Analisis Numerik dan Eksperimental Performa *Annular Heater* dengan Variasi Jumlah *Axial Fin Insert* dan *Mass Flow Rate*

Muhammad Galih Ardama[1], Fauzun[2]
Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Sleman, Yogyakarta, 55281
e-mail: galih.ardama@mail.ugm.ac.id[1], fauzun71@ugm.ac.id[2]

ABSTRACT

The annular heater system plays a crucial role in various industrial applications, particularly in enhancing energy efficiency through effective heat control. Previous studies have shown that geometric modifications to annular heaters, such as the addition of rectangular wire coils and outserts, can significantly impact heat transfer performance. This study aims to evaluate the effect of varying the number of axial fin inserts (plain tube, 2, 3, 4, and 5 fins) operated at different mass flow rates (0.1 kg/s, 0.2 kg/s, 0.3 kg/s, and 0.4 kg/s) on heat transfer performance in annular heaters. The methodology involves numerical simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD), validated against experimental data. The research results indicate that the validation between experimental and simulation data shows a deviation of 2.9%. Increasing the mass flow rate in the annular heater enhances the Reynolds and Nusselt numbers, influencing the flow characteristics and heat transfer of the fluid in the annulus. To improve heat transfer performance, design modifications were made with four variations in the number of axial fin inserts, which significantly increased the heat transfer coefficient compared to the conventional plain tube design, albeit with an increase in pressure drop. This study demonstrates that the annular heater design with four axial fin inserts delivers the best performance, achieving a heat transfer to pressure drop ratio of 21.005 W/m².K.Pa at a mass flow rate of 0.1 kg/s. The heat transfer to pressure drop ratio remains relatively stable across various axial fin insert geometries, making this design a promising solution for enhancing the heat transfer performance of annular heater.

Keywords: *Annular heater, axial fin, Computational Fluid Dynamics (CFD), experimental, heat transfer, heat transfer coefficient, pressure drop.*

ABSTRAK

Sistem *annular heater* memegang peranan penting dalam berbagai aplikasi industri, terutama dalam meningkatkan efisiensi energi melalui kontrol panas yang efektif. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa modifikasi geometri pada *annular heater*, seperti penambahan *rectangular wire coil* dan *outsert*, dapat mempengaruhi kinerja perpindahan panas secara signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah *axial fin insert* dengan variasi *plain tube*, 2, 3, 4, dan 5 buah yang dioperasikan pada *mass flow rate* yang beragam (0,1 kg/s, 0,2 kg/s, 0,3 kg/s, dan 0,4 kg/s) terhadap kinerja perpindahan panas pada *annular heater*. Metode yang digunakan melibatkan simulasi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yang divalidasi dengan data eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa validasi antara eksperimen dan simulasi menunjukkan deviasi sebesar 2,9%. Peningkatan *mass flow rate* pada *annular heater* meningkatkan bilangan Reynolds dan Nusselt, yang memengaruhi karakteristik aliran dan perpindahan panas fluida di sisi *annulus*. Untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas, dilakukan modifikasi desain dengan empat variasi jumlah *axial fin insert*, yang dapat meningkatkan nilai koefisien perpindahan kalor lebih tinggi dibandingkan desain konvensional (*plain tube*), meskipun terjadi peningkatan *pressure drop*. Studi ini menunjukkan bahwa desain *annular heater* dengan penambahan empat buah *axial fin insert* memberikan performa terbaik, menghasilkan rasio perpindahan kalor terhadap *pressure drop* sebesar 21,005 W/m².K.Pa pada *mass flow rate* 0,1 kg/s. Rasio perpindahan kalor terhadap *pressure drop* relatif stabil untuk berbagai variasi geometri *axial fin insert*, sehingga desain ini memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan kinerja perpindahan kalor *annular heater*

Kata kunci: *Annular heater, axial fin, Computational Fluid Dynamics* (CFD), Eksperimental, perpindahan panas, koefisien perpindahan panas, *pressure drop*

PENDAHULUAN

Dalam industri modern, efisiensi energi dan optimalisasi termal menjadi elemen krusial untuk meningkatkan kinerja dan menekan biaya operasional [1]. Salah satu teknologi yang berperan penting dalam mencapai efisiensi tersebut adalah *heater system* atau sistem pemanas. *Heater*, atau pemanas, adalah perangkat yang digunakan untuk meningkatkan suhu suatu objek atau lingkungan melalui perpindahan energi panas [2]. Prinsip kerja *heater* didasarkan pada konversi energi, umumnya dari listrik atau bahan

bakar, menjadi panas yang kemudian ditransmisikan ke medium yang diinginkan, baik itu udara, air, maupun material padat. Desain *heater* sendiri disesuaikan dengan kebutuhan spesifik, mencakup berbagai jenis seperti elemen pemanas listrik, pemanas gas, inframerah, serta induksi, yang masing-masing memiliki karakteristik efisiensi energi dan kemampuan kontrol suhu.

Salah satu jenis *heater* adalah *annular heater* yang tidak hanya menjamin stabilitas suhu tetapi juga mengurangi konsumsi energi dengan mengontrol aliran panas secara efektif. Beberapa penelitian terkait *annular heater* telah dilakukan selama beberapa tahun terakhir, salah satunya penelitian mengenai pengaruh penggunaan outsert terhadap aliran dan perpindahan kalor pada *annular heat exchanger* tipe horizontal yang didekati dengan pemanfaatan *heater*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan outsert meningkatkan koefisien perpindahan panas rata-rata sebesar 89,84%, bilangan Nusselt rata-rata sebesar 76,76%, dan faktor gesekan rata-rata sebesar 55,48% [3].

Selain itu, tantangan desain dalam sistem *annular heater* terletak pada pengendalian suhu agar tidak terjadi gradien termal yang ekstrem. Penelitian menunjukkan bahwa aliran fluida dalam *annulus* harus dirancang dengan cermat untuk mencegah ketidakstabilan termal, terutama dalam kondisi operasi yang dinamis.

Dengan meningkatnya tuntutan global untuk efisiensi energi dan keberlanjutan, *annular heater* diprediksi akan memainkan peran semakin penting dalam berbagai industri. Inovasi dalam desain akan memastikan bahwa sistem ini mampu memenuhi kebutuhan industri modern dan mendukung operasional yang lebih efisien dan ramah lingkungan di masa depan [4,5].

Dalam penelitian terkait *annular heater*, dua pendekatan utama yang sering digunakan adalah eksperimen langsung dan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Metode eksperimen melibatkan pengujian fisik pada prototipe untuk memverifikasi perilaku sistem dalam kondisi operasional nyata, memberikan data empiris yang akurat tentang aliran fluida, distribusi panas, dan stabilitas termal [6]. Di sisi lain, simulasi CFD memungkinkan pemodelan aliran dan transfer panas secara komputasi, memberikan visualisasi detail tentang pola aliran fluida dan distribusi suhu di dalam *annulus*. CFD memungkinkan para peneliti mengeksplorasi berbagai skenario operasional dan melakukan optimasi desain tanpa perlu membuat prototipe fisik terlebih dahulu [7]. Selain itu, CFD dapat memodelkan kondisi ekstrem yang sulit dicapai dalam eksperimen langsung, seperti variabel suhu tinggi atau aliran turbulen kompleks [8]. Kombinasi kedua metode ini sering digunakan untuk memvalidasi hasil dan memastikan bahwa desain memenuhi spesifikasi dan tujuan operasional secara efisien.

TINJAUAN PUSTAKA

Perpindahan Kalor Konveksi

Konveksi adalah perpindahan kalor yang terjadi akibat gerakan atau perpindahan molekul dari daerah dengan temperatur tinggi ke daerah dengan temperatur rendah, disertai dengan perpindahan partikel-partikel zat perantaranya [9]. Laju perpindahan kalor secara konveksi dirumuskan oleh Hukum Pendinginan Newton (*Newton's law of cooling*) sebagai berikut:

$$Q_{conv} = hA_s(T_\infty - T_w) \quad (1)$$

Perpindahan Kalor dalam Pipa Konsentris

Fluida mengalir melalui annulus yang dibentuk oleh dua tabung konsentris, dan perpindahan panas secara konveksi dapat terjadi baik dari maupun ke permukaan tabung bagian dalam dan luar. Kondisi termal, seperti fluks panas atau suhu, dapat ditentukan secara terpisah untuk masing-masing permukaan ini [10]. Dalam kasus ini, persamaan *heat flux* dari setiap permukaan dapat dihitung menggunakan persamaan 2 dan 3.

$$q_i'' = h_i\,(T_{s,i} - T_m) \quad (2)$$

$$q_o'' = h_o\,(T_{s,o} - T_m) \quad (3)$$

Diameter hidraulik (D_h) adalah ukuran yang digunakan untuk menganalisis aliran fluida dalam pipa atau saluran yang tidak melingkar, seperti pada kasus pipa *annulus*. Diameter hidraulik digunakan sebagai pengganti diameter geometris (yang berlaku untuk pipa melingkar) agar perhitungan aliran fluida dan perpindahan panas tetap valid. Ini didefinisikan berdasarkan luas penampang aliran fluida dan keliling

basah (*wetted perimeter*). Secara matematis, diameter hidraulik dirumuskan seperti pada persamaan 4 berikut

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{4}$$

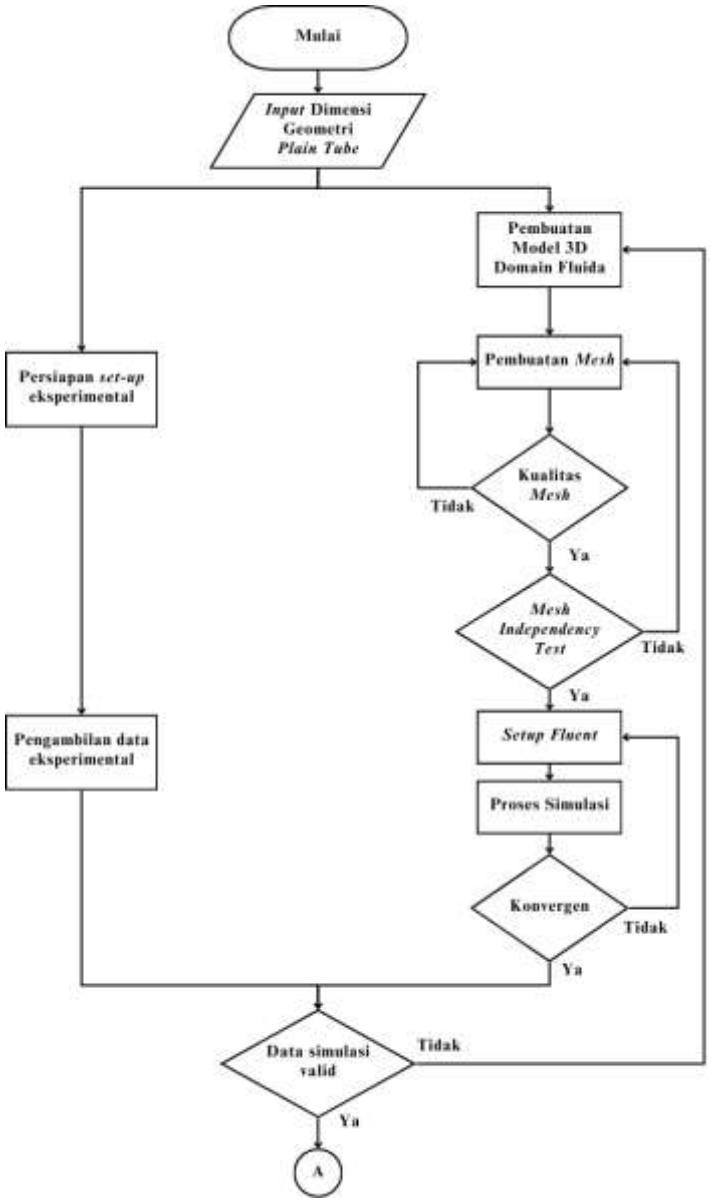
dengan A_c merupakan luas penampang aliran, sedangkan P adalah keliling basah atau bagian dari dinding saluran yang bersentuhan langsung dengan fluida. Dari persamaan 4, nilai diameter hidraulik pada kasus pipa *annulus* adalah seperti pada persamaan 5.

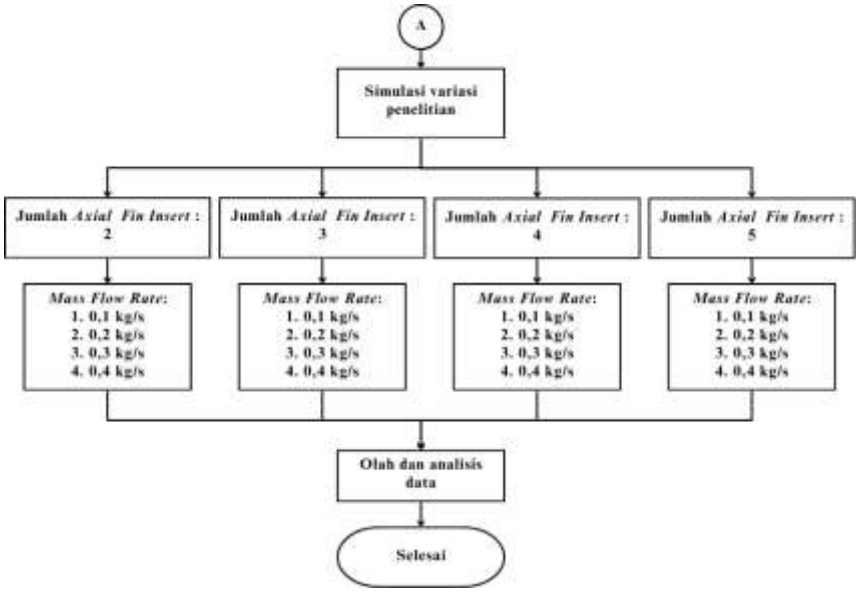
$$D_h = \frac{4\pi(D_o^2 - D_i^2)}{\pi(D_o + D_i)} = D_o - D_i \tag{5}$$

METODE

Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu eksperimental dan simulasi numerik (CFD). Diawali dengan pengambilan data eksperimen pertama untuk variasi *Plain Tube* yang kemudian dimulai pembuatan geometri hingga *set-up* simulasi yang memberikan hasil dengan deviasi maksimum sebesar 10% untuk memastikan validitas *set-up* simulasi yang digunakan. Berikut merupakan diagram alir penelitian yang digunakan dalam penelitian:

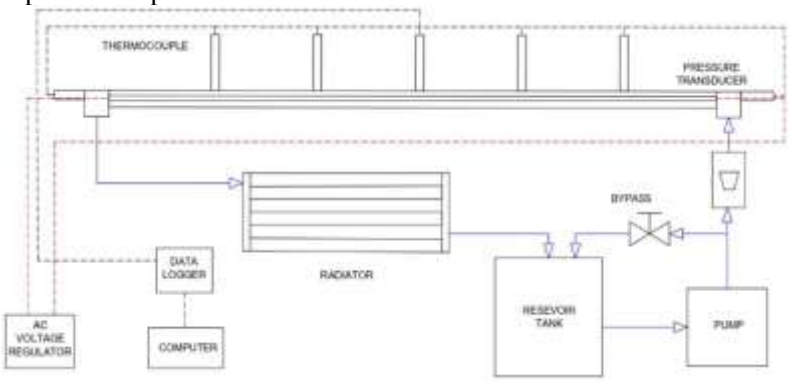




Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Fasilitas Penelitian

Perangkat uji eksperimen penggunaan *axial fin insert* terdiri dari tujuh komponen utama, yaitu *reservoir*, pompa, *heater*, sistem perpipaan, sistem sensor, *data logger*, dan radiator. *Set-up* untuk tahap eksperimental pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik eksperimental

Proses Simulasi CFD

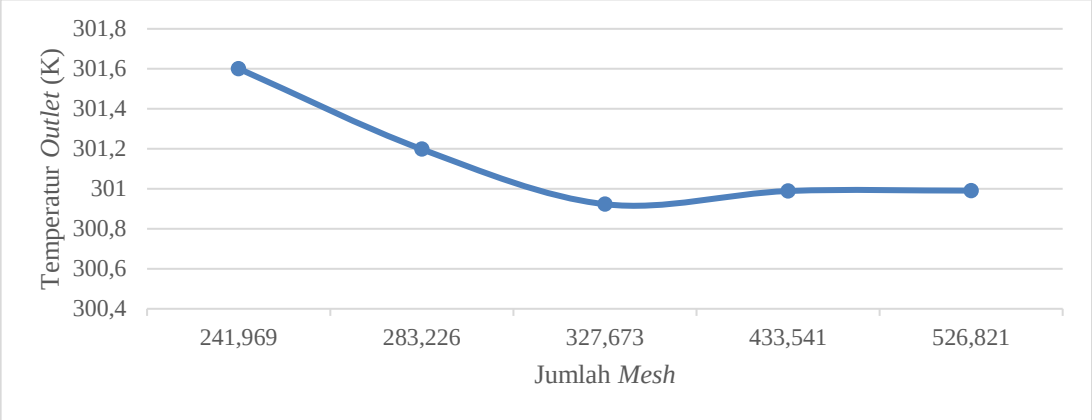
Proses simulasi CFD dilakukan melalui tiga tahapan penting, yaitu *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*, menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent dengan model tiga dimensi yang telah dibuat. Dalam simulasi ini, persamaan energi diaktifkan, sementara pada persamaan viskositas digunakan model turbulensi $Realizable\ k{-}\varepsilon$. Untuk pengaturan *Near-Wall Treatment*, dipilih fungsi *standard wall function*. Pada pengaturan *solution method*, digunakan metode *Gradient Green-Gauss Node Based* untuk gradient, PRESTO! untuk tekanan, *First Order Upwind* untuk momentum, *Turbulent Kinetic Energy*, dan *Turbulent Dissipation Rate*, serta *Second Order Upwind* untuk energi. Pengaturan ini dipilih untuk memastikan akurasi dan kestabilan simulasi dalam menganalisis perpindahan panas dan aliran fluida di dalam sistem yang diuji.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mesh Independency Test

Mesh independency test merupakan prosedur yang dilakukan untuk menilai tingkat sensitivitas antara hasil simulasi dengan jumlah elemen yang digunakan pada analisa. Hasil *mesh independency test* dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.

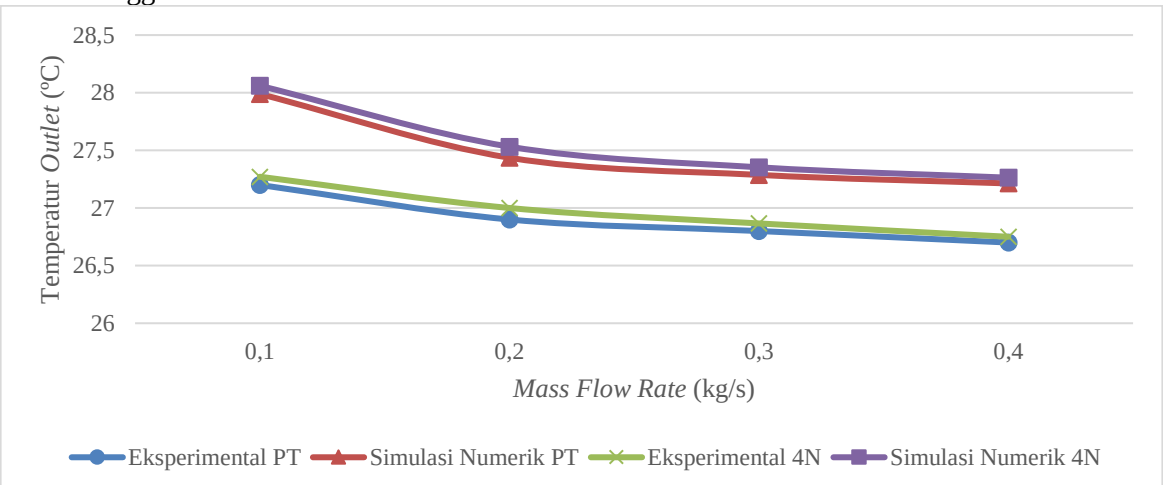
ISSN 2775-5630



Gambar 3. Grafik *Mesh Independency Test* variasi PT pada *mass flow rate* 0,1 kg/s

Validasi Hasil Simulasi dengan Eksperimental

Untuk memastikan keakuratan hasil simulasi menggunakan ANSYS Fluent, dilakukan proses validasi dengan membandingkan hasil simulasi dan hasil eksperimen. Validasi pertama dilakukan pada variasi PT (*Plain Tube*), yang berfungsi sebagai acuan awal dalam membandingkan kesesuaian data simulasi dengan data eksperimen. Pendekatan ini memberikan gambaran awal mengenai tingkat presisi simulasi sebelum melanjutkan ke tahap analisis lebih kompleks. Selain itu, validasi juga dilakukan pada variasi 4N untuk memastikan bahwa simulasi tetap berlaku pada desain dengan penambahan *axial fin insert*. Hasil validasi menunjukkan bahwa persentase selisih terbesar antara hasil simulasi dan eksperimen adalah 2,9% pada variasi *mass flow rate* 0,1 kg/s (setara dengan 1,59 GPM), yang masih berada di bawah batas standar deviasi (10%), sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi dan eksperimen valid baik untuk desain konvensional (*Plain Tube*) maupun desain dengan penambahan *axial fin insert*. Validasi ini memberikan kepercayaan bahwa model simulasi yang digunakan dapat diterapkan pada berbagai variasi geometri atau parameter lainnya tanpa mengurangi akurasi, memungkinkan simulasi digunakan secara andal untuk mengevaluasi berbagai skenario desain atau kondisi operasional dan menghasilkan hasil penelitian yang berkualitas tinggi.

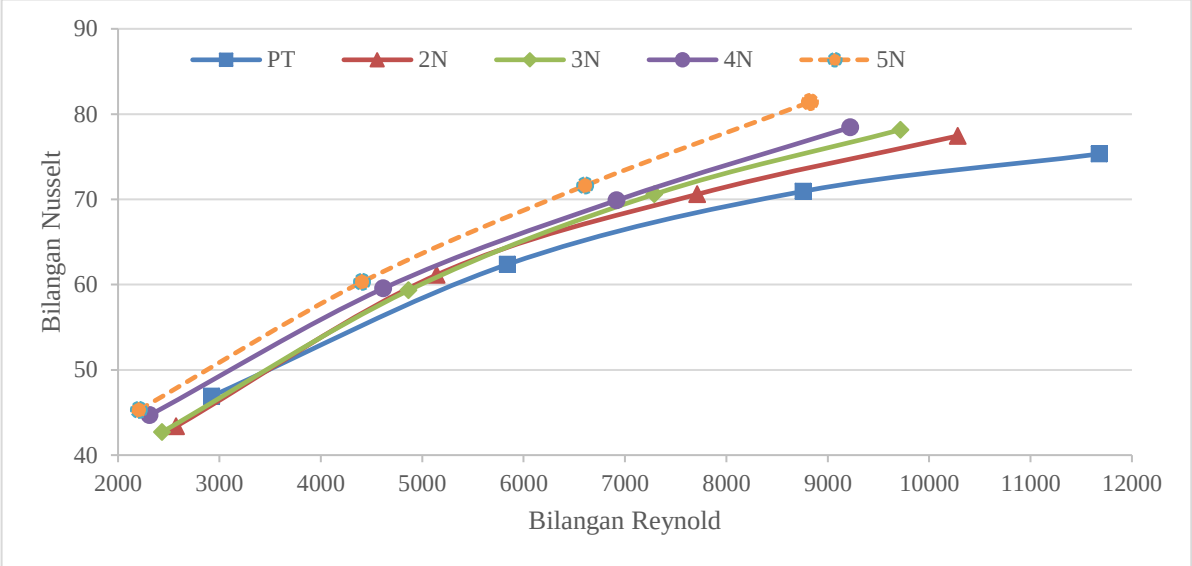


Gambar 4. Grafik validasi hasil eksperimental dengan hasil simulasi pada variasi PT dan 4N

Performa *Annular Heater*

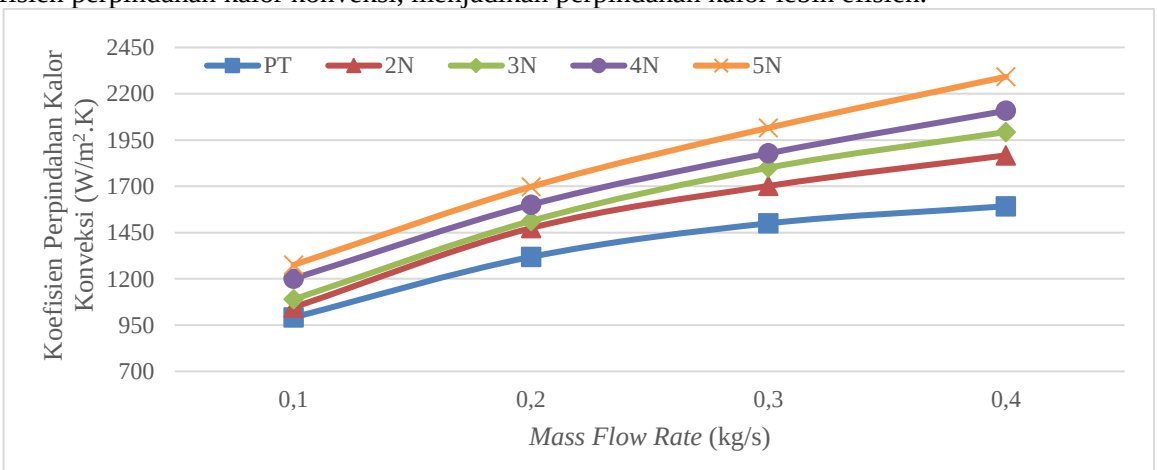
Analisis perpindahan kalor dalam aliran fluida menunjukkan hubungan antara bilangan Reynold dan bilangan Nusselt, di mana peningkatan bilangan Reynold umumnya meningkatkan bilangan Nusselt, yang mengindikasikan perpindahan panas yang lebih efisien. Grafik menunjukkan tren peningkatan bilangan Nusselt seiring bertambahnya bilangan Reynold, yang disebabkan oleh aliran turbulen yang memperbaiki pencampuran fluida dan mengurangi lapisan batas termal. Penambahan *axial fin insert* (variasi 2N hingga 5N) meningkatkan turbulensi dan pencampuran fluida di dekat dinding, sehingga menghasilkan perpindahan panas yang lebih baik. Variasi 5N menunjukkan nilai bilangan Nusselt tertinggi, menandakan performa perpindahan panas terbaik, sementara variasi PT memiliki performa terendah karena aliran yang lebih teratur dan pencampuran yang kurang optimal.

ISSN 2775-5630



Gambar 5. Grafik perbandingan antara peningkatan bilangan Reynold dengan bilangan Nusselt pada berbagai variasi

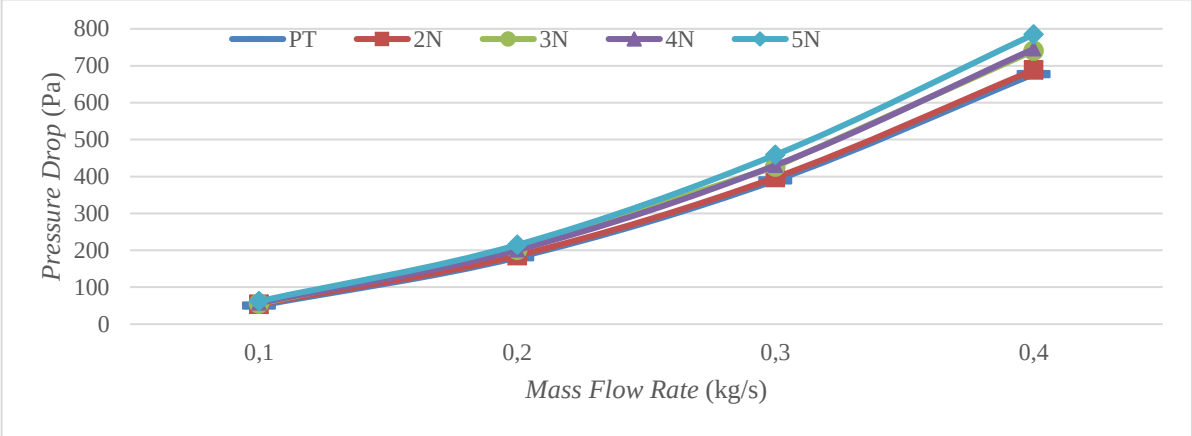
Evaluasi performa perpindahan kalor dalam aliran fluida dilakukan dengan plot antara koefisien perpindahan kalor konveksi dan *mass flow rate*, yang menunjukkan hubungan antara laju aliran massa fluida dan efektivitas perpindahan panas. Grafik menunjukkan bahwa variasi desain 5N memiliki koefisien perpindahan kalor tertinggi, diikuti oleh 4N, 3N, 2N, dan PT, mengindikasikan desain 5N memberikan performa terbaik. Hal ini disebabkan oleh penambahan *axial fin insert* yang meningkatkan turbulensi aliran dan memperbesar luas penampang efektif, yang memungkinkan kontak termal yang lebih baik antara fluida dan permukaan, sehingga mempercepat perpindahan kalor. Sebaliknya, konfigurasi PT memiliki performa terendah karena aliran yang lebih teratur dan luas penampang yang terbatas. Peningkatan *mass flow rate* juga memperbesar turbulensi, memaksimalkan manfaat penambahan luas penampang, dan meningkatkan koefisien perpindahan kalor konveksi, menjadikan perpindahan kalor lebih efisien.



Gambar 6. Grafik koefisien perpindahan kalor konveksi dalam berbagai variasi desain dan *mass flow rate*

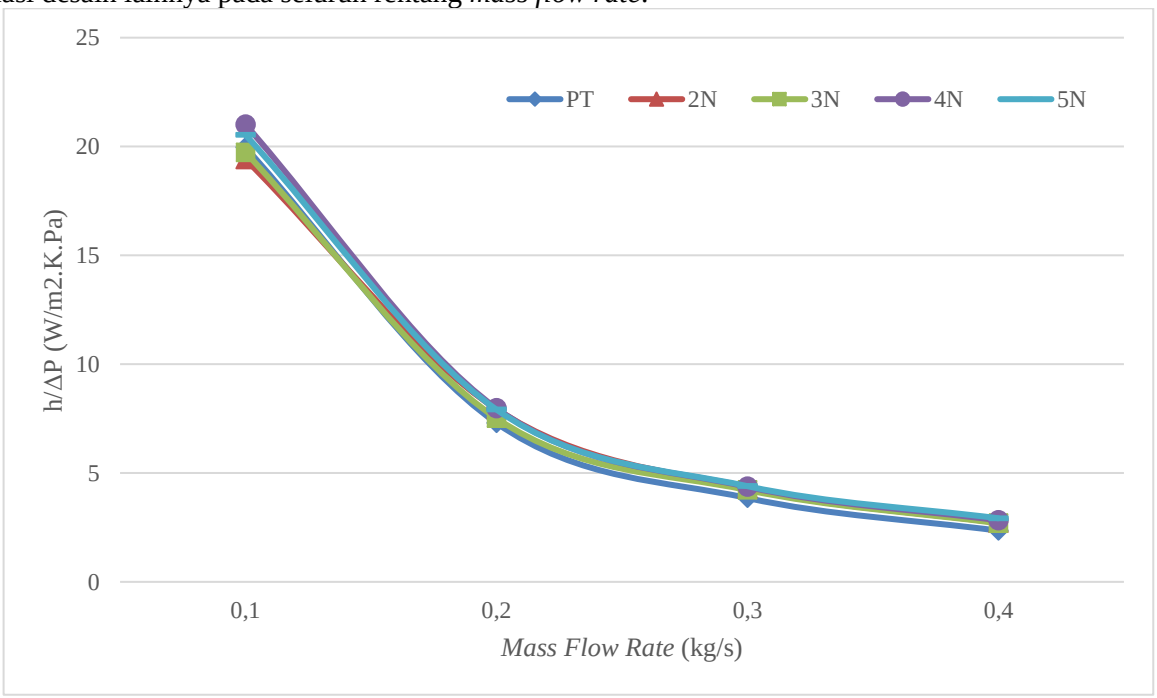
Grafik hubungan antara *pressure drop* dan *mass flow rate* menunjukkan bagaimana peningkatan laju aliran massa mempengaruhi besarnya tekanan jatuh dalam sistem *annular heater*. Secara umum, semakin tinggi *mass flow rate*, semakin besar pula nilai *pressure drop* untuk semua variasi desain. Pada *mass flow rate* rendah (0,1 kg/s), perbedaan *pressure drop* antar desain tidak signifikan, namun perbedaan ini semakin jelas pada *mass flow rate* yang lebih tinggi (0,2 kg/s hingga 0,4 kg/s). Peningkatan *pressure drop* pada desain dengan *axial fin insert* disebabkan oleh turbulensi yang lebih tinggi dan gesekan fluida yang meningkat. Desain dengan lebih banyak *axial fin insert*, seperti 5N, menunjukkan *pressure drop* tertinggi, sementara konfigurasi PT memiliki *pressure drop* terendah karena aliran lebih lancar tanpa hambatan tambahan. Meskipun penambahan *axial fin insert* meningkatkan performa perpindahan kalor, hal ini juga meningkatkan *pressure drop*, yang menjadi kerugian dalam desain sistem. Kesimpulannya, variasi desain PT memiliki *pressure drop* terendah, sedangkan 5N memiliki yang tertinggi.

ISSN 2775-5630



Gambar 6. Grafik *pressure drop* dalam berbagai variasi desain dan *mass flow rate*

Grafik hubungan antara koefisien perpindahan kalor konveksi per *pressure drop* (h/ΔP) dengan *mass flow rate* digunakan untuk menilai efisiensi perpindahan kalor dalam sistem aliran fluida, dengan mempertimbangkan kerugian akibat *pressure drop*. Grafik menunjukkan bahwa nilai h/ΔP cenderung menurun seiring peningkatan *mass flow rate*, yang mengindikasikan bahwa sistem *annular heater* lebih efisien pada laju aliran massa rendah, namun efisiensinya menurun pada laju aliran lebih tinggi. Berdasarkan data dan grafik, variasi desain 4N menunjukkan keseimbangan terbaik antara peningkatan perpindahan kalor dan pengurangan *pressure drop*, sehingga memberikan kinerja optimal dibandingkan variasi desain lainnya pada seluruh rentang *mass flow rate*.

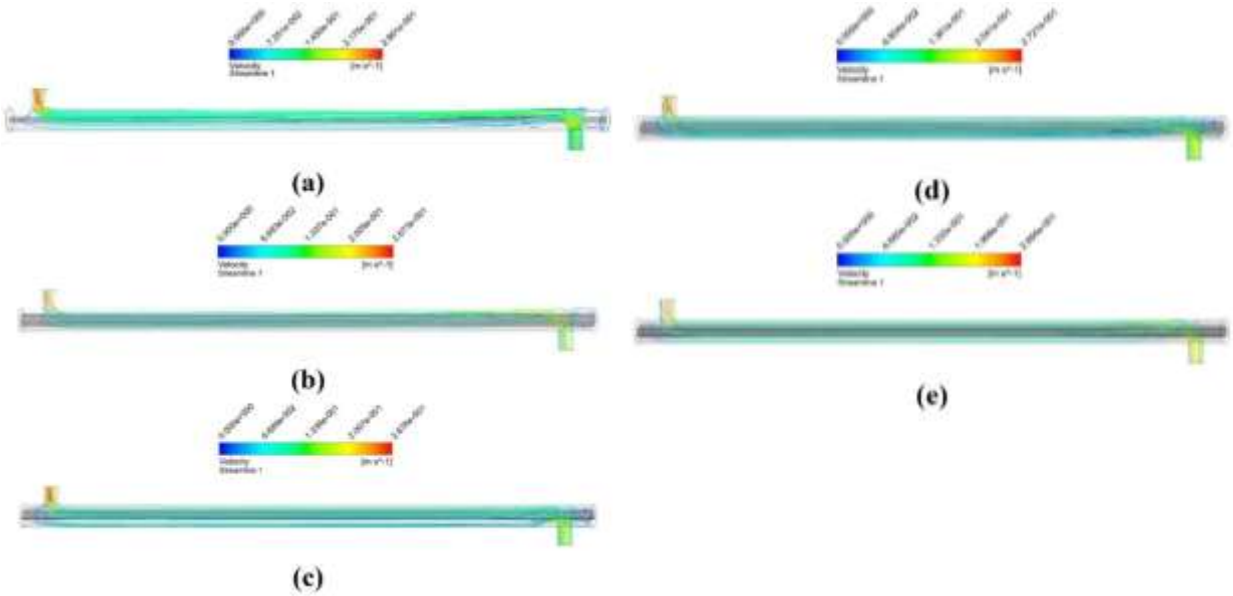


Gambar 7. Grafik nilai koefisien perpindahan kalor konveksi per *pressure drop* dalam berbagai variasi desain dan *mass flow rate*

Distribusi Kecepatan Aliran Fluida

Distribusi kecepatan aliran fluida dalam *annular heater* untuk berbagai desain ditunjukkan dalam Gambar 8, yang menggambarkan pengaruh desain terhadap pola aliran dan efisiensi perpindahan kalor. Konfigurasi PT (Gambar 8a) menunjukkan aliran stabil dengan kecepatan tinggi di sekitar *inlet* dan *outlet*, namun distribusi kalor kurang optimal. Konfigurasi 2N (Gambar 8b) menghasilkan kecepatan lebih tinggi di sekitar *outlet*, meningkatkan perpindahan kalor di bagian akhir, namun menurunkan stabilitas aliran. Konfigurasi 3N (Gambar 8c) memperlihatkan gangguan aliran yang intens, meningkatkan perpindahan kalor lokal tetapi berisiko meningkatkan tekanan. Konfigurasi 4N (Gambar 8d) memiliki distribusi kecepatan merata, mendukung perpindahan kalor yang konsisten tanpa meningkatkan *pressure drop* berlebih, menjadikannya yang paling efisien. Konfigurasi 5N (Gambar 8e) hampir optimal, namun sedikit menurun efisiensinya karena penurunan kecepatan di beberapa titik.

ISSN 2775-5630



Gambar 8. Distribusi kecepatan aliran fluida dalam *annular heater* dengan (a) PT, (b) 2N, (c) 3N, (d) 4N, dan (e) 5N pada *mass flow rate* 0,1 kg/s

KESIMPULAN

Hasil validasi menunjukkan kesesuaian analisis numerik dan eksperimen dengan selisih maksimum sebesar 2,9%, yang membuktikan bahwa simulasi valid dan dapat digunakan untuk optimalisasi perpindahan panas *annular heater*. Peningkatan *mass flow rate* pada *annular heater* meningkatkan bilangan Reynolds dan Nusselt, yang memengaruhi perpindahan panas fluida di sisi *annulus*. Modifikasi desain dengan empat variasi geometri *axial fin insert* meningkatkan koefisien perpindahan kalor dibandingkan desain konvensional (*plain tube*), meskipun menyebabkan peningkatan *pressure drop*. Studi ini menyimpulkan bahwa desain *annular heater* dengan empat *axial fin insert* memberikan performa terbaik, menghasilkan rasio perpindahan kalor terhadap *pressure drop* sebesar 21,005 W/m².K.Pa pada *mass flow rate* 0,1 kg/s, dengan rasio perpindahan kalor terhadap *pressure drop* yang relatif stabil untuk berbagai variasi geometri *axial fin insert*, menunjukkan potensi desain ini untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas *annular heater*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Adams, R. (2020). Energy efficiency in industrial heating systems. Industrial Energy Review, 25(3), 45–56.
[2] Smith, J., Brown, D., & Lewis, M. (2018). Heat transfer and energy conversion in heating systems. Thermal Science and Engineering Journal, 42(4), 321–330.
[3] Ma'a M., Samsul Kamal, & Indro Pranoto. (2024). Pengaruh Outsert terhadap Aliran dan Perpindahan Kalor pada Annular Heat Exchanger Tipe Horizontal. Jurnal Rekayasa Mesin, 15(3). DOI: 10.21776/jrm.v15i3.1512.
[4] Guo, Z., Sung, H. J., & Hyun, J. M. (1997). Pulsating flow and heat transfer in an annulus partially filled with porous media. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 31(5), 517–527.
[5] Prasad, V., & Kulacki, F. A. (1984). Natural convection in a vertical porous annulus. International Journal of Heat and Mass Transfer, 27(2), 207–219.
[6] Yudhatama, I. W. (2018). Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) Erosi Partikel Pasir pada Aliran Gas Turbulen dalam Elbow Pipa Vertikal-Horizontal. Jurnal Teknik ITS, 7(2), B136–B141.
[7] Badruddin, I. A., Zainal, Z. A., Narayana, A. P. A., & Seetharamu, K. N. (2006). Thermal non-equilibrium modeling of heat transfer through vertical annulus embedded with porous medium. International Journal of Heat and Mass Transfer, 49(25–26), 4955–4965.
[8] Nield, D. A., & Bejan, A. (2006). Convection in porous media (3rd ed.). Springer.
[9] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (7th ed.). Wiley. ISBN: 978-0470501979
[10] Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). Fundamentals of heat and mass transfer (8th ed.). John Wiley & Sons.