



Penerapan Metode *Moving Particle Semi-Implicit* dalam Simulasi Pelelehan *Freeze Plug* pada Molten Salt Reactor saat Terjadi Kecelakaan Reaktor

Wafiq Azizah Nurhajjah¹, Asril Pramutadi Andi Mustari^{2*}, Yacobus Yulianto³ 

¹ Program Studi Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

² Kelompok Keahlian Fisika Nuklir dan Biofisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

³ Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received August 28, 2022

Accepted July 28, 2023

Available online October 25, 2023

Kata Kunci:

Freeze Plug, Metode MPS, Transfer Panas

Keywords:

Freeze Plug, *MPS Method*, *Heat Transfer*



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Sisi keamanan merupakan aspek yang sangat diperhatikan dalam mendesain suatu reaktor. Perpindahan panas yang cepat dalam pelelehan *freeze plug* merupakan salah satu faktor yang sangat krusial dalam desain reaktor molten *molten salt*. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis perpindahan panas pada pencairan *frozen salt* dalam reaktor *molten salt*, mengevaluasi efektivitas desain *freeze plug* dengan dan tanpa logam tambahan (tembaga, kuningan, dan aluminium), serta memberikan rekomendasi desain untuk meningkatkan kuantitatif dimana mekanisme perpindahan panas pada pencairan *frozen salt* disimulasikan dengan menggunakan metode *Moving Particle Semi-Implicit* dengan analisis 2D dengan menggunakan dua variasi desain. Desain yang disimulasikan adalah *freeze plug* dengan dan tanpa tambahan logam. Subjek penelitian utama dalam simulasi ini adalah *freeze plug* dalam reaktor *molten salt*. Simulasi tanpa tambahan logam dilakukan selama 250 detik. Pada desain dengan tambahan logam, digunakan tiga jenis logam, yaitu tembaga, kuningan, dan aluminium. Simulasi dengan tambahan logam dilakukan selama 25 detik. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa desain dengan logam tambahan menghantarkan panas lebih baik daripada tanpa logam tambahan. Dari tiga logam tersebut, tembaga memiliki waktu paling cepat dalam mencairkan *frozen salt*. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai konduktivitas termal suatu bahan, semakin cepat perpindahan panas ke *freeze plug* sehingga semakin cepat pelelehan *freeze plug*.

ABSTRACT

The safety side is a very important aspect in designing a reactor. Rapid heat transfer in freeze plug melting is one of the most crucial factors in the design of molten salt reactors. The purpose of this study is to analyze heat transfer in frozen salt liquefaction in molten salt reactors, evaluate the effectiveness of freeze plug designs with and without additional metals (copper, brass, and aluminum), and provide design recommendations to improve the efficiency and safety of molten salt reactors. This research is a quantitative research where the heat transfer mechanism in frozen salt liquefaction is simulated using the Semi-Implicit Moving Particle method with 2D analysis using two design variations. The simulated design is a freeze plug with and without the addition of metal. The main research subject in this simulation was a freeze plug in a molten salt reactor. The simulation without the addition of metal was carried out for 250 seconds. In designs with the addition of metal, three types of metals are used, namely copper, brass, and aluminum. The simulation with the addition of metal was carried out for 25 seconds. The results obtained show that designs with additional metals conduct heat better than without additional metals. Of the three metals, copper has the fastest time to melt frozen salt. This shows that the higher the thermal conductivity value of a material, the faster the heat transfer to the freeze plug so that the faster the melting of the freeze plug.

1. PENDAHULUAN

Energi merupakan sektor yang berperan memberikan kontribusi paling besar dalam menurunkan emisi CO₂. Hal ini bersesuaian dengan komitmen Indonesia untuk menurunkan emisi CO₂ melalui dorongan transisi energi menuju energi bersih (*green energy*) yang ramah lingkungan. Energi bersih memiliki beberapa kriteria di antaranya emisi yang dihasilkan lebih sedikit, luas lahan yang diperlukan lebih kecil, dan tidak mengganggu ekosistem (Adyana, 2024; Bhowmik et al., 2018; Mariana, 2023). Salah satu sumber energi bersih yang memenuhi kriteria tersebut dan juga masuk ke dalam portofolio kebutuhan energi dunia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) (Apriliyanti & Rizki, 2023; Wang et al., 2018).

Penerimaan masyarakat terhadap pembangunan PLTN masih naik turun akibat dari bahan bakar yang bersifat radioaktif dan dapat merusak lingkungan, terlebih jika dikaitkan dengan kecelakaan reaktor

*Corresponding author.

E-mail addresses: pramutadi@itb.ac.id (Asril Pramutadi Andi Mustari)

di Chernobyl dan Fukushima yang merupakan kecelakaan reaktor dengan tingkat terparah semakin menutup mata masyarakat terhadap peranan PLTN sebagai energi bersih (Meiliasari et al., 2022; Takebayashi et al., 2017; Yoschenko et al., n.d.). Untuk itu, perlu dikembangkan desain reaktor maju yang memiliki sistem keselamatan tinggi dan menjamin kecelakaan serupa tidak akan terulang kembali. Selain itu, desain reaktor maju juga harus meningkatkan keberlanjutan, memiliki laju konsumsi bahan bakar rendah, menghasilkan limbah lebih sedikit, biaya lebih murah, non-proliferasi, serta spektrum penggunaan yang lebih luas. Salah satu PLTN generasi IV yang menjadi rujukan untuk PLTN masa depan adalah Molten Salt Reactor (MSR) yang memiliki sistem keamanan tinggi yang dikenal dengan sistem keselamatan pasif (Lumbanraja & Dewi, 2017; Mahmuddin & Kashiwagi, 2014). Molten Salt Reactor merupakan reaktor berbahan bakar garam cair (molten fuel) yang awalnya dikembangkan oleh ORNL (Oak Ridge National Laboratory) di AS, dipimpin oleh Alvin Weinberg. Reaktor daya dengan bahan bakar Thorium ini berhasil diuji coba dari 1965 hingga 1969 atau lebih dari 13.000 jam tanpa ada masalah apapun juga (Haubenreich & Engel, 2014; Limbaran et al., 2021; Yusibani et al., 2021).

Dalam lima tahun terakhir, PT Thorcon Power Indonesia (TPI) telah menggaungkan pembangunan MSR atau lebih dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Thorium (PLTT) di Indonesia dengan nama dagang Thorcon. Thorcon dirancang dan dikembangkan oleh Martingale Inc., Amerika Serikat dengan daya total 1000 MWe yang berasal dari 4 modul, dimana setiap modul berdaya 250 MWe (Lumbanraja & Liun, 2018; Mangapul, 2016). Dalam hal ini, PT TPI menyampaikan komitmen dalam pembangunan PLTT yaitu menjamin bahwa kejadian kecelakaan reaktor Fukushima atau Chernobyl tidak akan terjadi dengan desain Thorcon. Komitmen ini didukung oleh keunggulan MSR yang menggunakan bahan bakar garam cair yang memiliki titik didih pada 1700°C dan reaktor ini tidak bertekanan. Dengan bahan bakar berupa garam cair ini MSR memiliki sistem keselamatan yang unik, yaitu saat terjadi *overheat* pada bahan bakar, panasnya akan melelehkan sumbat yang berada di bawah teras reaktor yang dikenal dengan istilah *freeze plug*. Setelah sumbat ini meleleh, bahan bakar garam cair akan dievakuasi ke tangki bawah tanah dengan bantuan gravitasi. *Freeze plug* dalam keadaan normal berfasa padat yang secara aktif didinginkan oleh dinding logam (Allibert et al., 2016; Li et al., 2014; Lumbanraja & Dewi, 2017).

Saat terjadi kecelakaan reaktor atau bahan bakar *overheat*, *freeze plug* yang terbuat dari *frozen salt* harus dilelehkan dengan cepat agar akumulasi panas tidak merusak struktur reaktor dan bahan bakar langsung dievakuasi untuk didinginkan (Chisholm et al., 2020; Ilham et al., 2023; Nabiilah et al., 2022). Mekanisme transfer panas dari bahan bakar terhadap *freeze plug* dapat diselesaikan dengan metode perhitungan numerik. Salah satu metode numerik yang dapat diterapkan adalah metode *Moving Particle Semi-implicit* (MPS). Metode ini berbasis partikel dengan menggunakan deskripsi Lagrangian dan diskritisasi spasialnya didasarkan pada perbedaan pembobotan dan persamaan tekanan Poisson terhadap aliran tak termampatkan (Istavara et al., 2022; Koshizuka et al., 2018; Nabiilah et al., 2022). Adapun kelebihan metode ini adalah pemodelan tidak menggunakan mesh atau *grid* sehingga fluida yang disimulasikan diwakili oleh partikel-partikel yang dapat bergerak sesuai kondisi parameter yang dimiliki. Hal ini sangat bermanfaat karena lebih efisien dalam perhitungan. Metode ini telah diterapkan pada beberapa kasus fenomena di dalam reaktor nuklir, seperti proses stratifikasi, proses relokasi, proses solidifikasi, dan kasus eutectic (Hidayati et al., 2020, 2021; Ilham et al., 2018; Mustari et al., 2015; Mustari & Oka, 2014).

Beberapa penelitian mengenai sifat pelelehan *freeze plug* pada reaktor *Molten Salt* telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Desain baru untuk safety plug telah diuji dan diusulkan. Sifat pelelehan *freeze plug* lewat simulasi dengan menggunakan LiF-ThF₄, Hastelloy-N, dan tembaga. Selain itu, penggunaan logam tambahan, khususnya tembaga, untuk mempercepat proses pelelehan *frozen salt*. Proses pelelehan *freeze plug* menggunakan bahan tambahan Hastelloy-N, Heynes-242, dan ODS alloys (MA754) (Li et al., 2020; Nabiilah et al., 2022; Tiberga et al., 2019; Yanti et al., 2022). Keterbaruan dari penelitian ini terletak pada pendekatan pemodelan menggunakan metode *Moving Particle Semi-Implicit* (MPS) untuk memahami mekanisme transfer panas pada pelelehan *freeze plug* dalam reaktor *Molten Salt Reactor* (MSR). Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dengan mempertimbangkan dua variasi dalam desain *freeze plug*, yaitu tanpa logam tambahan dan dengan tambahan logam (tembaga, kuningan, dan aluminium), menjadikannya studi yang mendalam terkait pengaruh logam terhadap efisiensi mekanisme transfer panas pada saat terjadi kecelakaan reaktor.

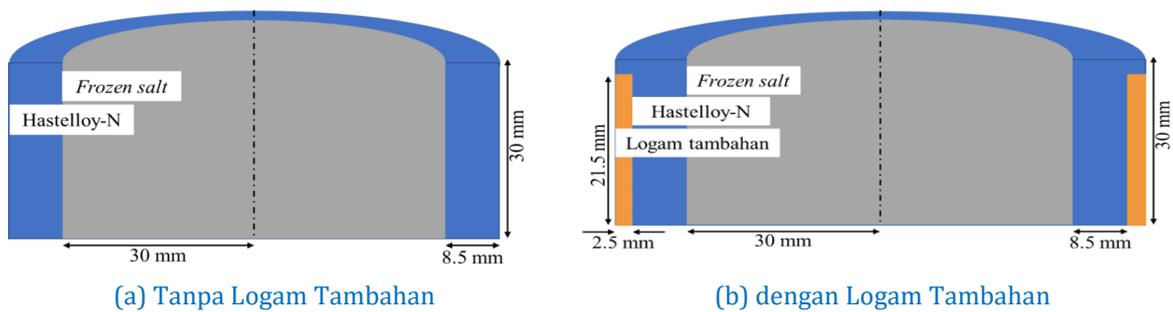
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan proses transfer panas pada pelelehan *frozen plug* untuk dua variasi, yakni tanpa logam dan dengan logam (tembaga, kuningan, dan aluminium). Hasil yang diperoleh sangat bermanfaat untuk menentukan desain *freeze plug* yang efisien dalam mekanisme transfer panas pada pelelehan *frozen salt* saat terjadi kecelakaan reaktor. Dikarenakan penelitian mengenai proses pelelehan *freeze plug* dengan menggunakan metode MPS ini masih sangat terbatas, maka penelitian ini sangat dibutuhkan. Keterbaruan dalam penelitian ini adalah mempertimbangkan dua variasi dalam *freeze plug*, yaitu tanpa logam dan dengan logam (tembaga, kuningan, dan aluminium), yang fokus dalam upaya untuk mengevaluasi pengaruh logam terhadap mekanisme transfer panas. Selain itu, informasi yang

diperoleh dari studi ini dapat dijadikan referensi yang penting bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir, khususnya dalam pengembangan bidang keamanan dan keselamatan reaktor.

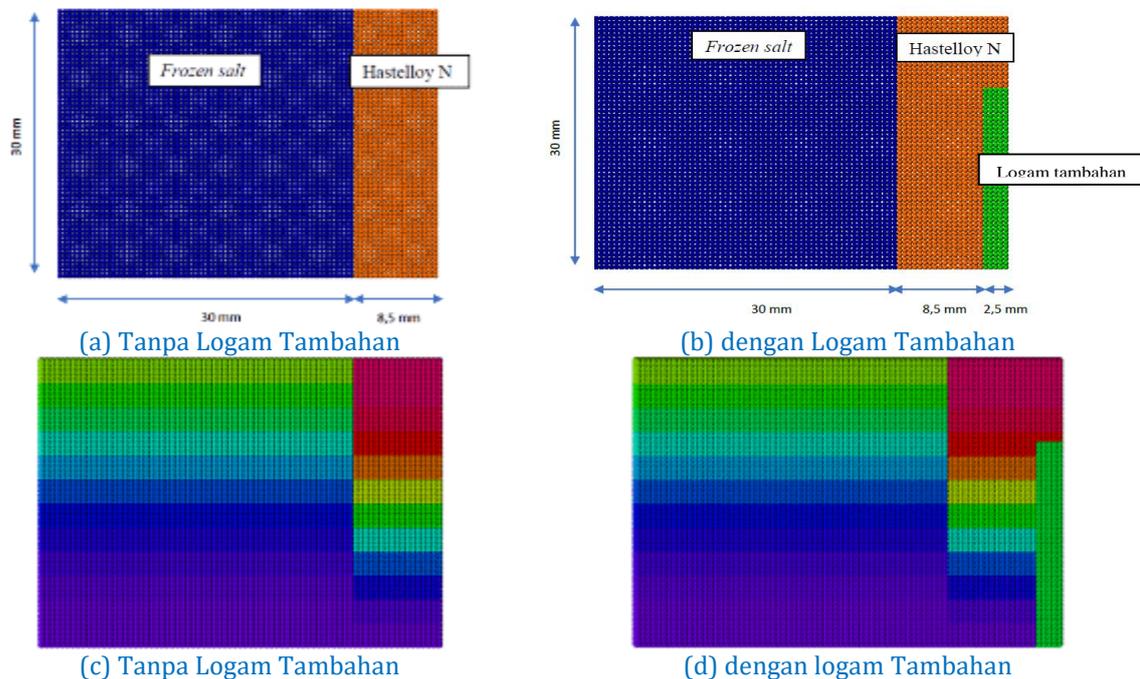
2. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif terkait studi kasus tentang sistem keselamatan pasif pada *Molten Salt Fast Reactor* (MSFR) saat terjadinya kecelakaan reaktor melalui simulasi pelelehan *freeze plug* menggunakan metode MPS. Dalam studi ini, metode Crank-Nicholson dan metode Beda Hingga digunakan untuk melakukan perhitungan numerik secara implisit dan eksplisit (Sampera, 2016; Sinopa et al., 2020). Pada penelitian ini, dilakukan simulasi pelelehan *freeze plug* menggunakan metode MPS dalam dua dimensi dengan dua desain *freeze plug*, yaitu simulasi pelelehan *freeze plug* tanpa logam tambahan dan dengan logam tambahan yang ditunjukkan oleh Gambar 1. *Freeze plug* merupakan *frozen salt* yang terbuat dari molten fuel yang dipadatkan. Adapun spesifikasi dari *frozen salt* ini telah diteliti sebelumnya dan ditunjukkan dalam

Table 1.



Gambar 1. Desain Penampang Vertical Freeze Plug



Gambar 2. Geometri Simulasi untuk Desain

Table 1. Spesifikasi Material Frozen Salt

| Spesifikasi | Persamaan | Nilai pada T = 1078°C |
|--|---|-----------------------|
| Densitas (g/cm ³) | $4,094 - 8.82 \times 10^{-4} (T - 1.008)$ | 4.080 |
| Viskositas kinematik (m/s ²) | $5.54 \times 10^{-8} \times \exp\left(\frac{3.689}{T}\right)$ | 2.46×10^{-6} |
| Konduktivitas termal (W/m K) | $0.928 + 8.397 \times 10^{-5} \times T$ | 1.010 |

| Spesifikasi | Persamaan | Nilai pada T = 1078°C |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Koefisien panas spesifik (J/g K) | $-1.11 + 0.00278 \times T$ | 1.773 |

Table 2. Spesifikasi Logam Tambahan

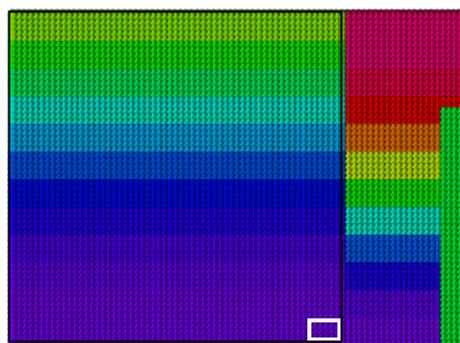
| Material | Densitas (kg/m ³) | Koefisien panas spesifik (J/kg K) | Konduktivitas termal (W/m K) |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Tembaga | 8960 | 385 | 386 |
| Kuningan | 8587 | 376 | 96 |
| Aluminium | 2705 | 903 | 239 |

Pada penelitian ini, proses transfer panas dimodelkan dengan bentuk geometri sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Proses simulasi dilakukan selama 250 detik dengan melibatkan 4620 partikel (tanpa logam tambahan) dan 4920 partikel (dengan logam tambahan) dengan jarak antar-partikel adalah 5×10^{-4} m. Proses simulasi dimulai dari tengah *frozen salt* ke salah satu sisi logam yang melingkupinya karena diasumsikan perpindahan panas yang terjadi pada kedua sisi sama. Pada simulasi ini, *molten fuel* tidak dilibatkan secara partikel langsung, melainkan melalui pengaruh temperatur *molten fuel* saat melewati ambang batas pada *frozen salt* dan *hastelloy-N* yang melingkupinya. Dengan kata lain, distribusi temperatur pada *frozen salt* dalam simulasi ini merupakan distribusi temperatur setelah temperatur *molten fuel* telah melewati ambang batas dalam beberapa saat. Distribusi temperatur pada simulasi ini menggunakan distribusi temperatur berdasarkan ketinggian dan temperatur logam tambahan dibuat seragam, yaitu 1000°C (Nabiilah et al., 2022; Yanti et al., 2022). Pada simulasi dengan menggunakan logam tambahan ini dilakukan variasi pada logam yang digunakan. Logam tambahan yang digunakan adalah tembaga, aluminium, dan kuningan dengan kandungan kimia diperoleh dari ekstrapolasi beberapa sumber yang ditampilkan pada Table 2.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

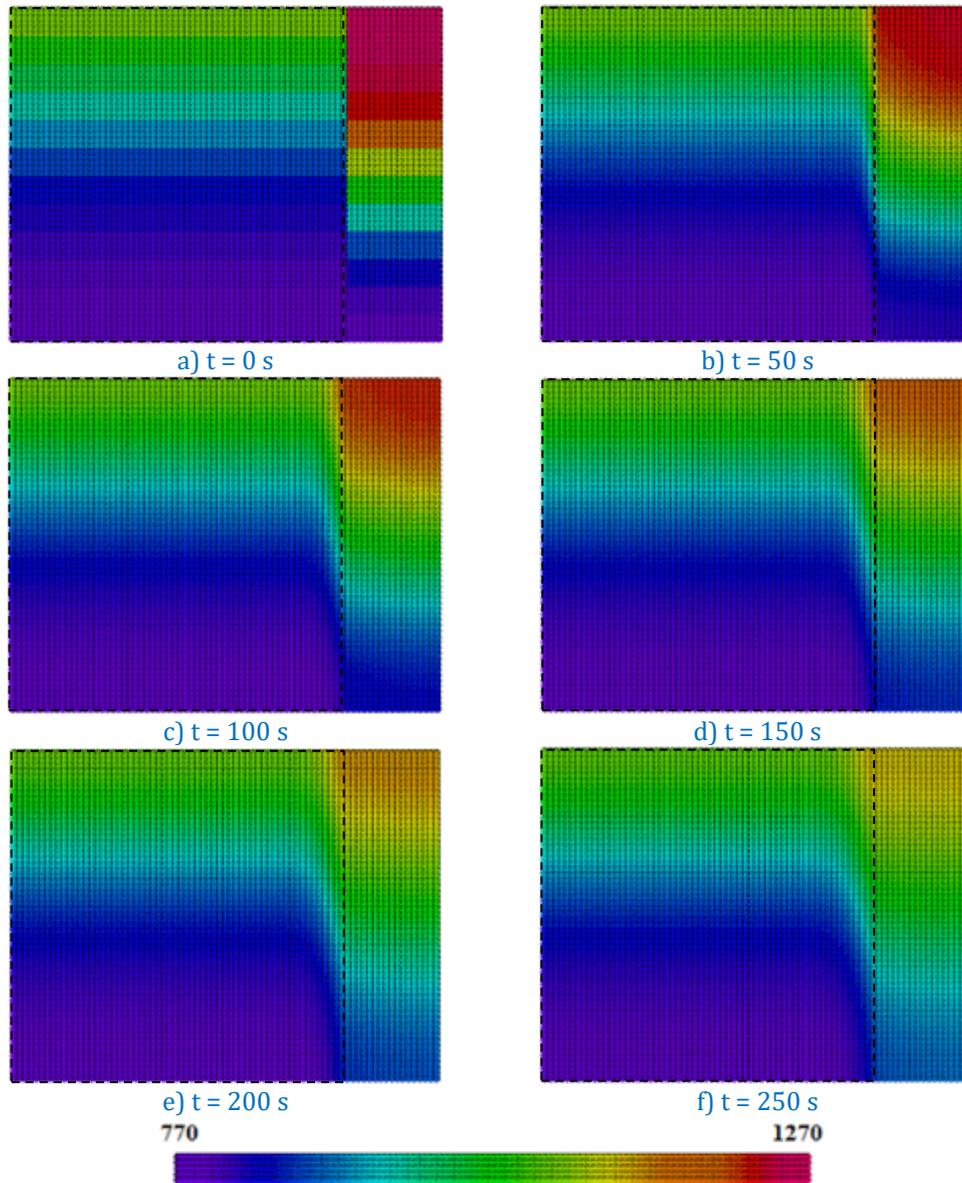
Pada studi ini, simulasi pelelehan *freeze plug* dilakukan tanpa dan dengan menggunakan logam tambahan. Tujuannya adalah untuk melihat transfer panas yang terjadi melalui distribusi temperatur dan menentukan kapan *freeze plug* meleleh. Distribusi temperatur direpresentasikan oleh warna, dimana warna merah mewakili temperatur yang paling tinggi, yaitu 1270°C dan warna biru keunguan mewakili temperatur yang paling rendah, yaitu 770°C. Penentuan waktu *freeze plug* meleleh dilakukan dengan mengidentifikasi temperatur *frozen salt* bagian paling bawah yang bersentuhan dengan material *hastelloy-N* yang disorot oleh kotak putih pada Gambar 3. Ketika temperatur pada bagian tersebut telah mencapai temperatur leleh dari *frozen salt*, yaitu 843°C ditunjukkan dengan warna biru terang maka *freeze plug* telah berhasil dilelehkan.



Gambar 3. Posisi *Frozen Salt* yang Menjadi Sorotan dalam Penentuan Pelelehan

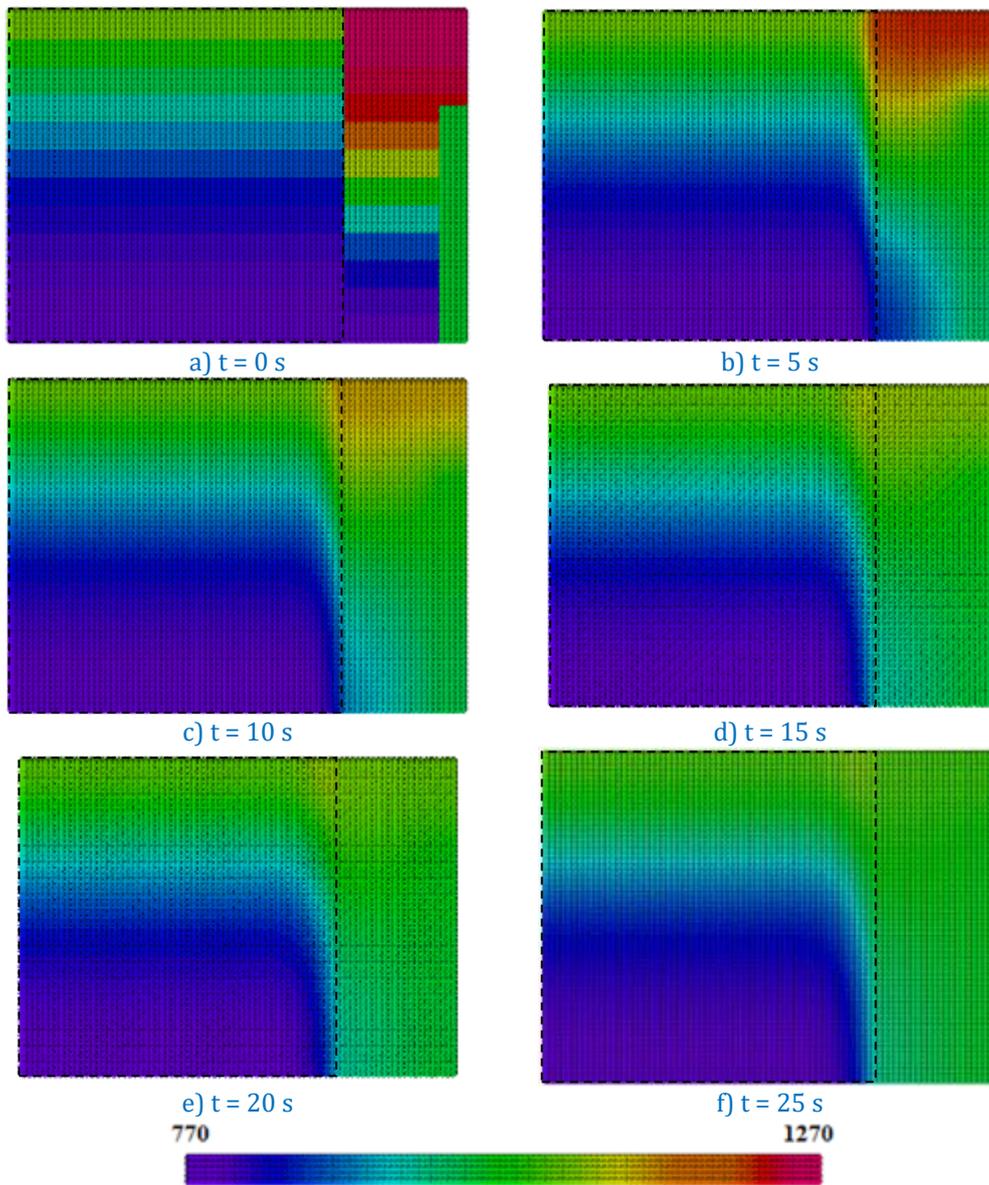
Pada simulasi tanpa logam tambahan menggunakan metode MPS melibatkan 4620 partikel dengan jarak antar dua partikel yang berdekatan adalah 5×10^{-4} m. Gambar 4 merupakan hasil simulasi pelelehan *freeze plug* tanpa menggunakan logam tambahan. Ditampilkan hasil simulasi pada waktu 0 s, 50 s, 100 s, 150 s, 200 s, dan 250 s. Dapat dilihat distribusi temperatur yang awalnya ditunjukkan oleh waktu 0 s mengalami perubahan pada waktu selanjutnya. Bagian atas *hastelloy-N* dari waktu ke waktu berubah dari merah ke jingga lalu menjadi kuning berarti menandakan telah terjadi penurunan temperatur atau panasnya telah ditransfer ke bagian lain yang memiliki temperatur yang lebih rendah. Di bagian bawah *hastelloy-N* menerima panas dari temperatur yang lebih tinggi ditunjukkan dari warna yang mulanya biru

keunguan berubah menjadi biru hingga biru muda. Untuk *frozen salt* bagian yang signifikan mengalami perubahan temperatur adalah bagian atas dan bagian sisi yang bersenuhan dengan *hastelloy-N*. *Frozen salt* mencapai temperatur lelehnya setelah 250 s, yang ditunjukkan bagian *frozen salt* yang bersentuhan dengan *hastelloy-N* telah berwarna biru terang.



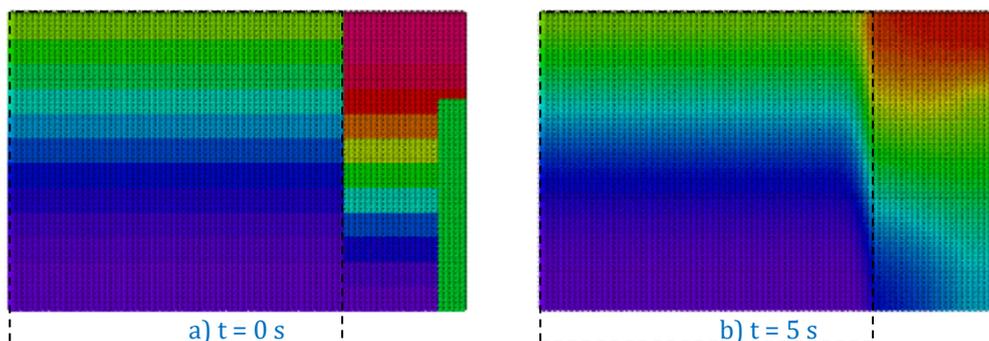
Gambar 4. Proses Pelelehan *Freeze Plug* tanpa Logam Tambahan

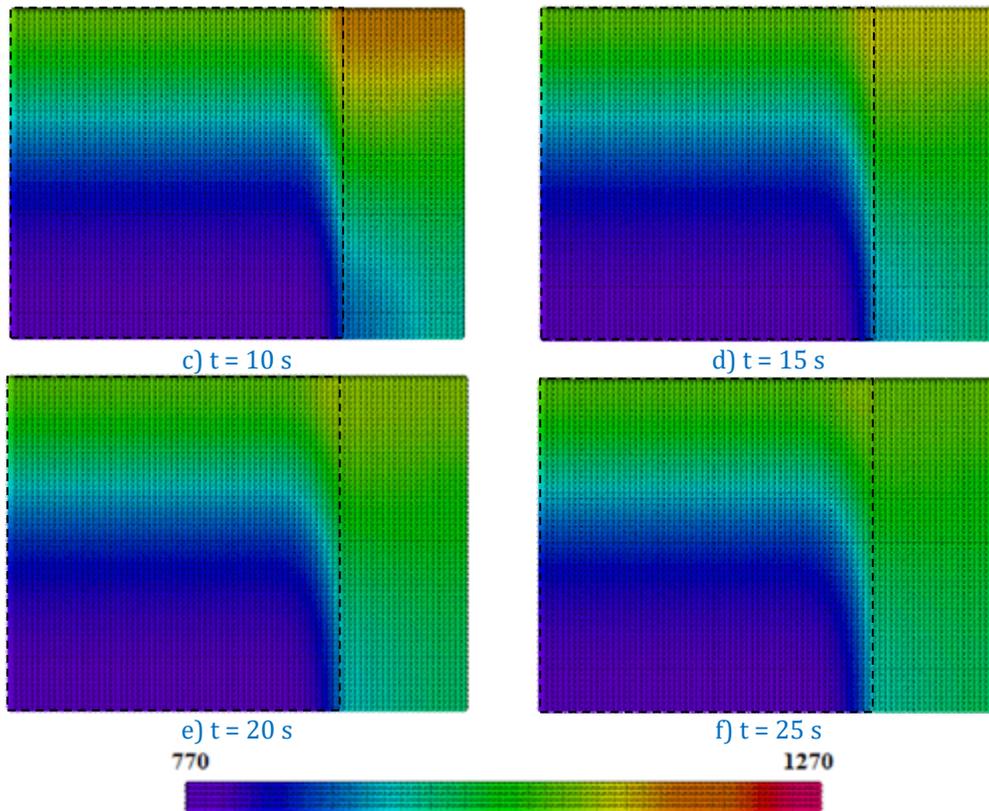
Pada simulasi dengan logam tambahan menggunakan metode MPS melibatkan 4920 partikel dengan jarak antar dua partikel yang berdekatan adalah 5×10^{-4} m. Pada simulasi ini digunakan tiga logam yang berbeda yaitu tembaga, kuningan, dan aluminium. **Gambar 5** menunjukkan hasil pelelehan *freeze plug* menggunakan logam tambahan tembaga. Ditampilkan hasil simulasi pada waktu 0 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s dan 25 s, dapat dilihat proses tranfer panas pada bagian bawah *hastelloy-N* atau yang bersentuhan dengan tembaga jauh lebih cepat dibandingkan dengan tanpa logam tambahan. Hal ini menandakan bahwa *frozen salt* juga lebih cepat mencapai temperatur lelehnya, yaitu pada waktu 18,5 s. Transfer panas yang lebih cepat dapat terjadi dengan adanya transfer panas dari atas dan juga dari samping oleh tembaga.



Gambar 5. Proses Pelelehan *Freeze Plug* dengan Tambahan Tembaga

Gambar 6 menunjukkan hasil pelelehan *freeze plug* menggunakan logam tambahan kuningan. Ditampilkan hasil simulasi pada waktu 0 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s, dan 25 s, dapat dilihat proses tranfer panas pada bagian bawah *hastelloy-N* atau yang bersentuhan dengan kuningan juga jauh lebih cepat dibandingkan dengan tanpa logam tambahan. Namun, jika dibandingkan dengan tembaga tidak berbeda jauh ditunjukkan dari distribusi temperatur yang hampir sama tiap satuan waktu pada hasil yang ditampilkan. Jika diperhatikan lebih lanjut, sorotan *frozen salt* pada bagian bawah yang bersentuhan dengan *hastelloy-N* sedikit lebih lambat mencapai temperatur lelehnya dibanding dengan tembaga, yaitu pada waktu 21,4 s.

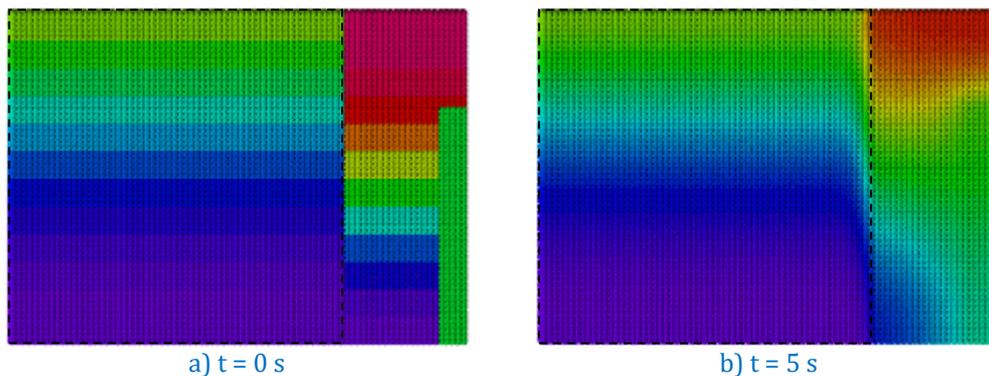


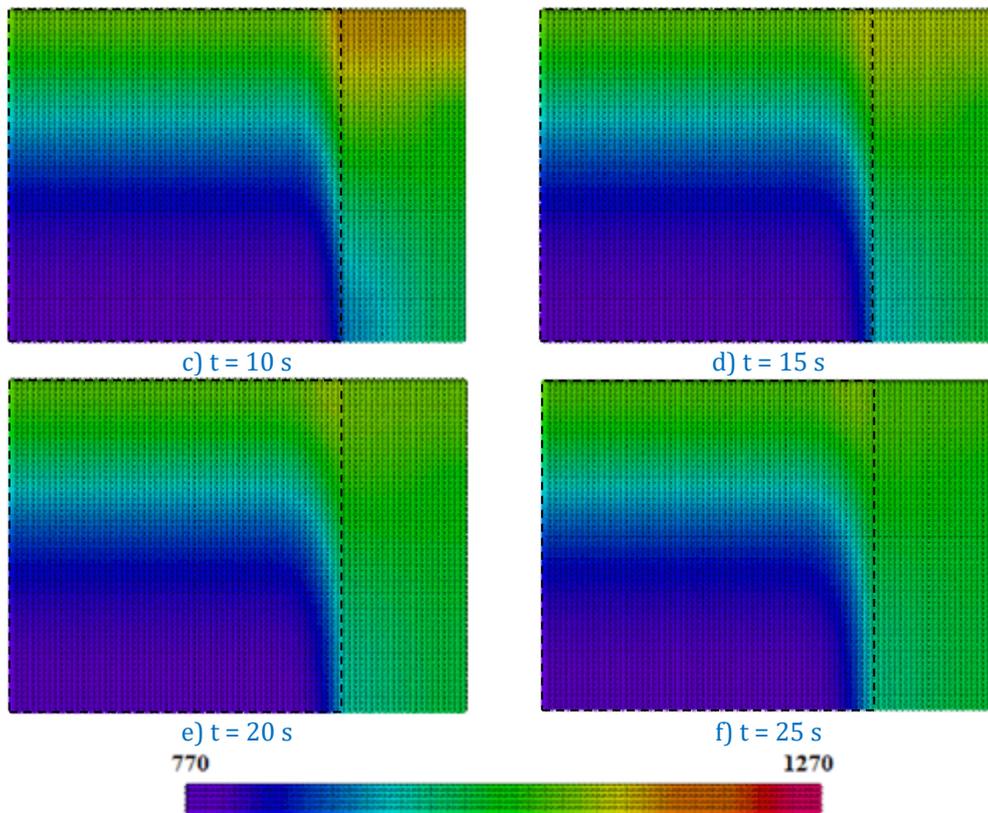


Gambar 6. Proses Pelelehan *Freeze Plug* dengan Tambahan Kuningan

Gambar 7 menunjukkan hasil pelelehan *freeze plug* menggunakan logam tambahan aluminium. Ditampilkan hasil simulasi pada waktu 0 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s, dan 25 s, dapat dilihat proses tranfer panas pada bagian bawah *hastelloy-N* atau yang bersentuhan dengan aluminium juga jauh lebih cepat dibandingkan dengan tanpa logam tambahan. Namun, jika dibandingkan dengan tembaga dan kuningan tidak berbeda jauh ditunjukkan dari distribusi temperatur yang hampir sama tiap satuan waktu pada hasil yang ditampilkan. Jika diperhatikan lebih lanjut, sorotan *frozen salt* pada bagian bawah yang bersentuhan dengan *hastelloy-N* mencapai temperatur lelehnya pada waktu 19,2 s.

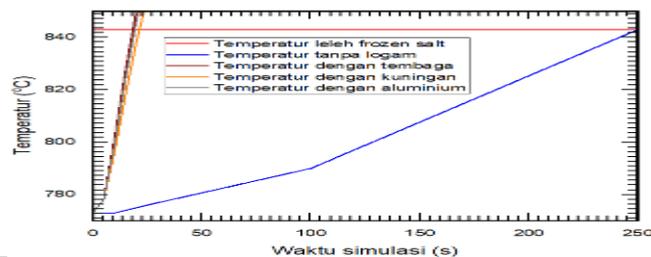
Ditampilkan pada **Gambar 8** grafik perubahan temperatur *frozen salt* bagian bawah yang bersentuhan dengan *hastelloy-N* untuk geometri tanpa logam tambahan (garis berwarna biru) dan geometri dengan menggunakan tiga logam yaitu tembaga (garis berwarna coklat), kuningan (garis berwarna jingga), dan aluminium (garis berwarna abu). Temperatur awal untuk semua geometri sama, yaitu 773°C. Namun tampak perbedaan yang sangat signifikan antara geometri tanpa logam tambahan dan dengan logam tambahan telah dimulai pada detik-detik awal setelah simulasi dijalankan. Untuk geometri dengan logam tambahan perubahan temperaturnya jauh lebih tajam dari pada geometri tanpa logam tambahan. Hal ini menandakan bahwa dengan adanya logam tambahan mempercepat transfer panas sehingga *frozen salt* lebih cepat meleleh.



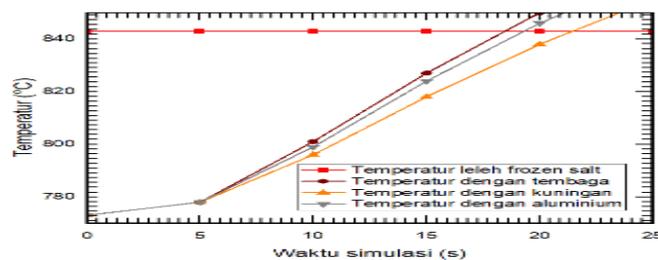


Gambar 7. Proses Pelelehan Freeze Plug dengan Tambahan Aluminium

Kemudian Gambar 9 menampilkan grafik perbandingan perubahan temperatur *frozen salt* antara tembaga, kuningan, dan aluminium. Dapat dilihat pola grafik dari ketiga perubahan temperatur *frozen salt* akibat tiga logam ini hampir sama. Setelah 5 detik, terlihat perbedaan kenaikan temperatur, yaitu secara berurutan dari perubahan terbesar ke yang terkecil adalah tembaga, aluminium, dan kuningan. Hal ini menandakan bahwa kecepatan pelelehan *freeze plug* sebanding dengan konduktivitas termal dari logam yang digunakan.



Gambar 8. Perubahan Temperatur Bagian Bawah Frozen Salt yang Bersentuhan dengan Hastelloy-N untuk Geometri Tanpa Tembaga, dan dengan Tembaga



Gambar 9. Perubahan Temperatur Bagian Bawah Frozen Salt yang Bersentuhan dengan Hastelloy-N Menggunakan Logam Tambahan Tembaga, Kuningan, dan Aluminium

Pembahasan

Dalam penelitian kuantitatif ini, proses transfer panas disimulasikan untuk mempelajari mekanisme pelelehan *freeze plug* dengan dan tanpa logam tambahan. Untuk geometri dengan logam tambahan perubahan temperaturnya jauh lebih tajam dari pada geometri tanpa logam tambahan. Hal ini menandakan bahwa dengan adanya logam tambahan mempercepat transfer panas sehingga *frozen salt* lebih cepat meleleh. Hasil simulasi dari studi ini menunjukkan bahwa variasi suhu member pengaruh yang cukup signifikan pada konfigurasi dengan penambahan logam dibandingkan dengan konfigurasi tanpa tambahan logam. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan lebih banyak logam mempunyai efek menguntungkan dalam mempercepat perpindahan panas, sehingga mempercepat proses pelelehan *freeze plug*. Terjadinya proses ini difasilitasi oleh kontak antara *freeze plug* dan logam tambahan, sehingga meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Logam tambahan menunjukkan konduktivitas termal yang lebih baik dibandingkan bahan tanpa logam tambahan, sehingga meningkatkan laju perpindahan panas di dalam sistem. Area kontak antara *freeze plug* dan logam tambahan sangat penting karena memungkinkan perpindahan panas yang efisien melalui kontak langsung. Akibatnya, komponen yang bersentuhan dengan logam mengalami kenaikan suhu lebih cepat dibandingkan komponen yang tidak bersentuhan. Hasil penelitian ini berpotensi menciptakan kemungkinan kemajuan desain yang lebih efektif dalam aplikasi tertentu yang memerlukan perpindahan panas yang cepat. Dengan kata lain, memasukkan logam ke dalam desain secara signifikan meningkatkan efisiensi transmisi panas dan mempercepat pencairan *freeze plug*.

Dari [Gambar 9](#) terlihat bahwa logam tembaga mencapai titik leleh *frozen salt* lebih cepat dibandingkan logam aluminium dan kuningan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa logam tembaga dapat mempercepat proses pelelehan *frozen salt* dibandingkan aluminium dan kuningan. Hasil ini sejalan dengan hasil yang diperoleh dalam penelitian terdahulu dimana tembaga mempercepat proses pelelehan *frozen plug* dibanding material lain yang digunakan dalam penelitian tersebut. Meskipun desain yang digunakan berbeda dengan desain yang digunakan dalam penelitian ini, hasil yang diperoleh menunjukkan kesamaan ([Nabiilah et al., 2022](#); [Yanti et al., 2022](#)).

Peningkatan temperatur yang lebih cepat akibat logam tambahan sangat mempengaruhi kecepatan pelelehan *freeze plug* dimana peningkatan temperatur sebanding dengan konduktivitas termal dari logam tambahan yang digunakan. Kecepatan pelelehan ini merupakan faktor yang sangat penting di dalam reaktor *molten salt* ketika terjadi penumpukan panas (kondisi darurat). Penumpukan panas berlebih akibat *freeze plug* yang belum meleleh mempengaruhi komponen lain di dalam reaktor, khususnya saluran bahan bakar cair, dimana akan sangat beresiko jika akumulasi panas tersebut mencapai titik leleh dari material saluran bahan bakar cair.

Dengan demikian, dalam mendesain *freeze plug* sebaiknya menggunakan logam tambahan agar transfer panas dari *molten salt* dapat dengan cepat terdistribusi ke *freeze plug* sehingga *freeze salt* lebih mudah mencair. Di antara tembaga, kuningan, dan aluminium, direkomendasikan untuk menggunakan tembaga karena memiliki daya hantar kalor yang tinggi dibandingkan kuningan dan aluminium.

Hasil dari penelitian ini tidak hanya memberikan wawasan teknis tentang transfer panas dan kecepatan pelelehan *freeze plug*, tetapi juga memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi nuklir yang lebih aman dan efisien. Rekomendasi untuk menggunakan tembaga sebagai logam tambahan dalam desain *freeze plug* dapat menjadi pedoman berharga dalam perancangan dan pengembangan *Molten Salt Reactor* di masa depan. Keandalan hasil penelitian ini diperkuat oleh konsistensi temuan dengan penelitian-penelitian terdahulu, dimana hasil penelitian ini sejalan dengan hasil yang diperoleh dari penelitian [Nabiilah et al., \(2022\)](#); [Yanti et al., \(2022\)](#) yang memfokuskan pada penggunaan logam tambahan, khususnya tembaga, untuk mempercepat proses pencairan garam beku. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa memasukkan logam tembaga dapat menyebabkan peningkatan suhu sumbat beku lebih cepat dibandingkan dengan skenario di mana tembaga tidak digunakan. Hal ini pun yang dilakukan dalam penelitian ini tetapi dengan bahan logam yang berbeda dengan penelitian terdahulu. Perbedaan bahan logam yang digunakan tetap menghasilkan kesimpulan yang sama yakni penggunaan logam tambahan dapat mempercepat proses pelelehan *freeze plug*. Selain itu, proses pelelehan *freeze plug* menggunakan bahan tambahan Hastelloy-N, Heynes-242, dan ODS alloys (MA754) ([Nabiilah et al., 2022](#); [Tiberga et al., 2019](#); [Yanti et al., 2022](#)). Hasilnya menunjukkan ODS alloy (MA754) lebih cepat melelehkan *freeze plug* dibanding yang lain dikarenakan memiliki konduktivitas termal yang paling tinggi di antara campuran yang digunakan. Hasil ini pun sesuai dengan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, dimana logam dengan konduktivitas termal yang tinggi dapat mempercepat pelelehan *freeze plug* dibandingkan logam dengan konduktivitas termal yang rendah.

Dalam penelitian ini, logam tambahan yang digunakan, yakni aluminium, kuningan, dan tembaga, merupakan logam yang cukup banyak digunakan sebagai bahan dalam alat-alat elektronika. Ketersediaan ini membantu mencegah kekhawatiran terkait kelangkaan logam. Tidak seperti logam langka atau terbatas, sifat logam ini yang tersebar luas memastikan aksesibilitasnya untuk penelitian dan aplikasi praktis. Selain

itu, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi ketersediaan data untuk logam tambahan yang dapat dicampurkan dengan *freeze plug* untuk mempercepat proses pelelehan *freeze plug* itu sendiri. Ketersediaan data, khususnya untuk logam kuningan, aluminium, dan tembaga dapat menopang pengembangan penelitian lain terkait fenomena pelelehan *freeze plug*.

Selain itu, hasil yang diperoleh oleh [Nabiilah et al., \(2022\)](#); [Yanti et al., \(2022\)](#) telah menjelaskan bahwa metode MPS mampu menjelaskan fenomena pelelehan *freeze plug* dalam menginvestigasi sifat pelelehan *freeze plug* pada *Molten Salt Reactor*. Keberhasilan penerapan metode MPS oleh [Yanti et al.](#) dan [Nabiilah et al.](#) dalam menjelaskan fenomena pelelehan *freeze plug* secara tidak langsung mendukung kesesuaian metode MPS untuk mensimulasikan dan memahami fenomena pelelehan *freeze plug* ini sehingga menambah tingkat kepercayaan pada hasil atau pun meminimalkan keraguan tentang keakuratan dan keandalan hasil. Metode MPS ini tampaknya cukup baik dalam memberikan wawasan bagaimana *freeze plug* menjalani proses pelelehan. Kemampuan metode MPS untuk mensimulasikan dan menjelaskan fenomena *freeze plug* memberikan kontribusi untuk pemahaman yang lebih baik tentang proses ini dalam *Molten Salt Reactor*.

Dengan demikian, penelitian ini meningkatkan pemahaman ilmiah tentang perpindahan panas dan laju peleburan *freeze plug*, sekaligus menawarkan rekomendasi praktis untuk desain dan kemajuan *Molten Salt Reactor* yang lebih efektif dan aman. Penelitian ini meningkatkan literatur ilmiah dan membuka jalan bagi penelitian mendalam di masa depan di sektor penting ini dengan menyarankan penggunaan tembaga sebagai logam tambahan dan mengkonfirmasi penerapan metode MPS.

Hasil studi ini dapat menjadi landasan untuk melakukan penelitian lanjutan guna memperoleh pengetahuan yang lebih komprehensif mengenai proses peleburan *freeze plug*. Pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini memerlukan eksplorasi lanjutan pada jenis logam tambahan, menyelidiki pengaruh bentuk *freeze plug*, atau menguji pengaruh dari berbagai situasi operasional. Dengan memperluas cakupan studi, akan sangat memungkinkan untuk mengungkapkan variabel yang lebih tepat yang mungkin berdampak pada proses pelelehan *freeze plug*.

4. SIMPULAN

Proses pelelehan *freeze plug* pada *Molten Salt Reactor* saat terjadi kecelakaan reaktor telah disimulasikan dengan menggunakan Metode *Moving Particle Semi-Implicit*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain *freeze plug* dengan logam tambahan lebih cepat meleleh dibanding desain tanpa logam tambahan. Hal ini menjelaskan bahwa tambahan logam dapat mempercepat proses transfer panas dari *freeze plug* ke *frozen salt*. Secara khusus, hasil yang diperoleh dari pemanfaatan aluminium, kuningan, dan tembaga dapat memberikan gambaran bagaimana logam-logam tersebut dapat berkontribusi dalam mempercepat proses pencairan *freeze plug*. Dari tiga logam yang digunakan, logam tembaga yang memiliki nilai konduktivitas panas tertinggi lebih cepat dalam melelehkan *frozen salt* dibanding logam lainnya. Hal ini menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai konduktivitas panas logam, semakin cepat dalam melelehkan *frozen salt*. Hasil dari penelitian ini menambah pemahaman ilmiah tentang perpindahan panas dan laju pelelehan *freeze plug*, memberikan saran praktis untuk meningkatkan desain dan kemajuan reaktor *Molten Salt* agar lebih efisien dan aman. Studi ini meningkatkan literatur ilmiah dan memfasilitasi penelitian komprehensif di masa depan dalam bidang penting ini dengan mengusulkan penggabungan tembaga sebagai logam tambahan dan memverifikasi kesesuaian metode MPS.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh program P2MI 2022 Institut Teknologi Bandung dengan nomor kontrak 71/IT1.C02/SK-TA/2022.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Adyana, N. (2024). Penerapan Pajak Karbon di Indonesia: Kajian Ekonomi, Politik, Dan Sosial. *OPTIMAL Jurnal Ekonomi Dan Manajemen*, 4(1), 11–21. <https://doi.org/10.55606/optimal.v4i1.2552>.
- Allibert, M., Aufiero, M., Brovchenko, M., Delpech, S., Ghetta, V., Heuer, D., Laureau, A., & Merle-Lucotte, E. (2016). Molten salt fast reactors. In *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100149-3.00007-0>.
- Apriliyanti, K., & Rizki, D. (2023). Kebijakan energi terbarukan: studi kasus indonesia dan norwegia dalam pengelolaan sumber energi berkelanjutan. *Jurnal Ilmu Pemerintahan Widya Praja*, 49(2), 186–209. <https://doi.org/10.33701/jipwp.v49i2.3684>.
- Bhowmik, C., Baruah, A., Bhowmik, S., & Ray, A. (2018). Green energy sources selection for sustainable

- energy planning using multi-criteria decision-making approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012029>.
- Chisholm, B. M., Krahn, S. L., & Sowder, A. G. (2020). A unique molten salt reactor feature – The freeze valve system: Design, operating experience, and reliability. *Nuclear Engineering and Design*, 368(1), 110803.
- Haubenreich, P. N., & Engel, J. R. (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives. *Nuclear Applications and Technology*, 8(2), 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.nucene.2014.02.014>.
- Hidayati, A. N., Mustari, A. P. A., Waris, A., Yulianto, Y., & Ilham, M. (2021). Study on Fluid Descends Vertically on Static Fluid Using Moving Particle Semi-Implicit Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1772(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1772/1/012007>.
- Hidayati, A. N., Waris, A., Mustari, A. P. A., Apriani, N. A., Ifthacharo, M., & Wulandari, R. (2020). The Effect of Temperature Variations on Wood's Metal Plate Melting Simulation by Using MPS. *Journal of Physics: Conference Series*, 1493(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1493/1/012024>.
- Ilham, M., Aji, I. K., & Okawa, T. (2023). Numerical investigation on the effects of fundamental design parameters on freeze plug performance in molten salt reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 403, 112144. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112144>.
- Ilham, M., Yulianto, Y., & Mustari, A. P. A. (2018). Simulation on Relocation of Non-Compressed Fluid Flow using Moving Particle Semi-Implicit (MPS) Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 407(1), 012100. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/407/1/012100>.
- Istavara, A., Ratiko, R., Pratama, H. A., & Nasruddin, N. (2022). Pemodelan Dinamik Pendinginan Bahan Bakar Nuklir Bekas Reaktor Riset Secara Natural Konveksi Pada Prototipe Dry Cask Storage. *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, 28(2), 113–124. <https://doi.org/10.17146/urania.2022.28.2.6639>.
- Koshizuka, S., Shibata, K., Kondo, M., & Matsunaga, T. (2018). Moving particle semi-implicit method. In *A Meshfree Particle Method for Fluid Dynamics*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03952-9>.
- Li, G., Gao, J., Wen, P., Zhao, Q., Wang, J., Yan, J., & Yamaji, A. (2020). A review on MPS method developments and applications in nuclear engineering. *Nuclear Engineering. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 367, 113166. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113166>.
- Li, G., Oka, Y., & Furuya, M. (2014). Experimental and numerical study of stratification and solidification/melting behaviors. *Nuclear Engineering and Design*, 272, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.02.023>.
- Limbaran, B. G., Harto, A. W., & Sihana, S. (2021). Analisis Sistem Pendingin Pasif Pasca Shutdown Dengan Skenario Severe Accident pada Innovative Molten Salt Reactor (IMSR). *Teknofisika*, 24(1), 29–34. <https://doi.org/10.17146/gnd.2021.24.1.5957>.
- Lumbanraja, S. M., & Dewi, D. (2017). Kajian Pra Kelayakan PLTN SMART Lepas Pantai Jenis Struktur Berbasis Gravitasi Untuk Indonesia. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 19(1), 33. <https://doi.org/10.17146/jpen.2017.19.1.3267>.
- Lumbanraja, S. M., & Liun, E. (2018). Reviu Implementasi Thorcon Molten Salt Reactor di Indonesia. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 20(1), 53. <https://doi.org/10.17146/jpen.2018.20.1.4083>.
- Mahmuddin, F., & Kashiwagi, M. (2014). Performance Evaluation of an Optimized Floating Breakwater in Oblique Waves with a Higher-Order Boundary Element Method. *Makara Journal of Technology*, 18(1), 7. <https://doi.org/10.7454/mst.v18i1.2940>.
- Mangapul, J. (2016). Pengaturan Tegangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 1000 WATT. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 1(1), 79–95. <https://doi.org/10.52447/jkte.v1i1.211>.
- Mariana, K. (2023). Peranan etika bisnis dalam menghadapi global warming di era globalisasi. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(01), 30–35. <https://doi.org/10.56127/jukim.v2i01.416>.
- Meiliasari, D. P., Panjaitan, B. S., Widana, I. D. K. K., Apriadi, R. K., & Cahyadi, D. (2022). Lesson Learned Dari Kecelakaan Reaktor Nuklir Fukushima Daiichi Untuk Meningkatkan Mitigasi Reaktor Serba Guna Gerrit Augustinus Siwabessy (RSG-GAS). *PENDIPA Journal of Science Education*, 6(2), 493–500. <https://doi.org/10.33369/pendipa.6.2.493-500>.
- Mustari, A. P. A., & Oka, Y. (2014). Molten uranium eutectic interaction on iron-alloy by MPS method. *Nuclear Engineering and Design*, 278, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.07.028>.
- Mustari, A. P. A., Oka, Y., Furuya, M., Takeo, W., & Chen, R. (2015). 3D simulation of eutectic interaction of Pb–Sn system using Moving Particle Semi-implicit (MPS) method. *Annals of Nuclear Energy*, 81, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.03.031>.
- Nabilah, B. F., Mustarib, A. P. A., & Yulianto, Y. (2022). Simulasi Pelelehan Freeze Plug Termodifikasi pada Molten Salt Reactor Menggunakan Metode Moving Particle Semi-implicit. *POSITRON*, 12(2), 112–

119. <https://doi.org/10.26418/positron.v12i2.57434>.
- Sampera, H. (2016). Aplikasi Metode Beda Hingga Crank-Nicholson Implisit untuk Menentukan Kasus Adveksi-Difusi 2D pada Sebaran Polutan Di Suatu Perairan. *PRISMA FISIKA*, 4(2), 56–63. <https://doi.org/10.26418/pf.v4i2.15851>.
- Sinopa, L. C. K., Noviani, E., & Rizki, S. W. (2020). Hampiran Solusi Persamaan Panas Dimensi Satu Dengan Metode Beda Hingga Crank-Nicolson. *Bimaster: Buletin Ilmiah Matematika, Statistika Dan Terapannya*, 9(1), 195 – 204. <https://doi.org/10.26418/bbimst.v9i1.38819>.
- Takebayashi, Y., Lyamzina, Y., Suzuki, Y., & Murakami, M. (2017). Risk Perception and Anxiety Regarding Radiation after the 2011 Fukushima Nuclear Power Plant Accident: A Systematic Qualitative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1306. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111306>.
- Tiberga, M., Shafer, D., Lathouwers, D., Rohde, M., & Kloosterman, J. L. (2019). Preliminary investigation on the melting behavior of a freeze-valve for the Molten Salt Fast Reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 132, 544–554. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.06.039>.
- Wang, Q., Li, R., & He, G. (2018). Research status of nuclear power: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.044>.
- Yanti, N. J., Mustari, A. P. A., Hidayati, A. N., & Aprianti, N. A. (2022). The effect of Copper utilization on MSFR's safety plug performance simulation by using MPS. *Journal of Physics: Conference Series*, 2243(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012059> [DownloadArticle PDF](#).
- Yoschenko, V., Kashparov, V., & Ohkubo, T. (n.d.). Radioactive Contamination in Forest by the Accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Comparison with Chernobyl. *Radiocesium Dynamics in a Japanese Forest Ecosystem: Initial Stage of Contamination After the Incident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*, 1(1), 3–22. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8606-0_1.
- Yusibani, E., Nisa, H., & Rajibussalim, R. (2021). Simulasi Pengaruh Radius Channel Garam dan Temperatur Terhadap Distribusi Temperatur Pada Teras Molten Salt Breeder Reactor. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 23(2), 81–88. <https://doi.org/10.17146/jpen.2021.23.2.6407>.