

RANCANG BANGUN *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* BERBAFFLE HELIKS UNTUK PENGUJIAN *HYBRID NANOFLUIDA* CUO–SIO₂

Indra Naufal Adani

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: indra.22068@mhs.unesa.ac.id

I Made Arsana

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: madearsana@unesa.ac.id

Abstrak

Shell and tube heat exchanger (STHE) merupakan alat penukar panas yang banyak digunakan di industri, namun konfigurasi *segmental baffle* konvensional masih memiliki kelemahan berupa distribusi aliran yang tidak merata dan *pressure drop* yang tinggi. Konfigurasi *helical baffle* menjadi salah satu solusi untuk memperbaiki karakteristik aliran pada sisi *shell*, namun ketersediaan alat uji skala laboratorium yang dirancang khusus untuk mengevaluasi konfigurasi tersebut masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun STHE berbaffle heliks skala laboratorium yang dapat digunakan sebagai alat pengujian *hybrid nanofluida* CuO–SiO₂. Rancang bangun dilaksanakan melalui empat tahap: perancangan geometri komponen, fabrikasi, perakitan sistem, dan pengujian *commissioning*. Alat dirancang dengan *shell stainless steel* (diameter dalam 164 mm, panjang 960 mm), *tube* tembaga 12 buah dengan susunan *triangular* 60°, dan *helical baffle* aluminium yang dapat dipertukarkan pada tiga sudut kemiringan (42°, 45°, dan 48°). Sistem dilengkapi pompa sentrifugal, elemen pemanas dengan *thermocontrol*, termokopel tipe K, dan *pressure gauge*. Hasil *commissioning* dengan fluida air menunjukkan bahwa alat mampu mempertahankan temperatur masuk sesuai target ($\pm 0,5^\circ\text{C}$), pembacaan tekanan berulang secara konsisten pada tiga replikasi, dan tidak terjadi kebocoran pada seluruh sambungan. Efektivitas termal terukur pada konfigurasi baseline sebesar 44,03%. Neraca energi antara sisi panas dan sisi dingin menunjukkan selisih sistematis ($Q_c/Q_h \approx 0,30$) yang disebabkan oleh tidak adanya isolasi termal pada *shell* serta kenaikan temperatur sisi dingin yang kecil ($2,20^\circ\text{C}$), dan keduanya menjadi catatan penyempurnaan alat pada tahap berikutnya. Dengan demikian, STHE berbaffle heliks hasil rancang bangun terbukti layak digunakan sebagai alat pengujian termohidraulik pada skala laboratorium.

Kata Kunci: *shell and tube heat exchanger, helical baffle, rancang bangun, commissioning, termohidraulik.*

Abstract

Shell and tube heat exchangers (STHE) are widely used in industry, but the conventional *segmental baffle* configuration suffers from non-uniform flow distribution and high *pressure drop*. Helical baffles improve shell-side flow characteristics, yet purpose-built laboratory-scale apparatus for evaluating them remains limited. This study designs and builds a laboratory-scale helical-baffle STHE as a test apparatus for CuO–SiO₂ hybrid nanofluid, in four stages: geometry design, fabrication, assembly, and commissioning. The apparatus has a stainless steel shell (inner diameter 164 mm, length 960 mm), 12 copper tubes in a 60° triangular layout, and interchangeable aluminium helical baffles at 42°, 45°, and 48°, together with a centrifugal pump, a thermocontrolled heating element, type-K thermocouples, and pressure gauges. Commissioning with water shows that inlet temperatures are held within $\pm 0.5^\circ\text{C}$, pressure readings repeat across three replications, no leakage occurs, and the measured thermal effectiveness of the baseline configuration is 44.03%. The hot- and cold-side energy balance shows a systematic discrepancy ($Q_c/Q_h \approx 0.30$) attributed to the absence of thermal insulation and to the small cold-side temperature rise (2.20°C); both are noted for subsequent refinement. The constructed helical-baffle STHE is therefore feasible as a laboratory-scale thermohydraulic test apparatus.

Keywords: *shell and tube heat exchanger, helical baffle, design and build, commissioning, thermohydraulic testing.*

PENDAHULUAN

Efisiensi energi merupakan salah satu isu utama dalam sektor industri, khususnya pada sistem pembangkit listrik, proses kimia, dan pendinginan mesin. *Shell and tube heat exchanger* (STHE) banyak digunakan karena kapasitasnya yang besar, keandalannya tinggi, serta fleksibilitas desainnya. Namun, konfigurasi *segmental baffle* yang umum dipakai sering menimbulkan distribusi aliran yang tidak merata dan *pressure drop* yang tinggi (Cucumo et al., 2016).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, konfigurasi *helical baffle* diperkenalkan karena mampu menurunkan

pressure drop sekaligus meningkatkan efektivitas perpindahan panas melalui pembentukan aliran spiral pada sisi *shell*. Gao et al. (2015) menunjukkan bahwa sudut heliks baffle berpengaruh signifikan terhadap kinerja termohidraulik STHE, sedangkan (Arsana, I. M., Rasyid, A. H. A., Drastiawati, N. S., & Ariyanto, 2020) membuktikan pengaruh baffle gap terhadap efektivitas STHE berbaffle heliks.

Selain faktor desain geometri, fluida kerja juga berperan penting. Fluida konvensional seperti air memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah, sehingga dikembangkan nanofluida. Hybrid nanofluida yang

menggabungkan dua jenis nanopartikel menunjukkan peningkatan konduktivitas termal yang sinergis (Kalsi et al., 2025). Kombinasi CuO–SiO₂ dinilai potensial: CuO memberikan konduktivitas termal tinggi (~18 W/m·K), sedangkan SiO₂ meningkatkan stabilitas suspensi dan menekan kenaikan viskositas (Gürbüz et al., 2021; Mezrakchi, 2024).

Meskipun potensi hybrid nanofluida dan helical baffle telah banyak dilaporkan, ketersediaan alat uji yang dirancang khusus untuk mengevaluasi kombinasi keduanya pada STHE masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun (rancang bangun) STHE dengan konfigurasi helical baffle bervariasi sudut yang dapat digunakan sebagai alat pengujian hybrid nanofluida CuO–SiO₂, serta memvalidasi kinerja alat tersebut melalui pengujian termohidraulik.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada tersedianya satu unit alat uji STHE berbaffle heliks skala laboratorium dengan *helical baffle* yang dapat dipertukarkan pada tiga sudut kemiringan (42°, 45°, dan 48°) pada geometri *shell* dan *tube* yang identik. Ketersediaan alat ini membuka peluang studi pengaruh geometri *baffle* terhadap performa perpindahan panas pada kondisi operasi yang terkontrol, sekaligus dapat dimanfaatkan sebagai sarana penelitian dan pembelajaran perpindahan panas di lingkungan laboratorium perguruan tinggi.

METODE

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (*design and build*) yang dilanjutkan dengan pengujian *commissioning*. Tahap rancang bangun menghasilkan satu unit *shell and tube heat exchanger* (STHE) berbaffle heliks skala laboratorium, yang selanjutnya diuji fungsinya menggunakan fluida air untuk memastikan alat beroperasi sesuai spesifikasi desain sebelum digunakan pada pengujian dengan *hybrid nanofluida*. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian adalah menghasilkan alat uji yang berfungsi sekaligus membuktikan kelayakannya sebagai sarana pengujian termohidraulik pada skala laboratorium.

Objek Penelitian

Objek penelitian adalah *shell and tube heat exchanger* berbaffle heliks skala laboratorium hasil rancang bangun, dengan *shell* berbahan *stainless steel*, *tube* tembaga berjumlah 12 buah, dan *helical baffle* aluminium yang dapat dipertukarkan pada tiga sudut kemiringan. Spesifikasi rinci alat disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi *Shell and Tube Heat Exchanger* Hasil Rancang Bangun

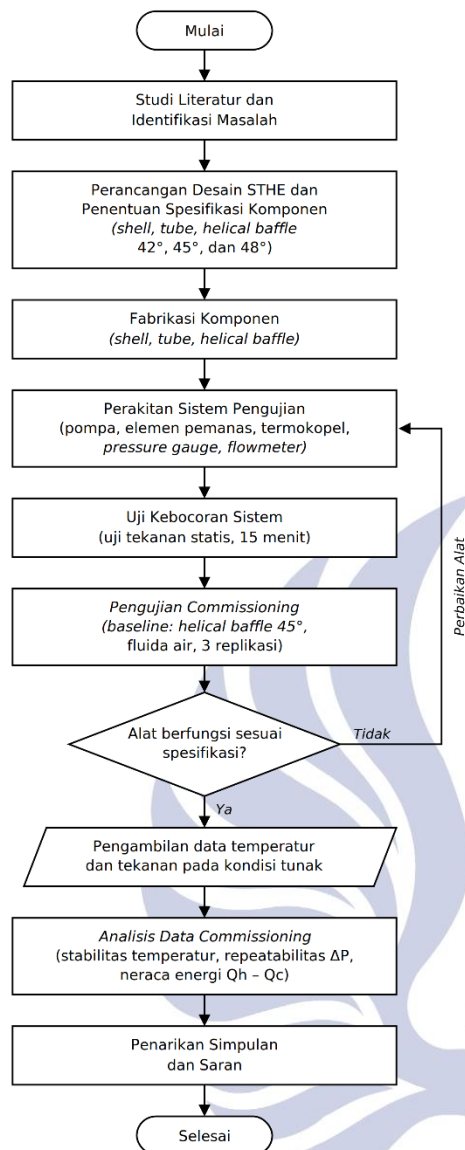
Komponen	Klasifikasi	Dimensi / Keterangan
Fluida	Aliran	Counter flow
Fluida	Fluida sisi shell	Air (fluida dingin), 30°C
Fluida	Fluida sisi tube	Air / hybrid nanofluida CuO–SiO ₂ (panas), 80°C
Shell	Material	Stainless steel (SS 304)
Shell	Diameter dalam / luar	164 mm / 170 mm
Shell	Panjang / lintasan	960 mm / 1 laluan
Tube	Material / jumlah	Tembaga / 12 buah
Tube	Diameter dalam / luar	11,9 mm / 12,7 mm
Tube	Panjang / susunan	966 mm / triangular 60°
Tube	Tube pitch	45 mm
Baffle	Material / tebal	Aluminium / 1,5 mm
Baffle	Jarak antar baffle	20 mm
Baffle	Variasi sudut heliks	42°, 45°, dan 48°

Parameter Desain dan Operasi

Rancang bangun difokuskan pada tiga kelompok parameter berikut. *Parameter geometri* meliputi dimensi *shell* dan *tube* yang tetap, serta sudut kemiringan *helical baffle* yang dirancang dapat dipertukarkan pada tiga nilai (42°, 45°, dan 48°) untuk mendukung studi geometri *baffle* pada penelitian lanjutan. *Parameter operasi nominal* meliputi temperatur masuk fluida panas 80°C, temperatur masuk fluida dingin 30°C, debit fluida panas 2 L/menit, dan debit fluida dingin 6 L/menit. *Parameter pengukuran* meliputi temperatur pada empat titik (masuk dan keluar sisi *tube* serta sisi *shell*) menggunakan termokopel tipe K, tekanan pada empat titik menggunakan *pressure gauge*, dan debit fluida menggunakan *flowmeter*.

Diagram Alir Penelitian

Diagram alir keseluruhan program penelitian, mulai dari studi literatur, perancangan dan fabrikasi alat, perakitan sistem, pengujian *commissioning*, hingga analisis data dan penarikan kesimpulan, ditunjukkan pada Gambar 1. Diagram tersebut juga mencantumkan tahap pengujian dengan variasi konsentrasi *hybrid nanofluida* sebagai bagian dari rangkaian penelitian secara keseluruhan; adapun cakupan naskah ini dibatasi pada tahap rancang bangun dan pengujian *commissioning*, sedangkan pengaruh konsentrasi terhadap performa termohidraulik dilaporkan secara terpisah.



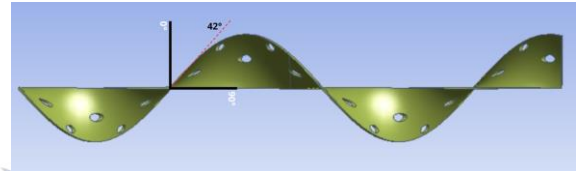
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahap Rancang Bangun dan Fabrikasi

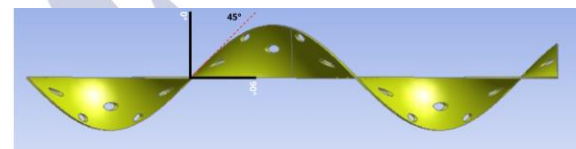
Proses rancang bangun dilaksanakan dalam empat tahap utama, yaitu: (1) perancangan desain dan penentuan spesifikasi komponen; (2) fabrikasi komponen *shell*, *tube*, dan *helical baffle*; (3) perakitan sistem pengujian; serta (4) pengujian dan validasi kinerja alat. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Perpindahan Panas (A8.02.01), Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya.

Perancangan diawali dengan penentuan geometri *shell*, *tube*, dan *helical baffle*. Diameter dalam *shell* ditetapkan 164 mm agar mampu mengakomodasi 12 *tube* tembaga dengan susunan *triangular* 60° dan *tube pitch* 45 mm, sedangkan panjang *shell* 960 mm dipilih untuk menyediakan panjang efektif perpindahan panas yang cukup pada laju aliran nominal. *Helical baffle* dirancang dengan tiga variasi sudut heliks, yaitu 42°, 45°, dan 48°,

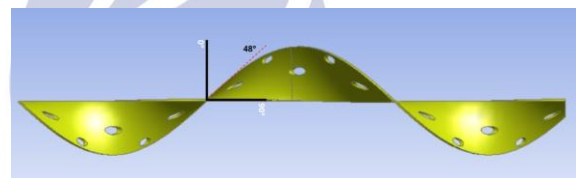
agar pengaruh intensitas aliran spiral dapat dikaji pada penelitian lanjutan tanpa mengubah geometri komponen lain. Jarak antar *baffle* ditetapkan 20 mm mengikuti rekomendasi perancangan STHE berbaffle heliks skala laboratorium (Gao et al., 2015). Spesifikasi lengkap komponen hasil perancangan disajikan pada Tabel 1. Sketsa desain ketiga variasi sudut helical baffle hasil perancangan ditunjukkan pada Gambar 2 sampai Gambar 4.



Gambar 2. Sketsa Desain Baffle dengan sudut 42°

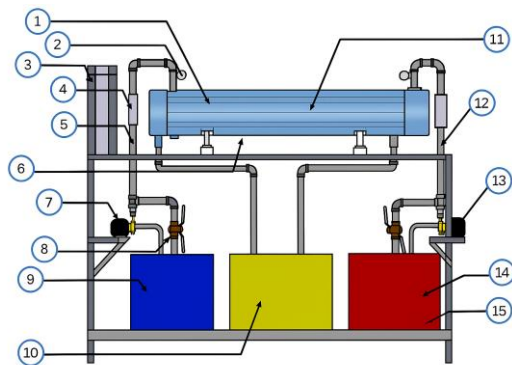


Gambar 3. Sketsa Desain Baffle dengan sudut 45°



Gambar 4. Sketsa Desain Baffle dengan sudut 48°

Setelah desain ditetapkan, komponen difabrikasi sesuai spesifikasi pada Tabel 1. *Shell* dibuat dari *stainless steel* SS 304 yang dipilih karena ketahanan korosinya baik terhadap fluida kerja berbasis air. *Tube* dibuat dari tembaga dengan konduktivitas termal tinggi (~385 W/m·K) untuk memaksimalkan laju perpindahan panas antar fluida, sedangkan *helical baffle* dibuat dari aluminium tebal 1,5 mm karena ringan, mudah dibentuk mengikuti profil heliks, dan mampu mempertahankan geometri pada suhu operasi eksperimen. Komponen kemudian dirakit menjadi satu kesatuan sistem pengujian yang dilengkapi pompa sentrifugal (Shimizu), elemen pemanas dengan *thermocontrol*, tangki fluida, katup pengatur, *flowmeter*, *pressure gauge*, dan termokopel tipe K yang terkalibrasi pada sisi masuk dan keluar. Skema sistem hasil rancang bangun ditunjukkan pada Gambar 5. Seluruh sambungan diuji kebocoran menggunakan uji tekanan statis (menutup katup keluaran dan mengamati penurunan tekanan selama 15 menit) sebelum sistem dioperasikan untuk *commissioning*.



Gambar 5. Skema *shell and tube heat exchanger* berbaffle heliks hasil rancang bangun

Prosedur Pengujian Commissioning

Pengujian *commissioning* dilakukan untuk memverifikasi bahwa alat mampu beroperasi sesuai spesifikasi desain sebelum digunakan pada pengujian dengan *hybrid nanofluida*. Fluida kerja yang digunakan pada tahap ini adalah air pada kedua sisi (sisi *tube* sebagai fluida panas dan sisi *shell* sebagai fluida dingin) sehingga verifikasi kinerja mekanis dan termal alat tidak dipengaruhi oleh karakteristik fluida kerja lain. Alat dioperasikan pada satu konfigurasi *baseline*, yaitu *helical baffle* dengan sudut 45° yang mewakili konfigurasi tengah dari tiga sudut yang tersedia. Temperatur masuk fluida panas dijaga 80°C melalui *thermocontrol* dan temperatur masuk fluida dingin dijaga 30°C , sedangkan debit diatur pada nilai nominal melalui katup pengatur. Pengujian diulang sebanyak tiga kali untuk mengevaluasi repeatabilitas pembacaan instrumen. Data temperatur dan tekanan pada sisi masuk dan keluar dicatat setelah tercapai kondisi tunak, yaitu ketika perubahan temperatur pada seluruh titik pengukuran kurang dari $\pm 0,5^\circ\text{C}$ dalam interval 1 menit.

Analisis Data

Data hasil *commissioning* dianalisis untuk mengevaluasi tiga aspek kelayakan alat. Laju perpindahan panas pada sisi panas dan sisi dingin dihitung menggunakan Persamaan 1. Laju perpindahan panas aktual ditetapkan berdasarkan sisi fluida panas, yaitu $Q_{\text{aktual}} = Q_h$ sesuai Persamaan 2, karena sisi panas merupakan sisi dengan kapasitas kalor minimum (C_{min}) pada seluruh kondisi pengujian sekaligus sisi yang membawa fluida kerja yang diteliti. Efektivitas termal dihitung dengan Persamaan 3 sebagai indikator fungsional alat, dan *pressure drop* total dihitung dengan Persamaan 4 untuk mengevaluasi repeatabilitas pembacaan *pressure gauge*.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$Q_{\text{aktual}} = Q_h \quad (2)$$

$$\varepsilon = (Q_{\text{aktual}} / Q_{\text{maks}}) \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta P = \Delta P_{\text{tube}} + \Delta P_{\text{shell}} \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Rancang Bangun

Rancang bangun menghasilkan sebuah unit *shell and tube heat exchanger* berbaffle heliks skala laboratorium yang mampu beroperasi pada kondisi operasi nominal. Alat terdiri atas *shell* stainless steel dengan *flange* pada kedua ujung yang memungkinkan pembongkaran untuk pertukaran konfigurasi *baffle*, 12 *tube* tembaga yang tertata pada susunan *triangular* 60° , serta *helical baffle* aluminium dengan tiga sudut kemiringan yang dapat dipertukarkan. Sistem sirkulasi lengkap dengan pompa, tangki, elemen pemanas, katup pengatur, *flowmeter*, *pressure gauge*, dan termokopel telah terpasang dan berfungsi. Foto alat hasil rancang bangun dan detail konstruksi *helical baffle* pada tiga sudut ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Alat *shell and tube heat exchanger* berbaffle heliks hasil rancang bangun



Gambar 7. Detail konstruksi *helical baffle* dengan variasi sudut 42° , 45° , dan 48°

Hasil Pengujian Commissioning

Pengujian *commissioning* dilakukan pada konfigurasi *baseline* (*helical baffle* 45°) menggunakan air pada kedua sisi. Tiga aspek kelayakan alat dievaluasi, yaitu (1) stabilitas temperatur pada kondisi tunak, (2) repeatabilitas pembacaan tekanan, dan (3) kekedapan sistem terhadap kebocoran.

Setelah alat dioperasikan selama ± 3 menit, kondisi tunak tercapai dan pembacaan temperatur pada seluruh titik pengukuran memenuhi kriteria perubahan kurang dari $\pm 0,5^\circ\text{C}$ dalam interval 1 menit. Temperatur masuk fluida panas dan fluida dingin masing-masing terjaga pada rentang $80,2\text{--}80,5^\circ\text{C}$ dan $30,3^\circ\text{C}$ selama durasi perekaman data (5 menit), menunjukkan bahwa sistem *thermocontrol* dan pertukaran panas ke lingkungan mampu mempertahankan kondisi operasi nominal. Selisih temperatur antara sisi masuk dan sisi keluar terbaca konsisten pada tiga replikasi, yaitu rata-rata $22,03^\circ\text{C}$ pada sisi panas ($80,33^\circ\text{C}$ menjadi $58,30^\circ\text{C}$) dan $2,20^\circ\text{C}$ pada sisi dingin ($30,30^\circ\text{C}$ menjadi $32,50^\circ\text{C}$), menandakan bahwa termokopel dan sistem akuisisi data berfungsi dengan baik. Dengan nilai tersebut diperoleh $Q_{\text{aktual}} = Q_h = 3069,51\text{ W}$ dan $Q_{\text{maks}} = 6970,85\text{ W}$, sehingga efektivitas termal alat pada konfigurasi baseline yang dihitung dengan Persamaan 3 adalah 44,03%.

Pembacaan *pressure gauge* pada sisi masuk dan keluar *tube* maupun *shell* diambil pada tiga replikasi. Nilai *pressure drop* total ($\Delta P = \Delta P_{\text{tube}} + \Delta P_{\text{shell}}$) yang diperoleh adalah 28 Pa dan berulang pada ketiga replikasi. Perlu ditegaskan bahwa nilai tersebut jauh lebih kecil daripada ketidakpastian absolut alat ukur: *pressure gauge* yang digunakan memiliki rentang 0–15 psi dengan akurasi $\pm 2,5\%$ *full scale*, sehingga angka 28 Pa tidak dapat diperlakukan sebagai nilai absolut yang presisi. Yang dapat dipertanggungjawabkan dari pengujian ini adalah keterulangan pembacaan pada ketiga replikasi, yang menunjukkan bahwa kondisi hidraulik sistem tidak berubah selama pengujian, sehingga nilai tersebut layak dipakai sebagai indikator komparatif antarvariasi tetapi tidak sebagai nilai mutlak. Untuk penelitian lanjutan dengan rentang *pressure drop* yang kecil disarankan menggunakan *pressure transducer* diferensial dengan resolusi yang lebih sesuai.

Uji kebocoran menggunakan uji tekanan statis selama 15 menit menunjukkan tidak ada penurunan tekanan yang teramati pada sisi *shell* maupun sisi *tube*, sehingga seluruh sambungan dinyatakan kedap. Selama seluruh sesi *commissioning*, tidak teramati kebocoran fluida pada sambungan *flange*, sambungan pipa, maupun pada *seal* pompa.

Aspek yang perlu dicatat dari *commissioning* adalah adanya ketidaksesuaian neraca energi antara sisi panas dan sisi dingin. Laju perpindahan panas sisi panas (Q_h) yang dihitung dari Persamaan 1 secara konsisten lebih besar dari laju perpindahan panas sisi dingin (Q_c) pada tiga replikasi *baseline*, dengan rasio Q_c/Q_h rata-rata sekitar 0,30 ($Q_h = 3069,51\text{ W}$ dan $Q_c = 919,60\text{ W}$). Selisih yang konsisten dan bukan bersifat acak mengindikasikan penyebab sistematis, bukan kesalahan pembacaan sesaat. Dua kemungkinan penyebab teridentifikasi. *Pertama*, alat uji tidak dilengkapi

isolasi termal pada permukaan luar *shell* dan perpipaan sisi panas, sehingga sebagian kalor terlepas ke lingkungan sebelum fluida panas mencapai sisi keluar dan sebelum energi tersebut terbaca sebagai kenaikan temperatur sisi dingin. *Kedua*, kenaikan temperatur sisi dingin relatif kecil ($\sim 2^\circ\text{C}$) dibandingkan penurunan temperatur sisi panas ($\sim 22^\circ\text{C}$), sehingga bias kalibrasi tetap pada termokopel maupun pencampuran fluida yang tidak sempurna pada titik pengukuran suhu keluar sisi *shell* akan memengaruhi Q_c secara proporsional lebih besar dibandingkan Q_h . Kedua hal ini menjadi catatan penyempurnaan alat pada tahap berikutnya.

Secara keseluruhan, hasil *commissioning* menunjukkan bahwa alat hasil rancang bangun mampu beroperasi pada kondisi operasi nominal secara stabil, memberikan pembacaan instrumen yang berulang, dan bebas dari kebocoran. Alat dinyatakan layak digunakan sebagai sarana pengujian termohidraulik pada skala laboratorium, dengan catatan penyempurnaan pada aspek isolasi termal dan resolusi pembacaan tekanan untuk pengujian lanjutan.

Simpulan

Rancang bangun yang dilakukan menghasilkan satu unit *shell and tube heat exchanger* berbaffle heliks skala laboratorium dengan *helical baffle* yang dapat dipertukarkan pada tiga sudut kemiringan, yaitu 42° , 45° , dan 48° , dilengkapi sistem sirkulasi, elemen pemanas dengan *thermocontrol*, termokopel tipe K, dan *pressure gauge*, yang seluruhnya berfungsi sebagai satu kesatuan sistem uji. Pengujian *commissioning* pada konfigurasi *baseline* membuktikan bahwa alat mampu beroperasi secara stabil pada kondisi tunak dengan temperatur masuk kedua fluida terjaga dalam batas $\pm 0,5^\circ\text{C}$, pembacaan tekanan yang berulang secara konsisten pada tiga replikasi, serta seluruh sambungan bebas kebocoran setelah uji tekanan statis selama lima belas menit, dengan efektivitas termal terukur sebesar 44,03%. Selama *commissioning* teridentifikasi ketidaksesuaian neraca energi yang bersifat sistematis antara sisi panas dan sisi dingin, yang diduga disebabkan oleh tidak adanya isolasi termal pada *shell* dan perpipaan sisi panas serta oleh kenaikan temperatur sisi dingin yang kecil sehingga bias kalibrasi termokopel dan pencampuran fluida yang tidak sempurna berpengaruh secara proporsional lebih besar pada sisi tersebut, dan kedua hal tersebut menjadi catatan penyempurnaan alat pada tahap berikutnya. Dengan demikian alat hasil rancang bangun terbukti layak digunakan sebagai sarana pengujian termohidraulik pada skala laboratorium dan dapat dimanfaatkan untuk penelitian lanjutan dengan berbagai fluida kerja dan konfigurasi *baffle*, termasuk pengujian *hybrid nanofluida* CuO–SiO₂, dengan catatan penyempurnaan pada aspek isolasi termal dan resolusi pengukuran tekanan.

Saran

Dari rancang bangun dan pengujian *commissioning* yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Menambahkan isolasi termal pada *shell* dan perpipaan yang terpapar udara sekitar untuk mengurangi kehilangan kalor ke lingkungan, sehingga neraca energi $q_h - q_c$ dapat lebih tertutup dan efektivitas termal terukur lebih akurat.
2. Menggunakan pompa dengan kapasitas debit yang lebih tinggi agar debit fluida panas dapat dinaikkan di atas nilai nominal 2 L/menit, sehingga rezim aliran sisi tube yang pada penelitian ini masih laminar ($Re \approx 898$) dapat mencapai kondisi transisi atau turbulen dan koefisien perpindahan panas serta efektivitas termal berpotensi meningkat.
3. Melengkapi alat dengan sensor tekanan beresolusi lebih tinggi (misalnya manometer diferensial atau *pressure transducer*) untuk meningkatkan ketelitian pengukuran *pressure drop*.
4. Melakukan pengujian pada variasi laju aliran yang lebih beragam untuk mengetahui pengaruh bilangan Reynolds terhadap karakteristik perpindahan panas dan *pressure drop*.
5. Mengkaji variasi rasio massa dan jenis nanopartikel *hybrid* lain untuk memperoleh kombinasi fluida kerja dengan performa termohidraulik yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsana, I. M., Rasyid, A. H. A., Drastiawati, N. S., & Ariyanto, S. R. (2020). *The Influence of Baffle Gap to The Effectiveness of Shell and Tube Heat Exchanger with Helical Baffle The Influence of Baffle Gap to The Effectiveness of Shell and Tube Heat Exchanger with Helical Baffle*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042091>
- Cucumo, M., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., Mele, M., Galloro, A., Schimio, R., & Le Pera, G. (2016). Thermohydraulic analysis of a shell-And-Tube "helical baffles" heat exchanger. *International Journal of Heat and Technology*, 34(Special Issue 2), S255–S262. <https://doi.org/10.18280/ijht.34S210>
- Gao, B., Bi, Q., Nie, Z., & Wu, J. (2015). Experimental study of effects of baffle helix angle on shell-side performance of shell-and-tube heat exchangers with discontinuous helical baffles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.04.011>
- Gürbüz, E. Y., Variyenli, H. İ., Sözen, A., Khanlari, A., & Ökten, M. (2021). Experimental and numerical analysis on using CuO-Al₂O₃/water hybrid nanofluid in a U-type tubular heat exchanger. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 31(1), 519–540. <https://doi.org/10.1108/HFF-04-2020-0195>
- Kalsi, S., Kumar, S., Kumar, A., Alam, T., Sharma, A., & Yadav, A. S. (2025). A review on hybrid nanofluids for heat transfer: advancements, synthesis, challenges and applications. *Discover Applied Sciences*, 7(7). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07141-8>
- Mezrakchi, R. Al. (2024). Investigation of various hybrid nanofluids to enhance the performance of a shell and tube heat exchanger. *AIMS Energy*, 12(1), 235–255. <https://doi.org/10.3934/energy.2024011>