

Analisis Perhitungan *Benchmark* Keselamatan Kritikalitas Larutan Uranil Nitrat di Teras Slab 280T STACY

Zuhair, Suwoto, dan Suharno

Abstract: Criticality benchmark experiment at STACY critical facility is important for validation of computation technique and nuclear data library used in design of nuclear fuel cycle criticality safety. This paper discusses criticality safety benchmark calculation at STACY facility, which uses uranyl nitrate solution with MCNP-4C Monte Carlo transport code. The continuous energy nuclear data library was utilized in benchmark calculation to complete criticality safety analysis. The MCNP-4C criticality (k_{eff}) prediction indicated overestimated results for all configurations except for configuration 131. The biases of calculation with criticality experiment ($k_{\text{eff}} = 1$) were under 0.26%. Configuration 140 calculation showed the most precisely agreement with C/E value of 1.0001. From these results, it can be concluded that the capability and reliability of MCNP-4C is constantly high in prediction of criticality accuracy for uranyl nitrate solution at STACY 280T slab core.

Keywords: *criticality, uranyl nitrate solution, STACY, slab core, MCNP-4C*

PENDAHULUAN

Data kritikalitas larutan uranil nitrat pengayaan rendah sangat penting untuk memvalidasi teknik komputasi dan pustaka data nuklir yang digunakan dalam desain keselamatan kritikalitas fasilitas daur bahan bakar nuklir. Namun data kritikalitas yang diperoleh secara eksperimental ini hanya sedikit sekali sebelum serangkaian eksperimen sistematis dimulai tahun 1995 di Fasilitas Kritik Eksperimen Statik (*Static Experiment Critical Facility*) STACY[1].

Fasilitas STACY adalah fasilitas kritik berdaya termal maksimum 200W di *Japan Atomic Nuclear Agency* (JAEA) yang menggunakan larutan uranil nitrat, plutonium nitrat dan

campuran keduanya [(Pu+U) nitrat][2]. STACY didesain untuk studi kondisi-kondisi yang mengakibatkan reaksi fisi atau kritikalitas dalam asam nitrat yang mengandung uranium dan plutonium di fasilitas daur bahan bakar nuklir.

Eksperimen kritikalitas STACY dikerjakan di teras 280T dengan tangki *slab* yang memiliki panjang 280 mm, lebar 690 mm dan dikelilingi oleh air sebagai reflektor. Ketinggian kritis larutan uranil nitrat dengan pengayaan 9,97% ^{235}U dicapai di tujuh konfigurasi teras dengan konsentrasi dari 300 gU/l hingga 464 gU/l[3].

Makalah ini membahas perhitungan *benchmark* keselamatan

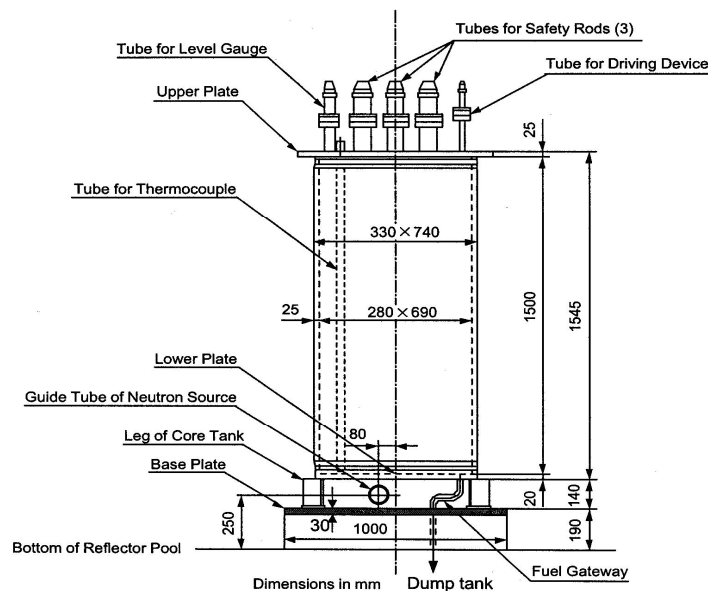
kritikalitas di fasilitas STACY menggunakan larutan uranil nitrat dengan program transport Monte Carlo MCNP-4C[4]. Program MCNP-4C dipilih karena kapabilitas dan reliabilitasnya yang tinggi dalam akurasi prediksi kritikalitas berbagai reaktor. Pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI[5] dimanfaatkan dalam perhitungan *benchmark* untuk melengkapi analisis keselamatan kritikalitas.

METODOLOGI PENELITIAN

Fasilitas STACY terdiri atas tangki teras yang berisi larutan uranil nitrat, sistem pemindah larutan, sistem penanganan larutan dan sistem penyimpanan. Reaktivitas teras dikendalikan dengan mengatur level

larutan dalam tangki teras. Pada awal operasi, larutan uranil nitrat dimasukkan ke dalam tangki teras hingga mendekati level di bawah setengah ketinggian kritis yang diprediksi. Setelah itu, larutan uranil nitrat dimasukkan sedikit demi sedikit hingga kondisi kritis tercapai.

Diagram skematik teras 280T STACY diperlihatkan dalam Gambar 1. Tangki teras *slab* 280T terbuat dari *stainless steel* SUS304L berukuran 280 mm × 690 mm di bagian dalam dan 330 mm × 740 mm di bagian luarnya. Ketebalan dinding tangki teras di bagian sisi, bawah dan atas masing-masing adalah 25 mm, 20 mm dan 25 mm. Tinggi tangki teras di bagian dalam adalah 1.500 mm sehingga di bagian luarnya menjadi 1.545 mm.



Gambar 1. Diagram skematik teras slab 280T STACY.

Tangki teras didukung oleh empat lengan *stainless steel* (*leg of core tank*) dengan tinggi 140 mm dan berdiri di atas pelat bawah *stainless steel* (*base plate*) yang memiliki panjang 1.000 mm, lebar 1.000 mm dan tebal 30 mm. Pelat bawah ini berada 160 mm di atas dasar tangki kolam kosong yang tidak terisi air. Tangki teras di bagian atas disokong oleh pelat atas *stainless steel* (*upper plate*) yang memiliki ukuran sama seperti pelat bawah. Sumber neutron eksternal Am-Be dimasukkan ke bawah bagian dasar tangki teras pada awal

operasi. Struktur dan peralatan lainnya dapat dilihat dalam Gambar 1.

Tangki teras ditempatkan dalam tangki kolam berisi air yang berfungsi sebagai reflektor. Dimensi luar tangki kolam yang terbuat dari *stainless steel* adalah panjang 4.020 mm, lebar 2.020 mm dan tinggi 2.400 mm. Dasar tangki teras pada 330 mm di atas dasar tangki kolam. Jarak terdekat antara dinding sisi tangki teras dan permukaan dalam tangki kolam sekitar 530 mm. Eksperimen kritikalitas dikerjakan dalam kondisi kolam berisi air dengan ketinggian 200 mm di atas atap tangki teras.

Tabel 1. Data eksperimental teras 280T STACY dalam kondisi kritis.

Konfigurasi	Tanggal eksperimen	Karakteristik larutan uranil nitrat (25°C)			Ketinggian kritis (cm)	Suhu (°C)
		Konsentrasi U (gU/l)	Molaritas asam (mol/l)	Densitas (g/cm ³)		
105	16.04.97	464,2±0,8	0,852±0,018	1,6462±0,0005	40,09±0,02	23,8
113	07.05.97	429,9±0,8	0,800±0,020	1,5997±0,0005	42,77±0,02	24,8
125	18.06.97	371,9±1,1	0,800±0,020	1,5237±0,0005	51,37±0,02	23,1
129	04.07.97	350,8±0,7	0,800±0,020	1,4957±0,0005	56,96±0,02	23,7
131	10.07.97	328,9±0,6	0,800±0,020	1,4665±0,0005	66,39±0,02	23,4
140	08.10.97	311,4±0,7	0,955±0,015	1,4465±0,0005	81,47±0,02	21,7
196	26.08.98	299,6±0,6	0,965±0,015	1,4318±0,0004	102,34±0,02	22,8

Tabel 2. Komposisi isotopik uranium.

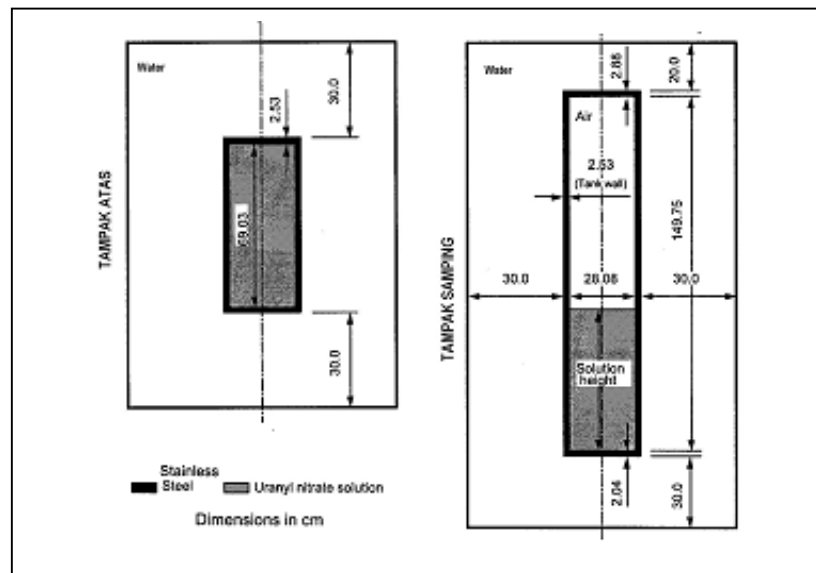
Isotop	% Berat
²³⁴ U	0,08
²³⁵ U	9,97±0,013
²³⁶ U	0,01
²³⁸ U	89,94

Kondisi kritis eksperimen *benchmark* keselamatan kritikalitas dirangkum dalam Tabel 1. Larutan uranil nitrat sendiri terdiri atas uranil nitrat [$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$], asam nitrat [HNO_3] dan air [H_2O]. Konsentrasi larutan uranil nitrat diatur sedemikian rupa sehingga menurun dari 464,2 gU/l menjadi 299,6 gU/l setiap langkah demi langkah eksperimen. Molaritas asam nitrat berada pada interval 0,800 mol/l

hingga 0,965 mol/l. Komposisi isotopik uranium diberikan dalam Tabel 2.

Model Perhitungan *Benchmark*

Model *benchmark* teras 280T STACY dalam perhitungan kritikalitas dengan MCNP-4C diperlihatkan dalam Gambar 2. Model *benchmark* 3-D X-Y-Z ini terdiri atas larutan uranil nitrat, tangki teras dan reflektor air. Ketebalan reflektor air yang berada di sisi dan bawah tangki teras dimodelkan 30 cm sedangkan di atas tangki teras 20 cm.



Gambar 2. Model *benchmark* teras 280T STACY.

Struktur dan peralatan fasilitas 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 tidak dimasukkan dalam perhitungan. Simplifikasi ini tidak akan memperburuk akurasi prediksi kritikalitas karena bagian non-aktif dari teras reaktor.

Densitas atom larutan uranil nitrat ditabulasikan dalam Tabel 3. Densitas *stainless steel* SUS304L adalah 7,93 g/cm³. Densitas atom

stainless steel yang digunakan untuk tangki teras, tangki kolam reflektor air dan struktur material lainnya diberikan dalam Tabel 4.

Tabel 3. Densitas atom (atom/barn-cm) larutan uranil nitrat (25⁰C).

Konfigurasi	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	H	N	O
105	9,5555-7	1,1858-4	1,1843-7	1,0562-3	5,5582-2	2,8647-3	3,8481-2
113	8,8494-7	1,0981-4	1,0968-7	9,7813-4	5,6459-2	2,6597-3	3,8146-2
125	7,6555-7	9,4999-5	9,4881-8	8,4617-4	5,7800-2	2,3658-3	3,7641-2
129	7,2211-7	8,9609-5	8,9498-8	7,9816-4	5,8265-2	2,2589-3	3,7445-2
131	6,7703-7	8,4015-5	8,3910-8	7,4833-4	5,8738-2	2,1480-3	3,7238-2
140	6,4101-7	7,9545-5	7,9446-8	7,0852-4	5,8778-2	2,1527-3	3,7137-2
196	6,1672-7	7,6531-5	7,6435-8	6,8167-4	5,9066-2	2,0989-3	3,7057-2

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

<i>Stainless steel</i>							
C	7,1567-5	Mn	9,9095-4	S	1,0424-5	Cr	1,6725-2
Si	7,1415-4	P	5,0879-5	Ni	8,5600-3	Fe	5,9560-2
Reflektor air				Udara			
H	6,6658-2	O	3,3329-2	N	3,9016-5	O	1,0409-5

Temperatur air model *benchmark* adalah 25⁰C. Densitas air pada temperatur 25⁰C adalah 0,99704 g/cm³ dan derivasi dari densitas ini menghasilkan densitas atom reflektor air yang ditampilkan juga dalam Tabel 4. Udara tersusun atas 76,64 wt% nitrogen dan 23,36 wt% oksigen. Densitas atom udara yang berada di atas larutan uranil nitrat dalam tangki teras dapat dilihat dalam Tabel 4.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perhitungan MCNP-4C, distribusi sumber neutron fisi awal stabil yang dimasukkan dalam *ksrc card* berada dalam larutan uranil nitrat. Sebanyak 50 siklus di-*skip* dari total 250 siklus dengan 5.000 neutron per siklus digunakan dalam *kcode card*. Dengan kata lain, 50 siklus iterasi tak aktif dengan 250.880 *history* neutron dan 200 siklus iterasi aktif dengan

999.510 *history* neutron telah disimulasikan MCNP-4C dalam perhitungan *benchmark* kritikalitas.

Analisis ini, pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI dimanfaatkan untuk seluruh isotop kecuali ^{24}Cr , ^{26}Fe dan ^{28}Ni . Data nuklir ^{24}Cr dan ^{28}Ni diadopsi dari pustaka ENDF/B-V sedangkan ^{26}Fe dari RMCCS. Data hamburan termal $S(\alpha, \beta)$ yang digunakan dalam *mt card* adalah *lwtr.01t*. Data ini untuk melengkapi pertimbangan interaksi neutron termal di bawah energi ~ 4 eV dengan hidrogen dalam air dan dalam larutan uranil nitrat. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem fasilitas kritik.

Seluruh perhitungan dikerjakan dalam temperatur kamar. Temperatur larutan setiap konfigurasi teras bervariasi dari $21,7^{\circ}\text{C}$ hingga $24,8^{\circ}\text{C}$ (Tabel 1), tetapi temperatur yang diadopsi dalam model *benchmark* adalah 25°C . Perbedaan temperatur ini dapat diatasi dengan penanganan termal gas bebas dalam *TMP card* yang akan mengoreksi tampang lintang model gas bebas MCNP. Penanganan *TMP card* akan memberikan nilai k_{eff} yang lebih baik, namun perbedaannya dengan perhitungan tanpa *TMP card* amat sangat kecil sehingga pengaruh perbedaan temperatur ($0,2-3,3^{\circ}\text{C}$) dapat diabaikan.

Tabel 5. Hasil perhitungan *benchmark* kritikalitas (k_{eff}) teras *slab* 280T STACY.

Konfigurasi	Perhitungan MCNP-4C
105	$1,0017 \pm 0,0007$
113	$1,0026 \pm 0,0008$
125	$1,0013 \pm 0,0007$
129	$1,0024 \pm 0,0007$
131	$0,9998 \pm 0,0007$
140	$1,0001 \pm 0,0007$
196	$1,0003 \pm 0,0007$

Hasil perhitungan *benchmark* kritikalitas (k_{eff}) larutan uranil nitrat teras *slab* 280T STACY diberikan dalam Tabel 5. Prediksi kritikalitas

(k_{eff}) MCNP-4C menunjukkan hasil di atas estimasi untuk seluruh konfigurasi kecuali konfigurasi 131. Bias perhitungan dengan eksperimen

kritikalitas ($k_{\text{eff}} = 1$) berada di bawah 0,26%. Perhitungan konfigurasi 140 memperlihatkan kesesuaian yang paling baik dengan nilai $C/E = 1,0001$. Peranan ENDF/B-VI, khususnya tampang lintang tangkapan ^{235}U dalam jangkauan energi resonansi yang relatif kecil dan tampang lintang (n, p) dari ^{14}N di daerah energi termal[6] yang relatif kecil juga, turut menyumbang akurasi prediksi kritikalitas larutan uranil nitrat di teras *slab* 280T STACY.

KESIMPULAN

Eksperimen *benchmark* kritikalitas di fasilitas kritik STACY sangat penting untuk memvalidasi teknik komputasi dan pustaka data nuklir yang digunakan dalam desain keselamatan kritikalitas fasilitas daur bahan bakar nuklir.

Prediksi kritikalitas (k_{eff}) MCNP-4C menunjukkan hasil di atas estimasi untuk seluruh konfigurasi kecuali konfigurasi 131. Bias perhitungan dengan eksperimen kritikalitas ($k_{\text{eff}} = 1$) berada di bawah 0,26%. Perhitungan konfigurasi 140 memperlihatkan kesesuaian yang paling presisi dengan nilai $C/E = 1,0001$.

Dari hasil-hasil ini dapat disimpulkan bahwa kapabilitas dan reliabilitas MCNP-4C tetap tinggi dalam akurasi prediksi kritikalitas larutan uranil nitrat di teras *slab* 280T STACY.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Ir. Tagor M. Sembiring yang menyediakan fasilitas komputasi untuk penelitian ini. Kami sangat menghargai kesediaan waktu, koreksi, saran dan perhatian yang sungguh berarti dari Dr. Ferhat Aziz, M.Sc. dan Ir. B. Bandriyana, M.Si. dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Yoshihiro MIYOSHI, "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, Vol. 2, p. 512, September 20-24, 1999.
- [2]. Yoshihiro MIYOSHI and Takuya UMANO, "Reactor Physics Tests and Benchmark Analyses of STACY", Proceedings of The First NUCEF International Symposium, JAERI-Conf 96-008, p. 23-28, 1996
- [3]. Toshihiro YAMAMOTO, Yoshihiro MIYOSHI, Tsukasa KIKUCHI and Shouichi WATANABE, "Criticality Safety Benchmark Experiment on 10% Enriched Uranyl Nitrate Solution Using a 28-cm-Thickness

- Slab Core”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 39, No. 7, p. 789-799, July 2002
- [4]. J.F. BRIESMEISTER, *ed.*, “MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C”, LA-13709-M, April 2000
- [5]. J.S. HENDRICKS, S.C. FRANKLE, J.D. COURT, “ENDF/B-VI Data for MCNP”, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994
- [6]. Japanese Nuclear Data Committee, “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, Vol. 44, No. 1, p. 106, 2002