

ANALISIS AKURASI PAKET PROGRAM WIMSD-5B/CITATION DALAM PERHITUNGAN KRITIKALITAS REAKTOR MSRE

ACCURATION ANALYSIS OF THE WIMSD-5B/CITATION CODES ON THE CRITICALITY CALCULATION OF THE MSRE REACTOR

S. Permana¹⁾, D.Tamaza¹⁾, H.Sid'qon²⁾

¹⁾Puslitbang Iptekhan Baliitbang – Kementerian Pertahanan, Jl. Jati No.1 Pondok Labu, Jakarta Selatan, 12450

²⁾PT. R95 Naval Architect, Menteng Square Tower A Lt. 3 R.A-029, Jl. Matraman Raya 30E Senen, Jakarta
Email: sigit.permana1974@gmail.com

Diterima 10 Desember 2020, diterima dalam bentuk perbaikan 22 Maret 2021, disetujui 19 April 2021

ABSTRAK

ANALISIS AKURASI PAKET PROGRAM WIMSD-5B/CITATION DALAM PERHITUNGAN KRITIKALITAS REAKTOR MSRE. Paket program WIMSD-5B/CITATION telah digunakan sebagai perangkat analitik kekritisan berbagai jenis reaktor dan memberikan hasil yang memuaskan. Meskipun demikian, paket program ini belum pernah digunakan untuk menganalisis kekritisan reaktor jenis MSR (Molten Salt Reactor). Dalam penelitian ini program WIMSD-5B/CITATION dianalisis akurasi untuk menghitung kritikalitas reaktor MSRE (Molten Salt Reactor Experiment), yaitu reaktor MSR yang pernah dioperasikan sebagai fasilitas eksperimen. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui akurasi WIMSD-5B/CITATION untuk menghitung kritikalitas bahan bakar Tipe C di reaktor MSRE. Kritikalitas teras reaktor MSRE dihitung dengan 6 kelompok energi neutron dengan model geometri R-Z. Hasil perhitungan menunjukkan model sel yang menempatkan celah di tengah grafit (Model 1) lebih baik dibanding dengan sel yang menempatkan celah bahan bakar di luar grafit (Model 2). Namun demikian perbedaan relatif antara hasil perhitungan dan n hasil eksperimen masih tinggi yaitu 7,23%. Akurasi perhitungan kritikalitas didominasi oleh faktor model geometri sel dan teras. Pengaruh signifikan juga bersumber dari data jumlah void dan komposisi pengotor Li-6. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa fluks neutron dan faktor puncak daya radial di teras MSRE sangat sensitif terhadap model sel bahan bakar.

Kata kunci: Reaktor Garam Cair, MSRE, WIMSD-5B, CITATION, kekritisan

ABSTRACT

ACCURATION ANALYSIS OF THE WIMSD-5B/CITATION CODES ON THE CRITICALITY CALCULATION OF THE MSRE REACTOR. The WIMSD-5B / CITATION code has been used as a criticality analytic tool for various types of reactors and the codes give the satisfaction results. However, these codes have never been used to analyze the criticality of MSR type reactors (Molten Salt Reactor). In this study, the accuracy of WIMSD-5B/CITATION calculation result is analyzed in the criticality of the MSRE (Molten Salt Reactor Experiment) reactor, which is an MSR reactor that has been operated as an experimental facility. The objective of this study is to determine the accuracy of the WIMSD-5B/CITATION for calculating the criticality of Type C fuel in the MSRE reactor. The core criticality of the MSRE reactor was calculated using 6 groups of neutron energies using the R-Z geometric model. The calculation results show that the cell model that places the fuel gap in the middle of graphite (Model 1) is better than the cell that places the fuel gap outside the graphite (Model 2). However, the relative difference between the calculation and experimental results was still high, that of 7.23%. The accuracy of criticality calculations is dominated by the cell and core geometry model factors. The significant effect also came from the data on the number of voids and the composition of the Li-6 impurity. The results also showed that the neutron flux and the peak radial power factor in the MSRE core were very sensitive to the fuel cell model.

Keywords: Molten Salt Reactor, MSRE, WIMSD-5B, CITATION, criticality

PENDAHULUAN

Paket program WIMSD-5B [1] dan CITATION [2] adalah paket program yang banyak digunakan untuk perhitungan sel dan teras reaktor. Akurasi kombinasi WIMSD-5B/CITATION dalam perhitungan kritikalitas atau parameter neutronik teras untuk berbagai jenis reaktor telah banyak dipublikasikan [3-6]. Namun demikian, kombinasi kedua paket program ini belum pernah digunakan untuk reaktor jenis *Molten Salt Reactor* (MSR). Kajian kritikalitas reaktor MSR banyak dilakukan dengan paket program berbasis Monte Carlo [7,8]. Meskipun demikian beberapa peneliti ada yang menggunakan metode deterministik [9,10]. Mengingat akurasi kombinasi paket program WIMSD-5B/CITATION telah terbukti, maka ada motivasi yang kuat untuk melakukan kajian akurasi perhitungan kritikalitas dengan kombinasi paket program tersebut untuk reaktor jenis MSR.

MSR adalah jenis reaktor yang menggunakan bahan bakar garam cair (*molten salt fuel*) berbasis uranium atau torium. MSR dapat menggunakan neutron spektrum termal, epitermal dan cepat dalam operasinya [11]. Reaktor MSR dengan neutron spektrum termal, menggunakan grafit sebagai moderator. MSR memiliki temperatur operasi yang tinggi, $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, dengan tekanan yang rendah, 5 bar [11]. Berdasarkan data operasi reaktor, MSR merupakan tipe reaktor yang dapat memanfaatkan torium (Th) secara maksimal [11,12]. Mengingat cadangan Th dunia cukup tinggi, maka reaktor daya jenis MSR menjadi salah satu jenis SMR (*Small Modular Reactor*) yang banyak didesain [12].

Pengembangan MSR dimulai di *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) dengan mengoperasikan *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) pada daya nominal 8 MW (termal) di tahun 1965-1969 [10]. Ada banyak eksperimen, seperti kritikalitas, fluks neutron, parameter kinetik, yang telah dilakukan dan datanya dikumpulkan dalam dokumen laporan operasi. Akan tetapi, beberapa informasi terkait kandungan Li-6 dan densitas material teras memiliki nilai yang berbeda. Demikian juga dengan pemodelan teras yang digunakan dalam perhitungan juga berbeda diantara para peneliti. Makalah ini menyajikan efek perbedaan nilai atau data tersebut dalam perhitungan kritikalitas terpilih di reaktor MSRE dengan WIMSD-5B/CITATION. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi WIMSD-5B/CITATION dalam perhitungan kritikalitas reaktor MSRE dengan variasi model sel bahan bakar.

Kajian hanya dibatasi pada perhitungan kritikalitas yaitu k_{eff} , faktor perlipatan efektif teras. Parameter k_{eff} menggambarkan secara global parameter neutronik suatu reaktor. Oleh karena itu jika k_{eff} akurat maka perhitungan parameter neutronik terkait, seperti fluks neutron atau faktor puncak daya, juga akurat. Dampak model sel bahan bakar terhadap hasil perhitungan fluks neutron dan pembangkitan panas juga disajikan dalam penelitian ini.

Data nuklir yang tersedia di dalam WIMSD-5B sangat lengkap, terutama data tampang lintang neutron untuk temperatur tinggi tersedia sampai 2000 K. Hal ini cocok dengan reaktor tipe MSR yang beroperasi pada temperatur tinggi. Di samping itu, paket program WIMSD-5B menggunakan data nuklir yang relatif baru yaitu ENDF/B-VII.1 [13,14]. Peningkatan akurasi perhitungan dengan ENDF/B-VII.1 telah dipublikasikan dalam penelitian terkait [3, 9,15,16].

Penelitian ini juga menggunakan data nuklir ENDF/B-VII.1 dan model teras seperti yang digunakan oleh ORNL untuk mendapatkan hasil yang akurat. Hasil kegiatan ini memberikan informasi penting bagi peneliti lain dalam kajian reaktor MSR dengan paket program deterministik perhitungan teras dengan difusi neutron seperti CITATION yang konstanta difusinya dari paket program WIMSD-5B. Seperti yang telah diketahui, paket program deterministik memiliki waktu komputasi yang jauh lebih cepat dibanding dengan metode Monte Carlo, sehingga paket program ini masih tetap banyak digunakan oleh para peneliti.

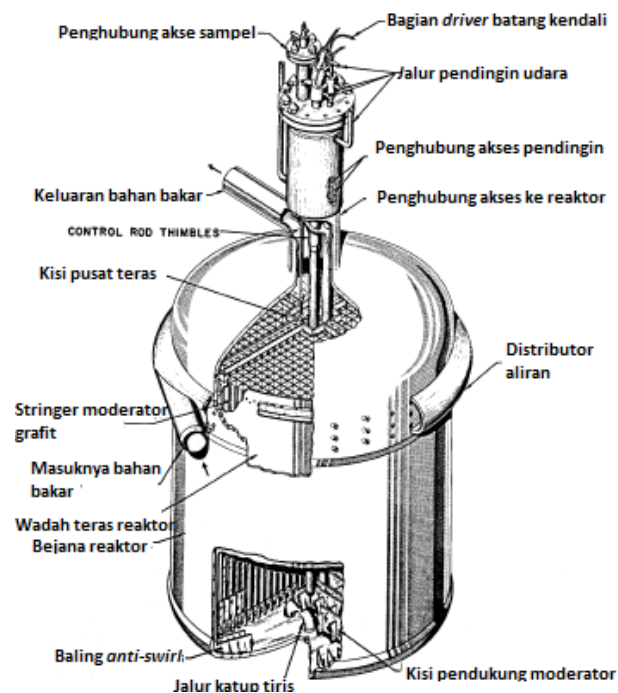
METODOLOGI

MSRE merupakan reaktor MSR fluida tunggal yang mengalir secara kontinyu melalui untai primer dengan spesifikasi tersaji pada Tabel 1 dan Gambar 1 [10,17]. Bahan bakar garam mengalir ke bejana teras yang bermoderator grafit melalui distributor aliran dan menghasilkan spektrum termal. Kemudian, bahan bakar turun ke bawah pada daerah anular (*downcomer*) di antara bejana teras dan can teras. Setelah itu, bahan bakar mengalir ke atas menuju penukar panas melewati kisi perangkat moderator grafit melalui pompa (dengan laju alir 173 kg/s) [10].

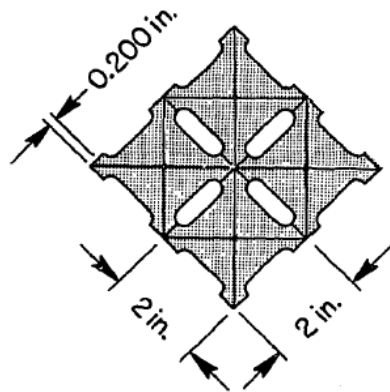
Moderator grafit berbentuk bujur sangkar dengan ukuran 5,08 cm × 5,08 cm dan dengan tinggi total 170,18 cm. Teras reaktor dibentuk dari 513 kisi grafit. Grafit tersebut disusun sedemikian sehingga membentuk teras berbentuk lingkaran. Gambar 2 memperlihatkan celah bahan bakar yang terbentuk dari kumpulan 4 kisi grafit [10,17].

Tabel 1. Parameter desain dan operasi reaktor MSRE [10]

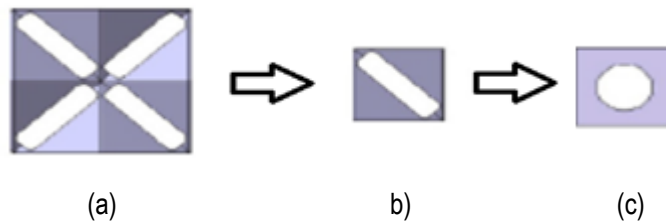
Parameter	MSRE
Daya termal reaktor, MW	8
Bahan bakar, (% mol)	- Tipe A: $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ (70 - 23,7 - 5 - 1 - 0,3) - Tipe B: $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ (66,8 - 29 - 4 - 0 - 0,2) - Tipe C: $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ (65 - 29,2 - 5 - 0 - 0,8)
Pengkayaan, % U-235	- Tipe A : 93 - Tipe B : 93 - Tipe C : 35
Teras Reaktor	
Diameter (D), m	1,4097
Tinggi (H), m	1,626
Kerapatan panas rerata, MW/m ³	14
Temperatur inlet, °C	635
Temperatur outlet, °C	~ 663
ΔT , °C	28
Tekanan, MPa	0,3
Sistem primer	
Laju alir, kg/s	173



Gambar 1. Bejana dan teras reaktor MSRE [10]



Gambar 2. Konfigurasi celah aliran bahan bakar di dalam sel bahan bakar untuk MSR [10]

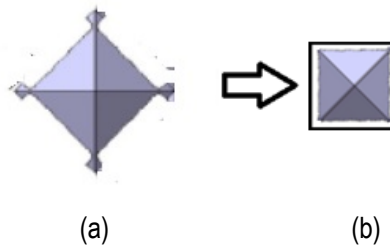


Gambar 3. Penyederhanaan sel bahan bakar MSRE (Model 1)

Analisis dimulai dengan perhitungan sel WIMSD-5B untuk mendapatkan konstanta kelompok difusi neutron untuk CITATION. Sel bahan bakar MSRE (Gambar 2) memiliki bentuk geometri yang kompleks. Bentuk geometri yang tersedia di WIMSD-5B terbatas pada bentuk bujur sangkar (SQUARE) dan lingkaran (ANNULUS), sehingga WIMSD-5B tidak dapat memodelkan sel bahan bakar MSRE secara langsung dan perlu pendekatan volume ekuivalen di setiap bagian geometrinya. Sebagai contoh adalah Model 1 (Gambar 3.c), yaitu model sel dimana celah bahan bakar berbentuk lingkaran dalam bujursangkar grafit. Model 1 dikonversi dari volume ekuivalen sel bahan bakar MSRE (Gambar 3.a) yang diwakili dengan sel tunggal (Gambar 3.b). Dengan demikian volume celah bahan bakar dan grafit di Gambar 3.b identik dengan Gambar 3.c. Sel seperti Gambar 3.c yang menjadi model sel untuk WIMSD-5B.

Pendekatan volume ekuivalen lainnya adalah Model 2, dengan mengambil 1 elemen moderator grafit (Gambar 4.a). Jika diperhatikan, maka celah bahan bakar di luar bujur sangkar grafit. Oleh karena itu, Model 2 menggunakan sel bahan bakar MSRE dijadikan 2 bujur sangkar, dengan bujur sangkar dalam adalah grafit dan bujur sangkar luar adalah celah bahan bakar (Gambar 4.b). Dengan demikian, untuk Model 1, input geometri yang dipakai adalah ANNULUS dan SQUARE sedangkan Model 2 adalah SQUARE. Teras MSRE yang dipilih adalah teras dengan bahan bakar Tipe C (Tabel 1).

Proses penyederhanaan geometri sel bahan bakar MSRE dengan Model 1 diajukan dalam penelitian lain [10] dan menunjukkan bahwa fraksi volume bahan bakar di teras aktif sebesar 22,5% sehingga didapatkan jari-jari lingkaran celah bahan bakar sebesar 1,36 cm dan sisi luar bujur sangkar grafit sebesar 5,08 cm. Pendekatan sel Model 2 juga perlu dilakukan karena jika sel diasumsikan adalah 1 batang grafit, maka tempat untuk celah berada di luar grafit.



Gambar 4. Penyederhanaan sel bahan bakar MSRE (Model 2)

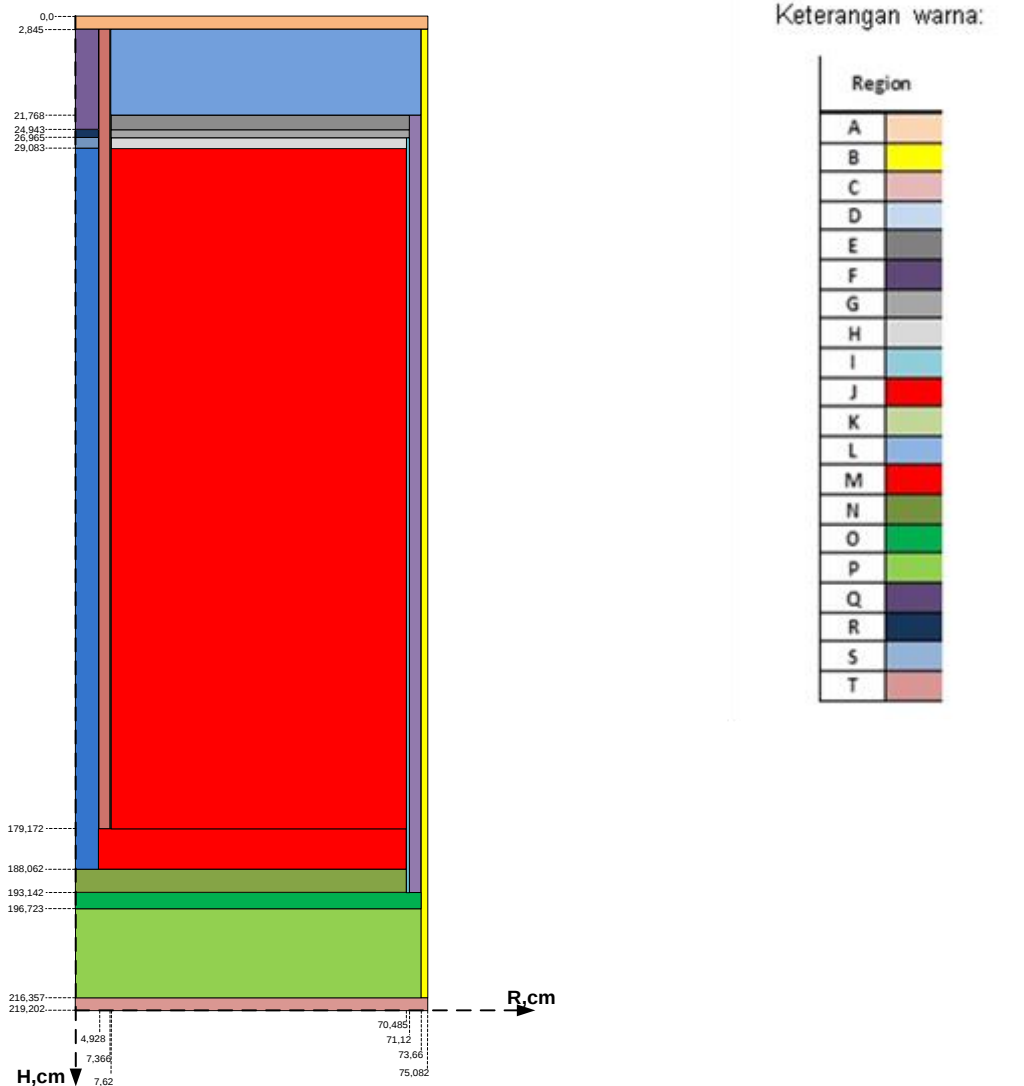
Tabel 2 adalah data komposisi 20 material yang harus dibangkitkan (*generation*) untuk membentuk teras MSRE. Tiap material yang dibangkitkan konstanta kelompok difusinya (tampang lintang makroskopis neutron) dengan WIMSD-5B untuk dipakai dalam perhitungan teras dengan CITATION. Tabel 3 adalah pengelompokan tenaga neutron untuk tiap konstanta kelompok difusi, yaitu dari 69 kelompok kemudian digabung (*collapse*) menjadi 6 kelompok. Posisi dan pembagian geometri dari setiap zona penyusun teras disajikan pada Tabel 4.

Tabel 2. Komposisi di tiap zona dan material Teras MSRE

Zona	Material	Komposisi (% volume)		
		Bahan bakar	Grafit	INOR-8
A	1	0	0	100
B	2	0	0	100
C	3	0	0	100
D	4	100	0	0
E	5	93,7	3,5	2,8
F	6	100	0	0
G	7	94,6	5,4	0
H	8	63,3	36,5	0,2
I	9	0	0	100
J	10	22,5	77,5	0
K	11	0	0	100
L	12	22,5	77,5	0
M	13	22,5	77,5	0
N	14	23,7	76,3	0
O	15	66,9	15,3	17,8
P	16	90,8	0	9,2
Q	17	100	0	0
R	18	89,9	10,1	0
S	19	43,8	56,2	0
T	20	100	0	0

Tabel 3. Batas tenaga neutron untuk generasi konstanta difusi neutron

Kelompok	Batas atas (eV)	Batas bawah (eV)
1	10×10^6	$0,183 \times 10^6$
2	$0,183 \times 10^6$	$5,530 \times 10^3$
3	$5,530 \times 10^3$	148,728
4	148,728	4,0
5	4,0	0,625
6	0,625	1×10^{-5}



Gambar 5. Model R-Z teras reaktor MSRE

Gambar 5 menunjukkan pembagian distribusi zona, dengan teras MSRE dibentuk dalam model R-Z. Paket program difusi neutron dengan banyak kelompok CITATION dilakukan untuk perhitungan teras MSRE. Dalam perhitungan kritikalitas akan dilakukan beberapa analisis sensitivitas akibat adanya beberapa perbedaan data, antara lain:

1. Jumlah % atom Li-6, data ORNL sebesar 0,0074% dan data IRPhEP (*International Reactor Physics Benchmark Experiment Evaluation Project*) sebesar 0,004% [18].
2. Zona K (Tabel 1) di teras diabaikan oleh Tadepalli dkk. [10]
3. Densitas Zona T dikalikan faktor 0,46 [11] karena ada void, sedangkan yang lain mengabaikannya [17].

Ketiga data di atas akan dilihat dampaknya terhadap nilai k_{eff} yang diperoleh untuk sel Model 1 dan jumlah Li-6 sebesar 0,0074%. Sebagai acuan, nilai kritikalitas pada saat eksperimen kritikalitas dengan bahan bakar tipe C (Tabel 1) adalah 0,99976 [17]. Eksperimen kritikalitas dilakukan dengan cara mengisi teras reaktor dengan bahan bakar tipe C.

Tabel 4. Lebar, tinggi dan volume masing-masing region/zona

Zona	Material	Ri, cm	Ro, cm	Hb, cm	Ht, cm	Volume, cm ³
A	1	0,00	75,08	190,30	193,14	5,038E+04
B	2	73,66	75,08	-23,22	190,30	1,419E+05
C	3	0,00	75,08	-26,06	-23,22	5,038E+04
D	4	7,62	73,66	171,37	190,30	3,191E+05
E	5	7,62	71,12	168,20	171,37	4,987E+04
F	6	71,12	73,66	0,00	171,37	1,980E+05
G	7	7,62	71,12	166,45	168,20	2,753E+04
H	8	7,62	70,49	164,06	166,45	3,683E+04
I	9	70,49	71,12	0,00	166,45	4,702E+04
J	10	7,62	70,49	13,97	164,06	2,315E+06
K	11	7,37	7,62	13,97	190,30	2,109E+03
L	12	0,00	4,93	5,08	164,06	1,213E+04
M	13	4,93	70,49	5,08	13,97	1,381E+05
N	14	0,00	70,49	0,00	5,08	7,929E+04
O	15	0,00	73,66	-3,58	0,00	6,105E+04
P	16	0,00	73,66	-23,22	-3,58	3,347E+05
Q	17	0,00	4,93	168,20	190,30	1,686E+03
R	18	0,00	4,93	166,45	168,20	1,337E+02
S	19	0,00	4,93	164,06	166,45	1,821E+02
T	20	4,93	7,37	13,97	190,30	1,661E+04

Catatan : Ri = jari-jari dalam; Ro = jari-jari luar; Hb = tinggi bagian bawah; Ht = tinggi bagian atas; nilai negatif berarti posisi di bawah posisi acuan (0,00 cm)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 5 menyajikan hasil perhitungan kritikalitas (k_{eff}) reaktor MSRE dengan bahan bakar tipe C yaitu dengan pengkayaan U-235 sebesar 35% dan LiF-BeF₂-ZrF₄-ThF₄-UF₄ dengan kandungan 65 – 29,2 – 5 – 0 – 0,8 mol (Tabel 1). Hasil k_{eff} sel bahan bakar dengan Model 1 memberikan nilai yang relatif lebih dekat dengan hasil eksperimen jika dibanding dengan Model 2. Model 1 memiliki perbedaan relatif lebih rendah -7,23%, dibanding eksperimen, sebaliknya Model 2 memiliki perbedaan relatif lebih tinggi 11,54% dibanding eksperimen.

Pengurangan fraksi atom Li-6 dari 0,0074% menjadi 0,004% memberi dampak kenaikan k_{eff} , sehingga perbedaan relatif turun sebesar 0,68% sehingga menjadi -6,55%. Nilai k_{eff} juga naik sebesar 1,19% jika zona K diabaikan dengan cara digabung dengan zona J karena zona K yang tipis. Kemudian, Tabel 5 menunjukkan jika fraksi void tidak ada, maka nilai k_{eff} dapat naik sebesar 2,86%. Dengan demikian, perubahan k_{eff} terbesar terjadi pada saat model sel mengalami perubahan pada fraksi void (0%), kemudian diikuti, peniadaan zona K dan penurunan fraksi atom Li-6.

Model sel dan peniadaan zona K berkaitan dengan pemodelan geometri di perhitungan sel dan teras. Hasil ini menunjukkan efek model geometri sel bahan bakar teras yang sangat menentukan akurasi perhitungan teras. Selain geometri, efek void juga mempengaruhi nilai k_{eff} teras. Mengingat MSR menggunakan bahan bakar garam cair, maka kajian adanya gas selama beroperasi yang dapat menimbulkan void harus dipertimbangkan dalam perhitungan teras reaktor MSR.

Tabel 5. Hasil perhitungan k_{eff}

Sel	%Li-6	Zona K	Fraksi void	Experiment	WIMSD-5B/CITATION	Perbedaan relatif dengan eksperimen
Model 1	0,0074	Ada	0,46	0,99978	0,92753	-7,23%
Model 2	0,0074	Ada	0,46		1,11520	11,54%
Model 1	0,004	Ada	0,46		0,93424	-6,55%
Model 1	0,0074	Tidak ada	0,46		0,93943	-6,04%
Model 1	0,0074	Ada	0,0		0,95622	-4,37%

Perbedaan relatif sebesar -7,23% dengan Model 1 adalah sangat besar. Nilai ini setara dengan 7,230 pcm. Nilai fraksi neutron kasip efektif (β_{eff}) reaktor MSRE adalah 666.1 pcm [19], sehingga perbedaannya sekitar $10,85 \times \beta_{\text{eff}}$. Oleh karena itu, perlu juga dilakukan perbandingan dengan beberapa hasil dari peneliti lain seperti disajikan pada Tabel 6. Ada 3 penelitian terkait perhitungan kritikalitas teras reaktor MSRE yang pernah dilakukan, dengan 2 penelitian menggunakan metode Monte Carlo dan 1 penelitian menggunakan metode deterministik. Tabel 6 menyajikan hasil penelitian lain untuk perhitungan k_{eff} reaktor MSRE dengan bahan bakar Tipe C.

Tabel 6 menunjukkan bahwa metode Monte Carlo tidak menjamin perbedaan dengan eksperimen yang kecil, seperti ditunjukkan dalam hasil Serpent2 dan MCNP terdapat perbedaan sebesar 1,45%. Oleh karena itu, efek *user* dalam memodelkan teras cukup signifikan dalam perhitungan kekritisasi MSRE dengan Metode Monte Carlo. Akan tetapi hasil metode deterministik dengan paket program DYN1D-MSR konsisten dengan hasil WIMSD5B/CITATION.

Tabel 6. Perbandingan hasil WIMSD-5B/CITATION dengan hasil paket program lainnya

Nama Paket Program	Metode	Ref	k_{eff}	(C-E)×100%/E
WIMSD-5B/CITATION (Model 1)	Deterministik	Penelitian saat ini	0,92753	7,23%
WIMSD-5B/CITATION (Model 2)	Deterministik	Penelitian saat ini	1,11520	11,54%
Serpent2	Monte Carlo	[17]	1,02132	2,15%
MCNP	Monte Carlo	[8]	0,9925	0,7%
DYN1D-MSR	Deterministik	[18]	1,069675	6,99%

Tabel 7. Fluks neutron rerata pada zona teras aktif ($\times 10^{14}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Zona	Kelompok energi neutron	Model 1	Model 2	(Model 2- Model 1)×100% / Model 1
J	1	0,1045	0,0852	-18,5%
	2	0,1001	0,0924	-7,7%
	3	0,0966	0,0915	-5,3%
	4	0,0887	0,0778	-12,3%
	5	0,0459	0,0390	-15,0%
	6	0,4720	0,1359	-71,2%
L	1	0,3217	0,1786	-44,5%
	2	0,2861	0,2047	-28,5%
	3	0,2354	0,1886	-19,9%
	4	0,1894	0,1490	-21,4%
	5	0,0885	0,0719	-18,8%
	6	0,7282	0,2227	-69,4%
M	1	0,0407	0,0449	10,4%
	2	0,0396	0,0512	29,3%
	3	0,0386	0,0522	35,1%
	4	0,0352	0,0438	24,3%
	5	0,0181	0,0211	16,7%
	6	0,1759	0,0673	-61,7%

Tabel 8. Faktor puncak daya radial dengan Model 1 dan Model 2

Zona	FPD radial Model 1	FPD radial Model 2	(Model 2- Model 1)×100% / Model 1
J	1,0449	0,8517	-18,5%
L	1,6491	1,7863	8,3%
M	0,3907	0,4493	15,0%

Berdasarkan Gambar 5, maka ada 3 zona yang berkaitan dengan bahan bakar atau teras aktif, yaitu zona J, L dan M atau region no. 10, 12 dan 13 (Tabel 4). Tabel 7 menyajikan efek model sel dalam perhitungan fluks neutron rerata untuk tiap kelompok tenaga neutron pada tiga zona tersebut. Tampak jelas fluks neutron rerata di teras aktif dengan Model 1 lebih tinggi dibanding Model 2. Pada neutron dengan energi tinggi (khususnya kelompok 1) perbedaan relatif maksimum antara Model 1 dan 2 adalah -18,5%, -44,5% dan -10,4% masing-masing untuk zona J, L dan M. Perbedaan yang lebih tinggi lagi terjadi pada energi termal dengan perbedaan relatif -71,2%, -69,4% dan -61,7% masing-masing untuk zona J, L dan M.

Fluks neutron yang lebih rendah di Model 2 akibat tingginya tampang lintang makroskopik pembelahan yang tinggi. Nilai k_{eff} yang tinggi di Model 2, menunjukkan tingginya tampang lintang makroskopik Model 2 dibanding Model 1. Kesenjangan daya reaktor dengan fluks neutron dan tampang lintang makroskopik pembelahan, mengakibatkan dengan tampang lintang makroskopik pembelahan yang tinggi dan daya termal tetap 8 MW, maka fluks neutron akan turun. Tampak jelas fluks neutron, baik cepat dan termal, di teras reaktor MSR sangat sensitif dengan model sel bahan bakar.

Faktor puncak daya (*power peaking factor*) radial adalah parameter teras yang menunjukkan kerataan pembangkitan panas ke arah radial. Efek faktor puncak daya (FPD) radial pada teras MSRE akibat penggunaan model sel bahan bakar tersaji pada Tabel 8. Tampak jelas bahwa model sel memiliki pengaruh yang signifikan pada FPD radial reaktor MSR karena ada perbedaan relatif sebesar -0,185 dan 0,150 berturut turut untuk zona J dan M. Sedangkan untuk zona L perbedaannya relatif kecil. Seperti diketahui daerah J adalah daerah aktif teras bagian tengah, L adalah dibagian tengah serta M yang dibagian bawah. Gambar 5 menunjukkan bahwa meskipun konfigurasi di daerah aktif (mengandung grafit) reaktor MSRE tidak kompleks, namun demikian FPD radial sangat sensitif terhadap karakteristik tampang lintang makroskopis neutron yang dibangkitkan

KESIMPULAN

Analisis akurasi paket program WIMSD-5B/CITATION untuk perhitungan kekritisasi reaktor MSRE telah selesai dilakukan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa faktor geometri sel bahan bakar memberikan pengaruh yang paling besar yaitu 18,77% terhadap kekritisasi. Perbedaan fraksi void di tengah teras juga cukup signifikan pengaruhnya terhadap kekritisasi, yaitu sebesar 2,86%, demikian juga penurunan kandungan 0,0034% (atom) Li-6 memberikan kenaikan kekritisasi sebesar 0,68%. Dapat disimpulkan bahwa WIMSD-5B/CITATION hanya akurat digunakan jika geometri sel bahan bakar reaktor MSR ada dalam data input geometri WIMS. Keberadaan void di teras MSRE mempengaruhi akurasi perhitungan kritikalitas teras MSRE.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan Pengembangan Pembangkit Daya Berbasis Thorium Tahap V-VIII TA. 2020 yang ada di Puslitbang Iptekhan Balitbang Kementerian Pertahanan. Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada yang terhormat Kabalitbang Kemhan Marsekal Muda TNI Julexi Tambayong, Kapuslitbang Iptekhan Marsekal Pertama TNI Ir. Oki Yanuar, Kabid Bekkomlek Puslitbang Iptekhan Kolonel Tek. Hevry Yanto sebagai Kepala Pelaksana Kegiatan, Tagor Malem Sembiring (BATAN) yang memberikan bimbingan teknis dalam penggunaan WIMSD-5B/CITATION dan semua staf terkait dalam penyediaan fasilitas dan data yang diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Kulikowska, WIMSD-5B: A neutronic code for standard lattice physics analysis, Saclay, NEA Data Bank, 1996.

- [2] D. . Fowler and T.B. Vondy, CITATION: A computer program for solving diffusion theory treating up to three dimension, ORNL-TM-2496 Rev. 2, Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1971.
- [3] K. Benaalilou, T. El Bardouni, Y. Boulaich, H. El Yaakoubi and E. Chham, "Modeling and simulation of a TRIGA MARK-II research reactor using WIMSD-5B and CITATION codes," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 148, pp. 64-75, 2019.
- [4] B. A. Lindley, B. Tollit, T. Hino, P.J. Smith, J.T. Murgatroyd and P.N. Smith, "Development of a core design capability for innovative boiling water reactor designs for burning transuranic isotopes using WIMS / PANTHER," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 123, pp. 162–171, 2019.
- [5] S. Tashakor, E. Zari, and M. Naminazari, "Neutronic simulation of CAREM-25 small modular reactor," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 99, pp. 185 - 195, 2017.
- [6] M. Rafiei, S. Alireza, and M. Shirazi, "Study of power distribution in the CZP , HFP and normal operation states of VVER-1000 (Bushehr) nuclear reactor core by coupling nuclear codes," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 75, pp. 38–43, 2015.
- [7] S. Xia, J. Chen, W. Guo, D. Cui, J. Han, J. Wu and X. Cai, "Energy development of a molten salt reactor specific depletion code MODEC," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 124, pp. 88–97, 2019.
- [8] Z. Guo, J. Zhou, D. Zhang, K.S. Chaudri, W. Tian G. Su and S. Qiu, "Coupled neutronics/thermal-hydraulics for analysis of molten salt reactor," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 258, pp. 144–156, 2017.
- [9] T. Fei, B. Feng, and F. Heidet, "Molten salt reactor core simulation with PROTEUS," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 140, pp. 1070-1079, 2019.
- [10] S. C. Tadepalli, A. Gupta, and K. Umasankari, "Neutronic analysis of MSRE and its study for validation of ARCH code," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 320, pp. 1–8, 2017.
- [11] B. M. Elsheikh, "ScienceDirect Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors," *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 63–70, 2013.
- [12] G. Zhu and J. Chen, "Low enriched uranium and thorium fuel utilization under once - through and offline reprocessing scenarios in small modular molten salt reactor," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 11, pp. 5775-5787, 2019,.
- [13] M. B. Chadwick, M. Herman, P. Oblozinsky, M.E. Dunn, Y. Danon, A.C. Kahler, D.L. Smith, B. Pritychenko, G. Arbanas, et al., "ENDF / B-VII . 1 Nuclear Data for Science and Technology : Cross Sections , Covariances , Fission Product Yields and Decay Data," *Nucl. Data Sheets*, vol. 112, pp. 2887–2996, 2011.
- [14] R.E. MacFarlane, R.D. Mosteller, B.C. Kiedrowski, S.C. Frankle, M.B. Chadwick, R.D. McKnight, R.M. Lell, G. Palmiotti, H. Hirata, M. Herman, et al., "ENDF / B-VII . 1 Neutron Cross Section Data Testing with Critical Assembly Benchmarks and Reactor Experiments," *Nucl. Data Sheets*, vol. 112, pp. 2997–3036, 2011.
- [15] P. H. Liem, 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*, vol. 109, pp. 196–203, 2018.
- [16] Zuhair, Suwoto, T. Setiadipura, and Z. Su'ud, "The effects of applying silicon carbide coating on core reactivity of pebble-bed HTR in water ingress accident," *Kerntechnik*, vol. 82, pp. 92–97, 2017.
- [17] M. Fratoni, D. Shen, G. Ilas and J. Powers, Molten salt reactor experiment benchmark evaluation, Project 16-10240, Berkeley: University of California, 2020.
- [18] J. Krepel, Dynamics of molten salt reactors, Prague, Czech Technical University, 2006.