

DESAIN OPTIMAL TERAS *SMALL MODULAR MOLTEN SALT REACTOR* (SM-MSR) SEBAGAI SISTEM PROPULSI KAPAL PERANG

- 1,2)Teknologi Daya Gerak,
Fakultas Sains dan
Teknologi Pertahanan,
Universitas Pertahanan RI,
Jakarta, Indonesia
3) Pusat Teknologi dan
Keselamatan Reaktor
Nuklir, Badan Tenaga
Nuklir Nasional, Banten
15314, Indonesia

Corresponding email ¹⁾ :
cahyoridhoprabudi@gmail.com

Received: 06.02.2023
Accepted: 20.05.2023
Published: 28.06.2023

©2023 Politala Press.
All Rights Reserved.

Cahyo Ridho Prabudi ¹⁾, Sovian Aritonang ²⁾, Topan Setiadipura ³⁾

Abstrak. Sebagai salah satu upaya untuk peningkatan daya tahan kapal perang dapat dilakukan dengan menggunakan sistem propulsi nuklir sebagai sumber tenaga penggerak. Penggunaan energy nuklir sebagai sitem penggerak memiliki nilai efektifitas yang tinggi jika dibandingkan dengan minyak alam. Salah satu contoh model reaktor yang dapat digunakan pada kapal perang yaitu Molten Salt Reactor (MSR). MSR yang ada saat ini masih berukuran sangat besar. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dilakukan desain optimal teras Small Modular Molten Salt Reactor (SM-MSR) yang diseuaikan dengan luas permukaan kapal perang. Dari simulasi dan optimasi yang dilakukan dengan software MCNP dengan parameter yang menjadi acuan adalah dengan 1% Li dan 2% U-235 dengan geometri desain optimal memiliki jari-jari pin cell core 0.8 cm, jari-jari pin cell blanket 2.6 cm dan tinggi core 160 cm. Desain awal SM-MSR pada penelitian ini memiliki koefisien reaktivitas void yang negative.

Kata Kunci: SM-MSR, Sistem propulsi, Kapal perang, MCNP, Kritikalitas.

Abstract. Utilizing a nuclear propulsion system as a source of propulsion is one method for extending the durability of warships. Compared to using natural oil, using nuclear energy as a propulsion system offers a high effectiveness value. The Molten Salt Reactor illustrates a reactor design that can be utilized on warships (MSR). The current MSR is still quite big. Therefore in this research, an optimal design of the Small Modular Molten Salt Reactor (SM-MSR) core will be adapted to the surface area of a warship. From the simulation and optimization carried out with the MCNP software, the parameter used as a reference is criticality. The optimal fuel material composition is 1% Li and 2% U-235, with an optimal design geometry having a cell core pin radius of 0.8 cm, a pin cell blanket radius of 2.6 cm, and a core height of 160 cm. The initial design of the SM-MSR in this study had a negative coefficient of void reactivity.

Keywords: SM-MSR, Propulsion systems, Warships, MCNP, Criticality.

To cite this article: <https://doi.org/10.34128/je.v10i1.238>

1. Pendahuluan

Pembangunan kekuatan pertahanan bertujuan untuk mewujudkan pertahanan keamanan negara yang kuat dan mampu menghadapi segala ancaman [1]. TNI-AL sebagai komponen utama kekuatan pertahanan militer maritim harus didukung dengan kekuatan armada laut yang mumpuni agar dapat menjaga dan melindungi kedaulatan negara khususnya di wilayah laut. Sehingga pengembangan teknologi Alutsista selalu menjadi salah satu prioritas pemerintah di bidang pertahanan. TNI-AL membutuhkan armada kapal perang yang memiliki daya tahan (*endurance*) tinggi untuk memperkuat pertahanan maritim Indonesia. Daya tahan akan memengaruhi umur

pakai dan waktu operasi kapal perang. Semakin tinggi endurance akan semakin lama pula waktu operasi dan umur pakai kapal tersebut. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan *endurance* kapal adalah pemilihan sistem propulsi yang cocok.

Propulsi nuklir dapat menjadi solusi atas permasalahan tersebut. Propulsi nuklir menggunakan reaksi nuklir sebagai sumber daya utama. Reaksi nuklir dapat menghasilkan energi yang lebih besar jika dibandingkan dengan energi yang dihasilkan oleh minyak bumi. Sehingga kebutuhan akan bahan bakar nuklir tidak sebanyak yang dimiliki minyak bumi [2]. Propulsi nuklir dapat memberikan efisiensi bahan bakar serta kinerja yang paling menjanjikan. Beberapa angkatan laut di seluruh dunia mengoperasikan reaktor skala kecil dari pembangkit listrik tenaga nuklir di atas kapal dan kapal selam untuk menyediakan tenaga penggerak [3]. Pada saat ini perkembangan teknologi nuklir yang banyak dikembangkan yaitu reaktor garam cair (*molten salt reactor*) yang dapat beroperasi bebas dalam air bertekanan tinggi serta menawarkan keamanan operasional jangka panjang yang lebih besar [4]–[7]. Pada sistem propulsi maritim, teknologi MSR dapat beroperasi untuk menyediakan propulsi hingga 30 tahun [8]. MSR dengan tipe *small modular* dapat menghasilkan hingga 100 MW energi panas pada suhu yang cukup untuk menghasilkan uap guna mengaktifkan turbin yang menggerakkan generator listrik [9]–[12].

Berdasarkan keunggulan yang ada tersebut, dalam penelitian ini akan dilakukan kajian mengenai desain optimal teras *Small Modular Molten Salt Reactor* (SM-MSR) yang nantinya akan diaplikasikan sebagai sistem propulsi kapal perang serta mendapatkan konfigurasi teras SM-MSR yang aman untuk beroperasi. Penggunaan *small modular* ini, dilakukan agar nantinya MSR yang di desain dapat digunakan pada kapal perang.

2. Metodologi

Konfigurasi teras reaktor yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada desain yang dilakukan oleh Alam dan Harto [13] [14]. Perbedaan mendasar dengan desain peneliti sebelumnya yaitu penggunaan ukuran teras yang jauh lebih kecil karena agar dapat diterapkan pada kapal perang. Oleh karena itu penelitian ini memiliki fokus kajian dalam penelitian ini yaitu pada desain awal teras *Small Modular Molten Salt Reactor* (SM-MSR) yang optimal untuk sistem propulsi kapal perang, serta mendapatkan konfigurasi teras SM-MSR yang aman untuk beroperasi. Penelitian ini dibatasi pada pemodelan teras reaktor menggunakan paket program MCNP yang meliputi analisis neutronik tanpa mempertimbangkan analisis termohidrolik, dengan parameter neutronik yang diteliti adalah kritikalitas. Dimensi awal SM-MSR yang ditentukan yaitu *pitch* 8 cm, jari-jari *pin cell core* 2 cm dan jari-jari *pin cell blanket* 3.6 cm, dengan tinggi *core* 100 cm dan tinggi teras 160 cm.

Pendekatan yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu pendekatan secara kuantitatif. Pendekatan kuantitatif dilakukan dengan simulasi eksperimen menggunakan metode *probabilistic* dengan cara mensimulasikan teras reaktor dan distribusi neutron menggunakan software MCNP. Adapun variabel optimasi yang dilakukan meliputi variasi konsentrasi material elemen bahan bakar, jari-jari *pin cell core*, jari-jari *pin cell blanket*, dan tinggi *core* untuk menentukan dimensi geometri optimal, serta variasi persentase *void* dan tinggi batang kendali. Kemudian untuk mengetahui tingkat keselamatan reaktor saat beroperasi. Pengolahan data hasil simulasi yang diperoleh diolah menggunakan regresi linear yang selanjutnya dilakukan analisis secara deskriptif. Hal ini ditujukan agar dapat menjelaskan korelasi antara desain geometri reaktor dan nilai k_{eff} yang dihasilkan. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1

Secara teoritis menurut Lamarsh, kesetimbangan laju produksi neutron dengan laju kehilangan neutron dalam sistem reaktor harus dipertahankan pada kondisi tetap agar reaksi fisi berantai dalam teras reaktor dapat terus berlangsung dan dinyatakan dalam bentuk koefisien pelipatan efektif (k_{eff}) [15] [16]. Adapun persamaan dri perhitungan (k_{eff}) dapat dilihat pada persamaan (1) berikut [15].

$$k = k_{eff} = \eta \epsilon f p P_f P_{th} \quad (1)$$

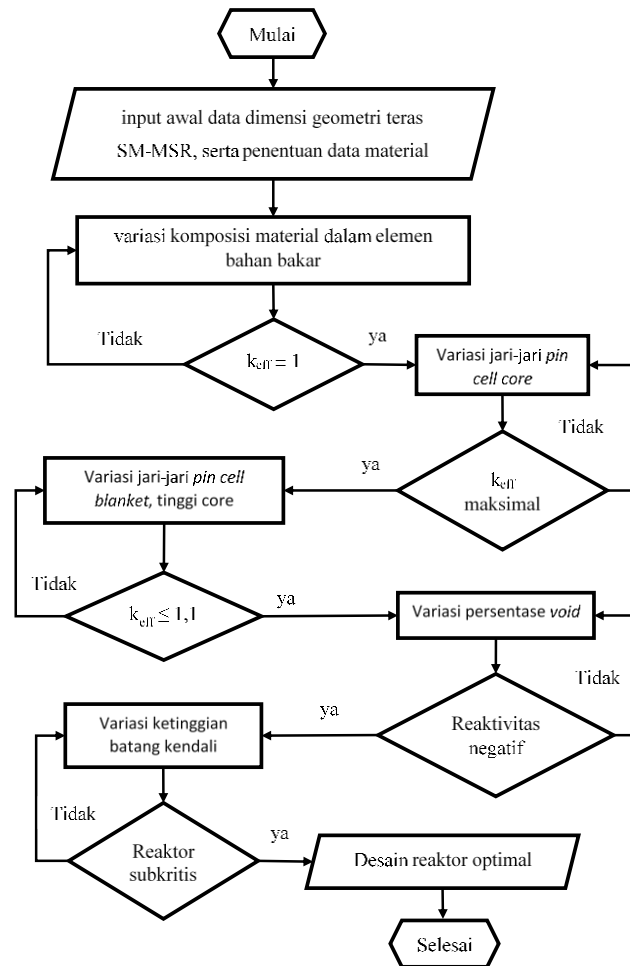
Keterangan:

- η = total pembelahan neutron yang dihasilkan
- ϵ = faktor kecepatan pembelahan
- f = faktor termal yang digunakan
- p = probabilitas resonansi yang lolos
- P_f = probabilitas kecepatan neutron yang tidak lolos
- P_{th} = probabilitas neutron termal yang tidak lolos

Jika reaktor diasumsikan berukuran besar tak hingga, maka neutron yang lolos dianggap tidak ada. Sehingga persamaan (1) menjadi :

$$k_{\infty} = \eta \epsilon f p \quad (2)$$

Persamaan (2) di atas disebut dengan persamaan empat faktor. Kritikalitas dikategorikan dalam tiga kondisi subkritis, kritis dan superkritis. Dengan pembagian sebagai berikut. Jika $k < 1$ maka populasi neutron yang dihasilkan antar generasi semakin berkurang seiring dengan bertambahnya waktu. Keadaan ini disebut dengan subkritis. Jika $k = 1$ maka populasi neutrona antar generasi konstan dengan kata lain tidak terjadi perubahan. Keadaan ini disebut dengan keadaan kritis. Jika $k > 1$ maka populasi neutron yang dihasilkan antar generasi semakin bertambah. Sehingga kondisi ini sering disebut kondisi superkritis.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Koefisien reaktifitas *void*, dinyatakan dengan persamaan (3) berikut [15].

$$\alpha_v = \frac{\partial \rho}{\partial v} = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial v} \quad (3)$$

Keterangan:

α_v = koefisien reaktifitas *void*

v = fraksi *void*

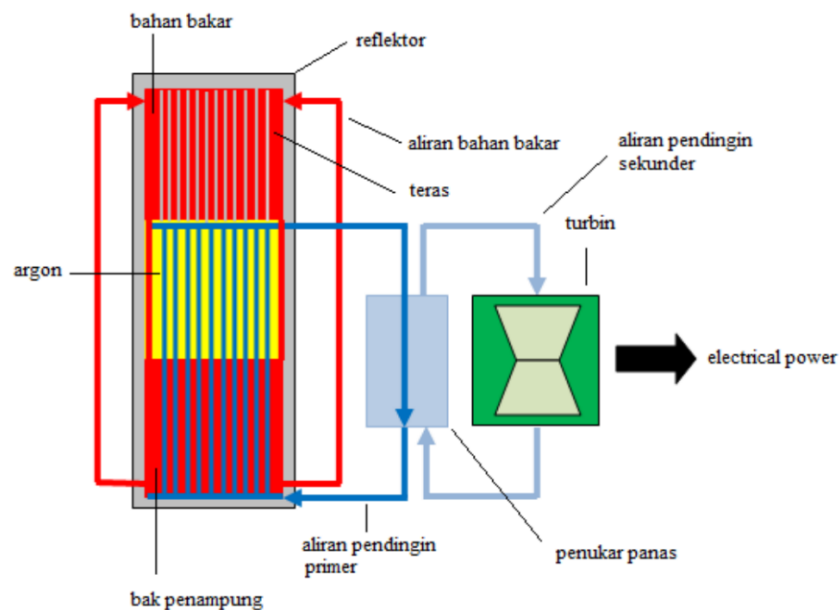
ρ = reaktifitas

k = kritikalitas

Jika koefisien reaktifitas *void* menunjukkan angka negatif maka fraksi *void* akan naik dan reaktifitas reaktor menjadi menurun. Jika koefisien reaktifitas *void* positif maka reaktifitas reaktor menjadi meningkat. Dalam penelitian ini, untuk memperoleh keselamatan reaktor yang baik, maka koefisien reaktifitas *void* yang dimiliki harus bernilai negatif.

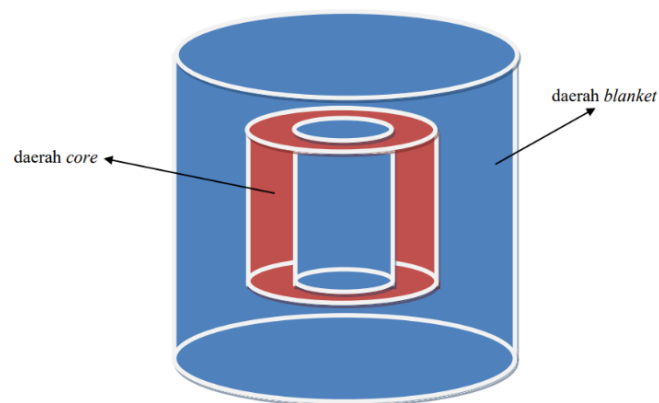
3. Hasil dan Pembahasan Desain Model Teras Reaktor

SM-MSR dalam penelitian ini merupakan desain awal dari reaktor MSR yang dimodifikasi seperti pada Gambar 1 [13]. SM-MSR merupakan reaktor modular yang menggunakan campuran garam fluoride $\text{PuF}_3\text{-UF}_4\text{-ThF}_4\text{-LiF}$ sebagai bahan bakar, LiF sebagai pendingin dan grafit sebagai moderator. Dalam penelitian ini simulasi perhitungan neutronik dibatasi hanya pada teras reaktor tempat dimana reaksi fisi terjadi.



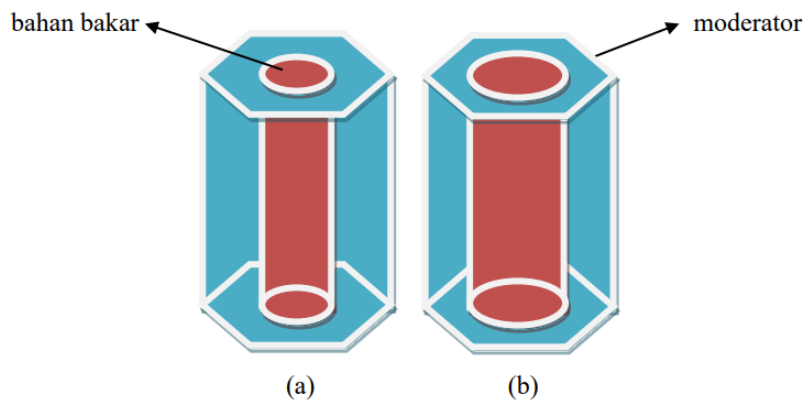
Gambar 2. Konsep Desain SM-MSR [13]

Teras SM-MSR berbentuk silinder dan dibagi menjadi dua daerah yaitu daerah *core* dan *blanket*. Daerah *core* didesain berbentuk *annulus* yang dikelilingi oleh daerah *blanket* seperti pada Gambar 3, dengan ukuran tebakan awal tinggi teras 160 cm, jari-jari teras 80 cm, tinggi *core* 100 cm, jari-jari luar *core* 60 cm, dan jari-jari dalam *core* 20 cm.

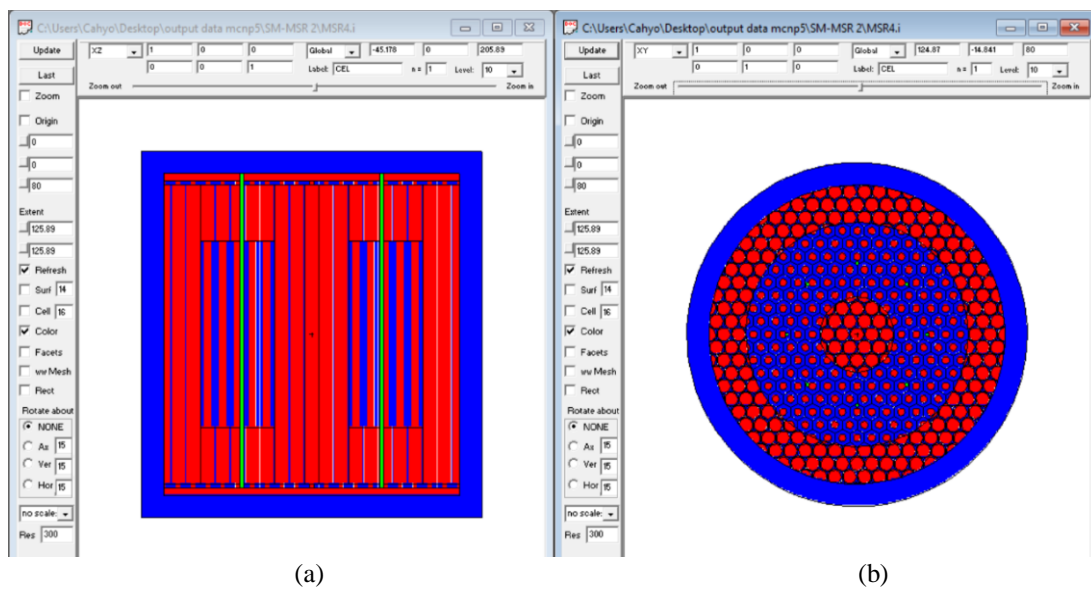


Gambar 3. Model Teras SM-MSR

Tiap-tiap daerah, baik *blanket* maupun *core* akan diisi oleh *pin cell* sesuai dengan jenis daerahnya masing-masing seperti pada Gambar 4 dengan ukuran tebakan awal jari-jari *pin cell core* 2 cm, jari-jari *pin cell blanket* 3,6 cm, tinggi *pin cell core* 100 cm, tinggi *pin cell blanket* 160 cm, dan *pitch* 8 cm. Hasil pemodelan teras MS-SMR dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Model Pin Cell (a) pin cell pada core, (b) pin cell pada blanket



Gambar 5. Hasil Vised MCNP, (a) Teras Tampak Samping, (b) Teras Tampak Atas

Komposisi Bahan Bakar Optimal

Komposisi bahan bakar yang optimal dalam penelitian ini mengacu pada komposisi U-235 yang dimiliki agar dapat dilakukan perhitungan k_{eff} pada setiap komposisi. Langkah awal yang dilakukan yaitu menjaga komposisi U-235 tetap konstan dan memvariasikan komposisi Li. Langkah selanjutnya adalah dengan memvariasikan komposisi U-235 yang berbeda untuk mengetahui kecenderungan adanya perbedaan selisih perubahan k_{eff} akibat komposisi U-235 yang berbeda.

Tabel 1. Pengaruh perubahan komposisi U-235 dan Li terhadap nilai k_{eff}

No	U-235 (%)	Li (%)				
		1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
1	1 %	0.96663	0.96942	0.97731	0.97731	0.98902
2	2 %	1.02996	1.03728	1.04310	1.04310	1.05242
3	3 %	1.07448	1.07989	1.08855	1.08855	1.09549
4	4 %	1.11083	1.1149	1.11980	1.12509	1.13060
5	5 %	1.13561	1.13973	1.14239	1.15149	1.15122

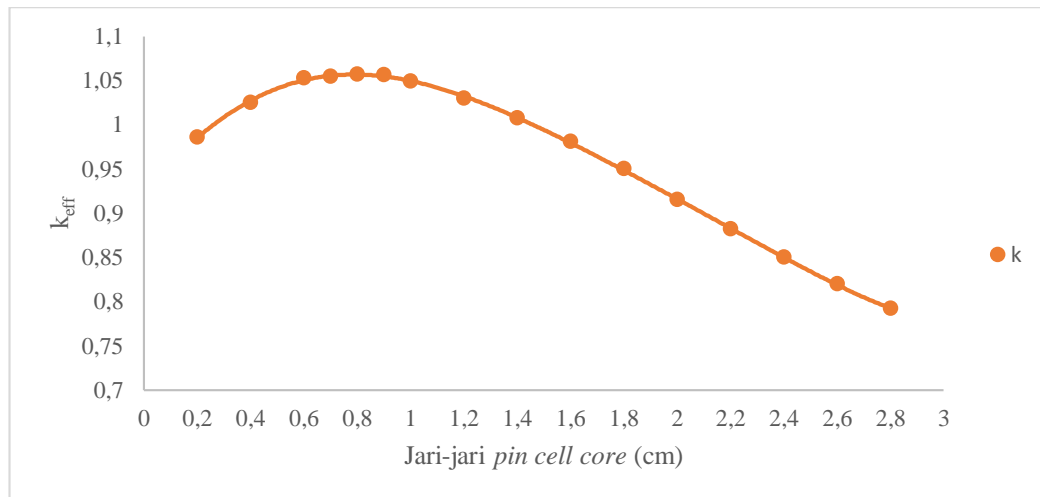
Hasil eksperimen menunjukkan bahwa k_{eff} akan semakin besar seiring dengan bertambahnya persentase Li dan ikut bertambahnya persentase U-235. Indikator komposisi bahan bakar yang optimal adalah saat komposisi reaktor dalam keadaan kritis ($k_{eff} \approx 1$). Dapat dilihat pada Tabel 1, hasil eksperimen yang memenuhi kriteria bahan bakar optimal adalah ketika konsentrasi U-235 pada 2% dan Li pada 1% sehingga komposisi bahan bakar optimal untuk desain SM-MSR pada penelitian ini adalah dengan kandungan 1% Li-7 dan 2% U-235.

Dimensi Teras Reaktor Optimal

Langkah awal untuk menentukan dimensi teras reaktor optimal adalah dengan memvariasikan ukuran jari-jari *pin cell core*, dengan indikator neutronik yang dijadikan landasan untuk menentukan *output* yang dihasilkan optimal atau tidak adalah nilai k_{eff} yang merupakan nilai k_{eff} maksimal. Pada SM-MSR, ukuran jari-jari *pin cell core* akan mempengaruhi nilai k_{eff} . Penambahan ukuran jari-jari *pin cell core* akan menyebabkan nilai k_{eff} membentuk kurva parabola seperti terlihat pada Gambar 6. Hal tersebut dikarenakan nilai k_{eff} dipengaruhi oleh perubahan populasi neutron dan peluang neutron untuk bereaksi fisi.

Tabel 2. Pengaruh variasi jari-jari *pin cell core* terhadap nilai k_{eff}

No	h core(cm)	r pin core (cm)	r pin blanket (cm)	k_{eff}	stdv
1	100	0.2	2.6	0.98583	0.00136
2	100	0.4	2.6	1.02515	0.00099
3	100	0.6	2.6	1.05272	0.00147
4	100	0.7	2.6	1.05458	0.00143
5	100	0.8	2.6	1.057	0.00153
6	100	0.9	2.6	1.05642	0.00151
7	100	1	2.6	1.04908	0.00134
8	100	1.2	2.6	1.02996	0.00119
9	100	1.4	2.6	1.00774	0.00129
10	100	1.6	2.6	0.98094	0.00109
11	100	1.8	2.6	0.95009	0.00116
12	100	2	2.6	0.91509	0.00137
13	100	2.2	2.6	0.88214	0.0011
14	100	2.4	2.6	0.84997	0.00106
15	100	2.6	2.6	0.82003	0.00106
16	100	2.8	2.6	0.79237	0.001



Gambar 6. Grafik Pengaruh Variasi jari-Jari Pin Cell Core Terhadap Nilai k_{eff}

Pada rentang ukuran 0.2 – 0.8 cm terlihat bahwa nilai k_{eff} meningkat karena mengalami *under moderated*, sebaliknya pada rentang ukuran jari-jari pin cell core 0.8 – 2.8 cm terlihat nilai k_{eff} menjadi menurun . kondisi ini dinamakan *over moderated*. Dari data tersebut dapat diketahui pada saat nilai k_{eff} mencapai nilai maksimal maka posisi tersebut merupakan titik ukuran jari-jari pin cell core yang optimal untuk reaktor SM- MSR. Hasil output simulasi pada Tabel 2 menunjukkan bahwa ukuran jari-jari pin cell core yang optimal adalah 0.8 cm karena pada ukuran tersebut nilai k_{eff} pada reaktor SM-MSR menunjukkan nilai yang maksimal.

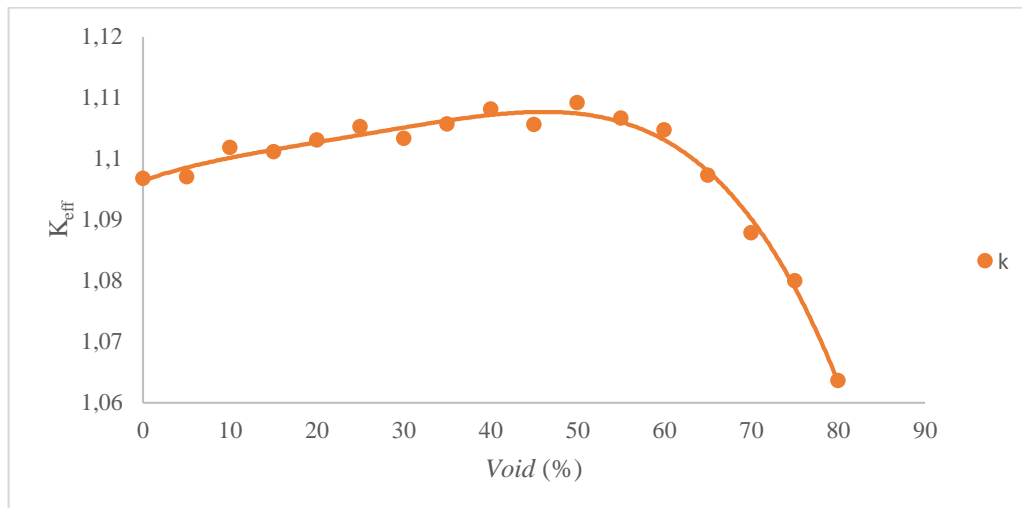
Tabel 3 Pengaruh ukuran jari-jari pin cell blanket dan tinggi core terhadap nilai k_{eff}

No	r pin core (cm)	r pin blanket (cm)	h core (cm)					
			60	80	100	120	140	160
1	0.8	2	1.08875	1.11666	1.13006	1.1411	1.15469	1.15567
2	0.8	2.2	1.0547	1.08469	1.10622	1.12062	1.13036	1.13832
3	0.8	2.4	1.02417	1.05848	1.08089	1.09498	1.11177	1.11681
4	0.8	2.6	0.99471	1.03305	1.057	1.07635	1.08915	1.09674
5	0.8	2.8	0.96729	1.00846	1.03773	1.05586	1.07026	1.07774
6	0.8	3	0.94142	0.98692	1.0145	1.03417	1.04612	1.06015
7	0.8	3.2	0.91811	0.96416	0.99525	1.01622	1.03194	1.04076
8	0.8	3.4	0.90031	0.94789	0.9771	0.99892	1.01603	1.02703
9	0.8	3.6	0.88442	0.93108	0.96501	0.98619	1.00423	1.01142
10	0.8	3.8	0.86482	0.91308	0.94803	0.97442	0.98792	1.00392

Dalam perancangan reaktor nilai maksimal k_{eff} perlu dibatasi agar reaktor tetap aman saat terjadi kecelakaan, dan indikator yang dijadikan landasan untuk menentukan dimensi optimal desain adalah nilai k_{eff} yang mendekati dan tidak lebih dari 1.1 ($k_{eff} \leq 1.1$). Untuk mendapatkan hasil yang memenuhi parameter tersebut, langkah yang dilakukan adalah dengan memvariasikan jari-jari pin cell blanket dan ketinggian core. Hasil simulasi dengan memvariasikan jari-jari pin cell blanket dan tinggi core dapat dilihat pada Tabel 3 dan desain optimal diperoleh pada ukuran jari- jari pin cell blanket 2.6 cm dan tinggi core 160 cm dengan nilai k_{eff} 1.09674.

Koefisien Reaktivitas Void

Reaktivitas *void* (*void reactivity*) adalah komponen penting dalam kajian keselamatan reaktor nuklir. Suatu reaktor nuklir harus didesain memiliki *inherent safe*, artinya reaktor tersebut mampu untuk menjaga dirinya sendiri agar tetap selamat. Reaktivitas *void* adalah salah satu komponen dalam *inherent safe* [14]. Jika reaktivitas *void* positif maka terbentuknya *void* akan meningkatkan reaktivitas teras yang berdampak pada peningkatan daya yang sangat signifikan, yang akhirnya menyebabkan peningkatan suhu teras secara drastis. Sebaliknya, jika reaktivitas *void* negatif, terbentuknya *void* akan menurunkan reaktivitas teras dan menurunkan daya reaktor.

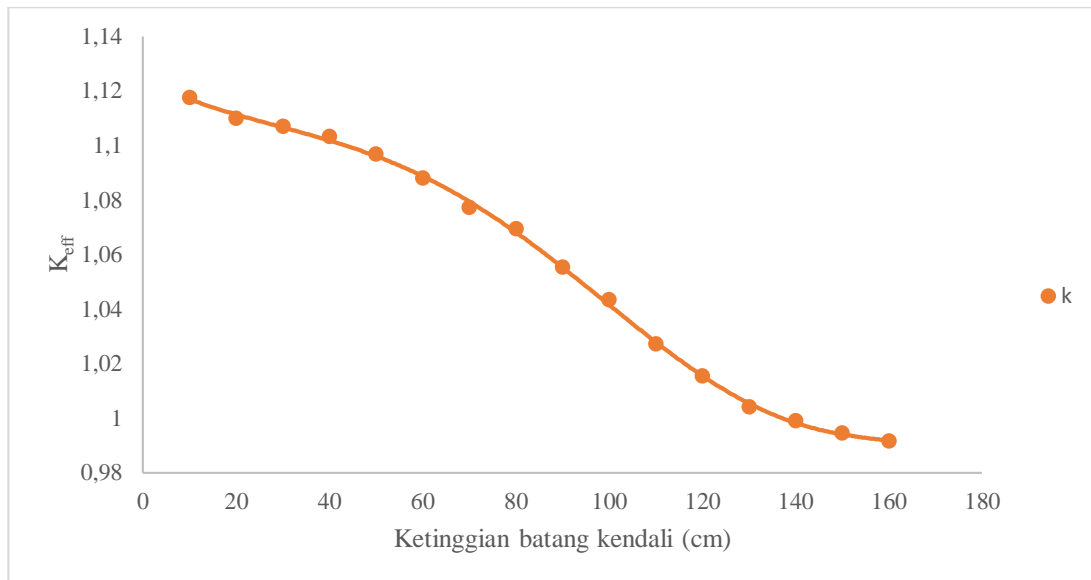


Gambar 7. Grafik Reaktivitas Void

Gambar 7 menunjukkan grafik yang membentuk kurva parabola karena terbentuknya *void* dalam teras reaktor juga menyebabkan kondisi *under moderated* dan *over moderated*. Reaktivitas mengalami peningkatan yang relatif kecil, terlihat dari kurva yang landai ketika konsentrasi *void* yang terbentuk ada pada rentang 0-50 %, sebelum akhirnya turun drastis saat konsentrasi *void* berada pada rentang 50-80 %. Kurva reaktivitas *void* tersebut dilakukan regresi linear sehingga diperoleh nilai koefisien reaktivitas *void* dari turunan persamaan kurva untuk rentang 0-50% adalah 0.0002 dan untuk rentang 50-80% memiliki koefisien reaktivitas *void* -0.0015. Semakin bertambahnya *rasio* void maka nilai k_{eff} akan semakin turun yang artinya desain reaktor SM-MSR memiliki umpan balik reaktivitas *void* negatif.

Pengaruh Ketinggian Batang Kendali

Tujuan dari simulasi pengaruh ketinggian batang kendali adalah untuk mengetahui karakteristik reaktor pada saat beroperasi dan saat kecelakaan. Batang kendali merupakan komponen penting dalam pengendalian reaktor yang material penyusunnya merupakan bahan yang dapat menyerap neutron. Desain SM-MSR dalam penelitian ini menggunakan B_4C yang memiliki tampang lintang mikroskopik serapan yang sangat besar yaitu 3.84×10^3 barn sebagai material penyusun batang kendali. Besarnya tampang lintang serapan menyebabkan populasi neutron yang terbentuk akibat reaksi fisi dalam reaktor berkurang sehingga berdampak pada menurunnya nilai k_{eff} seiring dengan masuknya batang kendali ke dalam reaktor seperti yang terlihat dalam hasil simulasi pada Tabel 4.



Gambar 8. Grafik Pengaruh Ketinggian Batang Kendali Terhadap Nilai k_{eff}

Gambar 8 terlihat bahwa kemiringan kurva terbesar terjadi pada ketinggian 50-120 cm, yang berarti bahwa pengaruh batang kendali terhadap nilai k_{eff} paling besar terjadi di tengah teras. Hal ini dikarenakan fluks terbesar dari reaktor terletak di daerah tengah, sehingga ketika batang kendali memasuki daerah tersebut maka pengaruh terhadap nilai k_{eff} cukup besar bila dibandingkan dengan daerah lainnya.

Tabel 4. Pengaruh tinggi batang kendali terhadap nilai k_{eff}

No	$h_{core}(cm)$	k_{eff}	$stdv$
1	10	1.11742	0.0015
2	20	1.10991	0.00128
3	30	1.10689	0.00125
4	40	1.10312	0.00162
5	50	1.09678	0.00151
6	60	1.08788	0.00113
7	70	1.07723	0.00138
8	80	1.06934	0.00104
9	90	1.05522	0.0011
10	100	1.04344	0.00136
11	110	1.02718	0.00137
12	120	1.01548	0.00104
13	130	1.00415	0.00121
14	140	0.99905	0.00145
15	150	0.99457	0.00107
16	160	0.99155	0.00148

Pada kondisi operasi pompa bahan bakar memompa bahan bakar ke dalam teras. Pada saat terjadi kecelakaan berupa matinya pompa bahan bakar, maka akan terjadi SCRAM pada teras. Selain itu untuk reaktor jenis MSR, ada penilaian bahwa “reaktor tetap aman untuk penghentian seluruh pompa utama jika sistem SCRAM yang sesuai dirancang” [17]. SCRAM adalah penghentian reaktor secara mendadak bersamaan dengan masuknya seluruh batang kendali ke dalam teras. Masuknya seluruh batang kendali ke dalam teras menyebabkan neutron terserap oleh batang kendali sehingga teras menjadi subkritis. Kondisi yang menggambarkan situasi ini terlihat pada Tabel 4 saat ketinggian batang kendali mencapai 160 cm dengan nilai k_{eff} 0.99155. Reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor akan terus berkurang seiring dengan berkurangnya populasi neutron di dalam teras.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan MCNP, komposisi material bahan bakar yang optimal untuk desain teras SM-MSR pada 1% Li dan 2% U-235 dengan dimensi geometri SM-MSR yang optimal adalah dengan ukuran jari-jari pin *cell core* 0.8 cm, jari-jari *pin cell blanket* 2.6 cm, dan tinggi *core* 160 cm. Desain SM-MSR memiliki koefisien reaktivitas *void* yang negatif sebesar -0.0015. Pada kondisi kecelakaan reaktor berada pada level subkritis dengan nilai k_{eff} 0.99155. Dengan demikian desain memenuhi aspek keselamatan sebuah reaktor sehingga dapat diimplementasikan sebagai sistem propulsi untuk kapal perang.

Daftar Pustaka

- [1] Kemhan_RI, *Buku Putih Pertahanan Indonesia 2015*. 2015.
- [2] C. Forsberg, P. Peterson, and H. Zhao, “An Advanced Molten Salt Reactor Using High-Temperature Reactor Technology There is Renewed Interest in MSRs Because of Changing Goals and New Technologies (Since 1970),” *2004 Int. Congr. Adv. Nucl. Power Plants Embed. Top. 2004 Am. Nucl. Soc. Annu. Meet. Am. Nucl. Soc. Pittsburgh*, pp. 1–17, 2008.
- [3] S. Philippe, “Topical Papers Safeguarding the Military Naval Nuclear Fuel Cycle,” vol. XLII, no. 3, 2014.
- [4] L. G. de Freitas Neto, L. O. Freire, A. Dos Santos, and D. A. De Andrade, “Potential advantages of molten salt reactor for merchant ship propulsion,” *Brazilian J. Radiat. Sci.*, vol. 9, no. 2B, pp. 1–18, 2021, doi: 10.15392/bjrs.v9i2b.1466.
- [5] M. Irfan, R. O. Bura, and D. Wahyudi, “Konsep Teknologi Reaktor Nuklir Sebagai Sistem Propulsi Kapal Perang Logistik Landing Platform Dock,” *Tekno. Daya Gerak*, vol. 3, no. 1, pp. 1–24, 2020, [Online]. Available: <http://jurnalprodi.idu.ac.id/index.php/TDK/article/view/533>.
- [6] B. M. Elsheikh, “Environmental Impacts of Molten Salt Reactors,” *J. Nucl. Radiat. Phys.*, vol. 14, pp. 21–28, 2019.
- [7] M. P. Dion, L. G. Worrall, and L. M. Scott, *Molten Salt Reactor Signatures and Modeling Study*. Oak Ridge National Laboratory, 2020.
- [8] J. C. Gehin and J. J. Powers, “Liquid fuel molten salt reactors for thorium utilization,” *Nucl. Technol.*, vol. 194, no. 2, pp. 152–161, 2016, doi: 10.13182/NT15-124.
- [9] J. Wu *et al.*, “A Review of Molten Salt Reactor Multi-Physics Coupling Models and Development Prospects,” *Energies*, vol. 15, no. 8296, 2022.
- [10] L. Samalova, O. Chvala, and G. I. Maldonado, “Comparative economic analysis of the Integral Molten Salt Reactor and an advanced PWR using the G4-ECONS methodology,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 99, pp. 258–265, 2017, doi: 10.1016/j.anucene.2016.09.001.
- [11] A. Hamzah, Suwoto, and H. Adrial, “Preliminary analysis of dose rates distribution of experimental power reactor 10 MW using MCNP,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1198, no. 2, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1198/2/022038.
- [12] D. Leblanc, “Using Molten Salt Nuclear Reactors in the Oil Sands,” pp. 1–20, 2012.
- [13] H. . Alam, “Desain Innovative Molten Salt Reactor (IMSR) dengan Menggunakan MCNP5,” *Teknofisika*, 2011.
- [14] A. W. Harto, “Reaktor Innovative Molten Salt (IMSR) Dengan Sistem Keselamatan Pasif Menyeluruh,” *Tri Dasa Mega*, vol. 13, no. 1, pp. 10–20, 2011.
- [15] C. R. Prabudi, “Pengaruh Ketinggian Larutan Bahan Bakar pada Kekritisannya Aqueous Homogeneous Reactor,” *Teknofisika*, vol. 2, no. 2, pp. 55–60, 2013.
- [16] J. R. Lamarsh, *Introduction to nuclear reactor theory*. Addison-Wesley, 1972.
- [17] S. Pirooz, C. Technology, and S. Officer, “Thorium fuel utilization: Options and Trends,” *Proc. three IAEA Meet. Vienna*, no. November, pp. 54–56, 2002.