

ANALISIS PERHITUNGAN DESAIN TERAS PWR PADA KONFIGURASI KRITIS DENGAN SCALE5.1

Tukiran. S. dan Surian Pinem

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310
Email : tukiran@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS PERHITUNGAN DESAIN TERAS PWR PADA KONFIGURASI KRITIS DENGAN SCALE5.1. Perhitungan desain teras reaktor PWR pada konfigurasi kritis telah dilakukan dengan menggunakan program komputer KENO V.a dan SAS2H yang merupakan modul program yang ada dalam program SCALE5.1 dengan tujuan untuk memahami keandalan *code* dan karakteristik teras PWR 1000 MWe. Perhitungan dilakukan untuk teras reaktor tipe PWR dengan perangkat bahan bakar 157 dan tiap perangkat bakar terdiri dari 17 x 17 pin. Setiap pin bahan bakar dimuati dengan material bahan bakar uranium oksida pengkayaan 3,21 %, 3,41 % dan 3,59 %. Program KENO V.a digunakan untuk menggenerasi tampang lintang makroskopik perangkat bahan bakar yang berisi 264 pin bahan bakar dan 24 pin berisi air dan satu tabung pengarah. Perhitungan dilakukan dengan 27 energi grup neutron yang terdiri dari grup *fast*, *epithermal* dan *thermal*. Sedangkan perangkat yang ke dua terdiri dari 264 pin berisi bahan bakar dan 20 pin berisi material Gd_2O_3 sebagai racun dapat bakar. Perangkat yang ketiga dan keempat terdiri 16 pin dan 12 pin berisi material racun dapat bakar dan satu pin yang ditengah diisi tabung pengarah selainnya bahan bakar. Kemudian dilakukan perhitungan teras dengan model 1/8 teras terdiri atas 26 perangkat bahan bakar dengan program KENO V.a. Konstanta kelompok dihitung untuk setiap perangkat bahan bakar dan material pembentuk teras. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa teras konfigurasi kritis awal siklus diperoleh nilai $k_{\text{eff}} = 1,0040$ dengan standar deviasi 0,0005 sesuai dengan hasil perhitungan *benchmark*. Namun dalam perhitungan deplesi bahan bakar dengan menggunakan SAS2H perangkat bahan bakar terdapat perbedaan nilai 3 % dengan *benchmark*. Hal ini disebabkan oleh karena pemilihan pustaka tampang lintang mikroskopik di dalam program SAS2H yang berbeda dengan perhitungan *benchmark*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa program komputer KENO V.a dan SAS2H dapat digunakan untuk validasi perhitungan desain teras PWR konfigurasi kritis.

Kata kunci: Perhitungan, Teras PWR, Desain, Konfigurasi Kritis

ABSTRACT

ANALYSIS OF DESIGN CALCULATION OF THE PWR CORE AT CRITICAL CONFIGURATION WITH SCALE5.1 CODE. Design calculation of the PWR core at critical configuration has been done using KENO V.a and SAS2H modules which available in the SCALE5.1 code with aim for understanding code capability and characteristic of the PWR 1000 MWe core. The calculation was done for the core of PWR reactor has 157 fuel assembly which consist of 17 x 17 pins. Each fuel pin is inserted with UO₂ material with 3.21 %, 3.41 %, 3.59 % enrichments. KENO V.a used for generating macroscopic cross section of fuel assembly which consist of 264 fuel pin and 24 pins consist of water and one is guide tube in the center. Calculation was done with 27 neutron group energy namely fast, epithermal and thermal groups energy. While the second fuel assembly consists of 264 fuel pins and 20 pins inserted Gd_2O_3 burnable poison. The third and forth consist of 16 and 12 fuel pins inserted with Gd_2O_3 burnable poison material, respectively and one guide tube in the center of fuel assembly. Core calculation was done with 1/8 core model consist of 26 fuel assembly used KENO V.a code. Macroscopic cross section was calculated for each fuel assembly and all material of core. The result of calculation showed that at critical configuration achieved the value of effective multiplication factor k_{eff} is 1.0040 with 0.0005 standard deviation according to result of benchmark calculation. But for fuel depletion calculation which used SAS2H code for fuel assembly has different value 3 % with benchmark calculation. It is because the library microscopic of cross section in SAS2H is different with benchmark calculation. So it can be concluded that KENO V.a and SAS2H code can be used for validation of design calculation for PWR core at critical configuration.

Key words: Calculation, PWR core, Design, Critical configuration.

PENDAHULUAN

Rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia sudah masuk

pada Sistem Energi Nasional (SEN) dan direncanakan dalam *roadmap* PLTN BATAN. Salah satu langkah yang telah dilakukan oleh BATAN adalah mengkaji PLTN yang telah

beroperasi secara rutin minimal selama 3 tahun tanpa kendala. Kajian yang dilakukan adalah kajian ekonomi, keselamatan dan desain terhadap suatu teras PLTN. PLTN yang dikaji yang telah terbukti keandalannya beroperasi selama ini di dunia adalah teras PLTN tipe PWR (*Pressurized Water Reactor*). Dalam kajian tersebut sering dilakukan dengan menggunakan program komputer. Untuk melakukan kajian desain suatu teras reaktor dibutuhkan perhitungan yang teliti dan akurat dengan menggunakan program komputer (*computer code*) karena berhubungan erat dengan keselamatan operasi teras reaktor. Bagian yang penting dari kajian desain teras reaktor adalah validasi suatu program komputer yang dilakukan dengan analisis perhitungan konfigurasi kritis teras reaktor menggunakan model teras PWR yang sudah beroperasi secara komersial. Sudah banyak program komputer yang tersedia di pasaran namun untuk mendesain teras reaktor menggunakan program tersebut perlu divalidasi dan diverifikasi sehingga keandalan, kemampuan dan kelemahan program komputer tersebut bisa diketahui. Pada umumnya suatu teras reaktor didesain untuk dapat beroperasi sampai jangka waktu tertentu dengan aman dan selamat. Belum tentu suatu program komputer cocok digunakan untuk perhitungan desain teras PWR, sehingga harus divalidasi. Filosofi desain teras PWR adalah mempunyai reaktivitas lebih yang cukup besar pada awal siklus dan mempunyai panjang siklus tertentu yaitu lamanya bahan bakar di dalam teras yang dikenal dengan derajat bakar untuk tiap perangkat bahan bakar serta mempunyai koefisien reaktivitas negatif. Filosofi ini harus dibuktikan dengan perhitungan desain menggunakan program komputer. Perhitungan desain teras dilakukan menggunakan program komputer dengan membuat teknik pemodelan teras yang efektif terlebih dahulu. Semua parameter desain teras dihitung berdasarkan program komputer yang akurat dan teliti. Disamping program komputer yang sesuai juga harus didukung oleh teknik pemodelan teras yang efektif, sehingga tercapai tujuan perhitungan desain suatu teras reaktor yang dapat dioperasikan dengan aman, efektif dan selamat.

Sebelumnya telah dilakukan penelitian tentang analisis karakteristik perangkat maju teras PWR dengan menggunakan program KENO.V.a¹⁾. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa program KENO V.a dapat digunakan untuk menentukan karakteristik perangkat bahan bakar teras PWR sehingga perlu untuk dilanjutkan hingga ke perhitungan teras reaktor.

Pada penelitian ini dilakukan validasi perhitungan desain teras PWR pada konfigurasi kritis. Teras reaktor yang tersusun atas 157

perangkat bahan bakar dan tiap perangkat terdiri dari 17 x 17 pin mengandung material bahan bakar UO₂ yang diperkaya uranium-235 dengan 3,21%, 3,41% dan 3,59%. Setiap perangkat bahan bakar divarisi dengan jumlah batang racun dapat bakar Gd₂O₃ dalam bahan bakar dan pengaturan konsentrasi boron pada moderator. Campuran Gd₂O₃ dan uranium berbentuk pelet bahan bakar dipasang pada perangkat, sehingga bersifat pasif atau tidak sebagai kendali reaktivitas. Batang kendali digunakan sebagai kendali reaktivitas lebih pada saat *shut-down* reaktor, perubahan daya, dan fluktuasi suhu pendingin primer serta fluktuasi konsentrasi boron pada saat operasi daya normal. Pengaturan konsentrasi boron pada moderator dilakukan pada saat terjadi perubahan kondisi teras dari dingin (suhu normal) ke panas (suhu operasi) pada daya nol, perubahan densitas material hasil fisi seperti Xe & Sm, dan pembakaran bahan bakar dari awal (BOC) hingga akhir (EOC) siklus operasi²⁾. Validasi perhitungan dilakukan dengan program KENO V.a dan SAS2H. Program KENO V.a dengan metode Monte Carlo digunakan untuk perhitungan kritikalitas, sedangkan program SAS2H digunakan untuk perhitungan derajat bakar dan deplesi bahan bakar³⁾. Perhitungan KENO V.a berdasarkan geometri 2-D dihitung faktor multiplikasi efektif dan SAS2H berdasarkan deplesi perangkat bakar individu. Berdasarkan model ¼ teras PWR simetri dan derajat bakar merata setiap perangkat bakar yang ada ditentukan nilai faktor multiplikasi teras. Hasil perhitungan akan dibandingkan dengan hasil perhitungan benchmark yang telah teruji.

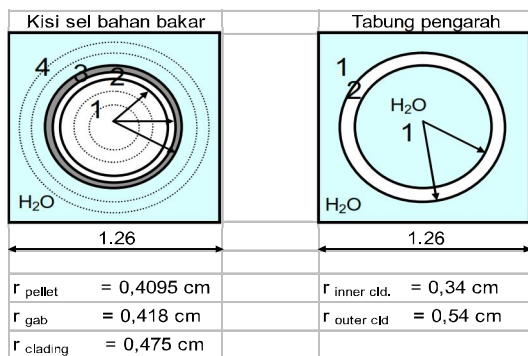
TEORI

- Deskripsi Teras Reaktor
Teras reaktor PWR terdiri dari 157 perangkat bahan bakar, setiap perangkat terdiri atas 17 x 17 kisi yang berisi 264 pin bahan bakar dan 24 tabung pengarah serta satu tabung instrumentasi. Pada saat operasi kontrol reaktivitas dilakukan dengan menggunakan 4 batang kendali *bank* dan 2 *shut down bank* yang terdiri dari material Ag-In-Cd. Pada teras reaktor terdapat 68 *cluster* BPR (Burnable Poison Rod) yang mengandung 912 BPR baru dan 192 BPR deplesi serta larutan boron. Konfigurasi kritis dimodelkan pada perhitungan ini adalah suhu moderator dingin 300 K dan suhu panas (operasi) 600 K dianggap konstan dan batang kendali semua berada di atas. Seluruh teras diwakili oleh 5 batch bahan bakar yaitu; batch ke 5 mempunyai pengkayaan 3,41 % , batch ke 4 mempunyai pengkayaan 3,21 % dan batch ke 3 mempunyai pengkayaan 3,59 %. Ke 3 batch

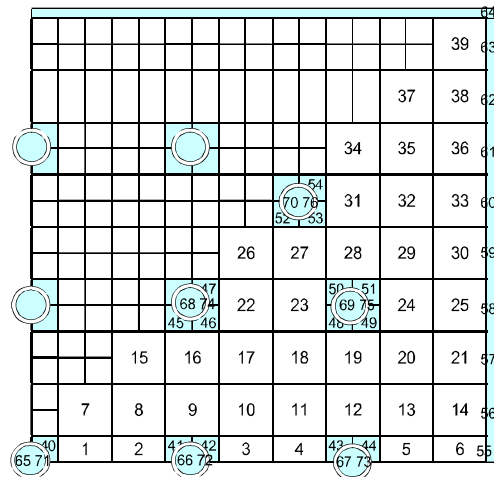
bahan bakar ini merupakan deplesi bahan bakar, sedangkan 2 batch bahan bakar lagi merupakan bahan bakar baru (*fresh fuel*) dengan pengkayaan 3,41 % dan 3,21 %. Untuk siklus berikutnya batch lima akan dikeluarkan dari teras dan demikian seterusnya.

- Pemodelan kisi sel, perangkat dan teras PWR
Data fisik teras PWR yang digunakan sebagai obyek perhitungan adalah salah satu reaktor yang telah beroperasi di Virginia Amerika. Pada Tabel 1 dapat dilihat ukuran dan bentuk geometri kisi sel bahan bakar, tabung pengarah, perangkat bahan bakar dan teras reaktor tersebut. Sebelum perhitungan nilai reaktivitas lebih teras PWR, maka dilakukan terlebih dahulu pemodelan kisi sel bahan bakar, perangkat bahan bakar dan teras reaktor yang akan dijelaskan sebagai berikut ini.

Pemodelan satu unit kisi sel dan tabung pengarah penyusun perangkat bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 1. Material kisi sel bahan bakar tersusun dari bahan bakar UO_2 pengkayaan 3,21 wt%, 3,41wt% dan 3,59 wt% dengan kelongsong Zr-4 dan moderator H_2O . Pada moderator H_2O dilakukan penambahan larutan boron silikat (B_2O_3) dengan konsentrasi boron bervariasi untuk mencapai konfigurasi teras kritis. Untuk kondisi dingin (normal), suhu bahan bakar, kelongsong dan moderator adalah 300 K, sedangkan untuk kondisi panas (saat operasi) suhu masing-masing bahan bakar, kelongsong dan moderator berturut-turut 900 K, 600 K dan 600 K. Dalam model perhitungan, kisi sel bahan bakar dibagi menjadi 8 daerah yang terdiri dari 3 daerah bahan bakar, 1 daerah void berisi udara, 1 daerah kelongsong dan bagian terluar merupakan 3 daerah moderator. Kisi sel tabung pengarah terbuat dari material Zr-4 dimana bagian dalam dan luarnya berupa air ringan (H_2O) dengan konsentrasi boron bervariasi.



Gambar 1. Pemodelan kisi sel bahan bakar dan tabung pengarah



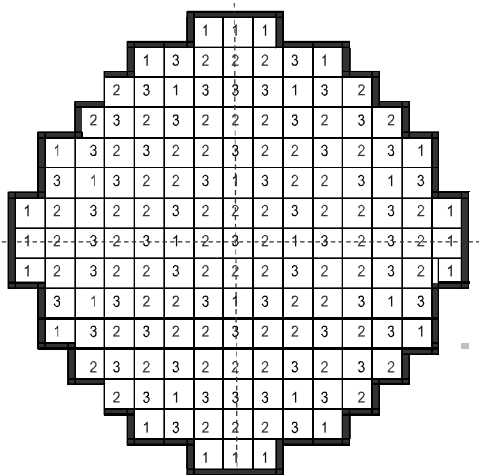
Gambar 2. Pemodelan 1/4 perangkat bahan bakar secara homogen

Tabel 1. Data teras PLTN PWR⁵⁾

Jenis	Parameter	Unit	Nilai
Teras reaktor	Daya panas	MW _e	930
	Tinggi aktif	m	3,66
	Diameter	m	3,37
	Jumlah perangkat	-	157
	Tekanan pendingin	psia	2250
	Suhu pendingin	K	600
	Densitas air	g/cm ³	0.7041
Bahan bakar	Material	-	UO ₂
	Pengkayaan	wt%	3,4
	Densitas	% TD	95
	Diameter pelet	mm	8,1915
	Jarak bahan bakar	mm	12,6
	Energi bakar akhir	GWd/t	31
	Rata-rata daya linier	kW/m	17,9
Kelongsong	Material	-	Zr-4
	Diameter luar	mm	9,5
	Ketebalan	mm	0,57
Perangkat bahan Bakar	Bentuk	-	17x17
	Jml. Batang bahan bakar	-	264
	Jml. tabung pengarah	-	24
	Jumlah tabung instrumen	-	1

Perangkat bahan bakar PWR tersusun dari 17x17 grid yang terdiri dari 264 batang bahan bakar dan 25 tabung pengarah. Tabung pengarah tersebut digunakan sebagai tempat alat instrumentasi atau batang kendali. Di dalam perhitungan, posisi tersebut digantikan oleh air dengan konsentrasi boron yang bervariasi untuk mencapai kritis. Konfigurasi teras dapat dilihat pada Gambar 3, dimana setiap bujur sangkar mewakili posisi sebuah perangkat bahan bakar. Bentuk perangkat bahan bakar PWR berupa persegi simetris 90° dengan ukuran 21,42 cm x 21,42 cm. Posisi pin rod setiap ¼ perangkat bahan bakar membentuk sudut simetris 45°. Pemodelan ¼ perangkat bahan bakar PWR secara homogen dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada Gambar 3, menunjukkan distribusi kelompok pengayaan perangkat bahan bakar di dalam teras reaktor PLTN-PWR. Jumlah total perangkat bahan bakar yang berada di dalam teras adalah 157 unit. Perangkat bahan bakar dibagi kedalam 3 kelas pengayaan yaitu pengayaan 1, 2 dan 3, masing-masing dengan jumlah 52, 52, dan 53 unit. Karena rata-rata fraksi bakar buang perangkat bahan bakar adalah 33 GWd/t, maka untuk teras reaktor PWR berbahan bakar UO₂ pengkayaan 3,21 wt%, 3,41 wt% dan 3,59 wt % tersebut, masing-masing kelas fraksi bakar perangkat bahan bakar diasumsikan mempunyai fraksi bakar awal sebesar 0 GWd/t, 10,333 GWd/t dan 20,667 GWd/t. Setiap siklus Selain bahan bakar, teras reaktor juga tersusun dari bejana reaktor, barrel reaktor, *reflector baffle* dan moderator. Perhitungan teras yang dilakukan dalam geometri 2 dimensi dan karena bentuk teras reaktor simetris maka model perhitungan dilakukan hanya 1/4 dari bagian yang ada.



Keterangan :

1,2,3 = Perangkat bahan bakar pengkayaan 1, pengkayaan 2, dan pengkayaan 3.

Gambar 3. Pemodelan 1/4 teras PLTN-PWR

METODE PERHITUNGAN

Program Komputer SCALE5.1 dikembangkan oleh ORNL yang tujuannya digunakan untuk perhitungan analisis kritikalitas reaktor dan deflesi bahan bakar. Program SCALE5.1 terdiri atas beberapa modul seperti; CSAS, SAS2H, NITAWL, BONAMI, CENTRM, ORIGEN-ARP dan KENO.

Perhitungan dengan menggunakan modul program NITAWL berdasarkan pada persamaan integral Nordheim. Program NITAWL menyelesaikan persamaan integral transport secara numerik dengan metode *collision probabilities* namun geometrinya sangat sederhana dan terbatas. Metode ini masih dapat digunakan dengan geometri kisi yang sederhana dengan memasukkan factor Dancoff pada probabilitas kebocoran neutron. Metode integral Nordheim menghasilkan pustaka tampang lintang yang akurat³⁾.

Program CENTRM (*Continuous Transport Module*) adalah perhitungan satu dimensi dengan menggunakan persamaan transport Boltzmann. Metode perhitungan ini menitik beratkan pada perhitungan fluks neutron angular yang sangat akurat dengan penyederhanaan model yang digunakan yaitu satuan unit sel. Kemudian dengan penggunaan pembobotan spektrum diperoleh konstanta tampang lintang multi group rerata. Pada umumnya data tampang lintang pustaka CENTRM pada beberapa kondisi temperatur diinterpolasi dengan metode *pointwise* untuk temperatur yang diinginkan. Sedangkan program KENO.V.a adalah perhitungan dengan menggunakan metode Monte Carlo transport. Diagram alir perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.

- Perhitungan k_{eff} teras PWR dengan KENO V.a
Alur perhitungan k_{eff} teras PLTN-PWR ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan perhitungan nilai reaktivitas lebih dilakukan tersendiri melalui persamaan berikut ini:

$$\rho = \frac{(k_{eff} - 1)}{k_{eff}} \times 100\%$$

Sebelum melakukan perhitungan k_{eff} tersebut, maka dilakukan perhitungan kisi sel bahan bakar dan tabung pengarah dengan paket program CSAS untuk mendapatkan tabel tampang lintang makroskopik detail 27 kelompok energi. Kemudian dilakukan perhitungan tampang lintang makroskopik perangkat bahan bakar dengan mengkonsdensasi 238 kelompok energi menjadi 27 kelompok energi menggunakan paket program SCALE5.1 modul BONAMI. Selanjutnya dilakukan perhitungan teras 2 dimensi dengan paket program SCALE5.1 modul KENO V.a untuk mendapatkan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Data pustaka tampang lintang yang digunakan

dalam perhitungan di atas adalah ENDF-B/5. Perhitungan reaktivitas lebih dilakukan terhadap kondisi teras PWR berikut ini: Teras reaktor dalam kondisi dingin dengan suhu moderator 300 K, konsentrasi boron tertentu. Teras reaktor dalam kondisi panas dengan suhu moderator 600 K, konsentrasi boron tertentu.

Perhitungan Depleksi

Perhitungan depleksi bahan bakar dilakukan dengan program SAS2H merupakan modul yang ada di sistem SCALE5.1 dan mempunyai 27 group pustaka derajat bakar. Program SAS2H adalah perhitungan 1-D dengan 2 jenis perhitungan spektrum (bagian 1 model sel, bagian 2 model perangkat bakar) pada waktu iradiasi tertentu untuk mendapatkan tampang lintang makroskopik fungsi derajat bakar berdasarkan desain dan parameter operasi tertentu. Tujuan perhitungan ini untuk memprediksi isotop hasil fisi yang terjadi pada setiap group bahan bakar sebagai fungsi parameter operasi. Perhitungan juga dilakukan untuk perangkat bakar yang berisi racun dapat bakar (BPR). SAS2H mempunyai kemampuan untuk menentukan komposisi isotop bahan bakar pada derajat bakar tertentu dengan komposisi bahan bakar, kelongsong dan moderator serta parameter desain batang bahan bakar seperti kisi dan level daya awal sudah diketahui. Pehitungan depleksi bahan bakar teras PWR pada konfigurasi kritis dilakukan berdasarkan *batch fuel*. Pada konfigurasi kritis dimodelkan terdapat 2 group batch 6, yaitu 1 group 6 B (perangkat yang berisi 16 klaster masing-masing mengandung 12 batang racun dapat bakar) dan 1 group 6 N (perangkat tanpa racun dapat bakar). Program SAS2H menghitung setiap perangkat sebagai perhitungan depleksi material bahan bakar secara individu. Susunan perangkat bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 2, sedangkan Tabel 3 densitas uranium pada perangkat baru.

Tabel 2. Group bahan bakar pada teras PWR

Group	Jumlah FA	Jumlah BPR	Rerata MWD/t	siklus	Pengkayaan (%)
4	12	-	24,986	2,3,5	3,21
5	20	-	29,255	3,4,5	3,41
6B	8	Depleksi	14,081	4,5	3,59
6N	49	-	15,101	4,5	3,59
7B	52	Fresh	0	5	3,59
7N	8	-	0	5	3,59
N2/5	8	depleksi	0	5	3,59

Tabel 3. Isotop uranium pada bahan bakar baru

Group FA	Densitas teori	U-234 (%)	U-235 (%)	U-236 (%)	U-238 (%)
4	94,55	0,027	3,21	0,015	96,746
5	94,58	0,029	3,41	0,016	96,545
6	94,58	0,031	3,59	0,017	96,363
7	94,89	0,031	3,59	0,017	96,352
N2/5	94,88	0,031	3,59	0,017	96,352

HASIL DAN PEMBAHASAN

• Reaktivitas Teras PWR

Gambar 5 menunjukkan perubahan reaktivitas lebih teras PWR selama satu siklus operasi. Dari gambar tersebut dapat dilihat pengurangan reaktivitas lebih teras PWR dibedakan menjadi 3 bagian yaitu reaktivitas lebih yang terjadi akibat perubahan suhu dari kondisi dingin ke panas (suhu operasi), reaktivitas lebih akibat terbentuknya racun Xe dan Sm, dan reaktivitas lebih akibat terjadinya pembakaran bahan bakar.

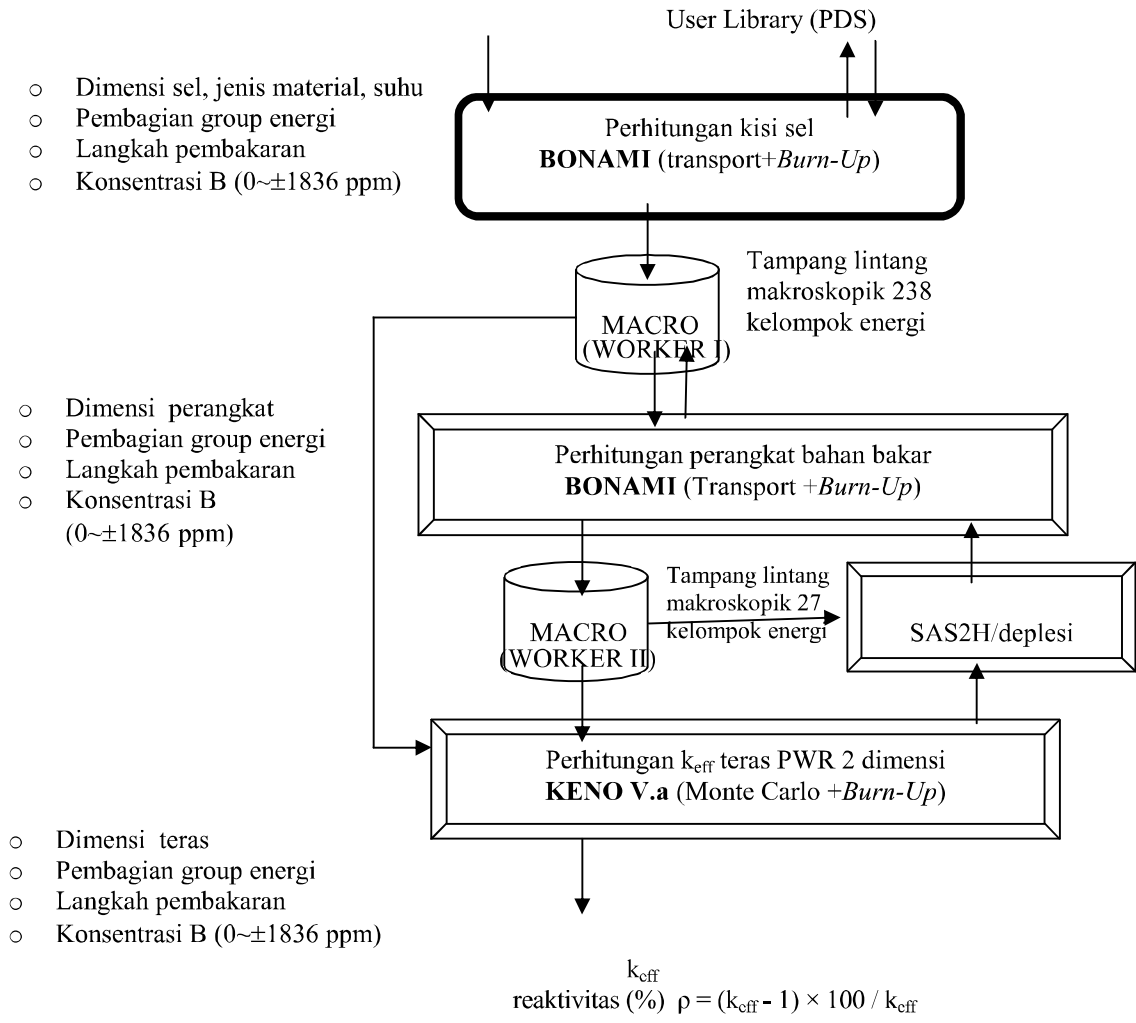
Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa nilai k_{eff} teras PWR pada kondisi dingin adalah 1,281 (21,9 % $\Delta k/k$), sedangkan nilai k_{eff} teras pada kondisi suhu operasi adalah 1,1865 (15,7 % $\Delta k/k$). Dengan demikian perubahan reaktivitas lebih dari kondisi dingin ke kondisi suhu operasi adalah 6,2 % $\Delta k/k$.

• Perubahan k_{eff} (reaktivitas lebih) terhadap konsentrasi boron

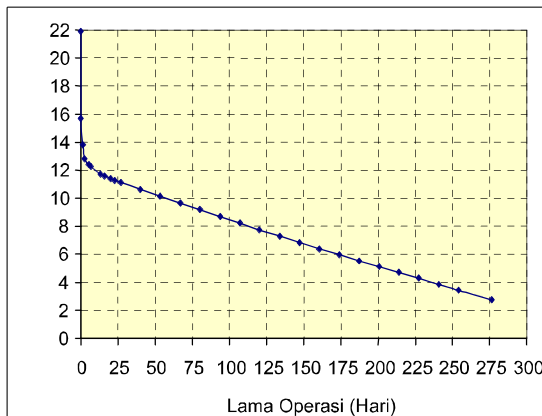
Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan nilai k_{eff} teras PWR pada beberapa kondisi diantaranya saat teras reaktor dingin (suhu moderator 300K) dengan konsentras boron divariasi sebesar 0 ppm - 1836 ppm..

• Perubahan konsentrasi boron terhadap fungsi waktu operasi

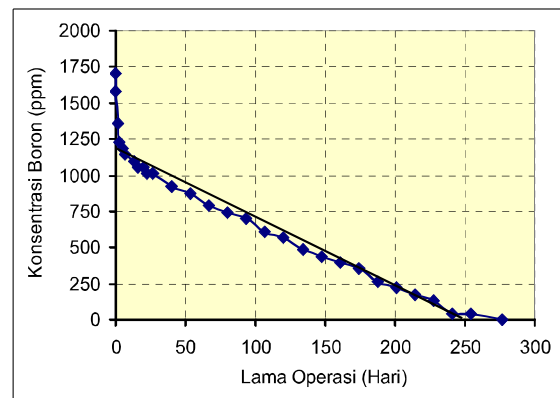
Gambar 6 menunjukkan perubahan konsentrasi boron terhadap lama operasi teras PWR. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa meskipun perubahan kondisi teras reaktor dari dingin ke panas mengakibatkan penurunan reaktivitas lebih sebesar 6,19 % $\Delta k/k$, tetapi perubahan konsentrasi boron hanya turun sebesar 75,2 ppm (=1700,3 ppm - 1625,1 ppm). Hal tersebut disebabkan perbedaan suhu yang mengakibatkan densitas moderator berbeda, sehingga meskipun nilai konsentrasi boron sama tetapi berat boron berbeda.



Gambar 4. Struktur sistem perhitungan dengan SCALE5. 1



Gambar 5. Perubahan reaktivitas lebih selama operasi reaktor dari BOC sampai EOC



Gambar 6. Perubahan konsentrasi boron terhadap waktu operasi reaktor

Tabel 2. Perubahan nilai k_{eff} atau reaktivitas lebih terhadap konsentrasi boron

Konsentrasi Boron (ppm)	k_{eff}	Reaktivitas (% $\Delta k/k$)	Konsentrasi Boron (ppm)	k_{eff}
0 (dingin)	1,280518	21,91	876,49	1,091134
0	1,186453	15,72	920,44	1,087187
43,72	1,173482	14,78	964,39	1,083277
87,44	1,168767	14,44	1008,36	1,079398
131,18	1,164094	14,10	1052,34	1,075556
174,93	1,159471	13,75	1096,33	1,07175
218,69	1,154888	13,41	1140,33	1,067596
262,47	1,150353	13,07	1184,35	1,06423
306,25	1,148590	12,94	1228,37	1,060522
350,05	1,141411	12,39	1272,41	1,056841
393,86	1,137000	12,05	1316,46	1,053194
437,67	1,132639	11,71	1360,52	1,04958
481,50	1,12831	11,37	1404,59	1,045996
525,35	1,124028	11,03	1448,67	1,042441
569,20	1,119782	10,70	1492,76	1,038916
613,06	1,115577	10,36	1536,87	1,035421
656,94	1,111409	10,02	1580,98	1,03548
700,83	1,107278	9,69	1631,07	1,031873
744,73	1,103189	9,35	1836,00	1,000300
788,64	1,098223	8,94		
832,56	1,095116	8,69		

Besarnya konsentrasi boron pada Gambar 6 didasarkan pada kesetaraan besarnya perubahan reaktivitas lebih yang ditimbulkan dengan selisih antara reaktivitas lebih pada waktu tertentu dikurangi reaktivitas lebih saat akhir siklus. Dapat dijelaskan bahwa konsentrasi boron saat awal siklus berubah secara drastis yaitu dari sekitar 1581 ppm menjadi 1228,37 ppm. Setelah operasi reaktor sekitar 3 hari ditunjukkan perubahan konsentrasi boron yang konstan.

Hasil Perhitungan Depleksi Bahan Bakar

Hasil perhitungan depleksi bahan bakar dengan menggunakan program SAS2H. Tampang lintang makroskopik dari BONAMI digunakan pada program SAS2H. Diperoleh bahwa hasil perhitungan SAS2H seperti Tabel 3 di bawah ini. Perhitungan ini jika dibandingkan dengan hasil perhitungan benchmark terdapat perbedaan rata-rata sekitar 3 %. Hal ini disebabkan oleh karena perbedaan pustaka tampang lintang mikroskopik yang digunakan berbeda, namun sejauh ini perhitung depleksi dengan SAS2H sesuai dibandingkan dengan perhitungan origen, karena menggunakan pustaka tampang lintang yang sama.

Tabel 3. Hasil perhitungan depleksi FA (Fuel Assembly) dengan SAS2H

Mode 1/8 teras	Group FA	Tampang lintang	Rerata fraksi bakar MWD/t		
			SAS2H	Origen.ARP	Benchmark
1	6	7	17,105	17,100	17,612
2	7	11	0	0	0
3	4	1	21,493	21,490	21,129
4	7	11	0	0	0
5	6	7	17,332	17,332	17,120
6	7	11	0	0	0
7	6	7	17,390	17,394	17,850
8	6	5	9,801	9,800	17,700
9	5	3	20,951	20,930	20,456
10	7	11	0	0	0
11	6	8	14,081	14,072	14,012
12	7	11	0	0	0
13	6	6	1,289	1,290	1,130
14	N2/5	9	0	0	0
15	5	4	30,615	30,612	30,730
16	6	7	17,158	17,156	17,056
17	7	11	0	0	0
18	6	7	15,802	15,800	15,546
19	7	11	0	0	0
20	6	7	16,831	16,831	16,320
21	6	7	15,852	15,850	15,459
22	7	11	0	0	0
23	7	10	0	0	0
24	5	4	32,048	32,048	32,300
25	6	6	12,139	12,130	12,021
26	4	2	26,732	26,730	26,435

KESIMPULAN

Perhitungan desain teras PWR konfigurasi kritis telah dilakukan dengan menggunakan paket program SCALE5.1. Perhitungan dilakukan terhadap beberapa kondisi teras reaktor yaitu pada awal siklus, kondisi dingin dan pada akhir siklus, kondisi panas. Hasil perhitungan menunjukkan kesesuaian dengan perhitungan benchmark karena menggunakan metode yang sama. Namun pada perhitungan depleksi bahan bakar terdapat perbedaan sekitar 3 %, hal ini disebabkan pustaka tampang lintang yang digunakan berbeda. Secara keseluruhan program SCALE5.1 dapat digunakan untuk analisis kritikalitas teras dan depleksi bahan bakar teras PWR.

DAFTAR PUSTAKA

1. TUKIRAN S., : Analisis Karakteristik Perangkat Bahan Bakar Maju Teras PWR , Prosiding PLTN, Solo, November 2009.
2. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer

Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols. I-III, Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-732, November 2006

3. DUDERSTADT, J.J and HAMILTON, L.J, " Nuclear Reactor Analysis " , John Wilay&Sons, New York, 1976.
4. LIEM PENG HONG, " Analisis Numerik, Komputasi dan Pemrograman Komputer pada Disain Neutronik Reaktor Nuklir, Diktat Kuliah, Jakarta , 1994.
5. WOOD, JAMES, Computational Methods in Reactor Shielding, Pergamon Press Ltd, New York, 1982.
6. LAMARSH, JOHN R. Nuclear Reactor Theory, Addison Wesley Publ. Co, Massachusetts, 1966

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

Apakah program SCALE 5.1?

(Suroso, PTRKN-BATAN):

Jawaban :

Kelebihan Scale 5.1 adalah code yang sudah terintegrasi dari beberapa modul seperti BONAMI, KENO, ORIGEN. Sehingga sekali hitung bisa beberapa parameter ditentukan. Scale 5.1 juga dapat menghitung geometri 3D yang sangat rumit. Pustaka tampak lintangnya terbaru.