

Pemodelan Sirkulasi Alamiyah Bahan Pendingin pada Reaktor Nuklir dengan Variasi Perbedaan Temperatur Pemanas dan Pendingin

Robi Dany Riupassa¹⁾, Novitrian^{2,a)}, Khairul Basar²⁾, dan Abdul Waris²⁾

¹Jurusan Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

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

^{a)} novit@fi.itb.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Studi tentang sirkulasi alamiyah bahan pendingin pada reaktor nuklir dapat dilakukan secara eksperimen maupun simulasi komputer. Saat ini telah dilakukan eksperimen dengan desain sistem loop tertutup berpendingin air. Maksimum perbedaan temperatur pemanas dan pendingin yang digunakan pada eksperimen yaitu 80 °C. Sistem loop tertutup yang telah dibangun akan dikembangkan untuk mengoptimalkan laju aliran bahan pendingin. Optimasi selanjutnya dilakukan melalui pemodelan berbasis computational fluid dynamics (CFD). Pada penelitian ini, sistem loop tertutup dimodelkan untuk beberapa jenis fluida dengan perbedaan temperatur pemanas dan pendingin diatas 80 °C. Hasil perhitungan akan memperlihatkan distribusi temperatur serta kecepatan aliran fluida. Selain pengaruh perbedaan temperatur pemanas dan pendingin, pengujian sistem untuk beberapa jenis fluida juga dapat menunjukkan pengaruh densitas fluida terhadap kecepatan aliran.

Kata-kata kunci: Sirkulasi Alamiyah, CFD

PENDAHULUAN

Pasca kecelakaan reaktor nuklir di Fukushima-Daiichi pada tahun 2011 lalu, aspek keselamatan dalam desain sebuah reaktor nuklir menjadi syarat mutlak yang harus diperhatikan. Apa yang terjadi pada kecelakaan reaktor tersebut menunjukkan bahwa sangat diperlukan sistem keselamatan yang sifatnya pasif (*passive safety*) dan melekat (*inherent safety*). Sistem keselamatan seperti ini dapat berjalan tanpa harus dioperasikan oleh operator. Hal ini dimungkinkan karena sistem ini memanfaatkan hukum alam yang terjadi berupa sirkulasi alamiyah. Sirkulasi alamiyah merupakan fenomena terjadinya aliran fluida karena adanya perbedaan densitas fluida yang bergantung terhadap temperatur. Pada kondisi darurat yang menyebabkan reaktor secara otomatis berhenti beroperasi, sirkulasi alamiyah dibutuhkan untuk mengalirkan bahan pendingin untuk mengambil sisa panas akibat peluruhan bahan radioaktif.

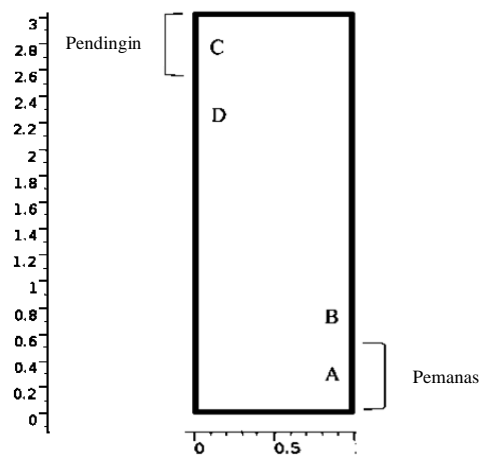
Sebagai bagian dari sistem keselamatan yang bersifat pasif dan melekat, studi tentang sirkulasi alamiyah menjadi sangat penting untuk diterapkan pada desain reaktor generasi mendatang. Hal ini dapat dilakukan melalui eksperimen dan simulasi komputer. Eksperimen tentang sirkulasi alamiyah bahan pendingin dilakukan dengan membangun sistem loop tertutup yang dipasang pemanas dan pendingin. Optimasi sistem loop tertutup dapat dikombinasikan secara eksperimen dan pemodelan komputer untuk mempelajari aliran fluida bahan pendingin [1]. Pemodelan komputer salah satunya dapat dilakukan berbasis *computational fluid dynamics* (CFD).

Pada penelitian ini, pemodelan berbasis CFD dilakukan untuk mempelajari sirkulasi alamiyah bahan pendingin pada reaktor nuklir. Model ini bertujuan untuk mengoptimalkan hasil penelitian secara eksperimen yang telah

dilakukan sebelumnya [2]. Pada eksperimen tersebut dibangun sistem loop tertutup berpendingin air dan dilakukan variasi perbedaan temperatur pemanas dan pendingin yaitu 30, 40, 60, dan 80 °C. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan temperatur maka kecepatan aliran fluida akan semakin tinggi. Hal ini diperoleh untuk beda temperatur sebesar 80 °C dengan kecepatan aliran mencapai 3 cm/s. Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan perbedaan temperatur diatas 80 °C. Mengingat bahwa reaktor berpendingin air memiliki kisaran suhu bahan pendingin masuk dan keluar teras reaktor mencapai 300 °C, maka pada penelitian ini divariasikan temperatur pemanas yaitu 150, 200, 250, dan 300 °C. Fluida kerja yang digunakan pada penelitian ini yaitu gasoline, liquid helium, liquid mercury, dan liquid sodium. Untuk temperatur pendingin dibuat konstan sebesar 10 °C. Hasil penelitian ini dapat menunjukkan distribusi temperatur serta kecepatan aliran fluida dalam sistem loop tertutup.

DESAIN SISTEM LOOP TERTUTUP

Desain sistem loop tertutup pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1. Sistem ini memiliki lebar sebesar satu meter dan tingginya tiga meter. Sistem ini mengadopsi yang telah dibangun secara eksperimen dengan menempatkan pendingin pada sisi kiri dari loop dan pemanas pada sisi kanannya. Seperti terlihat pada gambar tersebut, titik pengambilan data distribusi temperatur dan kecepatan aliran fluida yaitu pada titik A, B, C, dan D. Titik A berada pada pemanas, titik B berada setelah keluar dari pemanas, titik C berada pada pendingin, dan titik D yaitu setelah keluar dari pendingin. Dengan posisi pemanas dan pendingin seperti ini maka akan didapatkan aliran fluida dengan arah aliran berlawanan arah jarum jam.



Gambar 1. Desain sistem loop tertutup

Parameter fisis beberapa fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter fisis fluida [3]

Fluida	Densitas, ρ (g/cm ³)	Kapasitas panas, C_p (kJ/kg.K)	Viskositas Dinamik, μ (kg/s.m)	Konduktivitas Termal, k (W/m.K)
Liquid Helium	0.147	2.05	3.94×10^{-06}	0.0167
Liquid Sodium	0.898	1.330	4.24×10^{-04}	80
Gasoline	0.751	2.06	5.29×10^{-04}	0.1164
Liquid Mercury	13.63	0.141	1.79×10^{-03}	8.0

Kecepatan aliran fluida diperoleh dengan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes untuk aliran tak termampatkan (*incompressible flow*) sebagai berikut [4]

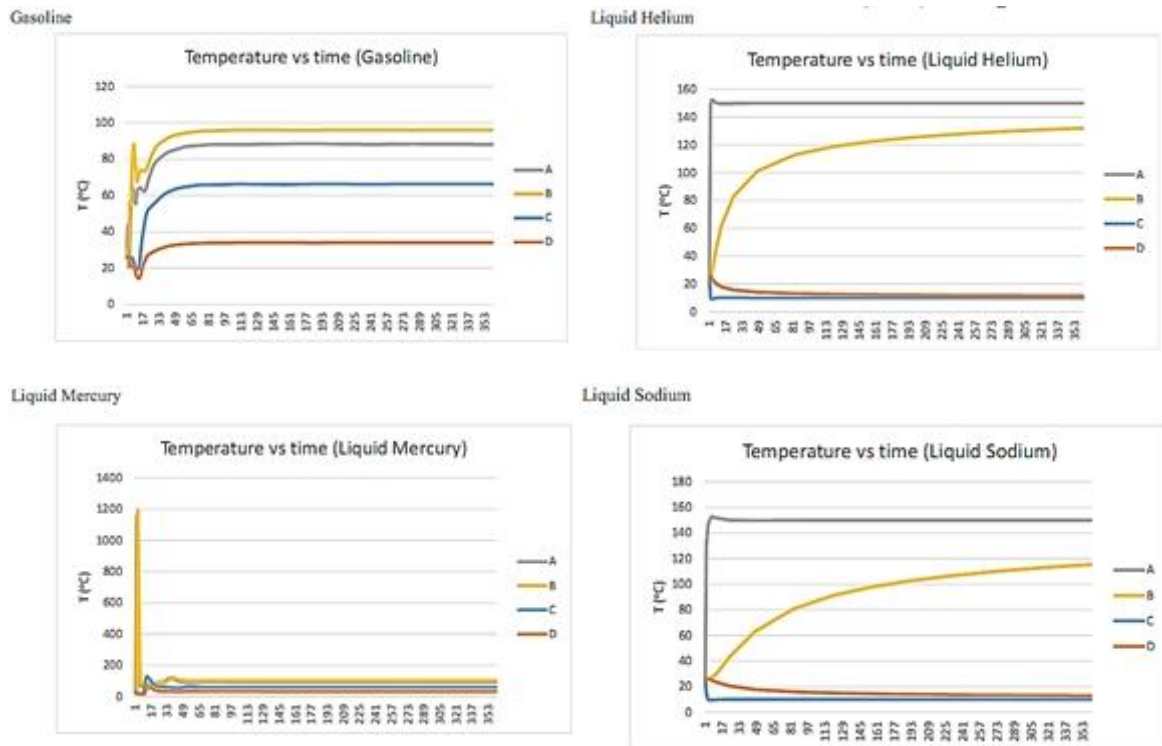
$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho\vec{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (1)$$

Sedangkan untuk perubahan temperatur fluida untuk model dua dimensi yang dilakukan pada penelitian ini ditentukan berdasarkan hubungan persamaan transfer panas fluida sebagai berikut

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T + q''' \quad (2)$$

HASIL DAN DISKUSI

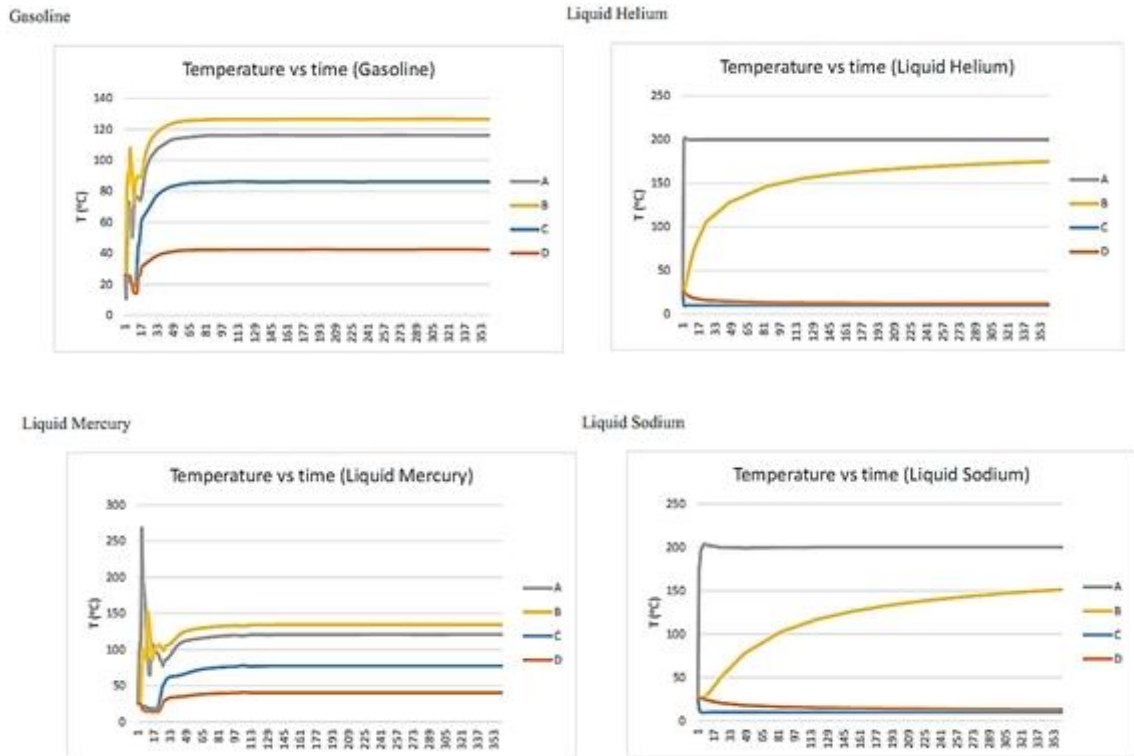
Hasil perhitungan diperoleh untuk nilai perubahan temperatur dan kecepatan aliran fluida pada titik A, B, C, dan D, untuk setiap fluida kerja yang digunakan. Waktu operasi sistem loop diambil selama enam menit. Perhitungan perubahan temperatur dengan temperatur pemanas sebesar 150 °C ditunjukkan seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Distribusi temperatur dengan temperatur pemanas sebesar 150 °C

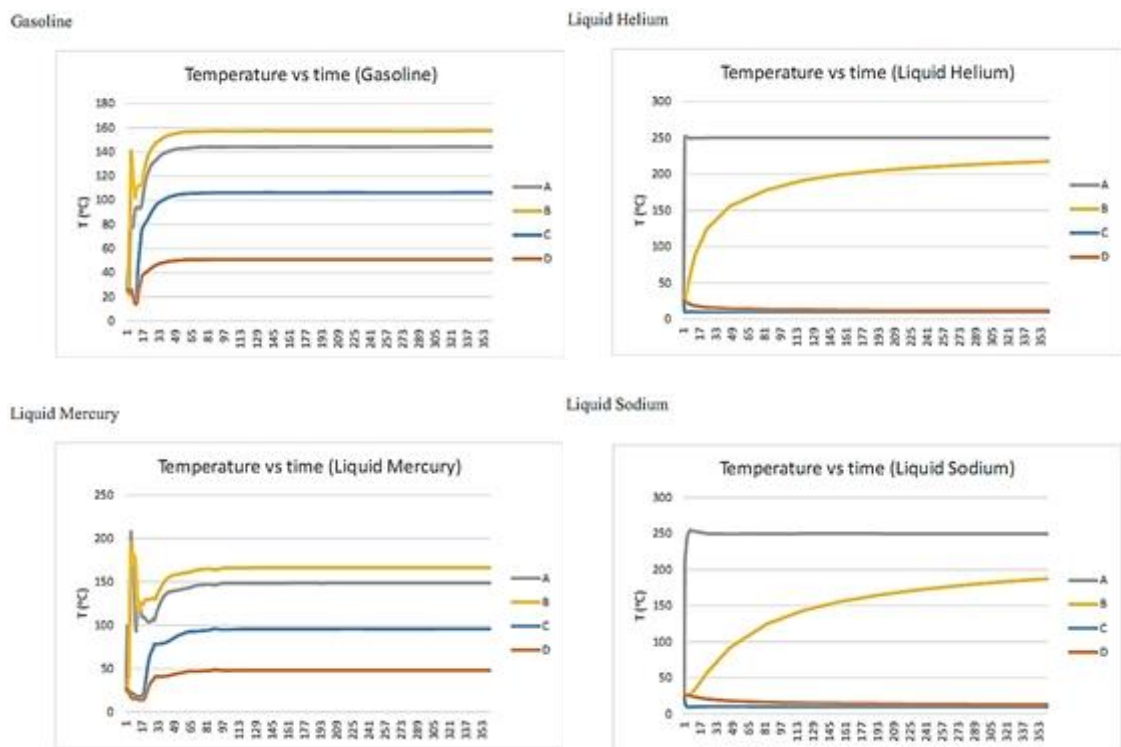
Hasil pada gambar 2 menunjukkan bahwa dengan temperatur awal sebesar 26 °C, tiap fluida kerja menghasilkan distribusi temperatur yang berbeda-beda selama waktu operasi. Gasoline dan liquid mercury sama-sama mencapai keadaan saturasi dalam waktu sekitar satu menit beroperasi. Distribusi temperatur yang ditunjukkan pada hasil untuk gasoline dan liquid mercury memperlihatkan bahwa aliran fluida terjadi selama waktu operasi. Hal ini terlihat bahwa temperatur pada titik pemanas (titik A) untuk kedua fluida ini tidak tetap berada pada nilai temperatur pemanas yang diberikan yaitu sebesar 150 °C. Tetapi terlihat bahwa pada titik A untuk gasoline memiliki temperatur mencapai 84 °C sedangkan liquid mercury mencapai 95 °C. Hal ini menunjukkan akibat adanya aliran fluida maka panas pada pemanas dapat dialirkan ke daerah lain dalam sistem loop tertutup. Hal ini berbeda dengan hasil perhitungan yang didapatkan untuk liquid helium dan liquid sodium. Pada kedua fluida ini, temperatur pemanas selama waktu operasi tetap konstan bernilai 150 °C. Hal ini menunjukkan bahwa aliran fluida tidak terjadi.

Selanjutnya perubahan temperatur dengan temperatur pemanas sebesar 200 °C ditunjukkan seperti pada gambar 3. Hasil pada gambar 3 memperlihatkan bahwa untuk gasoline dan liquid mercury, temperatur pemanas dapat turun selama waktu beroperasi.



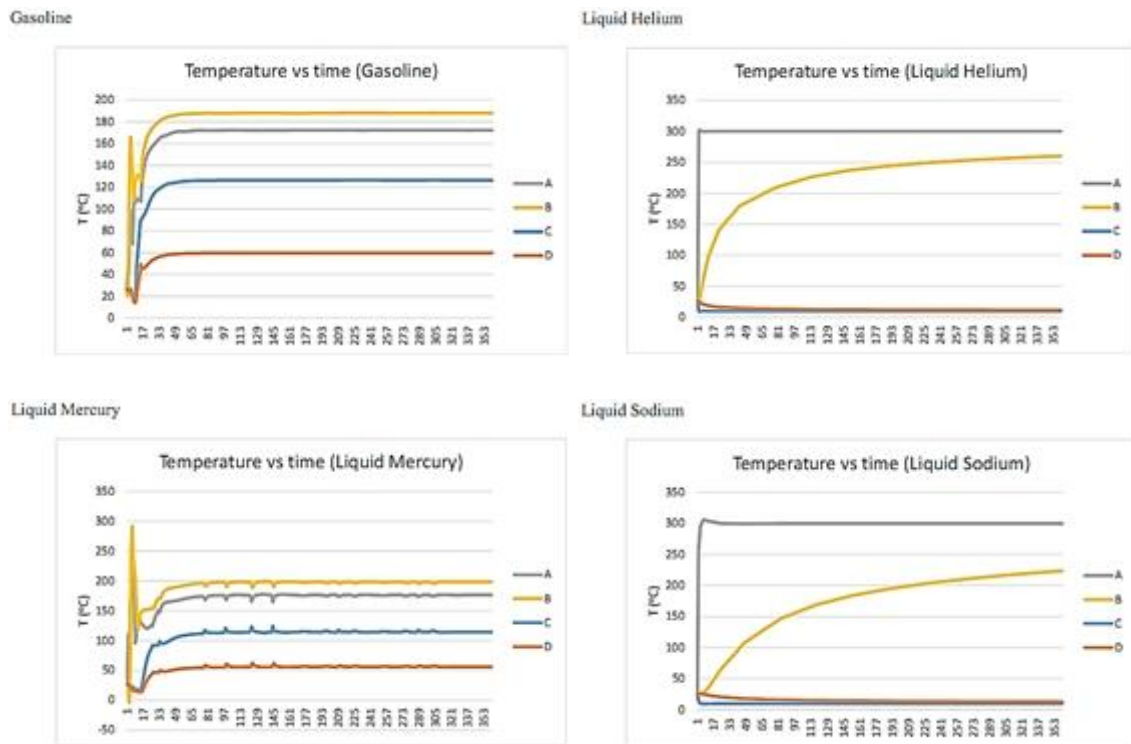
Gambar 3. Distribusi temperatur dengan temperatur pemanas sebesar 200 °C

Gasoline pada titik pemanas mengalami penurunan sampai 119 °C sedangkan liquid mercury mencapai 125 °C. Panas yang terdistribusi membuat temperatur di titik C yang dipasang pendingin menjadi meningkat mencapai 75 °C. Hasil pada gambar 3 untuk liquid helium dan liquid sodium masih memberikan tren yang sama dengan hasil pada gambar 2.

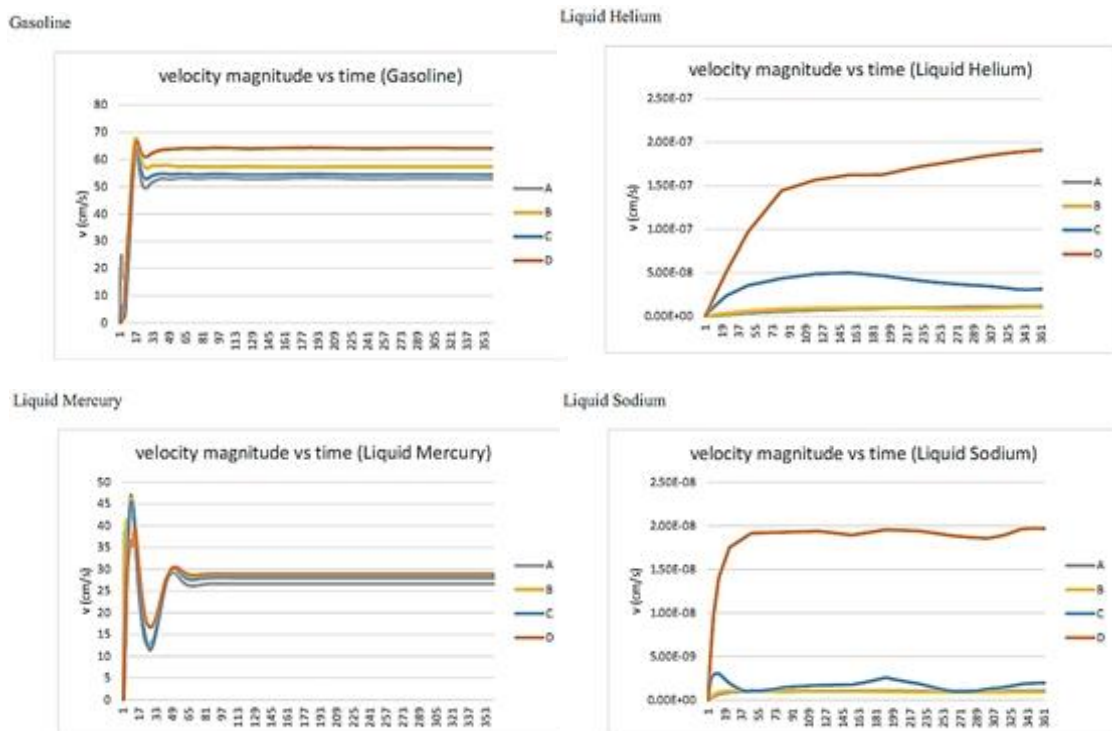


Gambar 4. Distribusi temperatur dengan temperatur pemanas sebesar 250 °C

Pada gambar 3 dapat dilihat bahwa pada titik A untuk liquid helium dan liquid sodium temperatur cenderung konstan selama waktu operasi yaitu sebesar 200 °C. Pada titik B, baik liquid helium maupun liquid sodium memiliki temperatur yang terus naik dari temperatur awal yang diberikan. Liquid helium kenaikannya lebih cepat dibandingkan liquid sodium. Untuk liquid helium dalam waktu sekitar 97 s temperatur telah mencapai 150 °C sedangkan liquid sodium diperlukan waktu sekitar 337 s untuk temperatur mencapai 150 °C. Untuk titik C, kedua fluida ini memiliki temperatur yang konstan selama waktu operasi sedangkan titik D cenderung mengalami sedikit penurunan temperatur dari temperatur awal yang diberikan.



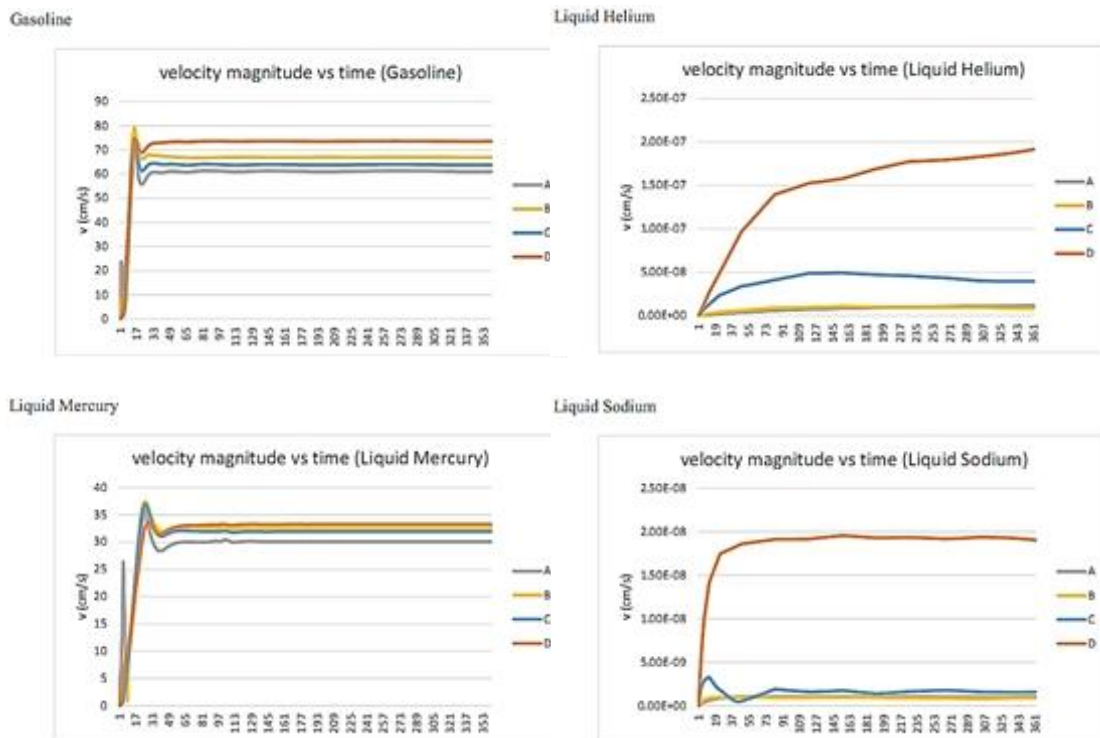
Gambar 5. Distribusi temperatur dengan temperatur pemanas sebesar 300 °C



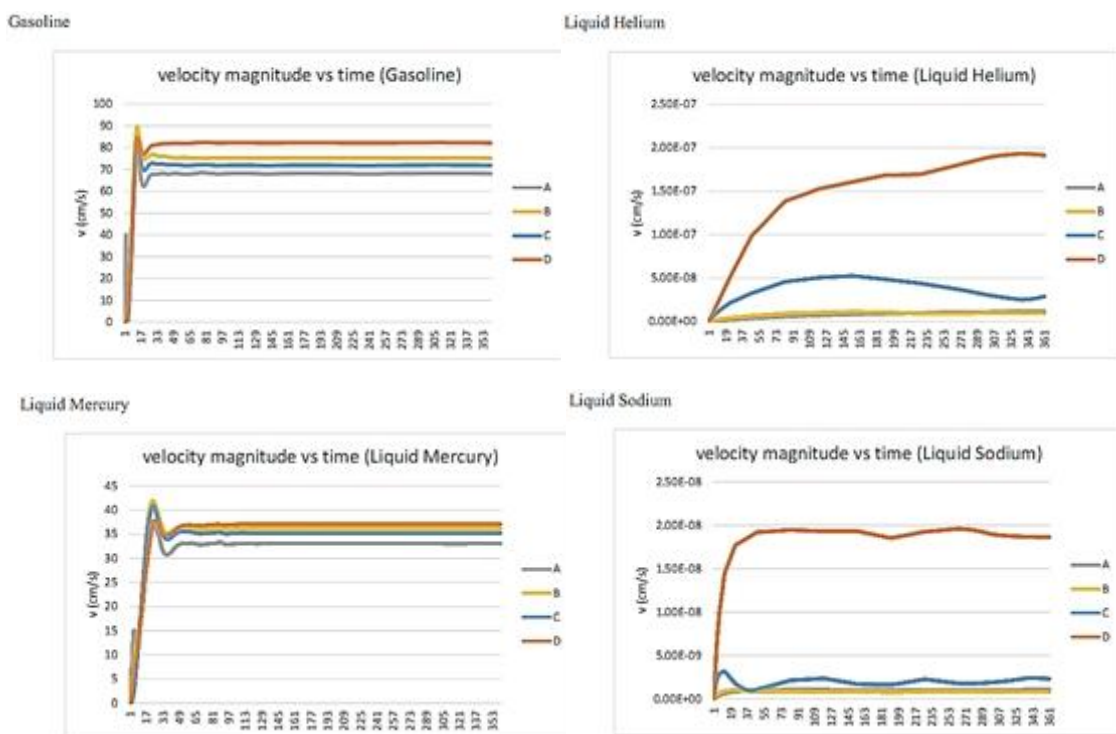
Gambar 6. Kecepatan aliran fluida dengan temperatur pemanas sebesar 150 °C

Untuk perubahan temperatur dengan temperatur pemanas sebesar 250 °C ditunjukkan seperti pada gambar 4.

Hasil pada gambar 4 diperoleh bahwa gasoline selama waktu beroperasi akan mengalami penurunan temperatur pemanas sampai dengan 142 °C sedangkan liquid mercury mencapai 150 °C. Selanjutnya dengan temperatur pemanas sebesar 300 °C akan diperoleh hasil perhitungan distribusi temperatur seperti ditunjukkan pada gambar 5. Hasil ini menunjukkan bahwa gasoline memiliki nilai temperatur pemanas selama waktu operasi mencapai 170 °C sedangkan liquid mercury mencapai 177 °C.

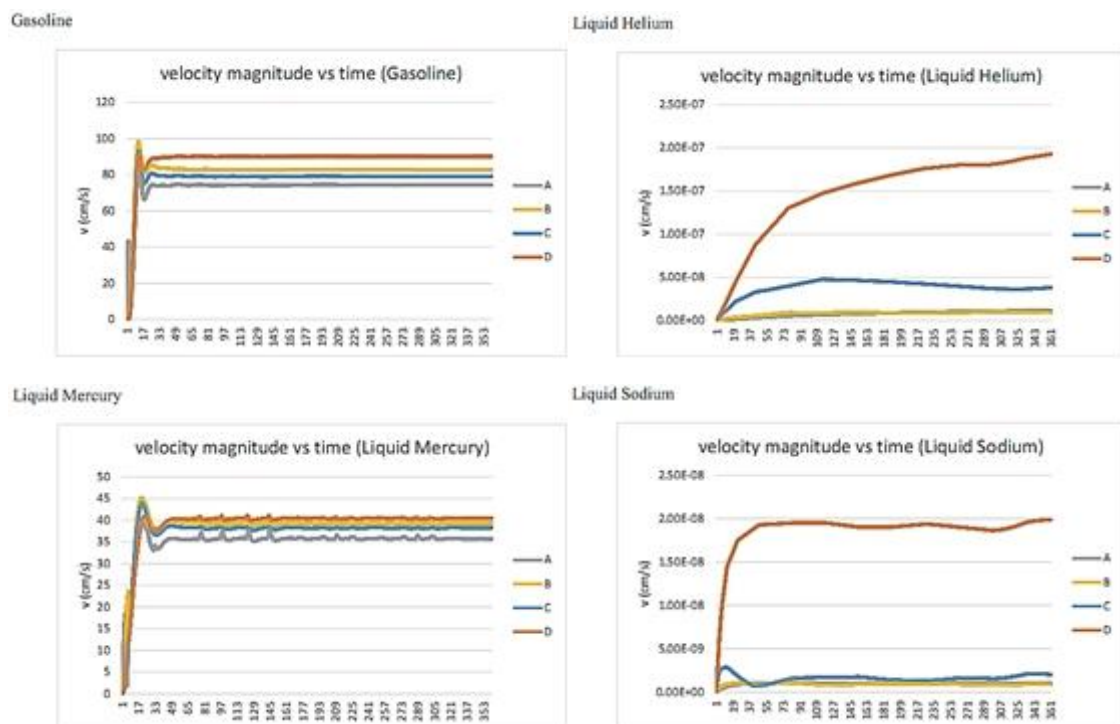


Gambar 7. Kecepatan aliran fluida dengan temperatur pemanas sebesar 200 °C



Gambar 8. Kecepatan aliran fluida dengan temperatur pemanas sebesar 250 °C

Distribusi temperatur yang ditunjukkan hasilnya pada gambar 2, 3, 4, dan 5 menggambarkan proses sirkulasi alamiah yang terjadi terutama untuk fluida kerja berupa gasoline dan liquid mercury. Optimasi kondisi sirkulasi alamiah pada kondisi kecelakaan reaktor dibutuhkan untuk mengatasi kegagalan pengambilan panas akibat hilangnya daya pompa. Hasil perhitungan distribusi temperatur berkaitan dengan kecepatan aliran fluida dalam sistem loop tertutup ini. Distribusi panas yang baik sehingga tidak terjadi penumpukan panas pada salah satu titik hanya bisa diperoleh jika aliran fluida dapat terjadi dengan baik secara alamiah. Semakin cepat aliran fluida maka distribusi panas akan semakin baik. Hasil perhitungan yang lain yaitu kecepatan aliran fluida dapat dilihat pada gambar 6, 7, 8, dan 9. Masing-masing secara berurutan yaitu untuk temperatur pemanas sebesar 150, 200, 250, dan 300 °C. Hasil perhitungan kecepatan aliran fluida ini sebagai klarifikasi terjadinya distribusi temperatur ke setiap daerah dalam sistem loop tertutup. Sebagaimana telah ditunjukkan hasilnya pada gambar 2, 3, 4, dan 5. Dengan hasil perhitungan kecepatan aliran maka kita dapat melihat seberapa efisien sistem ini dapat berkerja untuk mengalirkan panas dari titik pemanas ke titik-titik lain dalam sistem loop. Sebagai perbandingan hasil-hasil yang telah diperoleh maka dapat kita tinjau titik D yaitu pada posisi setelah keluar dari pendingin. Untuk temperatur pemanas sebesar 150 °C diperoleh hasil perhitungan pada titik D untuk gasoline sebesar 65 cm/s sedangkan liquid mercury sebesar 28 cm/s. Sedangkan untuk liquid helium dan liquid sodium memiliki kecepatan aliran yang kecil sekali atau bahkan bisa dikatakan tidak mengalir. Hal ini tentu yang menyebabkan sehingga panas yang diberikan pada pemanas cenderung konstan selama waktu operasi karena tidak terdistribusi ke titik lain sepanjang sistem loop. Hasil perhitungan untuk temperatur pemanas sebesar 200 °C diperoleh gasoline kecepatan alirannya sebesar 74 cm/s sedangkan liquid mercury mencapai 33 cm/s. Untuk temperatur pemanas sebesar 250 °C dan 300 °C, gasoline kecepatan alirannya mencapai 83 dan cm/s dan 90 cm/s sedangkan liquid mercury kecepatan alirannya mencapai 37 cm/s dan 41 cm/s.



Gambar 9. Kecepatan aliran fluida dengan temperatur pemanas sebesar 300 °C

Secara keseluruhan untuk keempat variasi perbedaan temperatur dapat dilihat bahwa liquid helium dan liquid sodium tidak cocok digunakan untuk sistem loop dengan spesifikasi seperti ini. Keseluruhan hasil perhitungan menunjukkan bahwa kedua fluida ini tidak dapat mengalir yang mengakibatkan panas yang diberikan pada pemanas tidak dapat terdistribusi. Hasil yang baik diperoleh untuk gasoline dan liquid mercury yang memberikan kecepatan aliran fluida lebih besar dari yang diperoleh secara eksperimen untuk bahan pendingin air.

KESIMPULAN

Perhitungan dengan menggunakan variasi perbedaan temperatur pemanas dan pendingin diatas 80 °C menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pemanas maka kecepatan aliran pendingin akan semakin besar. Hasil ini seperti ditunjukkan pada gambar 6 sampai gambar 9. Fluida dengan kecepatan aliran yang paling besar

diperoleh untuk gasoline. Untuk temperatur pemanas sebesar 150 °C diperoleh kecepatan alirannya mencapai 65 cm/s, temperatur pemanas 200 °C mencapai 74 cm/s, temperatur pemanas 250 °C mencapai 83 cm/s, dan untuk temperatur pemanas 300 °C mencapai 90 cm/s.

REFERENSI

1. Antariksawan, dkk, *Experimental and Numerical Simulation Investigation of Single-Phase Natural Circulation in a Large Scale Rectangular Loop*, *Atom Indonesia*, 45, 17-25 (2019)
2. Habibi Abdillah and Novitrian, Experiments on Natural Convection as Cooling System Mechanism on Nuclear Reactors, *Journal of Physics : Conference Series*, 1204, 012111 (2019)
3. A. Bejan dan A.D. Kraus, *Heat Transfer Handbook*. New Jersey: John Wiley and Sons (2003)
4. A.Y. Cengel dan A.J. Ghajar, *Heat and mass transfer, fundamentals and applications* 5th edition. McGraw-Hill Education, New York, 910 (2015)