dengan menggunakan program MCNP4C dengan kondisi teras semua bahan bakar masih baru, daya nol, tanpa boron, keadaan teras dingin dan bersih. Perhitungan dilakukan dalam beberapa tahap. Pertama dilakukan pemodelan setiap perangkat bahan bakar teras OPR1000. Perangkat bahan bakar teras OPR1000 ada 6 jenis dengan kode A0, B0, B1, B2, C0 dan C1. Karakteristik dari setiap perangkat dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4. Kemudian dilihat gambar dari model dengan menggunakan program *vised*. Model input disesuaikan dengan keadaan yang sebenarnya baik posisi pin, ukuran dan pengkayaannya. Selanjutnya dilakukan perhitungan kritikalitas teras OPR1000. Nilai kekritisitas teras OPR1000 berdasarkan desain KHNP dibandingkan dengan referensi yang ada. Batasan parameter kritikalitas untuk teras OPR1000 yang mempunyai daya termal 2825 MWt adalah nilai k_{eff} awal teras siklus $< 1,200$ (lebih besar dari 1)

3.1 Perhitungan teras dengan MCNP4C

Program MCNP4C digunakan untuk menyelesaikan masalah transport neutron yang dikembangkan oleh Los Alamos National Laboratory (LANL). MCNP4C dapat menggunakan model geometri 3-D yang rinci tanpa penyederhanaan. Setelah mendefinisikan konfigurasi geometri, MCNP dengan energi neutron yang kontinyu menyelesaikan persamaan integral transport dengan simulasi histori partikel. Trayek setiap partikel neutron direkam sesuai dengan hukum interaksi partikel. Sejumlah partikel yang random digunakan sebagai sample dan menentukan interaksi probabilistik yang terjadi. Perhitungan kritikalitas reaktor yang sangat penting adalah dalam menentukan nilai k_{code} , sehingga MCNP4C dapat menghitungnya secara benar dan akurat. Nilai k_{code} adalah suatu sumber neutron yang didistribusikan melalui material yang dapat belah seperti U-235 sebagai bahan bakar di dalam reaktor. Ketika reaksi fisi terjadi, lokasinya disimpan untuk generasi berikutnya atau siklus neutron berikutnya. Pada akhir setiap siklus nilai k_{eff} dihitung sebagai ratio dari jumlah neutron yang berfisi dengan sumber neutron. Laju reaksi di bahan bakar dapat diperoleh melalui estimasi panjang lintasan. Perhitungan evaluasi kritikalitas teras OPR1000 dengan MCNP4C menggunakan library ENDF5.3. Sebagai input dalam program MCNP4C adalah jenis bahan bakar, pengkayaan, dimensi serta ukuran dan geometri bahan bakar. Kemudian dimodelkan pin sel dan perangkat bahan bakar di dalam

teras reaktor. Sedangkan output dari MCNP4C adalah nilai k_{eff} teras. Perhitungan teras OPR1000 dilakukan dengan program MCNP4C yang data-datanya seperti pada Tabel 3. Konfigurasi teras OPR1000 dimodelkan dengan 177 jumlah perangkat bahan bakar. Dimana perangkat bahan bakar kondisi dan posisinya di dalam teras tertentu. Dengan berubahnya posisi dan komposisi perangkat bahan bakar di dalam teras akan mempengaruhi nilai k_{eff} . Nilai k_{eff} menunjukkan karakteristik teras OPR1000 yang nilainya tertentu disetiap siklus. Sebelum melihat hasil perhitungan terlebih dahulu dipastikan bahwa model yang dibuat sudah sesuai dengan keadaan aslinya melalui program *vised*. Jika masih terdapat kesalahan didalam pemodelan maka modelnya harus diperbaiki sampai diperoleh gambar yang sesuai dengan kebenarannya. Kemudian nilai k_{eff} yang diperoleh dibandingkan dengan referensi. Nilai yang hampir sama dipastikan bahwa perhitungan dengan MCNP4C dianggap cukup baik.

Tabel 1. Data Desain Teras OPW1000^[5]

– Daya teras reaktor (MWt)	2825	– Bahan bakar (pellet):	
– Teras aktif:		Material	UO ₂
Radius teras efektif (m)	1,83	Densitas, %	94,6
Tinggi aktif bahan bakar (m)	4,26	Diameter, cm	0,819
Perbandingan molekul H ₂ O/U	2,40	Panjang, cm	0,983
– Perangkat bahan bakar, dimensi (cm)	21,402 x 21,402 x 177	– RCCA:	
Jumlah Matriks	16 x 16	Penyerap neutron	B ₄ C
Jumlah rod per perangkat	236	Diameter, cm	0,866
Berat Uranium, Kg	75.914,5	Kerapatan, cm	10,159
Berat Zirkaloy, Kg	16.127,7	Material kelongsong	SS-304
– Tebal reflektor (cm):		Tebal kelongsong	0,047
bagian atas: air dan baja	25,4	Jumlah perangkat	45
bagian bawah: air dan baja	25,4	– GRCA:	
bagian samping: air dan baja	38,1	Penyerap neutron	B ₄ C, SS-304
– Elemen bakar:		Diameter, cm	0,866
Jumlah untuk seluruh teras	38.280	Kerapatan, gr/cm ³	10,159
Diameter luar, cm	0,95	Tebal kelongsong, cm	0,047
Diameter gap, cm	0,016	– Reaktivitas lebih k_{eff}	1,181
Tebal kelongsong, cm	0,057	– Fraksi neutron kasip	0,0065
Material kelongsong	Zirkaloy-4		
Panjang plenum gas fisi, cm	17,8		
Square lattice pitch, cm	1,26		
Pitch to diameter ratio	1,326		

Tabel 2. Densitas beberapa isotop teras OPR1000

Nuklida	UO ₂ (1,6%)	UO ₂ (2,78%)	UO ₂ (3,28%)	UO ₂ (3,78%)
U ²³⁵	0.01410425	0.02450571	0.02891299	0.03332021
U ²³⁸	0.86741161	0.85699458	0.85258070	0.84816688
O	0.11848414	0.11849971	0.11850631	0.11851291
H ₂ O	7.583E-02	7.583E-02	7.583E-02	7.583E-02
Zr.	0.9823	0.9823	0.9823	0.9823

Tabel 3. Perbandingan teras OPR1000^[7]

Paremeter desain	OPR-1
Jumlah grid perangkat bahan bakar	16 x16
Jumlah (FA) dalam teras	177
Jumlah pin bahan bakar (FA)	236
Pitch perangkat bahan bakar (mm)	207.78
Pitch bahan bakar (mm)	12.85
Panjang FA (mm)	4528
Lebar FA (mm)	203
Diameter bahan bakar (mm)	9,50
Jumlah tabung pengarah	4
Jumlah tabung instrumen	1

R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A	
1								1 B0	2 B0	3 C0	4 B0	5 B0			
2					6 B0	7 C0	8 C1	9 C1	10 B1	11 C1	12 C1	13 C0	14 B0		
3				15 C0	16 C1	17 A0	18 B2	19 A0	20 A0	21 A0	22 B2	23 A0	24 C1	25 C0	
4		26 B0	27 C1	28 B1	29 B2	30 A0	31 C1	32 A0	33 C1	34 A0	35 B2	36 B1	37 C1	38 B0	
5		39 C0	40 A0	41 B2	42 A0	43 B1	44 A0	45 B1	46 A0	47 B1	48 A0	49 B2	50 A0	51 C0	
6	52 B0	53 C1	54 B2	55 A0	56 B1	57 A0	58 C1	59 A0	60 C1	61 A0	62 B1	63 A0	64 B2	65 C1	66 B0
7	67 B0	68 C1	69 A0	70 C1	71 A0	72 C1	73 A0	74 A0	75 A0	76 C1	77 A0	78 C1	79 A0	80 C1	81 B0
8	82 C0	83 B1	84 A0	85 A0	86 B1	87 A0	88 A0	89 A0	90 A0	91 A0	92 B1	93 A0	94 A0	95 B1	96 C0
9	97 B0	98 C1	99 A0	100 C1	101 A0	102 C1	103 A0	104 A0	105 A0	106 C1	107 A0	108 C1	109 A0	110 C1	111 B0
10	112 B0	113 C1	114 B2	115 A0	116 B1	117 A0	118 C1	119 A0	120 C1	121 A0	122 B1	123 A0	124 B2	125 C1	126 B0
11	127 C0	128 A0	129 B2	130 A0	131 B1	132 A0	133 B1	134 A0	135 B1	136 A0	137 B1	138 A0	139 C0		
12	140 B0	141 C1	142 B1	143 B2	144 A0	145 C1	146 A0	147 C1	148 A0	149 B2	150 B1	151 C1	152 B0		
13		153 C0	154 C1	155 A0	156 B2	157 A0	158 A0	159 A0	160 B2	161 A0	162 C1	163 C0			
14			164 B0	165 C0	166 C1	167 C1	168 B1	169 C1	170 C1	171 C0	172 B0				
15					173 B0	174 B0	175 C0	176 B0	177 B0						

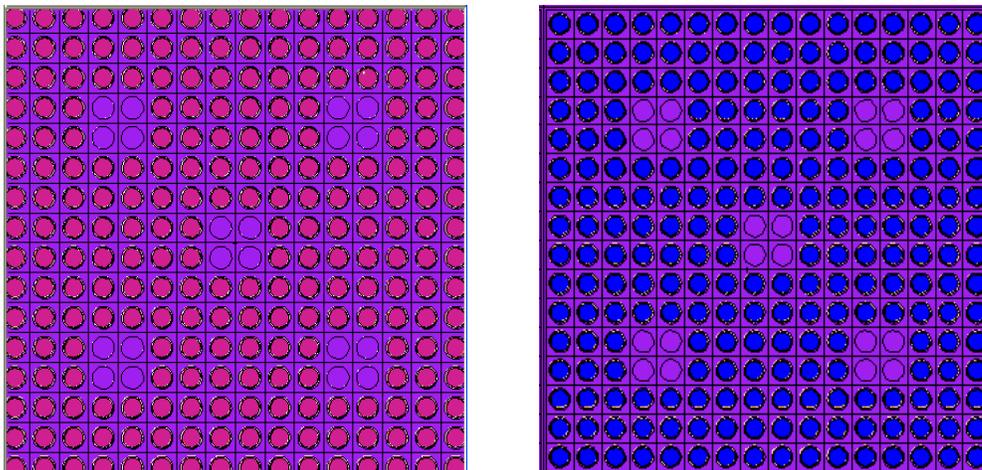
Gambar 1. Susunan perangkat bahan bakar teras OPR^[6]

Tabel 4. Kondisi Perangkat bahan bakar di dalam teras OPR1000

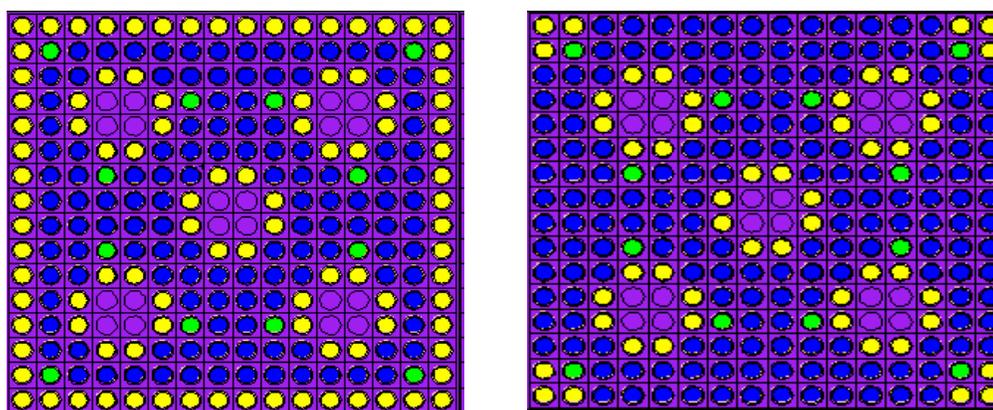
Tipe perangkat	Jumlah FA	Pengkayaan %	Jumlah rod	Jumlah Gadolinia	% berat
A0	61	1,6	236	-	-
B0	24	3,28	236	-	-
B1	20	3,28/2,78	124/100	12	6,5
B2	16	3,28/2,78	172/52	12	6,5
C0	16	3,28/2,78	184/52	-	-
C1	40	3,78/3,28	120/100	16	6,5
Jumlah	177				

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

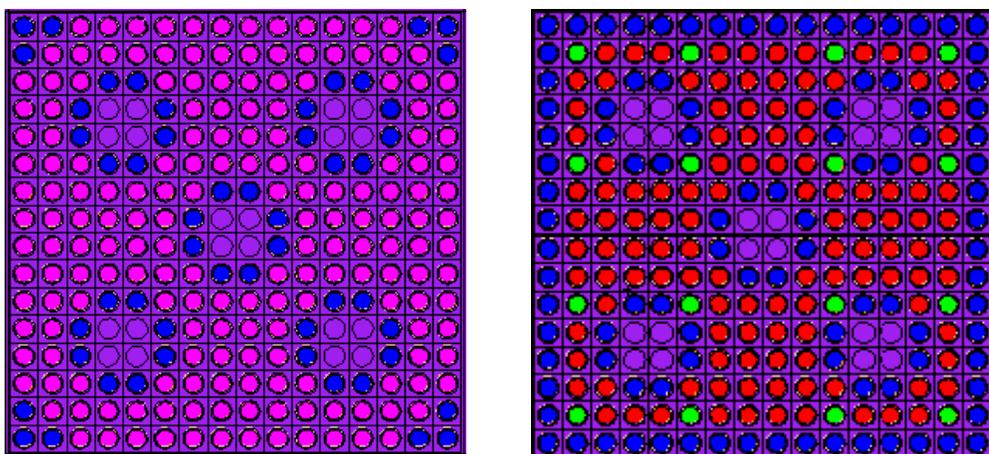
Dari hasil perhitungan program MCNP4C diperoleh gambar model perangkat bakar teras OPR1000. Ada 6 jenis perangkat bahan bakar yang dimodelkan yaitu perangkat bakar A0 dan B0 pada Gambar 2. Jumlah batang bahan bakar 16 x16 dalam satu perangkat A0 dengan pengkayaannya 1,6%, di dalam teras pada siklus pertama terdapat 61 buah perangkat A0. Satu *Guide tube* dan *instrument tube* diasumsikan menggunakan 4 *grid* bahan bakar. Sedangkan perangkat B0 pengkayaannya adalah 3,28% dan di dalam teras terdapat 24 buah perangkat B0. Gambar 3 adalah perangkat bakar B1 dan B2, dimana perangkat B1 di dalam teras pertama OPR1000 ada 20 buah. Perangkat B1 terdiri dari 124 batang bahan bakar dengan pengkayaan 3,28 % dan 100 buah batang bahan bakar dengan pengkayaan 2,78 % dan 12 buah batang bahan bakar berisis racun dapat bakar gadolinium oksida. Sedangkan perangkat B2 di dalam teras awal OPR1000 ada 16 buah dengan jumlah batang bahan bakar 172 yang pengkayaannya 3,28 % dan 52 buah batang bahan bakar yang pengkayaannya 2,78 % serta 12 buah batang bahan bakar racun dapat bakar. Gambar 4 adalah perangkat bakar C0 dan C1. Perangkat C0 terdiri dari 184 batang bahan bakar dengan pengkayaan 3,28% dan 52 batang bahan bakar dengan pengkayaan 2,78 tanpa racun dapat bakar. Perangkat ini didalam teras OPR1000 ada 16 buah. Sedangkan perangkat C1 terdiri dari 120 batang bahan bakar dengan pengkayaan 3,78% dan 100 batang bahan bakar dengan pengkayaan 3,28% serta 16 buah batang racun dapat bakar. Hasil pemodelan menunjukkan kesesuaian dengan kebenaran yang sesuai dengan posisi dan komposisinya. Gambar 5 adalah posisi 177 buah perangkat bakar di dalam teras OPR1000 desain KHNP(*Korean Hydro and Nuclear Power*), Nilai keff teras OPR1000 dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai keff teras OPR1000 tidak jauh berbeda dari referensi yang ada hanya berbeda sekitar 0,2 % . Namun kecenderungannya nilai yang diperoleh lebih kecil dari nilai referensi. Hal ini disebabkan mungkin metode dan tampang lintang yang digunakan untuk menghitung nilai k_{eff} berbeda dengan referensi.



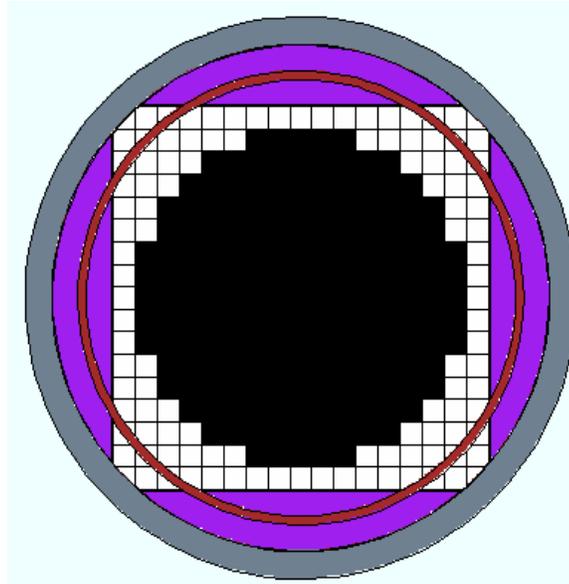
Gambar 2. Perangkat bahan bakar (A0) dan (B0)



Gambar 3. Perangkat bahan bakar (B1) dan (B2)



Gambar 4. Perangkat bahan bakar (C0) dan (C1)



Gambar 5. Penampang atas teras OPR1000

Tabel 5. Nilai k_{eff} teras OPR1000

Parameter	k_{eff}	k_{eff} (Ref) ^[5]
OPR-1	1,17912	1,180

Dari nilai tersebut dapat diperoleh karakteristik teras OPR1000 bahwa nilai reaktivitas lebih teras kecil jika dibandingkan dengan teras AP1000 yang mempunyai nilai k_{eff} teras 1,200. Sehingga untuk membuat teras OPR1000 subkritis diperlukan konsentrasi boron yang kecil dibanding teras AP1000. Teras OPR1000 bersifat *low boron concentration* artinya untuk membuat reaktor subkritis dibutuhkan konsentrasi boron yang rendah dibanding tipe reaktor yang sejenis PWR1000 lainnya. Jika nilai konsentrasi boron rendah hal ini sangat mendukung pada nilai koefisien reaktivitas moderator yang lebih negatif yang artinya umpan balik negatif dari moderator sangat baik. Jika jumlah boron lebih besar di dalam moderator dapat menyebabkan kerugian bagi reaktor tersebut baik dari segi keselamatan maupun korosinya. Sehingga desain suatu teras PWR diinginkan nilai konsentrasi boron yang lebih kecil didalam teras PWR. Hal ini juga menyebabkan konsentrasi litium di dalam moderator sangat minimal sehingga mengurangi korosi terhadap kelongsong.

Teras OPR1000 mempunyai jumlah perangkat yang lebih sedikit yang artinya jumlah uranium di dalam teras lebih sedikit namun nilai reaktivitas teras diawal siklus lebih besar dari teras AP1000. Hal ini disebabkan oleh karena desain bahan bakar yang berbeda yaitu teras OPR1000 menggunakan racun dapat bakar gadolinium oksida. Nilai reaktivitas teras diawal siklus dapat dilihat melalui nilai k_{eff} terasnya. Dari tabel tersebut dapat dilihat juga bahwa nilai k_{eff} teras OPR1000 diperoleh adalah 1,17912 ini berarti bahwa teras tersebut diharapkan dapat dioperasikan sepanjang siklusnya yaitu 18 bulan dengan daya 1000 Mwe.

6. KESIMPULAN

Hasil perhitungan program MCNP4C menunjukkan bahwa nilai k_{eff} teras OPR1000 tanpa boron, bersih dan dingin adalah $1,17912 \pm 0,00014$. Nilai ini tidak jauh berbeda dari referensi. Karakteristik teras OPR100 desain KHNP bersifat *low boron concentration*. Nilai konsentrasi boron yang rendah sangat mendukung pada nilai koefisien reaktivitas moderator yang lebih negatif sehingga umpan balik negatif dari moderator sangat baik sehingga teras reaktor OPR1000 baik dari segi keselamatan maupun sistem material korosinya. Hal ini juga menyebabkan konsentrasi litium di dalam moderator sangat minimal sehingga mengurangi korosi terhadap kelongsong.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Drs. Amir Hamzah M.Si. yang telah membantu penulis dalam menyiapkan input file APR1400 dan penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ir. Tagor MS yang memberikan banyak masukan pada penyelesaian makalah ini terutama diskusi tentang MCNP4C.

8. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. TUKIRAN S, IMAN K, “*Analisis Karakteristik Perangkat Bahan Bakar Maju Teras PWR*”, Proseding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, ITS, Surabaya, 28 Juli 2010.
- [2]. SANG YOUN JEON, NAM GYU PARK, GYU TAE CHOI and HYEONG KOO KIM., “*An Investigation on the Hold down Margin using Monte-Carlo Algorithm for the PWR Fuel Assembly*”, Korea Nuclear Fuel Co. Ltd., 493 Deogjin-Dong Youseong-Gu Daejeon, Korea 2000.
- [3]. ROKHMADI, SEMBIRING TM, “*Perhitungan Kritikalitas MCNP4C-2 Pada Teras Benchmark Kisi Bahan Bakar PWR Dengan Lubang Air Dan Pertubing Rod*”, Proseding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, ITS, Surabaya, 28 Juli 2010.
- [4]. ANONIMUOUS, “*Simplified Passive Advanced Light Water Reactor Plant Program*”, PWR Standard Safety Analysis Report, 4th Volume, DE-AC03-90SF18495, Westinghouse Electric Corporation, 1992.
- [5]. LIANG ZHANG, “*Evaluation of High Power Density Annular Fuel Application in the Korean OPR-1000*”, B.S Nuclear Engineering and Technology, Massachusetts Institute of Technology, June 2009.
- [6]. CHI YOUNG HAN, CHANG HO SHIN, and JONG KYUNG KIM, “*Application of an Advanced MCNP Technique to Analysis of Nuclear Characteristics in Reactor Core*”, Salt Lake City, Utah, USA, September 2001.
- [7]. AUNG THARN DAING, MYUNG-HYUN KIM, “*Engineering Design Feasibility of Low Boron Concentration Core in PWR*”, Document, KEPCO Nuclear Fuel Company, Rep. of Korea, 2010

DISKUSI/TANYA-JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Sri Sudadiyo, PTRKN-BATAN)

- Mengapa anda mengambil PWR jenis OPR1000?

JAWABAN: (Tukiran, PTRKN-BATAN)

- Karena teras reaktor OPR1000 sangat diminati di Korea, terasnya efektif dan bersifat low boron concentration. Di Korea 4 PLTN OPR1000 sudah beroperasi dan 4 PLTN lagi sedang dibangun. Teras OPR1000 sangat fleksibel bahkan dapat dinaikkan dayanya menjadi 1400 MWe yang disebut APR1400.

2. PERTANYAAN: (Rika Agustina, FMIPA-UNY)

- Apa jenis bahan bakar teras OPR1000?

JAWABAN: (Tukiran, PTRKN-BATAN)

- Jenis bahan bakar teras OPR1000 adalah UO_2 dengan pengkayaan 1,6%; 2,71%; 3,28%. Sebagian dari perangkat bakar diberi racun dapat bakar Gd_2O_3 .

3. PERTANYAAN: (Maman Mulyaman, PTRKN-BATAN)

- Apakah teras OPR1000 bahan bakarnya mengandung racun dapat bakar? Kalau ya, apa dan berapa konsentrasinya?

JAWABAN: (Tukiran, PTRKN-BATAN)

- Bahan bakar teras OPR1000 mengandung racun dapat bakar yaitu Gd_2O_3 dengan konsentrasi 6,5%, namun tidak semua perangkat bahan bakar mempunyai racun dapat bakar (hanya perangkat tertentu saja, misalnya perangkat B_1 , B_2 dan C_1)