

Analisis Performa Hidrodinamik Sistem Pendingin Fassip-04. Ver.2 Berdasarkan Profil Tekanan, Laju Aliran Massa, dan Bilangan Reynolds

Hydrodynamic Performance Analysis of a Passive-4. Ver.2 Cooling System through Pressure Profile, Mass Flow Rate, and Reynolds Number

Muhamad Farhan Supriadi¹, Ferdian Nugraha Syarif¹, Dwi Yuliaji¹, Roy Waluyo¹, Mulya Juarsa^{2*}.

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Ibn Khaldun Bogor, Kota Bogor, 16162 Indonesia.

²Kelompok Riset Sistem Termofluida Reaktor Nuklir, Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Gd.80, KST. B.J. Habibie, Setu, Tangerang Selatan 15314, Indonesia.

Abstrak. Penelitian ini menganalisis performa hidrodinamik sistem pendingin pasif berbasis sirkulasi alam pada fasilitas FASSIP-04 milik BRIN menggunakan nanofluida Al_2O_3 0,025 wt% sebagai fluida kerja. Evaluasi dilakukan terhadap beda tekanan (ΔP), laju aliran massa ($\dot{m}$), dan Bilangan Reynolds (Re) pada daya pemanas 880–1350 W. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan daya pemanas secara konsisten meningkatkan ΔP , $\dot{m}$, dan Re , yang memperkuat mekanisme natural circulation. Pada daya rendah, profil ΔP menunjukkan fluktuasi sinusoidal yang stabil, pada daya menengah muncul ketidakstabilan, dan pada daya tinggi grafik ΔP cenderung tunak (*steady-state*), menandakan peningkatan stabilitas aliran. Semua nilai Re berada di atas batas turbulensi ($Re > 2300$), sehingga aliran selalu berada pada rezim turbulen selama pengujian. Nanofluida menunjukkan respons hidrodinamik lebih baik dibanding air murni, terutama dalam menjaga kestabilan aliran dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Temuan ini menunjukkan bahwa nanofluida Al_2O_3 berpotensi meningkatkan kinerja sistem pendingin pasif serta menjadi dasar pengembangan desain termohidrolik yang lebih optimal pada reaktor berdaya rendah.

Kata kunci: sirkulasi alam, nanofluida, hidrodinamik, Bilangan Reynolds, pendingin pasif.

Abstract. This study analyzes the hydrodynamic performance of a passive cooling system based on natural circulation at the BRIN's FASSIP-04 facility using 0.025 wt% Al_2O_3 nanofluid as the working fluid. The evaluation was conducted on pressure difference (ΔP), mass flow rate ($\dot{m}$), and Reynolds number (Re) at heating powers of 880–1350 W. The results show that an increase in heating power consistently increases ΔP , $\dot{m}$, and Re , which strengthens the natural circulation mechanism. At low power, the ΔP profile showed stable sinusoidal fluctuations; at medium power, instability appeared; and at high power, the ΔP graph tended to be steady-state, indicating increased flow stability. All Re values were above the turbulence threshold ($Re > 2300$), so the flow was always in the turbulent regime during testing. Nanofluids exhibit better hydrodynamic response than pure water, especially in maintaining flow stability and increasing heat transfer efficiency. These findings indicate that Al_2O_3 nanofluids have the potential to improve the performance of passive cooling systems and serve as the basis for developing more optimal thermohydraulic designs in low-power reactors.

Keywords: natural circulation, nanofluid, hydrodynamics, Reynolds number, passive cooling.

* Penulis korespondensi: mulya.juarsa@brin.go.id

1. Pendahuluan

Perencanaan pembangunan PLTN kembali diperkuat karena masyarakat semakin menerima penggunaan PLTN sebagai sumber energi listrik di Indonesia. Hal ini terjadi karena Indonesia memiliki wilayah yang sangat luas, mulai dari Sabang hingga Merauke, dan membutuhkan pasokan listrik yang sangat besar[1]. Seperti pembangkit listrik lainnya, keamanan dan keselamatan PLTN memang menjadi prioritas utama, terutama bila terjadi kecelakaan yang menyebabkan bocornya bahan radioaktif ke lingkungan. Kecelakaan terbaru yang terjadi di PLTN adalah kejadian di Fukushima Daichi, Jepang tahun 2011. Kecelakaan itu terjadi karena datangnya tsunami dan air menggenang melebihi tinggi tembok penahan, sehingga air masuk ke generator cadangan. Generator tersebut akhirnya rusak, membuat sistem pendingin berhenti bekerja sepenuhnya karena pompa tidak beroperasi (sistem aktif gagal)[2].

Sistem pendingin FASSIP berbasis sirkulasi alam merupakan salah satu teknologi keselamatan penting pada fasilitas termal dan reaktor berdaya rendah, terutama karena kemampuan operasionalnya yang independen dari komponen mekanik aktif maupun suplai daya eksternal. Mekanisme ini memanfaatkan perbedaan densitas fluida akibat perubahan temperatur untuk menghasilkan aliran mandiri dalam konfigurasi loop tertutup, sehingga menyediakan jalur pendinginan yang andal pada kondisi kecelakaan kehilangan daya (*loss-of-power scenario*)[3]. Stabilitas dan kinerja sistem sirkulasi alam sangat dipengaruhi oleh karakteristik hidrodinamik di dalam pipa, khususnya profil tekanan, laju aliran massa, serta Bilangan Reynolds, yang secara kolektif menentukan rezim aliran dan kualitas perpindahan panas[4]. Untuk mendukung kajian eksperimental terkait fenomena tersebut, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) mengembangkan rangkaian fasilitas FASSIP (Fasilitas Sistem Simulasi Pasif), salah satunya FASSIP-04 (Passive-4), yang dirancang sebagai sistem pendingin pasif skala laboratorium dengan konfigurasi loop vertikal dan horizontal. Versi terbaru fasilitas ini, FASSIP-04 Ver.2, telah melalui uji komisioning untuk memastikan stabilitas operasi dan keandalan pengambilan data, terutama parameter hidrodinamik dalam kondisi pemanasan bertahap[5]. Kajian lanjut menunjukkan bahwa perubahan temperatur fluida dapat memengaruhi pola aliran, perubahan densitas, hingga nilai Bilangan Reynolds, yang berdampak langsung pada performa perpindahan panas[6].

Selain itu, riset terkait sistem FASSIP lainnya juga menegaskan bahwa rugi tekanan (*pressure drop*) dan hambatan aliran memegang peran penting dalam menentukan kelangsungan sirkulasi alam pada loop termohidrolis[7]. Meskipun berbagai studi telah meninjau perilaku termal maupun karakteristik aliran pada fasilitas FASSIP, analisis yang mengintegrasikan profil tekanan, laju aliran massa, dan Bilangan Reynolds secara simultan pada FASSIP-04 masih terbatas. Padahal ketiga parameter tersebut diperlukan untuk mengevaluasi performa hidrodinamik secara komprehensif, terutama dalam mengidentifikasi respons sistem terhadap variasi temperatur operasi serta menilai kestabilan rezim aliran. Dengan demikian, diperlukan kajian eksperimental yang lebih terpadu untuk memahami perilaku hidrodinamik Passive-4 secara menyeluruh[8]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa hidrodinamik pada sistem pendingin FASSIP-04 melalui evaluasi terukur terhadap profil tekanan, laju aliran massa, dan Bilangan Reynolds pada berbagai kondisi operasi. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain dan optimasi sistem pendingin pasif, sekaligus memperkuat pemahaman fundamental mengenai mekanisme sirkulasi alam pada fasilitas termohidrolis.

2. Metode

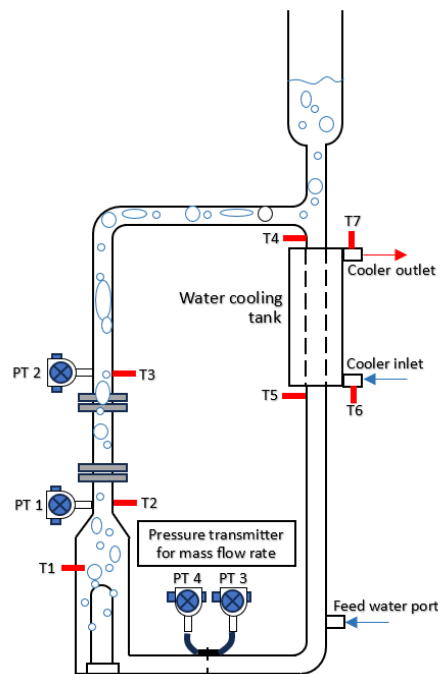
2.1 Peralatan Eksperimen

Penelitian ini dilakukan menggunakan fasilitas FASSIP-04 yang dikembangkan oleh BRIN sebagai sistem pendingin pasif skala laboratorium berbasis sirkulasi alam. Fasilitas ini terdiri dari loop pipa tertutup yang terbuat dari *stainless steel* 304 dengan diameter dalam pipa 18 mm dan diameter luar 21 mm. konfigurasi loop mencakup riser vertikal setinggi 1,5 m, *downcomer* sepanjang 1,4 m, dan dua segmen horizontal yang menghubungkan bagian pemanas (*heater*) dan pendingin (*cooler*). Total panjang loop adalah sekitar 6,2m.

Pemanasan diberikan menggunakan *immersion heater* berdaya 1000 W yang dapat dioperasikan pada beberapa tingkat daya, yaitu 250 W, 500 W, 750 W, dan 1000 W. Sistem pendingin menggunakan *heat exchanger* berpendingin air dengan laju aliran tetap sehingga temperatur pada bagian *cooler* dapat dipertahankan stabil selama pengujian.

Parameter hidrodinamik diukur menggunakan beberapa instrumen, yaitu:

1. *Pressure transducer* tipe PX309 (range 0–5 bar, akurasi $\pm 0,25\%$), dipasang pada tiga titik pengukuran tekanan: P1 (*inlet riser*), P2 (*mid-riser*), dan P3 (*downcomer*).
2. *Flowmeter ultrasonik* TUF-2000M (range 0,2–3 L/min, akurasi $\pm 1\%$) untuk mengukur laju aliran massa secara waktu nyata.
3. *Termokopel tipe-K* (range 0–400°C, akurasi $\pm 1,5^\circ\text{C}$) yang ditempatkan pada tujuh titik di sepanjang loop untuk merekam distribusi temperatur.



Gambar 1. Sistem Pendingin Fassip-4. Ver. 2

Rincian peralatan utama dapat di lihat pada Error! Reference source not found.. Spesifikasi Peralatan Eksperimen Fassip-04.

Tabel 1. Spesifikasi Peralatan Eksperimen Fassip-04

Komponen	Spesifikasi Teknis	Rentang Operasi	Akurasi
Material Pipa	<i>Stainless steel</i> 304, ID 18 mm, OD 21 mm	-	-
<i>Pressure Transducer</i>	PX309	0-5 bar	±0,25%
Flowmeter Ultrasonik	TUF-2000M	0,2-3 L/min	±1%
Termokopel tipe-K	-	0-400 °C	±1,5°C
<i>Heater</i>	<i>Immersion</i> 1000 W	250-1000W	-

2.2 Preparasi Nano Fluida

Nanofluida yang digunakan pada penelitian ini merupakan suspensi nanopartikel oksida logam dengan air sebagai fluida dasar (*base fluid*). Preparasi dilakukan menggunakan metode dua-tahap (*two-step method*) yang umum digunakan dalam penelitian termohidrolik berbasis nanofluida. Proses diawali dengan penimbangan nanopartikel sesuai fraksi volume yang telah ditentukan ($\phi = 0,05\text{--}0,2\%$) menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,1 mg. Setelah itu, nanopartikel dicampurkan ke dalam sejumlah air deionisasi dan diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit untuk memastikan penyebaran awal yang merata. Campuran kemudian diproses menggunakan ultrasonic homogenizer selama 45–60 menit untuk memecah aglomerasi dan menghasilkan dispersi yang stabil serta distribusi partikel yang seragam. Jika diperlukan, surfaktan tipe anionik dapat ditambahkan dalam jumlah kecil (0,1–0,2 wt%) untuk meningkatkan kestabilan nanofluida, terutama selama pengujian berdurasi panjang. Tahap akhir adalah uji kestabilan nanofluida yang dilakukan secara visual dan melalui pengukuran zeta potential untuk memastikan tidak terjadi sedimentasi signifikan selama proses pengujian di FASSIP-04. Nanofluida yang telah homogen kemudian digunakan sebagai fluida kerja pada loop Passive-4, menggantikan air biasa. Sifat termofisik nanofluida seperti densitas (ρ), viskositas (μ), panas jenis (cp), dan konduktivitas termal (k) dihitung menggunakan korelasi standar berdasarkan fraksi volume nanopartikel.

2.3 Laju Aliran Massa

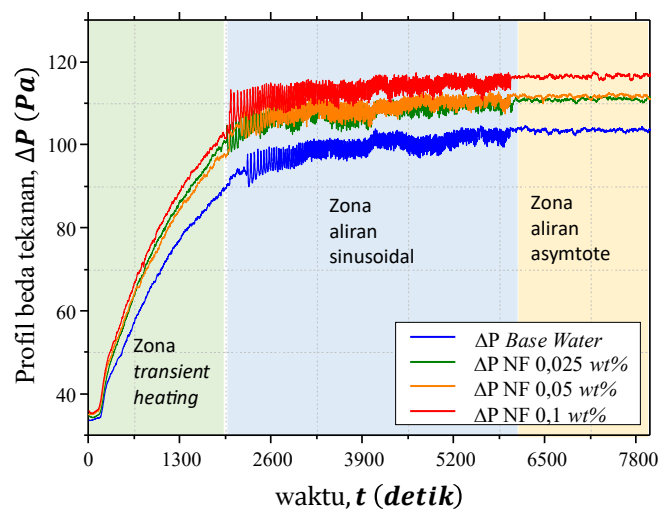
Laju aliran massa $\dot{m}$ merupakan parameter hidrodinamik utama yang menentukan kemampuan sistem dalam mengangkut energi termal dan mempengaruhi bilangan Reynolds pada loop Fassip-04. Pada penelitian ini $\dot{m}$ diperoleh dari pengukuran debit volumetrik Q menggunakan flowmeter ultrasonik TUF-2000M, kemudian dikonversi menjadi laju massa dengan memperhitungkan densitas fluida pada kondisi temperatur operasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Profil Beda Tekanan Pada Bagian Orifice

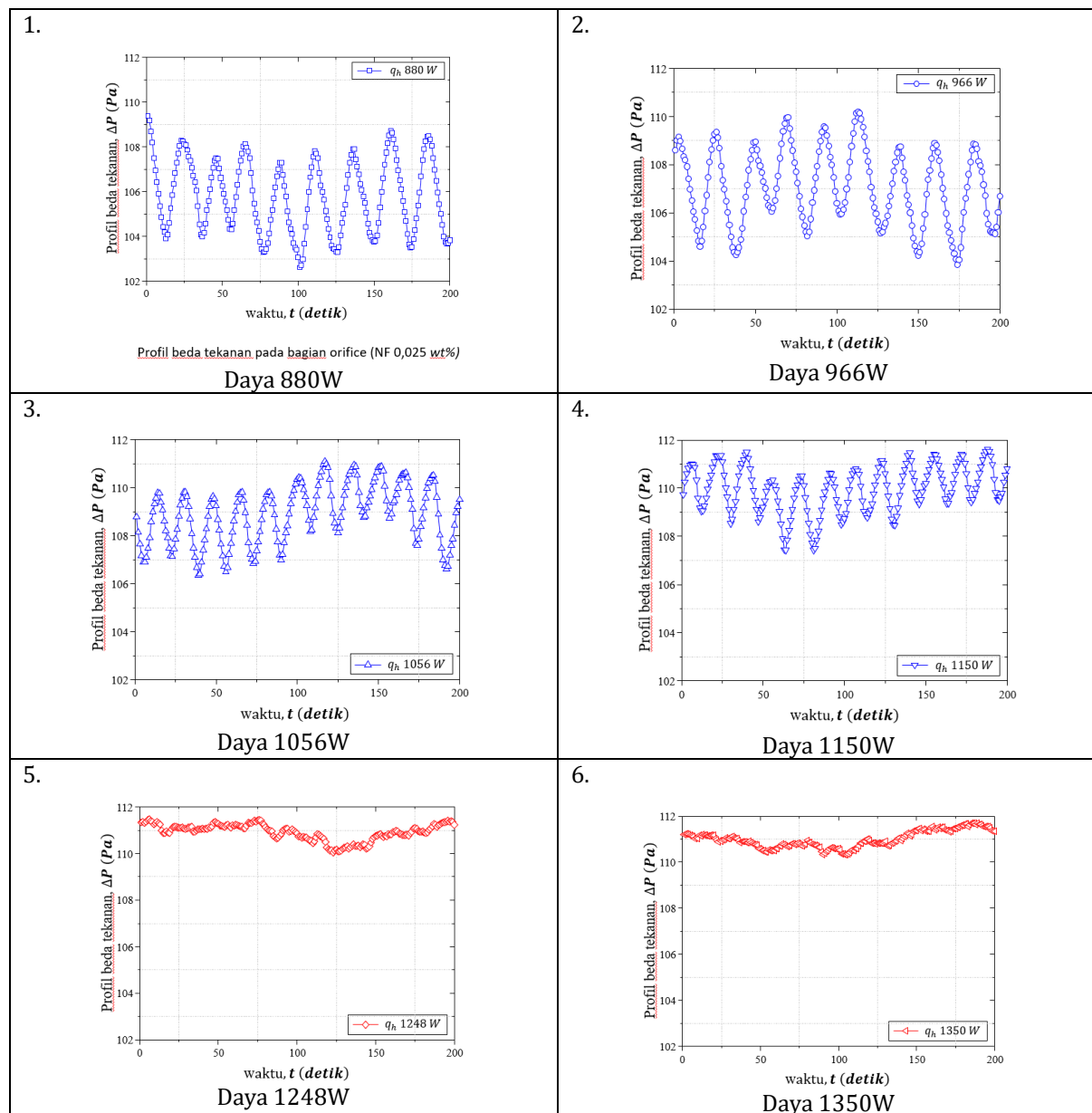
Bagian ini menganalisis respons hidrodinamik aliran satu fase pada bagian orifice sebagai fungsi dari peningkatan daya pemanas, dengan merujuk pada Gambar 1 (Profil Beda Tekanan Pada Bagian Orifice). Profil beda tekanan (ΔP) digunakan sebagai indikator langsung perubahan laju aliran massa dalam sistem sirkulasi alam, yang dipengaruhi oleh gaya apung

dan resistansi mekanik dari orifice sebagai *flow restrictor*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan daya pemanas menghasilkan gradien tekanan yang semakin tinggi akibat kenaikan kecepatan aliran serta perubahan densitas fluida karena ekspansi termal. Grafik memperlihatkan tiga zona aliran utama, yaitu zona pemanasan transien (kenaikan tajam ΔP), zona aliran sinusoidal (fluktuasi akibat interaksi termal dan hidrodinamik), serta zona asimtot/tunak (*mendekati steady-state*). Nanofluida berbasis Al_2O_3 memperlihatkan profil ΔP yang lebih tinggi dibanding air murni (*base water*) pada kondisi tunak, yang menandakan peningkatan viskositas dan perubahan sifat momentum fluida sehingga berpotensi meningkatkan laju aliran massa dalam sirkuit primer. Pada fraksi nanosolid rendah (0,025 wt%), perbedaan belum signifikan namun tren ΔP mengarah pada perilaku non-Newtonian ringan. Temuan ini menegaskan bahwa peningkatan daya pemanas tidak hanya memengaruhi kestabilan aliran, tetapi juga dapat menggeser rezim aliran menuju kondisi yang lebih turbulen, sehingga profil ΔP pada orifice menjadi elemen penting dalam memahami interaksi antara perpindahan panas dan dinamika aliran dalam sistem sirkulasi alam.



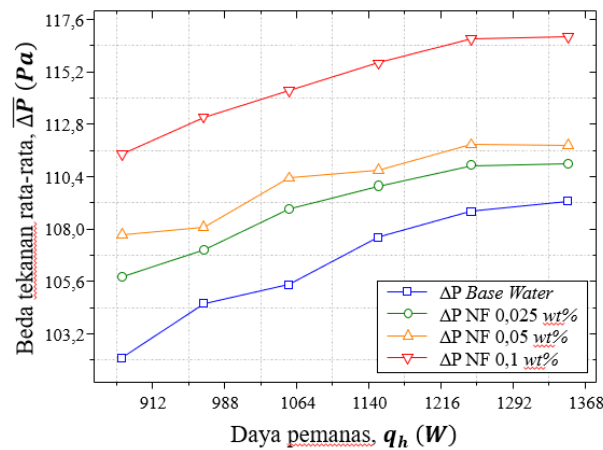
Gambar 2. Profil Beda Tekanan Pada Bagian Orifice

Analisis kestabilan aliran pada nanofluida Al_2O_3 0,025 wt% ditunjukkan melalui profil ΔP pada Gambar 1 hingga Gambar 6, yang menggambarkan respons hidrodinamik aliran terhadap variasi daya pemanas ($q_h = 880\text{--}1350\text{ W}$). Pada daya rendah (880 W dan 966 W), grafik menunjukkan fluktuasi sinusoidal yang jelas dan teratur, menunjukkan adanya ketidakstabilan periodik akibat interaksi antara gaya apung dan resistansi mekanik dari orifice sebagai *flow restrictor*. Ketika daya pemanas meningkat (1056 W dan 1150 W), amplitudo ΔP bertambah dan pola fluktuasi menjadi lebih kompleks serta disertai peningkatan kebisingan hidrodinamik, menandakan bahwa aliran mulai bertransisi menuju rezim yang lebih aktif secara termal. Pada daya pemanas tertinggi (1248 W dan 1350 W), terjadi perubahan signifikan di mana fluktuasi sinusoidal berkurang drastis dan profil ΔP cenderung mendatar, menunjukkan bahwa sistem telah memasuki zona asimtot/tunak (*steady-state*) dengan kestabilan aliran yang tinggi. Temuan ini mengonfirmasi bahwa peningkatan daya pemanas tidak hanya memperkuat gaya penggerak sirkulasi alam, tetapi juga mengatur transisi aliran dari kondisi periodik menuju rezim tunak, sekaligus menunjukkan bahwa nanofluida Al_2O_3 0,025 wt% memiliki respons termohidrolik adaptif yang penting dalam optimasi sistem sirkulasi alam.



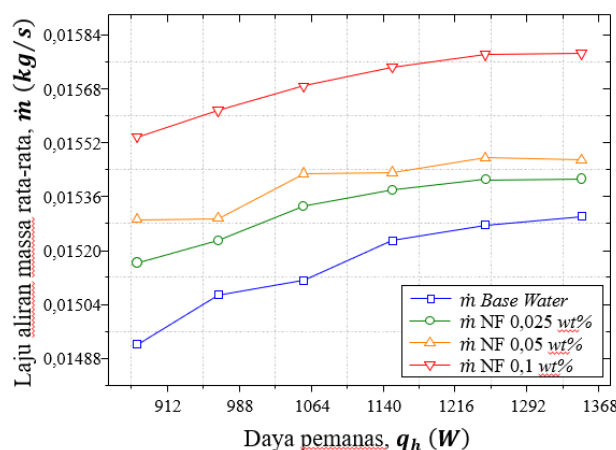
Gambar 3. Kestabilan Aliran Pada Nanofluida

Pada Gambar 4 menunjukkan bahwa kenaikan daya pemanas (q_h) secara konsisten meningkatkan beda tekanan rata-rata ($\Delta \bar{P}$) pada seluruh jenis fluida, yang mengindikasikan bertambahnya energi termal yang diserap fluida sehingga memperbesar gaya apung serta mempercepat sirkulasi aliran. Terlihat bahwa air murni (*Base Water*) selalu memiliki $\Delta \bar{P}$ terendah, sementara nanofluida memberikan respon tekanan yang lebih tinggi, dengan tren peningkatan yang jelas seiring bertambahnya fraksi massa nanopartikel. Konsentrasi NF 0,1 wt% menghasilkan $\Delta \bar{P}$ tertinggi, menunjukkan bahwa semakin banyak nanopartikel yang ditambahkan, semakin kuat dorongan sirkulasi dan resistansi aliran yang terjadi dalam sistem. Tren ini mengonfirmasi bahwa penambahan nanopartikel tidak hanya memengaruhi viskositas dan momentum aliran, tetapi juga memperkuat fenomena natural circulation melalui peningkatan *driving head*. Dengan demikian, grafik ini memperlihatkan hubungan langsung antara daya pemanas, konsentrasi nanofluida, dan respons hidrodinamik sistem, serta menegaskan bahwa nanofluida memiliki potensi lebih baik dalam meningkatkan performa termal-hidrolik dibandingkan airmurni.



Gambar 4. Nilai Beda Tekanan Rata-Rata Berdasarkan Peningkatan Daya Pemanas

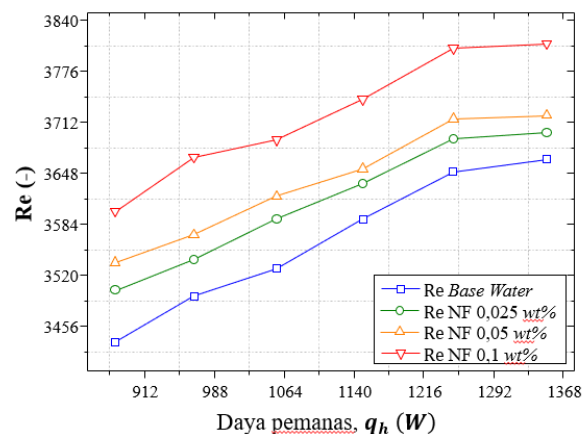
Pada Gambar 5 memperlihatkan hubungan langsung antara perbedaan tekanan dan laju aliran massa ($\dot{m}$), di mana kenaikan daya pemanas q_h secara konsisten mendorong peningkatan laju aliran massa rata-rata untuk seluruh jenis fluida. Peningkatan daya pemanas meningkatkan beda densitas akibat pemanasan, memperbesar gaya apung, dan mempercepat sirkulasi alami dalam sistem. Grafik menunjukkan bahwa nanofluida memiliki nilai $\dot{m}$ yang lebih tinggi dibandingkan air murni (Base Water) pada semua level daya, dengan nilai tertinggi diperoleh pada konsentrasi 0,1 wt%. Tren ini menguatkan hasil ΔP sebelumnya, bahwa respons hidrodinamik nanofluida lebih sensitif terhadap pemanasan. Perbaikan sifat termofisika, seperti peningkatan konduktivitas termal dan viskositas, membuat nanofluida lebih efektif dalam menyerap panas dan mentransfer momentum, sehingga menghasilkan aliran massa yang lebih besar. Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa penggunaan nanofluida, terutama pada konsentrasi tinggi, tidak hanya meningkatkan kinerja perpindahan panas, tetapi juga memperkuat mekanisme sirkulasi alam pada sistem pendinginan pasif.



Gambar 5. Laju Aliran Massa Rata-Rata

Pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara bilangan Reynolds (Re) dan peningkatan daya pemanas (q_h), yang digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik jenis aliran dalam sistem sirkulasi alam. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa Re meningkat secara konsisten seiring bertambahnya q_h , baik pada air murni maupun seluruh variasi nanofluida. Kenaikan ini berkorelasi langsung dengan peningkatan laju aliran massa yang sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 3, sehingga menghasilkan percepatan aliran fluida dan mengurangi pengaruh viskositas. Semua nilai Re yang diperoleh berada di atas batas kritis ($Re > 2300$), yang menandakan bahwa aliran berada pada rezim turbulen selama pengujian berlangsung. Tren peningkatan yang paling signifikan terlihat pada nanofluida konsentrasi tertinggi (Al_2O_3 0,1

wt%), yang menghasilkan Re terbesar di seluruh rentang q_h . Hal ini menunjukkan bahwa nanofluida tidak hanya meningkatkan efektivitas perpindahan panas melalui natural *circulation driving head*, tetapi juga mampu mempertahankan kondisi turbulen yang stabil, sehingga mendukung performa konveksi termal yang lebih optimal dibandingkan air dasar.



Gambar 6. Bilangan Reynold

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini sistem pendingin pasif FASSIP-04 berbasis sirkulasi alam terbukti mampu beroperasi secara stabil pada berbagai tingkat daya pemanas tanpa ketergantungan pada komponen mekanik aktif. Peningkatan daya pemanas 880–1350 W memberikan respons hidrodinamik yang konsisten berupa kenaikan ΔP , $\dot{m}$, dan Re , yang menunjukkan penguatan mekanisme natural *circulation*. Nanofluida Al_2O_3 0,025 wt% memberikan performa lebih baik dibanding air murni, terutama dalam meningkatkan kestabilan aliran, efisiensi perpindahan panas, dan kemampuan mempertahankan rezim turbulen ($Re > 2300$) sepanjang pengujian. Transisi aliran dari fluktuasi sinusoidal menuju kondisi tunak mengindikasikan adaptasi sistem terhadap pemanasan bertahap dan menunjukkan kemampuan nanofluida dalam mengoptimalkan sirkulasi termal. Dengan demikian, nanofluida Al_2O_3 memiliki potensi signifikan dalam pengembangan desain sistem pendingin pasif yang lebih efektif untuk aplikasi termohidrolis dan reaktor berdaya rendah.

Daftar Pustaka

- [1] M. J. Hari suparian, Dwi Yuliaji, Dady Haryanto, "Analisa Bejana Main Steam Generatir (MSG) Kapasitas 178 Liter Dan Tekanan Kerja 10 Bar," 2020.
- [2] D. H. Jodi Maulana, Ainur Rosidi, Giarno, G.Bambang.H dan M. J. Dwi Yuliaji, "Analisis Laju Perubahan Energi Internal Air Wct Selama Kondisi Tunak Berdasarkan Variasi Temperatur," 2020.
- [3] D. H. Anhar R. Antariksawan, Surip Widodo1, Mulya Juarsal and M. H. K. and N. Putra2, "Simulation Of Operational Conditions Of Fassip-02 Natural Circulation Cooling System Experimental Loop".
- [4] M. Juarsa, D. Haryanto, and J. Prasetyo, "Passive System Simulation Facility (Fassip) Loop For Natural Circulation Study," pp. 4–5, 2016.
- [5] Dwi Yuliaji, Roy Waluyo, Gatot Eka Pramono, Putut Hery Setiawan, Mulya Juarsa, "Uji Komisioning Fasilitas Sistem Simulasi Pasif 04 Versi 2 (Fassip 04 Ver.2) Untuk Studi Kemampuan Pendinginan Pasif Pada Sistem Keselamatan Reaktor Nuklir," 2023.
- [6] D. Y. Putut Hery Setiawan1, Agus S. Pamitran, S. A. Adhika E.P, Arif Adtyas B, Almira C.A, and M. J. M, Ridho Irwansyah, "Effect of water temperature variation on natural circulation flow regimes and Reynolds Number in passive cooling," 2025.
- [7] J. S. P. Susyady, Hendro Tjahyono, Sukmanto Dibyo, "Investigasi Karakteristik Termohidrolis Teras Reaktor Daya Kecil Dengan Pendinginan Sirkulasi Alam Menggunakan Relap5," 2016.
- [8] M. Rafel et al., "Karakteristik perubahan laju aliran massa di bagian pendingin berdasarkan variasi daya selama pada kondisi tunak u ntai rektangular FASSIP-04 Ver.2," pp. 217–223.