

INVESTIGASI KEAKURATAN METODE PERHITUNGAN REAKTIVITAS BATANG KENDALI REAKTOR RSG-GAS DIBANDINGKAN DENGAN HASIL PENGUKURAN

THE INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF THE REACTIVITY CALCULATING METHOD OF THE RSG-GAS REACTOR'S CONTROL ROD WHICH COMPARED BY THE MEASUREMENT RESULT

Jaja Sukmana, M. Imron, M. Gading Permadi, Nur Faturohmi
PRSG-BATAN, Kaw Puspiptek Ged 31, Setu, Tangerang Selatan, Banten. 15310
jajasukmana20@gmail.com

Diterima 1 Juni 2020, diterima dalam bentuk perbaikan 9 Juli 2020, disetujui 26 Juli 2020

ABSTRAK

INVESTIGASI KEAKURATAN METODE PERHITUNGAN REAKTIVITAS BATANG KENDALI REAKTOR RSG-GAS DIBANDINGKAN DENGAN HASIL PENGUKURAN. Nilai reaktivitas batang kendali harus diprediksi secara akurat sebagai bagian terpenting dari fitur keselamatan teknis di reaktor RSG-GAS. Hasil inspeksi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan (87,31%) antara nilai reaktivitas batang kendali dari hasil eksperimen dengan hasil perhitungan menggunakan code BATAN-FUEL. Investigasi ini bertujuan untuk mendapatkan metode yang tepat dalam perhitungan reaktivitas batang kendali di reaktor RSG-GAS. Metodologi yang digunakan adalah melalui perhitungan ulang menggunakan BATAN-2DIFF/3DIFF code, Serpent-2 code, MCNP6 code, dan membandingkan terhadap hasil eksperimen serta melakukan evaluasi untuk pemilihan code yang tepat. Hasil nilai error antara perhitungan dengan eksperimen dari BATAN-2DIFF dengan seluruh batang kendali di bawah-satu batang dinaikan, terendah dan tertinggi adalah 18,65% di F-5 T-89 dan 80,59% di E-9 T-80 sedangkan dengan seluruh batang kendali di atas, adalah 1,96% di C-8 T-83 dan 35,22% di G-6 T-89. Hasil BATAN-3DIFF dengan seluruh batang kendali di atas adalah 0,07% di F-8 T-90 dan 18,88% di F-5 T-89. Hasil Serpent-2 dengan seluruh batang kendali di atas adalah 20,67% di C-8 dan 38,74% di G-6. Dan hasil MCNP6 dengan seluruh batang kendali di atas adalah 3,48% di B-7 dan 60,81% di F-5. Parameter beta efektif, efek shadowing, umur penyerap, nilai fraksi bakar, dan perubahan manajemen bahan bakar dapat menjadi bahan evaluasi pada parameter neutronik. Dengan investigasi ini, metode perhitungan reaktivitas batang kendali reaktor RSG-GAS direkomendasikan menggunakan BATAN-3DIFF.

Kata Kunci: reaktivitas batang kendali, investigasi, BATAN-3DIFF code, MCNP code:

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF THE REACTIVITY CALCULATING METHOD OF THE RSG-GAS REACTOR'S CONTROL ROD WHICH COMPARED BY THE MEASUREMENT RESULT. *The reactivity balance of control rod must be accurately predicted as the most important part of the technical safety features in the RSG-GAS reactor. The results of the inspection showed that there is a significant difference (87.31%) between the reactivity balance of the control rod of the experimental results with the results of calculations using the BATAN-FUEL code. This investigation aims to obtain an appropriate method in calculating the reactivity of control rods in the RSG-GAS reactor. The methodology used is through re-calculation using BATAN-2DIFF / 3DIFF code, Serpent-2 code, MCNP6 code, and comparing the results of experiments and evaluating for the selection of the right code. The results of the error value between calculations and experiments from BATAN-2DIFF with all control rods down-one up, the lowest and highest are 18.65% at F-5 T-89 and 80.59% at E-9 T-80 while with all control rods up, is 1.96% at C-8 T-83 and 35.22% at G-6 T-89. The results of BATAN-3DIFF with all the control rods up were 0.07% at F-8 T-90 and 18.88% at F-5 T-89. The results of Serpent-2 with all the control rods up were 20.67% in C-8 and 38.74% in G-6. And the results of MCNP6 with all the control rods up were 3.48% in B-7 and 60.81% in F-5. Effective beta parameters, shadowing effects, age of absorber, burn up fuels, and changes in core management can be evaluated for the neutronic of calculation parameters. With this investigation, the method for calculating reactivity of RSG-GAS reactor control rods is recommended to use BATAN-3DIFF.*

Keywords: reactivity worth, investigation, BATAN-3DIFF code, MCNP code.

PENDAHULUAN

Pada pengoperasian reaktor nuklir, sistem batang kendali memainkan peranan yang sangat penting karena didesain untuk mengendalikan reaktivitas teras dan memadamkan operasi reaktor (*shutdown*). Nilai reaktivitas batang kendali harus diprediksi secara akurat melalui eksperimen dan perhitungan sebagai bagian terpenting dari fitur keselamatan teknis di reaktor RSG-GAS.

Namun merujuk dari hasil diskusi pada kegiatan inspeksi keselamatan yang dituangkan pada laporan hasil evaluasi (LHE) Bapeten No.492/LHE/PIBN/L18, tanggal 22 Juli 2019 terhadap laporan Penilaian Keselamatan Berkala (PKB) reaktor RSG-GAS[1], bahwa terdapat adanya perbedaan yang signifikan besar antara nilai reaktivitas batang kendali dari hasil eksperimen dengan nilai reaktivitas batang kendali hasil perhitungan yang menggunakan code BATAN-FUEL, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Selisih hasil perhitungan dengan hasil eksperimen dinyatakan sebagai berikut, diantaranya yaitu pada posisi kisi E-9 sebesar 85,73% dan pada posisi B-7 sebesar 87,31%. Dari hasil diskusi pada kegiatan inspeksi Bapeten bulan Februari 2019 tersebut, diharapkan untuk diupayakan adanya kesesuaian antara hasil perhitungan dan pengukuran reaktivitas batang kendali pada deviasi maksimum 5%.

Tabel 1. Nilai perbedaan reaktivitas batang kendali hasil perhitungan terhadap hasil pengukuran menurut inspeksi Bapeten.

Batang Kendali		Hasil Perhitungan		Hasil Pengukuran	Selisih (%) thd Pengukuran
Kode JDA	Posisi	(%)	(\$)	(\$)	
01+09	E-9	2,741	3,8122	2,0525	85,7364
02+15	G-6	2,520	3,5049	2,1050	66,5020
03+13	F-8	2,967	4,1266	2,3600	74,8544
04+11	F-5	2,363	3,2865	2,2950	43,2030
05+10	C-5	2,722	3,7858	2,3650	60,0767
06+14	C-8	2,199	3,0584	1,8400	66,2182
07+16	D-4	2,568	3,5716	2,4750	44,3082
08+12	B-7	2,426	3,3741	1,8000	87,4517

Sumber: LHE Bapeten No.492/LHE/PIBN/L18, 22 Juli 2019

Berdasarkan permasalahan tersebut perlu dirumuskan langkah investigasi, diantaranya yaitu melakukan perhitungan ulang nilai reaktivitas menggunakan beberapa program komputer yang tervalidasi atau melakukan evaluasi terhadap metode eksperimen/pengukurannya. Tujuan investigasi ini adalah menentukan *code* yang paling sesuai untuk menghitung parameter reaktivitas batang kendali reaktor RSG-GAS. Perbedaan nilai parameter neutronik di teras reaktor RSG-GAS antara hasil pengukuran dan hasil perhitungan dengan BATAN-FUEL *code* menurut Hong LP & Surbakti T, sudah terjadi sejak teras pertama (siklus operasi reaktor yang ke-1), yaitu rata-rata 10%[2],[3]. Namun diharapkan hasil perhitungan selanjutnya dapat menunjukkan nilai yang konsisten walaupun masih terjadi perbedaan. Jika perbedaan semakin besar, maka sebaiknya dikaji ulang cara pengukuran itu sendiri ataupun menghitung dengan *code* yang lain misalnya MCNP. Demikian pula, penelitian ini diharapkan bermanfaat dalam memvalidasi kebenaran nilai reaktivitas batang kendali pada eksperimen serta dapat memberikan jawaban pemenuhan dari salah satu permasalahan di LHE laporan PKB reaktor RSG-GAS.

Batang Kendali dan Reaktivitasnya di Teras Reaktor

Pengoperasian reaktor RSG-GAS ditunjang dengan 48 bahan bakar nuklir, yang terdiri dari 40 bahan bakar standar (Elemen Bakar, EB) dan 8 bahan bakar kendali (Elemen Kendali, EK). Batang kendali reaktor RSG-GAS, di teras berada di posisi kisi B-7, C-5, C-8, D-4, E-9, F-5, F-8, dan G-6 seperti yang tunjukan pada Gambar 1. Pada setiap akhir siklus operasi, 1 EK diganti dengan yang baru setelah melalui 8 kelas/siklus operasi, yaitu dari posisi B-7[4]. Batang kendali reaktor RSG-GAS berbentuk garpu, dimana tiga pelat bahan bakar sebelah kiri dan kanan dari elemen bakar standar diganti dengan penyerap AgInCd (komposisi Argentum 80%, Indium 15%, dan Cadmium 5%). Data desain terkait batang kendali reaktor RSG-GAS, ditampilkan pada Tabel 2. Fungsi EK adalah sebagai pengendali jalannya operasi reaktor agar laju pembelahan/populasi neutron di dalam teras reaktor dapat diatur sesuai dengan kondisi operasi yang dikehendaki. Selain hal tersebut, EK juga berfungsi untuk memadamkan

reaktor/menghentikan reaksi pembelahan (multiflikasi neutron). Dengan kandungan unsur penyerap tersebut maka EK dinyatakan memiliki reaktivitas yang berlawanan dengan reaksi nuklir di reaktor, yaitu bernilai negatif.

Reaktivitas adalah nilai penyimpangan dari faktor multiplikasi neutron pada kondisi kritis reaktor nuklir. Ada beberapa macam reaktivitas diantaranya: reaktivitas lebih (*excess reactivity*), reaktivitas padam (*shutdown reactivity*), reaktivitas total (*total reactivity*), reaktivitas kondisi *one stuck rod*. Persamaan reaktivitas, yaitu sebagai berikut:

$$\rho = \frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}} \quad 1)$$

dengan, ρ = reaktivitas teras (%) dan k_{eff} = konstanta multiplikasi efektif
Sedangkan persamaan untuk menghitung reaktivitas EK, sebagai berikut:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad 2)$$

dengan, $n(t)$ = rapat neutron (n/cm^3), $C_i(t)$ = konsentrasi neutron kasip kelompok ke-i

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \lambda C_i(t) \quad 3)$$

β_i = fraksi neutron kasip

β = fraksi neutron kasip total

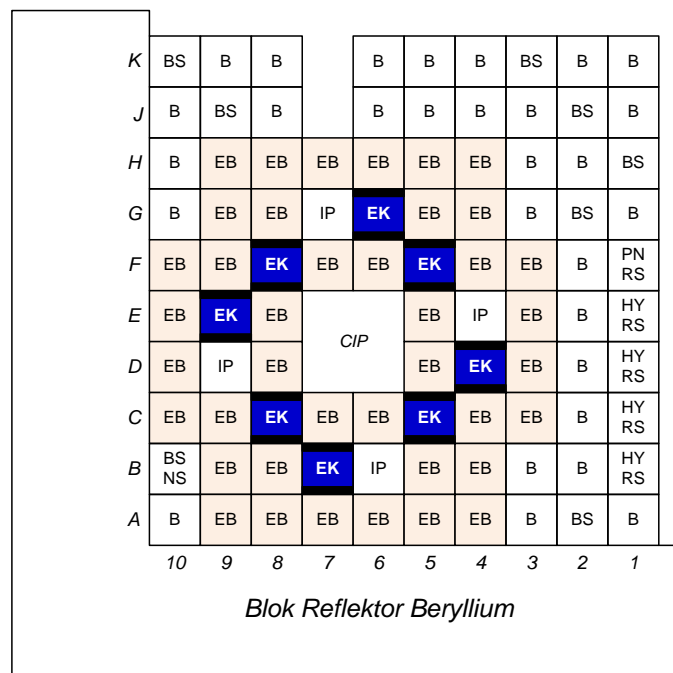
ℓ = umur rata-rata neutron (s)

λ_i = tetapan peluruhan neutron kasip kelompok ke-i (s^{-1})

ρ = reaktivitas EK (%)

Pada pengoperasian reaktor, nilai reaktivitas masing-masing batang kendali di teras harus sudah dapat diperhitungkan ataupun diukur. Pengukuran reaktivitas EK di reaktor RSG-GAS dilakukan secara kompensasi berpasangan[5],[6] yaitu satu batang kendali yang akan dikalibrasi (posisi 0 mm) naik dan satu batang kendali kompensator (posisi 600 mm) turun sedangkan lainnya bank kondisi kritis, kemudian nilai yang terbaca pada Servogor dikonversi dalam satuan % dengan dibagi nilai total fraksi neutron kasip β yaitu 0,00718629[4],[7] untuk teras Silisida (β_{eff} awal siklus 0,007695[8] dan β_{eff} untuk teras Oksida 0,00765[9]). Persamaan reaktivitas EK per jam secara eksperimen, yang diperoleh dengan menyelesaikan persamaan 2 dan 3 adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{n(t)} \left(\frac{dn(t)}{dt} + \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i(t)}{dt} \right) \quad 4)$$



Gambar 1. Posisi batang kendali (EK) di teras reaktor RSG-GAS.

Tabel 2. Data Desain Parameter Terkait Batang Kendali Reaktor RSG-GAS[10].

Parameter Fisik	Nilai	Tipe/Jenis
Jumlah bahan bakar kendali, Material fuel	8	U ₃ Si ₂ -Al
Jumlah penyerap (tipe garpu), Material	8	Ag-In-Cd
Dimensi bahan bakar kendali (mm)	77,1 x 81 x 600	
Jumlah pelat bahan bakar kendali	15	
Dimensi fuel meat (mm)	0,54 x 62,75 x 600	
Pengkayaan U-235 (%)	19,75	
Densitas Uranium (g/cm ³)	2,96	
Muatan U-235 per bahan bakar kendali (g)	178,6	
Ketebalan bahan penyerap (mm)	3,38	
Ketebalan kelongsong penyerap (mm), Material	0,85	SS-321
Kecepatan EK maksimum (cm/s)	0,0564	
Parameter Kinetik-Neutronik	Nilai	Tipe/Jenis
Reaktivitas lebih, awal siklus, dingin, tanpa Xe (%)	7,77	
Reaktivitas untuk eksperimen (%)	3,00	
Nilai reaktivitas total 8 EK (%)	-14,58	
Marjin reaktivitas padam (%)	-0,5	
Marjin reaktivitas <i>one stuck rod</i> (%)	-2,87	
Fraksi neutron kasp total	0,00719	
Umur hidup neutron serentak (μs)	64,5	

Code Penghitung Parameter Kinetik-Neutronik

Program perhitungan komputer (*code*) BATAN-FUEL atau BATAN-2DIFF adalah suatu program komputer yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan difusi neutron banyak kelompok tenaga dalam geometri 2-Dimensi[11]. Akurasi perhitungan parameter neutronik reaktor RSG-GAS dengan BATAN-2DIFF sangat ditentukan oleh: tampang lintang material penyusun teras, pemodelan teras yang detail, dan keakuratan perhitungan fraksi bakar tiap elemen bakar yang ada di teras[12],[13]. Sedangkan BATAN-3DIFF *code* adalah pengembangan dari BATAN-2DIFF, yang mana pemodelan teras tidak hanya ke arah-X dan arah-Y, tetapi juga ke arah-Z atau sudah memperhitungkan posisi tinggi-rendah elemen/*cell* di teras reaktor.

Sedangkan MCNP (*Monte Carlo N-Particle Transport*) *code* merupakan pemodelan sel-sel tiga dimensi yang dibatasi oleh permukaan dua dimensi dalam mensimulasikan transport partikel dengan proses secara random. Hasil presisi pada MCNP bergantung pada: 1) teknik perhitungan maju/mundur, 2) banyaknya partikel yang disimulasikan, dan 3) teknik untuk mengurangi variasi[14].

Selanjutnya *Serpent code* adalah program komputer untuk menghitung fraksi bakar dalam fisika reaktor yang relatif merupakan aplikasi terbaru dari program Monte Carlo untuk energi berkelanjutan. Kode ini digunakan untuk aplikasi fisika reaktor mulai dari pembangkitan konstanta kelompok yang dihomogenisasi hingga perhitungan fraksi bakar dan pemodelan teras reaktor riset kecil hingga perhitungan multi-fisika (*radiation shielding, fusion neutronics, etc.*) dengan dikopel ke berbagai termal-hidrolik, CFD dan *solid-mechanics tool*[15]. Versi pengembangan *Serpent* saat ini, yaitu *Serpent-2*, telah mendiversifikasi aplikasi kode, terutama untuk homogenisasi spasial dan aplikasi multi-fisika. *Serpent-2* memiliki kemampuan untuk menghasilkan konstanta kelompok yang dihomogenisasi yang digunakan oleh teras simulator dan analisis transien berdasarkan metode difusi nodal, termasuk penampang reaksi yang dihomogenisasi, matriks hamburan, koefisien difusi, faktor diskontinuitas, konstanta waktu (simulasi *time dependent*) dan penampang absorpsi penyerapan untuk racun produk fisi ¹³⁵Xe dan ¹⁴⁹Sm serta precursornya[16]. Keempat *code* di atas (BATAN-2DIFF, BATAN-3DIFF, MCNP, dan *Serpent-2*) akan dicoba digunakan untuk menghitung nilai reaktivitas batang kendali di reaktor RSG-GAS.

Tinjauan parameter kinetik-neutronik reaktor RSG-GAS

Parameter kinetika konfigurasi penuh siklus operasi teras pertama reaktor RSG-GAS (terdiri dari 12 FE dan 6 CE), mempunyai nilai reaktivitas lebih (hasil eksperimen) sebesar 8,46% $\Delta k/k$ dan nilai reaktivitas total batang

kendali 17,80% $\Delta k/k$. Nilai reaktivitas lebih dikonversi menjadi faktor multiplikasi efektif sebesar 1,09242 dengan menggunakan nilai β_{eff} dari Vendor ($\beta_{\text{eff}} = 765$ pcm). Perbedaan hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan Monte Carlo *code* (library JENDL-4.0 dan ENDF/B-VII.0), nilai *error* kurang dari 1% (sangat baik)[17]. Sedangkan evaluasi parameter kinetika teras pertama menggunakan MPV3 *code* dengan library data nuklir terbaru (library JENDL-4.0 dan ENDF/B-VII.0), diperoleh nilai β_{eff} 738,3 pcm dan 736,5 pcm dan dengan MCNP-6.2 (library JENDL-4.0 dan ENDF/B-VII.0) diperoleh β_{eff} 746,8 pcm dan 740,8 pcm. Dengan menggunakan β_{eff} yang baru maka nilai reaktivitas lebih dan nilai EK teras pertama menjadi 8,16% $\Delta k/k$ dan 17,18% $\Delta k/k$, serta faktor multiplikasi efektif sebesar $k = 1,08886$, artinya nilai lama lebih besar 4%[18]. Perbedaan nilai reaktivitas EK hasil perhitungan (MVP3, JENDL-4.0) terhadap hasil percobaan dipengaruhi karena pengukuran total nilai EK dilakukan dengan metode penjumlahan aritmatika sederhana dari nilai masing-masing EK tunggal (perlu penelitian lanjutan). Nilai fraksi neutron kasip ($\beta_{\text{eff}} = 719$ pcm) reaktor RSG-GAS akan menurun jika tingkat muat uranium Silisida ditingkatkan[8].

Hasil perhitungan reaktivitas reaktor RSG-GAS berbahan bakar U_3Si_2-Al pada tingkat muat 2,96 gU/cc dengan menggunakan SRAC-CITATION, yaitu reaktivitas lebih sebesar 8,287% $\Delta k/k$ (LAK 9,2% $\Delta k/k$), reaktivitas total sebesar -11,436% $\Delta k/k$ (LAK -14,5% $\Delta k/k$). Untuk hasil reaktivitas lebih perbedaan terbesar terjadi saat simulasi EK *full-down* dibandingkan saat *full-up*. Pada perhitungan untuk tingkat muat 3,55 gU/cc dan 4,80 gU/cc tanpa ada perubahan material lainnya, maka kriteria keselamatan menurut LAK tidak terpenuhi, kecuali dengan penambahan BKP, pengurangan jumlah Be elemen, dan pencampuran Gd_2O_3 ke dalam bahan bakar dapat menurunkan nilai reaktivitas EK[19].

Reaktivitas total batang kendali hasil pengukuran (data operasi teras ke-6 (T-6) s.d T-91) bervariasi dari -9,38% s.d -17,68%, reaktivitas lebih dari 6,07% s.d 11,9%, reaktivitas padam dari -2,63% s.d -7,14%, dan reaktivitas *one stuck rod* dari -1,22% s.d -4,72%. Reaktivitas Total BK terendah terjadi di teras operasi ke-36, ketika pemuatan 2 BBN Silisida (tahap pertama konversi dari BBN Oksida). Nilai reaktivitas EK pada setiap teras operasi masih mampu untuk mengontrol reaktivitas lebih, begitu juga nilai reaktivitas padam setiap teras operasi masih mampu mengontrol apabila terjadi *one stuck rod*[20]. Hasil evaluasinya, bahwa a) reaktivitas lebih teras cenderung menurun dengan banyaknya jumlah bahan bakar Silisida di teras transisi; dan b) margin padam tidak dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar Silisida di teras transisi[7].

Efek interaksi EK pada operasi teras kerja khas (*typical working core*) reaktor RSG-GAS menggunakan metode teori *Perturbation* dan tiga asumsi penyederhanaan dengan perhitungan kekritisan N+1 melalui BATAN-FUEL *code*, menunjukkan secara kuantitatif interaksi timbal balik antara satu EK dengan batang lainnya. Efek interaksi antara dua batang yang berinteraksi nilai reaktivitasnya mencapai hingga 19% sedangkan efek interaksi dari batang terhadap semua (8) batang kendali yang terlibat yang berinteraksi mencapai hingga 32%. Perbedaan relatif dari hasil perhitungan BATAN-FUEL dengan hasil perhitungan 2DIFF & ADJOINT-2D mencapai nilai *error* 8%[21] terutama berasal dari kesalahan pada asumsi 1 yang menyatakan bahwa fungsi gangguan dapat difaktorkan ke dalam masing-masing fungsi. Namun, metode perhitungan nilai reaktivitas yang dicapai melalui sejumlah perhitungan kekritisan lebih unggul dan bermanfaat untuk mengoreksi hasil pengukuran reaktivitas total EK.

Model Benchmark dalam perhitungan reaktivitas batang kendali reaktor HTR-10 China dengan program transport Monte Carlo MCNP6 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VII; memperlihatkan prediksi MCNP6 memiliki kesesuaian yang cukup baik dengan pendekatan difusi yang diestimasi untuk reaktivitas sepuluh EK *fully in* di teras penuh. Hasil perhitungan menunjukkan bias tertinggi 6,44%[22]. Namun demikian kurang menguntungkan untuk teras reaktor TRIPOLI4.

METODOLOGI

Investigasi perbedaan nilai reaktivitas batang kendali antara hasil perhitungan terhadap hasil eksperimen dilakukan terhadap data teras operasi reaktor RSG-GAS mulai operasi ke-80 (T-80) hingga T-90. Data nilai reaktivitas batang kendali hasil eksperimen mengacu pada laporan pelaksanaan operasi PRSG, sedangkan nilai reaktivitas EK secara perhitungan dihitung dengan BATAN-FUEL *code* dan MCNP *code*.

BATAN-FUEL *code* menggunakan BATAN-2DIFF dengan simulasi seluruh batang kendali di bawah, satu batang kendali dinaikkan atau sebaliknya, yaitu seluruh batang kendali di atas, satu batang kendali diturunkan. Sedangkan pada BATAN-3DIFF, simulasi dilakukan untuk kondisi seluruh batang kendali di atas, satu batang

kendali diturunkan (simulasi sebaliknya akan sama dengan hasil BATAN-2DIFF). Dan MCNP code menggunakan MCNP6 serta Serpent-2, dengan simulasi yang sama seperti untuk BATAN-2DIFF.

Selanjutnya melakukan evaluasi dengan membandingkan nilai reaktivitas dari masing-masing EK tunggal sesuai posisi kisi antara hasil perhitungan terhadap hasil eksperimen. Evaluasi ini termasuk menganalisis penyebab perbedaannya dengan mengacu pada nilai batasan ataupun kajian sebelumnya.

Dan yang terakhir adalah menilai dan merekomendasikan code yang paling sesuai diterapkan untuk perhitungan reaktivitas EK di reaktor RSG-GAS.

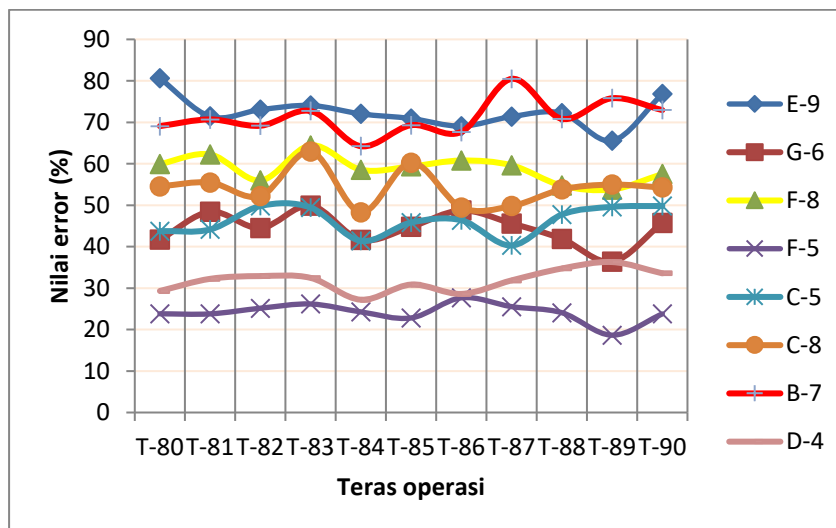
HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran dan perhitungan ditampilkan dalam bentuk tabel-tabel serta menjadi grafik. Data tersebut cukup banyak sehingga tabel yang disajikan adalah langsung untuk nilai perbedaan antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran atau nilai *error*. Data dikelompokkan dan dievaluasi sesuai *code* yang digunakan dan kondisi EK-nya, sebagai berikut:

- a. Menggunakan BATAN-2DIFF, kondisi *All CR Down-One Up*

Tabel 3. Nilai *error* (%) dengan perhitungan B-2DIFF kondisi *All CR Down-One Up*.

Posisi BK	T-80	T-81	T-82	T-83	T-84	T-85	T-86	T-87	T-88	T-89	T-90
E-9	80,59	71,41	73,05	74,06	72,03	70,92	69,08	71,38	72,19	65,56	76,82
G-6	41,69	48,41	44,50	49,92	41,65	44,79	48,74	45,61	41,90	36,36	45,75
F-8	59,96	62,24	55,97	64,43	58,56	59,38	60,78	59,62	54,74	53,80	57,52
F-5	23,81	23,79	25,15	26,17	24,26	22,81	27,67	25,53	24,07	18,65	23,79
C-5	43,76	44,15	49,81	49,44	41,41	45,83	46,37	40,30	47,74	49,60	49,81
C-8	54,57	55,46	52,20	62,95	48,31	60,26	49,43	49,79	53,81	54,97	54,26
B-7	69,08	70,69	69,17	72,71	64,23	69,30	67,69	80,48	70,84	75,80	72,94
D-4	29,31	32,25	32,91	32,47	27,20	30,86	28,61	31,87	34,74	36,29	33,57



Gambar 2. Grafik sebaran perbedaan nilai *error* (%) reaktivitas EK tiap posisi antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan menggunakan BATAN-2DIFF, kondisi *All CR Down-One Up*, pada T-80 s/d T-90.

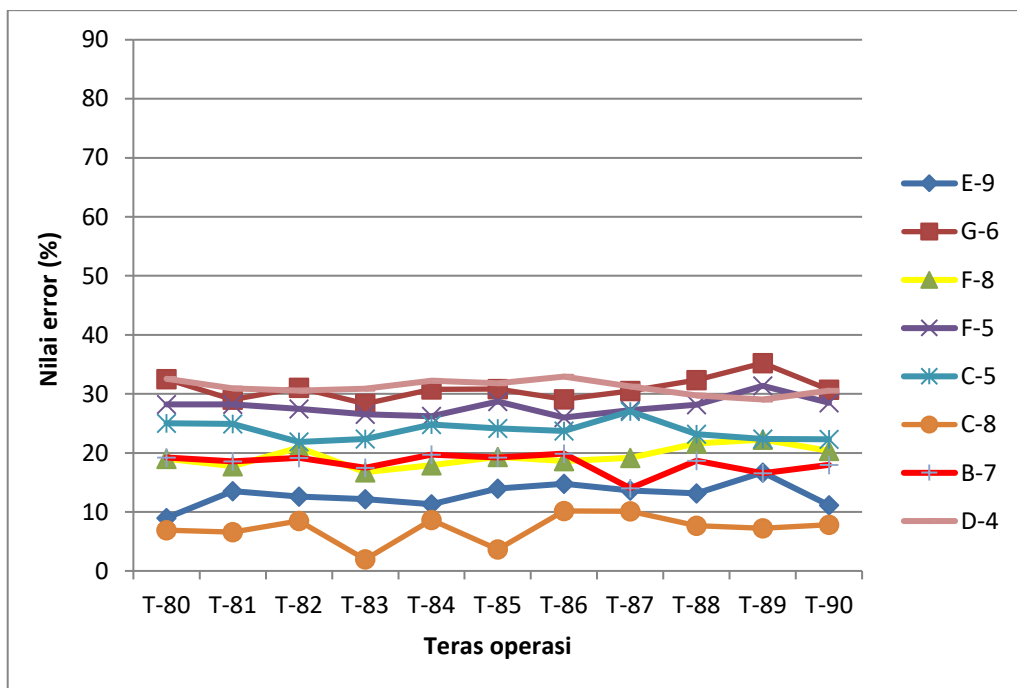
Dari data perhitungan menggunakan BATAN-2DIFF pada 11 teras operasi dengan simulasi seluruh EK posisi di bawah dan satu EK dinaikan diperoleh reaktivitas EK tertinggi 2,909% $\Delta k/k$ di posisi F-8 pada teras operasi ke-83. Reaktivitas EK tertinggi dari hasil eksperimen 1,951% $\Delta k/k$ di posisi D-4 teras operasi ke-86. Dari

pembandingan nilai reaktivitas hasil perhitungan dan eksperimen pada masing-masing posisi dan masing-masing teras operasi, perbedaan terendah dan tertinggi adalah 18,65% di F-5 T-89 dan 80,59% di E-9 T-80.

b. Menggunakan BATAN-2DIFF, kondisi *All CR Up-One Down*

Tabel 4. Nilai *error* (%) dengan perhitungan B-2DIFF kondisi *All CR Up-One Down*

Posisi BK	T-80	T-81	T-82	T-83	T-84	T-85	T-86	T-87	T-88	T-89	T-90
E-9	8,99	13,52	12,58	12,17	11,32	13,94	14,76	13,65	13,15	16,70	11,14
G-6	32,49	29,02	31,03	28,32	30,76	30,85	29,10	30,50	32,37	35,22	30,73
F-8	19,00	17,73	20,91	16,74	17,94	19,33	18,60	19,15	21,63	22,25	20,34
F-5	28,24	28,25	27,47	26,56	26,23	28,73	26,00	27,23	28,16	31,36	28,47
C-5	25,02	24,90	21,85	22,35	24,79	24,17	23,73	27,05	23,16	22,35	22,30
C-8	6,92	6,59	8,46	1,96	8,62	3,65	10,16	10,09	7,67	7,25	7,82
B-7	19,21	18,57	19,17	17,46	19,69	19,19	19,88	14,01	18,69	16,57	17,98
D-4	32,57	30,93	30,57	30,90	32,22	31,80	32,93	31,23	29,75	29,05	30,53



Gambar 3. Grafik sebaran perbedaan nilai *error* (%) reaktivitas EK tiap posisi antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan menggunakan BATAN-2DIFF, kondisi *All CR Up-One Down*, pada T-80 s/d T-90.

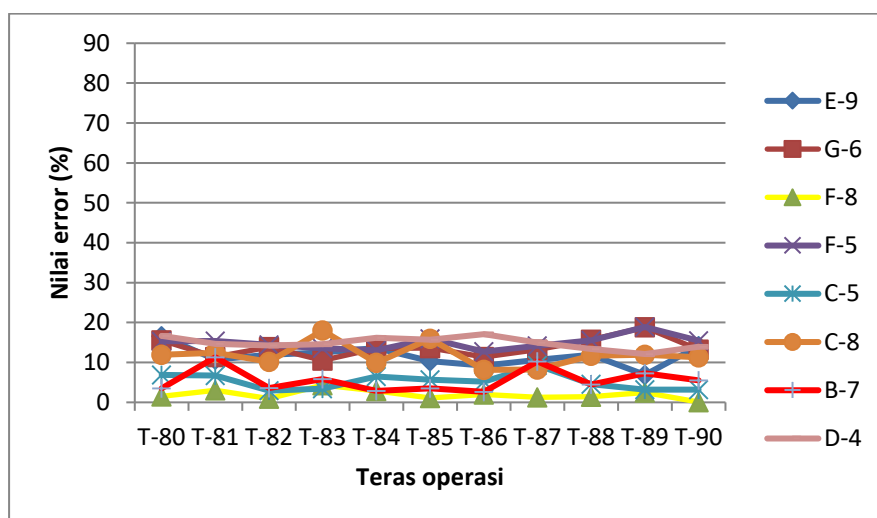
Dari data perhitungan menggunakan BATAN-2DIFF dengan simulasi seluruh EK posisi di atas dan satu EK diturunkan diperoleh reaktivitas EK tertinggi 1,473% $\Delta k/k$ di posisi F-8 pada teras operasi ke-81 & 83. Dari pembandingan nilai reaktivitas hasil perhitungan dan eksperimen pada masing-masing posisi dan masing-masing teras operasi, perbedaan terendah dan tertinggi adalah 1,96% di C-8 T-83 dan 35,22% di G-6 T-89.

Sedangkan menurut Surbakti T, pada teras transisi Oksida ke Silisida telah terdapat perbedaan antara hasil pengukuran dan hasil perhitungan menggunakan BATAN-2DIFF, yaitu untuk reaktivitas lebih 37,1% pada T-36, reaktivitas padam 55,3% pada T-37, dan reaktivitas BBN 25% dari RI-225 pada T-37[6]. Walaupun tidak membandingkan kondisi serupa untuk reaktivitas EK, tetapi perbedaan hasil pengukuran dan perhitungan menggunakan BATAN-FUEL juga telah terjadi ketika peralihan teras BBN Oksida ke teras BBN Silisida sehingga akan berpengaruh terhadap perbedaan-perbedaan parameter neutronik lainnya.

c. Menggunakan BATAN-3DIFF, kondisi All CR Up-One Down

Tabel 5. Nilai error (%) dengan perhitungan B-3DIFF kondisi All CR Up-One Down (300 mm)

Posisi	T-80	T-81	T-82	T-83	T-84	T-85	T-86	T-87	T-88	T-89	T-90
E-9	16,60	10,76	11,92	12,50	13,62	10,29	9,18	10,62	11,96	6,89	14,07
G-6	15,56	11,39	13,82	10,52	13,52	13,62	11,39	13,19	15,66	18,82	13,23
F-8	1,49	3,02	0,94	4,32	2,84	1,09	1,99	1,28	1,43	2,43	0,07
F-5	15,32	15,39	14,44	13,52	13,02	15,96	12,71	14,19	15,54	18,88	15,44
C-5	6,85	6,69	2,93	3,39	6,46	5,69	5,21	9,30	4,54	3,22	3,16
C-8	11,96	12,45	10,15	18,00	9,96	15,98	8,13	8,26	11,67	11,94	11,33
B-7	3,48	11,29	3,57	5,81	2,85	3,55	2,64	10,24	4,44	7,29	5,51
D-4	16,63	14,69	14,23	14,61	16,16	15,66	17,09	15,01	13,41	12,10	13,95



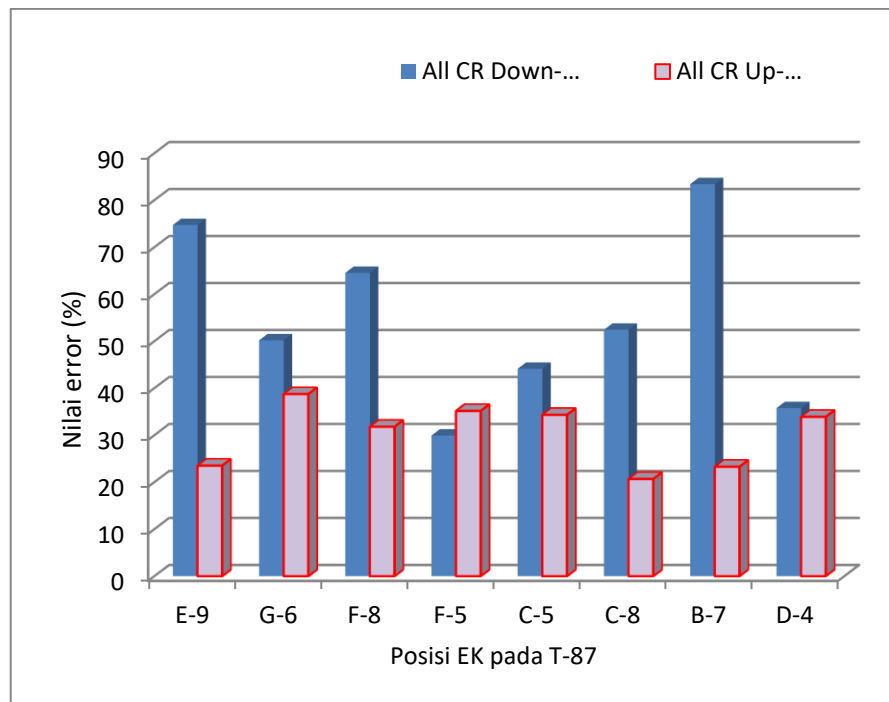
Gambar 4. Grafik sebaran perbedaan nilai error (%) reaktivitas EK tiap posisi antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan menggunakan BATAN-3DIFF, kondisi All CR Up-One Down, pada T-80 s/d T-90.

Dari data perhitungan menggunakan BATAN-3DIFF dengan simulasi seluruh EK posisi di atas dan satu EK diturunkan diperoleh reaktivitas EK tertinggi 1,846% $\Delta k/k$ di posisi F-8 pada teras operasi ke-83. Dari perbandingan nilai reaktivitas hasil perhitungan dan eksperimen pada masing-masing posisi dan masing-masing teras operasi, perbedaan terendah dan tertinggi adalah 0,07% di F-8 T-90 dan 18,88% di F-5 T-89.

d. Menggunakan Serpent-2, kondisi All CR Down-One Up & All CR Up-One Down

Tabel 6. Nilai error (%) dengan perhitungan Serpent-2 kondisi All CR Down-One Up & All CR Up-One Down, T-87

Posisi BK	All CR Down-One Up	All CR Up-One Down
E-9	74,72	23,51
G-6	50,18	38,74
F-8	64,52	31,79
F-5	29,92	35,15
C-5	44,12	34,32
C-8	52,43	20,67
B-7	83,41	23,29
D-4	35,74	33,90



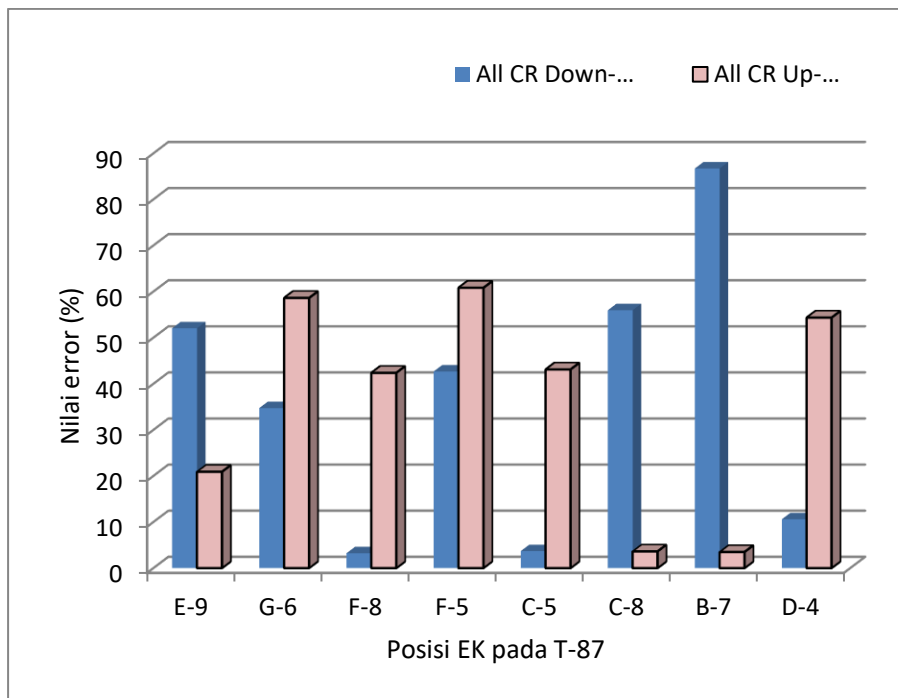
Gambar 5. Grafik sebaran perbedaan nilai *error* (%) reaktivitas EK tiap posisi antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan menggunakan Serpent-2, pada T-87.

Dari data perhitungan menggunakan Serpent-2 dengan simulasi seluruh EK posisi di bawah dan satu EK dinaikan diperoleh reaktivitas EK tertinggi 2,986% $\Delta k/k$ di posisi F-8 pada teras operasi ke-87. Dari perbandingan nilai reaktivitas hasil perhitungan dan eksperimen pada masing-masing posisi di teras operasi ke-87, perbedaan terendah dan tertinggi adalah 29,92% di F-5 dan 83,41% di B-7. Sedangkan dengan simulasi seluruh EK posisi di atas dan satu EK diturunkan diperoleh reaktivitas EK tertinggi 1,252% $\Delta k/k$ di posisi D-4. Dari perbandingan nilai reaktivitas hasil perhitungan dan eksperimen pada masing-masing posisi di teras operasi ke-87, perbedaan terendah dan tertinggi adalah 20,67% di C-8 dan 38,74% di G-6.

- e. Menggunakan MCNP 6, kondisi *All CR Down-One Up & All CR Up-One Down*

Tabel 7. Nilai *error* (%) dengan perhitungan MCNP6 kondisi *All CR Down-One Up & All CR Up-One Down*, T-87

Posisi BK	All CR Down-One Up	All CR Up-One Down
E-9	52,02	20,90
G-6	34,71	58,62
F-8	3,22	42,36
F-5	42,66	60,81
C-5	3,68	43,09
C-8	55,94	3,62
B-7	86,70	3,48
D-4	10,58	54,34



Gambar 6. Grafik sebaran perbedaan nilai *error* (%) reaktivitas EK tiap posisi antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan menggunakan MCNP-6, pada T-87.

Dari data perhitungan menggunakan MCNP-6 dengan simulasi seluruh EK posisi di bawah dan satu EK dinaikan diperoleh reaktivitas EK tertinggi 2,453% $\Delta k/k$ di posisi B-7 pada teras operasi ke-87. Dari perbandingan nilai reaktivitas hasil perhitungan dan eksperimen pada masing-masing posisi di teras operasi ke-87, perbedaan terendah dan tertinggi adalah 3,22% di F-8 dan 86,70% di B-7. Sedangkan dengan simulasi seluruh EK posisi di atas dan satu EK diturunkan diperoleh reaktivitas EK tertinggi 1,390% $\Delta k/k$ di posisi C-8. Dari perbandingan nilai reaktivitas hasil perhitungan dan eksperimen pada masing-masing posisi di teras operasi ke-87, perbedaan terendah dan tertinggi adalah 3,48% di B-7 dan 60,81% di F-5.

Dari ke-6 metode perbandingan perhitungan terhadap eksperimen, nilai *error* yang paling kecil (terbaik) adalah dengan BATAN-3DIFF pada posisi simulasi seluruh EK di atas satu batang kendali diturunkan, yaitu nilai terbesar 18,88% dan terkecil 0,07% dengan rata-rata *error* 9,95% di F-8 pada T-90. Kesesuaian hasil perhitungan terhadap pengukuran reaktivitas EK reaktor RSG-GAS sebagai mana yang diharapkan pada inspeksi Bapeten supaya mencapai *error* 5%, beberapa posisi dapat dipenuhi dengan BATAN-3DIFF *code*. Seperti data pada Tabel 5, yaitu di posisi F-8 rata-rata 1,90%, di posisi B-7 rata-rata 5,52%, dan di posisi C-5 rata-rata 5,22%.

Hasil evaluasi menurut Hong LP[20] dan Surbakti T[7]: nilai reaktivitas EK pada fungsi posisi berbeda dikarenakan pola manajemen bahan bakar, kondisi panas gamma, dan umur elemen penyerap di dalam teras reaktor, sedangkan perbedaan hasil ukur dan hasil hitung karena belum terkoreksinya parameter reaktivitas teras akibat pengaruh shadowing interaksi antar EK selama eksperimen serta adanya perbedaan nilai fraksi bakar BBN dalam perhitungan dengan sesungguhnya di teras reaktor.

Hasil investigasi terhadap eksperimen/pengukuran reaktivitas EK; untuk mendapatkan nilai reaktivitas dalam % dari nilai *dollar* pada servorgor adalah dengan dikonversi atau dikalikan nilai beta 765 pcm. Sedangkan nilai beta untuk teras Silisida pada LAK adalah 719 pcm (lebih kecil). Sehingga, apabila nilai beta sesuai LAK diterapkan maka nilai *error* terhadap perhitungan bertambah besar. Dengan asumsi proporsional maka nilai *error* eksperimen dengan perhitungan menjadi lebih baik lagi apabila nilai *dollar* saat eksperimen dikonversi dengan nilai beta yang diperoleh pada awal siklus, yaitu 769,5 pcm[8]. Untuk penggunaan nilai beta di reaktor RSG-GAS perlu dikaji lebih lanjut sehingga mendekati nilai sesungguhnya, untuk ditetapkan dalam LAK, dan diharapkan reaktivitas hasil perhitungan mendekati nilai eksperimen.

Menurut Zuhair[22], model Benchmark dalam perhitungan reaktivitas EK reaktor untuk HTR-10 China dengan program MCNP6 dan pustaka ENDF/B-VII; memperlihatkan prediksi MCNP6 memiliki kesesuaian yang cukup baik dengan estimasi untuk reaktivitas sepuluh EK *fully in* di teras penuh. Sedangkan pada tinjauan di teras TRIPOLI4 simulasi dengan MCNP6 memperlihatkan hasil yang kurang baik dibandingkan teori Difusi. Perbedaan perhitungan teori Difusi dan Monte Carlo secara teoretik dapat disebabkan oleh pendekatan model geometri reaktor yang dibuat dan struktur energi tampang lintang data nuklir yang digunakan.

Code MCNP6 dan Serpent-2 merupakan program komputer yang belum secara regular diterapkan untuk perhitungan di reaktor RSG-GAS sehingga masih banyak memerlukan penyesuaian pada variasi parameter inputannya. Sedangkan BATAN-FUEL code sudah digunakan sejak komisioning reaktor RSG-GAS hingga teras operasi terkini sehingga berbagai perhitungan parameter kinetik-neutronik teras reaktor dapat dilakukan rutin dan berkelanjutan dan direkomendasikan khususnya dengan BATAN-3DIFF.

KESIMPULAN

Nilai *error* reaktivitas EK antara hasil perhitungan terhadap hasil eksperimen dengan posisi seluruh batang kendali di bawah satu batang dinaikkan menggunakan BATAN-2DIFF 18,65%-80,59%, Serpent-2 29,92%-83,41%, MCNP6 3,22%-86,70%, sedangkan dengan posisi seluruh batang kendali di atas satu batang diturunkan menggunakan BATAN-2DIFF 1,96%-35,22%, BATAN-3DIFF 0,07%-18,88%, Serpent-2 20,67%-38,74%, MCNP6 3,48%-60,81%. Dengan investigasi ini maka metode perhitungan reaktivitas batang kendali reaktor RSG-GAS direkomendasikan menggunakan BATAN-3DIFF.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih sebagai wujud penghargaan yang ditujukan terhadap pihak-pihak yang terlibat dalam pembuatan KTI terkait investigasi perbedaan nilai reaktivitas batang kendali reaktor RSG-GAS, yaitu rekan-rekan yang mengikuti pelatihan neutronik dengan MCNP tahun 2020 dan khusus kepada pengajar neutronik bapak Tagor Malem Sembiring PKSEN-BATAN.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Bapeten, "Laporan hasil evaluasi (LHE) Bapeten No.492/LHE/PIBN/L18 untuk laporan Penilaian Keselamatan Berkala (PKB) reaktor RSG-GAS," Jakarta, 2019.
- [2]. P. . Liem and T. . Sembiring, "Validation of Batan's Standard Neutron Diffusion Codes For Control Rod Worth Anaylisis," *Atom Indones.*, vol. 23 (2), 1997.
- [3]. T. Surbakti, S. Pinem, T. Sembiring, and Am. Hamzah, "Calculation of Control Rods Reactivity Worth of RSG-GAS First Core Using Deterministic and Monte Carlo Methods," *Atom Indones.*, vol. 45, no. 2, 2019.
- [4]. Batan, "Laporan Analisis Keselamatan (LAK) RSG-GAS Rev. 10.1," Serpong, 2011.
- [5]. T. Surbakti and Purwadi, "Karateristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS selama 30 tahun beroperasi," *JFPA*, vol. Vol 07, No, 2017.
- [6]. T. M. Sembiring, L. Suparlina, and tukiran, "Analisis manajemen teras transisi reaktor RSG-GAS menuju teras setimbang Silisida," *Pros. Has. Penelit. P2TRR*, 2000.
- [7]. Purwadi, "Karateristika Teras RSG-GAS dengan Bahan Bakar Silisida," *Sigma Epsil.*, vol. 21, No.2, 2017.
- [8]. T. Surbakti, P. Surian, and T. M. Sembiring, "Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Silisida terhadap Parameter Kinetik Teras Reaktor RSG-GAS," *JFPA*, vol. 3, No.1, 2013.
- [9]. Batan, *Multipurpose Reaktor G.A. Siwabessy-MPR30 of Safety Analysis Report (SAR)*, Rev. 7. Jakarta: PRSG-Batan, 1989.
- [10]. PRSG-Batan, "Laporan Analisis Keselamatan (LAK) Reaktor RSG-GAS Rev. 11," 2018.
- [11]. P. H. Liem, "BATAN-FUEL: A General In-Core Fuel Management Code," *J. Atom Indones.*, vol. 22 (2), 1996.
- [12]. J. Sukmana, "Validasi Perhitungan Manual Fraksi Bakar Teras Operasi ke-65 dengan Menggunakan Program Batan-2DIFF," *Bul. Pengelolaan Reakt. Nukl.*, vol. Vol. VII, 2010.
- [13]. J. Sukmana and A. Mariatma, "Kajian Keselamatan Operasi RSG-GAS dengan Energi Terbangkitkan 660 MWD Menggunakan Perhitungan BATAN-2DIFF," *Pros. Semin. Nas. Teknol. dan Apl. Reakt. Nukl.*, 2010.
- [14]. L. L.A.N, "RSICC COMPUTER CODE COLLECTION. CCC810,." 2008.

- [15]. J. Leppanen, "Serpent-a Continues-energy Monte Carlo Reactor Physic Burnup Calculation Code. User's Manual,." 2015.
- [16]. V. Valtavirta and J. Leppanen, "Coupled burnup calculations with the Serpent-2 Monte Carlo Code," *M&C Int. Conf. Korea*, vol. April 16-2, 2017.
- [17]. P. H. Liem and T. M. Sembiring, "Benchmarking the new JENDL-4.0 library on criticality experiments of a research reactor with oxide LEU (20 w/o) fuel, light water moderator and beryllium reflectors," *Ann. Nucl. Energy*, 2012.
- [18]. L. Peng Hong, T. Surbakti, and D. Hartanto, "Kinetics parameters evaluation on the first core of the RSG GAS (MPR-30) using continuous energy Monte Carlo method," *Prog. Nucl. Energy-science Direct*, 2018.
- [19]. J. Susilo and Rokhmadi, "Analisis reaktivitas batang kendali teras setimbang Silisida RSG-GAS dengan SRAC-CITATION," *Pros. PPI-PDIPTN*, 2007.
- [20]. T. Surbakti and dkk, "Reactivity characteristic of RSG-GAS working core 30 years operation," *J. PFA (Penelitian Fis. dan Apl.)*, vol. Unesa-Sema, 2017.
- [21]. L. P. Hong, T. Taryo, T. M. Sembiring, S. Hiroshi, and N. Yoshitaka, "Study on the control rod interaction effect in RSG gas multipurpose reactor (MPR-30)," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 29, no. 6, pp. 701–716, 2002.
- [22]. Zuhair, Suwoto, P. I. Yazid, and J. S. Pane, "Studi model benchmark MCNP6 dalam perhitungan reaktivitas batang kendali HTR-10," *Ganendra JNST*, vol. Vol.9, 2016.