

Studi Awal Karakteristik Transfer Panas Pada Sistem Sirkulasi Alami untuk Molten Salt Reaktor (MSR) Menggunakan Metode COMSOL Multiphysics

Rindi Wulandari^{1,a)}, Sidik Permana^{2,b)}, Suprijadi^{3,c)}

¹Laboratorium Fisika Nuklir,
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Laboratorium Fisika Nuklir,
Kelompok Keilmuan Ilmu dan Rekayasa Nuklir,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

³Laboratorium Fisika Elektronik dan Instrumentasi,
Kelompok Keilmuan Fisika Teoritik Energi Tinggi dan Instrumentasi,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} wulandarindi@gmail.com (corresponding author)

^{b)} psidik@fi.itb.ac.id

^{c)} supri.haryono@gmail.com

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) generasi IV adalah reaktor daya hasil pengembangan inovatif dari PLTN generasi sebelumnya yang dikembangkan oleh the Generation IV Forum (GIF) dengan kriteria aspek ekonomi yang tinggi, tingkat keselamatan lanjut, menghasilkan limbah dengan kuantitas yang sangat rendah, dan tahan terhadap aturan Non-Proliferation Treaty (NPT). Molten Salt Reactor (MSR) adalah salah satu reaktor nuklir generasi IV yang menggunakan garam cair sebagai bahan bakar dan pendingin, sehingga teknologi yang digunakan berbeda dengan reaktor berbahan bakar padat atau reaktor konvensional. Salah satu peran penting dalam teknologi MSR adalah aliran garam cair yang digunakan untuk penyimpan panas. Garam cair memiliki titik leleh rendah dan titik didih tinggi, bahkan pada tekanan rendah, sehingga dimungkinkan untuk merancang sistem suhu tinggi tanpa meningkatkan tekanan. Pada studi ini, penulis fokus pada fenomena transfer panas dari sistem sirkulasi alami pada MSR. Simulasi dibuat dengan model 2-dimensi menggunakan metode COMSOL Multiphysics. Garam yang digunakan untuk aliran pendingin adalah sodium (Na). Aspek-aspek yang diperhitungkan dalam studi yaitu 1) karakteristik fenomena transfer panas 2) perubahan laju alir 3) perubahan tekanan pada sistem. Skenario pada studi diasumsikan laju alir pada sistem primer dalam keadaan tunak dalam kondisi normal dan reaksi fisi diabaikan. Hasil dari studi ini adalah karakteristik distribusi temperatur pada core, tekanan pada sistem pendingin primer, dan kecepatan selama waktu tertentu.

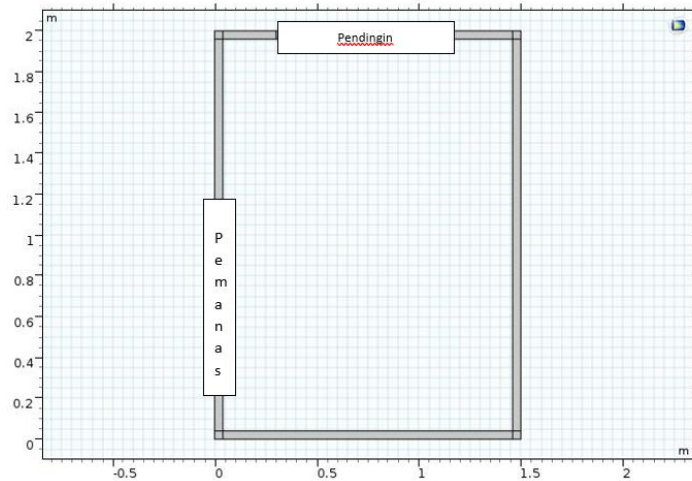
Kata-kata kunci: Transfer Panas, Molten Salt reactor, metode COMSOL Multiphysics

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) generasi IV adalah reaktor daya hasil pengembangan inovatif dari PLTN generasi sebelumnya yang dikembangkan oleh *the Generation IV Forum* (GIF) dengan kriteria aspek ekonomi yang tinggi, tingkat keselamatan lanjut, menghasilkan limbah dengan kuantitas yang sangat rendah, dan tahan terhadap aturan *Non-Proliferation Treaty* (NPT),[1]. *Molten Salt Reactor* (MSR) adalah salah satu reaktor nuklir generasi IV yang menggunakan garam cair sebagai bahan bakar dan pendingin, sehingga teknologi yang digunakan berbeda dengan reaktor berbahan bakar padat atau reaktor konvensional.

Salah satu peran penting dalam teknologi MSR adalah aliran garam cair, karena selain berperan sebagai bahan bakar dapat juga berperan sebagai penyimpan panas dan memiliki karakteristik transfer panas yang baik,[C]. Garam cair memiliki titik leleh rendah dan titik didih tinggi, bahkan pada tekanan rendah, sehingga dimungkinkan untuk merancang sistem suhu tinggi tanpa meningkatkan tekanan. Hal ini merupakan sebuah keuntungan bagi sistem MSR. Ada banyak komposisi garam yang dapat dipertimbangkan untuk digunakan. Namun, nitrat natrium dan kalium lebih potensial sebagai pendingin. Titik leleh fluorida terlalu tinggi. Karenanya fluorida cocok untuk digunakan dalam reaktor suhu tinggi,[2].

Tujuan studi kali ini adalah mengetahui karakteristik transfer panas pada aliran sirkulasi alami dengan sodium (Na) sebagai garam cair menggunakan metode COMSOL *Multyphysics* sebagai studi awal guna mensimulasikan aliran garam pendingin pada MSR dan berbagai studi transien lainnya. Simulasi dibangun dengan model 2-D (dua-dimensi) ditunjukkan oleh gambar 1. Sodium (Na) memiliki titik leleh dan titik didih pada suhu 97.80°C dan 883°C , rentang suhu ini merupakan rentang suhu yang sesuai dengan suhu operasi MSR.



Gambar 1. Skema Model 2-D pada COMSOL *Multyphysics*

DINAMIKA FLUIDA DAN TRANSFER PANAS

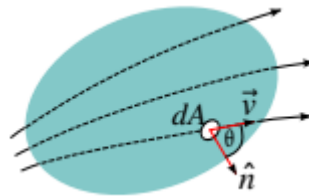
Dinamika Fluida

Fluida adalah zat yang dapat berubah bentuk secara kontinu ketika mendapatkan tegangan geser. Fluida dapat berubah bentuk sesuai volume ruang tempat fluida tersebut berada. Konsep fluida sebagai suatu zat yang kontinu merupakan dasar dari dinamika fluida klasik. Karena fluida diasumsikan sebagai suatu substansi kontinu, maka properti fluida seperti densitas,

temperatur, dan kecepatan merupakan suatu fungsi yang kontinu dalam fungsi posisi dan waktu,[3].

1. Hukum Kekekalan Massa: Persamaan Kontinuitas

Dalam mekanika fluida, kekekalan massa dalam suatu volume kontrol dapat dinyatakan sebagai jumlah laju fluks massa yang melewati (masuk dan keluar) volume kontrol ditambah laju perubahan massa di dalam volume kontrol,[3].



Gambar 2. Aliran fluida yang melewati volume kontrol

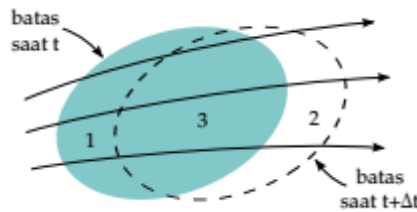
Pada gambar 2, laju fluks massa yang keluar melalui elemen luas dA pada suatu elemen volume kontrol adalah

$$\rho v dA \cos\theta = \rho(\vec{v} \cdot \hat{n}) dA \tag{1}$$

dengan \vec{v} merupakan kecepatan aliran fluida, \hat{n} adalah arah normal bidang permukaan volume kontrol, ρ merupakan densitas fluida, dan dA merupakan elemen luas yang dilewati aliran fluida.

2. Hukum Newton Kedua : Persamaan Navier-Stokes

Hukum Newton kedua tentang gerak menyebutkan bahwa laju perubahan momentum dari sebuah sistem sama dengan jumlah gaya yang bekerja pada sistem tersebut,[3].



Gambar 3. Volume Kontrol pada suatu medan aliran fluida

Gambar 3 menunjukkan perubahan batas yang terjadi pada volume kontrol ketika dilewati oleh medan aliran fluida. Persamaan umum yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes[4],

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{F} \tag{2}$$

Transfer Panas

1. Persamaan Dinamika Transfer Panas

Persamaan dinamika transfer panas diturunkan dari hukum persamaan termodinamika sebagai berikut,[4]

$$dE = \delta Q - \delta W \tag{3}$$

Dengan dE adalah energi dalam sistem, δQ adalah panas yang ditambahkan ke dalam sistem, dan δW merupakan kerja yang dilakukan sistem.

Aliran energi yang masuk dan keluar dari volume kontrol dinyatakan dengan laju fluks energi, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2. Aliran energi yang keluar melewati elemen luas dA dapat dinyatakan sebagai

$$\text{Laju fluks energi} = e\rho(\vec{v} \cdot \hat{n})dA = e\rho(vdA\cos\theta) \tag{4}$$

Dari persamaan kekekalan energi diperoleh persamaan differensial transfer panas, yaitu, [4]

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot k\nabla T \cdot \dot{q} \tag{5}$$

Jenis Transfer Panas: Konveksi

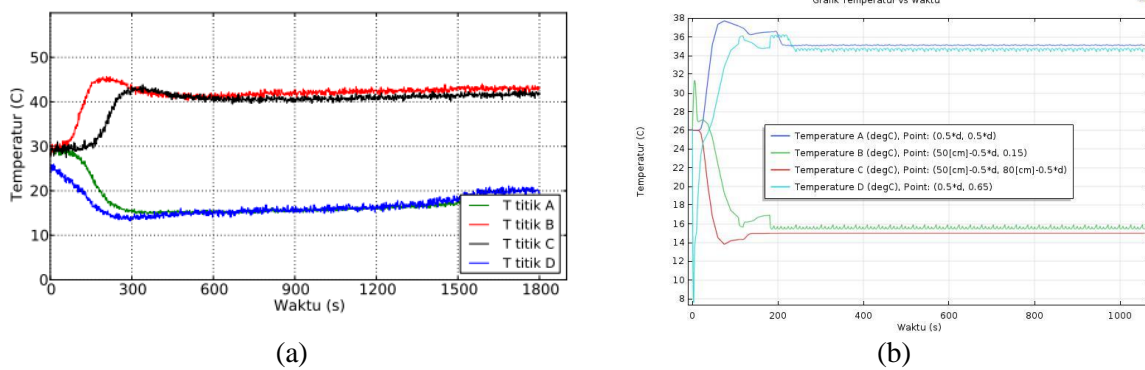
Konveksi merupakan transfer panas dengan bantuan medium fluida. Terdapat dua macam fenomena konveksi, yaitu konveksi paksa dan konveksi alami. Pada konveksi paksa, transfer panas dan aliran fluida terjadi karena adanya bantuan gaya eksternal, seperti gaya dorong dari kipas atau pompa. Pada konveksi alami, aliran fluida terjadi akibat gaya apung fluida yang dihasilkan oleh perubahan densitas fluida. Perubahan densitas fluida dapat diakibatkan oleh perbedaan temperatur fluida. Hubungan antara perubahan densitas dengan perbedaan temperatur dapat dituliskan pada persamaan berikut, [5]

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \tag{6}$$

Dengan ρ_0 adalah densitas awal fluida, ρ densitas fluida pada lapisan yang dipanaskan, β merupakan koefisien muai termal, dan ΔT adalah perbedaan temperatur antara fluida yang dipanaskan dengan temperatur fluida awal.

DESKRIPSI MODEL SIMULASI SIRKULASI ALAMI

Tahap awal dilakukan studi literatur sebagai pengumpulan data dan untuk memverifikasi model sistem sirkulasi alami. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan simulasi dengan eksperimen yang dilakukan oleh Habibi, 2013 [6]. Hasil yang diperoleh berkesesuaian dengan eksperimen yang dilakukan. Gambar 4 merupakan perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dari model sirkulasi alami yang menggunakan fluida air, dengan ukuran model 50 x 80 (cm).



Gambar 4. Hasil Verifikasi: Perubahan temperature pada model sistem sirkulasi alami (a) hasil eksperimen, Habibi 2013 (b) hasil simulasi dengan COMSOL *Multyphysics*

Untuk kecepatan alir fluida pada eksperimen tidak dilakukan karena sensor yang digunakan tidak dapat mendeteksi kecepatan alir fluida, dikarenakan aliran alir yang terlalu kecil (dibawah batas minimum kemampuan sensor). Namun, saat simulasi kecepatan dan tekanan dapat diketahui. Saat sistem mulai stabil, kecepatan alir pada model diaas adalah 0.3 cm/s dan

tekanan yang nilainya tidak berubah secara signifikan, yaitu sekitar 1 atm. COMSOL *Multiphysics* dapat digunakan untuk simulasi model sistem sirkulasi alami.

Deskripsi Sistem

Model sistem sirkulasi alami dibangun dengan simulasi dua dimensi (2D) ukuran 1.5 x 2 (m), dengan garam sodium (Na) sebagai Fluida, ditunjukkan oleh gambar 1. Karakteristik sodium (Na) diberikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Karakteristik Fisis dari sodium (Na), [7]

Nama	Sodium (Na)
Titik leleh	97.80°C
Titik didih	883°C
Densitas	0.7 g/cm ³

Kondisi awal sodium memiliki temperatur 150°C, tekanan 1 atm, dan air berada dalam keadaan diam. Temperature pemanas 500 °C dan temperature pendingin 100 °C, dan inlet kecepatan 10 cm/s. Dinding sistem sirkulasi dibuat isolasi termal agar tidak terjadi transfer panas antara sistem sirkulasi dengan lingkungan. Hal ini dimaksudkan agar transfer panas hanya terjadi pada fluida yang terdapat di dalam sistem sirkulasi. Selain itu aliran fluida dianggap laminar, karena kecepatan air di dalam sistem sirkulasi rendah,[7]. Pemodelan dibuat dengan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga, COMSOL *Multiphysics*.

Pemodelan dimulai dengan pemilihan modul fisika. Modul yang dipilih adalah modul *Non-Isothermal FLOW* (NITF). Modul ini merupakan gabungan tiga persamaan dasar, yaitu persamaan kontinuitas, persamaan Navier-Stokes, dan persamaan dinamika transfer panas di dalam fluida.

Persamaan kontinuitas

$$\nabla \rho \vec{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

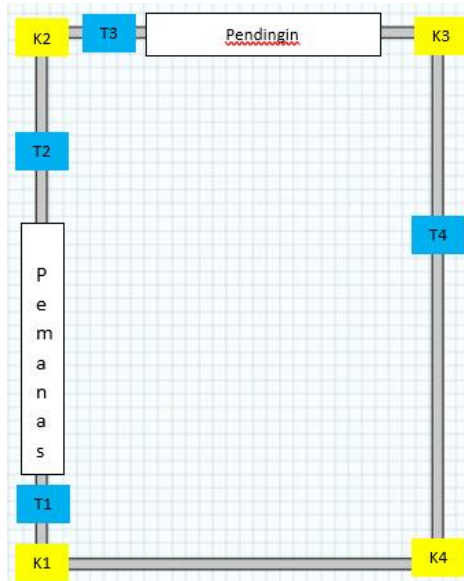
Persamaan Navier-Stokes

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\Gamma} + \vec{F} \quad (8)$$

Persamaan dinamika transfer panas di dalam fluida

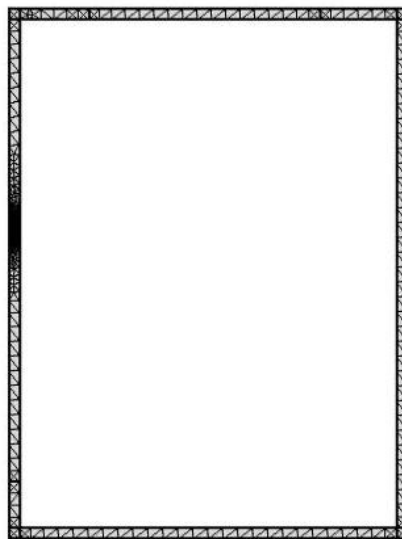
$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + \dot{q} \quad (9)$$

Pada simulasi akan dicari nilai temperatur dan kecepatan air di beberapa titik pengukuran. Posisi titik-titik pengukuran temperatur dan kecepatan air dapat dilihat pada Gambar 5.



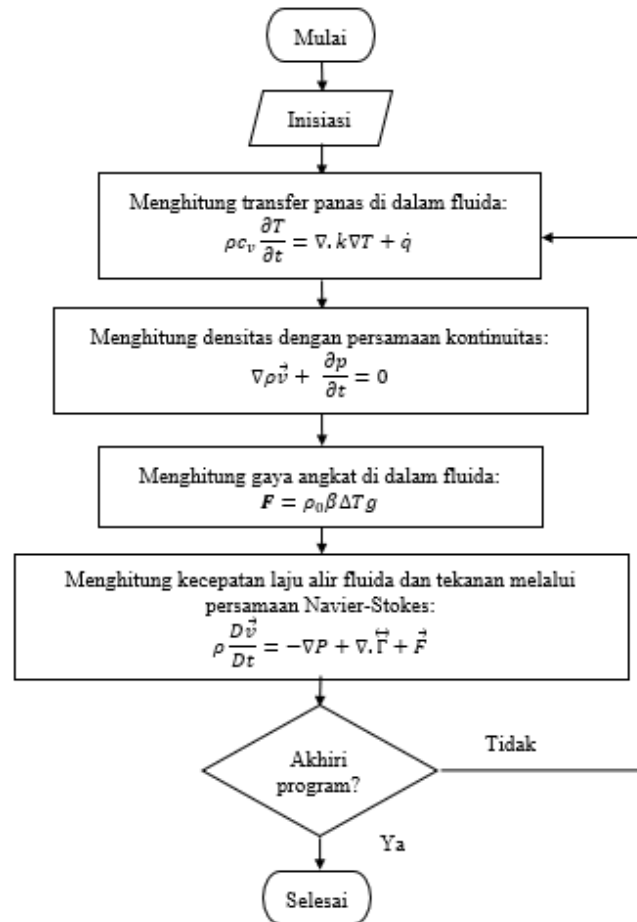
Gambar 5. Posisi titik-titik pengukuran temperatur (1,2,3,4) dan kecepatan aliran fluida (1,2,3,4)

Setelah penentuan kondisi awal dan syarat batas, selanjutnya dilakukan *meshing*, yaitu membagi bagi geometri sistem kedalam ukuran yang lebih kecil. Setelah dilakukan *meshing*, geometri sistem akan berbentuk seperti yang ditunjukkan gambar 6.



Gambar 6. Bentuk geometri sistem sirkulasi setelah dilakukan *meshing* hasil pemodelan

Setelah tahap *meshing* dilakukan, berarti tahap *pre-processor* selesai. Selanjutnya dilakukan langkah *solver* oleh COMSOL *Multiphysics* yaitu dengan Metode Elemen Hingga (MEH). Pada gambar III.5 menunjukkan *flowchart* dari perhitungan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*.



Gambar 6. Flowchart perhitungan perangkat lunak COMSOL Multiphysics

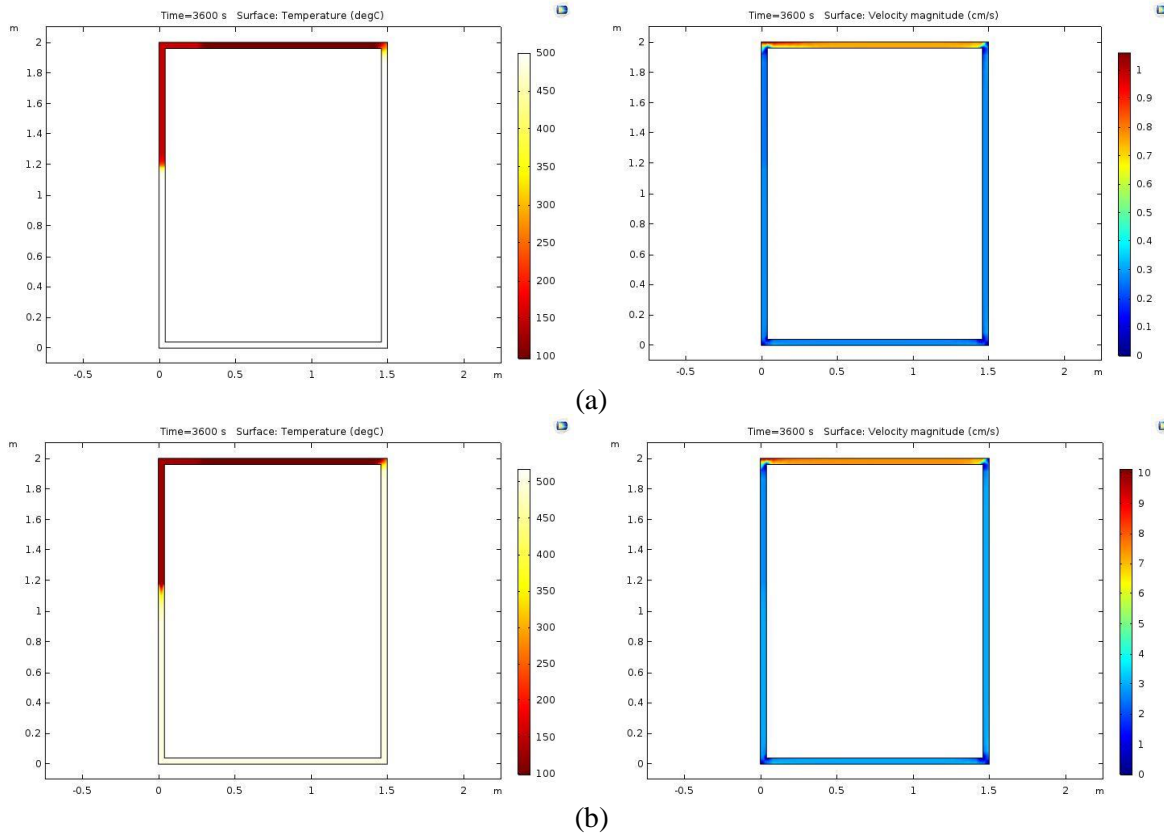
HASIL PEMODELAN DAN SIMULASI

Simulasi yang dilakukan terdiri dari 2 macam, yaitu berdasar variasi inlet kecepatan alir fluida dengan konfigurasi sebagai berikut:

Tabel 2. Konfigurasi simulasi dengan variasi ketinggian

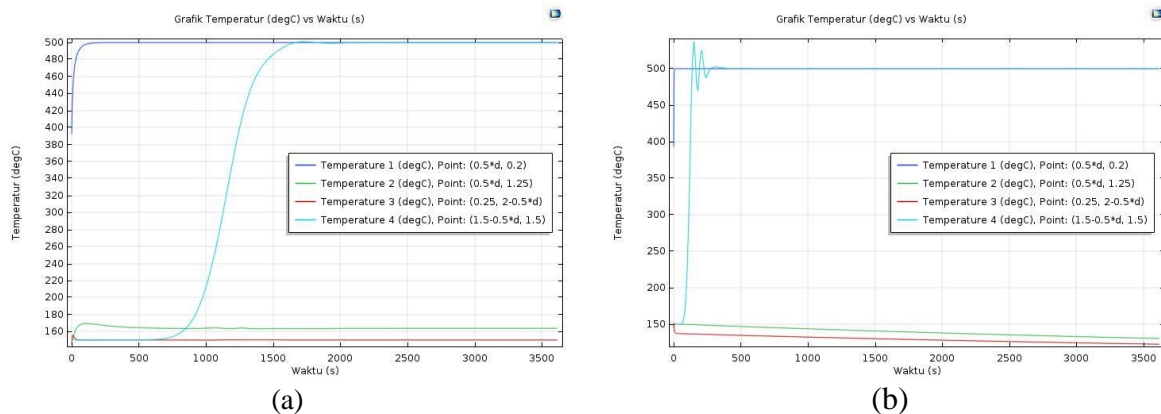
Model	T _c (°C)	T _h (°C)	ΔT (°C)	Inlet Kecepatan alir (cm/s)
I	100	500	400	1
II	100	500	400	10

Hasil simulasi dinyatakan dalam bentuk gambar distribusi temperatur dan kecepatan (Gambar 8), grafik temperatur terhadap waktu (Gambar 9), dan grafik kecepatan terhadap waktu (Gambar 10).



Gambar 8. Distribusi temperatur dan kecepatan pada saat $t = 3600$ s (a) inlet kecepatan 1 cm/s (b) inlet kecepatan 10 cm/s

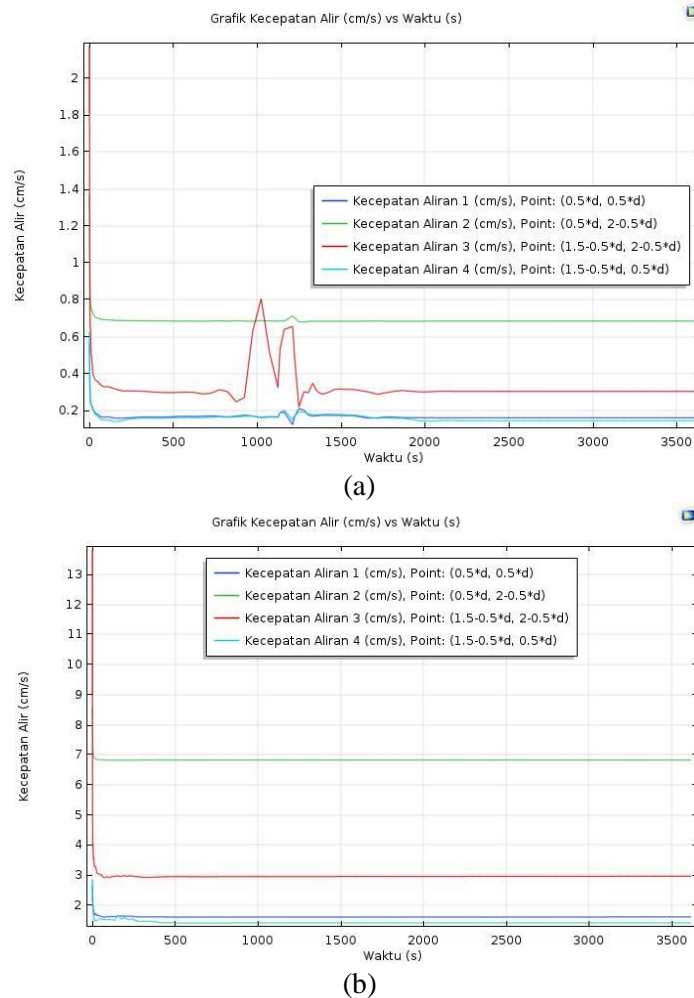
Mulanya terjadi aliran fluida ketika pemanas dan pendingin diaktifkan. Air pada bagian pemanas akan bergerak ke atas karena mengalami penurunan densitas dan air pada bagian pendingin akan bergerak ke bawah karena mengalami peningkatan densitas. Gambar 7 di atas terjadi saat $t=3600$ s dan kondisi sistem sudah stabil. Pada dasarnya karakteristik dari distribusi kecepatan dan temperatur sama. Untuk distirubusi dari tekanan juga sama. Untuk melihat perbedaannya dapat dilihat pada gambar 8 dan gambar 9.



Gambar 9. Grafik temperatur terhadap waktu (a) inlet kecepatan 1 cm/s (b) inlet kecepatan 10 cm/s

Untuk perubahan suhu, sedikit ada perbedaan pada saat akan menuju kondisi stabil hal ini dipengaruhi inlet kecepatan aliran. Untuk inlet 1cm/s terlihat lebih stabil, dan untuk inlet 10 cm/s untuk beberapa waktu sistem tidak stabil walaupun pada akhirnya stabil. Ini menunjukkan

inlet kecepatan yang terlalu tinggi untuk sistem berdimensi 150 x 200 cm. Namun untuk perubahan suhu sendiri tidak ada pengaruh signifikan.



Gambar 10. Grafik inlet kecepatan alir fluida terhadap waktu (a) inlet kecepatan 1 cm/s (b) inlet kecepatan 10 cm/s

Terjadi ketidak stabilan kecepatan untuk posisi Kecepatan Aliran 3 (warna merah), hal tersebut disebabkan suhu yang cukup tinggi pada sistem. Semakin tinggi perbedaan temperatur maka gaya dorong akan semakin bertambah. Gaya dorong akan mempengaruhi kecepatan aliran air di dalam sistem sirkulasi.

Berdasar pada Gambar 8 dan 9 serta hasil verifikasi, tekanan pada sistem baik berdimensi 50 x 80 (cm) (hasil verifikasi) maupun sistem simulasi 150 x 200 (cm) tidak terjadi pengaruh signifikan. Kecepatan alir pada sistem sangat dipengaruhi oleh inlet kecepatan pada awal sistem dijalankan. Untuk dimensi yang terlalu kecil, sistem akan tidak stabil jika diberi nilai inlet kecepatan alir yang tinggi. Selain itu, inlet kecepatan alir juga dapat mempengaruhi perubahan suhu pada sistem. Semakin cepat kecepatan alir, maka semakin besar pengambilan panas pada sistem, dapat dilihat pada Gambar 8 temperatur mengalami penurunan pada titik pengukuran 3 dan 4.

KESIMPULAN

COMSOL *Multiphysics* dapat digunakan untuk simulasi sistem sirkulasi alami dan dapat mengeluarkan data-data yang tidak didapatkan pada hasil eksperimen, selain itu dapat

digunakan untuk simulasi dengan sistem yang lebih rumit. Pada studi ini digunakan sodium (Na) sebagai fluida pada sistem sirkulasi alami, karena memiliki rentang nilai suhu *liquid* yang hampir sama dengan sistem operasi MSR. Hasil simulasi yang diperoleh berupa distribusi temperatur, kecepatan alir fluida pada sistem, dan tekanan. Tidak ada pengaruh signifikan pada tekanan. Kecepatan alir pada sistem sirkulasi sangat dipengaruhi oleh inlet kecepatan pada saat awal sistem akan dijalankan. Inlet kecepatan alir juga dapat mempengaruhi perubahan suhu pada sistem. Semakin cepat kecepatan alir, maka semakin besar pengambilan panas pada sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah ini didanai oleh Bantuan Kegiatan Mahasiswa (BKM) - Institut Teknologi Bandung 2019.

REFERENSI

1. Y.D Anggoro, *Kajian Pengembangan PLTN Generasi IV. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Volume 15* (2013)
2. C. Forsberg, *The Advanced High-Temperature Reactor: High-Temperature Fuel, Molten Salt Coolant and Liquid-Metal-Reactor Plant*, Paper INES1-71, 1st International Conference on Innovative Nuclear Energy Systems for Sustainable Development of the world (COE INES-1), Tokyo, Japan, (2004)
3. C.W. Forsberg, P.F. Peterson, H. Zhao, *An advanced Molten Salt Reactor Using High-Temperature Reactor Technology*, International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '04), June 13–17, (2004)
4. Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard, Robert W. Fox, *Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley and Sons : New Jersey (2004)
5. Charles E. Wicks, Gregory Rorrer, James R. Welty, Robert E. Wilson, *Dasar-dasar Fenomena Transport : Transfer Momentum*. Erlangga : Bandung (2004)
6. Adam Bejan, Allan D. Kraus, *Heat Transfer Handbook*. John Wiley and Sons : New Jersey (2003)
7. Habibi Abdillah, *Rancang Bangun Sistem Instrumentasi dan Sistem Deteksi Kecepatan dan Temperatur Air Pada Sistem Sirkulasi Alami*. Departemen Fisika Institut Teknologi Bandung, Bandung (2013)
8. AZoM, *Sodium – Properties and Applications*. <https://www.azom.com/> (2012) (dikutip pada 23 Juni 2019)
9. COMSOL Multiphysics, *INTRODUCTION TO COMSOL Multiphysics version 5.3*. COMSOL (2017)
10. A.K. Srivastava, dkk, *Experimental And Theoretical Studies In Molten Salt Natural Circulation Loop* (MSNCL). BHABHA ATOMIC RESEARCH CENTRE, Mumbai-India (2016)