



Simulasi Pengaruh Radius *Channel* Garam dan Temperatur Terhadap Distribusi Temperatur Pada Teras *Molten Salt Breeder Reactor*

Elin Yusibani*¹, Hidayatun Nisa¹, Rajibussalim¹

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Syiah Kuala, JL. Syech Abdurrauf No.3 Banda Aceh, Indonesia 23111

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima:

11 Juli 2021

Diterima dalam bentuk revisi:

30 Desember 2021

Disetujui:

30 Desember 2021

Kata kunci:

Radius channel garam

Distribusi temperatur

Molten Salt Breeder (MSBR)

Computational Fluid Dynamic (CFD)

ABSTRAK

SIMULASI PENGARUH RADIUS CHANNEL GARAM DAN TEMPERATUR TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA TERAS *MOLTEN SALT BREEDER REACTOR*. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan distribusi temperatur dengan variasi radius *channel* garam dan temperatur masukan pada teras *Molten Salt Breeder Reactor* (MSBR). *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan perangkat lunak Ansys Fluent digunakan pada simulasi ini untuk sebuah sel moderator. Variasi radius *channel* garam adalah 0,0108 m; 0,0208; dan 0,0308 m dengan panjang moderator 3,96 m. Variasi temperatur masukan adalah 809 K, 839 K, 859 K, dan 909 K. Hasil simulasi pada variasi radius menunjukkan bahwa dengan pertambahan sebesar 0,01 m memberikan kenaikan suhu sebesar 8 - 23 K pada temperatur masukan konstan. Perubahan terhadap temperatur masukan, diperoleh kenaikan temperatur keluaran antara 1 - 10 K, pada radius *channel* garam yang konstan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa distribusi temperatur dalam teras MSBR akan meningkat jika radius *channel* garam diperkecil atau temperatur masukan dinaikkan.

ABSTRACT

SIMULATION ON THE EFFECT OF CHANNEL SALT RADIUS AND TEMPERATURE TO TEMPERATURE DISTRIBUTION IN MOLTEN SALT BREEDER REACTOR CORE. This study aims to simulate the temperature distribution with variations in the radius of the salt channel and the input temperature for the Molten Salt Breeder Reactor (MSBR) core. Computational Fluid Dynamics (CFD) with Ansys Fluent software was used in this simulation for a moderator cell. The variations of the radius salt channel are 0.0108 m; 0.0208; and 0.0308 m, with a moderator length of 3.96 m. The input temperature variations are 809 K, 839 K, 859 K, and 909 K. The simulation results on the radius variation show that with an increase of 0.01 m, the temperature increases for 8—23 K at a constant input temperature. Changes in the input temperature at a constant salt channel radius give the output temperature between 1—10 K. Thus, it can be concluded that the temperature distribution in the MSBR core will increase if the salt channel radius is reduced or the input temperature is increased.

Keywords: salt channel radius, temperature distribution, Molten Salt Breeder Reactor (MSBR), Computational Fluid Dynamic (CFD) method

© 2021 Jurnal Pengembangan Energi Nuklir. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi reaktor nuklir hingga saat ini telah memasuki pada tahap Generasi IV (GenIV). GenIV merupakan generasi reaktor yang dibangun berdasarkan perbaikan dan evaluasi pengembangan dari reaktor generasi sebelumnya. Beberapa aspek yang ditingkatkan pada reaktor GenIV adalah kepastian ketersediaan bahan bakar dalam jangka waktu yang panjang, peningkatan efisiensi biaya pembangkit listrik, peningkatan aspek keselamatan dan peningkatan proteksi fisik serta proliferasi [1]. Salah satu jenis reaktor yang dikembangkan pada reaktor

GenIV adalah *Molten Salt Reactor* (MSR). MSR merupakan salah satu jenis reaktor yang memiliki sistem keselamatan pasif yang baik. Pada MSR, bahan bakar berupa lelehan garam dialirkan melalui saluran inti grafit untuk menghasilkan spektrum termal [1]. MSR pertama kali dipelopori oleh *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) dan mendapat respon positif setelah beroperasi dalam waktu sekitar empat tahun [2]. Reaktor tersebut dinamakan *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) yang menggunakan garam bahan bakar fluorida dan grafit sebagai moderator. Pada tahun 1971 ORNL mengembangkan MSRE yang diberi nama *Molten Salt Breeder Reactor* (MSBR). Berawal

*Penulis korespondensi.

E-mail: elinyusibani@unsyiah.ac.id

dari proyek Reaktor *Molten Salt Breeder* oleh ORNL, hingga kini pengembangan konsep reaktor garam cair terus diusulkan, diantaranya adalah FUJI-MSR di Jepang [3], dan integral MSR yang diusulkan *Canadian Company Terrestrial Energy* dengan menawarkan reaktor modular kecil untuk pembangkit listrik skala industri [4]. Reaktor dengan konsep serupa seperti MSRE sedang dikembangkan di Cina [5]. MSR yang dikembangkan oleh ThorCon bertujuan untuk melakukan penyederhanaan sehingga dapat difungsikan sebagai penggerak kapal [6]. Teknologi reaktor garam cair ini banyak diminati karena potensi dan keunggulan yang ditawarkan. Salah satu keselamatan pasif yang melekat pada reaktor MSR ini yang sangat baik adalah pada penggunaan bahan bakar berbasis garam *fluoride* yang berbentuk padat pada suhu ruang. Dengan demikian, MSR harus dioperasikan pada suhu cukup tinggi, yaitu di atas suhu lebur dari garam cair. Garam *fluoride* tidak bereaksi dengan udara dan tidak mudah larut dan bereaksi dengan air, sehingga meminimalisir kemungkinan terjadi kecelakaan. Perancangan sebuah reaktor memerlukan tiga aspek analisis yaitu analisis neutronik, analisis termalhidrolik dan analisis keselamatan. Salah satu aspek paling penting dalam analisis reaktor yaitu termalhidrolik reaktor. Oleh karena itu pendekatan pemodelan multi fisika diperlukan untuk mempelajari pola termalhidroliknya. Analisis termalhidrolik tersebut meliputi transfer panas (*heat transfer*), penurunan tekanan (*pressure drop*), dan distribusi temperatur. Deskripsi yang memadai mengenai termalhidrolik ini sangat penting untuk mempelajari pengendalian, operasi dan pemeliharaan reaktor. Studi awal perilaku termal hidrolik pada *channel* bahan bakar garam MSR telah dilakukan dengan mensimulasikan aliran bahan bakar garam secara 2D [7]. Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya pengaruh volume bahan bakar garam pada sifat perpindahan panas, namun pengaruh ini harus diperhitungkan dengan akurat menggunakan analisis geometri 3D yang lebih realistis dan berorientasi desain. Penelitian menganalisis perilaku termal hidrolik dengan mensimulasikan distribusi temperatur moderator dan *fuel channel* reaktor MSRE telah dilakukan [8]. Diperoleh suhu maksimum bahan bakar garam berada di *outlet* sementara suhu maksimum grafit berada di sekitar tengah *channel*. Ketika

diameter *fuel channel* dikecilkan, garam bahan bakar mengalami peningkatan suhu puncak dan diikuti dengan peningkatan daya reaktor. Suhu puncak bahan bakar dan grafit meningkat masing-masing sebesar 1°C dan 5°C setiap penurunan 0,1 cm diameter *channel* [7].

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan pengaruh radius dan temperatur garam terhadap distribusi temperatur dalam teras reaktor MSBR. Untuk mensimulasikan distribusi temperatur pada teras MSBR digunakan perangkat lunak *Ansys Fluent* dengan metode *Computed Fluid Dynamic* (CFD). Studi terperinci, tepat dan komprehensif dari konfigurasi geometri teras reaktor MSBR, dan perilaku neutroniknya diluar cakupan penelitian ini.

2. METODE

Salah satu perangkat lunak yang biasa digunakan dalam bidang desain dan analisis adalah ANSYS [9]. Program paket komputer Fluent dalam menyelesaikan aspek termohidrolika dalam teras reaktor menggunakan persamaan-persamaan dasar diantaranya konservasi massa, konservasi momentum, konservasi energi dan model aliran turbulensi. Persamaan konversi massa dapat dilihat pada Persamaan 1 [9].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (1)$$

dengan ρ adalah densitas fluida, x_i adalah jarak dalam arah i , v_i adalah komponen kecepatan dalam arah i dan S_m adalah sumber. Persamaan konversi momentum dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

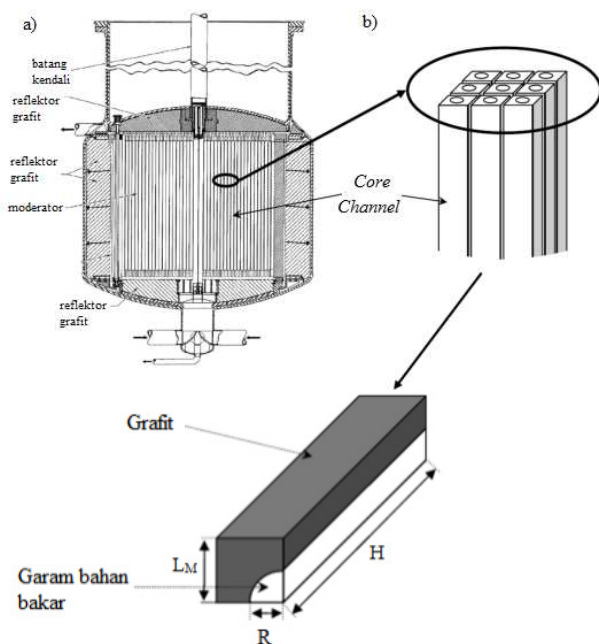
dengan p adalah tekanan statik, g_i adalah percepatan gravitasi, F_i adalah gaya luar dan τ_{ij} adalah tensor stress. Persamaan konversi energi dapat dilihat pada Persamaan 3.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + \frac{\partial p}{\partial t} + v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_y \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + S_h \quad (3)$$

dengan T adalah temperatur, J_j , adalah fluks spesies j , k adalah konduktivitas termal campuran, h adalah entalpi dan S adalah sumber. Program paket Fluent juga melibatkan faktor turbulensi ($k-\epsilon$) seperti pada Persamaan 4.

$$\rho(\overline{u'_i u'_j}) = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

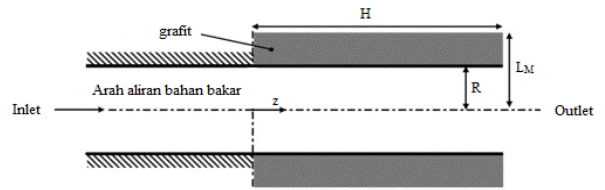
dengan \overline{u} adalah komponen kecepatan rata-rata, k adalah energi kinetik turbulen, μ_t adalah viskositas turbulen, dan δ_{ij} adalah delta kroneker $i = 1,2,3; j = 1,2,3$.



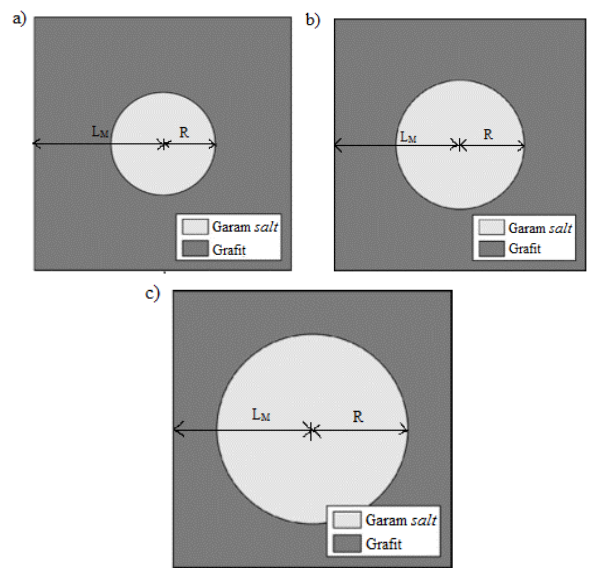
Gambar 1. Representasi skematis dari pemodelan moderator (H = panjang saluran; R = radius channel bahan bakar garam; dan L_M = ketebalan moderator) (a) teras reaktor MSBR (b) moderator beserta *channel* bahan bakar garam [10].

Geometri dari moderator pada penelitian ini diambil dari data set reaktor MSBR ORNL. Geometri dibuat menggunakan ANSYS Fluent versi 2020 R2 dengan model 3D. Geometri moderator terbagi atas dua daerah yaitu padatan dan fluida dengan ketebalan moderator (L_M) yaitu sebesar 0,0508 m. Material padatan dalam simulasi ini adalah silinder moderator menggunakan material grafit, sedangkan fluidanya adalah garam bahan bakar yang terdiri dari ${}^7\text{LiF}$ (71.7 mol%), BeF_2 (16 mol%), ThF_4 (12 mol%) dan ${}^{233}\text{UF}_4$ (0.3 mol%). Untuk keperluan simulasi, Radius *channel* bahan bakar garam divariasikan menjadi $R_1 = 0,0108$ m, $R_2 = 0,0208$ m dan R_3

= 0,0308 m dengan panjang moderator yaitu 3,96 m (Gambar 1, 2 dan 3) dengan temperatur masukan masing-masing divariasikan menjadi 809 K, 839 K, 859 K dan 909 K.



Gambar 2. Model geometri tampak samping.



Gambar 3. Radius *channel* bahan bakar garam dan ketebalan grafit masing-masing model geometri (a) $R_1 = 0,0108$ m, $L_M = 0,0508$ m (b) $R_2 = 0,0208$ m, $L_M = 0,0508$ m, dan (c) $R_3 = 0,0308$ m, $L_M = 0,0508$ m.

Tabel 1. Parameter reaktor MSBR ([7], [11]).

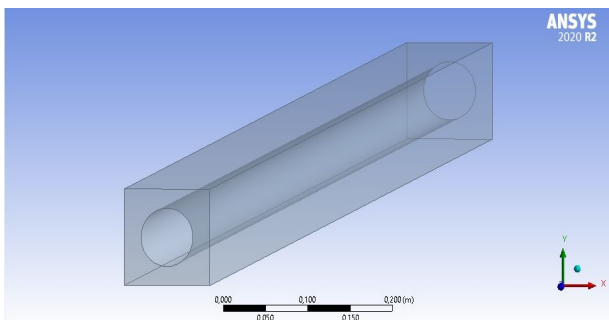
Parameter	Nilai	
Teras		
Daya Total (MW_{th})	1830	
Radius <i>channel</i> bahan bakar garam, R [m]	0,0208	
Ketebalan grafit, L_M [m]	0,0508	
Panjang saluran, H [m]	3,96	
Bahan Bakar		
	Garam	Grafit
Densitas [kg/m^3]	3,327	1,843
Kalor Jenis [J/Kg.K]	1,357	1,760
Temperatur Inlet [K]	839	-
Temperatur Outlet [K]	977	-
Viskositas [kg/m.s]	0,01	-
Konduktivitas Termal [W/m.K]	1,23	31,2
Kecepatan Aliran [m/s]	1,47	-
Angka Prandtl	11	-
Bilangan Reynold	2×10^4	-

Bahan bakar Garam: ($\text{LiF} - \text{BeF}_2 - \text{ThF}_4 - \text{UF}_4$)

Tekanan yang digunakan dalam simulasi konstan sebesar 1 atm. Perhitungan dilakukan dengan iterasi sebanyak 1000 hingga konvergen. Kriteria konvergensi yang digunakan adalah apabila nilai *residual absolute* mencapai 1×10^6 untuk semua perhitungan. Data yang dimasukkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Geometri dibuat berbentuk 3D moderator tunggal MSBR yang terdiri dari daerah padatan yaitu moderator grafit, dan daerah fluida yang diisikan bahan bakar garam bersirkulasi dari *inlet* ke *outlet* (Gambar 4). Variasi radius dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi temperatur akibat perpindahan panas antara bahan bakar garam dengan grafit. *Channel* bahan bakar garam ditempatkan dalam balok moderator grafit yang memiliki geometri lebih besar, dan diatur sedemikian rupa.



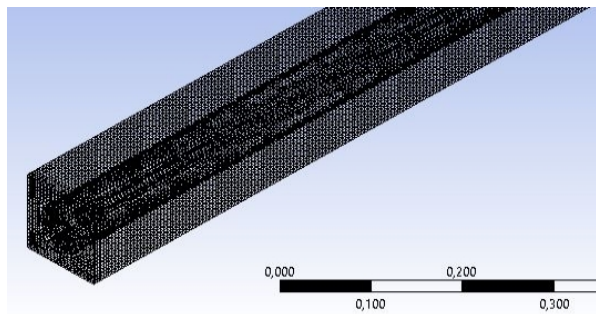
Gambar 4. Geometri Moderator MSBR dengan radius *channel* bahan bakar garam 0,0308 m.

Penggenerasian *mesh* pada penelitian ini menggunakan Ansys Meshing berbentuk *heksahedral*. Penyempurnaan *mesh* pada daerah fluida dilakukan dengan mengaplikasikan *Face Sizing* dengan *Element Size* 10^{-2} m dan *Behavior* diatur dari *Soft* ke *Hard*. Selanjutnya penyempurnaan *mesh* pada batasan *channel* diaplikasikan fitur *Edge Sizing* dengan tipe *Number of Division* sebesar 30 pada tepi *channel* bahan bakar garam. Adapun kualitas dari proses *meshing* yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan tabel dapat dilihat kualitas *meshing* yang dihasilkan telah masuk dalam kriteria *acceptable meshing* yaitu lebih dari 0,15 untuk *orthogonal quality* dan kurang dari 0,95 untuk *skewness*. Gambar

5 menunjukkan visualisasi *meshing* geometri moderator tunggal MSBR.

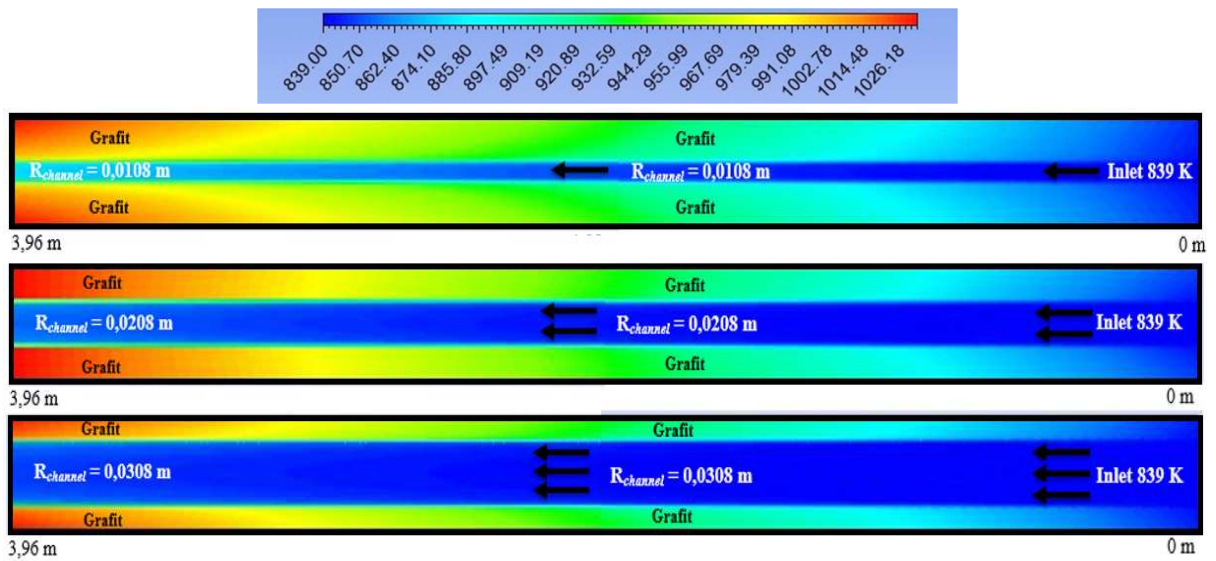
Tabel 2. Jumlah Mesh dan Kualitas Meshing yang dihasilkan

Radius Channel (m)	Jumlah Mesh	Skewness	Orthogonal Quality
0,0108	317200	0,47784	0,52251
0,0208	443207	0,63080	0,45634
0,0308	468663	0,56447	0,44618



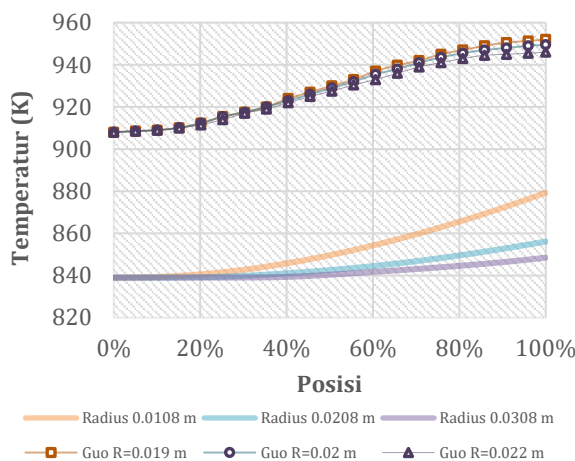
Gambar 5. Hasil *meshing* geometri moderator MSBR untuk radius *channel* bahan bakar garam 0,0308 m.

Metode solusi yang dipilih untuk menyelesaikan kasus perpindahan panas pada penelitian ini adalah metode SIMPLE. Sedangkan untuk perhitungan momentum, tekanan, dan energi dipilih metode diskritisasi *second order*. Hasil simulasi berupa distribusi temperatur dalam teras MSBR dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan hasil simulasi pengaruh radius terhadap distribusi temperatur *channel* garam dalam teras reaktor MSBR. Perpindahan panas yang terjadi di dalam *channel* garam secara konduksi dan konveksi. Aliran panas konduksi terjadi disepanjang padatan grafit, karena molekul-molekul grafit berhubungan secara langsung. Sedangkan secara konveksi perpindahan panas terjadi antara bahan bakar garam dengan grafit yang berada pada dinding *channel*. Konduktivitas termal grafit (31,2 W/m.K) lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar garam (1,23 W/m.K). Terlihat perbedaan nilai temperatur antara bahan bakar garam dengan grafit pada ketinggian moderator yang sama disebabkan oleh konduktivitas termal material. Nilai konduktivitas termal ini menunjukkan seberapa cepat energi termal mengalir dalam bahan. Semakin besar konduktivitas termal, maka semakin cepat laju perpindahan energi termal terjadi. Pada radius *channel* bahan bakar



Gambar 6. Kontur warna distribusi temperatur dari inlet 0 m sampai 3,96 m.

garam diperbesar dengan temperatur constant (839 K) hasil simulasi menunjukkan temperatur bahan bakar garam cenderung menurun. Semakin besar radius *channel* garam maka semakin besar pula volume bahan bakar garam yang masuk, sehingga semakin kecil pengaruh konduktivitas termal dalam distribusi temperatur garam. Gambar 7 menunjukkan grafik pengaruh variasi *channel* bahan bakar garam terhadap distribusi temperatur dalam teras reaktor MSBR.

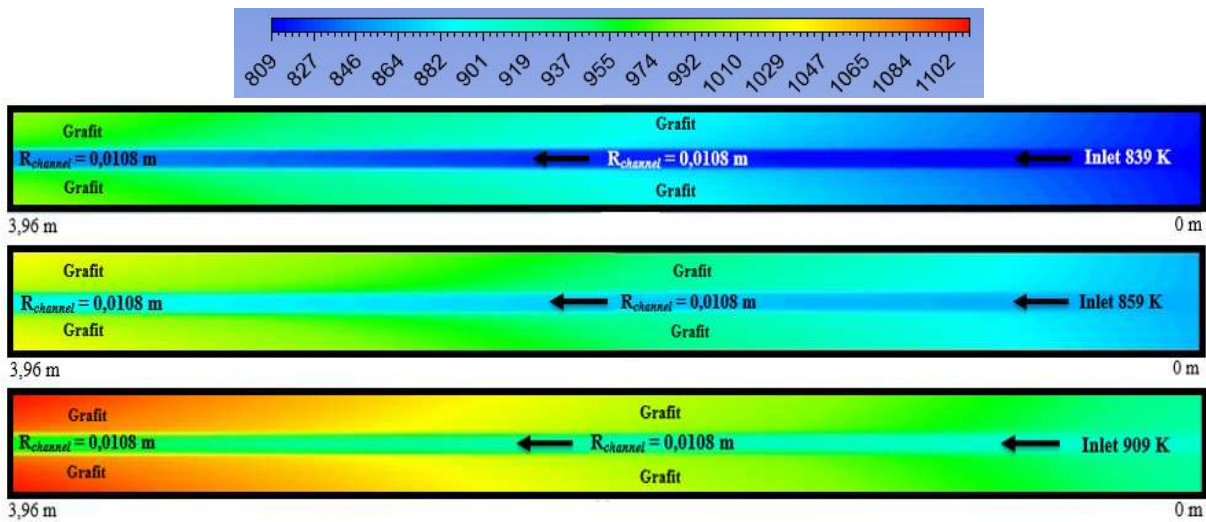


Gambar 7. Grafik pengaruh variasi *channel* bahan bakar garam terhadap distribusi temperatur dalam teras reaktor MSBR.

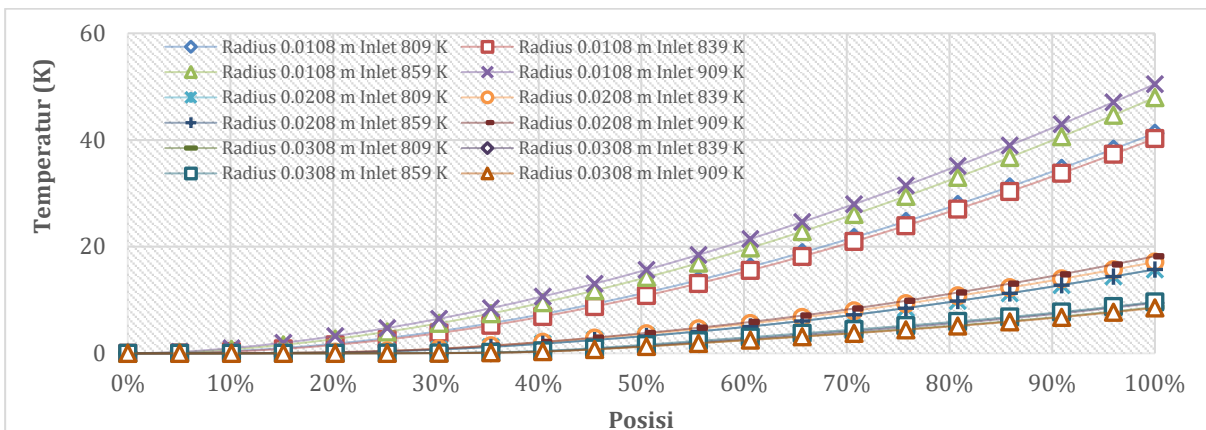
Posisi pada Gambar 7 merupakan ketinggian *channel* dalam persen, sedangkan sumbu Y merupakan temperatur disepanjang ketinggian *channel*. Pada temperatur masukan yang sama, namun radius *channel* bahan bakar

garam berbeda, terlihat perbedaan temperatur pada posisi yang sama secara aksial. Hasil ini konsisten dengan penelitian oleh Guo, Z. et al., [8], distribusi temperatur bahan bakar garam mengalami kenaikan sesuai dengan posisi ketinggiannya, semakin tinggi bahan bakar garam mengalir didalam *channel*, semakin tinggi pula temperaturnya. Oleh sebab itu, temperatur tertinggi di dalam *channel* berada pada daerah *outlet*, hal ini disebabkan bahan bakar garam yang mengalir dari *inlet* menuju outlet terus-menerus menerima panas.

Perubahan radius mempengaruhi temperatur puncak bahan bakar garam. Selisih temperatur keluaran dengan temperatur masukan pada setiap perubahan radius *channel* 0,0108 m, 0,0208 m, dan 0,0308 m secara berturut-turut adalah 40 K, 17 K, dan 10 K. Hasil ini menunjukkan *channel* bahan bakar garam dengan radius 0,0108 m menghasilkan selisih temperatur yang lebih besar daripada radius *channel* yang lebih besar, yaitu sebesar 40 K. Bersesuaian dengan hasil simulasi oleh Ref [8] menunjukkan bahwa *channel* berdiameter lebih besar memiliki tingkat keamanan yang lebih baik, namun akan memperpendek umur grafit karena efek korosi. Selain itu, dengan volume bahan bakar garam yang masuk lebih besar, performa grafit dalam memoderasi neutron cepat kedalam spektrum termal menjadi menurun. Distribusi temperatur variasi temperatur masukan bahan bakar garam dengan radius 0,0108 m, yang dipotong memanjang pada setengah dari panjang moderator seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Kontur warna pengaruh variasi temperatur masukan terhadap distribusi temperatur dari tengah moderator hingga outlet dengan variasi temperatur masukan 839, 859 dan 909 K pada $R=0,0108$ m.



Gambar 9. Grafik pengaruh variasi temperatur masukan bahan bakar garam terhadap distribusi temperatur moderator dalam teras reaktor MSBR.

Berdasarkan simulasi pada jari jari channel sebesar 0,0108 m didapat bahwa dengan temperatur masukan 839 K, 859 K, dan 909 K, temperatur bahan bakar garam pada ketinggian moderator 1,98 m secara berturut-turut sebesar 820 K, 873 K, dan 924 K (Gambar 8). Pada temperatur masukan garam 909 K menghasilkan distribusi temperatur tertinggi mencapai 1105 K dan temperatur keluaran bahan bakar garam mencapai 959,5 K. Sedangkan pada temperatur masukan garam 859 K dan 809 K, menghasilkan temperatur keluaran garam berturut-turut sebesar 906 K dan 850 K. Grafik 9 menunjukkan distribusi temperatur yang telah dinormalisasi dengan temperatur masukan 809 K, 839 K, 859 K, dan 909 K. Pada radius *channel* garam 0,0108 m, dihasilkan temperatur puncak secara berturut-turut sebesar 41 K, 40 K, 48 K dan 50 K. Pada radius *channel* garam 0,0208 m dihasilkan temperatur

puncak secara berturut-turut, 16 K, 17 K, 16 K dan 18 K. Radius *channel* garam 0,0308 m dihasilkan temperatur puncak secara berturut-turut 9 K, 9 K, 10 K dan 8 K.

Temperatur masukan 909 K menghasilkan temperatur keluaran paling tinggi pada radius *channel* yang sama. Namun pada radius *channel* garam yang lebih besar, yaitu 0,0308 m. Pada setiap perubahan temperatur masukan menghasilkan selisih temperatur yang hampir sama, yaitu sekitar 8 K hingga 9 K di outlet *channel*. Sedangkan pada radius *channel* garam 0,0108 m, selisih temperatur pada setiap perubahan temperatur masukan dapat dilihat sangat jelas. Hal ini disebabkan oleh semakin kecilnya koefisien perpindahan energi termal yang terjadi ketika volume bahan bakar garam semakin besar. Aliran konveksi yang terjadi antara bahan bakar garam dengan grafit adalah aliran konveksi bebas, sehingga gerakan fluida

garam hanya disebabkan oleh gradien temperatur tanpa melibatkan pompa. Sebagai akibatnya intensitas gerakan molekul-molekul bahan bakar garam cenderung kecil sehingga koefisien perpindahan energinya menjadi kecil pula. Jika diameter *channel* diperbesar, volume bahan bakar garam yang masuk akan semakin besar. Sehingga koefisien perpindahan energinya semakin bertambah kecil. Koefisien perpindahan energi konveksi sangat berhubungan dengan kerapatan, viskositas, diameter alir, bilangan Reynolds, Prandtl, dan Nuselt. Secara matematis, hubungan ini dapat dilihat pada Persamaan 5-8.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}; \quad (5)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}; \quad (6)$$

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{0.3}; \quad (7)$$

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad (8)$$

Dimana Re adalah bilangan Reynolds, ρ adalah kerapatan, v adalah kecepatan aliran, μ adalah viskositas fluida, Pr adalah bilangan Prandtl, c_p adalah kalor spesifik, k adalah konduktivitas termal, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, dan D adalah diameter tempat alir. Persamaan 5 membuktikan bahwa semakin besar diameter *channel*, semakin besar pula volume bahan bakar garam yang masuk, akibatnya semakin kecil koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi. Berdasarkan Pers. (5) diketahui bahwa semakin kecil koefisien perpindahan panas konveksi maka semakin kecil pula laju perpindahan yang terjadi. Dalam desain teras reaktor, temperatur operasi yang tinggi akan menghasilkan efisiensi yang tinggi pula, namun berdampak negatif pada sistem instrumentasi dan komponen-komponen dalam teras reaktor. Sistem instrumentasi mudah rusak dan komponen-komponen akan mengalami percepatan korosi pada temperatur garam yang sangat tinggi. Sehingga perlu diketahui temperatur optimum dalam sebuah desain reaktor.

4. KESIMPULAN

Telah berhasil dilakukan simulasi pengaruh radius *channel* garam dan temperatur terhadap distribusi temperatur di dalam teras reaktor MSBR. Berdasarkan hasil simulasi diketahui bahwa semakin besar radius *channel* garam, akan menurunkan temperatur keluaran bahan bakar garam pada temperatur masukan yang sama. Semakin tinggi temperatur masukan garam yang masuk kedalam *channel*, maka semakin meningkat pula distribusi temperatur disepanjang *channel* pada radius yang sama.

SARAN/ REKOMENDASI

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mengkondisikan lebih dari satu moderator sehingga dapat dilihat interaksi yang terjadi, mengingat jumlah moderator dalam teras MSBR berjumlah 1.582 sel.

DAFTAR ACUAN

- [1]. Anggoro, Y. D., Dewi, D., Nurlaila, N., & Yuliyanto, A. T. (2013). Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 15(2).
- [2]. Rosenthal, M. (1969). Molten-salt Reactor Program Semiannual *Progress Report: For Period Ending August 31, 1968*. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee
- [3]. Furukawa, K., Arakawa, K., Erbay, L. B., Ito, Y., Kato, Y., Kiyavitskaya, H., Lecocq, A., Mitachi, K., Moir, R., & Numata, H. (2008). A road map for the realization of global-scale thorium breeding fuel cycle by single molten-fluoride flow. *Energy Conversion and Management*, Vol. 49(7), 1832-1848.
- [4]. LeBlanc, D., & Rodenburg, C. (2017). Integral molten salt reactor. Dalam *Molten Salt Reactors and Thorium Energy* (hlm. 541-556). Elsevier.
- [5]. Cheng, M., & Dai, Z. (2013). Stability Analysis of the MSBR. *International Conference on Nuclear Engineering* Vol 55799, American Society of Mechanical Engineers.
- [6]. Jorgensen, L. (2017). ThorCon reactor. Dalam *Molten Salt Reactors and Thorium Energy*, 557-564. Elsevier.
- [7]. Di Marcello, V., Cammi, A., & Luzzi, L. (2008). Analysis of thermal-hydraulic behaviour of the molten salt nuclear fuel. In *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe*, 8-11.
- [8]. Guo, Z., Zhou, J., Zhang, D., Chaudri, K. S., Tian, W., Su, G., & Qiu, S. (2013). Coupled neutronics/thermal-hydraulics for analysis of molten salt reactor. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 258, 144-156.
- [9]. FLUENT, A. (2005). *Fluent Theory Manual*. Fluent Inc, Lebanon.

- [10]. LeBlanc, D. (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. *Nuclear Engineering and design*, 240(6), 1644–1656.
- [11]. Robertson, R. C. (1971). *Conceptual Design Study Of A Single-Fluid Molten-Salt Breeder Reactor*. comp.; Oak Ridge National Lab., Tenn.