

Analisis Keselamatan Kritikalitas Teras Silindris Stacy dengan Perhitungan Transport Monte Carlo

Zuhair

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN
Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong, Tangerang 15310

Diterima 4 Agustus 2012, direvisi 28 November 2012

ABSTRAK

Serangkaian eksperimen telah dilakukan di fasilitas STACY dan banyak parameter fundamental larutan uranil nitrat pengkayaan rendah didapatkan. Kritikalitas merupakan salah satu parameter utama dalam prediksi karakteristik neutronik eksperimen STACY selain reaktivitas level larutan, reaktivitas void, parameter kinetik dan reaktivitas temperatur yang mendominasi fenomena *transient* dalam kondisi abnormal. Eksperimen kritikalitas yang dikerjakan di teras STACY menggunakan larutan uranil nitrat berpengkayaan ^{235}U 9,97% dengan tangki silindris berdiameter 80cm dan tinggi 150cm. Sebanyak 8 konfigurasi kritis STACY dalam kondisi tanpa reflektor (*unreflected*) dan dengan reflektor air (*water-reflected*) dipilih dalam makalah ini untuk perhitungan keselamatan kritikalitas dengan program transport Monte Carlo MCNPX. Untuk seluruh konfigurasi, perhitungan MCNPX memperlihatkan konsistensi yang baik dengan kecenderungan memproduksi *keff* di bawah estimasi. Bias perhitungan dengan data eksperimen (*keff* = 1) untuk konfigurasi dengan reflektor air, yakni 0,01-0,18%, sedikit lebih baik dibandingkan untuk konfigurasi tanpa reflektor (0,14-0,41%). Hasil perhitungan MCNPX yang lebih baik daripada prediksi MCNP-4C menyimpulkan bahwa, MCNPX lebih layak diaplikasikan dalam analisis keselamatan kritikalitas larutan uranil nitrat di fasilitas daur bahan bakar nuklir komersial.

Kata kunci: kritikalitas, larutan uranil nitrat, STACY, teras silindris, MCNP-4C, MCNPX.

ABSTRACT

A set of experiment has been done at STACY facility and many fundamental parameters of uranyl nitrate solution have been found out. Criticality is one of main parameters in predicting neutronic characteristic of STACY experiment beside solution level reactivity, void reactivity, kinetic parameter and temperature reactivity which dominates transient phenomenon in abnormal condition. Criticality experiment performed at STACY core uses 9.97% ^{235}U -enriched uranyl nitrate solution with 80-cm-diameter cylindrical and 150-cm-height tank. Eight critical configurations in unreflected and water-reflected conditions were selected in this paper for criticality safety calculation with Monte Carlo transport code MCNPX. For all configurations, MCNPX calculations show good consistency with the trend of producing underestimated *keff*. Calculation biases with experimental data (*keff* = 1) for water-reflected configurations, i.e. 0.01-0.18%, were slightly better than those of unreflected configurations (0.14-0.41%). MCNPX calculation results which are better than the prediction of MCNP-4C concludes that MCNPX is more eligible to be applied to criticality safety analysis of uranyl nitrate solution in commercial nuclear fuel cycle facility.

Key word: criticality, uranyl nitrate solution, STACY, cylindrical core, MCNP-4C, MCNPX.

PENDAHULUAN

*Corresponding author :
E-mail: zuhairbasjmeleh@yahoo.com

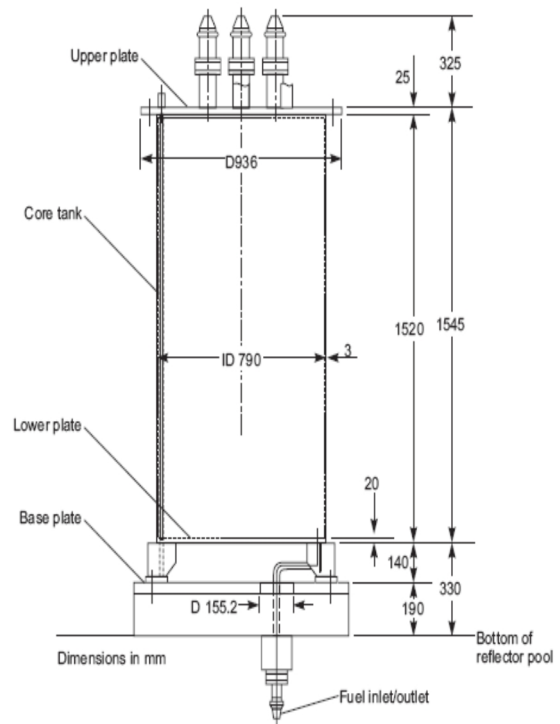
Data kritikalitas fundamental dari larutan uranil nitrat pengkayaan rendah sangat penting

untuk menguji validitas program komputasi dan data nuklir yang digunakan dalam desain keselamatan kritikalitas fasilitas daur bahan bakar nuklir. Fasilitas kritik eksperimen statik (*static experiment critical facility*) STACY [1] dibangun untuk mengakumulasi data kritikalitas secara sistematis guna mengevaluasi batasan desain neutronik keselamatan kritikalitas fasilitas daur bahan bakar nuklir seperti fasilitas pemrosesan-ulang bahan bakar bekas reaktor air ringan.

Sejak kritikalitas pertama dicapai pada 23 Februari 1995, serangkaian eksperimen telah dilakukan di fasilitas STACY dan banyak parameter fundamental larutan uranil nitrat pengkayaan rendah didapatkan. Kritikalitas merupakan salah satu parameter utama dalam prediksi karakteristik neutronik eksperimen STACY selain reaktivitas level larutan, reaktivitas void, parameter kinetik dan reaktivitas temperatur yang mendominasi fenomena *transient* dalam kondisi abnormal. Eksperimen kritikalitas yang dikerjakan di teras STACY menggunakan larutan uranil nitrat berpengkayaan 235U 9,97% dengan tangki silindris berdiameter 80 cm dan tinggi 150 cm [2-4]. Sebanyak 8 konfigurasi kritis STACY dalam kondisi tanpa reflektor (*unreflected*) dan dengan reflektor air (*water-reflected*) dipilih dalam makalah ini untuk perhitungan keselamatan kritikalitas dengan program transport Monte Carlo MCNPX [5].

Program MCNPX dipilih karena merupakan salah satu program paling populer dan *powerful* dalam analisis keselamatan kritikalitas berbagai jenis reaktor dengan berbagai tipe bahan bakar, spektrum energi dan geometri. Kapabilitas dan reliabilitasnya yang tinggi dalam akurasi prediksi kritikalitas reaktor dengan berbagai tipe bahan bakar, spektrum energi dan geometri. Konsentrasi uranium dalam larutan bahan bakar bervariasi dari 194 hingga 243gU/l untuk kondisi tanpa reflektor dan kondisi dengan reflektor air. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI [6] dimanfaatkan dan komparasi dengan hasil perhitungan MCNP-4C [7,8] dilakukan untuk melengkapi analisis keselamatan kritikalitas.

Deskripsi HTR *Pebble Bed*. STACY adalah perangkat kritik berdaya termal maksimum 200W yang menyediakan berbagai eksperimen fisika reaktor. Fasilitas ini dioperasikan oleh Japan Atomic Energy Agency (JAEA) dan menggunakan larutan uranil nitrat [UO₂(NO₃)₂], plutonium nitrat [Pu(NO₃)₄] atau campuran keduanya [Pu(NO₃)₄- UO₂(NO₃)₂]. Diagram skematik STACY seperti diperlihatkan dalam Gambar 1 terdiri atas tangki teras yang berisi larutan bahan bakar, sistem pemindah larutan, sistem penanganan larutan dan sistem penyimpanan. Reaktivitas teras dikendalikan dengan mengatur level larutan dalam tangki teras. Larutan bahan bakar dipompa ke dalam teras dari dasar tangki teras melalui pipa berdiameter luar 27,2 mm dengan ketebalan 3,4 mm dari dasar tangki teras. Tangki teras, yang terbuat dari *stainless steel* SUS304L dengan tebal di bagian sisi, bawah dan atas masing-masing adalah 3 mm, 20 mm dan 25 mm, berbentuk silinder dengan diameter dalam 790 mm dan tinggi sekitar 1.500 mm.



Gambar 1. Diagram skematik teras silindris STACY.

Tangki teras disokong oleh empat lengan (*leg of core tank*) *stainless steel* dengan tinggi 140 mm dan berdiri di atas pelat bawah (*base plate*) *stainless steel* yang memiliki panjang 1.000 mm, lebar 1.000 mm dan tebal 30 mm. Pelat bawah ini berada di ketinggian 160 mm di atas dasar tangki kolam kosong. Tangki teras di bagian atas disokong oleh pelat atas (*upper plate*) *stainless steel* yang memiliki ukuran sama seperti pelat bawah.

Tangki teras secara vertikal disisipi oleh tabung untuk termokopel yang berfungsi mengukur temperatur larutan. Empat batang kendali pengaman (*safety rod*) dan alat pengukur level larutan (*level gauge*) ditempatkan di bagian atas tangki teras. *Level gauge* berperan sebagai pengukur ketinggian larutan bahan bakar selama operasi reaktor. Batang kendali pengaman berbentuk silinder dan terbuat dari pelet boron karbida (B4C) yang dilapisi kelongsong *stainless steel* SUS304. Dalam posisi terangkat penuh, bagian bawah batang kendali pengaman berada 1.850 mm di atas dasar tangki teras sedangkan dalam posisi terinsersi penuh, bagian bawah batang kendali pengaman berada 50 mm di atas dasar tangki teras. Selama operasi reaktor batang kendali pengaman terangkat penuh di atas teras dan hanya digunakan untuk memancing (*shutdown*) reaktor. Sumber neutron Am-Be

diletakkan secara horizontal antara dinding bawah tangki teras dan pelat bawah.

Tangki teras STACY berada dalam tangki kolam *stainless steel* dengan ukuran panjang 4.020 mm, lebar 2.020 mm dan tinggi 2.400 mm. Tebal dinding tangki kolam di bagian sisi dan bawah masing-masing adalah 10 mm dan 15 mm. Dasar tangki teras berada 330 mm di atas dasar tangki kolam.

Tabel 2. Komposisi isotopik uranium.

Isotop	%Berat
234U	0,08
235U	9,97±0,013
236U	0,01
238U	89,94

Tabel 1 memperlihatkan kondisi kritis eksperimen keselamatan kritikalitas. Eksperimen kritikalitas dikerjakan dalam kondisi kolam kosong tidak berisi air dan kolam berisi air yang mengelilingi tangki teras di bagian bawah, sisi dan atas. Air ringan yang bersifat sebagai reflektor ini memiliki level 200 mm di atas atap tangki teras.

Sebanyak 4 konfigurasi kritis STACY tanpa reflektor (*unreflected*) dan 4 konfigurasi dengan reflektor air (*water-reflected*) dipilih untuk analisis ini. Konsentrasi uranium dalam larutan bahan bakar bervariasi dari 194 hingga 243 gU/l untuk kondisi tanpa reflektor dan

Tabel 1. Data eksperimental teras silindris STACY dalam kondisi kritis.

(a) Konfigurasi tanpa reflektor

Konfigurasi	Karakteristik larutan uranil nitrat (25°C)				Ketinggian larutan kritis (cm)
	Konsentrasi U (gU/l)	Molaritas asam (mol/l)	Densitas (g/cm ³)	Temperatur (°C)	
215	243,1±0,5	0,97±0,02	1,3569±0,0004	25,7	43,98±0,02
218	225,7±0,4	0,97±0,02	1,3340±0,0004	25,4	51,33±0,02
221	204,7±0,5	0,99±0,02	1,3060±0,0004	25,3	69,09±0,02
223	193,7±0,5	0,98±0,02	1,2906±0,0004	25,8	95,95±0,02

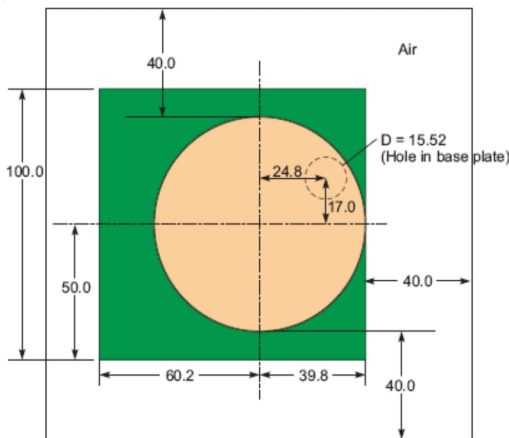
(b) Konfigurasi dengan reflektor air

Konfigurasi	Karakteristik larutan uranil nitrat (25°C)				Ketinggian larutan kritis (cm)
	Konsentrasi U (gU/l)	Molaritas asam (mol/l)	Densitas (g/cm ³)	Temperatur (°C)	
216	243,1±0,5	0,97±0,02	1,3569±0,0005	22,9	41,46±0,02
217	225,5±0,4	0,97±0,02	1,3339±0,0005	23,3	47,87±0,02
220	204,7±0,5	0,99±0,02	1,3060±0,0005	23,6	62,56±0,02
226	193,7±0,5	0,98±0,02	1,2909±0,0005	23,7	81,09±0,02

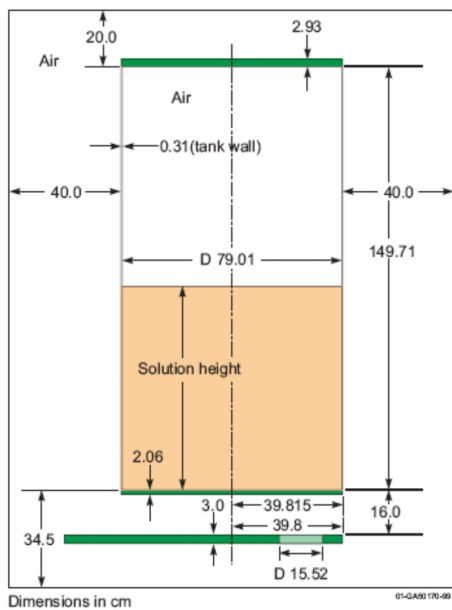
kondisi dengan reflektor air. Molaritas asam nitrat dijaga pada interval 0,97 hingga 0,99 mol/l untuk kedua kondisi kritis. Komposisi isotopik uranium diberikan dalam Tabel 2.

METODE PENELITIAN

Perhitungan keselamatan kritikalitas dikerjakan dengan program MCNPX dan model perhitungan teras silindris STACY ditunjukkan dalam Gambar 2 dan 3.

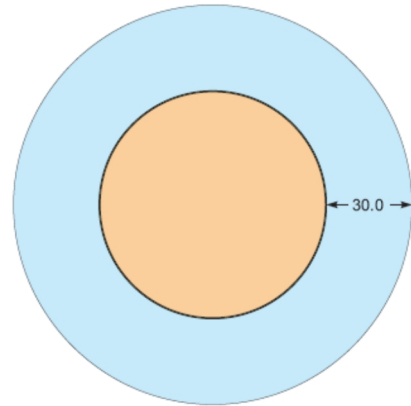


Tampak atas



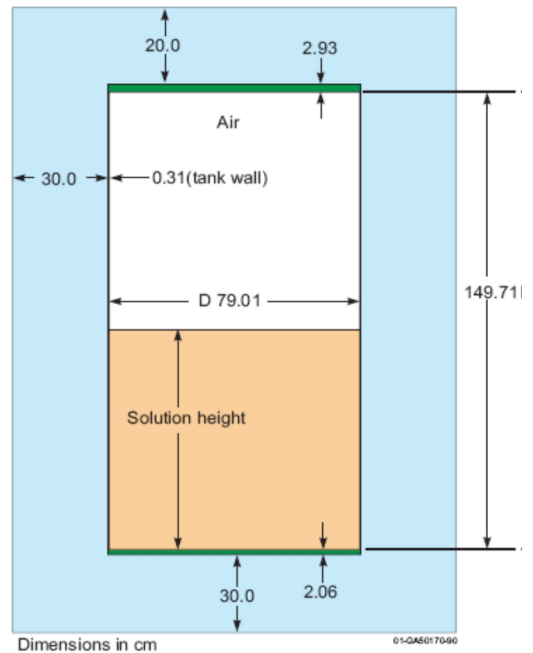
Tampak samping

Gambar 2. Model teras silindris STACY untuk konfigurasi tanpa reflektor.



Steel Uranyl nitrate solution Water

Tampak atas



Tampak samping

Gambar 3. Model teras silindris STACY untuk konfigurasi dengan reflektor air.

Model ini cukup sederhana. Struktur detail dari perangkat STACY dimodelkan sepresisi mungkin sesuai dengan geometri aktual dan spesifikasi sebenarnya. Untuk konfigurasi tanpa reflektor, model hanya terdiri atas larutan uranyl nitrat, tangki teras dan struktur tambahan (pelat bawah) yang memiliki efek refleksi neutron cukup dominan. Tebal pelat bawah ini adalah 3 cm dan permukaan atasnya terletak 13,94 cm di bawah dasar tangki teras. Udara yang mengelilingi

tangki teras dimodelkan memiliki ketebalan 40 cm di bagian sisi, 34,5 di bawah dan 20 cm di atas tangki teras. Untuk konfigurasi dengan reflektor air, model terdiri atas larutan uranil nitrat, tangki teras dan air ringan. Air ringan dimodelkan memiliki ketebalan 30 cm di bagian sisi dan bawah tangki teras serta 20 cm di atas tangki teras.

Struktur dan peralatan di luar tangki teras STACY seperti empat lengan penyokong

tangki teras, enam detektor neutron untuk operasi reaktor, sembilan detektor neutron dan sumber neutron pulsa untuk pengukuran eksperimental, struktur dan peralatan di bagian atas tangki teras, dinding sisi dan bawah tangki kolam, struktur lainnya di luar tangki teras dan lain-lain ditangani sebagai void dan tidak dipertimbangkan dalam perhitungan karena tidak akan mengurangi akurasi prediksi kritikalitas.

Tabel 3. Densitas atom (atom/barn-cm) larutan uranil nitrat (25°C).

(a) Konfigurasi tanpa reflektor							
Konfigurasi	234U	235U	236U	238U	H	N	O
215	5,0042-7	6,2098-5	6,2021-8	5,5312-4	6,0297-2	1,8157-3	3,6535-2
218	4,6460-7	5,7654-5	5,7582-8	5,1353-4	6,0692-2	1,7275-3	3,6380-2
221	4,2137-7	5,2289-5	5,2224-8	4,6575-4	6,1073-2	1,6332-3	3,6175-2
223	3,9873-7	4,9479-5	4,9418-8	4,4072-4	6,1298-2	1,5715-3	3,6050-2
(b) Konfigurasi dengan reflektor air							
Konfigurasi	234U	235U	236U	238U	H	N	O
216	5,0042-7	6,2098-5	6,2021-8	5,5312-4	6,0297-2	1,8157-3	3,6535-2
217	4,6460-7	5,7654-5	5,7531-8	5,1307-4	6,0708-2	1,7265-3	3,6384-2
220	4,2137-7	5,2289-5	5,2224-8	4,6575-4	6,1073-2	1,6332-3	3,6175-2
226	3,9873-7	4,9479-5	4,9418-8	4,4072-4	6,1318-2	1,5715-3	3,6060-2

Tabel 4. Densitas atom (atom/barn-cm) SUS304L, reflektor air dan udara.

<i>Stainless steel SUS304L</i>							
C	4,3736-5	Mn	1,1561-3	S	2,9782-6	Cr	1,6775-2
Si	1,0627-3	P	4,3170-5	Ni	8,3403-3	Fe	5,9421-2
Reflektor air				Udara			
H	6,6658-2	O	3,3329-2	N	3,9016-5	O	1,0410-5

Tabel 5. Hasil perhitungan keselamatan kritikalitas (k_{eff}) teras silindris STACY.

Konfigurasi tanpa reflektor	Perhitungan Transport Monte Carlo		Konfigurasi dengan reflektor air	Perhitungan Transport Monte Carlo	
	MCNP-4C	MCNPX		MCNP-4C	MCNPX
215	k_{eff}	0,9963 ±0,0002	216	k_{eff}	0,9975 ±0,0002
	MCNP-4C /MCNPX	1,0000		MCNP-4C /MCNPX	1,0000
218	k_{eff}	0,9965 ±0,0002	217	k_{eff}	0,9976 ±0,0002
	MCNP-4C /MCNPX	1,0000		MCNP-4C /MCNPX	1,0000
221	k_{eff}	0,9955 ±0,0002	220	k_{eff}	0,9970 ±0,0002
	MCNP-4C /MCNPX	1,0000		MCNP-4C /MCNPX	1,0000
223	k_{eff}	0,9976 ±0,0002	226	k_{eff}	0,9979 ±0,0002
	MCNP-4C /MCNPX	1,0000		MCNP-4C /MCNPX	1,0000

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perhitungan kritikalitas dengan MCNPX, opsi tipikal KCODE dan KSRC harus digunakan. Untuk mendapatkan hasil dengan statistik presisi yang cukup baik, perhitungan dikerjakan dengan mensimulasikan *skipping* 50 siklus pertama dari 250 siklus total dengan jumlah neutron fisi 5.000 per siklus. generasi setelah *skipping* 50 generasi dimana 5.000 neutron fisi disimulasikan dalam setiap generasi. Opsi tipikal KSRC, dimanfaatkan dengan menempatkan sejumlah sumber neutron fisi awal stabil dalam larutan uranil nitrat.

Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI yang tak bergantung pada struktur kelompok energi dimanfaatkan dalam analisis ini untuk seluruh isotop kecuali ^{24}Cr , ^{26}Fe dan ^{28}Ni . Tampang lintang ^{24}Cr dan ^{28}Ni diadopsi dari pustaka ENDF/B-V sedangkan ^{26}Fe dari RMCCS. Data hamburan termal $S(\alpha, \beta)$ yang disediakan MCNPX juga dipertimbangkan dalam perhitungan untuk memodelkan interaksi neutron secara akurat dengan hidrogen dalam air dan dalam larutan pada energi di bawah ~ 4 eV. Kondisi vakum dikenakan pada batas luar dari sistem perangkat kritik STACY.

Temperatur larutan setiap konfigurasi teras tanpa reflektor dan dengan reflektor air bervariasi dari 22,9°C hingga 25,8°C (Tabel 1), sedangkan temperatur yang diadopsi dalam model perhitungan adalah 25°C. Perbedaan temperatur ini dapat diatasi dengan memodifikasiampang lintang MCNP untuk temperatur spesifik yang diminta, namun MCNP juga menyediakan opsi TMP yang akan mengoreksiampang lintang model gas bebas MNCP. Penanganan TMP akan menghasilkan nilai k_{eff} yang lebih baik, tetapi perbedaannya dengan perhitungan tanpa opsi TMP amat sangat tidak berarti sehingga pengaruh perbedaan temperatur antara temperatur eksperimental dan temperatur yang diadopsi dalam perhitungan (25°C), yaitu 0,3-2,1°C, dapat diabaikan.

Tabel 5 merangkum hasil perhitungan keselamatan kritikalitas (k_{eff}) larutan uranil nitrat teras silindris STACY. Dari Tabel ini dapat diamati bahwa, untuk seluruh konfigurasi, perhitungan MCNPX memperlihatkan konsistensi yang baik dengan kecenderungan memproduksi k_{eff} di bawah estimasi. Nilai di bawah estimasi ini diperkirakan lebih disebabkan oleh pengabaian refleksi neutron dari struktur di luar tangki teras daripada perbedaan temperatur yang diadopsi dalam perhitungan.

Seperti perhitungan yang dihasilkan oleh MCNP-4C, bias perhitungan MCNPX dengan data eksperimen ($k_{\text{eff}} = 1$) untuk konfigurasi dengan reflektor air, yakni 0,01-0,18%, sedikit lebih baik dibandingkan untuk konfigurasi tanpa reflektor (0,14-0,41%). Hasil perhitungan MCNPX lebih baik daripada prediksi MCNP-4C yang memperlihatkan bias dengan data eksperimen ($k_{\text{eff}} = 1$) sebesar 0,21-0,30% untuk konfigurasi dengan reflektor air dan 0,24-0,45% untuk konfigurasi tanpa reflektor. Namun secara umum dapat dikatakan perhitungan MCNPX dan MCNP-4C, yang walaupun sedikit lebih kecil 0,01-0,26% dari MCNPX, memberikan hasil dengan akurasi yang cukup tinggi. Akurasi yang dicapai dalam perhitungan ini tidak lepas dari peranan pustakaampang lintang ENDF/B-VI, khususnyaampang lintang tangkapan ^{235}U dalam jangkauan energi resonansi danampang lintang (n, p) dari ^{14}N di daerah energi termal [9].

KESIMPULAN

Analisis keselamatan kritikalitas teras silindris STACY telah dilakukan dengan perhitungan transport Monte Carlo. Untuk seluruh konfigurasi, perhitungan MCNPX memperlihatkan konsistensi yang baik dengan kecenderungan memproduksi k_{eff} di bawah estimasi.

Bias perhitungan dengan data eksperimen ($k_{\text{eff}} = 1$) untuk konfigurasi dengan reflektor air, yakni 0,01-0,18%, sedikit lebih baik

dibandingkan untuk konfigurasi tanpa reflektor (0,14-0,41%).

Hasil perhitungan MCNPX yang lebih baik daripada prediksi MCNP-4C menyimpulkan bahwa, MCNPX lebih layak diaplikasikan dalam analisis keselamatan kritikalitas larutan uranyl nitrat di fasilitas daur bahan bakar nuklir komersial.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yoshihiro Miyoshi (Sep 20-24, 1999), Experimental Program of STACY for Criticality Safety Research on Low Enriched Uranyl and Plutonium Nitrate Solution, *Proceedings of The Sixth International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC'1999)*, Versailles, France, **2**, 512.
- [2] Yuichi Yamane, Yoshihiro Miyoshi, Shouichi Watanabe, *et al.* (2003), Critical Experiments on 10% Enriched Uranyl Nitrate Solution using 80-cm Diameter Cylindrical Core, *Journal of Nuclear Technology*, **141**[221].
- [3] Kotaro Tonoike, Yoshihiro Miyoshi, and Toshihiro Yamamoto (2002), Kinetic Parameter $\beta_{\text{eff}}/\lambda$ Measurement on Low Enriched Uranyl Nitrate Solution with Single Unit Cores (600 \emptyset , 280T, 800 \emptyset) of STACY, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **39**[11], 1227.
- [4] Yoshihiro Miyoshi, Toshihiro Yamamoto, Kotaro Tonoike, Yuichi Yamane, Shouichi Watanabe (Oct 20-24, 2003), Critical Experiments on STACY Homogeneous Core Containing 10% Enriched Uranyl Nitrate Solution, *Proceedings of The Seventh International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNC'2003)*, Tokai, Japan.
- [5] J.S. Hendricks, G.W. McKinney, *et al.* (Apr 11, 2008), *MCNPX 2.6.0 Extensions*, LA-UR-08-2216, Los Alamos National Laboratory.
- [6] J.S. Hendricks, S.C. Frankle, J.D. Court (1994), *ENDF/B-VI Data for MCNP*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891.
- [7] J.F. Briesmeister, *ed.* (Apr 2000), *MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*, LA-13709-M.
- [8] Zuhair, Suwoto, Tagor M. Sembiring (15 Sep 2005), Perhitungan Transport Monte Carlo dalam Keselamatan Kritikalitas Teras Silindris STACY, *Prosiding Seminar Nasional Ke-11 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir*, Malang.
- [9] Japanese Nuclear Data Committee (2002), Activity Report of Japanese Nuclear Data Committee in Period of April 1999 to March 2001, *Nihon-Genshiryoku-Gakkai Shi, Journal of Atomic Energy Society*, Japan, **44**[1], 106.