

VALIDASI PROGRAM BATAN-2DIFF DALAM PERHITUNGAN β_{EFF} DI TERAS FCA

Zuhair, Rokhmadi, Tagor M.S., Liem P.H.

ABSTRAK

VALIDASI PROGRAM BATAN-2DIFF DALAM PERHITUNGAN β_{EFF} DI TERAS FCA. Beberapa saran yang mendorong perbaikan program Batan-2DIFF telah meningkat dan salah satunya adalah validasi program Batan-2DIFF dalam perhitungan fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) di teras FCA. β_{eff} adalah salah satu parameter kinetik yang penting dalam analisis keselamatan reaktor nuklir. β_{eff} ini memainkan peranan yang penting dalam interpretasi teoretik dari pengukuran reaktivitas, oleh karena itu harus diprediksi secara akurat dengan perhitungan neutronik. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan β_{eff} di teras FCA XIX-1 antara kombinasi program difusi Batan-2DIFF & ALPHA-KP dan CITATION-FBR & PERKY. Program Batan-2DIFF melakukan perhitungan fluks neutron *forward* dan *adjoint* yang akan dimanfaatkan oleh program ALPHA-KP untuk menentukan fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}). Tampang lintang makroskopik efektif material di daerah teras dan di daerah blanket digenerasi dengan program perhitungan sel 1-D WIMS/D4 dalam struktur 69 kelompok energi. Berbagai data neutron kasip yang diolah dari *Evaluated Nuclear Data Library* (ENDF/B6.2, JENDL-3.2), yang dievaluasi oleh periset Tomlinson dan yang direkomendasikan oleh WPEC/SG6, digunakan untuk melengkapi validasi ini. Perhitungan β_{eff} dengan kombinasi Batan-2DIFF & ALPHA-KP menyajikan hasil di bawah estimasi tetapi secara umum bersesuaian dengan CITATION-FBR & PERKY. Penggunaan *evaluated library* JENDL-3.2 memperlihatkan hasil yang paling dekat, yaitu -1,85%. Perbedaan relatif sebesar 0,05% dari nilai eksperimen menunjukkan akurasi prediksi β_{eff} dengan data nuklir WPEC/SG6 adalah yang paling baik, yang membuktikan validasi program Batan-2DIFF.

ABSTRACT

VALIDATION OF BATAN-2DIFF CODE ON THE CALCULATION OF β_{EFF} IN FCA CORE. Several encouraging suggestions for improving the Batan-2DIFF code have arised and one of them is validation of the Batan-2DIFF code on the calculation of effective delayed neutron fraction (β_{eff}) in FCA core. The β_{eff} is one of important kinetic parameters in nuclear reactor safety analysis. This β_{eff} plays important role in the theoretical interpretation of reactivity measurement, therefore it has to be accurately predicted by the neutronic calculation. The validation was conducted by comparing the calculation result of β_{eff} in FCA XIX-1 core between combination of Batan-2DIFF & ALPHA-KP and CITATION-FBR & PERKY diffusion codes. The Batan-2DIFF code performs the calculation of forward and adjoint neutron fluxes which will be utilized by ALPHA-KP code to determine the effective delayed neutron fraction (β_{eff}). The effective macroscopic cross-section of material in core and blanket regions were generated with 1-D cell calculation code WIMS/D4 in structure of 69 energy group. Various delayed neutron data processed from *Evaluated Nuclear Data Library* (ENDF/B6.2, JENDL-3.2), evaluated by researcher Tomlinson and recommended by WPEC/SG6 were used to complete this validation. The calculation of β_{eff} by combination of Batan-2DIFF & ALPHA-KP presents underestimated results but generally they have agreement with those by CITATION-FBR & PERKY. The use of evaluated library of JENDL-3.2 shows the most close result, i.e. -1.85%. The relative difference of 0.05% from

experiment value indicates that the prediction accuracy of β_{eff} with nuclear data of WPEC/SG6 is the best one which proved the validation of the Batan-2DIFF code.

PENDAHULUAN

Salah satu aktivitas riset Bidang Fisika Reaktor di Pusat Reaktor Serba Guna adalah mengembangkan sendiri program standard untuk desain dan analisis keselamatan neutronik dan termohidrolik dari perangkat kritik, reaktor riset dan reaktor daya. Program Batan-2DIFF[1] telah berhasil dikembangkan dan diverifikasi dengan program generik 2DBUM serta divalidasi dengan hasil eksperimen Perangkat Kritik Universitas Kyoto (KUCA)[2]. Beberapa saran yang mendorong perbaikan program Batan-2DIFF telah meningkat dan salah satunya adalah validasi program Batan-2DIFF dalam perhitungan fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) di teras FCA JAERI (*Fast Critical Assembly, Japan Atomic Energy Research Institute*).

Fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) adalah salah satu parameter kinetik yang penting dalam analisis keselamatan reaktor nuklir. Bagi pelaku eksperimen, β_{eff} didefinisikan sebagai faktor perbandingan antara reaktivitas yang dihitung ($\% \Delta K/K$) dan reaktivitas yang diukur ($\$$). β_{eff} ini memainkan peranan yang penting dalam interpretasi teoretik dari pengukuran reaktivitas karena besaran ini berhubungan dengan parameter reaktivitas seperti: reaktivitas bahan bakar, reaktivitas void sodium, reaktivitas Doppler dan reaktivitas batang kendali yang penting dalam studi karakteristik teras reaktor cepat. Oleh karena itu β_{eff} harus diprediksi secara akurat dengan perhitungan neutronik.

Dalam penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan β_{eff} di teras FCA XIX-1 antara kombinasi program difusi Batan-2DIFF & ALPHA-KP[3] dan

CITATION-FBR[4] & PERKY[5]. Program Batan-2DIFF melakukan perhitungan fluks neutron *forward* dan *adjoint* yang akan dimanfaatkan oleh program ALPHA-KP untuk menentukan fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}). Tampang lintang makroskopik efektif material di daerah teras dan di daerah blanket digenerasi dengan program perhitungan sel 1-D WIMS/D4[6] dalam struktur 69 kelompok energi. Berbagai data neutron kasip yang diolah dari *Evaluated Nuclear Data Library* (ENDF/B6.2[7], JENDL-3.2[8]), yang dievaluasi oleh periset Tomlinson[9] dan yang direkomendasikan oleh WPEC/SG6 (*Working Party on International Evaluation Cooperation, Sub group 1.6 on Delayed Neutron Data Validation*), digunakan untuk melengkapi hasil validasi ini.

Pada prinsipnya, perhitungan β_{eff} di reaktor cepat akan memberikan hasil yang lebih akurat bila struktur kelompok energi yang digunakan semakin banyak. Konstanta kelompok SLAROM dengan struktur 70 kelompok energi telah memberikan hasil dengan akurasi yang cukup tinggi untuk perhitungan β_{eff} dengan CITATION-FBR & PERKY. Akurasi yang hampir sama diharapkan dapat dicapai bila WIMS/D4 dengan struktur 69 kelompok energi digunakan untuk perhitungan β_{eff} dengan Batan-2DIFF & ALPHA-KP.

TEORI

Generasi Data Neutron Kasip

Dalam analisis reaktor penanganan neutron kasip mencakup penggunaan data neutron kasip yang dikarakterisasi oleh 3 parameter, yaitu: λ_i (konstanta peluruhan), β_i (fraksi neutron kasip) dan

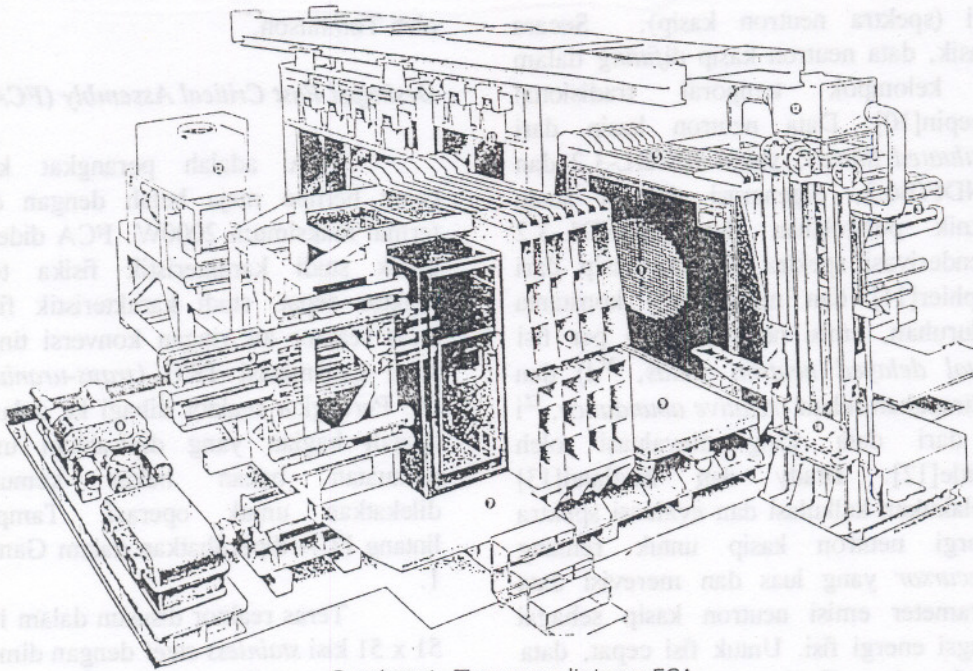
λ_{di} (spektra neutron kasip). Secara klasik, data neutron kasip difitting dalam 6 kelompok temporal tradisional Keepin[10]. Data neutron kasip dari *evaluated library*, yakni JENDL-3.2 dan ENDF/B6.2, digenerasi dengan suatu teknik pengolahan data. JENDL-3.2 menderivasi spektra neutron kasip dari Saphier[11] dan mengadopsi konstanta peluruhan, emisi neutron kasip per fisi (*total delayed neutron yields, λ_{di}*) dan kelimpahan relatif (*relative abundance, α_i*) dari data yang dievaluasi oleh Tuttle[12]. Brady dan England[13] melakukan kalkulasi dan evaluasi spektra energi neutron kasip untuk rentang *precursor* yang luas dan merevisi data parameter emisi neutron kasip sebagai fungsi energi fisi. Untuk fisi cepat, data Brady dan England diadopsi dalam ENDF/B6.2. Data yang direkomendasikan oleh WPEC/SG6 dalam proyek OECD/NEA/CRP&NDC diadopsi dari R.W. Waldo dkk.[14] dengan spektra neutron fisi kasip diperoleh dari evaluasi Brady dan England. Analisis eksperimen di FCA secara konvensional menggunakan spektra energi dari Saphier dan kompilasi data parameter neutron kasip yang dievaluasi

oleh Tomlinson.

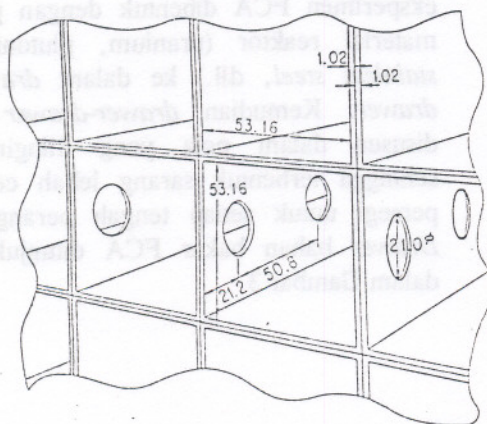
Deskripsi Fast Critical Assembly (FCA)

FCA adalah perangkat kritik cepat bertipe meja belah dengan daya termal maksimum 2000W. FCA didesain untuk studi karakteristik fisika teras reaktor cepat, studi karakteristik fisika teras reaktor air ringan konversi tinggi, studi transmudasi TRU (*trans-uranium*), dll. Perangkat reaktor dibagi ke dalam 2 tengah bagian yang dipisahkan untuk pemuatan bahan bakar kemudian dilekatkan untuk operasi. Tampang lintang FCA diperlihatkan dalam Gambar 1.

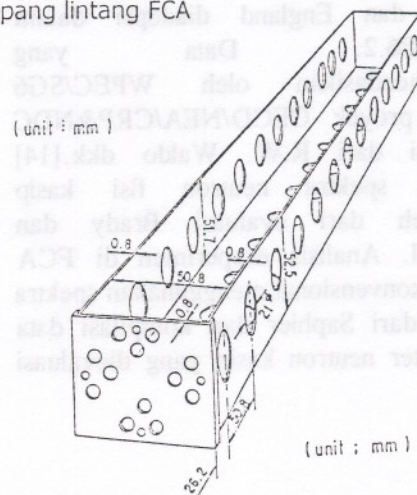
Teras reaktor disusun dalam larik 51 x 51 kisi *stainless steel* dengan dimensi 5,52 cm x 5,52 cm. Struktur matriks FCA dilukiskan dalam Gambar 2. Teras eksperimen FCA dibentuk dengan pelat material reaktor (uranium, plutonium, *stainless steel*, dll.) ke dalam *drawer-drawer*. Kemudian *drawer-drawer* ini disusun dalam pola yang diinginkan sehingga terbentuk sarang lebah cepuk persegi untuk setiap tengah perangkat. *Drawer* bahan bakar FCA ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 1. Tampang lintang FCA



Gambar 2. Struktur matriks FCA

Gambar 3. *Drawer* bahan bakar FCA

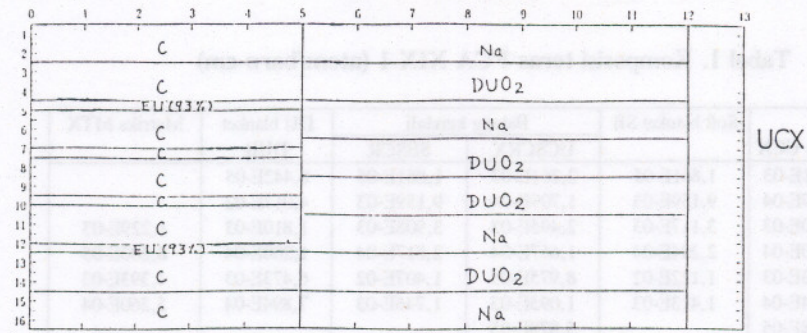
Fasilitas FCA memiliki fleksibilitas yang tinggi dalam komposisi bahan bakar dan geometri teras sehingga eksperimen yang dilakukan di FCA dapat memberikan data integral untuk desain teras reaktor cepat dengan memanfaatkan berbagai perangkat simulasi.

TATA KERJA

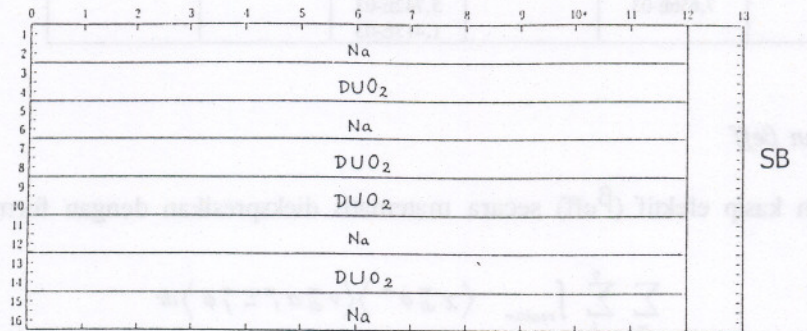
Model Perhitungan Sel

Tampang lintang makroskopik efektif material di daerah teras dan di

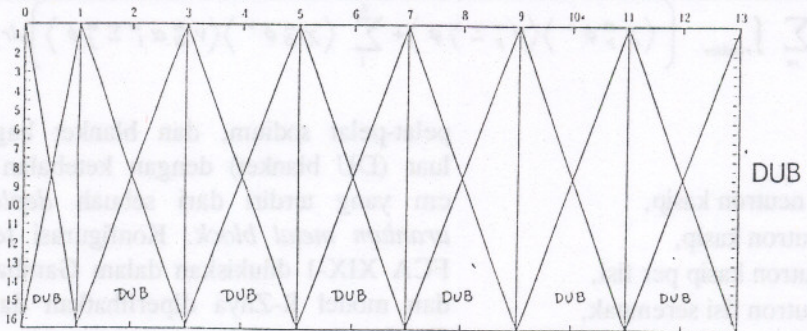
daerah blanket digenerasi dengan program perhitungan sel 1-D WIMS/D4. Geometri sel dimodelkan dengan multi-slab. Struktur 69 kelompok energi dari 0 hingga 10 MeV diterapkan untuk memberikan hasil perhitungan dengan akurasi yang tinggi. Pola sel dari *drawer-drawer* dilukiskan dalam Gambar 4 dengan komposisi densitas atom seperti disajikan dalam Tabel 1. Untuk sel teras, opsi *buckling search* dikerjakan untuk mencapai kondisi kritis sedangkan untuk sel blanket digunakan *buckling nol*.



(a)

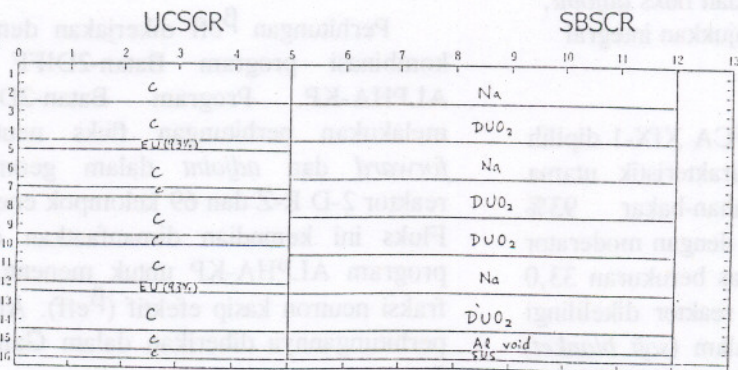


SB



DUB

(b)



(c)

Gambar 4. Pola sel *drawer-drawer* untuk (a) teras (UCX), (b) blanket (SB dan DUB), dan (c) batang kendali yang tersisip di daerah teras (UCSCRX) dan blanket (SBSCR)

Tabel 1. Komposisi teras FCA XIX-1 (atom/barn-cm)

	Teras UCX	Soft blanket SB	Batang kendali		DU blanket DUB	Matriks MTX
			UCSCRX	SBSCR		
U235	2,261E-03	1,861E-05	2,261E-03	1,861E-05	8,442E-05	
U238	1,709E-04	9,159E-03	1,709E-04	9,159E-03	4,017E-02	
Cr	1,810E-03	3,117E-03	2,495E-03	3,908E-03	1,810E-03	1,229E-03
Mn	1,200E-04	2,294E-04	1,667E-04	2,817E-04	1,200E-04	8,200E-05
Fe	6,473E-03	1,122E-02	8,975E-03	1,407E-02	6,473E-03	4,393E-03
Ni	7,894E-04	1,413E-03	1,095E-03	1,746E-03	7,894E-04	5,360E-04
H	5,878E-05		5,878E-05			
C	6,749E-02		6,534E-02			
O	2,546E-05	1,835E-02	2,546E-05	1,835E-02		
Na		7,656E-03		5,742E-03		
Al				1,413E-03		

Model Perhitungan β_{eff}

Fraaksi neutron kasip efektif (β_{eff}) secara matematis diekspresikan dengan formula sebagai berikut:

$$\beta_{eff} = \frac{\sum_m \sum_i \int_{reaktor} \langle \chi_{di}^m \phi^+ \rangle \langle v_{di}^m \alpha_i^m \Sigma_j^m \phi \rangle dr}{\sum_m \int_{reaktor} \left(\langle \chi_p^m \phi^+ \rangle \langle v_p^m \Sigma_j^m \phi \rangle + \sum_i \langle \chi_{di}^m \phi^+ \rangle \langle v_{di}^m \alpha_i^m \Sigma_j^m \phi \rangle \right) dr}$$

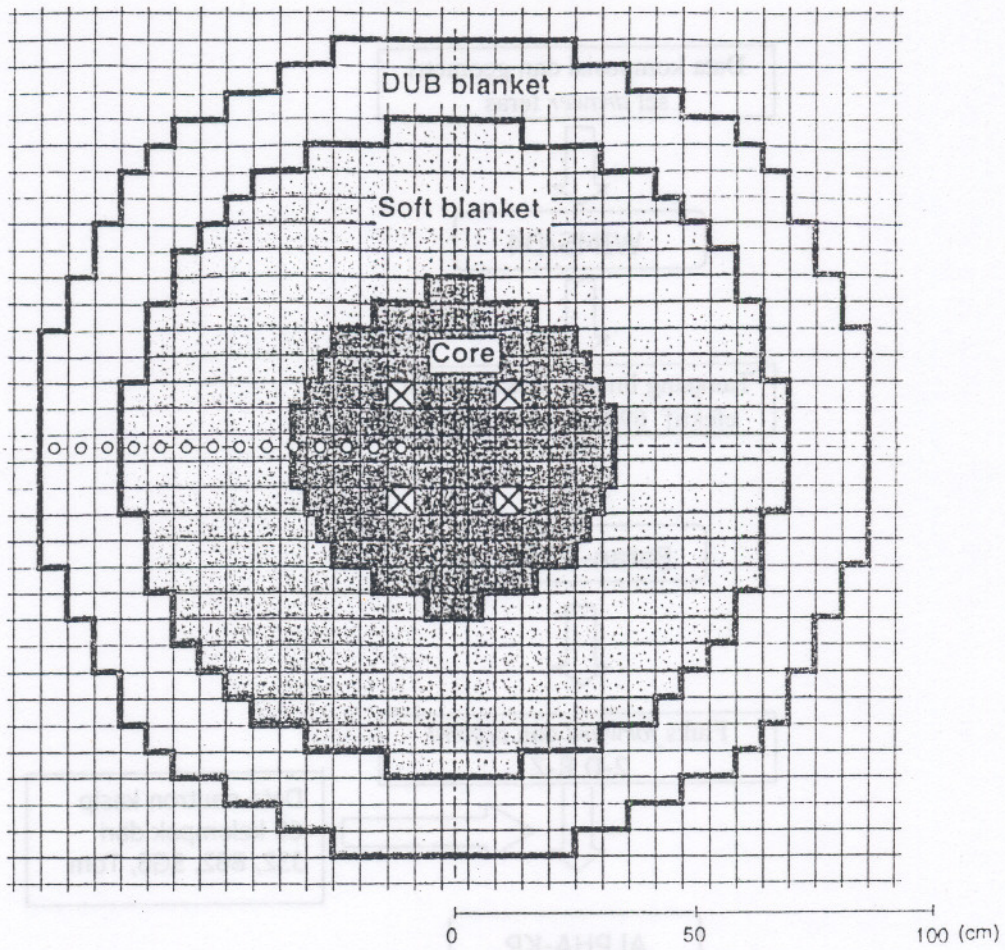
dimana,

- m = isotop,
- i = kelompok neutron kasip,
- χ_{di}^m = spektra neutron kasip,
- v_{di}^m = jumlah neutron kasip per fisi,
- χ_p^m = spektra neutron fisi serempak,
- v_p^m = jumlah neutron serempak per fisi,
- ϕ, ϕ^+ = fluks *forward* dan fluks *adjoint*,
- dan braket < > menunjukkan integral energi.

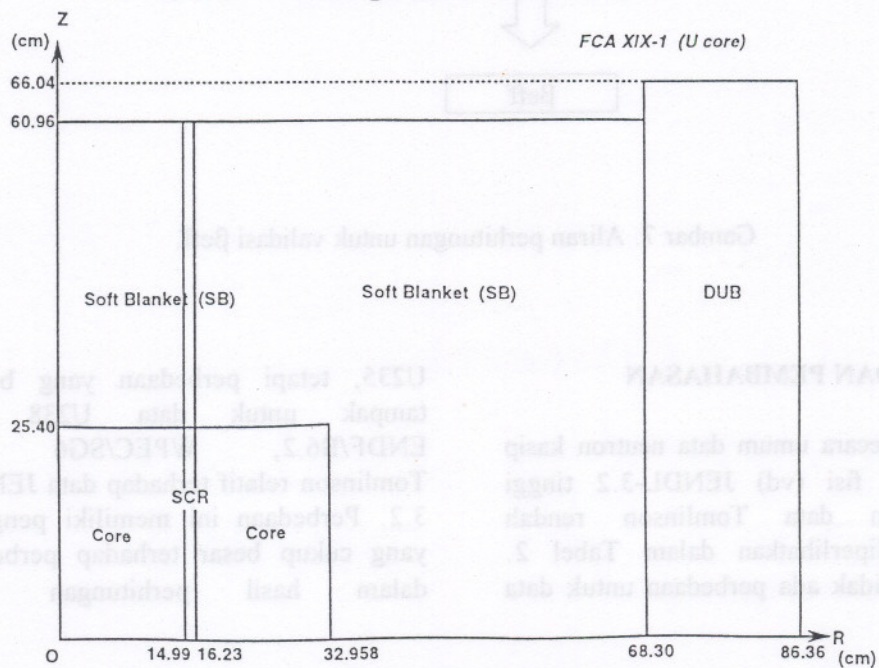
Konfigurasi teras FCA XIX-1 dipilih untuk validasi ini. Karakteristik utama teras adalah berbahan-bakar 93% *enriched uranium* (EU) dengan moderator grafit dan geometri teras berukuran 33,0 cm x 50,8 cm. Teras reaktor dikelilingi oleh blanket bagian dalam (*soft blanket*) dengan ketebalan 30 cm yang terdiri dari pelat-pelat *depleted uranium-oxide* dan

pelat-pelat sodium, dan blanket bagian luar (DU blanket) dengan ketebalan 15 cm yang terdiri dari sebuah *depleted uranium metal block*. Konfigurasi teras FCA XIX-1 dilukiskan dalam Gambar 5 dan model R-Znya diperlihatkan dalam Gambar 6.

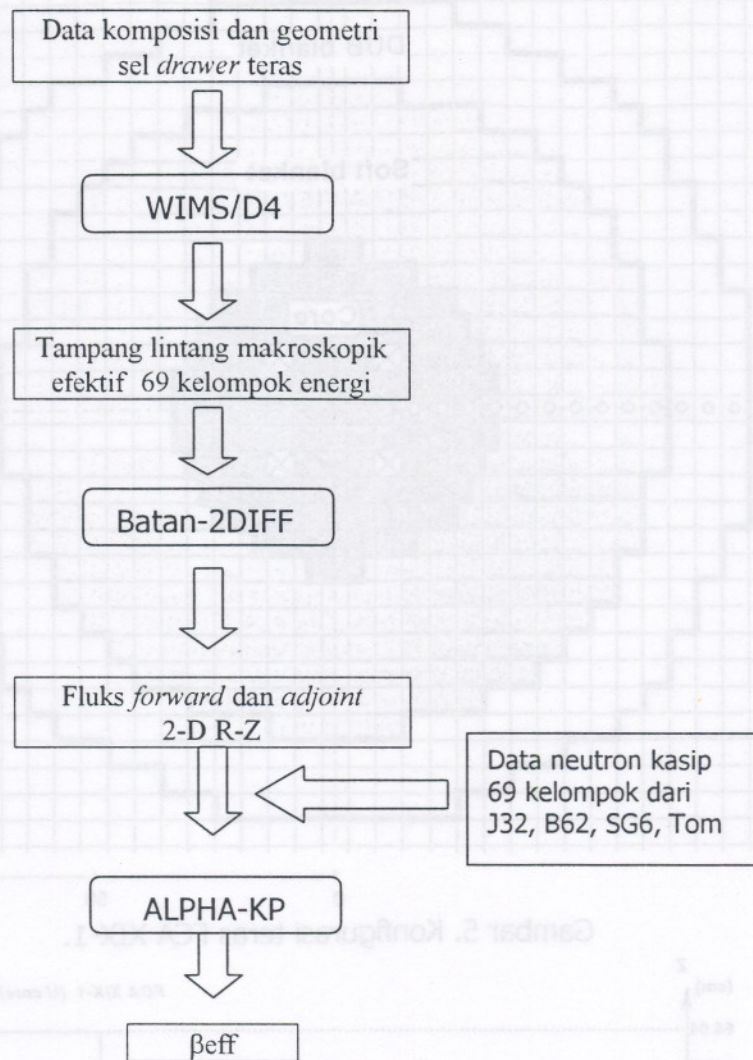
Perhitungan β_{eff} dikerjakan dengan kombinasi program Batan-2DIFF & ALPHA-KP. Program Batan-2DIFF melakukan perhitungan fluks neutron *forward* dan *adjoint* dalam geometri reaktor 2-D R-Z dan 69 kelompok energi. Fluks ini kemudian dimanfaatkan oleh program ALPHA-KP untuk menentukan fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}). Aliran perhitungannya diberikan dalam Gambar 7.



Gambar 5. Konfigurasi teras FCA XIX-1.



Gambar 6. Model R-Z dalam perhitungan β_{eff} .

Gambar 7. Aliran perhitungan untuk validasi β_{eff} .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum data neutron kasip total per fisi (vd) JENDL-3.2 tinggi sedangkan data Tomlinson rendah seperti diperlihatkan dalam Tabel 2. Hampir tidak ada perbedaan untuk data

U235, tetapi perbedaan yang berarti tampak untuk data U238 dari ENDF/B6.2, WPEC/SG6 dan Tomlinson relatif terhadap data JENDL-3.2. Perbedaan ini memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap perbedaan dalam hasil perhitungan β_{eff} .

Tabel 2. Perbandingan neutron kasip total per fisi (vd) antara data nuklir

	JENDL-3.2	ENDF/B6.2	WPEC/SG6	Tomlinson
U235	1,672E-03	1,670E-03	1,660E-03	1,650E-03
U238	4,810E-02	4,400E-02	4,500E-02	4,399E-02

Dari Tabel 3 dapat diamati konstanta peluruhan U235 dan U238 dari Tomlinson dan WPEC/SG6 memiliki nilai yang sama seperti dari JENDL-3.2 Bila nilai ENDF/B6.2 dibandingkan

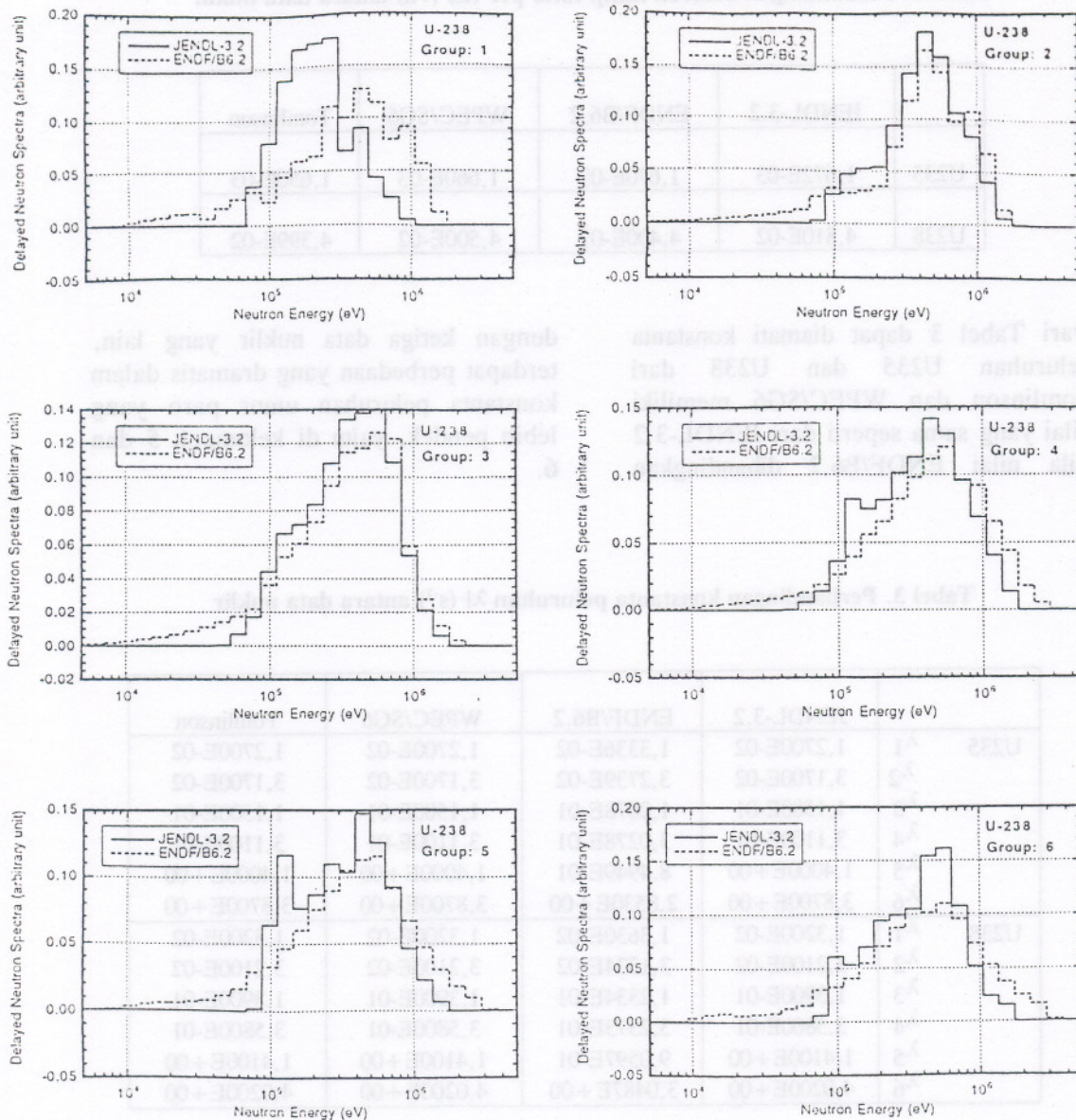
dengan ketiga data nuklir yang lain, terdapat perbedaan yang dramatis dalam konstanta peluruhan umur paro yang lebih pendek, yaitu di kelompok 5 dan 6.

Tabel 3. Perbandingan konstanta peluruhan λ_i (s^{-1}) antara data nuklir

		JENDL-3.2	ENDF/B6.2	WPEC/SG6	Tomlinson
U235	λ_1	1,2700E-02	1,3336E-02	1,2700E-02	1,2700E-02
	λ_2	3,1700E-02	3,2739E-02	3,1700E-02	3,1700E-02
	λ_3	1,1500E-01	1,2078E-01	1,1500E-01	1,1500E-01
	λ_4	3,1100E-01	3,0278E-01	3,1100E-01	3,1100E-01
	λ_5	1,4000E+00	8,4949E-01	1,4000E+00	1,4000E+00
	λ_6	3,8700E+00	2,8530E+00	3,8700E+00	3,8700E+00
U238	λ_1	1,3200E-02	1,3630E-02	1,3200E-02	1,3200E-02
	λ_2	3,2100E-02	3,1334E-02	3,2100E-02	3,2100E-02
	λ_3	1,3900E-01	1,2334E-01	1,3900E-01	1,3900E-01
	λ_4	3,5800E-01	3,2373E-01	3,5800E-01	3,5800E-01
	λ_5	1,4100E+00	9,0597E-01	1,4100E+00	1,4100E+00
	λ_6	4,0200E+00	3,0487E+00	4,0200E+00	4,0200E+00

Spektra ENDF/B6.2 dibentuk oleh estimasi model dari spektrum yang tak terukur dan ekspansi dari spektrum yang terukur tidak lengkap. Ini bisa dilihat dalam Gambar 8 yang menunjukkan secara umum spektra JENDL-3.2 di

daerah energi kurang dari 50 keV atau lebih dari 1,74 MeV adalah nol sedangkan spektra ENDF/B6.2 memiliki beberapa puncak energi dengan intensitas yang bervariasi dari kelompok ke kelompok.



Gambar 8. Spektra energi neutron kaspis U238 dari kelompok 1 hingga 6.

Hasil perhitungan β_{eff} dengan kombinasi program Batan-2DIFF & ALPHA-KP disajikan dalam Tabel 4. Dapat diamati dari Tabel 4, perhitungan β_{eff} dengan Batan-2DIFF & ALPHA-KP memperlihatkan hasil di bawah estimasi tetapi secara umum bersesuaian dengan CITATION-FBR & PERKY dengan

perbedaan relatif maksimum sebesar -5,30%. Penggunaan *evaluated library* JENDL-3.2 memperlihatkan hasil yang paling dekat, yaitu -1,85%. Perhitungan CITATION-FBR & PERKY dikemukakan dalam Pustaka [15] dan [16].

Tabel 4. Hasil perhitungan β_{eff} dengan Batan-2DIFF & ALPHA-KP

	JENDL-3.2	ENDF/B6.2	WPEC/SG6	Tomlinson
Batan-2DIFF & ALPHA-KP	7,676E-03 (0,9815)	7,505E-03 (0,9665)	7,404E-03 (0,9576)	7,285E-03 (0,9470)
CITATION-FBR & PERKY	7,821E-03 (1,0000)*	7,765E-03 (1,0000)	7,732E-03 (1,0000)	7,693E-03 (1,0000)

*) Perhitungan CITATION-FBR & PERKY dinormalisasi menjadi 1

Perbandingan hasil perhitungan β_{eff} dengan eksperimen (C/E) disajikan dalam Tabel 5. Perbedaan relatif sebesar 0,05 % dari nilai eksperimen, yaitu 7,40E-03[17], menunjukkan akurasi prediksi β_{eff} dengan

data neutron kasip yang direkomendasikan oleh WPEC/SG6 adalah yang paling baik, yang membuktikan validasi program Batan-2DIFF.

Tabel 5. Perbandingan perhitungan dan eksperimen (C/E) β_{eff}

C/E	JENDL-3.2	ENDF/B6.2	WPEC/SG6	Tomlinson
Batan-2DIFF & ALPHA-KP	1,0373	1,0142	1,0005	0,9845
CITATION-FBR & PERKY	1,0569	1,0493	1,0449	1,0396

KESIMPULAN

Validasi program Batan-2DIFF dalam perhitungan fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) telah dilakukan dengan data neutron kasip yang diolah dari *Evaluated Nuclear Data Library* (ENDF/B6.2, JENDL-3.2), yang dievaluasi oleh periset Tomlinson dan yang direkomendasikan oleh WPEC/SG6.

Perhitungan β_{eff} dengan kombinasi Batan-2DIFF & ALPHA-KP menyajikan hasil di bawah estimasi tetapi secara umum bersesuaian dengan CITATION-FBR & PERKY. Penggunaan *evaluated library* JENDL-3.2 memperlihatkan hasil yang paling dekat, yaitu -1,85%.

Perbedaan relatif sebesar 0,05 % dari nilai eksperimen menunjukkan akurasi prediksi β_{eff} dengan data nuklir WPEC/SG6 adalah yang paling baik, yang membuktikan validasi program Batan-2DIFF.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Bapak Ir. Alfahari Mardi, M.Sc. yang telah memberikan saran dan dorongan yang membesarkan hati dalam penelitian ini. Pun kepada Bapak Dr. Ir. Dhandhang Purwadi, kami sampaikan terimakasih atas koreksinya yang bermanfaat dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. P.H. LIEM, "Development and Verification of Batan's Standard, Two-dimensional Multigroup Neutron Diffusion Code (Batan-2DIFF)", *Atom Indonesia*, **20**(2), 1994
2. ZUHAIR, TAGOR M.S., and LIEM P.H., "Batan-2DIFF and -3DIFF Diffusion Codes Validation on Kyoto University Critical Assembly (KUCA)", *Atom Indonesia*, **24**(1), 1998
3. TAGOR M.S., "Program Perhitungan Parameter Kinetik α ", Risalah Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir VIII, Jakarta, 24-25 Februari, 1998
4. S. IJIMA, "Multi-dimensional Diffusion Calculation Code for Fast Reactor Neutronics: CITATION-FBR", JAERI, 1977 (*in Japanese*)
5. S. IJIMA, H. YOSHIDA, and H. SAKURAGI, "Multi-dimensional Perturbation Theory Code based on Diffusion Approximation: PERKY", JAERI-M 6993, 1977
6. J.R. ASKEW, F.J. FAYERS, and P.B. KEMSELL, "A General Description of the Lattice Code WIMS", *Brit. Nucl. Energy Soc.*, **5**(4), 1966
7. P.F. ROSE and C.L. DUNFORD, "Data Formats and Procedures for The Evaluated Nuclear data File ENDF-6", BNL-NCS-44945, 1990
8. K. SHIBATA, *et al.*, "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3: JENDL-3", JAERI 1319, 1990
9. L. TOMLINSON, "Delayed Neutrons from Fission: A Compilation and Evaluation of Experimental Data", AERE-R6993, Atomic Energy Research Establishment, 1972
10. G.R. KEEPIN, *Physics of Nuclear Kinetics*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1965
11. D. SAPHIER, D. ILBERG, S. SHALEV, and S. YIFTAH, "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their Importance", *Nucl. Sci. Eng.*, **62**, 660, 1977
12. R.J. TUTTLE, "Delayed-Neutron Data for Reactor-Physics Analysis", *Nucl. Sci. Eng.*, **56**, 37, 1975
13. M.C. BRADY and T.R. ENGLAND, "Delayed Neutron Data and Group Parameters for 43 Fissioning Systems", *Nucl. Sci. Eng.*, **103**, 129, 1989
14. R.W. WALDO, R.A. KARAM, and R.A. MEYER, "Delayed Neutron Yields: Time Dependent Measurements and Predictive Model", *Physical Review C*, **23**(3), 1113, 1981
15. ZUHAIR, "Analisis Fraksi Neutron Kasip Efektif (β_{eff}) di Teras FCA dengan Perhitungan Teori Difusi", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 8-10 Juli, 1997
16. S. OKAJIMA, ZUHAIR, T. SAKURAI, and H. SONG, "Evaluation of Delayed Neutron Data using FCA β_{eff} Benchmark Experiment", *Nucl. Sci. Technol.*, **35**(12), 963, 1998
17. T. SAKURAI, *et al.*, "Benchmark Experiments of Effective Delayed Neutron Fraction (β_{eff}) in JAERI-FCA", Proc. of the International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island - New York, Oct. 5-8, 1998

DISKUSI

Pertanyaan (Usman Sudjadi):

Apa sebabnya terjadi perbedaan antara perhitungan CITATION-FBR & PERKY dan Batan-2DIFF & ALPHA-KP? Bagaimana perbedaannya dibandingkan hasil eksperimen?

Jawaban (Zuhair) :

Pada prinsipnya, perhitungan β_{eff} akan memberikan hasil yang lebih akurat bila struktur kelompok energi yang digunakan semakin banyak. Dibandingkan dengan reaktor termal, untuk menganalisis reaktor cepat, dibutuhkan jumlah kelompok energi neutron yang lebih banyak. Hal ini disebabkan karena keterkaitan pada peubah energi di reaktor cepat jauh lebih kuat dibandingkan reaktor termal. Sebaliknya pada reaktor termal, keterkaitan pada peubah ruang lebih dominan dibandingkan reaktor cepat.

Dalam perhitungan β_{eff} di reaktor cepat, yang lebih penting adalah struktur kelompok di daerah energi cepat haruslah cukup banyak karena ada beberapa puncak spektra neutron kasip terletak pada energi neutron yang berbeda. SLAROM membaginya sebanyak 34 kelompok sedangkan WIMS/D4 sebanyak 17 kelompok. Perbedaan pembagian inilah diperkirakan menjadi penyebab timbulnya perbedaan hasil perhitungan antara kedua program yang digunakan.

Para periset dalam sebuah tim dari sejumlah negara ikut berpartisipasi dalam eksperimen β_{eff} di Teras FCA XIX-1. Dalam melakukan pengukuran β_{eff} , setiap tim menggunakan metode eksperimen yang berbeda-beda, JAERI Jepang dengan metode *Covariance to mean*, CEA Prancis dengan *Noise*, IPPE Rusia dengan *Rossi- α* dan *Cf-source*, dll. Dibandingkan hasil eksperimen β_{eff} dari tim Universitas Nagoya dengan metode *Modified Bennett*, perhitungan CITATION-FBR & PERKY dengan data neutron kasip JENDL-3.2 memberikan hasil perbandingan yang paling akurat, yaitu C/E = 1,0001. Hasil seluruh pengukuran β_{eff} dengan berbagai metode tersebut (terkecil 7,18E-03, terbesar 7,82E-03) kemudian dirata-ratakan dengan matriks korelasi dan diperoleh harga β_{eff} rerata sebesar 7,40E-03. Nilai ini dekat sekali dengan hasil perhitungan Batan-2DIFF & ALPHA-KP yang memanfaatkan data nuklir WPEC/SG6 (C/E = 1,0005).