

Studi Perhitungan *Benchmark* Kritikalitas Teras Metalik dan MOX di FCA

Zuhair¹⁾, Tagor M. Sembiring¹⁾, dan Putranto Ilham Yazid²⁾

Abstract: The criticality experiments at FCA three cores have been done to obtain reliable original data as a benchmark test. The first two cores was mock-up of metallic fueled LMFBR's and the other was a mock-up of a MOX fueled LMFBR. The criticality calculation of FCA cores was performed by using the Monte Carlo transport code MCNP-4C in 2-D R-Z reactor geometry. The analysis was done with ENDF/B-VI continuous energy neutron cross-section library at room temperature. The MCNP-4C criticality prediction (k_{eff}) for metallic (XVI-1 and XVI-2) cores were underestimated in 0.54% and 0.48%, respectively. The MCNP-4C criticality prediction (k_{eff}) for MOX (XVII-1) core showed best agreement with the experimental data where C/E value was 0.99995. In general, it can be concluded that MCNP-4C calculations on FCA criticality benchmark experiments show a high accuracy for metallic as well as MOX cores.

Keywords: *criticality, metallic core, MOX core, FCA, MCNP-4C, ENDF/B-VI*

PENDAHULUAN

Saat ini banyak studi eksperimental telah dilakukan dalam bidang fisika reaktor cepat menggunakan perangkat kritik di Amerika, Eropa dan Jepang. Informasi dari eksperimen-eksperimen ini dimanfaatkan untuk mengkaji validitas pustaka data nuklir dan teknik perhitungan yang dikerjakan. Namun hanya sedikit dari studi-studi seperti ini yang terbuka sehingga seseorang dapat melakukan analisis sebagai uji benchmark.

Eksperimen kritikalitas di tiga teras Perangkat Kritik Cepat (*Fast Critical Assembly*, FCA^[1]) yang dioperasikan oleh JAEA di Tokai, dikerjakan untuk mendapatkan data original yang dapat diandalkan sebagai

uji benchmark bagi serangkaian perhitungan yang dilakukan dengan berbagai metode. Ketiga teras, yang dinamai XVI-I, XVI-2 dan XVII-1, memiliki sebuah daerah uji sentral (pusat) yang dikelilingi oleh daerah *driver*. Dua teras yang pertama adalah model teras reaktor cepat LMFBR (*Liquid Metal Fast Breeder Reactor*) berbahan bakar metalik dan teras yang terakhir adalah model LMFBR berbahan bakar MOX (*mixed-oxide*)^[2].

Dalam studi ini, perhitungan benchmark kritikalitas teras metalik dan MOX di FCA dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP-4C^[3] dalam geometri reaktor 2-D R-Z. Program ini dipilih karena akurasinya

¹⁾ Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN, Kawasan Puspiptek, Serpong
Tel. (021)756-0912, Fax. (021)756-0913, e-mail: zuhairbasimeleh@yahoo.com

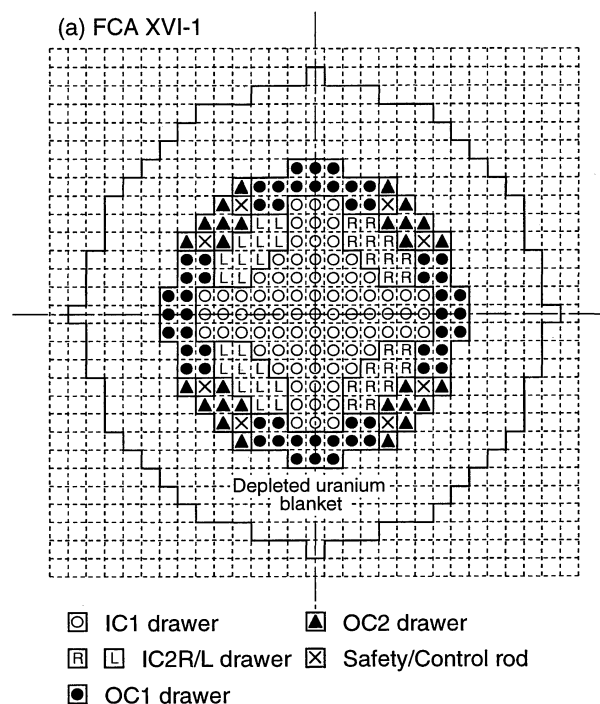
²⁾ Pusat Teknologi Nuklir, Bahan dan Radiometri – BATAN, Bandung

yang tinggi dalam simulasi kritikalitas berbagai reaktor. Perhitungan MCNP-4C didasarkan pada eksperimen di tiga teras benchmark FCA dengan berbagai komposisi uranium dan plutonium di daerah uji sentral. Analisis perhitungan dikerjakan dengan data tampang lintang neutron energi kontinu ENDF/B-VI[4] untuk melengkapi studi ini.

Deskripsi Teras *Benchmark FCA*

FCA adalah perangkat kritik cepat bertipe meja belah dengan daya maksimum 1000W. FCA didesain untuk

studi karakteristik fisika teras reaktor cepat, studi karakteristik fisika teras reaktor air ringan konversi tinggi, studi transmudasi TRU (trans-uranium), dan lain-lain. Perangkat reaktor dibagi ke dalam 2 bagian, yaitu bagian setengah perangkat yang tetap (*fixed-half of assembly*) dan bagian setengah perangkat yang dapat bergerak (*movable-half of assembly*). Kedua bagian ini dipisahkan untuk pemuatan bahan bakar kemudian dilekatkan untuk operasi.



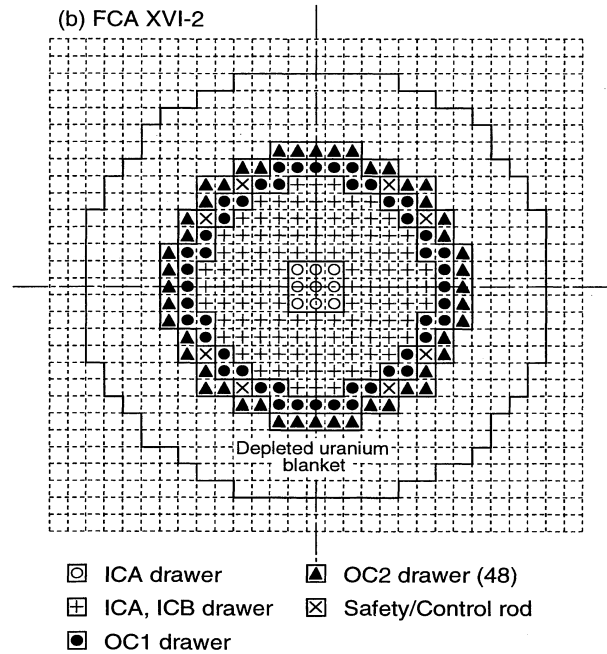
Gambar 1a. Konfigurasi teras *benchmark FCA XVI-1*.

Konfigurasi teras FCA dalam eksperimen benchmark kritikalitas diperlihatkan dalam Gambar 1(a)-(c). Diameter daerah uji adalah 68,5 cm

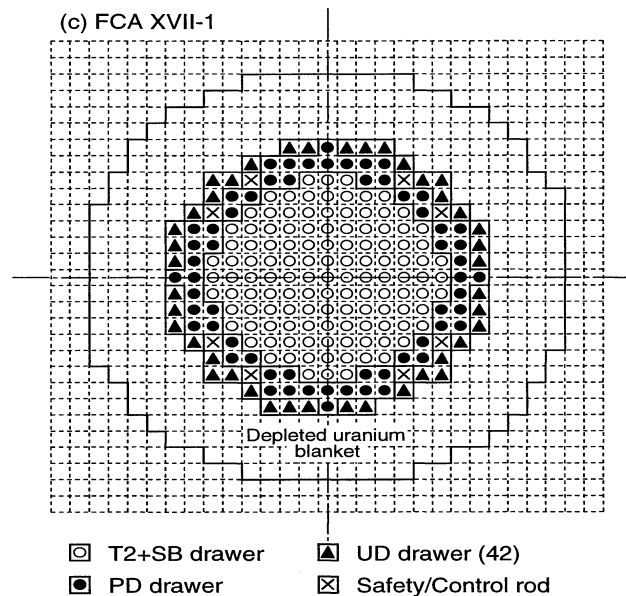
dan tingginya 91,4 cm. Teras FCA XVI-1 dan XVI-2 adalah model teras reaktor cepat berbahan bakar metalik dimana di daerah ujinya terdiri atas uranium

dan plutonium untuk teras XVI-1 serta hanya terdiri atas plutonium untuk XVI-2 sebagai material fisil. Teras FCA XVII-1 adalah model teras reaktor cepat berbahan bakar MOX yang juga tidak memiliki uranium yang diperkaya

di daerah ujinya. *Blanket* radial (DUB, *depleted uranium block*) dalam teras reaktor ditempatkan di luar daerah *driver* sedangkan *blanket* aksial (NUB, *natural uranium block*) berada di bagian atas dan bawah teras.



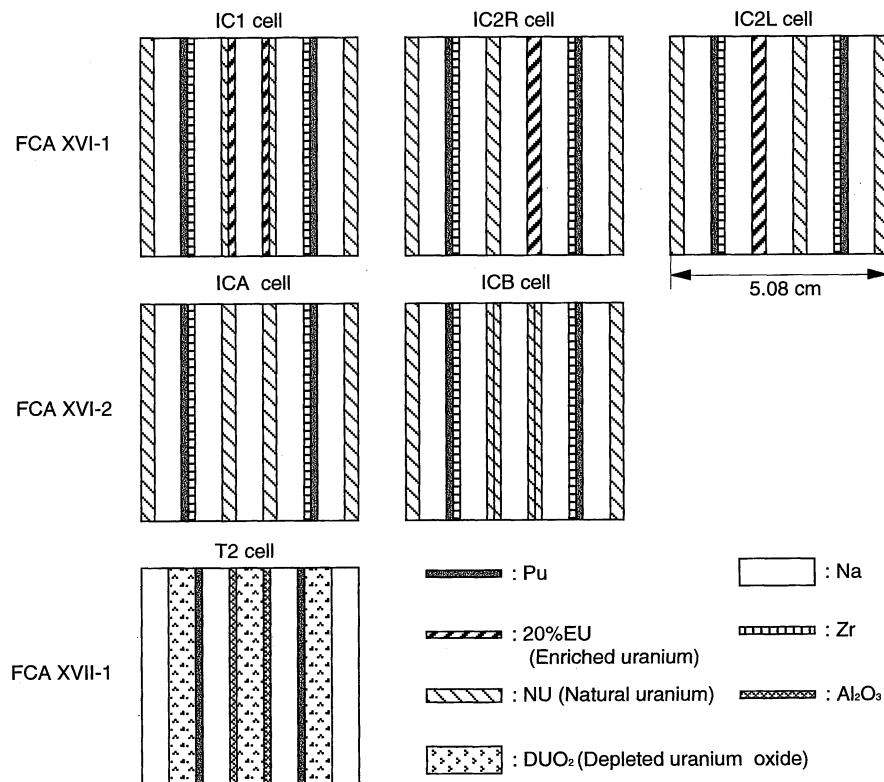
Gambar 1b. Konfigurasi teras *benchmark* FCA XVI-2.



Gambar 1c. Konfigurasi teras *benchmark* FCA XVII-1.

Teras FCA tersusun atas *tube* matriks *stainless steel* berukuran 5,52 cm × 5,52 cm. Rak-rak bahan bakar (*fuel drawers*) disusun ke dalam *tube* matriks. Sel satuan yang mensimulasikan komposisi bahan bakar dimasukkan ke dalam rak bahan bakar. Dimensi sel satuan adalah 5,08

cm × 5,08 cm × 5,08 cm. Komposisi bahan bakar disimulasikan menggunakan pelat plutonium (Pu), pelat uranium alam (NU, *natural uranium*), pelat sodium (Na), dan lain-lain. Susunan pelat dalam sel satuan di daerah uji sentral dilukiskan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Susunan pelat dalam sel satuan di daerah uji sentral.

Karakteristik utama teras benchmark FCA dirangkum dalam Tabel 1. Daerah uji teras XVI-1 terdiri atas pelat-pelat bahan bakar uranium diperkaya 20% (20% EU, *enriched uranium*) dan plutonium, sedangkan daerah uji teras XVI-2 dibentuk hanya oleh plutonium. Teras XVII-1 tidak

mengandung pelat-pelat uranium diperkaya di daerah ujinya. Komparasi antara teras XVI-2 dan XVII-1 ditunjukkan oleh perbedaan bahan bakar metalik dan MOX sedangkan komparasi antara teras XVI-1 dan XVI-2 dicirikan oleh efek ²³⁵U.

Tabel 1. Karakteristik utama teras *benchmark* FCA.

	FCA XVI-1	FCA XVI-2	FCA XVII-1
Daerah uji			
Dimensi ($\emptyset \times H$)	68,5 cm $\times$ 91,4 cm	68,5 cm $\times$ 91,4 cm	68,5 cm $\times$ 91,4 cm
Bahan bakar	Pu+Uranium diperkaya (EU)	Pu+Uranium alam (NU)	Pu+Uranium oksida susut kadar (DUO ₂)
Densitas atom	(10 ²² atom/cm ³)	(10 ²² atom/cm ³)	(10 ²² atom/cm ³)
Pu-239	0,105	0,105	0,105
Pu-240	0,009	0,009	0,009
U-235	0,054	0,007	0,001
U-238	0,926	0,975	0,687
O	0,008	0,005	1,704
Na	0,957	0,957	0,766
Fe	1,341	1,341	1,223
Zr	0,209	0,209	0,000
Daerah <i>driver</i>	Pu+Uranium diperkaya (EU)	Pu+Uranium diperkaya (EU)	Pu+Uranium diperkaya (EU)
Volum teras aktif (ℓ)	593	627	644
Daerah <i>blanket</i> aksial	Uranium alam (NU)	Uranium alam (NU)	DUO ₂ +Na

Densitas atom nuklida utama di daerah uji diberikan dalam Tabel 1. Densitas atom ²³⁹Pu adalah tetap untuk ketiga teras sedangkan ²³⁵U lebih tinggi di teras XVI-1 dan ²³⁸U lebih tinggi di teras XVI-2. Karena itu, pengkayaan yang didefinisikan sebagai $(^{235}\text{U}+^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu})/(\text{U}+\text{Pu})$ menghasilkan nilai 15%, 10% dan 13% masing-masing untuk teras XVI-1, XVI-2 dan XVII-1.

Karakteristik utama teras *benchmark* FCA lainnya adalah:

- Teras XVI-1 dan XVI-2 dimuati oleh pelat-pelat Zirkonium untuk mensimulasikan paduan (Pu, U)Zr.
- Teras XVI-1 dan XVI-2 dibentuk oleh pelat-pelat sodium (Na) yang jumlahnya 25% lebih banyak daripada XVII-1 untuk mensimulasikan ikatan sodium (*sodium bond*) yang dimuatkan ke dalam *pin* bahan bakar.

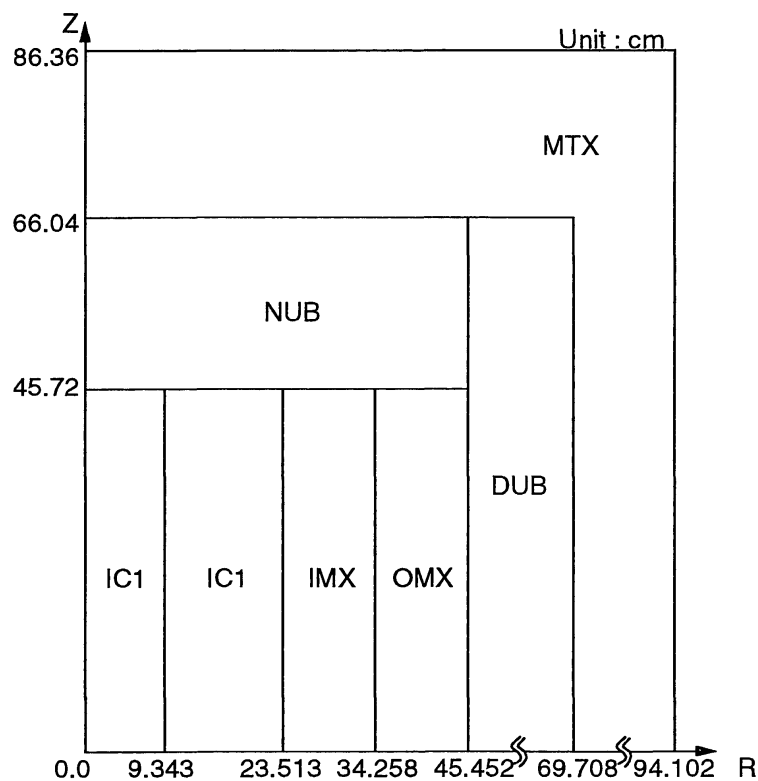
Teras XVI-1 dan XVI-2 menggunakan blok uranium (NUB, natural uranium block) sedangkan XVII-1 memanfaatkan pelat-pelat uranium susut kadar (DUO_2 , *depleted uranium oxide*) dan pelat-pelat sodium (Na) sebagai *blanket* aksial.

METODOLOGI PENELITIAN

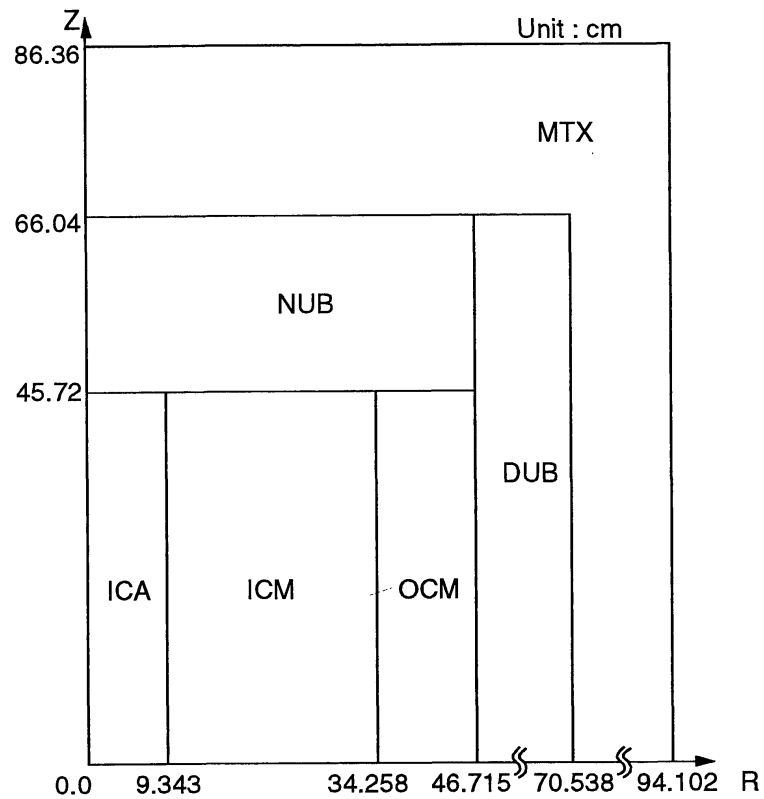
Peehitungan Kritikal

Kritikalitas teras *benchmark* FCA dicapai ketika batang-batang kendali dimasukkan penuh ke dalam teras. Batang kendali terdiri dari pelat-pelat uranium yang diperkaya (EU). Rak-rak IC2 di teras XVI-1 yaitu IC2R dan IC2L

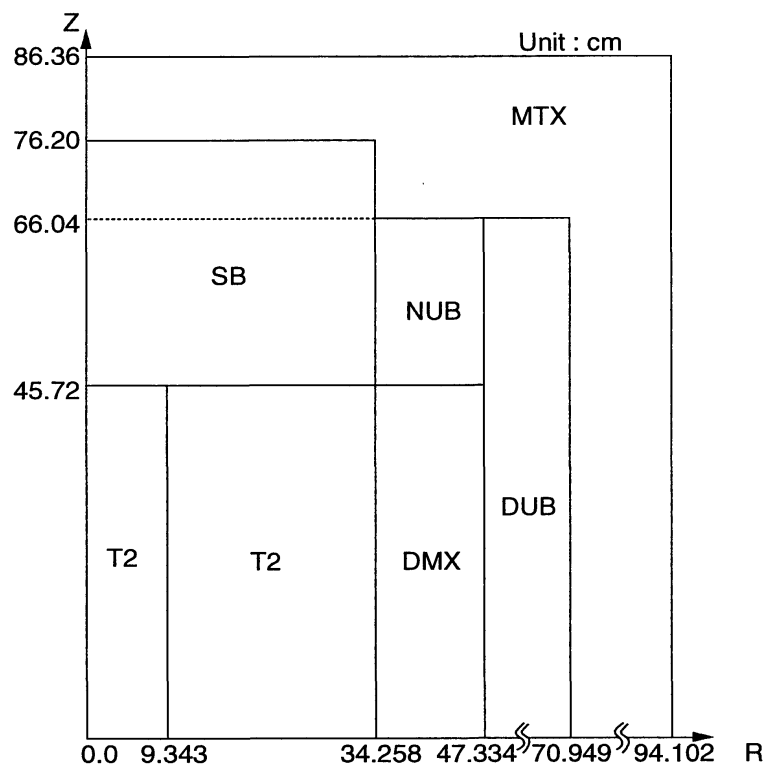
memiliki susunan pelat yang tidak simetris seperti diperlihatkan dalam konfigurasi teras dalam Gambar 1(a). Pengaruh dari rak yang tidak simetris terhadap kritikalitas (k_{eff}) ini telah dievaluasi secara eksperimental dan hasilnya diestimasi sekitar $0,02\% \Delta k/k$. Teras FCA XVI-2 mencapai kondisi kritis dengan rak OC2 sebanyak 48 buah di bagian *fixed-half of assembly* dan 47 buah di bagian *movable-half of assembly*. Pengaruh dari ketidaksimetrisan ini terhadap k_{eff} juga dievaluasi secara eksperimental dan hasilnya sekitar $0,1\% \Delta k/k$.



Gambar 3a. Model perhitungan 2-D R-Z teras FCA XVI-1.



Gambar 3b. Model perhitungan 2-D R-Z teras FCA XVI-2.



Gambar 3c. Model perhitungan 2-D R-Z teras FCA XVII-1.

Perhitungan kritikalitas teras FCA dikerjakan dengan program transport Monte Carlo MCNP-4C dalam geometri reaktor 2-D R-Z seperti diperlihatkan dalam Gambar 3(a)-(c). Di teras XVI-1, rak IC1 dan IC2 dalam Gambar 1(a) dihomogenisasi menjadi daerah IMX seperti diperlihatkan dalam Gambar 3(a). Hal yang sama dikerjakan juga di teras XVI-1, yaitu rak OC1, OC2 dan SCR (batang kendali/

pengaman) dihomogenisasi menjadi daerah OMX. Di teras XVI-2 dalam Gambar 1(b), rak ICA dan ICB dihomogenisasi menjadi ICM serta rak OC1, OC2 dan SCR dihomogenisasi menjadi OCM seperti ditunjukkan dalam Gambar 3(b). Di teras XVII-1 dalam Gambar 1(c), rak PD, UD dan SCR dihomogenisasi menjadi DMX seperti dilukiskan dalam Gambar 3(c). Densitas atom teras FCA pada Tabel 2.

Tabel 2. Densitas atom teras benchmark FCA (10^{22} atom/cm³).

XVI-1	IC1	IMX	OMX	NUB	DUB	MTX
H	1,5958E-4	1,2284E-4	1,4104E-4	-	-	-
B-10	-	-	-	-	-	-
B-11	-	-	-	-	-	-
C	1,3393E-4	1,0310E-4	1,1837E-4	-	-	-
O	7,7094E-5	6,1185E-5	6,5948E-5	-	-	-
Na	9,5705E-3	9,5705E-3	8,7383E-3	-	-	-
Al	1,4997E-4	1,4997E-4	1,5652E-3	-	-	-
Si	1,9671E-5	1,9671E-5	1,1974E-5	-	-	-
Cr	3,7118E-3	3,7118E-3	3,5997E-3	1,8101E-3	1,8101E-3	1,2290E-3
Mn	2,7741E-4	2,7741E-4	2,6722E-4	1,2001E-4	1,2001E-4	8,2000E-5
Fe	1,3414E-2	1,3414E-2	1,2987E-2	6,4727E-3	6,4727E-3	4,3930E-3
Ni	1,7030E-3	1,7030E-3	1,6412E-3	7,8944E-4	7,8944E-4	5,3600E-4
Zr	2,0906E-3	2,0906E-3	1,2725E-3	-	-	-
U-235	5,4285E-4	5,4298E-4	2,1119E-3	2,8968E-4	8,4422E-5	-
U-238	9,2592E-3	9,2596E-3	8,8355E-3	3,9888E-2	4,0174E-2	-
Pu-239	1,0455E-3	1,0455E-3	6,3641E-4	-	-	-
Pu-240	9,1348E-5	9,1348E-5	5,5603E-5	-	-	-
Pu-241	3,7932E-6	3,7932E-6	2,3089E-6	-	-	-
Pu-242	8,0368E-7	8,0368E-7	4,8920E-7	-	-	-
Am-241	4,8581E-6	4,8581E-6	2,9571E-6	-	-	-

XVI-2	ICA	ICM	OCM	NUB	DUB	MTX
H	1,0277E-4	1,2302E-4	2,0170E-4	-	-	-
B-10	-	-	-	-	-	-
B-11	-	-	-	-	-	-
C	8,6256E-5	1,0325E-4	1,6928E-4	-	-	-
O	5,2498E-5	6,1268E-5	8,7356E-5	-	-	-
Na	9,5705E-3	9,5705E-3	8,8343E-3	-	-	-
Al	1,4997E-4	1,4997E-4	1,3731E-3	-	-	-
Si	1,9671E-5	1,9671E-5	9,0790E-6	-	-	-
Cr	3,7118E-3	3,7118E-3	3,5612E-3	1,8101E-3	1,8101E-3	1,2290E-3
Mn	2,7741E-4	2,7741E-4	2,6442E-4	1,2001E-4	1,2001E-4	8,2000E-5
Fe	1,3414E-2	1,3414E-2	1,2841E-2	6,4727E-3	6,4727E-3	4,3930E-3
Ni	1,7030E-3	1,7030E-3	1,6225E-3	7,8944E-4	7,8944E-4	5,3600E-4
Zr	2,0906E-3	2,0906E-3	-	-	-	-
U-235	7,0716E-5	7,0716E-5	3,3036E-3	2,8968E-4	8,4422E-5	-
U-238	9,7531E-3	9,7531E-3	9,5433E-3	3,9888E-2	4,0174E-2	-
Pu-239	1,0455E-3	1,0455E-3	4,8255E-4	-	-	-
Pu-240	9,1348E-5	9,1348E-5	4,2160E-5	-	-	-
Pu-241	3,6436E-6	3,6436E-6	1,6816E-6	-	-	-
Pu-242	8,0368E-7	8,0368E-7	3,7093E-7	-	-	-
Am-241	5,0077E-6	5,0077E-6	2,3112E-6	-	-	-
XVII-1	T2	DMX	SB	NUB	DUB	MTX
H	-	1,0608E-4	6,6199E-5	-	-	-
B-10	-	-	-	-	-	-
B-11	-	-	-	-	-	-
C	-	8,9032E-5	5,5560E-5	-	-	-
O	1,7038E-2	1,2295E-2	1,7066E-2	-	-	-
Na	7,6563E-3	7,0995E-3	7,6563E-3	-	-	-
Al	2,3188E-3	9,4365E-3	2,1688E-3	-	-	-
Si	1,9671E-5	1,0730E-5	-	-	-	-
Cr	3,3850E-3	3,2810E-3	3,1174E-3	1,8101E-3	1,8101E-3	1,2290E-3
Mn	2,5007E-4	2,4091E-4	2,2939E-4	1,2001E-4	1,2001E-4	8,2000E-5
Fe	1,2226E-2	1,1827E-2	1,1217E-2	6,4727E-3	6,4727E-3	4,3930E-3
Ni	1,5471E-3	1,4897E-3	1,4131E-3	7,8944E-4	7,8944E-4	5,3600E-4
Zr	-	-	-	-	-	-
U-235	1,3954E-5	2,6372E-3	3,1633E-5	2,8968E-4	8,4422E-5	-
U-238	6,8690E-3	5,5064E-3	9,3075E-3	3,9888E-2	4,0174E-2	-
Pu-239	1,0455E-3	5,7029E-4	-	-	-	-
Pu-240	9,1348E-5	4,9826E-5	-	-	-	-
Pu-241	3,4442E-6	1,8786E-6	-	-	-	-
Pu-242	8,0368E-7	4,3837E-7	-	-	-	-
Am-241	5,2071E-6	2,8402E-6	-	-	-	-

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan MCNP-4C didasarkan pada eksperimen kritikalitas di tiga teras benchmark FCA. Seluruh perhitungan menggunakan 10.000 histori neutron per siklus untuk 250 siklus aktif dengan 50 siklus pertama *diskip* untuk menghindari problema konvergensi sumber. Sumber fisi awal stabil diletakkan di daerah IC1, ICA dan T2 masing-masing untuk teras FCA XVI-1, XVI-2 dan XVII-1. Analisis dikerjakan dengan pustaka tampang lintang energi kontinu ENDF/B-VI pada temperatur ruang untuk seluruh nuklida kecuali ^{24}Cr , ^{26}Fe dan ^{28}Ni . Tampang lintang ^{24}Cr dan ^{28}Ni diambil dari pustaka ENDF/B-V sedangkan ^{26}Fe dari RMCCS. Data hamburan neutron termal $S(\alpha, \beta)$ yang digunakan untuk mempertimbangkan efek kimia air ringan, benzena, grafit dan lain-lain sebagai moderator untuk energi di bawah ~ 4 eV tidak dimasukkan dalam perhitungan karena FCA tidak memiliki

moderator. Kondisi batas vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem perangkat kritik.

Hasil perhitungan kritikalitas teras benchmark FCA dengan MCNP-4C dan komparasinya dengan data eksperimen diperlihatkan dalam Tabel 3. Prediksi kritikalitas (k_{eff}) MCNP-4C di teras metalik (XVI-1 dan XVI-2) masing-masing berada 0,54% dan 0,48% di bawah estimasi. Prediksi kritikalitas (k_{eff}) MCNP-4C di teras MOX (XVII-1) memperlihatkan kesesuaian yang paling baik dengan data eksperimen dimana nilai $C/E = 0,99995$. Spektrum neutron teras MOX yang lebih lunak daripada yang dimiliki teras metalik diperkirakan mempengaruhi hasil perhitungan MCNP-4C lebih baik di teras MOX dibandingkan di teras metalik, namun studi lebih lanjut masih diperlukan untuk membuat analisis dan evaluasi yang lebih detil dan rinci.

Tabel 3. Hasil perhitungan kritikalitas dengan MCNP-4C dan komparasinya dengan data eksperimen.

Teras FCA		Data Eksperimen	Perhitungan MCNP-4C
XVI-1	k_{eff}	$1,0041 \pm 0,0002$	$0,99868 \pm 0,00037$
	C/E		0,99460
XVI-2	k_{eff}	$1,0045 \pm 0,0002$	$0,99971 \pm 0,00037$
	C/E		0,99523
XVII-1	k_{eff}	$1,0036 \pm 0,0002$	$1,00355 \pm 0,00036$
	C/E		0,99995

KESIMPULAN

Studi perhitungan benchmark kritikalitas teras metalik dan MOX di FCA telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP-4C dan pustaka tampang lintang neutron energi kontinu ENDF/B-VI pada temperatur ruang.

Prediksi kritikalitas (k_{eff}) MCNP-4C di teras metalik (XVI-1 dan XVI-2) masing-masing berada 0,54% dan 0,48% di bawah estimasi. Prediksi kritikalitas (k_{eff}) MCNP-4C di teras MOX (XVII-1) memperlihatkan kesesuaian yang paling baik dengan data eksperimen dimana nilai C/E = 0,99995.

Secara umum dapat disimpulkan bahwa perhitungan MCNP-4C dalam eksperimen benchmark kritikalitas FCA menunjukkan akurasi yang cukup tinggi baik di teras metalik maupun MOX.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Ir. Suharno, M.Sc. atas dukungan dan sarannya yang sangat membantu dan bermanfaat. Komentar, saran dan koreksi dari Dr. Ferhat Aziz, M.Sc. yang sangat berarti dalam perbaikan makalah ini, sungguh kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. S. IIJIMA, H. OIGAWA, T. SAKURAI, T. NEMOTO and S. OKAJIMA, "Benchmark Experiment for Physics Parameters of Metallic-Fueled LMFBR at FCA", Proceedings of the International Conference on the Physics of Reactors (PHYSOR'96), Mito, Japan, Vol. 2, p. E-46–E-55, September 16-20, 1996
- [2] H. OIGAWA, S. IIJIMA, T. SAKURAI, S. OKAJIMA, M. ANDOH, T. NEMOTO, Y. KATO and T. OSUGI, "A Proposal of Benchmark Calculation on Reactor Physics for Metallic Fueled and MOX Fueled LMFBR Based upon Mock-up Experiment at FCA", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 37, No. 2, p. 186-201, February 2000
- [3] J.F. BRIESMEISTER, *ed.*, "MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C", LA-13709-M, April 2000
- [4] J.S. HENDRICKS, S.C. FRANKLE, J.D. COURT, "ENDF/B-VI Data for MCNP", Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994