

KAJIAN KESELAMATAN PEMBANGUNAN REAKTOR DAYA SEBAGAI ALTERNATIF ENERGI MASA DEPAN

SAFETY STUDY OF POWER REACTOR DEVELOPMENT AS ALTERNATIVE FUTURE ENERGY

Sadono dan Eko Misrianto

Analis Pertahanan Negara, Puslitbang Strahan, Balitbang Kemhan
Dono_str@gmail.com; ekomisrianto5@gmail.com

ABSTRAK

Desain pra-konseptual fitur keselamatan teknis untuk laboratorium reaktor MSR telah selesai dilakukan. Desain berfokus pada penentuan umur hidup reaktor, koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, koefisien reaktivitas temperatur moderator, koefisien reaktivitas densitas bahan bakar, koefisien reaktivitas void, kritikalitas pada pipa sistem primer, kritikalitas pada tangki penampung bahan bakar, parameter kinetik, dan analisis insersi reaktivitas. Tujuan desain ini adalah untuk menjamin bahwa teras reaktor yang didesain memiliki keselamatan melekat dan terjamin subkritikalitasnya. Model teras dengan geometri R-Z dan 3-dimensi masing-masing digunakan untuk perangkat analitik deterministik dan Monte Carlo. Hasil desain menunjukkan bahwa reaktor MSR dengan daya 20 MWt memiliki umur hidup reaktor sampai 15 tahun. Kajian kritikalitas menunjukkan bahwa seluruh sistem primer dan tangki penampung bahan bakar memiliki jaminan subkritikalitas yang tinggi. Karakteristik transien saat dimasukkan reaktivitas sebesar 37,1 pcm/s menunjukkan teras reaktor tetap dalam keadaan aman. Berdasarkan desain ini, diusulkan laboratorium reaktor MSR sebaiknya berdaya 40 MWt yang digenerasi dari dua unit teras reaktor dengan daya masing-masing 20 MWt. Pilihan ini akan menjadikan laboratorium dapat digunakan untuk kajian pengoperasian reaktor modular dengan sistem kogenerasi. Sistem kogenerasinya terdiri dari sistem pembangkit listrik, penggerak sistem propulsi, dan desalinasi air. Reaktor ini dapat membangkitkan daya listrik minimum 7 MWe jika efisiensi termal 35%.

Kata kunci: reaktor MSR, keselamatan inheren, parameter kinetik, koefisien reaktivitas, fitur keselamatan teknis

ABSTRACT

The pre-conceptual design of engineered safety features for the MSR reactor laboratory has been carried out. The design focused on determining the reactor life time, the reactivity coefficients of fuel and moderator temperatures, the reactivity coefficient of fuel density, the reactivity coefficient of void, the criticality of the primary system pipes, the criticality in the fuel drain tank, the kinetic parameters, and the reactivity insertion analysis. The objective of the design is to ensure that the designed MSR reactor core has an inherent safety with the subcriticality condition in the primary pipes and the fuel drained tanks. The MSR core is modelled by the R-Z and the 3-dimensional detail geometries by using the deterministic and Monte Carlo analytic tools, respectively. The design results showed that the MSR reactor with the thermal power of 20 MWt has the life time of 15 years. The criticality study shows that all primary systems and the fuel drained tanks are guaranteed to be in the subcriticality condition. The transient analysis due to the reactivity insertion of 37.1 pcm/s showed that the core can be controlled safely. Based on those designed results, the MSR reactor laboratory with the power of 40 MWt generated from two reactor units of 20 MWt is a very good recommendation. The recommended MSR laboratory can be used as a facility for the modular reactor with a cogeneration system. The cogeneration system consists of an electric generation system, propulsion system drive, and water

desalination. This reactor can generate a minimum electric power of 7 MWe if the thermal efficiency is 35%.

Keywords: MSR reactor, inherent safety, kinetics parameters, reactivity coefficients, engineered safety feature

PENDAHULUAN

Aspek dan fitur keselamatan teknis merupakan hal yang penting dalam desain reaktor. Desain reaktor harus memenuhi prinsip dan tujuan keselamatan pemanfaatan energi nuklir. beberapa hal yang terkait dengan prinsip keselamatan, seperti keselamatan melekat, margin keselamatan, penghalang ganda dan redundansi. Adapun tujuan keselamatan adalah melindungi pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup, yang dilaksanakan melalui upaya yang efektif untuk mencegah timbulnya bahaya radiasi. Oleh sebab itu, aspek unjuk kerja sistem keselamatan yang tinggi dengan mengandalkan keselamatan melekat (*inherent safety*) dan sistem pasif, menjadi pilihan reaktor maju saat ini. Penyediaan sistem pendingin teras darurat, sistem penyungkup, sistem kemampuhan (*habitability system*), sistem pemindahan dan pengendali hasil fisi, maupun sistem keselamatan teknis lainnya dilakukan dalam cakupan aspek fitur keselamatan teknis. Sebagai contoh, kemampuan sistem dalam memindahkan panas untuk waktu tertentu supaya teras tidak sampai meleleh. Namun demikian, pekerjaan desain prakonseptual aspek keselamatan dan fitur keselamatan teknis tidak akan membahas semua aspek di atas. Desain hanya akan difokuskan pada jaminan terpenuhinya keselamatan melekat dan tidak terjadinya kritikalitas pada sistem primer.

Adapun bagian fitur keselamatan teknis akan dibahas tentang analisis kualitatif fitur yang dibutuhkan pada reaktor MSR.

METODOLOGI PENULISAN

Metode penulisan yang digunakan adalah metode deskriptif analitik, di mana data yang digunakan diperoleh dari beberapa hasil analisis dan kajian yang ada, disertai wawancara dan diskusi dengan pihak-pihak terkait. Data tersebut kemudian dianalisis berdasarkan sumber dan teori yang ada, sehingga dapat menghasilkan rekomendasi sebagai dasar kebijakan model sistem perpustakaan pertahanan di masa yang akan datang.

LANDASAN TEORI

1. Desk Assessment

Spesifikasi desain prakonseptual keselamatan dan fitur keselamatan teknis MSR mengacu pada sebagian besar data sebagaimana disajikan pada Tabel 1, seperti material, diameter/tebal pipa, maupun posisi tangki tiris bahan bakar.

Tabel 1. Spesifikasi desain keselamatan dan fitur keselamatan teknis

No.	URAIAN	NILAI
1.	MODERATOR	
	a. Umur hidup	4,5 tahun
2.	SISTEM KENDALI REAKTIVITAS	
	a. Koefisien reaktivitas	Harus bernilai negatif untuk masing-masing komponen temperatur, densitas, dan void

3	TANGKI TIRIS BAHAN BAKAR	
	a. Material	SS316
	b. Kapasitas total	1,44 m ³
	c. Posisi	Tepat di bawah bejana reaktor (memperlancar waktu pengurasan)
4	PIPA PRIMER	
	a. Material	SS316
	b. Diameter dalam	13 cm – 20 cm
	c. Tebal	0,7 cm - 0,8 cm

Tabel 2 menyajikan data yang diperlukan dalam setiap perhitungan ataupun desain serta hasil yang akan diperoleh.

Tabel 2. Data *input* dan *output* setiap kegiatan desain

No.	Kegiatan desain	Input	Output
1	Penentuan umur moderator grafit	Konfigurasi teras	Fluks neutron > 0,18 MeV Batas <i>fluence</i> sebesar $\sim 1 \times 10^{22}$ neutron/cm ²
2	Perhitungan koefisien reaktivitas umpan balik negatif	Kondisi teras sebagai fungsi temperatur dan densitas	Koefisien reaktivitas harus bernilai negatif
3	Perhitungan kritikalitas pipa sistem primer	Diameter, tebal, dan bentuk pipa (horizontal, vertical dan siku)	Nilai $k_{\text{eff}} < 0,95$ meski dalam rentang 3σ
4	Perhitungan kritikalitas tangki penampung bahan bakar	Diameter, tebal, dan tinggi tangki Variasi jumlah tangki	Nilai $k_{\text{eff}} < 0,95$ meski dalam rentang 3σ
5	Perhitungan parameter kinetik	Konfigurasi teras	Parameter kinetik
6	Analisis keselamatan akibat <i>Reactivity Insertion Accident</i> (RIA)	Nilai parameter kinetik dan koefisien reaktivitas	Jaminan padamnya reaktor akibat koefisien reaktivitas negatif

2. Perangkat Analitik

Tabel 3 menyajikan perangkat analitik yang digunakan dalam desain prakonseptual keselamatan reaktor MSR.

Tabel 3. Perangkat analitik desain keselamatan reaktor

No.	Perhitungan	Perangkat Analitik
1	Perhitungan umur moderator grafit	WIMSD-5B dan CITATION
2	Perhitungan koefisien reaktivitas umpan balik negatif	WIMSD-5B dan CITATION
3	Perhitungan kritikalitas pipa sistem primer	MCNP6.1

4	Perhitungan kritikalitas tangki penampung bahan bakar	MCNP6.1
5	Perhitungan parameter kinetik	MCNP6.1
6	Analisis keselamatan akibat <i>Reactivity Insertion Accident</i> (RIA)	POK-DYN
7	Penentuan fitur keselamatan	Kajian Pustaka

3. Perhitungan Umur Grafit.

Tabel-tabel di bawah akan menyajikan umur moderator grafit pada reaktor MSR sebagai fungsi daya dan fraksi volume bahan bakar untuk 3 jenis bahan bakar, yakni $\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$, $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$ dan $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(235)F}_4$. Tampak jelas bahwa umur grafit pada teras dengan bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$ sedikit lebih pendek dibandingkan pada 2 bahan bakar lainnya. Meskipun demikian, tidak ada yang nilainya kurang dari batas minimal 4,5 tahun.

Tabel 4. Umur moderator grafit pada reaktor berbahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$

Daya (MWt)	Umur moderator grafit (tahun)							Fraksi volume bahan bakar (%)
	10	12	14	16	18	20	22	
20	23,75	19,62	16,97	15,19	13,91	13,05	12,60	
30	15,39	12,66	10,93	9,84	9,04	8,58	8,33	
40	11,26	9,30	8,02	7,21	6,65	6,36	6,33	
50	8,88	7,30	6,33	5,68	5,30	5,15	5,20	

Tabel 5. Umur moderator grafit pada reaktor berbahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$

Daya (MWt)	Umur moderator grafit (tahun)							Fraksi volume bahan bakar (%)
	10	12	14	16	18	20	22	
20	25,41	20,75	17,75	15,74	14,28	13,29	12,70	
30	16,35	13,32	11,38	10,11	9,17	8,53	8,16	
40	11,95	9,69	8,29	7,30	6,66	6,18	5,91	
50	9,37	7,58	6,44	5,66	5,15	4,79	4,60	

Tabel 6. Umur moderator grafit pada reaktor berbahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(235)F}_4$

Daya (MWt)	Umur moderator grafit (tahun)						
	Fraksi volume bahan bakar (%)						
	10	12	14	16	18	20	22
20	19,43	17,21	15,89	15,00	14,51	14,47	14,94
30	12,50	11,06	10,13	9,57	9,24	9,21	9,51
40	9,06	7,97	7,29	6,89	6,65	6,65	6,89
50	7,02	6,15	5,63	5,29	5,12	5,10	5,32

Berdasarkan hasil perhitungan dari data di atas, jika laboratorium reaktor MSR di darat memakai daya 20 MWt maka hanya diperlukan dua unit reaktor untuk beroperasi penuh selama 30 tahun, sedangkan jika memakai daya 50 MWt maka diperlukan 4 unit reaktor untuk beroperasi penuh selama 30 tahun. Adapun jumlah unit reaktor yang diperlukan untuk daya 30 MWt dan 40 MWt masing-masing adalah sebanyak 3

dan 4 unit. Hasil ini dapat menjadi pertimbangan dalam mengoptimalkan daya reaktor MSR.

4. Perhitungan Koefisien Reaktivitas Umpam Balik Negatif.

Koefisien reaktivitas umpan balik negatif merupakan salah satu parameter keselamatan yang penting karena menjadi penentu sifat keselamatan melekat yang dimiliki oleh suatu

reaktor. Untuk mencapai unjuk kerja keselamatan yang tinggi, semua unsur dalam koefisien reaktivitas umpan balik harus bernilai negatif. Dalam desain prakonseptual reaktor MSR, semua unsur yang berkontribusi dalam koefisien reaktivitas balik juga harus bernilai negatif.

Koefisien reaktivitas umpan balik negatif yang dihitung dalam desain keselamatan dapat diuraikan, sebagai berikut:

- a. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (αT_F) bernilai negatif. Temperatur awal teras diasumsikan sebesar 922 K. Jika kenaikan temperatur yang dipilih adalah 100 K (αT_F), maka temperatur teras pada saat terjadi kenaikan menjadi 1022 K.
- b. Koefisien reaktivitas moderator (αT_M) bernilai negatif. Moderator yang dipakai adalah grafit karena sifatnya yang dapat memoderasi tenaga neutron sehingga memberi efek yang signifikan terhadap stabilitas reaktor. Jika kenaikan temperatur moderator (αT_M) yang dipilih sebesar 50 K, maka temperatur teras akan menjadi 972 K.
- c. Koefisien reaktivitas densitas bahan bakar ($\alpha \rho F$) bernilai negatif. Selama reaktor beroperasi, akan terjadi perubahan temperatur bahan bakar yang dapat menyebabkan perubahan densitas bahan bakar.

Semakin tinggi temperatur bahan bakar maka densitasnya akan berkurang. Nilai $\alpha \rho F$ dinyatakan dalam satuan pcm/g/cm^3 . Perubahan densitas yang dipilih adalah 20% dari nilai densitas ketiga tipe bahan bakar pada temperatur 922 K.

d. Koefisien reaktivitas void (αV) bernilai negatif. Void dapat berupa terbentuknya gas dari hasil pembelahan atau sebagai akibat dari terjadinya pendidihan pada bahan bakar garam (pada kondisi terparah). Berdasarkan perhitungan, diasumsikan terjadi 20% void dengan cara mengurangi kerapatan atom penyusun bahan bakar sebanyak 20%.

5. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar.

Nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (αT_F) pada reaktor MSR dengan bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$, $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$, dan $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(235)F}_4$, dapat dilihat pada tabel 7 hasil perhitungan menunjukkan bahwa tipe bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(235)F}_4$ memiliki nilai αT_F yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua tipe bahan bakar lainnya. Meskipun demikian, nilai αT_F dari ketiga tipe bahan bakar tersebut masih bernilai negatif.

Tabel 7. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (αT_F) untuk reaktor dengan tiga tipe bahan bakar

Daya (MWt)	αT_F (pcm $\Delta k/k/K$)							Fraksi volume bahan bakar (%)	$\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$
	10	12	14	16	18	20	22		
20	-0,78	-0,88	-0,97	-1,06	-1,14	-1,22	-1,30		
30	-0,78	-0,88	-0,96	-1,04	-1,12	-1,19	-1,27		
40	-0,78	-0,79	-0,87	-0,96	-1,03	-1,11	-1,19		
50	-0,78	-0,86	-0,94	-1,02	-1,09	-1,16	-1,23		
Daya (MWt)	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(233)F ₄								
	10	12	14	16	18	20	22		
20	-0,76	-0,87	-0,97	-1,07	-1,18	-1,29	-1,40		
30	-0,75	-0,85	-0,95	-1,05	-1,16	-1,26	-1,36		
40	-0,73	-0,84	-0,94	-1,03	-1,13	-1,23	-1,34		
50	-0,73	-0,82	-0,92	-1,02	-1,11	-1,21	-1,31		
Daya	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(235)F ₄								

(MWt)	10	12	14	16	18	20	22
20	-1,39	-1,59	-1,78	-1,97	-2,15	-2,34	-2,52
30	-1,35	-1,54	-1,72	-1,90	-2,08	-2,26	-2,44
40	-1,31	-1,49	-1,67	-1,84	-2,01	-2,18	-2,35
50	-1,28	-1,45	-1,62	-1,78	-1,95	-2,12	-2,28

6. Koefisien reaktivitas temperatur moderator.

Tabel 8, menyajikan nilai koefisien reaktivitas temperatur moderator (αT_M) pada reaktor MSR dengan bahan bakar NaF-BeF₂-UF₄,NaF-BeF₂-ThF₄-U(233), dan NaF-BeF₂-ThF₄-U(235)F₄. Hasil perhitungan

menunjukkan bahwa nilai αT_M tertinggi terjadi pada reaktor MSR dengan bahan bakar NaF-BeF₂-UF₄. Adapun nilai αT_M akan selalu lebih tinggi dibandingkan dengan nilai αT_F untuk setiap tipe bahan bakar. Di samping itu, Tabel 8 juga menunjukkan semua αT_M bernilai negatif.

Tabel 8. Koefisien reaktivitas temperatur moderator (αT_M) untuk reaktor dengan tiga tipe bahan bakar

Daya (MWt)	αT_M (pcm $\Delta k/k/K$) Fraksi volume bahan bakar (%) NaF-BeF ₂ -UF ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-11,44	-10,86	-10,27	-9,72	-9,19	-8,69	-8,20
30	-11,27	-10,69	-10,10	-9,57	-9,05	-8,54	-8,10
40	-11,07	-11,03	-10,46	-9,91	-9,37	-8,86	-8,37
50	-10,90	-10,36	-9,81	-9,30	-8,80	-8,33	-7,89
Daya (MWt)	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(233)F ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-6,89	-6,48	-6,04	-5,61	-5,22	-4,84	-4,48
30	-6,77	-6,35	-5,93	-5,50	-5,12	-4,74	-4,40
40	-6,60	-6,21	-5,80	-5,40	-5,01	-4,66	-4,32
50	-6,43	-6,06	-5,66	-5,29	-4,92	-4,57	-4,23
Daya (MWt)	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(235)F ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-7,86	-7,14	-6,48	-5,92	-5,43	-4,97	-4,56
30	-7,73	-7,02	-6,41	-5,85	-5,36	-4,92	-4,52
40	-7,59	-6,92	-6,32	-5,78	-5,31	-4,86	-4,47
50	-7,47	-6,82	-6,23	-5,71	-5,24	-4,82	-4,42

7. Koefisien reaktivitas densitas bahan bakar.

Tabel 9 menyajikan nilai koefisien reaktivitas densitas bahan bakar ($\alpha \rho_F$) pada reaktor MSR dengan bahan bakar NaF-BeF₂-UF₄,NaF-BeF₂-ThF₄U(233)F₄, dan NaF-BeF₂-ThF₄-U(235)F₄. Hasil perhitungan menunjukkan nilai $\alpha \rho_F$ yang rendah

muncul pada reaktor MSR dengan bahan bakar NaF-BeF₂-ThF₄-U(235)F₄. Dibandingkan nilai αT_F dan αT_M , nilai $\alpha \rho_F$ terhitung sangat besar, yaitu berkisar antara -13971,33 sampai -4698,83 pcm $\Delta k/k$ untuk tiap g/cm³. Meskipun demikian, hasil perhitungan menunjukkan semua $\alpha \rho_F$ masih bernilai negatif.

Tabel 9. Koefisien reaktivitas densitas bahan bakar ($\alpha \rho_F$) untuk reaktor dengan tiga tipe bahan bakar

Daya	$\alpha \rho_F$ (pcm $\Delta k/k/g/cm^3$)
------	--

(MWt)	Fraksi volume bahan bakar (%)						
	NaF-BeF ₂ -UF ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-13971,33	-13183,43	-12560,50	-12056,13	-11684,81	-11405,05	-11198,08
30	-13925,03	-13153,03	-12530,53	-12068,19	-11676,24	-11363,30	-11197,59
40	-13871,44	-14017,65	-13291,16	-12725,68	-12275,68	-11926,80	-11693,15
50	-13305,22	-12665,14	-12158,17	-11769,19	-11447,06	-11229,50	-11086,07
Daya (MWt)	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(233)F ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-13440,25	-12806,10	-12306,72	-11875,20	-11555,69	-11320,55	-11166,57
30	-13439,00	-12802,63	-12277,78	-11830,68	-11515,70	-11285,65	-11139,61
40	-13389,83	-12746,38	-12205,14	-11811,05	-11468,14	-11259,28	-11121,39
50	-13305,22	-12665,14	-12158,17	-11769,19	-11447,06	-11229,50	-11086,07
Daya (MWt)	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(235)F ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-8606,97	-7670,01	-6843,74	-6164,04	-5590,38	-5099,57	-4698,83
30	-8614,54	-7668,83	-6886,47	-6214,52	-5658,91	-5184,31	-4796,94
40	-8608,04	-7692,90	-6919,03	-6255,57	-5718,58	-5242,84	-4864,81
50	-8602,16	-7709,95	-6944,32	-6312,06	-5772,18	-5329,92	-4940,84

8. Koefisien reaktivitas void.

Tabel 10 menyajikan nilai koefisien reaktivitas void (αV) pada

Hasil perhitungan menunjukkan nilai αV pada bahan bakar NaF-BeF₂-ThF₄-U(235)F₄ lebih rendah sekitar

reaktor MSR dengan bahan bakar NaF-BeF₂-UF₄, NaF-BeF₂-ThF₄-U(233)F₄, dan NaF-BeF₂-ThF₄-U(235)F₄.

50% dibandingkan dengan dua tipe bahan bakar lainnya, meskipun semuanya bernilai negatif.

Tabel 10. Koefisien reaktivitas void (αV) untuk reaktor dengan tiga tipe bahan bakar

Daya (MWt)	αV (pcm $\Delta k/k/\%void$)						
	Fraksi volume bahan bakar (%)						
	NaF-BeF ₂ -UF ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-379,80	-358,38	-341,45	-327,74	-317,64	-310,04	-304,41
30	-378,54	-357,55	-340,63	-328,06	-317,41	-308,90	-304,40
40	-377,08	-381,06	-361,31	-345,94	-333,70	-324,22	-317,87
50	-376,15	-356,30	-340,00	-327,06	-316,38	-308,77	-304,33
Daya (MWt)	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(233)F ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-365,36	-348,12	-334,55	-322,82	-314,13	-307,74	-303,55
30	-365,33	-348,03	-333,76	-321,61	-313,04	-306,79	-302,82
40	-363,99	-346,50	-331,79	-321,07	-311,75	-306,07	-302,33
50	-361,69	-344,29	-330,51	-319,93	-311,18	-305,26	-301,36
Daya (MWt)	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(235)F ₄						
	10	12	14	16	18	20	22
20	-233,97	-208,50	-186,04	-167,56	-151,97	-138,63	-127,73
30	-234,18	-208,47	-187,20	-168,94	-153,83	-140,93	-130,40
40	-234,00	-209,12	-188,09	-170,05	-155,45	-142,52	-132,25
50	-233,84	-209,59	-188,78	-171,59	-156,91	-144,89	-134,31

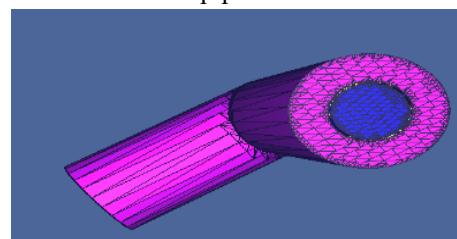
HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan koefisien reaktivitas reaktor MSR menunjukkan bahwa semua komponen bernilai negatif, sehingga spesifikasi/persyaratan desain dapat terpenuhi. Secara keseluruhan, tipe bahan bakar tidak begitu signifikan berpengaruh terhadap nilai koefisien reaktivitas.

1. Subkritikalitas Pipa Primer

Seperti diketahui, bahan bakar garam cair yang digunakan pada reaktor MSR akan mengalir di sepanjang sistem primer. Oleh karena itu, jaminan subkritikalitas di sepanjang pipa primer menjadi hal yang penting. Subkritikalitas juga harus dapat terjamin dalam keadaan darurat, misalnya saat seluruh sistem primer terendam air. Konfigurasi pipa yang dipilih adalah pipa horizontal, pipa vertikal dan pipa berbentuk L. Pada pipa horizontal, variasi ketinggian bahan bakar cair dilakukan di sepanjang diameter pipa; untuk pipa vertikal, level permukaan bakar cair juga divariasi;

Tiga konfigurasi pipa untuk pipa penukar panas dan pipa primer kemudian dikonfirmasi dengan gambar 3-D MCNP, sebagaimana tersaji pada Gambar 1. untuk pipa berbentuk L.



Gambar 1. Model 3-D MCNP pipa berbentuk L pada sistem primer

Nilai subkritikalitas untuk pipa penukar panas dan pipa primer pada kondisi normal dapat dilihat pada Tabel 11. dan Tabel 12. Adapun Tabel 13. menyajikan nilai subkritikalitas pada saat pipa primer terendam air (kondisi kecelakaan), di mana tampak ada kenaikan nilai kritikalitas meskipun masih di bawah nilai batas.

sedangkan pada pipa berbentuk L, variasi dilakukan dengan kombinasi ke arah vertikal dan horizontal. Adapun kriteria pipa yang dipilih, adalah sebagai berikut:

- Pipa primer dengan diameter terkecil ditempatkan pada penukar panas, dengan dimensi dalam (IR) sebesar 0,52832 cm dan tebal 0,10668 cm. Adapun tinggi dan panjang pipa vertikal dan horizontal masing-masing 40 cm, sedangkan untuk pipa berbentuk L, panjang dan tingginya masing-masing 10 cm.
- Pipa primer dengan jari-jari terbesar adalah pipa yang keluar dari bejana reaktor, dengan jari-jari dalam (IR) sebesar 10,15 cm dan tebal 0,8 cm. Bahan pipa yang dipilih adalah SS316. Dalam perhitungan kritikalitas, digunakan sumber neutron sebanyak 20.000 dengan jumlah siklus 300, di mana 50 siklus awal diabaikan. Nilai subkritikalitas yang harus dipenuhi adalah $k_{eff} < 0,95$ meski dalam rentang 3σ .

Tabel 11. Kritikalitas pipa penukar panas

Tinggi bahan bakar (%)	$k_{eff} (1\sigma)$
Vertikal	
100	$0,00111 \pm 0,0$
80	$0,00111 \pm 0,0$
60	$0,00111 \pm 0,0$
40	$0,00110 \pm 0,0$
20	$0,00106 \pm 0,0$
Horizontal	
100	$0,00111 \pm 0,0$
80	$0,00102 \pm 0,0$
60	$0,00085 \pm 0,0$
40	$0,00064 \pm 0,0$
20	$0,00037 \pm 0,0$
L	
100	$0,00112 \pm 0,0$
20	$0,00097 \pm 0,0$

Tabel 12. Kritikalitas pipa primer pada kondisi normal

Tinggi bahan bakar (%)	$k_{\text{eff}} (1\sigma)$
Vertikal	
100	$0,02892 \pm 0,00002$
80	$0,02497 \pm 0,00001$
60	$0,02316 \pm 0,00001$
40	$0,02085 \pm 0,00001$
20	$0,01793 \pm 0,00001$
Horizontal	
100	$0,02892 \pm 0,00002$
80	$0,02077 \pm 0,00001$
60	$0,01772 \pm 0,00001$
40	$0,01467 \pm 0,00001$
20	$0,01161 \pm 0,00000$
L	
100	$0,03570 \pm 0,00002$
20	$0,03327 \pm 0,00002$

Tabel 13. Kritikalitas pipa primer pada kondisi terendam air (kecelakaan)

Tinggi bahan bakar (%)	$k_{\text{eff}} (1\sigma)$
Vertikal	
100	$0,20877 \pm 0,00019$
80	$0,16665 \pm 0,00016$
Horizontal	
100	$0,20875 \pm 0,00018$
80	$0,16739 \pm 0,00017$
L	
100	$0,28451 \pm 0,00022$
20	$0,24199 \pm 0,00022$

Hasil perhitungan subkritikalitas pipa primer menunjukkan bahwa pipa berdiameter besar memiliki nilai kritikalitas yang lebih tinggi dibandingkan pipa berdiameter kecil. Oleh karena itu, jika pipa yang digunakan dalam desain MSR berukuran lebih besar dari 10,15 cm, maka perlu dilakukan perhitungan kritikalitas sehingga dapat menjamin kondisi subkritikalitas.

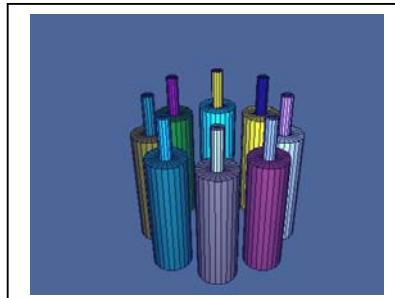
2. Subkritikalitas Tangki Penampung Bahan Bakar

Ciri utama reaktor MSR yakni adanya tangki bahan bakar cair (*fuel drain tank*), yang berfungsi untuk menampung seluruh bahan bakar yang terdapat di dalam reaktor dan sistem primer. Tangki penampung (tiris) akan difungsikan manakala terjadi

pemadaman reaktor dan jika terjadi kecelakaan. Adapun desain tangki harus memenuhi kriteria, sebagai berikut:

- Mampu menampung volume bahan bakar dari teras dalam rentang satu siklus operasi
- Harus dalam kondisi subkritis saat menampung bahan bakar garam, baik pada kondisi segar, temperatur dingin, maupun terendam air (kondisi kecelakaan).
- Tangki tiris harus tetap utuh selama proses pendinginan alamiah panas sisa. Proses ini dilakukan oleh sistem pendingin di luar reaktor yang juga berfungsi sebagai perisai radiasi. Dalam kegiatan desain prakonseptual, analisis yang dilakukan adalah butir kedua. Adapun butir pertama dan ketiga dilakukan pada fase desain berikutnya, karena manajemen bahan bakar pada konfigurasi teras terpilih harus dihitung terlebih dahulu.
- Kondisi yang dipilih dalam analisis keselamatan subkritikalitas tangki penampung adalah, sebagai berikut:
 - Menggunakan teras yang memiliki jari-jari terkecil, dengan jari-jari reaktor sebesar 92,1 cm. Hal ini untuk memastikan meskipun diletakkan dalam radius yang relatif kecil, tangki penampung tetap terjamin subkritikalitasnya.
 - Menggunakan volume bahan bakar yang maksimum, yakni sebanyak $1,33 \text{ m}^3$.
 - Tangki dipilih yang memiliki tinggi relatif pendek untuk menjaga stabilitas tangki. Sebagai acuan, tinggi tangki harus lebih pendek dari tinggi teras aktif. Dari hasil perhitungan, didapatkan tinggi reaktor minimum sebesar 140 cm.
 - Butir 1-3 akan ditentukan berdasarkan hasil desain prakonseptual teras.
 - Perhitungan dilakukan menggunakan MCNP6.1 melalui

- pemodelan tangki secara detail dengan asumsi terbuat dari bahan SS316 dan memiliki ketebalan 1,27 cm. Perhitungan ini dilakukan untuk skala 1 tangki, 2 tangki, 4 tangki dan 8 tangki.
- g. Dalam perhitungan kritikalitas, digunakan sumber neutron sebanyak 20.000 dengan jumlah siklus 300, di mana 50 siklus awal diabaikan. Nilai batas subkritikalitas adalah $k_{eff} < 0,95$ meski dalam rentang 3σ . Seluruh input konfigurasi tangki disimulasikan terlebih dahulu dalam bentuk model 3D untuk memastikan akurasi.
- h. Gambar 2. Menunjukkan tangki secara detail dengan asumsi terbuat dari bahan SS316 dan memiliki ketebalan 1,27 cm. Perhitungan ini dilakukan untuk skala 1 tangki, 2 tangki, 4 tangki dan 8 tangki.
- i. Dalam perhitungan kritikalitas, digunakan sumber neutron sebanyak 20.000 dengan jumlah siklus 300, di mana 50 siklus awal diabaikan. Nilai batas subkritikalitas adalah $k_{eff} < 0,95$ meski dalam rentang 3σ . Seluruh input konfigurasi tangki disimulasikan terlebih dahulu dalam bentuk model 3D untuk memastikan akurasi.
- j. sebanyak 20.000 dengan jumlah siklus 300, di mana 50 siklus awal diabaikan. Nilai batas subkritikalitas adalah $k_{eff} < 0,95$ meski dalam rentang 3σ . Seluruh input konfigurasi tangki disimulasikan terlebih dahulu dalam bentuk model 3D untuk memastikan akurasi.
- Gambar 2. menunjukkan model 3D pada konfigurasi 8 tangki. Gambar 2. Model 3-D MCNP tangki penampung bahan bakar sebanyak 8 tangki. Berdasarkan data di atas, 8 tangki tiris akan digunakan sebagai acuan dalam desain reaktor MSR yang dibuat saat ini.



Tabel-tabel di bawah ini menyajikan hasil perhitungan subkritikalitas untuk 1 tangki, 2 tangki, 4 tangki, dan 8 tangki. Tampak jelas semua konfigurasi, dengan H dan IR (jari-jari dalam) terpilih, sudah memenuhi syarat subkritiklitas.

Tabel 14. Kritikalitas 1 tangki penampung bahan bakar

Tangki	H (cm)	IR (cm)	$k_{eff} (1\sigma)$
A	118,04	60	$0,58163 \pm 0,00026$
B	86,72	70	$0,57517 \pm 0,00026$
C	66,40	80	$0,55314 \pm 0,00025$
D	52,46	90	$0,52292 \pm 0,00024$

Tabel 15. Kritikalitas 2 tangki penampung bahan bakar

Tangki	H (cm)	IR (cm)	$k_{eff} (1\sigma)$
E	132,79	40	$0,49076 \pm 0,00025$

Tabel 16. Kritikalitas 4 tangki penampung bahan bakar

Tangki	H (cm)	IR (cm)	$k_{eff} (1\sigma)$
F	118,04	30	$0,41070 \pm 0,00023$
G	86,72	35	$0,46063 \pm 0,00025$

Tabel 17. Kritikalitas 8 tangki penampung bahan bakar

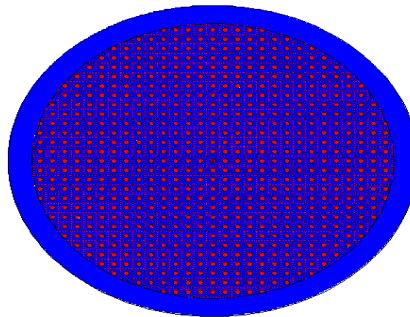
Tangki	H (cm)	IR (cm)	k_{eff} (1σ)
	132,30	20	$0,33462 \pm 0,00022$

3. Perhitungan Parameter Kinetik

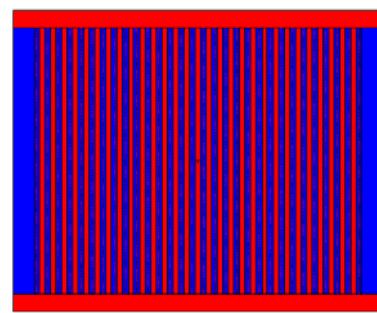
Parameter kinetik diperlukan untuk menentukan karakteristik transien reaktor saat terjadi penyisipan (*insertion*) reaktivitas. Parameter kinetik merupakan parameter neutron kasip dan serempak pada suatu reaktor. Perhitungan parameter kinetik reaktor MSR dilakukan dengan MCNP6.1. dan menggunakan sumber neutron sebanyak 20.000, dengan jumlah siklus 300, di mana 50 siklus awal diabaikan. Pada perhitungan parameter kinetik dengan

kartu KOPT, bentuk 3D reaktor cenderung ke arah radial dan aksial. Adapun parameter yang dihitung adalah, sebagai berikut:

- fraksi neutron kasip efektif, β_{eff}
- waktu generasi neutron serempak (μs), ℓ
- fraksi neutron serempak untuk kelompok prekursor ke- i , β_i
- konstanta peluruhan untuk kelompok prekursor ke- i (s^{-1}), λ_i



Gambar 3. Model MCNP teras MSR (tampak atas)



Gambar 4. Model MCNP teras MSR (tampak samping)

Tabel 18 menunjukkan hasil perhitungan parameter kinetik reaktor MSR yang akan digunakan dalam

analisis keselamatan akibat *Reactivity Insertion Accident* (RIA).

Tabel 18. Perhitungan parameter kinetik β_{eff} dan ℓ untuk reaktor MSR

Parameter	NaF-BeF ₂ -UF ₄	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U233F ₄	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U235F ₄
β_{eff}	$0,00605 \pm 0,00054$	$0,00260 \pm 0,00035$	$0,00653 \pm 0,00054$
$\ell, \mu s$	$174,80398 \pm 1,30046$	$123,59003 \pm 1,08503$	$174,80398 \pm 1,30046$

Tabel 19. Perhitungan parameter kinetik β_i dan λ_i

Kelompok prekursor, i	β		
	NaF-BeF ₂ -UF ₄	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U233F ₄	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U235F ₄
1	$8,00E-05 \pm 4,00E-05$	$2,90E-04 \pm 1,30E-04$	$3,00E-04 \pm 1,00E-04$
2	$8,70E-04 \pm 2,30E-04$	$5,20E-04 \pm 1,30E-04$	$1,57E-03 \pm 2,80E-04$
3	$1,08E-03 \pm 2,10E-04$	$4,80E-04 \pm 1,40E-04$	$1,14E-03 \pm 2,40E-04$
4	$2,61E-03 \pm 3,50E-04$	$9,60E-04 \pm 2,30E-04$	$1,98E-03 \pm 2,80E-04$
5	$7,40E-04 \pm 1,90E-04$	$2,60E-04 \pm 1,00E-04$	$1,33E-03 \pm 2,60E-04$

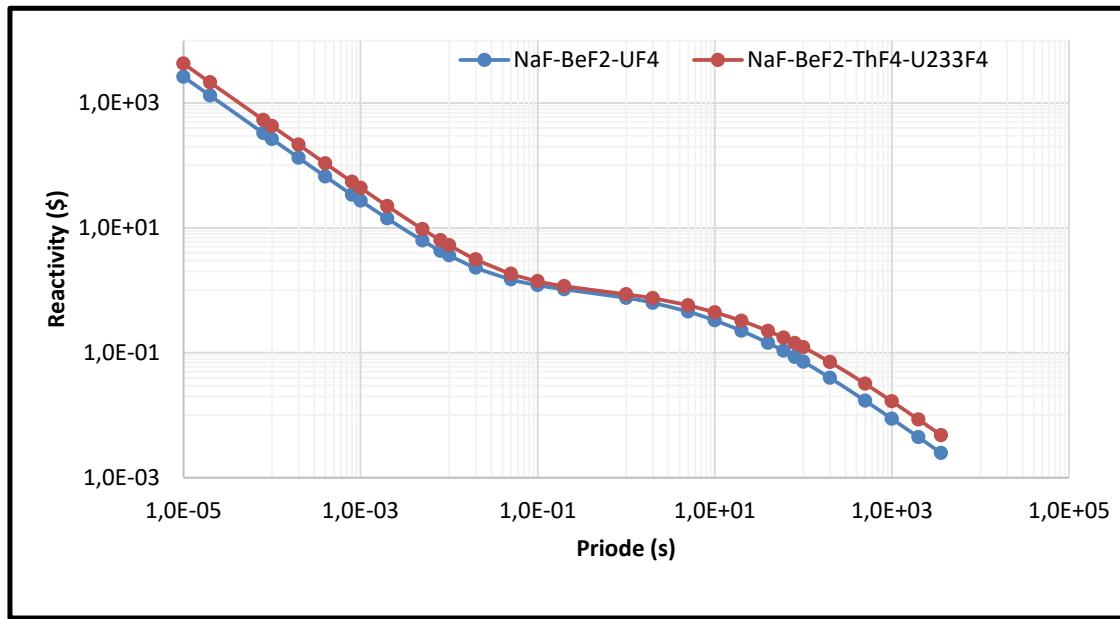
6	$6,70\text{E-}04 \pm 1,80\text{E-}04$	$9,00\text{E-}05 \pm 6,00\text{E-}05$ λ, s^{-1}	$2,10\text{E-}04 \pm 9,00\text{E-}05$
1	$1,33\text{E-}02 \pm 0,00\text{E+}00$	$1,29\text{E-}02 \pm 0,00\text{E+}00$	$1,33\text{E-}02 \pm 0,00\text{E+}00$
2	$3,27\text{E-}02 \pm 0,00\text{E+}00$	$3,47\text{E-}02 \pm 0,00\text{E+}00$	$3,27\text{E-}02 \pm 0,00\text{E+}00$
3	$1,21\text{E-}01 \pm 0,00\text{E+}00$	$1,19\text{E-}01 \pm 0,00\text{E+}00$	$1,21\text{E-}01 \pm 0,00\text{E+}00$
4	$3,03\text{E-}01 \pm 2,00\text{E-}05$	$2,87\text{E-}01 \pm 7,00\text{E-}05$	$3,03\text{E-}01 \pm 3,00\text{E-}05$
5	$8,50\text{E-}01 \pm 9,00\text{E-}05$	$8,02\text{E-}01 \pm 1,89\text{E-}03$	$8,55\text{E-}01 \pm 5,70\text{E-}04$
6	$2,86\text{E+}00 \pm 4,50\text{E-}04$	$2,48\text{E+}00 \pm 7,34\text{E-}04$	$2,86\text{E+}00 \pm 1,10\text{E-}03$

4. Analisis Keselamatan Insersi Reaktivitas

Data hasil perhitungan kinetik dan koefisien reaktivitas (pada bagian sebelumnya) kemudian digunakan dalam analisis keselamatan insersi reaktivitas. Insersi reaktivitas dalam analisis ini diasumsikan terjadi pada daya rendah (1 Wt) dan daya tinggi (1 MWt). Pemilihan daya dilakukan mengingat pada tingkat daya inilah

temperatur rerata teras tidak tinggi, sehingga efek koefisien reaktivitas umpan balik juga tidak besar. Hal ini dipilih untuk mengondisikan teras pada kondisi yang paling konservatif.

Insersi reaktivitas dapat dihitung dengan mengetahui karakteristik hubungan reaktivitas dan periode reaktor saat menggunakan bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$ dan $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U233F}_4$.



Gambar 5. Hubungan reaktivitas (\$) dan periode (s)

Tampak jelas dari gambar, terdapat bagian yang agak landai, di mana menunjukkan reaktor dikendalikan oleh reaktivitas akibat besarnya nilai ℓ (*prompt neutron generation time*) yang muncul. Data masukan yang dipakai

dapat dilihat pada Tabel 20, yaitu nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (sudah termasuk densitas bahan bakar) dan moderator grafit, dengan daya reaktor yang dipilih adalah 20 MWt.

Tabel 20. Data input koefisien reaktivitas

Koefisien reaktivitas	NaF-BeF ₂ -UF ₄	NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -U(233)F ₄
Fuel (temperatur dan densitas)	-7,4 pcm $\Delta k/k/K$	-9,28 pcm $\Delta k/k/K$
Moderator (temperatur)	-9,72 pcm $\Delta k/k/K$	-5,61 pcm $\Delta k/k/K$

a. Teras NaF-BeF₂-UF₄

Skenario transien yang dipilih pada daya rendah 1 Wt adalah, sebagai berikut:

Daya awal : 1Wt

Inersi reaktivitas : 37,1 pcm/s

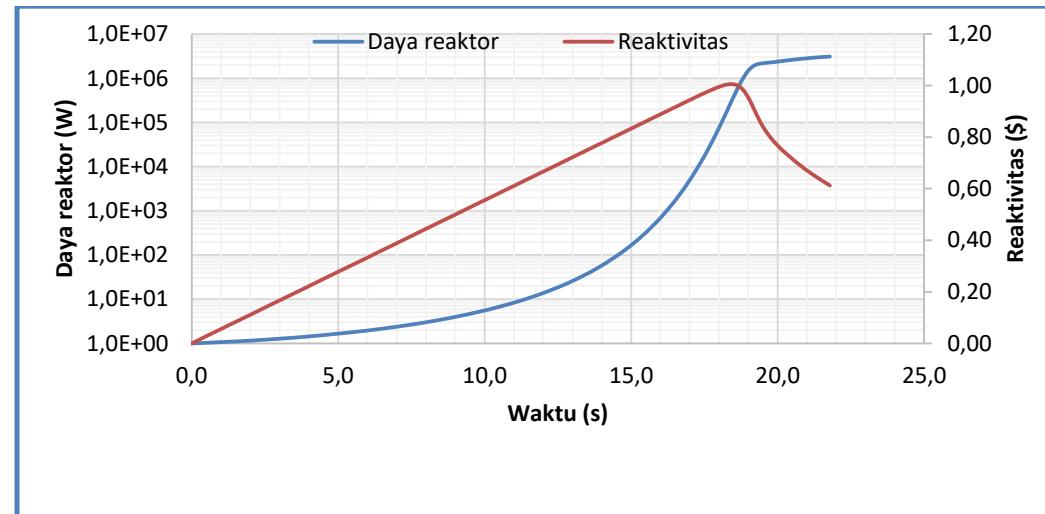
Trip pada daya : 3 MWt (15 % daya nominal)

Keterlambatan dalam inisiasi trip : 0,5 s

Waktu yang diperlukan batang kendali *scram* : 0,5 s

Adapun hasil perhitungan tersaji pada Gambar 6, di mana daya reaktor maksimum yang dicapai sebesar 3,16 MWt dan waktu yang diperlukan reaktor untuk *scram* adalah 22,0 s. Jika dilihat dari hasil perhitungan transien pada daya rendah, kenaikan daya terjadi cukup cepat jika dibandingkan dengan transien pada daya tinggi (Gambar 7),

karena umpan balik reaktivitas pada daya rendah sangat kecil. Akan tetapi kenaikan daya maksimum hanya 3,16 MWt atau 0,16 MWt lebih tinggi dari *trip* daya 3 MWt setelah reaktor mengalami *scram*. Hal ini menunjukkan bahwa reaktor cukup aman untuk insersi pada daya rendah.



Gambar 6. Inersi reaktivitas pada daya awal 1 Wt untuk bahan bakar NaF-BeF₂-UF₄

Skenario transien yang dipilih pada daya tinggi 1 MWt adalah, sebagai berikut:

Daya awal : 1MWt

Inersi reaktivitas : 37,1 pcm/s

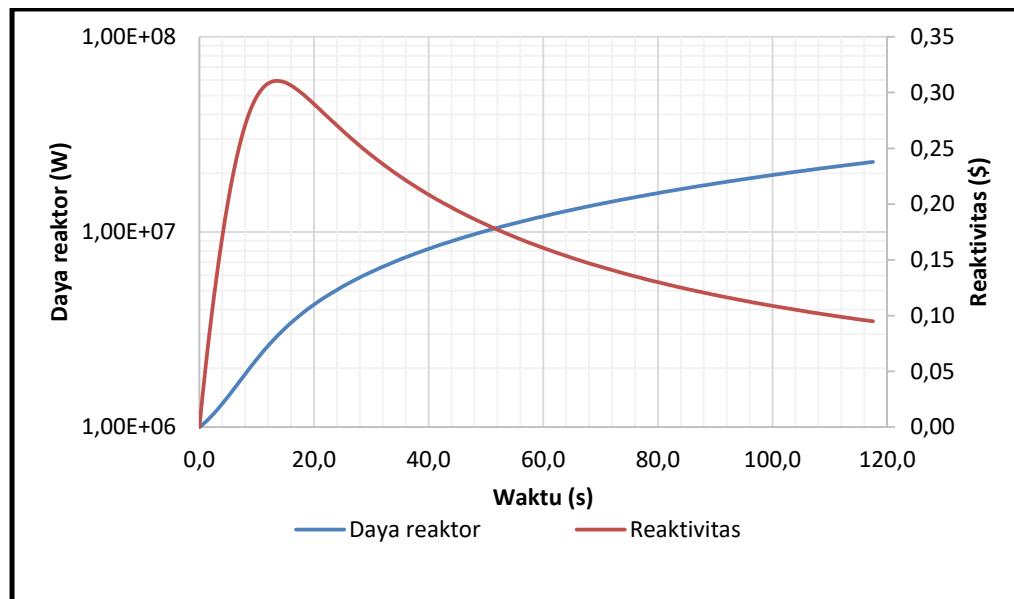
Trip pada daya : 22,8 MWt (114 % daya nominal)

Keterlambatan dalam inisiasi trip : 0,5 s

Waktu yang diperlukan batang kendali *scram* : 0,5 s

Adapun hasil perhitungan tersaji pada Gambar 7, di mana daya reaktor maksimum yang dicapai sebesar 22,89 MWt dan waktu yang diperlukan reaktor untuk *scram* adalah 117,74 s. Jika

dilihat dari hasil perhitungan transien pada daya tinggi, kenaikan daya terjadi tidak secepat pada daya rendah (Gambar 6.), karena umpan balik reaktivitas negatif yang besar pada daya tinggi.

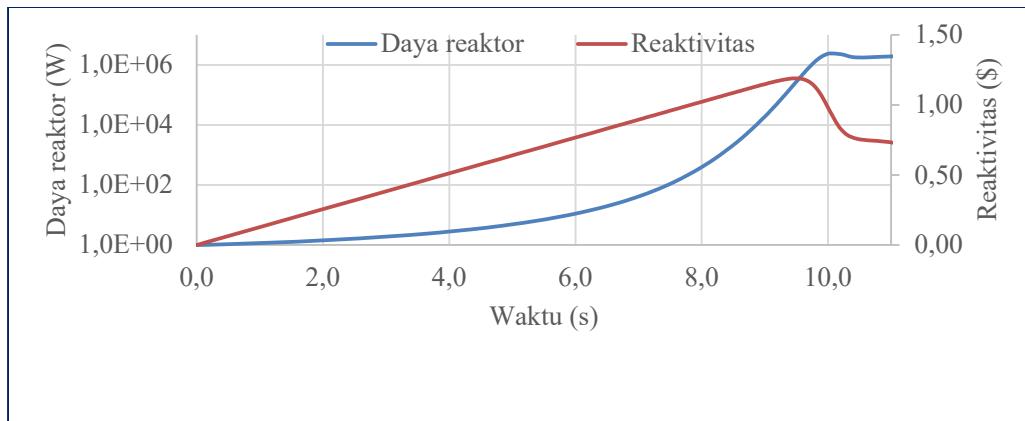


Gambar 7. Inersi reaktivitas pada daya awal 1 MWt untuk bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$

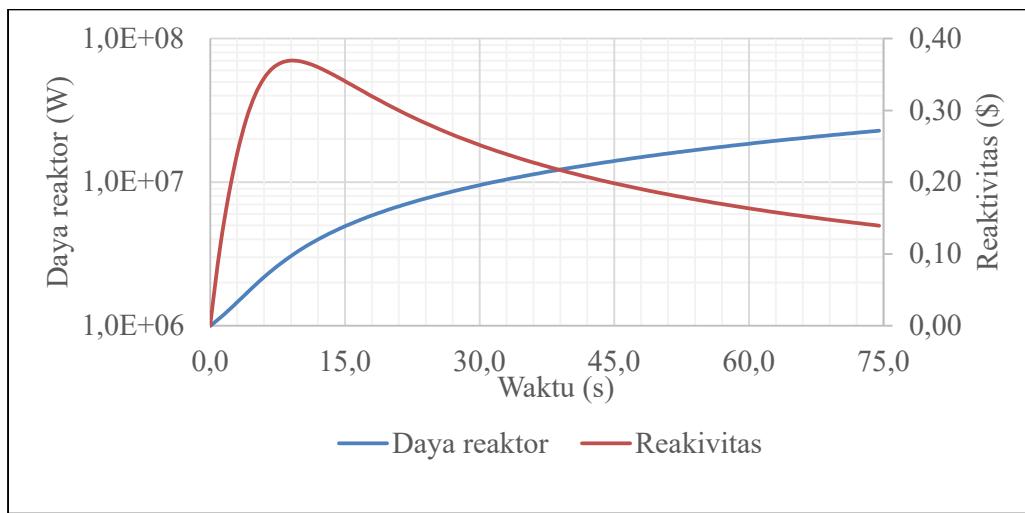
- b. Teras $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$
- Skenario insersi reaktivitas untuk daya rendah 1Wt dan daya tinggi 1 MWt pada teras dengan bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$ sama dengan teras $\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$, sedangkan untuk hasil insersi transien akan ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9. Gambar 8. menunjukkan karakteristik transien yang mirip dengan Gambar 6., akan tetapi daya maksimum yang dicapai sebesar 3,20 MW dan waktu yang diperlukan reaktor untuk *scram* adalah 7,45 s. Waktu *scram* yang lebih cepat pada teras dengan bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$ terjadi karena

nilai parameter kinetik β yang lebih rendah dibandingkan teras dengan bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-UF}_4$. Hal ini terlihat dari laju kenaikan daya yang tinggi.

Inersi reaktivitas pada daya tinggi (1MWt) menunjukkan daya maksimum yang dicapai adalah 22.95 MW dan waktu yang diperlukan reaktor untuk *scram* adalah 74.90 s (Gambar 9.). Dibandingkan dengan Gambar 7., daya maksimum yang dicapai tidak berbeda terlalu jauh, hanya saja waktu yang diperlukan reaktor untuk *scram* terjadi lebih cepat. Hal ini sama seperti pada daya rendah.



Gambar 8. Insersi reaktivitas pada daya awal 1 Wt untuk bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$



Gambar 9. Insersi reaktivitas pada daya awal 1 MWt untuk bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$

5. Fitur Keselamatan Teknis

Fitur keselamatan teknis disusun berdasarkan analisis keselamatan. Secara umum, fitur keselamatan reaktor MSR dilakukan melalui beberapa cara, sebagai berikut:

- Fungsi kendali reaktivitas. Fungsi ini dilakukan oleh batang kendali, tangki penampung bahan bakar dan sistem pengatur komposisi bahan bakar. Bagian ini disebut sebagai fitur keselamatan aktif, meskipun batang kendali, yang berfungsi untuk memadamkan reaktor dan tangki penampung bahan bakar, beroperasi dengan memanfaatkan gravitasi (pasif). Jumlah batang

kendali yang diperlukan tidak banyak karena reaktor tidak memiliki reaktivitas lebih. Kendali reaktivitas berikutnya adalah tangki penampung bahan bakar. Bahan bakar di atas reaktor dan sistem primer dapat langsung turun ke tangki bahan bakar saat katup beku (*freeze plug*) dibuka. Terakhir, reaktivitas dapat dengan mudah dikendalikan dengan pengatur komposisi.

- Fungsi kendali daya. Fungsi ini dilakukan dengan mengendalikan laju penambahan bakar melalui

- pengaturan laju alir bahan bakar oleh pompa.
- c. Fungsi pemindahan gas hasil belah. Fungsi ini dilakukan oleh *off-gas facility*, di mana fasilitas ini berfungsi sebagai tempat pemindahan gas dan kontaminan, seperti aerosol, partikel, volatil, produk hasil luruh, hasil belah berumur paruh pendek ($Xe-139$ dengan $t_{1/2} = 39,5$ s) dan hasil belah berumur paruh panjang ($Kr-85$ dengan $t_{1/2} = 10,7$ tahun atau $Se-79$ dengan $t_{1/2} = 6,5 \times 10^4$ tahun).
- d. Fungsi sistem pendingin alamiah. Fungsi ini dilakukan oleh sistem sirkulasi alamiah yang ada pada perisai lapis ke-3 (*annulus* berisi air). Fasilitas tersebut terkoneksi dengan kolam air yang memiliki kondensor. Fungsi sistem pendingin alamiah mengandalkan sistem pasif. Sumber panas yang menjadi beban sistem pendingin alamiah berasal dari sisa pasca pemadaman atau pemancangan (*scrammed*) reaktor maupun saat terjadi kecelakaan terparah (kombinasi listrik padam total dan batang kendali gagal masuk ke dalam teras). Dengan demikian dalam kondisi terparah, material baja, seperti pipa primer, bejana tekan, dan HE, akan tetap utuh. Pada desain laboratorium reaktor MSR di darat, masa tenggang (*grace period*) adalah minimal 14 hari.
- Pada fase desain prakonseptual, analisis fitur keselamatan terbatas pada jaminan keselamatan inheren yang memiliki koefisien reaktivitas umpan balik yang seluruh komponennya harus bernilai negatif. Jaminan keselamatan tersebut dapat dijabarkan, sebagai berikut:
- a. Jaminan seluruh pipa primer dalam keadaan subkritis
- b. Jaminan tangki penampung bahan bakar dalam keadaan subkritis
- c. Jaminan terpenuhinya kondisi *one stuck rod* pada batang pemadam (*shutdown rod*), di mana reaktor tetap dalam keadaan subkritis meski satu batang kendali dengan reaktivitas terbesar gagal disisipkan ke dalam teras (Dokumen Prakonseptual Instrumentasi dan Kendali serta Catu Daya)
- d. Jaminan dosis radiasi yang diserap oleh pekerja, masyarakat dan lingkungan dengan menyiapkan beberapa lapis perisai radiasi (Dokumen Prakonseptual Perisai Radiasi). Sistem perisai radiasi juga berfungsi sebagai pengungkung yang berlapis.
- e. Berdasarkan butir a-e, fitur keselamatan teknis yang telah dikerjakan adalah fungsi kendali reaktivitas, sedangkan fungsi lainnya akan dikerjakan pada fase desain konseptual dan desain dasar (*basic*). Hal ini disebabkan karena harus dilakukan perhitungan teras setimbang reaktor MSR untuk satu siklus reaktor terlebih dahulu.
- f. Fungsi yang sulit untuk didesain adalah fungsi pemindahan gas hasil belah, yang diharapkan dapat dilakukan pada fase desain dasar. Sub bagian ini juga mendeskripsikan penetapan misi dari laboratorium reaktor MSR yang hendak didesain. Penetapan misi diperlukan agar pekerjaan desain konseptual dapat dilakukan dengan lebih terarah. Tabel 20. menunjukkan data daya dan umur hidup reaktor MSR yang sebelumnya telah ditetapkan melalui spesifikasi desain. Berdasarkan data, tampak jelas reaktor MSR akan berfungsi sebagai fasilitas laboratorium konversi energi sebab dapat menghasilkan daya elektrik minimum 5 MW.
- g. Dokumen URD yang telah disusun dalam kegiatan tahun 2019 juga mensyaratkan agar reaktor MSR dapat dipakai sebagai fasilitas uji penggerak propulsi dengan MSR. Berdasarkan kedua data tersebut, reaktor didesain dengan sistem

kogenerasi (*cogeneration*) yang menggenerasi uap untuk menghasilkan listrik dan menjadi

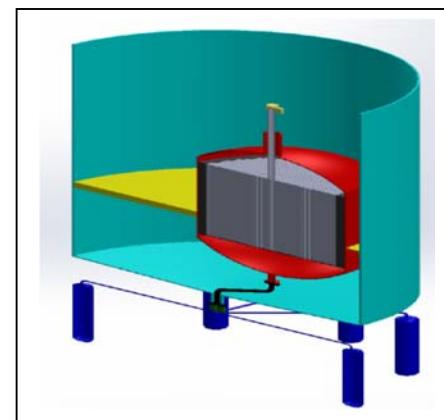
penggerak propulsi secara bersamaan atau tunggal.

Tabel 21. Data daya dan umur hidup reaktor MSR

No.	URAIAN	NILAI
1.	Daya termal	16 MW (min.)
2.	Daya elektrik (kebutuhan eksternal kapal)	5 MW (min.)
3.	Tipe	<i>Molten Salt Reactor</i> dengan spektrum termal tanpa pembiakan
4.	Umur hidup	≤ 40 tahun (laboratorium) ≤ 30 tahun (kapal)

Tabel 20 juga menunjukkan bahwa laboratorium dapat dipakai dengan umur hidup maksimum 40 tahun. Berdasarkan Tabel 4-6, dapat diusulkan untuk menggunakan dua unit reaktor, dengan daya masing-masing sebesar 20 MWt dan masing-masing dapat beroperasi selama 15,2 tahun, sehingga total umur operasi efektif dapat mencapai 30,4 tahun. Selain itu, pemilihan reaktor MSR dengan dua unit reaktor dapat juga digunakan untuk mempelajari pengaplikasian di dalam kapal, sistem reaktor MSR modular, dan uji penggunaan dua reaktor untuk sistem kogenerasi dengan modifikasi penukar panas.

- h. Model 3 Dimensi Reaktor MSR
Berdasarkan hasil kajian di atas, maka dapat disimpulkan desain reaktor MSR dengan daya 20 MWt memiliki karakteristik keselamatan yang lebih tinggi.



Gambar 10. Model 3D reaktor MSR dengan delapan tangki penampung bahan bakar

Bahkan kajian insersi reaktivitas menunjukkan bahwa dengan koefisien reaktivitas yang bernilai negatif, maka kenaikan daya dapat dikendalikan dengan sangat baik. Model 3D reaktor MSR yang telah dilengkapi dengan delapan tangki penampung (tiris) bahan bakar pada teras reaktor dan sistem primer dapat dilihat pada Gambar 10. Perbandingan Hasil Desain dengan Spesifikasi *User*.

Tabel 22 menyajikan rangkuman perbandingan nilai parameter desain keselamatan reaktor MSR antara URD/Spesifikasi dalam kontrak dan hasil desain prakonseptual.

Tabel 22. Perbandingan nilai URD/kontrak dan desain prakonseptual

No.	URAIAN	NILAI	
		URD/ Kontrak	Desain Pra konseptual
1	MODERATOR		
a.	Umur hidup	4,5 tahun	15 tahun
2	BEJANA REAKTOR		
a.	Material	SS316	SS316
b.	Tebal	± 15 mm	20 mm
c.	Massa	$\pm 11,57$ ton	13,96 ton
d.	Umur hidup	4,5 tahun	15 tahun (maksimum)
e.	Volume	Mempertimbangkan peningkatan volume bahan bakar dan operasi selama 4,5 tahun	$4,53 \text{ m}^3$ (tanpa B_4C shield)
3	SISTEM KENDALI REAKTIVITAS		
a.	Reaktivitas lebih teras maksimum	$4 \times 10^{-2} \% \Delta k/k$ (atau maksimum $0,5\beta$)	0,1-0,3 % $\Delta k/k$
b.	Koefisien reaktivitas	Harus bernilai negatif untuk masing-masing komponen temperatur, densitas, dan <i>void</i>	Hasil desain membuktikan semua komponennya bernilai negatif

Berdasarkan data di atas, dapat dilihat adanya perbedaan sebesar 20,7% pada massa bejana (2.c). Perbedaan juga terjadi karena tebal bejana tekan yang dipilih, 5 mm lebih tebal dibandingkan dengan nilai spesifikasi *user*.

dalam (ID) 40 cm dan tinggi 132,3 cm, terbuat dari material SS316 yang tersusun dalam 8 tangki simetris. Tangki penampung juga terjamin subkritikalitasnya meski dalam kondisi kecelakaan.

Teras terbukti dapat dikendalikan dengan aman meskipun terjadi insersi reaktivitas saat koefisien reaktivitas negatif bernilai besar. Hal ini menunjukkan teras reaktor sudah memiliki keselamatan melekat. Hasil kajian keselamatan mengusulkan laboratorium reaktor MSR sebaiknya berdaya 40 MWt yang terbagi dalam dua unit reaktor dengan daya masing-masing 20 MWt. Dengan demikian, laboratorium dapat mencapai usia maksimum 30,4 tahun serta dapat berfungsi sebagai uji reaktor modular dengan sistem kogenerasi sebagai penghasil listrik dan uji sistem propulsii, di samping menjadi unit desalinasi air bersih. Dengan asumsi efisiensi sebesar 35%, maka daya listrik minimum yang bisa dibangkitkan adalah 7 MWe.

KESIMPULAN

Desain prakonseptual keselamatan dan fitur keselamatan teknis untuk reaktor MSR telah selesai dilakukan. Berdasarkan hasil desain prakonseptual teras reaktor MSR dengan daya 20 MWt, maka karakteristik keselamatananya, yaitu: Umur grafit 15 tahun; Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, temperatur moderator, densitas bahan bakar dan *void* semuanya harus bernilai negatif; Seluruh pipa di dalam sistem primer menggunakan bahan SS316 dengan diameter luar (penukar panas) minimum 1,27 cm dan diameter maksimum 21,9 mm (pipa ke pompa), yang keseluruhannya terjamin kondisi subkritikalitasnya; Tangki penampung (tiris) bahan bakar berbentuk silinder dengan diameter

DAFTAR PUSTAKA

1. Tagor Sembiring, Pengembangan pembangkit listrik berbasis Thorium untuk pertahanan, Batan, 2018.
2. Tagor Sembiring, Pengembangan pembangkit listrik berbasis Thorium untuk pertahanan, Batan, 2019.
3. -----, Perhitungan parameter kinetik β_{eff} dan ℓ untuk reaktor MSR , 2018.
4. -----, Simulasi perhitungan bahan bakar $\text{NaF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-U(233)F}_4$, 2019.