

Studi Pengaruh Ukuran *Pebble bed* Terhadap Termal Hidrolik *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) Menggunakan COMSOL *Multiphysics*

I Gusti Ayu Putu Dwi Ekasari⁽¹⁾, Yanti Yulianti^{(1,a)*}, Duwi Hariyanto⁽²⁾,
Gurum Ahmad Pauzi⁽¹⁾

¹Jurusan Fisika, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia, 35141

²Prodi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia, 35365

Email : ^(a)yanti.yulianti@fmipa.unila.ac.id

Disubmisi: 3 Desember 2025, Direvisi: 25 Mei 2026

Abstract.

Background: The development of nuclear energy, particularly in the Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel (TMSR-SF) requires a deep understanding of thermal-hydraulic characteristics, including temperature, flow velocity, and pressure within the reactor core.

Aims: This research aims to analyze the influence of pebble bed diameter on temperature and pressure, as well as to examine the impact of initial fluid flow conditions on fluid velocity within the TMSR-SF reactor core.

Methods: Simulations were conducted by the Heat Transfer in Fluids and Laminar Flow modules in the COMSOL Multiphysics application.

Results: The simulation results show that the highest temperature difference percentage between the 6 cm and 9 cm pebble beds is 0.7%, while between the 6 cm and 12 cm pebble beds, it is 1.7%. The highest pressure drop percentage over time was observed in the 6 cm pebble bed at 1.6%, followed by the 9 cm pebble bed at 1.4%, and the 12 cm pebble bed at 1.5%. Additionally, the percentage difference of initial fluid flow rate decreasing was recorded at 0.09% between the 6 cm and 9 cm pebble beds and 0.26% between the 9 cm and 12 cm pebble beds.

Conclusion: The 6 cm pebble bed diameter provides more optimal thermal-hydraulic performance, particularly in terms of temperature stability and fluid flow consistency, which are crucial for the efficiency and safety of TMSR-SF reactor operation.

Keywords: COMSOL Multiphysics, TMSR-SF, Thermal hydraulics, Pebble bed, Diameter variations

Abstrak.

Latar Belakang: Pengembangan energi nuklir, khususnya dalam reaktor Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel (TMSR-SF) membutuhkan pemahaman mendalam tentang karakteristik termal hidrolik, termasuk suhu, kecepatan aliran, dan tekanan di dalam teras reaktor.

Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ukuran diameter *pebble bed* terhadap suhu dan tekanan, serta mengkaji pengaruh laju kondisi awal fluida terhadap kecepatan aliran fluida dalam teras reaktor TMSR-SF.

Metode: Simulasi dilakukan dengan memanfaatkan modul *Heat Transfer in Fluids* dan modul *Laminar Flow* pada aplikasi COMSOL Multiphysics.

Hasil: Hasil simulasi menunjukkan bahwa persentase perbedaan suhu tertinggi antara *pebble bed* berukuran 6 cm dan 9 cm adalah 0,7%, sementara antara *pebble bed* 6 cm dan 12 cm adalah 1,7%. Penurunan tekanan tertinggi seiring waktu terjadi pada *pebble bed* 6 cm sebesar 1,6%, *pebble bed* 9 cm sebesar 1,4%, dan *pebble*

bed 12 cm sebesar 1,5%. Selain itu, persentase perbedaan penurunan laju awal aliran fluida tercatat sebesar 0,09% antara *pebble bed* 6 cm dan 9 cm, serta 0,26% antara *pebble bed* 9 cm dan 12 cm.

Kesimpulan: Ukuran diameter *pebble bed* 6 cm memberikan kinerja termal hidrolik yang lebih optimal, khususnya dalam hal stabilitas suhu dan konsistensi aliran fluida, yang penting untuk efisiensi dan keamanan operasi reaktor TMSR-SF.

Kata kunci: COMSOL *Multiphysics*, TMSR-SF, termal hidrolik, *pebble bed*, variasi diameter

PENDAHULUAN

Pemanasan global dan perubahan iklim yang diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar fosil secara masif telah memicu berbagai masalah lingkungan, termasuk peningkatan suhu bumi, naiknya permukaan air laut, dan perubahan pola cuaca yang tidak stabil. Indonesia, dengan beragam sumber daya alam yang dimilikinya, perlu memanfaatkan sumber energi alternatif yang lebih bersih dan berkelanjutan [1]. Selain energi terbarukan seperti panas bumi, biomasa, air, angin, dan energi matahari, energi nuklir menjadi pilihan penting yang mampu menyediakan pasokan listrik dalam jumlah besar secara stabil, dengan emisi yang jauh lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil.

Saat ini, penggunaan energi nuklir di Indonesia masih terbatas pada penelitian dan aplikasi di bidang medis serta industri, seperti radiofarmasi, sterilisasi, pengawetan makanan, dan pertanian [2]. Namun, perkembangan teknologi reaktor nuklir telah melahirkan desain yang lebih aman dan efisien, seperti *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR) yang dilengkapi dengan sistem pipa keamanan atau *safety plug*. Sistem ini tidak lagi bergantung pada pasokan listrik eksternal untuk menjaga keselamatan reaktor, sehingga mampu mengatasi potensi kegagalan sistem pendingin seperti yang terjadi pada bencana nuklir Fukushima.

TMSR merupakan salah satu dari enam desain reaktor nuklir Generasi IV yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar, meningkatkan tingkat

keselamatan, dan mengurangi limbah nuklir. Reaktor ini menggunakan thorium sebagai bahan bakar utama, yang lebih melimpah, aman, dan ramah lingkungan dibandingkan uranium [3]. Dua jenis utama dari TMSR adalah *Thorium Molten Salt Reactor Liquid Fuel* (TMSR-LF) yang menggunakan bahan bakar berbentuk cair, dan *Thorium Molten Salt Reactor Solid Fuel* (TMSR-SF) [1] yang menggunakan bahan bakar berbentuk padat dengan *pebble bed* sebagai media bahan bakarnya. Dalam TMSR-SF, bahan bakar yang digunakan adalah partikel TRISO (*Tri-structural Isotropic*), yang dikemas dalam bentuk *pebble* atau bola-bola kecil. *Pebble bed* memainkan peran penting dalam mendukung efisiensi dan keselamatan operasional reaktor, karena konfigurasi bola-bola ini memungkinkan perpindahan panas yang efektif dan mengurangi risiko kecelakaan nuklir [4]. Ukuran *pebble* memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik termal hidrolik reaktor. *Pebble* yang lebih kecil cenderung meningkatkan luas permukaan kontak untuk perpindahan panas yang lebih baik, namun juga meningkatkan penurunan tekanan dan berisiko menyumbat aliran pendingin. Sebaliknya, *pebble* yang lebih besar mengurangi penurunan tekanan tetapi mungkin mengorbankan efisiensi perpindahan panas [5].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ukuran *pebble* mempengaruhi distribusi kekosongan (*void*) di dalam teras reaktor, yang mempengaruhi perpindahan panas maksimum [6]. Namun, studi yang lebih dalam mengenai pengaruh ukuran

pebble bed terhadap karakteristik termal hidrolik reaktor TMSR-SF masih sangat terbatas. Padahal karakteristik termal hidrolik, seperti distribusi suhu dan aliran fluida sangat penting dalam menentukan keselamatan reaktor nuklir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara lebih mendalam pengaruh ukuran *pebble bed* terhadap sifat termal hidrolik dalam reaktor TMSR-SF, terutama dalam hal distribusi suhu, profil aliran fluida, koefisien perpindahan panas, dan penurunan tekanan [7]. Simulasi numerik melalui perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* bisa mengkaji berbagai ukuran *pebble* untuk menentukan ukuran optimal yang dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas sekaligus meminimalkan risiko penurunan tekanan. Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan reaktor TMSR-SF yang lebih efisien dan aman. Selain itu, hasil penelitian ini akan mendukung pengembangan energi nuklir di Indonesia sebagai salah satu solusi energi bersih yang berkelanjutan dan berpotensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan. Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh ukuran diameter *pebble bed* terhadap termal hidrolik berupa suhu dan tekanan di teras reaktor TMSR-SF serta menganalisis pengaruh laju kondisi awal fluida terhadap termal hidrolik berupa kecepatan aliran fluida di dalam teras reaktor TMSR-SF.

METODE PENELITIAN

Simulasi studi pengaruh ukuran diameter *pebble bed* menggunakan teras reaktor berukuran 143×143 cm dengan variasi diameter *pebble bed* 6 cm, 9 cm, dan 12 cm. Penelitian ini menggunakan garam FLiBe dan grafit menggunakan modul *heat transfer in fluids* dan *laminar flow* pada aplikasi COMSOL *Multiphysics*. Penelitian ini mengadopsi pendekatan dua dimensi pada bidang x-y untuk menganalisis distribusi parameter termal hidrolik di dalam

pebble bed reaktor TMSR-SF.. Persamaan yang digunakan pada simulasi ini meliputi:

Persamaan Dinamika Perpindahan Panas

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \Phi \quad (1)$$

Persamaan (1) menggambarkan perpindahan energi panas dari grafit, Φ merupakan sumber panas berupa grafit yang menjadi lapisan terluar pada *Pebble bed* serta $\mathbf{u}$ dan v merupakan kecepatan *pebble bed* pada sumbu xy, karena *pebble bed* tetap di posisi yang sama maka kecepatannya 0 m/s.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Persamaan (2) menggambarkan perpindahan energi panas fluida yang bergerak dalam 2 dimensi, fluida pada penelitian ini menggunakan FLiBe serta $\mathbf{u}$ dan v merupakan kecepatan fluida pada sumbu xy sebesar 0,09 m/s.

Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Persamaan (3) mengasumsikan alirannya *weakly incompressible* dan densitasnya konstan. Aliran fluida yang dipengaruhi oleh variasi densitas kecil, densitas yang berubah terhadap waktu terutama yang disebabkan oleh perbedaan suhu, dihitung menggunakan persamaan boussinesq seperti ditunjukkan pada persamaan (4).

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (4)$$

Persamaan Navier – Stokes

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Persamaan (5) merupakan persamaan Navier- Stokes pada 2 dimensi

pada sumbu x tidak terdapat gaya eksternal (sama dengan 0).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial v}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

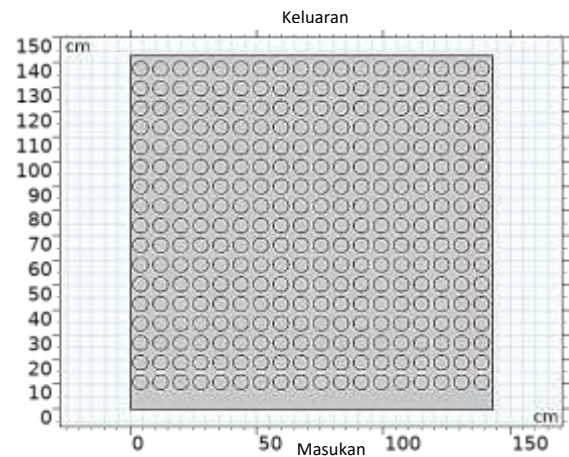
Persamaan (6) merupakan persamaan Navier-Stokes 2 dimensi pada sumbu y dipengaruhi oleh gaya gravitasi sehingga terdapat gaya eksternal yang dituliskan dengan $\rho \mathbf{g}$.

Persamaan (5) dan (6) berkaitan langsung dengan persamaan (7) yang menggambarkan keseimbangan gaya inersia dan gaya viskos dalam fluida. Bilangan Reynold ditentukan oleh rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos, ditunjukkan pada persamaan (7).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (7)$$

Pada persamaan (5) dan (6), bilangan Reynold menunjukkan apakah aliran didominasi oleh gaya viskos (laminar) atau gaya inersia (turbulen). Jika bilangan Reynold rendah, gaya viskos lebih dominan, menghasilkan aliran yang teratur. Sebaliknya, bilangan Reynold tinggi menunjukkan dominasi gaya inersia, yang dapat menyebabkan aliran menjadi turbulen.

Pada **Gambar 1** menunjukkan geometri teras dan *pebble bed*, sedangkan pada **Tabel 1** sampai **Tabel 4** menunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam pemodelan.



Gambar 1. Geometri Teras Reaktor dan *Pebble bed*

Tabel 1. Dimensi dari Teras Reaktor dan *Pebble bed*

Parameter	Nilai (m)
Panjang teras reaktor	1,43
Lebar teras reaktor	1,43
Diameter <i>pebble bed</i> 1	0,06
Diameter <i>pebble bed</i> 2	0,09
Diameter <i>pebble bed</i> 3	0,12

Tabel 2. Parameter Desain TMSR-SF Penelitian

Parameter	Nilai
Daya Termal (kW)	20.000/2000
Suhu Masuk (K)	873/873
Suhu Keluar (K)	893/973
Diameter <i>pebble</i> (cm)	6
Porositas	0,32
Teras Reaktor (m)	1,43 x 1,43
Pendingin	LiF-BeF ₂ (66,7%;33,3%)

Tabel 3. Parameter LiF-BeF₂(66,7-33,3)

Parameter	Nilai
Titik Lebur (K)	733,15
Titik Didih (K)	1673,15
Kapasitas Panas (J/kg.K)	2380
Viskositas (Pa.s)	$1,164 \times 10^{-4}$
Konduktivitas Termal(W/m.K)	0,0005

Tabel 4. Syarat Batas

Suhu masukan	873 K
Suhu keluaran	973 K
Tekanan relatif	0 Pa

Sumber panas	$2,53 \times 10^7 \text{ W/m}^3$
Kecepatan masuk	0,0952 m/s

Tabel 5. Titik Pengukuran

Titik ke	6 cm(x;y)	9 cm(x;y)	12 cm(x;y)
1	(75,5; 5)	(77; 8)	(71; 13)
2	(75,5; 46)	(77; 34)	(71; 45)
3	(75,5; 78)	(77; 70)	(71; 77)
4	(75,5; 110)	(77; 105)	(71; 108,5)
5	(75,5; 142)	(77; 141)	(71; 140,5)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan termal hidrolik pada *pebble bed* dengan diameter 6 cm, 9 cm, dan 12 cm dilakukan dengan mengambil data di lima titik selama simulasi menggunakan COMSOL *Multiphysics*. Lima titik pengukuran ini dipilih untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai distribusi suhu, tekanan, dan kecepatan aliran di sepanjang *pebble bed*.

Pada *pebble bed* berdiameter 6 cm (**Gambar 2**), suhu fluida mengalami peningkatan bertahap saat fluida bergerak dari inlet menuju outlet, menunjukkan transfer panas yang efisien dari *pebble* ke fluida. Kenaikan suhu ini terjadi karena luas permukaan *pebble* yang lebih besar memungkinkan perpindahan panas yang lebih cepat, dengan suhu inlet fluida sebesar 873,00 K dan suhu outlet mencapai 973,59 K, sehingga terjadi kenaikan suhu sebesar 11,52% seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5**. Meskipun ada sedikit penurunan suhu di bagian akhir karena fluida mendekati kondisi kesetimbangan termal, perpindahan panas secara keseluruhan tetap efisien.

Selain itu, kecepatan fluida juga mengalami penurunan dari 0,096 m/s di inlet menjadi 0,052 m/s di outlet, menghasilkan penurunan kecepatan sekitar 45,83%. Penurunan ini terjadi karena resistensi aliran yang dihasilkan oleh celah-celah antar *pebble* yang sempit dan peningkatan viskositas fluida pada suhu tinggi, namun kecepatan yang lebih rendah memungkinkan fluida menyerap panas secara optimal.

Tekanan fluida pun menurun secara signifikan dari 1891,93 Pa di inlet menjadi -31752,61 Pa di outlet, yang menunjukkan penurunan tekanan sebesar 1778,75%. Penurunan tekanan ini disebabkan oleh resistensi aliran yang tinggi dalam *pebble bed*, memperlambat aliran fluida secara signifikan menjelang outlet. Meskipun demikian, distribusi suhu, kecepatan, dan tekanan pada *pebble bed* 6 cm tetap terjaga dengan baik, memastikan pendinginan yang optimal dan stabilitas termal-hidrolik dalam reaktor.

Pada *pebble bed* berdiameter 9 cm (**Gambar 3**), suhu fluida juga mengalami peningkatan dari inlet menuju outlet, meskipun kenaikan suhu lebih moderat dibandingkan dengan *pebble bed* yang lebih kecil. Berdasarkan data, suhu inlet fluida adalah 873,00 K, sementara suhu outlet mencapai 968,66 K, yang menunjukkan adanya kenaikan suhu sebesar 10,96% seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6**. Kenaikan ini sedikit lebih rendah dibandingkan dengan *pebble bed* 6 cm, karena luas permukaan kontak antara fluida dan *pebble* yang lebih kecil, sehingga transfer panas tidak seefisien *pebble* yang lebih kecil. Namun, fluida tetap mampu menyerap panas dengan baik saat bergerak melalui reaktor.

Kecepatan fluida dalam *pebble bed* ini juga mengalami fluktuasi dari kecepatan awal 0,08 m/s di inlet, kecepatan fluida sempat turun di tengah *pebble bed* namun kemudian meningkat lagi menuju outlet, dengan kecepatan outlet mencapai 0,09 m/s. Penurunan dan peningkatan kecepatan ini mencapai sekitar 12,5%, yang menunjukkan adanya variasi aliran akibat distribusi tekanan dan hambatan aliran di sepanjang *pebble bed*.

Celah antar *pebble* yang lebih besar pada *pebble* 9 cm memberikan resistensi yang lebih kecil, sehingga fluida dapat mempertahankan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan *pebble* yang lebih kecil.

Tekanan fluida mengalami penurunan yang signifikan dari inlet ke outlet. Berdasarkan data, tekanan inlet adalah -405,37 Pa, sementara tekanan outlet turun menjadi -31521,06 Pa. Penurunan tekanan ini mencapai 7690,85%, menunjukkan bahwa meskipun resistensi aliran lebih rendah dibandingkan *pebble bed* 6 cm, tekanan tetap menurun secara signifikan sepanjang jalur aliran akibat gesekan dan hambatan antar *pebble*. Namun, penurunan tekanan ini tetap terkendali, dan aliran fluida terus berjalan stabil di sepanjang *pebble bed*.

Secara keseluruhan, *pebble bed* 9 cm menunjukkan distribusi suhu yang lebih moderat, fluktuasi kecepatan yang lebih kecil, serta penurunan tekanan yang cukup besar namun stabil, yang secara keseluruhan mendukung transfer panas yang efisien dan menjaga stabilitas termal hidrolik reaktor.

Pada *pebble bed* berdiameter 12 cm (**Gambar 4**), suhu fluida mengalami peningkatan yang lebih kecil dibandingkan *pebble bed* dengan ukuran yang lebih kecil. Berdasarkan data, suhu inlet fluida adalah 873,02 K dan suhu outlet mencapai 954,54 K, yang menunjukkan adanya kenaikan suhu sebesar 9,34% seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7**. Kenaikan suhu ini lebih rendah dibandingkan dengan *pebble bed* 6 cm dan 9 cm, karena luas permukaan kontak antara fluida dan *pebble* semakin kecil, sehingga perpindahan panas terjadi lebih lambat. Meski demikian, fluida masih mampu menyerap panas sepanjang jalur aliran, walaupun lebih lambat dibandingkan *pebble bed* yang lebih kecil.

Kecepatan fluida dalam *pebble bed* 12 cm juga menunjukkan pola penurunan yang lebih signifikan. Pada inlet, kecepatan fluida tercatat sebesar 0,06 m/s, namun menurun secara bertahap hingga kecepatan di outlet hanya mencapai 0,01 m/s. Penurunan kecepatan ini mencapai sekitar 83,33%, yang jauh lebih besar dibandingkan dengan *pebble bed* berdiameter lebih kecil. Penurunan kecepatan yang besar ini

disebabkan oleh resistensi yang lebih tinggi akibat jarak antar *pebble* yang lebih besar, yang memperlambat aliran fluida secara signifikan saat mendekati outlet.

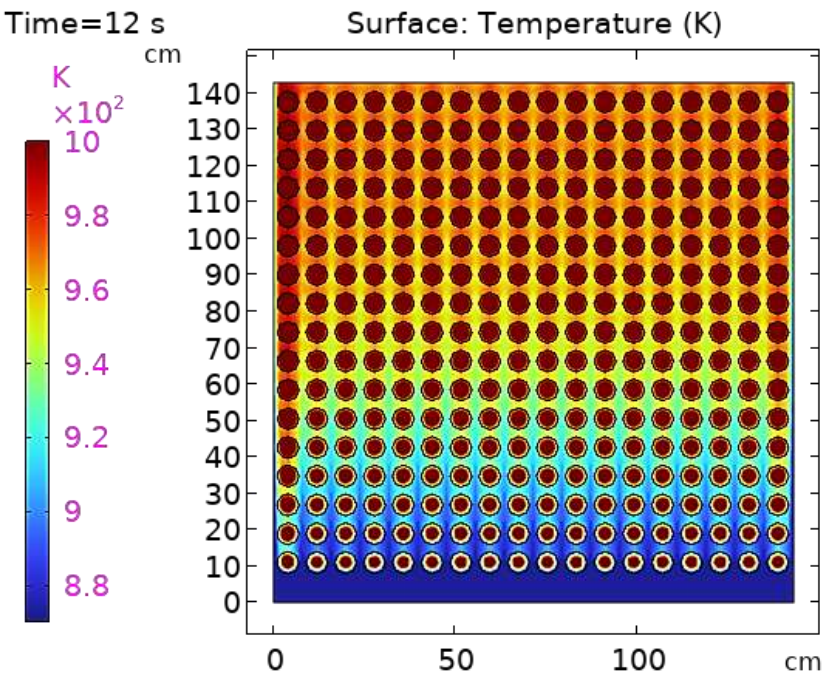
Tekanan fluida juga mengalami penurunan yang tajam dari inlet ke outlet. Berdasarkan data, tekanan inlet adalah 71,13 Pa, sementara tekanan outlet turun menjadi -9532,94 Pa. Penurunan tekanan ini mencapai 13508,79%, yang menunjukkan adanya resistensi yang sangat tinggi dalam aliran fluida, terutama karena jarak antar *pebble* yang lebih besar dan distribusi aliran yang tidak merata. Hal ini menyebabkan penurunan tekanan yang lebih drastis dibandingkan dengan *pebble bed* berdiameter lebih kecil. Secara keseluruhan, *pebble bed* 12 cm menunjukkan kenaikan suhu yang lebih rendah, penurunan kecepatan yang signifikan, serta penurunan tekanan yang sangat besar. Kombinasi ini mengindikasikan bahwa ukuran *pebble* yang lebih besar mengurangi efisiensi perpindahan panas.

Berdasarkan simulasi yang dilakukan pada ketiga variasi *pebble bed*, dapat disimpulkan bahwa ukuran *pebble bed* mempengaruhi kinerja reaktor, termasuk suhu, kecepatan aliran fluida, dan tekanan. *Pebble* berukuran 6 cm menunjukkan suhu yang paling stabil dan tertinggi, mencerminkan efisiensi yang baik dalam perpindahan panas.

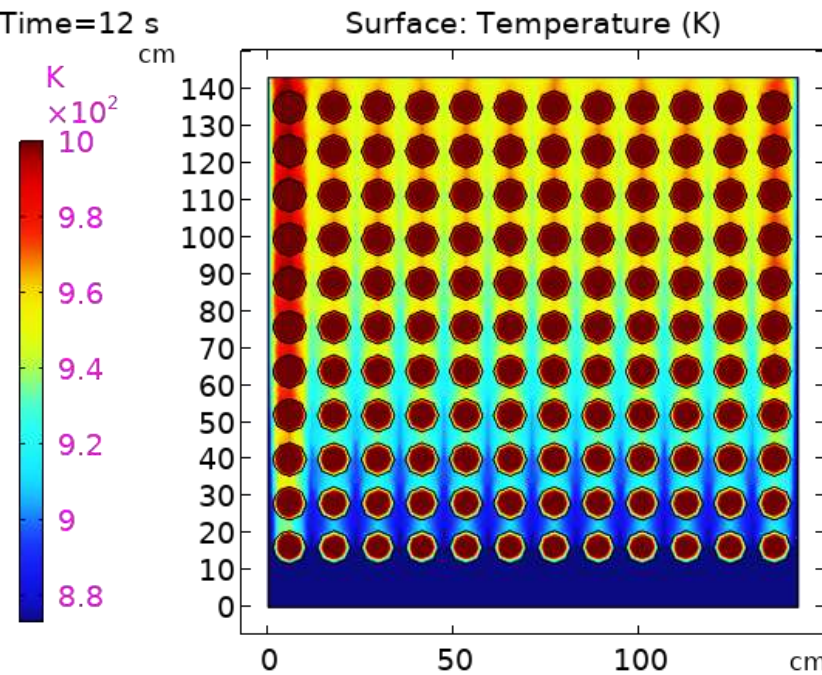
Pebble 9 cm menawarkan keseimbangan yang baik antara perubahan suhu dan penurunan tekanan, sehingga cocok untuk berbagai kondisi. Di sisi lain, *pebble* 12 cm memiliki suhu tinggi di beberapa titik, namun aliran fluida yang melambat dan penurunan tekanan yang drastis dapat mengurangi efisiensi reaktor.

Pemilihan ukuran *pebble* yang tepat sangat penting. Ukuran *pebble bed* 6 cm menjadi pilihan utama karena mencapai suhu outlet maksimal dengan kecepatan aliran yang seragam dan beda tekanan yang stabil. Sementara itu, *pebble* berukuran 9 cm

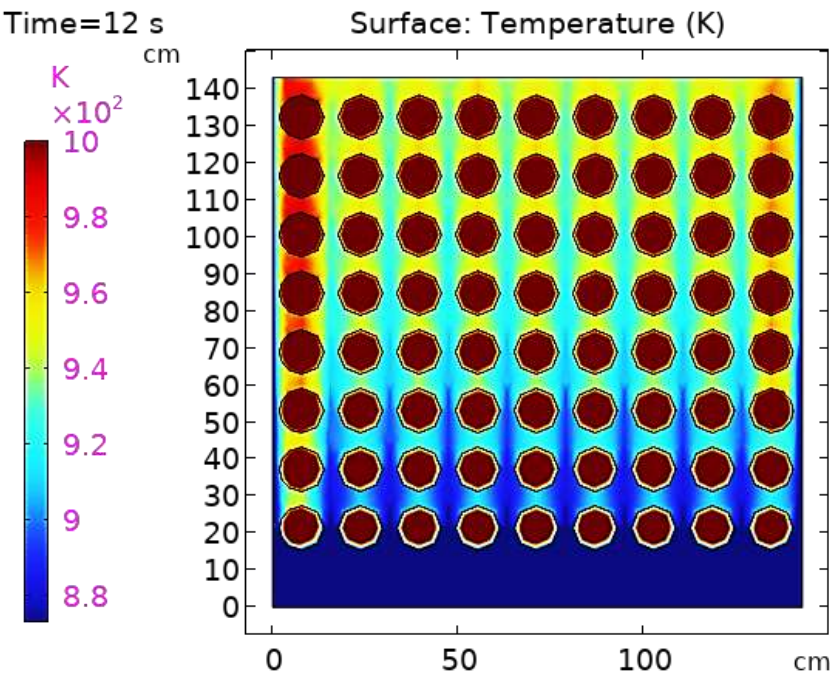
juga merupakan pilihan yang baik dengan suhu outlet yang konsisten dan pola aliran yang stabil. Namun, ukuran *pebble bed* 12 cm perlu dievaluasi lebih lanjut terkait geometri, porositas, dan daya tiap *pebble* untuk meningkatkan efisiensi reaktor TMSR-SF. Temuan ini dapat menjadi acuan untuk perbaikan desain reaktor di masa depan agar kinerjanya lebih optimal.



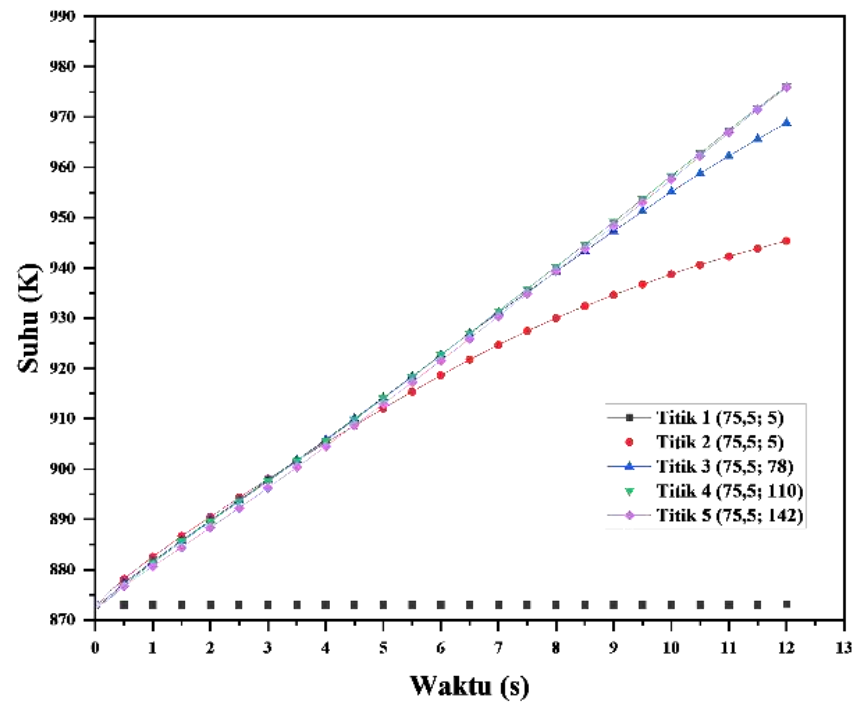
Gambar 2. Tampilan Distribusi Suhu pada *Pebble Bed* 6 cm



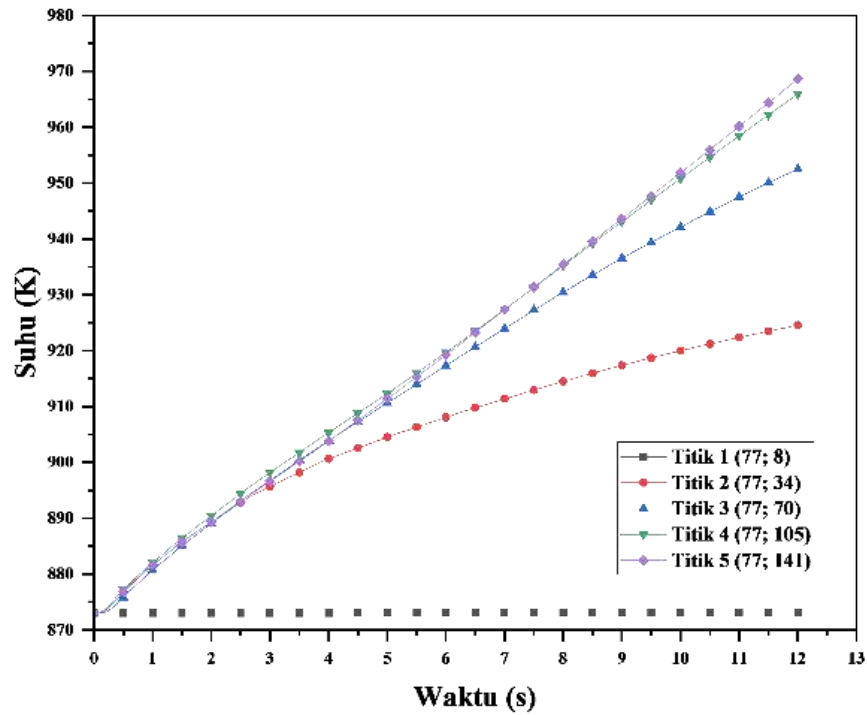
Gambar 3. Tampilan Distribusi Suhu pada *Pebble Bed* 9 cm



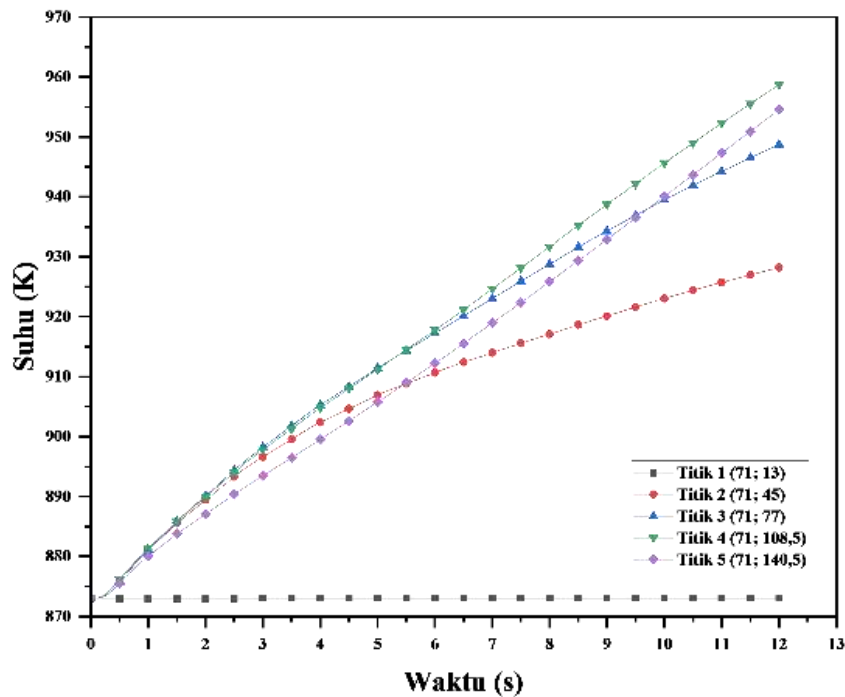
Gambar 4. Tampilan Distribusi Suhu pada Pebble Bed 12 cm



Gambar 5. Grafik Distribusi Suhu pada Pebble Bed 6 cm



Gambar 6. Grafik Distribusi Suhu pada *Pebble Bed* 9 cm



Gambar 7. Grafik Distribusi Suhu pada *Pebble Bed* 12 cm

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa *pebble bed* berukuran 6 cm efektif dalam menyerap dan mendistribusikan panas, dengan suhu yang meningkat tajam dari inlet hingga titik 4, serta aliran fluida yang stabil meskipun ada penurunan kecepatan dan tekanan. *Pebble bed* 9 cm juga menunjukkan performa baik dengan suhu yang stabil, meskipun mengalami penurunan kecepatan dan tekanan, menjadikannya efisien untuk reaktor TMSR-SF. Sebaliknya, *pebble bed* 12 cm menunjukkan peningkatan suhu yang signifikan, tetapi disertai penurunan drastis kecepatan dan tekanan, yang mengurangi efisiensi perpindahan panas akibat hambatan aliran. Persentase perbedaan suhu tertinggi antara *pebble* 6 cm dan 9 cm adalah 0,7%, sedangkan antara *pebble* 6 cm dan 12 cm mencapai 1,7%. Penurunan tekanan tertinggi tercatat pada *pebble* 6 cm (1,6%), 9 cm (1,4%), dan 12 cm (1,5%). Selain itu, perbedaan penurunan laju awal aliran fluida antara *pebble* 6 cm dan 9 cm adalah 0,09%, sementara antara *pebble* 9 cm dan 12 cm mencapai 0,26%. Temuan ini menegaskan pentingnya ukuran *pebble bed* dalam mempengaruhi kinerja termal hidrolik reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. E. Setyono and B. F. T. Kiono, "Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050," *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, vol. 2, pp. 154-162, 2021.
- [2] H. Susiati and M. A. Widiawaty, *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia (Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission)*, Malang: Unisma Press, 2023.
- [3] Y. Fu, Q. Sun, C. Zhou and Y. Zou, "A review of TRISO fuel performance models," in *Proceedings of the 2017 25th International Conference on Nuclear Engineering*, Shanghai, 2017.
- [4] Z. Dai, *Reaktor Garam Cair dan Energi Thorium*, 2nd ed., Shanghai Cina: Institut Fisika Terapan Shanghai, 2017.
- [5] A. F. Wadjdi, S. Permana and E. Misrianto, "Tinjauan Sistematis: Reaktor Garam Cair Thorium 2016-2020," *Penelitian Ilmiah & Teknologi*, vol. 5, pp. 137-141, 2021.
- [6] Y. Xiong, G. Liang, G. Nan, Y. Xingtuan, T. Jiuyan and J. Shengyao, "Effect of *pebble* size and bed dimension on the distribution of voidages in *pebble* on the distribution of voidages in *pebble*," *Special Issue on Simulation and Modelling in Nuclear Engineering*, vol. 2, pp. 99-109, 2017.
- [7] Yao, Xiao, J. Zhou, D. Zhang, S. Qiu, W. Tian and G. Su, "Thermal Hydraulic Studies of a Fluoride Salt Cooled High Temperature Test Reactor with Different CFD Methods," Prague, Czech Republic, 2014.

