

ANALISIS OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT PADA SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER DENGAN VARIASI SUDUT HELICAL BAFFLE MENGGUNAKAN SIMULASI CFD

Arkan Chrestella Hans Chilwin

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: arkan.2055@mhs.unesa.ac.id

I Made Arsana

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: madearsana@unesa.ac.id

Abstrak

Kinerja *shell-and-tube heat exchanger* (STHE) merupakan salah satu jenis penukar panas yang banyak diterapkan pada berbagai Kinerja *shell-and-tube heat exchanger* (STHE) dipengaruhi oleh konfigurasi geometri dan kondisi aliran yang menentukan efektivitas perpindahan panas. Salah satu parameter yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kinerja termal penukar panas adalah *Overall Heat Transfer Coefficient* (U). Evaluasi numerik dilakukan untuk menghindari perubahan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* akibat kombinasi variasi sudut *helical baffle* dan bilangan Reynolds melalui simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi numerik dilakukan dengan ANSYS Fluent 2023 R1 pada tiga variasi sudut *helical baffle* (19° , 42° , dan 45°) serta tiga variasi bilangan Reynolds (15.000, 30.000, dan 45.000). Keandalan model CFD terlebih dahulu diverifikasi melalui perbandingan dengan data eksperimen. Nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* ditentukan menggunakan laju perpindahan panas, *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), dan luas perpindahan panas efektif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan bilangan Reynolds meningkatkan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* pada seluruh konfigurasi yang dianalisis. Konfigurasi *helical baffle* 19° menghasilkan performa termal terbaik dengan nilai U sebesar $555,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ pada Reynolds 45.000, sedangkan nilai terendah sebesar $439,67 \text{ W/m}^2\text{K}$ diperoleh pada konfigurasi 45° dengan Reynolds 15.000. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi sudut *helical baffle* yang sesuai dan bilangan Reynolds yang lebih tinggi mampu meningkatkan kemampuan perpindahan panas pada *shell-and-tube heat exchanger*.

Kata Kunci: *Helical Baffle*; *Reynolds Number*; *Overall Heat Transfer Coefficient*; *Computational Fluid Dynamics*; *Shell-and-Tube Heat Exchanger*.

Abstract

The thermal performance of a *shell-and-tube heat exchanger* is governed by the interaction between flow behavior and the internal geometry of the heat exchanger. Among various design modifications, the application of *helical baffles* has attracted considerable attention because it promotes a spiral flow pattern that improves fluid mixing and enhances convective heat transfer. This study evaluates the effects of *helical baffle* angle and Reynolds number on the *Overall Heat Transfer Coefficient* (U) using a *Computational Fluid Dynamics* (CFD) approach. Numerical simulations were performed in ANSYS Fluent 2023 R1 for three *helical baffle* angles (19° , 42° , and 45°) under Reynolds numbers of 15,000, 30,000, and 45,000. The computational model was first validated against experimental measurements before conducting the parametric investigation. The *Overall Heat Transfer Coefficient* was determined from the heat transfer rate, *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), and effective heat transfer area. The numerical results indicate that increasing the Reynolds number consistently improves the *Overall Heat Transfer Coefficient* for every *helical baffle* configuration considered in this study. The highest value of $555.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ was achieved with the 19° *helical baffle* at $Re = 45,000$, whereas the lowest value of $439.67 \text{ W/m}^2\text{K}$ occurred for the 45° configuration at $Re = 15,000$. These findings demonstrate that combining a smaller *helical baffle* angle with a higher Reynolds number enhances the thermal performance of the *shell-and-tube heat exchanger* by improving the effectiveness of heat transfer.

Keywords: *Helical Baffle*; *Reynolds Number*; *Overall Heat Transfer Coefficient*; *Computational Fluid Dynamics*; *Shell-and-Tube Heat Exchanger*.

PENDAHULUAN

Efisiensi penggunaan energi menjadi salah satu indikator utama dalam pengembangan sistem termal di berbagai sektor industri. Peralatan yang berfungsi memindahkan energi panas dituntut mampu memberikan kinerja yang tinggi dengan konsumsi energi yang tetap ekonomis. Dalam berbagai aplikasi proses, *shell-and-tube heat exchanger* (STHE) dipilih karena memiliki konstruksi yang kokoh, mudah dioperasikan, serta mampu bekerja pada rentang tekanan dan temperatur yang luas. Karakteristik tersebut

menjadikan STHE sebagai salah satu jenis penukar panas yang paling banyak diterapkan pada pembangkit listrik, industri petrokimia, pengolahan minyak dan gas, industri pangan, serta berbagai sistem utilitas lainnya.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan perpindahan panas pada STHE, seperti modifikasi susunan *tube*, perubahan konfigurasi *baffle*, maupun optimasi kondisi operasi. Di antara berbagai metode tersebut, penggunaan *helical baffle* menjadi salah satu alternatif yang banyak mendapat perhatian karena mampu menghasilkan lintasan aliran berbentuk spiral. Pola aliran tersebut

mengurangi terbentuknya daerah stagnasi yang umum dijumpai pada *segmental baffle*, meningkatkan pencampuran fluida, serta memperbesar intensitas perpindahan panas konveksi pada sisi *shell* [5]–[8]. Karakteristik tersebut menjadikan *helical baffle* sebagai salah satu konfigurasi yang berpotensi meningkatkan efisiensi termal *heat exchanger*.

Selain konfigurasi *baffle*, kondisi aliran juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik perpindahan panas. Peningkatan bilangan Reynolds menyebabkan kecepatan aliran fluida bertambah sehingga intensitas turbulensi meningkat. Kondisi tersebut memperkuat mekanisme perpindahan panas konveksi melalui penurunan ketebalan *thermal boundary layer* di sekitar permukaan *tube*. Akibatnya, hambatan termal total berkurang dan kemampuan sistem dalam mentransfer energi panas menjadi lebih baik [6], [9], [10]. Oleh karena itu, evaluasi pengaruh bilangan Reynolds perlu dilakukan bersamaan dengan variasi geometri *helical baffle* untuk memperoleh konfigurasi operasi yang memberikan performa termal optimum.

Kinerja perpindahan panas pada *heat exchanger* dapat dievaluasi menggunakan berbagai parameter, seperti *heat transfer rate*, efektivitas, bilangan Nusselt, maupun *Overall Heat Transfer Coefficient* (U). Di antara parameter tersebut, nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* memberikan informasi yang lebih komprehensif karena merepresentasikan kemampuan total sistem dalam memindahkan energi panas dengan mempertimbangkan seluruh hambatan perpindahan panas yang terjadi selama proses konduksi dan konveksi. Nilai U dipengaruhi oleh laju perpindahan panas, perbedaan temperatur rata-rata logaritmik (*Log Mean Temperature Difference*), luas perpindahan panas efektif, karakteristik aliran fluida, serta konfigurasi geometri penukar panas [2], [6], [11]. Semakin besar nilai U , semakin efektif proses perpindahan panas yang berlangsung di dalam *heat exchanger*.

Untuk memperoleh pemahaman mengenai hubungan antara konfigurasi *helical baffle* dan karakteristik perpindahan panas, penelitian ini mengembangkan model numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada *shell-and-tube heat exchanger*. Analisis dilakukan pada tiga variasi sudut *helical baffle* (19° , 42° , dan 45°) serta tiga kondisi bilangan Reynolds (15.000, 30.000, dan 45.000). Seluruh hasil simulasi selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi perubahan *Overall Heat Transfer Coefficient* melalui parameter *heat transfer rate*, *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), dan luas perpindahan panas efektif. Hasil penelitian diharapkan memberikan informasi mengenai konfigurasi yang mampu menghasilkan performa perpindahan panas yang lebih baik pada sistem yang dikaji.

METODE

Jenis Penelitian

Kajian dilakukan melalui pemodelan numerik dengan ANSYS Fluent 2023 R1 untuk merepresentasikan karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *shell-and-tube heat exchanger* yang menggunakan konfigurasi *helical baffle*. Simulasi dilakukan dalam kondisi tunak

sehingga setiap variasi sudut *baffle* dan bilangan Reynolds dapat dibandingkan secara konsisten.

Model penukar panas yang digunakan mengacu pada konfigurasi *shell-and-tube heat exchanger* dengan diameter *shell* 164 mm, panjang *shell* 960 mm, dan 12 buah *tube* yang disusun menggunakan pola *rotated triangular* 60° . Diameter luar tube sebesar 12,7 mm, diameter dalam 11,9 mm, sedangkan panjang tube 966 mm. Variasi penelitian diterapkan pada sudut *helical baffle* sebesar 19° , 42° , dan 45° , sementara parameter operasi divariasikan pada bilangan Reynolds 15.000, 30.000, dan 45.000.

Tahap diskretisasi domain komputasi dilakukan melalui proses meshing menggunakan elemen tetrahedron untuk memperoleh representasi geometri yang sesuai dengan konfigurasi *helical baffle*. Kualitas mesh dievaluasi sebelum simulasi dijalankan guna memastikan model numerik memiliki stabilitas dan tingkat akurasi yang memadai. Selanjutnya, simulasi dilaksanakan setelah seluruh parameter kualitas mesh memenuhi kriteria yang ditetapkan.

Fluida kerja pada sisi *shell* maupun *tube* menggunakan air (*liquid water*) dengan sifat termofisik yang disesuaikan terhadap kondisi operasi. Temperatur masuk fluida panas pada sisi *tube* ditetapkan sebesar 80°C , sedangkan temperatur masuk fluida dingin pada sisi *shell* sebesar 30°C . Variasi bilangan Reynolds diterapkan melalui perubahan kecepatan aliran masuk, sementara kondisi keluaran ditetapkan menggunakan *pressure outlet*. Simulasi turbulensi menggunakan model *Realizable k- ϵ* yang dipadukan dengan *Enhanced Wall Treatment* untuk merepresentasikan fenomena aliran turbulen di dekat dinding.

Sebelum dilakukan analisis terhadap seluruh variasi parameter, model numerik terlebih dahulu divalidasi menggunakan data eksperimen yang tersedia. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan temperatur keluaran hasil simulasi terhadap temperatur keluaran hasil eksperimen. Tahapan ini bertujuan memastikan bahwa model CFD mampu merepresentasikan karakteristik perpindahan panas pada *shell-and-tube heat exchanger* secara memadai sehingga hasil simulasi dapat digunakan sebagai dasar analisis lebih lanjut.

Nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* (U) dihitung berdasarkan laju perpindahan panas, *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), dan luas perpindahan panas efektif. Data temperatur masuk dan keluar dari hasil simulasi digunakan untuk menentukan nilai LMTD, kemudian dikombinasikan dengan nilai laju perpindahan panas sehingga diperoleh nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* pada setiap variasi sudut *helical baffle* dan bilangan Reynolds. Parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi performa termal *shell-and-tube heat exchanger*.

Objek Penelitian

Objek penelitian ini berupa *shell-and-tube heat exchanger* (STHE) yang dilengkapi dengan *helical baffle* pada sisi *shell*. Model yang digunakan mengacu pada geometri Laboratorium Perpindahan Panas Universitas Negeri Surabaya (UNESA) dan dianalisis menggunakan

metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Fluent 2023 R1 untuk mengevaluasi karakteristik perpindahan panas berdasarkan variasi sudut *helical baffle* dan bilangan Reynolds. Spesifikasi geometri, material, fluida kerja, dan kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi objek penelitian

No.	Parameter	Nilai
1	Jenis penukar panas	<i>Shell-and-Tube Heat Exchanger</i>
2	Diameter <i>shell</i>	164 mm
3	Panjang <i>shell</i>	960 mm
4	Diameter <i>nozzle shell</i>	65 mm
5	Jumlah <i>tube</i>	12
6	Diameter luar <i>tube</i>	12,7 mm
7	Diameter dalam <i>tube</i>	11,9 mm
8	Panjang <i>tube</i>	966 mm
9	Material <i>tube</i>	<i>Copper</i>
10	Susunan <i>tube</i>	<i>Rotated triangular (60°)</i>
11	<i>Tube pitch</i>	45 mm
12	Ketebalan <i>helical baffle</i>	3 mm
13	Panjang <i>helical baffle</i>	830 mm
14	Variasi sudut <i>helical baffle</i>	19°, 42°, dan 45°
15	Fluida sisi <i>shell</i> dan <i>tube</i>	<i>Liquid water</i>
16	Temperatur <i>inlet</i> sisi <i>shell</i>	30°C
17	Temperatur <i>inlet</i> sisi <i>tube</i>	80°C

Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas

Sudut *helical baffle* (19°, 42°, dan 45°) serta bilangan Reynolds (15.000, 30.000, dan 45.000).

2. Variabel Terikat

Overall Heat Transfer Coefficient (U)

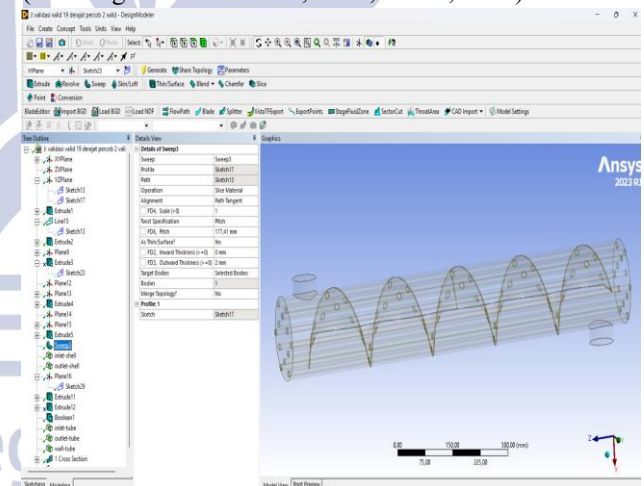
3. Variabel Kontrol

Geometri *shell-and-tube heat exchanger*, material *tube* (*copper*), fluida kerja (*liquid water*), temperatur masuk sisi *tube* (80°C), temperatur masuk sisi *shell* (30°C), model turbulensi *Realizable k-ε*, *Enhanced Wall Treatment*, serta perangkat lunak ANSYS Fluent 2023 R1.

Pembuatan Geometri dan Meshing

Model *shell-and-tube heat exchanger* dibangun menggunakan ANSYS DesignModeler 2023 R1 berdasarkan spesifikasi geometri yang mengacu pada Laboratorium Perpindahan Panas Universitas Negeri Surabaya. Geometri dimodelkan dalam domain fluida sisi *shell* dan *tube* dengan variasi sudut *helical baffle* sebesar 19°, 42°, dan 45°. Seluruh dimensi geometri dipertahankan konstan pada setiap variasi sehingga perubahan karakteristik perpindahan panas hanya dipengaruhi oleh sudut *helical baffle* dan bilangan Reynolds (Lei et al., 2008; Kurniawan & Arsana, 2017).

Domain komputasi didiskritisasi menggunakan elemen *tetrahedral* untuk memperoleh representasi geometri yang memadai pada *shell-and-tube heat exchanger* dengan konfigurasi *helical baffle*. Kualitas *mesh* telah memenuhi kriteria simulasi CFD sehingga dapat digunakan untuk seluruh variasi kondisi operasi (Versteeg & Malalasekera, 2007; White, 2009).



Gambar 1. Pembuatan geometri *shell-and-tube heat exchanger* menggunakan DesignModeler di ANSYS 2023R1.

Tabel 2. Parameter *mesh*

No.	Parameter	Nilai
1	Metode <i>Mesh</i>	<i>Tetrahedron</i>
2	Jumlah <i>Node</i>	948.291
3	Jumlah <i>Element</i>	5.480.350

No.	Parameter	Nilai
4	<i>Average Orthogonal Quality</i>	0,77217
5	<i>Average Skewness</i>	0,22592
6	<i>Maximum Skewness</i>	0,82128

Tabel 3. Pengaturan *General* dan *Models*

No.	Parameter	Pengaturan
1	<i>Solver</i>	<i>Pressure-Based</i>
2	<i>Time</i>	<i>Steady</i>
3	<i>Velocity Formulation</i>	<i>Absolute</i>
4	<i>Gravity Y (m/s²)</i>	-9,8
5	<i>Energy</i>	<i>On</i>
6	<i>Viscous Model</i>	<i>Realizable k-ε</i>
7	<i>Near Wall Treatment</i>	<i>Enhanced Wall Treatment</i>

Teknik Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* (U) pada setiap variasi sudut *helical baffle* dan bilangan Reynolds. Analisis didukung oleh perhitungan *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), bilangan Nusselt, distribusi temperatur, dan *wall heat flux* untuk menjelaskan mekanisme perpindahan panas yang terjadi (Çengel & Ghajar, 2015; Bergman et al., 2017; Shah & Sekulić, 2003).

Diagram Alir Penelitian

Penelitian diawali dengan studi literatur dan penentuan spesifikasi *shell-and-tube heat exchanger*. Selanjutnya dilakukan pemodelan geometri menggunakan ANSYS DesignModeler berdasarkan spesifikasi yang telah ditetapkan. Model kemudian didiskritisasi menggunakan ANSYS Meshing sebelum dilakukan pengaturan simulasi pada ANSYS Fluent 2023 R1, meliputi pemilihan *solver*, model turbulensi, material, kondisi batas, dan parameter numerik lainnya. Setelah simulasi mencapai kondisi konvergen, hasil simulasi diproses untuk memperoleh data temperatur, *heat transfer rate*, LMTD, dan *Overall Heat Transfer Coefficient* untuk dianalisis pada setiap variasi sudut

helical baffle dan bilangan Reynolds (Versteeg & Malalasekera, 2007; Çengel & Ghajar, 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Bilangan Reynolds dan Sudut *Helical Baffle* terhadap *Log Mean Temperature Difference* (LMTD)

Tabel 4. Nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD)

Sudut <i>Helical Baffle</i>	Re 15.000	Re 30.000	Re 45.000
19°	34,28	33,36	32,71
42°	35,17	34,22	33,63
45°	35,23	34,23	33,74

Berdasarkan Tabel 4, nilai LMTD menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds pada seluruh variasi sudut *helical baffle*. Pada sudut 19°, nilai LMTD menurun dari 34,28°C pada Reynolds 15.000 menjadi 32,71°C pada Reynolds 45.000. Pola serupa juga terjadi pada sudut 42° dan 45°, meskipun besar penurunannya relatif kecil.

Penurunan nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) menunjukkan bahwa perbedaan temperatur rata-rata antara fluida panas dan fluida dingin semakin berkurang akibat meningkatnya intensitas perpindahan panas pada bilangan Reynolds yang lebih tinggi. Laju aliran yang semakin besar meningkatkan pencampuran fluida dan koefisien konveksi, sehingga proses pertukaran energi berlangsung lebih efektif. Akibatnya, temperatur fluida panas mengalami penurunan yang lebih besar, sedangkan temperatur fluida dingin meningkat lebih cepat, sehingga selisih temperatur rata-rata di sepanjang penukar panas menjadi lebih kecil (Çengel & Ghajar, 2015; Bergman et al., 2017).

Jika dibandingkan berdasarkan sudut *helical baffle*, konfigurasi 45° menghasilkan nilai LMTD tertinggi, sedangkan konfigurasi 19° menghasilkan nilai LMTD terendah pada setiap variasi bilangan Reynolds. Perbedaan ini menunjukkan bahwa geometri *helical baffle* memengaruhi distribusi temperatur di dalam sisi *shell*. Namun demikian, nilai LMTD yang lebih besar tidak secara langsung menunjukkan kemampuan perpindahan panas yang lebih baik. Evaluasi performa termal harus mempertimbangkan hubungan antara LMTD dengan laju perpindahan panas melalui perhitungan *Overall Heat Transfer Coefficient* (U) (Shah & Sekulić, 2003; Thulukkanam, 2013).

Pengaruh Bilangan Reynolds dan Sudut *Helical Baffle* terhadap *Overall Heat Transfer Coefficient* (U)

Overall Heat Transfer Coefficient (U) digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi kemampuan *shell-and-tube heat exchanger* dalam

memindahkan energi panas dari fluida panas ke fluida dingin. Besarnya nilai U dipengaruhi oleh laju perpindahan panas, *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), luas perpindahan panas efektif, serta total hambatan termal yang terjadi selama proses perpindahan panas. Oleh karena itu, peningkatan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* menunjukkan bahwa proses perpindahan panas berlangsung lebih efektif sehingga kinerja termal penukar panas menjadi semakin baik.

Tabel 5. Nilai *overall Heat Transfer Coefficient* (U)

Sudut Helical Baffle	Re 15.000	Re 30.000	Re 45.000
19°	475,93	523,47	555,35
42°	442,24	486,27	516,38
45°	439,67	483,62	512,43

Nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* pada setiap kombinasi variasi sudut *helical baffle* dan bilangan Reynolds diperoleh dari hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan memanfaatkan data temperatur masuk dan keluar fluida, nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), laju perpindahan panas, serta luas perpindahan panas efektif. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 5 sebagai dasar untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter terhadap performa perpindahan panas.

Berdasarkan Tabel 5, peningkatan bilangan Reynolds memberikan kecenderungan kenaikan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* pada seluruh konfigurasi *helical baffle*. Pada sudut 19°, nilai U meningkat dari 475,93 W/m²K pada Reynolds 15.000 menjadi 555,35 W/m²K pada Reynolds 45.000, atau mengalami peningkatan sekitar 16,7%. Tren yang sama juga terlihat pada sudut 42° dan 45°, dengan kenaikan masing-masing sekitar 16,8% dan 16,6%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran akibat bertambahnya bilangan Reynolds memberikan kontribusi positif terhadap kemampuan perpindahan panas sistem.

Kenaikan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* pada bilangan Reynolds yang lebih tinggi berkaitan dengan meningkatnya intensitas turbulensi di dalam penukar panas. Aliran yang semakin turbulen menghasilkan pencampuran fluida yang lebih baik sehingga lapisan batas termal (*thermal boundary layer*) pada permukaan *tube* menjadi lebih tipis. Kondisi tersebut meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi sekaligus menurunkan hambatan termal total. Akibatnya, energi panas dapat dipindahkan dengan lebih efisien dari fluida panas menuju fluida dingin sehingga nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* meningkat. Fenomena ini sejalan dengan teori perpindahan panas yang menyatakan bahwa intensifikasi konveksi pada bilangan Reynolds tinggi mampu meningkatkan performa termal penukar panas.

Selain dipengaruhi oleh bilangan Reynolds, perubahan sudut *helical baffle* juga memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai *Overall Heat Transfer Coefficient*. Pada seluruh variasi Reynolds, konfigurasi 19° secara konsisten menghasilkan nilai U tertinggi, sedangkan konfigurasi 45° memberikan nilai terendah. Hal ini menunjukkan bahwa sudut *helical baffle* yang lebih kecil mampu mengarahkan aliran fluida secara lebih efektif mengikuti lintasan spiral di sisi *shell*. Pola aliran tersebut meningkatkan distribusi fluida di sekitar *tube*, memperbesar intensitas pencampuran, dan memperkuat mekanisme perpindahan panas konveksi sehingga nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* menjadi lebih tinggi dibandingkan konfigurasi dengan sudut yang lebih besar.

Hasil penelitian juga memperlihatkan bahwa nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) yang lebih rendah tidak selalu menunjukkan kemampuan perpindahan panas yang lebih buruk. Pada konfigurasi *helical baffle* 19°, nilai LMTD merupakan yang paling kecil, namun konfigurasi tersebut justru menghasilkan *Overall Heat Transfer Coefficient* tertinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan perpindahan panas akibat intensifikasi turbulensi lebih dominan dibandingkan penurunan gaya pendorong temperatur (*temperature driving force*). Dengan demikian, efektivitas perpindahan panas sistem tidak hanya ditentukan oleh besarnya LMTD, tetapi juga oleh peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi akibat perubahan pola aliran.

Secara keseluruhan, kombinasi sudut *helical baffle* 19° dan bilangan Reynolds 45.000 menghasilkan performa perpindahan panas terbaik dengan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* sebesar 555,35 W/m²K. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi geometri *helical baffle* yang dikombinasikan dengan peningkatan bilangan Reynolds mampu meningkatkan efektivitas perpindahan panas pada *shell-and-tube heat exchanger*. Hasil tersebut juga mendukung kecenderungan yang telah dilaporkan dalam penelitian terdahulu mengenai pengaruh pola aliran spiral terhadap peningkatan karakteristik perpindahan panas.

Hubungan LMTD, Overall Heat Transfer Coefficient, dan Bilangan Nusselt

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan bilangan Reynolds menyebabkan nilai LMTD menurun, sedangkan *Overall Heat Transfer Coefficient* (U) dan bilangan Nusselt (Nu) meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan intensitas turbulensi memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap perpindahan panas dibandingkan penurunan *temperature driving force*. Konfigurasi *helical baffle* 19° menghasilkan nilai U dan Nu tertinggi pada seluruh variasi Reynolds, sehingga memberikan performa perpindahan panas terbaik. Dengan demikian, evaluasi kinerja *shell-and-tube heat exchanger* perlu mempertimbangkan hubungan antara LMTD, U , dan Nu secara bersamaan.

Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), peningkatan bilangan Reynolds meningkatkan nilai *Overall Heat Transfer Coefficient* (U) pada seluruh variasi sudut *helical baffle* akibat meningkatnya intensitas perpindahan panas konveksi. Variasi sudut *helical baffle* juga berpengaruh terhadap performa termal, di mana konfigurasi 19° menghasilkan nilai U tertinggi sebesar 555,35 W/m²K pada Reynolds 45.000, sedangkan konfigurasi 45° menghasilkan nilai terendah sebesar 439,67 W/m²K pada Reynolds 15.000. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi *helical baffle* 19° memberikan performa perpindahan panas terbaik berdasarkan parameter *Overall Heat Transfer Coefficient*.

Saran

Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengembangkan kajian dengan menambahkan variasi geometri *helical baffle*, seperti perubahan *baffle pitch*, ketebalan, maupun jumlah lilitan, untuk memperoleh konfigurasi yang lebih optimal. Selain itu, penerapan model *conjugate heat transfer* serta validasi menggunakan data eksperimen juga dapat dilakukan guna meningkatkan akurasi hasil simulasi dan memperkuat keandalan model numerik.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, N., & Arsana, I. M. (2018). Simulasi performansi heat exchanger tipe shell and tube dengan helical baffle dan disk and doughnut baffle. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(1), 61–68.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Bhardwaj, A., Mishra, A. K., Rao, S., Kumar, G., & Singh, R. K. (2026). A comparative CFD study of baffle geometry and perforation shape for performance optimization in shell-and-tube heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 178, 111565. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.111565>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10th ed.). McGraw-Hill.
- Kakaç, S., & Liu, H. (2002). *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design* (2nd ed.). CRC Press.
- Kral, D., Stehlik, P., Van der Ploeg, H. J., & Master, B. I. (1996). Helical baffles in shell-and-tube heat exchangers, Part I: Experimental verification. *Heat Transfer Engineering*, 17(1), 93–101. <https://doi.org/10.1080/01457639608939868>
- Kurniawan, L. B., & Arsana, I. M. (2017). Studi perbandingan efektifitas heat exchanger tipe shell and tube dengan helical baffle dan double segmental baffle. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(3), 1–7.
- Lei, Y.-G., He, Y.-L., Chu, P., & Li, R. (2008). Design and optimization of heat exchangers with helical baffles. *Chemical Engineering Science*, 63(17), 4386–4395.
- Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons.
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Webb, R. L., & Kim, N.-H. (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- White, F. M. (2009). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Yousfi, M. (2022). Helical baffle thermohydraulic performance versus segmental baffle one. *Mechanika*, 28(6), 455–461. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.31096>