

ANALISIS DAN PENGUJIAN INTERAKSI BATANG KENDALI RSG-GAS DALAM PENENTUAN REAKTIVITAS TERAS (TAHAP II)

Taswanda Taryo, Rokhmadi, T.M. Sembiring, Lily Suparlina

ABSTRAK

ANALISIS DAN PENGUJIAN INTERAKSI BATANG KENDALI RSG-GAS DALAM PENENTUAN REAKTIVITAS TERAS (TAHAP II). Mengingat bahwa reaktivitas teras merupakan salah satu besaran yang sangat penting dalam keselamatan Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS), maka litbang ini perlu dilakukan. Dalam penelitian ini dilakukan analisis perhitungan dengan memakai program komputer terpilih yaitu WIMSD4 untuk perhitungan generasi tampang lintang dan parameter-parameter lain serta CITATION untuk perhitungan reaktivitas teras RSG-GAS. Selain perhitungan dengan memakai program komputer akan dilakukan verifikasi dengan data dan informasi teras kerja RSG-GAS. Salah satu kasus dalam pengujian kedua program komputer yang disebutkan sebelumnya adalah perhitungan k_{eff} teras kerja RSG-GAS dalam keadaan semua batang kendali berada penuh di dalam dan semua batang kendali di luar teras RSG-GAS. Selain itu dilakukan pula perhitungan reaktivitas teras RSG-GAS dengan insersi seluruh elemen kendali masing-masing 40 cm, 30 cm, 20 cm dan 10 cm. Hasil yang ditunjukkan adalah bahwa k_{eff} dalam kondisi tersebut di atas berturut-turut adalah 1,1110, 1,0810, 1,0555 dan 1,0120.

ABSTRACT

CALCULATION OF THE RSG-GAS CORE USING COMPUTER CODE CITATION-3D. Since core reactivity is one of the reactor safety parameters, this R&D has been carried out. To carry out the R&D, the code called WIMSD4 was used respectively for generating cross section and diffusion parameters. The code CITATION was then applied to estimate core reactivity in the RSG-GAS core. To verify the results of the calculation, data and information of the RSG-GAS Typical Working Core were used. To prove the codes reliably to use, the case of all control elements down in the reactor core and that of all control rods up in the core were applied. Other than the above mention, cases taking into account insertion of all control rods with the insertion depth of 40 cm, 30 cm, 20 cm and 10 cm were applied. The results for cases of 40 cm, 30 cm, 20 cm and 10 cm insertion depth are respectively 1,1110, 1,0810, 1,0555 and 1,0120.

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) telah diresmikan oleh Presiden Soeharto pada tanggal 20 Agustus 1987. Setelah tanggal itu, dilakukan komisioning untuk teras pertama sampai dengan teras ke enam¹⁾. Disamping komisioning untuk teras 1 sampai dengan teras 6, banyak kegiatan yang

dilakukan di dalam teras RSG-GAS, diantaranya pemasangan *Xenon Loop*, Neutron Radiografi, Difraktometer Neutron dlsb²⁾. Pemasangan dan komisioning peralatan di dalam teras cukup memakan waktu yang lama, sehingga akhirnya RSG-GAS baru dapat mencapai daya 30 MW termal pada tanggal 30 Maret 1992.

Data umum reaktor RSG-GAS dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk mengetahui secara rinci karakteristik RSG-GAS diperlukan data dan informasi fisika reaktor diantaranya besaran reaktivitas teras untuk setiap teras. Salah satu besaran yang sangat berpengaruh dalam penentuan besarnya kesetimbangan teras yaitu besar reaktivitas dari seluruh batang kendali. Besar reaktivitas seluruh batang kendali diantaranya bergantung kepada interaksi masing-masing batang kendali. Agar hasil reaktivitas batang kendali total ketelitiannya dapat diandalkan, maka diperlukan litbang baik secara numerik dengan paket program maupun validasinya dengan data dan informasi eksperimen teras-teras transisi. Dengan litbang ini diharapkan dapat diperoleh hasil verifikasi numerik dan hasil validasi dengan eksperimen. Dalam litbang ini yang pertama dilakukan adalah disamping studi kelayakan dari program terpilih untuk perhitungan ini, juga ketersediaan program-program yang akan dipilih.

Dengan telah tersedianya paket program untuk perhitungan reaktivitas teras RSG-GAS, diantaranya program WIMSD4 1-D³⁾ untuk generasi tampang lintang dan parameter-parameter difusi neutron serta program CITATION 2/3 Dimensi⁴⁾ yang berada di dalam *main frame* BATAN untuk perhitungan difusi neutron banyak kelompok. Dalam penelitian tahun anggaran 1997/1998 telah dilakukan perhitungan reaktivitas lebih teras RSG-GAS pada kondisi semua batang kendali di dalam teras (*fully down*) dan di luar teras (*fully up*) RSG-GAS⁵⁾. Hasil yang didapat dari dua kejadian tersebut menunjukkan bahwa reaktivitas lebih teras RSG-GAS pada kondisi-kondisi tersebut di atas berturut-turut - 3,627 % dan 10,786 %. Dalam tahun ini 1998/1999, selain hal di atas juga

dilakukan analisis reaktivitas teras RSG-GAS dengan insersi seluruh batang kendali dengan kedalaman 10 cm, 20 cm, 30 cm dan 50 cm. Dalam kasus tersebut dihasilkan k_{eff} berturut-turut 1,1109194, 1,1109188, 1,0555011 and 0,9764037.

TEORI

Seperti sudah diketahui bahwa persamaan difusi banyak kelompok dapat diturunkan dari persamaan transport diferensial Boltzmann seperti di bawah ini⁶⁾.

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(r, \Omega, E)}{\partial t} = -\Omega \cdot \nabla \phi(r, \Omega, E) - \sum (E) \phi(r, \Omega, E) + \int_0^{\infty} \int_{4\pi} \sum (\Omega \rightarrow \Omega', E \rightarrow E') \phi(r, \Omega', E') d\Omega' dE' + S(r, \Omega, E) \quad (1)$$

Kondisi Awal : pada $t=0$, $\phi(r, E, \Omega) = \phi_0(r, E, \Omega)$

Kondisi Batas : $\phi(r_s, E, \Omega) = 0$, jika $\Omega \cdot e_s < 0$, seluruh r_s pada S .

dimana,

$\phi(r, \Omega, E)$ = jumlah neutron pada titik r dengan energi E bergerak dengan arah sekitar Ω dan Ω' adalah vektor.

Persamaan 1 sebelah kanan = bocoran dari elemen volume

Persamaan 2 sebelah kanan = kehilangan karena absorpsi dan hamburan ke arah lain

Persamaan 3 sebelah kanan = penambahan karena hamburan neutron dari interval energi dan arah lain.

Persamaan 4 sebelah kanan = produksi sumber neutron dari elemen volume.

Pada persamaan (1), dengan anggapan bahwa bidang neutron simetri secara rotasi sekitar sumbu distribusi dan bebas terhadap t dan E , maka persamaan transport (1) menjadi :

$$\Omega \cdot \nabla \varphi(r, \Omega) + \sum \varphi(r, \Omega) = \int_{\Omega'} \int_0^{\infty} (\Omega \rightarrow \Omega') \varphi(r, \Omega') dr d\Omega' + S(r, \Omega)$$

(2)

Lebih jauh lagi, dengan menganggap bidang simetri datar serta sumbu distribusi adalah sumbu x, maka persamaan (2) menjadi :

$$\cos \theta \frac{\partial \varphi(x, \Omega)}{\partial x} + \sum \varphi(x, \Omega) = \int_{\Omega'} (\Omega' \rightarrow \Omega) \varphi(x, \Omega') d\Omega' + \frac{1}{4\pi} S(x)$$

(3)

Di dalam material isotropik, tampang lintang hamburan, $\Sigma_s (\Omega' \rightarrow \Omega)$ dapat dikembangkan ke dalam satu serial polinomial Legendre dengan $\cos \theta = \Omega \cdot \Omega'$ serta memberikan :

$$\cos \theta \frac{\partial \varphi(x, \Omega)}{\partial x} + \sum \varphi(x, \Omega) = \frac{1}{2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \sum_{m=0}^l P_l(\cos \theta) P_l(\cos \theta) \int_0^{\pi} \varphi(x, \Omega') P_l(\cos \theta) \sin \theta d\theta + \frac{1}{4\pi} S(x)$$

(4)

dan dengan ekspansi $\varphi(x, \Omega)$ sampai dua tingkat polinomial Legendre, fluks $\varphi(x, \Omega)$ dapat ditulis

$$\varphi(x, \Omega) \cong \frac{1}{4\pi} \phi(x) + \frac{3}{4\pi} J(x) \cos \theta \quad (5)$$

dimana,

ϕ = jumlah neutron yang berpenetrasi

di dalam bola dengan $r = 1/\pi^{0.5}$ setiap detik dari seluruh sisi

dan

biasa disebut fluks neutron, besaran skalar yang dicapai dengan penjumlahan besaran

dari

reaktor meliputi seluruh arah.

J = kerapatan arus neutron, besaran

Vektor yang dicapai dengan

penjumlahan vektor fluks

meliputi

seluruh sudut.

Dengan gabungan persamaan (5), (4) dan memasukkannya ke dalam persamaan (3) serta mengintegrasikan

sekali seluruh $d\Omega$ dan sekali meliputi $\cos \theta d\Omega$ akan didapat :

$$\frac{dJ}{dx} + \sum_a \phi = S(x) \quad (6)$$

dan

$$\frac{1}{3} \frac{dJ}{dx} + (\sum_t - \sum_{s1}) J = 0 \quad (7)$$

Dari persamaan (7), hukum difusi Fick dapat dicapai :

$$J = \frac{1}{3[\sum_s(1 - \cos \theta) + \sum_a]} \frac{d\phi}{dx} = -D \frac{d\phi}{dx} \quad (8)$$

dimana $D(\text{cm})$ disebut sebagai koefisien difusi.

Dengan menggabungkan persamaan (8) dan (5) akan menghasilkan persamaan dasar difusi neutron :

$$D \frac{d^2 \phi}{dx^2} - \sum_a \phi(x) + S(x) = 0 \quad (9)$$

Pendekatan yang paling berguna untuk menampilkan analisis neutron adalah persamaan difusi neutron. Perhitungan difusi dengan komputer lebih murah dibandingkan dengan penyelesaian menggunakan persamaan transport karena teori difusi mengurangi jumlah maksimum tujuh variabel bebas menjadi lima, yaitu tiga variabel ruang, satu variabel energi dan satu variabel waktu⁶⁾.

Mengingat teori difusi dengan segala keterbatasannya lebih banyak diinginkan daripada teori transport yang mahal, banyak koreksi yang timbul dari teori transport digunakan dalam penyelesaian teori difusi. Dengan koreksi-koreksi yang benar, teori difusi masih dapat diterima untuk digunakan untuk analisis masalah-masalah reaktor skala besar. Dengan demikian, sebuah paket komputer umum selayaknya mempunyai pilihan-pilihan yang dapat memasukkan koreksi-koreksi tersebut.

Perhitungan distribusi daya, faktor perlipatan dan yang lainnya dapat dicapai dengan penyelesaian persamaan difusi banyak kelompok yang merupakan penyederhanaan dari teori transport ⁶⁾. Persamaan difusi yang telah disebutkan sebelumnya diberikan oleh persamaan di bawah ini.

$$-\nabla \cdot D^g \nabla \phi^g(r) + \sum_l (r) \rho^l(r) = \sum_{g'=1}^G \Sigma_{tr,g'}^g(r) \phi^{g'}(r) + \sum_{g'=1}^G \chi_{g'}^g \sum_l (r) \rho^l(r) \quad (10)$$

$g = 1, 2, \dots, G,$

dimana,

- G = jumlah kelompok energi,
- g = indeks kelompok ,
- r = posisi,
- ϕ_g = fluks neutron kelompok g,
- D^g = konstanta difusi kelompok $g (= 1/3 \sum_{tr,g})$,
- Σ_{tr}^g = tampang lintang dari kelompok g,
- $\nu \Sigma_f^g$ = tampang lintang sumber fisi dari kelompok g,
- Σ_t^g = tampang lintang total untuk kelompok g,
 $= \Sigma_{a,g} + \Sigma_{g' \neq 1}^g = \Sigma_{s \rightarrow g'}$,
- Σ_a^g = tampang lintang serapan untuk kelompok g,
- $\Sigma_{s \rightarrow g'}$ = tampang lintang hamburan dari kelompok g' ke g,
- χ_g = fraksi sumber fisi di dalam kelompok g,
- k_{eff} = konstanta perlipatan efektif.

Persamaan-persamaan di atas diselesaikan dengan menggunakan

metoda beda hingga dengan membuat variabel ruang serta dengan menggunakan teknik terasi dan dalam akhirnya dapat menyelesaikan nilai eigen k_{eff} dan fluks neutron banyak kelompok $\phi^g(r)$.

Perlu untuk diingat bahwa ada empat pendekatan persamaan difusi terhadap persamaan teori transport , yaitu:

- a. fluks angular dapat dinyatakan hanya dengan satu kebergantungan angular anisotropik linear
- b. pendekatan satu kelompok
- c. sumber isotropik.
- d. perubahan kerapatan arus neutron yang lambat terhadap waktu dibandingkan dengan waktu hamburan rata-rata

$$\phi(r, \Omega, t) \cong \frac{1}{4\pi} \phi(r, t) + \frac{3}{4\pi} J(r, t) \Omega \quad (11)$$

(fluks angular tidak begitu bergantung kepada sudut, dengan demikian pendekatan difusi cukup sah).

$$\frac{1}{|J|} \frac{\partial |J|}{\partial t} \ll \langle \nu \Sigma_t \rangle \quad (12)$$

dengan demikian, kerapatan arus terhadap waktu jauh lebih lambat dibandingkan dengan frekuensi hamburan $\nu \Sigma_t$, yang biasanya dalam orde 10^{-5} det^{-1} atau lebih ⁶⁾.

Tabel 1 Data Desain Utama Reaktor RSG-GAS.

Umum	
Tipe Reaktor	Tipe kolam
Tipe Elemen Bakar	LEU Oksida
Sistem Pendingin	MTR, konveksi paksa, aliran ke bawah
Moderator/pendingin	Air ringan (H ₂ O)
Reflektor	Be dan H ₂ O
Daya Nominal (MWt)	30
Karakteristik Teras	
Jumlah elemen bakar	40
Jumlah elemen kontrol	8
Jumlah Penyerap tipe garpu (pasang)	8
Panjang Siklus Nominal (daya hari penuh)	25
Rerata <i>Burn-up</i> pada <i>BOC</i> (% loss dari U-235)	,3
Rerata <i>Burn-up</i> pada <i>EOC</i> (% loss dari U-235)	,3
Rerata <i>Burn-up</i> Pemakaian pada <i>EOC</i> (% loss dari U-235)	53,7
Elemen Bakar/Kontrol	
Dimensi elemen bakar/kontrol (mm)	77,1x81x600
Ketebalan pelat elemen (mm)	1,3
Lebar kanal pendingin (mm)	2,55
Jumlah pelat per elemen bakar	21
Jumlah pelat per elemen kontrol	15
Material <i>cladding</i> pelat elemen	AlMg ₂
Ketebalan <i>cladding</i> pelat elemen (mm)	0,38
Dimensi daging bahan bakar (mm)	0,54x62,75x600
Material elemen daging	U ₃ O ₈ Al
Pengayaan U-235 (%)	19,75
Kerapatan uranium dalam daging (g cm ⁻³)	2,96
Muatan U-235 per elemen bakar (g)	250
Muatan U-235 per elemen kontrol (g)	178,60
Material penyerap	Ag-In-Cd
Ketebalan penyerap (mm)	3,38
Material <i>cladding</i> penyerap	SS-321
Ketebalan material penyerap (mm)	0,85
Harga Reaktivitas (%)	
Reaktivitas lebih pada <i>BOC</i> dingin, tanpa xenon	9,2
Cadangan reaktivitas untuk eksperimen gerak	2,0
Reaktivitas lebih untuk elemen kontrol (8)	-14,5
Reaktivitas <i>shut-down</i> pada <i>BOC</i> , dingin, tanpa xenon, (8 elemen kontrol seluruhnya dimasukkan)	-5,3
Reaktivitas <i>shut-down</i> pada <i>BOC</i> , dingin, tanpa xenon, <i>stuck rod</i> (7 elemen kontrol seluruhnya dimasukkan)	-2,2
Rate maksimum reaktivitas insersi terkontrol (termasuk 15% batas keselamatan) (ΔP s ⁻¹)	2,8x10 ⁻⁴

Deskripsi Singkat Program Komputer CITATION 2D/3D.

Satu code yang cukup terkenal yaitu CITATION telah digunakan untuk menghitung faktor pelipatan teras reaktor, distribusi daya, dan terutama sekali distribusi fluks disekitar elemen kontrol.

Paket program CITATION dikembangkan oleh ORNL ⁴⁾ dapat menghitung masalah dua dan tiga dimensi di dalam teras reaktor. Teras reaktor dapat dibagi dalam tiga daerah, yaitu teras, reflektor dan air. Paket tersebut telah diuji dengan menggunakan *benchmarking IAEA* dengan tujuan untuk menguji hasil-hasil paket program WIMSD4.

Simulasi teras RSG-GAS terdiri dari daerah (daerah-daerah) dimana setiap material di dalam setiap daerah dianggap *uniform*. Seluruh tampang lintang yang didapat dari WIMSD4 tetap di dalam satu daerah; di dalam satu daerah, hanya fluks dan sumber neutron total yang bergantung ruang.

Persamaan-persamaan difusi neutron dipecahkan secara numerik untuk seluruh teras reaktor (teras, reflektor dan daerah di atas jarak ekstrapolasi linear) dengan menggunakan kondisi batas dan antar-muka yang tepat.

Persamaan difusi diganti oleh satu pendekatan ekuivalen beda hingga, dimana hal tersebut dicapai dengan penempatan pada setiap daerah sejumlah interval *mesh* yang sama dan melakukan pendekatan terhadap persamaan turunan/diferensial dengan analogi beda hingga pada seluruh titik-titik *mesh* yang ada. Interval *mesh* tetap dalam suatu daerah, tetapi bisa jadi bervariasi dari suatu daerah ke daerah yang lain. Interval *mesh* dipilih sedemikian kecil sehingga fluks

menjadi linear pada titik-titik *mesh* yang berdekatan ⁷⁾.

Dengan menggunakan persamaan turunan pertama dan kedua untuk fluks setiap titik *mesh*, maka setiap kelompok persamaan diferensial dapat diganti dengan N persamaan aljabar. Dengan menggunakan relasi tiga titik untuk fluks di dalam kelompok untuk perhitungan satu dimensi, sebuah persamaan yang dicapai dapat berlaku untuk seluruh titik kecuali pada bagian-bidang antar-muka. Seluruh persamaan akan mempunyai tiga fluks yang tidak diketahui, dimana dua daripadanya sangat umum di dalam setiap dua persamaan yang berdekatan. Nilai tunggal dapat dihitung dari kondisi batas pada batas rata-rata dan luar dari perangkat (*assembly*). Didalam kasus perhitungan dua dimensi seperti dengan CITATION, digunakan lima persamaan yang berbeda. Kemudian perhitungan 3 dimensi dengan menggunakan paket program yang sama dapat dikembangkan.

Dalam pelaksanaan perhitungan, pertama kali pengguna perlu untuk menebak harga distribusi sumber S, yang kemudian S tersebut dinormalisasikan dan diatur pada setiap titik *mesh*. Hal ini dimaksudkan untuk melakukan iterasi pertama. Dengan distribusi sumber S ini, persamaan beda hingga dapat dipecahkan untuk kelompok 1 sampai dengan kelompok 4. Setelah seluruh fluks untuk semua kelompok dihitung, satu distribusi sumber baru dihitung dari distribusi fluks yang didapatkan sebelumnya. Distribusi sumber ini digunakan untuk iterasi berikutnya, dan prosedur ini biasanya disebut iterasi luar. Metode ini dilakukan berulang-ulang sampai kriteria konvergensi tercapai, misalnya, untuk k_{eff} , $e_1 \approx 10^{-5}$ dan untuk fluks, $e_2 \approx 10^{-4}$.

TATA KERJA

Sebelum menghitung k_{eff} yang sekaligus dapat menghitung reaktivitas teras RSG-GAS, diperlukan urutan perhitungan, yaitu, perhitungan homogenisasi dan pemodelan sel, perhitungan dimensi dan komposisi sel dan perhitungan teras⁸⁾.

Untuk menghitung sel, telah digunakan program komputer WIMSD4 satu dimensi. Dengan program ini, diperlukan pemodelan elemen bakar dan kendali RSG-GAS. Dalam hal ini, elemen bakar dan kendali RSG-GAS dipandang sebagai *multiplate*, yang tersusun dari bagian daging, kelongsong, moderator dan *extra region*. WIMSD4 1-D dapat digunakan untuk menghitung sel untuk seluruh material di dalam teras seperti daging dengan fraksi bakar tertentu, reflektor Beryllium dan juga udara didalam teras. Pemodelan elemen bakar dan kendali RSG-GAS dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2. Pustaka WIMSD4 mempunyai 69 kelompok energi, yang kemudian dalam perhitungan menjadi 4 kelompok energi.

Dimulai dengan spesifikasi material dan geometri, tampang lintang makroskopik dihitung dengan menggunakan pustaka tampang lintang dan jumlah kerapatan sampai komposisi elemen bakar sebagai fungsi fraksi bakar elemen bakar di dalam MWD/THM. Keluaran dari perhitungan ini adalah tabel data di dalam 4 kelompok energi pada berbagai ragam fraksi bakar. Di dalam WIMSD4, ada tiga aspek penting yang dilakukan oleh program, yaitu, perhitungan resonansi, prosedur kondensasi dan perhitungan kebocoran.

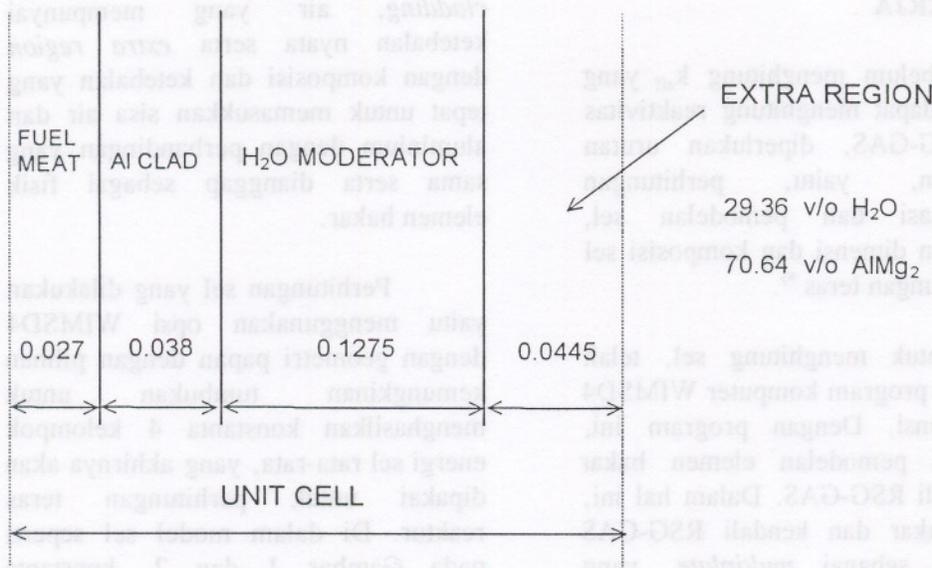
Unit sel yang digunakan dalam perhitungan ini terdiri dari daging,

cladding, air yang mempunyai ketebalan nyata serta *extra region* dengan komposisi dan ketebalan yang tepat untuk memasukkan sisa air dan aluminium dengan perbandingan yang sama serta dianggap sebagai fisik elemen bakar.

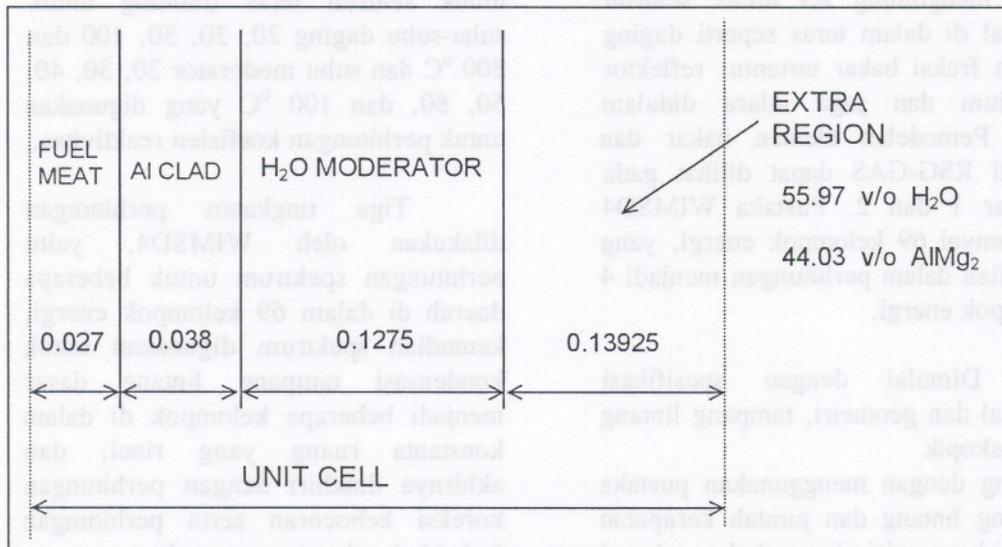
Perhitungan sel yang dilakukan yaitu menggunakan opsi WIMSD4 dengan geometri papan dengan pilihan kemungkinan tumbukan untuk menghasilkan konstanta 4 kelompok energi sel rata-rata, yang akhirnya akan dipakai untuk perhitungan teras reaktor. Di dalam model sel seperti pada Gambar 1 dan 2, konstanta kondensasi dihitung dengan konstanta 69 kelompok energi untuk daerah daging. Konstanta 4 kelompok energi untuk seluruh teras dihitung untuk suhu-suhu daging 20, 30, 50, 100 dan 200 °C dan suhu moderator 20, 30, 40, 60, 80, dan 100 °C yang digunakan untuk perhitungan koefisien reaktivitas.

Tiga tingkatan perhitungan dilakukan oleh WIMSD4, yaitu perhitungan spektrum untuk beberapa daerah di dalam 69 kelompok energi, kemudian spektrum digunakan untuk kondensasi tampang lintang dasar menjadi beberapa kelompok di dalam konstanta ruang yang rinci, dan akhirnya diakhiri dengan perhitungan koreksi kebocoran serta perhitungan fraksi bakar bergantung waktu.

Untuk perhitungan seluruh teras, program difusi 3 dimensi CITATION telah digunakan. Perhitungan dilakukan dengan geometri x-y-z yang terdiri dari 4x4 mesh per perangkat dimana masukan diambil untuk suatu teras kerja RSG-GAS tertentu. Dengan program ini, maka akan didapat harga k_{eff} , distribusi fluks dan daya, koefisien suhu dan reaktivitas batang kendali.



Gambar 1. Model Sel untuk Elemen Standard (cm) ⁸⁾



Gambar 2. Model Sel untuk Elemen Kontrol (cm) ⁸⁾

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian tahap kedua ini, telah dilakukan perhitungan-perhitungan yang berkaitan dengan keadaan sebagai berikut :

1. Keadaan dimana seluruh batang kendali berada di atas teras reaktor (*all rods up case*)
2. Keadaan dimana dilakukan insersi seluruh batang kendali ke dalam

teras, yaitu dengan memasukkan elemen kontrol sedalam 40 cm, 30 cm, 20 cm, dan 10 cm.

3. Keadaan teras reaktor dimana seluruh batang kendali berada di dalam teras reaktor (*all rod down case*).

Hasil lengkap perhitungan reaktivitas reaktor RSG-GAS pada kondisi-kondisi tersebut di atas dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan K_{eff} dengan CITATION 3D

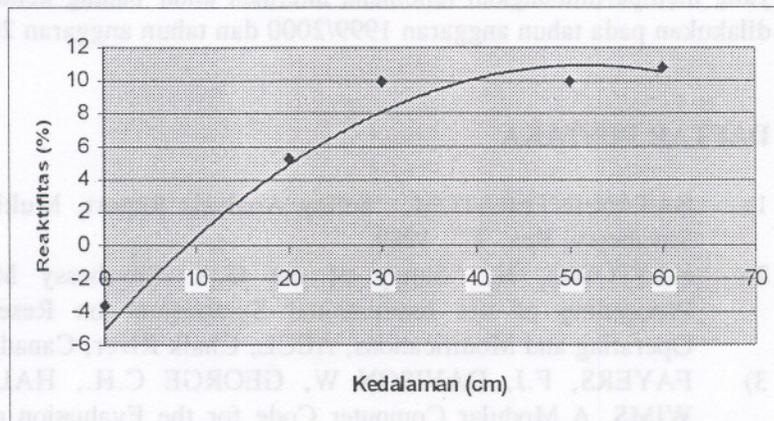
No.	Kondisi	Program CITATION 3D (HP)	Hasil Eksperimen (HE) ^{a)}	Perbedaan (%)
1.	Seluruh Batang Kendali di luar Teras			
	a. K_{eff} b. Reaktivitas Lebih Teras (P)	1,1209 10,786 %	9,608 %	10,9 %
2.	Inseri seluruh elemen kendali 40 cm			
	a. K_{eff} b. Reaktivitas Lebih Teras (P)	1,1110 9,984 %	9,446 %	5,4 %
3.	Inseri seluruh elemen kendali 30 cm			
	a. K_{eff} b. Reaktivitas Lebih Teras (P)	1,0810 8,200 %	8,070 %	1,6 %
4.	Inseri seluruh elemen kendali 20 cm			
	a. K_{eff} b. Reaktivitas Lebih Teras (P)	1,0555 5,258 %	4,781 %	9,1 %
5.	Inseri seluruh elemen kendali 10 cm			
	a. K_{eff} b. Reaktivitas Lebih Teras (P)	1,0120 1,189 %	1,810 %	52,0 %
6.	Seluruh Batang Kendali di dalam Teras			
	a. K_{eff} b. Reaktivitas Lebih Teras (P)	0,9650 -3,627 %	-4,665 %	28,6 %

Catatan : $P = (K_{eff}-1) / K_{eff}$; % Perbedaan = Abs. [{ (HP - HE) } / HP x 100 %.]

^{a)} - Hasil Eksperimen Teras 30 RSG-GAS.

Apabila hasil di atas digambarkan di dalam suatu grafik seperti pada Gambar 3, dimana sumbu x menunjukkan posisi dari seluruh elemen kendali secara bersamaan berada di dalam teras RSG-GAS, sedangkan sumbu y menunjukkan harga reaktivitas lebih teras RSG-GAS.

Seperti halnya reaktor nuklir yang lain, dapat disimpulkan bahwa reaktivitas teras RSG-GAS apabila seluruh batang kendali berada di atas teras haruslah positif, artinya bahwa teras mempunyai reaktivitas lebih yang cukup.



Gambar 3. Grafik reaktivitas lebih teras RSG-GAS dengan kedalaman batang kendali

Demikian halnya dengan reaktivitas teras RSG-GAS apabila seluruh batang kendali berada di dalam teras RSG-GAS. Dengan harga reaktivitas teras -3,627%, maka dapat dijamin bahwa dalam keadaan di atas teras RSG-GAS dalam keadaan sub kritis.

Dibandingkan dengan hasil eksperimen, ternyata hasil perhitungan berbeda. Hal ini dikarenakan kenyataan di lapangan tidak sama persis dengan simulasi dengan menggunakan code komputer. Sebagai contoh bahwa posisi bank semua elemen kontrol pada

eksperimen selalu berada posisi insersi 250 cm, sedangkan dalam perhitungan tergantung kepada kedalaman insersi elemen kontrol itu sendiri.

Hal lain yang dapat diungkapkan adalah bahwa dari Gambar 3 di atas tersebut dapat dianalisis bahwa kondisi kritis pada suatu daya tertentu dapat dicapai apabila posisi ujung bawah seluruh elemen kendali masing-masing berada pada kedalaman sekitar 47 cm dari dasar teras RSG-GAS.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam uraian pada bagian sebelumnya bahwa :

1. Dalam kasus seluruh batang kendali di luar teras RSG-GAS (*fully-up*) dengan CITATION 3-D telah dihasilkan harga bahwa reaktivitas lebih teras RSG-GAS adalah 10,786 %.
2. Dalam kasus seluruh batang kendali berada di dalam teras RSG-GAS (*fully-down*) dengan menggunakan CITATION 3-D didapat reaktivitas lebih teras RSG-GAS adalah -3,627%.
3. Dalam perhitungan reaktivitas lebih teras RSG-GAS dengan insersi seluruh elemen kendali berturut-turut 10 cm, 20 cm, 30 cm dan 50 cm adalah 9,984%, 9,983 %, 5,258 % dan -2,417%.
4. Perbedaan hasil perhitungan dengan Code CITATION 3D dengan hasil eksperimen disebabkan keadaan di lapangan tidak sama dengan keadaan simulasi pada perhitungan.

Untuk perhitungan interaksi antar batang kendali, maka disarankan bahwa dalam program yang ada, yaitu CITATION 3D, harus dilengkapi dengan suatu sub program yang mempertimbangkan fenomena interaksi antar batang kendali. Penelitian ini akan dilakukan pada tahun anggaran 1999/2000 dan tahun anggaran 2000/2001.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) BATAN-INTERATOM, "Safety Analysis Report, Multipurpose Reactor G.A. Siwabessy, Rev. 7 ", 1989.
- 2) HASTOWO, H, "Safety of the G.A. Siwabessy Multipurpose Reactor", Proceeding of the International Symposium on Research Reactors Safety, Operating and Modifications, AECL, Chalk River, Canada, 1989.
- 3) FAYERS, F.J, DAVISON W, GEORGE C.H., HALSALL, M.J, " LWR WIMS. A Modular Computer Code for the Evaluation of Light Water Reactor Lattices, Part I, Description of Methods ", AEEW.R 785, 1972.

- 4) FOWLER, T.B., VONDY, D.R. AND CUNNINGHAM, G.W., "Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION", ORNL-TM-2496, Revision 2, ORNL and Union Carbide Corporation, 1971.
- 5) Prosiding Hasil Penelitian PRSG Tahun 1997/1998, ISSN 0854-5178
- 6) DUDERSTADT, J.J., Nuclear Reactor Analysis, The University of Michigan, John Wisley & Son, 1976.
- 7) STACEY, JR., W.M., "Space Time Nuclear Reactor Kinetics", Academic Press, New York, 1969.
- 8) ARBIE, B., "Oxide to Silicide Fuel Conversion Study for Multipurpose Reactor G.A. Siwabessy", Ph.D Thesis, University of Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 1996.

DISKUSI

Pertanyaan (Saiful Sujalmo)

Bagaimana bentuk persamaan (teoritis) yang mendapatkan kurva cembung pada penurunan reaktivitas akibat insersi batang kendali pengatur ?

Jawaban (Taswanda Taryo)

Persamaan teoritisnya eksponensial

Pertanyaan (Suryawati)

Hasil perhitungan (menggunakan CITATION ?) $\rho_{TWC} = 10,786$ sedangkan ρ kondisi fully down (kondisi sub kritis) = -3.627 apakah nilai ini sudah dievaluasi dengan nilai SAR dan seberapa besar % perbedaannya ? serta kondisi parameter teras (untuk inputan perhitungan) seperti daya, susunan core (teras) mohon dijelaskan.

Jawaban (Taswanda Taryo)

1. Dibawah 3%
2. Susunan teras adalah TWC (Typical Working Core)

Pertanyaan (Uju Jujuratisbela)

Makalah ini nampaknya tidak jauh berbeda dengan makalah Laporan penelitian 1997/1998.

1. Tolong dijelaskan kemajuan penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian I tahun yang lalu (1997/1998).
2. Tolong hasil perhitungan dibandingkan dengan data desain RSG-GAS (Perhitungan Interatom) sebagai bahan kelengkapan dalam pembahasan.

Jawaban (Taswanda Taryo)

1. Tahun 1997/1998 hasil perhitungan kondisi batang kendali fully up dan fully down.
Tahun 1998/1999 di tambah perhiytungan kondisi insersi batang kendali 10 cm, 20 cm, 30 cm dan 50 cm.

2. Setuju

Pertanyaan (Unggul Hartoyo)

1. Tadi dikatakan, bahwa program tersebut, layak atau tidak di gunakan, layak atau tidaknya hasil tersebut, berdasarkan apa (referensi acuan) ?
2. Berapa batasan hasil tersebut dikatakan layak ?

Jawaban (Taswanda Taryo)

1. Acuan adalah hasil perhitungan dengan code lain yang selaras. Desain Interatom, code BATAN-3DIFF.
2. Perbedaan hasil code CITATION dan BATAN-3DIFF berbeda pada desimal 1/10000.