

Analisis numerik pengaruh *Cut Ratio* terhadap kinerja perpindahan panas di dalam pipa penukar kalor dilengkapi *Coaxial Cross Twisted Tape* dengan *V-Cut* dan *Center Clear*

Shaleh Ahmad¹, Fauzun^{1*}

¹Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

*Corresponding Author : fauzun71@ugm.ac.id

Abstrak

Teknik peningkatan perpindahan panas telah menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan efisiensi sistem rekayasa melalui perubahan aliran fluida, geometri, dan karakteristik material. *Twisted tape inserts* telah diakui memiliki potensi besar dalam meningkatkan perpindahan panas konvektif dalam sistem perpindahan panas. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan *twisted tape inserts* dengan variasi struktur dan pemotongan untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas dalam pipa. Metode numerik menggunakan komputasi dinamika fluida (CFD) ANSYS-Fluent digunakan untuk menganalisis aliran fluida dan perpindahan panas dalam pipa dengan *twisted tape inserts*. Simulasi dilakukan dalam rentang bilangan Reynolds 4.000-9.000 dengan fluks panas yang konstan pada dinding pipa sebesar 6.000 W/m². Hasil simulasi numerik divalidasi dengan data eksperimental sebelumnya. Hasil menunjukkan bahwa *twisted tape* dengan rasio pemotongan 1,0 memiliki efisiensi termal maksimum sebesar 0,94 dan meningkatkan bilangan Nusselt hingga 1,2 kali lipat.

Kata kunci: Perpindahan Panas, Twisted Tape Inserts, Efisiensi Termal, Bilangan Nusselt, Komputasi Dinamika Fluida

Abstract

The enhancement techniques in heat transfer have become the primary focus in efforts to improve the efficiency of engineering systems through alterations in fluid flow, geometry, and material characteristics. Twisted tape inserts have been recognized to have significant potential in enhancing convective heat transfer within heat transfer systems. This study explores the use of twisted tape inserts with structural variations and cutting to enhance heat transfer efficiency in pipes. Numerical methods using Computational Fluid Dynamics (CFD) ANSYS-Fluent are employed to analyze fluid flow and heat transfer in pipes with twisted tape inserts. Simulations are conducted within the Reynolds number range of 4,000-9,000 with a constant heat flux on the pipe wall of 6,000 W/m². The numerical simulation results are validated with previous experimental data. The results indicate that twisted tape with a cutting ratio of 1.0 achieves a maximum thermal efficiency of 0.94 and increases the Nusselt number by up to 1.2 times.

Keywords: Heat Transfer, Twisted Tape Inserts, Thermal Efficiency, Nusselt Number, Computational Fluid Dynamics.

PENDAHULUAN

Tujuan dari teknik peningkatan perpindahan panas adalah untuk meningkatkan efektivitas sistem (Mousavi Ajarostaghi dkk., 2022) melalui perubahan aliran fluida, geometri, atau karakteristik material (C. dkk., 2022). Kemajuan teknik peningkatan

perpindahan panas yang efisien memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja beragam sistem rekayasa (Bhattacharyya dkk., 2020) (Maradiya dkk., 2018), yang mengarah pada kemajuan besar dalam efisiensi energi, penurunan emisi, dan peningkatan keandalan sistem (Zimparov dkk.,

2022). Teknik-teknik ini dapat dikategorikan menjadi dua jenis: teknik pasif, yang menggunakan permukaan yang diperluas untuk memperbesar area perpindahan panas, dan teknik aktif, yang memanfaatkan perangkat eksternal untuk merangsang pergerakan fluida dan menambah perpindahan panas (Sheikholeslami dkk., 2015) (Liu, S. dan Sakr, 2013) (Thapa dkk., 2021). Di antara teknik-teknik ini, *twisted tape inserts* menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan perpindahan panas dalam sistem (Piriyarungrod dkk., 2015) (Varun dkk., 2016). *Twisted tape*, dalam bentuk strip yang digulung secara spiral, ditempatkan di dalam saluran aliran fluida untuk menginduksi turbulensi dan meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif (Yaningsih dkk., 2018). Penelitian ekstensif telah menunjukkan dampak luar biasa dari *twisted tape* dalam menambah koefisien perpindahan panas konvektif di berbagai peralatan perpindahan panas, seperti *heat exchanger* dan *boiler* (Mogaji dkk., 2013).

Pemanfaatan dinamika komputasi fluida (CFD) sangat luas dalam mengevaluasi dan meningkatkan teknik perpindahan panas. Efektivitas *twisted tape inserts* dalam hal ini bergantung pada strukturnya, yang berdampak pada pola aliran dan pembentukan turbulensi dalam aliran fluida (Mogaji dkk., 2022) (Rana dkk., 2021) (Sharma dkk., 2023) (Gupta dkk., 2020) (Lim dkk., 2017) (Manikanta dkk., 2017) (Ponweiser dkk., 2004). Kemajuan terkini dalam manufaktur, CFD dan metodologi simulasi telah memfasilitasi penciptaan struktur *twisted tape inserts* baru yang memiliki kemampuan perpindahan panas yang unggul (Varun dkk., 2016). Berbagai jenis *twisted tape*, seperti *twisted tape inserts* dengan potongan dan berlubang, telah diperiksa secara menyeluruh kemampuannya untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas dengan mengganggu lapisan batas pada dinding pipa (Bucak dan Yılmaz, 2020) (Murugesan dkk., 2011) (Saysroy, A. dan Eiamsa-ard, 2017) (Saysroy, Anucha dan Eiamsa-ard, 2017). Selain itu, modifikasi pada bentuk pita yang ditebuk dapat menggeser aliran pusaran lebih dekat ke dinding pipa, sehingga semakin meningkatkan efisiensi perpindahan panas (Liu, X. dkk., 2018).

Sarviya dan Fuskele (2018) mempelajari penggunaan *twisted tape* dengan tepian yang

dipotong terus menerus untuk meningkatkan perpindahan panas pada pipa tembaga. Studi ini menemukan bahwa *twisted tape* dengan potongan tepi persegi panjang terus menerus, meningkatkan laju perpindahan panas sebesar 2,21 dan 2,23 kali dibandingkan dengan pipa biasa dan pita bengkok konvensional. Efisiensi terbesar dicapai pada *twist ratio* 1,56. Murugesan dkk. (Murugesan dkk., 2011) mempelajari dampak *twisted tape* terhadap perpindahan panas, faktor gesekan, dan efisiensi termal pada pipa dengan *twist ratio* yang berbeda serta kombinasi *depth ratio* dan *width ratio*. *V-cut twisted tape* memiliki efisiensi termal 1,07 – 1,23 untuk bilangan Reynolds yang sama. Dalam penelitiannya, Eiamsa-ard dkk. (Seemawute dan Eiamsa-ard, 2010) melakukan penelitian untuk menguji bagaimana potongan *peripherally cut twisted tape* mempengaruhi perpindahan panas, faktor gesekan, dan faktor kinerja termal. Mereka menguji sembilan *twisted tape* berbeda dan mengukur laju perpindahan panas dan faktor gesekan dalam kondisi aliran panas yang seragam. Temuan menunjukkan bahwa *peripherally cut twisted tape* mencapai efisiensi termal maksimum sebesar 1,29 untuk aliran turbulen dan 4,88 untuk aliran laminar. Studi lain oleh Eiamsa-ard dan Promvonge (2010) berfokus pada dampak *twisted tape* dengan tepi bergerigi pada perpindahan panas dan penurunan tekanan dalam aliran panas konstan. Penelitian mereka menunjukkan bahwa penggunaan pita bergerigi meningkatkan bilangan Nusselts sebesar 72,2%. Peningkatan ini disebabkan oleh peningkatan *depth ratio* gerigi dan penurunan *width ratio* gerigi. Dalam penelitiannya, Murugesan dkk. (Murugesan dkk., 2010) meneliti kinerja penukar panas yang menggunakan desain *square-cut twisted tape* dan *perforated twisted tape*, dengan air berfungsi sebagai fluida kerja. Investigasi mereka berfokus pada perpindahan panas, faktor gesekan, dan efisiensi termal. Temuan menunjukkan bahwa penukar panas dengan *square-cut twisted tape* menunjukkan bilangan Nusselt dan koefisien gesekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *perforated twisted tape*. Selain itu, efisiensi termal *square-cut twisted tape* berkisar antara 1,02 hingga 1,27, sedangkan efisiensi termal *perforated twisted tape* berkisar antara 1,0 hingga 1,2. Dalam penelitian mereka, Nakhchi dan Esfahani

(Nakhchi dan Esfahani, 2019a) meneliti kinerja termal dan struktur aliran turbulen dalam *rectangular-cut twisted tape*. Temuan penelitian ini mengungkapkan bahwa aliran pusaran, yang dihasilkan oleh *rectangular-cut*, bergerak dari dinding luar tabung menuju daerah tengahnya, sehingga meningkatkan pencampuran cairan dan perpindahan panas. Selain itu, faktor gesekan yang terkait dengan aliran fluida lebih besar pada *rectangular-cut* dengan *cut ratio* yang bervariasi dibandingkan *twisted tape* tradisional. Khususnya, nilai kinerja termal untuk kasus yang melibatkan *single-cut twisted tape* mencapai puncaknya pada kisaran 1,2 hingga 1,64. Dalam studi mereka, Nakhchi dan Esfahani (Nakhchi dan Esfahani, 2019b) merancang model numerik yang bertujuan untuk meningkatkan perpindahan panas dalam tabung penukar panas melalui *double V-cut twisted tape*. Mereka melakukan eksperimen untuk menguji pengaruh berbagai *cut ratio* terhadap karakteristik aliran turbulen dan efisiensi termal sistem. Temuan utama menunjukkan bahwa *double V-cut twisted tape* dengan *cut ratio* 1,8 menunjukkan laju perpindahan panas tertinggi, melampaui *twisted tape* konvensional sebesar 48,0%, 64,3%, 86,0%, dan 117,4%. Pemanfaatan *double V-cut twisted tape* dengan rasio berbeda menghasilkan peningkatan kinerja termal masing-masing sebesar 1,35, 1,50, 1,64, dan 1,83.

Karakteristik perpindahan panas dan koefisien gesekan *cross hollow twisted tape inserts* pada pipa dengan lebar rongga 6, 8, dan 10 mm diselidiki oleh He dkk. (He dkk., 2018). Ditemukan bahwa pipa dengan *cross hollow twisted tape* menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam aliran laminar dibandingkan dengan aliran turbulen. Bagian *twisted tape* yang longgar mengurangi tekanan, menjadikannya *twisted tape* yang hemat energi. Dalam studi numerik yang dilakukan oleh Saysroy dkk. (Saysroy, Anucha dan Eiamsa-ard, 2017), peningkatan perpindahan panas dan kinerja termal pipa yang dimasukkan dengan *square-cut twisted tape* diperiksa dibandingkan dengan *twisted tape* klasik. Simulasi dilakukan pada kondisi aliran panas yang seragam, dengan *twist ratio* dan ketebalan yang konstan. Studi tersebut mengungkapkan bahwa semua pipa yang dimasukkan dengan *square-cut twisted tape* menunjukkan laju perpindahan panas dan

faktor gesekan yang lebih baik. Laju perpindahan panas dan faktor gesekan tertinggi dicapai dengan *square-cut twisted tape* 1,32 kali lebih tinggi dibandingkan *twisted tape* klasik. Eksperimen dilakukan oleh Bhuiya dkk. (Bhuiya dkk., 2013) untuk menilai bilangan Nusselt, faktor gesekan, dan faktor kinerja termal pada pipa yang dilengkapi dengan *perforated twisted tape*. Pipa yang digunakan pada penelitian memiliki porositas dan diameter yang bervariasi, berkisar antara 3 mm hingga 9 mm. Temuan menunjukkan bahwa *perforated twisted tape* menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam laju perpindahan panas, faktor gesekan, dan faktor kinerja termal, dengan peningkatan masing-masing sebesar 340%, 360%, dan 59%.

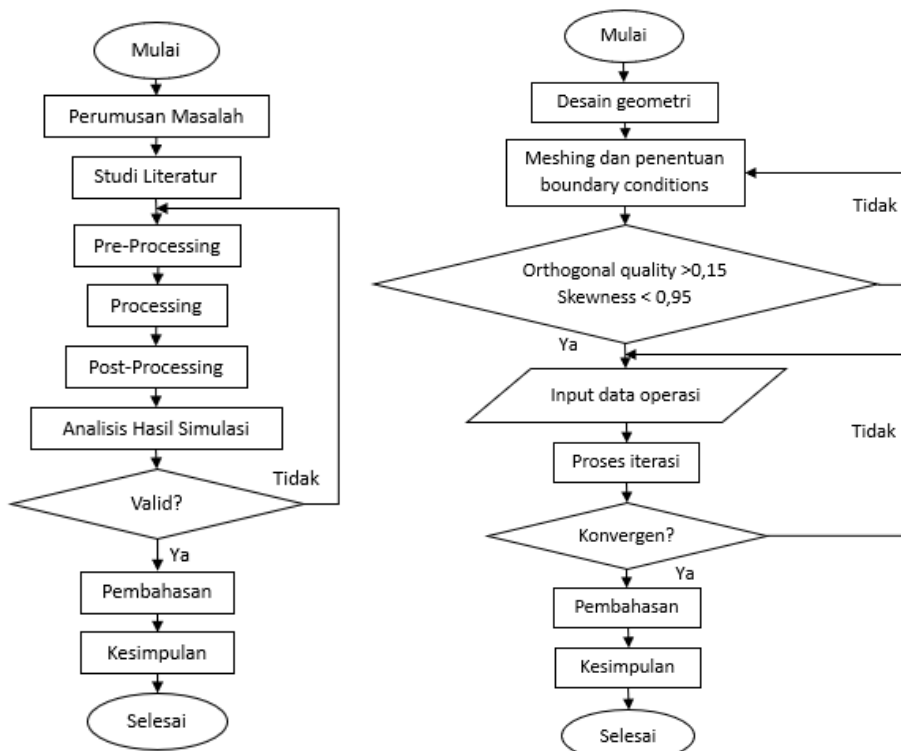
Pemanfaatan *twisted tape inserts* dalam aliran turbulen telah terbukti meningkatkan perpindahan panas, meskipun hal ini juga dapat menyebabkan peningkatan perbedaan tekanan sebagai akibat gesekan dengan permukaan *twisted tape* (Abed dkk., 2018). Beberapa faktor, termasuk bilangan Reynolds, *twist ratio*, dan jenis *twisted tape* (Saysroy, Anucha dan Eiamsa-ard, 2017), dapat mempengaruhi fenomena ini. Penting untuk dicatat bahwa dalam aliran turbulen, keberadaan *twisted tape* berpotensi menyebabkan kerusakan pada lapisan batas, sehingga mempengaruhi kinerja secara keseluruhan (Ghalambaz, Arasteh, dkk., 2020) (Ghalambaz, Mashayekhi, dkk., 2020) (Dewan dkk., 2004). Namun, ada metode untuk mengoptimalkan kinerja, seperti mengurangi luas permukaan pita (Mashoofi dkk., 2017) dan meningkatkan interferensi dalam lapisan batas. Di antara berbagai pilihan, *V-cut twisted tape* telah menunjukkan kinerja yang paling baik, secara efektif memaksimalkan kerusakan lapisan batas pada dinding pipa. Selain itu, menggabungkan *twisted tape* koaksial dengan *V-cut* dan *center clear cut* dapat meningkatkan kinerja perpindahan panas. Dalam penelitian ini, variasi baru dari *twisted tape* akan diperiksa. Dengan menggabungkan kedua elemen ini, tujuannya adalah untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas di dalam wilayah dinding pipa sekaligus mengurangi faktor gesekan melalui penerapan *center clear cut*. Desain pita bengkok yang inovatif ini disebut sebagai *Coaxial Cross Twisted Tape* dengan *V-Cut* dan *Center Clear Cut*.

METODE PENELITIAN

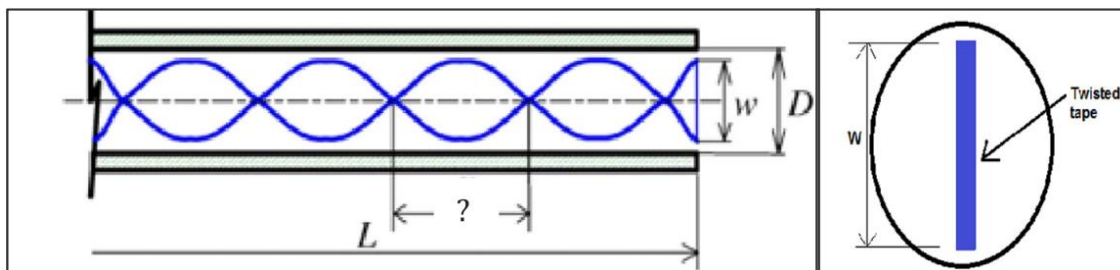
Deskripsi dan Asumsi dari Model

Gambar 2 (a) menyajikan diagram skematik untuk penelitian ini. Penelitian ini mereplikasi percobaan Sawarkar (2015), Gambar 2 (b) dan 2 (c) mengilustrasikan dua jenis *twisted tape* (*twisted tape* biasa dan *twisted tape* yang diteliti) ke dalam pipa melingkar dengan *twist ratio* 3,5. Pipa tersebut berukuran

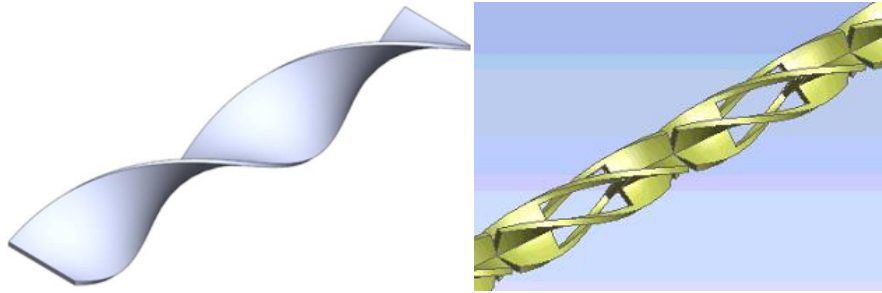
panjang 80 cm, dengan diameter dalam dan luar masing-masing 2,8 cm dan 3,2 cm. *Twisted tape* berbahan aluminium memiliki dimensi tebal 0,3 cm dan lebar 2,5 cm. Gambar 3 dan Tabel 1 menyajikan *V-cut ratio* (0,5, 0,66, dan 1). Perlu dicatat bahwa diameter bagian dalam pipa melebihi lebar *twisted tape*. Selain itu, jarak 100 mm diperlukan agar *twisted tape* dapat menyelesaikan rotasi 180 derajat.



Gambar 1. Diagram alir penelitian dan diagram alir simulasi.



(a) Pipe including twisted tape(Pawan A. Sawarkar; Pramod R. Pachghare;, 2015)



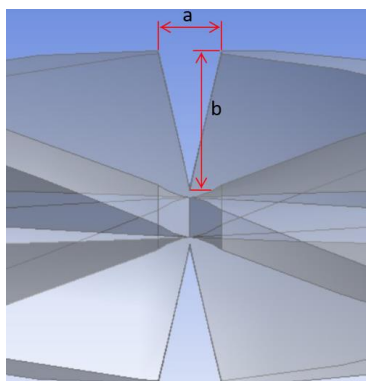
(b) Plain twisted tape and (c) Twisted tape for this paper
Gambar 2. Bentuk Geometri dari *twisted tape inserts*.

Persamaan Atur

Aliran fluida dalam pipa yang berisi *twisted tape inserts* dianalisis menggunakan persamaan kekekalan kontinuitas, momentum, dan energi. Analisis ini berfokus pada model 3D dan mengasumsikan fluks panas yang seragam pada dinding pipa. Faktor yang diabaikan termasuk gaya gravitasi, variasi sifat fluida, perpindahan panas konduktif pada *twisted tape*, radiasi, dan konveksi. Pendekatan pemodelan mempertimbangkan aliran turbulen dalam keadaan tunak, aliran tidak dapat dimampatkan, dan fluida Newton untuk mensimulasikan perpindahan panas dan aliran turbulen. Persamaan yang mengatur analisis ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

Persamaan Kekekalan Massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \tag{1}$$



Gambar 3. Bentuk Geometri dari *V-cut*.

Table 1 *V-cut ratio*

a (mm)	b (mm)	Rasio (a/b)
5	10	0,5
5	7,5	0,66
5	5	1

Sifat Fluida dan Kondisi Batas

Karakteristik termal air sebagai zat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dinilai

Persamaan Kekekalan Momentum:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho g - \nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij} \tag{2}$$

Persamaan Kekekalan Energi:

$$\rho \frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + p(\nabla \cdot V) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \tag{3}$$

Dimana:

$$\Phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \tag{4}$$

Untuk memastikan *fine-near-wall meshes* di dekat dinding di FLUENT, *enhanced wall treatment* diterapkan. Percobaan dilakukan dalam rentang bilangan Reynolds 4.000-9.000, mempertahankan fluks panas yang konsisten sebesar 6.000 W/m².

melalui beberapa sifat utama: densitas (ρ), kalor jenis (C_p), konduktivitas termal (k), dan viskositas (μ). Nilai-nilai ini diukur masing-masing pada 998,2 kg/m³, 4182 J/kg.K, 0,6 W/m.K, dan 0,001003 kg/(m.s).

Kondisi batas ditentukan untuk setiap wilayah domain komputasi. Wilayah internal yang memiliki muka yang sama tidak memerlukan kondisi batas apa pun, ia hanya ditetapkan sebagai fluida. Kondisi batas pada bagian *inlet* ditentukan oleh kecepatan air, sedangkan pada bagian *outlet* ditentukan oleh tekanan. Kondisi batas yang digunakan dalam model khusus ini dapat diuraikan sebagai berikut.

Kecepatan fluida pada dinding pipa dapat diabaikan karena *no slip condition* pada permukaan pipa dan *twisted tape*. Selain itu, fluks panas pada dinding pipa tetap konstan pada sekitar 6000 W/m².

Untuk menentukan kondisi awal, perhitungan bilangan Reynolds menghasilkan kecepatan masuk dengan menggunakan

persamaan (5). Bilangan Reynolds yang dipilih berada dalam kisaran 4000-9000, sedangkan suhu masuk tetap konstan pada 27°C.

Parameter non-dimensional dan beberapa variabel yang menjelaskan tentang aliran serta perpindahan panas dalam pipa dengan *twisted tape* antara lain:

Rezim aliran ditunjukkan dengan nilai bilangan Reynolds dibawah (Frank M. White, 2016)(Yunus A. Çengel, 2018):

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (5)$$

Penurunan tekanan dalam pipa dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach (Frank M. White, 2016) dibawah:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2} \quad (6)$$

$$f = 2D \frac{\Delta P}{L \rho u^2} \quad (7)$$

Temperatur rata-rata yang mengalir dalam fluida dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah (Cengel dan Ghajar, 2015)(Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, 2017).

$$T_b = (T_i + T_o)/2 \quad (8)$$

Koefisien perpindahan panas konveksi dihitung dari Hukum Pendinginan Newton (Cengel dan Ghajar, 2015)(Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, 2017).

$$\dot{Q} = h A_w (T_s - T_\infty) \quad (9)$$

$$\dot{q} = h (T_s - T_\infty) \quad (10)$$

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_s - T_\infty)} \quad (11)$$

Bilangan Nusselt dihitung dengan persamaan dibawah (Cengel dan Ghajar, 2015)(Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, 2017):

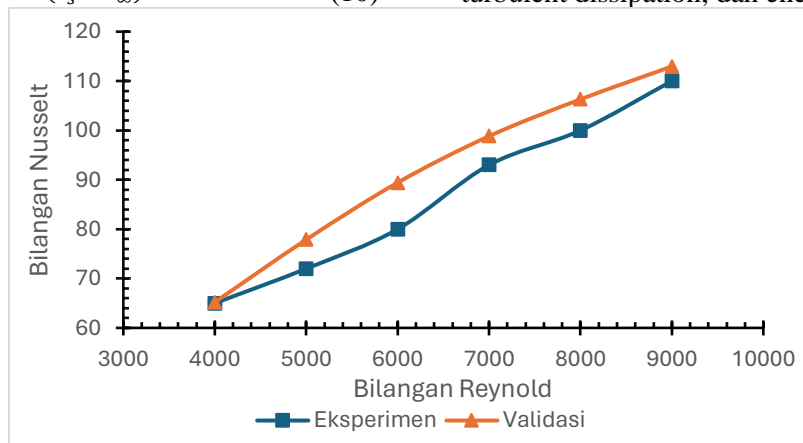
$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (12)$$

Efisiensi termal dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah (Dewan dkk., 2004):

$$\eta = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (13)$$

Domain Komputasi dan Meshing

Domain komputasi diselesaikan menggunakan analisis numerik melalui komputasi dinamika fluida ANSYS-Fluent. Untuk secara akurat mensimulasikan medan aliran dan laju perpindahan panas di dekat pita bengkok, dipilih Model Turbulensi k-ε dengan *enhance wall treatment*. Elemen *meshing* menggunakan elemen polihedral, dengan *meshing* halus di dekat zona *twisted tape* menggunakan ukuran maksimum 1 mm dan *meshing* halus lainnya di dekat dinding pipa untuk memastikan nilai Y+ minimal 5. Masalah diskritisasi dalam persamaan atur diselesaikan dengan menggunakan model *control volume* dengan algoritma SIMPLE, beserta *second-order upwind scheme* untuk tekanan dan *third-order* untuk momentum, turbulnt kinetic, turbulnt dissipation, dan energy.



Gambar 4. Perbandingan data simulasi numerik dan penelitian yang dilakukan oleh Sawarkar (2015)

Validasi

Untuk memverifikasi keakuratan simulasi numerik CFD digunakan hasil penelitian dari Sawarkar (2015) pada *plain twisted tape*. Perbandingan antara data eksperimen dan hasil sumlasi CFD bilangan Nusselt dan Bilangan Reynolds dapat dilihat

pada Gambar 4. Dari Gambar 4 terlihat bahwa data simulasi memiliki nilai yang baik sehingga tidak tedapat data yang melenceng jauh dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, nilai efisiensi termal maksimum pada *twisted tape* penelitian ini tercapai ketika rasio pemotongan 1,0. Pada Gambar 5, nilai efisiensi termal cenderung menurun dengan nilai efisiensi semakin berimpit pada bilangan Reynolds di atas 7.000.

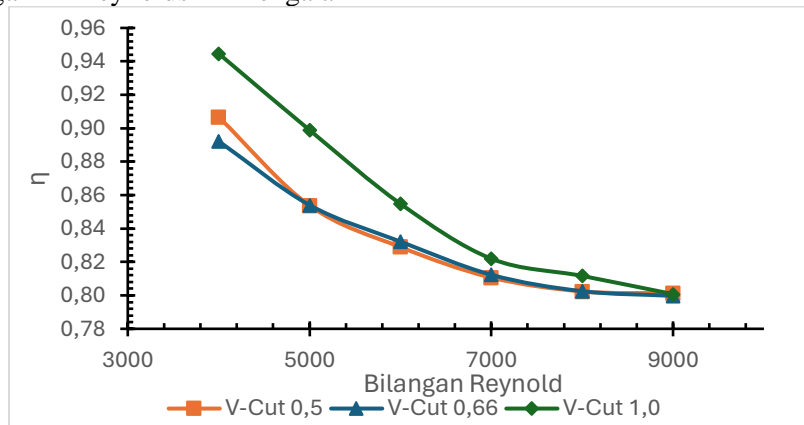
Bilangan Nusselt pada setiap variasi *V-cut* pada bilangan Reynolds yang diujikan ditunjukkan pada Gambar 6. Pada gambar tersebut, nilai Nusselt tertinggi dicapai ketika seluruh rasio pemotongan untuk setiap bilangan Reynolds yang diujikan.

Jika kita membandingkan bilangan Nusselt hasil penelitian ini dengan bilangan Nusselt pada Gambar 4 dan menggunakan nilai validasi (data hasil simulasi numerik) sebagai basis, kita akan melihat hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar 7 menunjukkan bahwa setiap variasi rasio dan variasi bilangan Reynolds mengalami

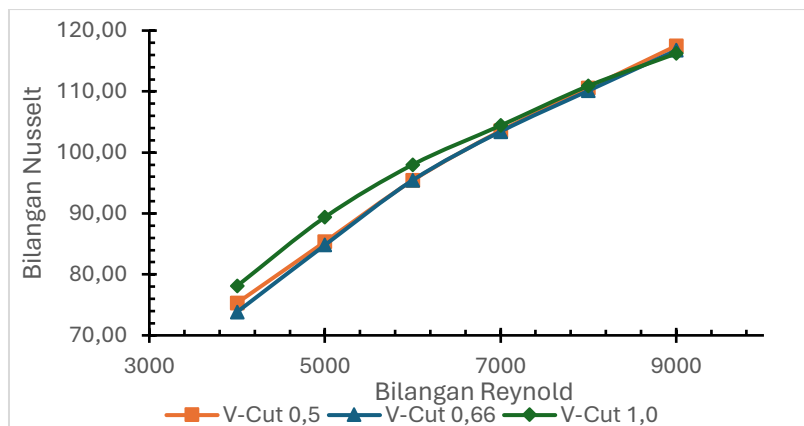
peningkatan yang signifikan dalam Nu/Nu_0 , dengan rasio 1,0 menjadi nilai tertinggi dan cenderung menurun dengan nilai efisiensi semakin berimpit pada bilangan Reynolds di atas 7.000.

Koefisien gesek untuk setiap variasi *V-cut* pada bilangan Reynold yang diujikan ditunjukkan pada Gambar 8. Koefisien gesek pada seluruh rasio memiliki nilai yang berimpit atau tidak memiliki perbedaan signifikan. Koefisien gesek tertinggi dicapai ketika bilangan Reynolds berada pada 9.000.

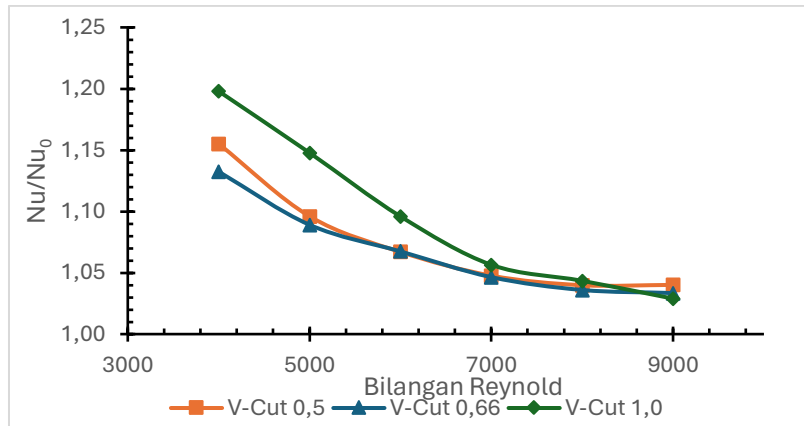
Koefisien gesek pada model validasi yang dinyatakan sebagai basis dibandingkan dengan hasil penelitian ini. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, nilai f/f_0 secara umum meningkat seiring peningkatan bilangan Reynolds. Angka paling kecil dicapai ketika rasio 1,0 dengan nilai f/f_0 sebesar 2,04.



Gambar 5. Perbandingan η pada seluruh kondisi rasio *V-cut*



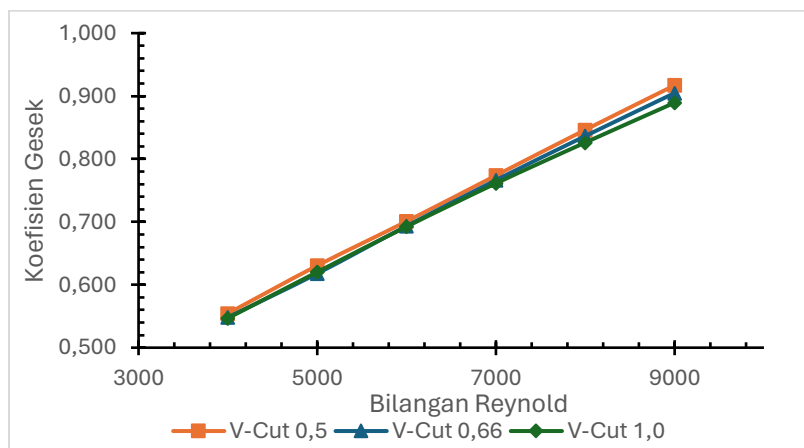
Gambar 6. Perbandingan Bilangan Nusselt seluruh kondisi rasio *V-cut*



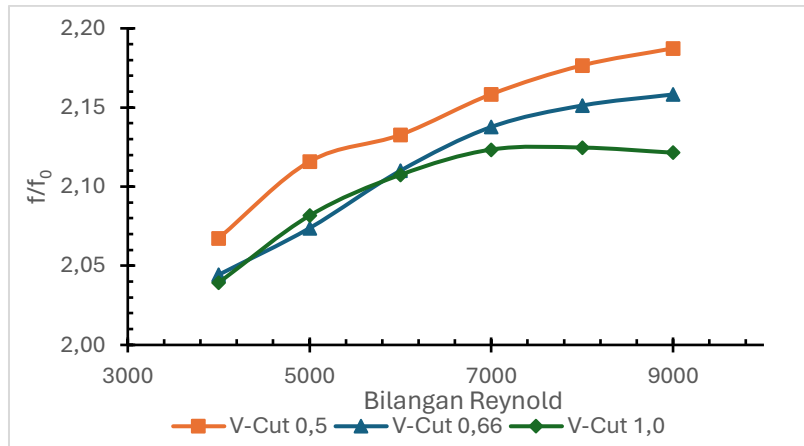
Gambar 7. Perbandingan Nu/Nu₀ pada seluruh kondisi rasio V-cut

Efisiensi termal maksimum yang dapat dicapai oleh suatu sistem terbatas karena adanya perbedaan antara kenaikan bilangan Nusselt dan peningkatan koefisien gesekan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 dan 9. Ketika koefisien gesekan, yang mewakili tingkat gesekan antara fluida dan permukaan, meningkat dalam sistem, hal ini tidak sebanding dengan peningkatan bilangan Nusselt. Bilangan Nusselt yang mencirikan perpindahan panas

konvektif dalam sistem, dan jika diimbangi dengan peningkatan koefisien gesekan yang signifikan, efisiensi termal sistem secara keseluruhan akan terhambat. Hal ini menyiratkan bahwa terdapat peningkatan kehilangan energi yang tidak diinginkan yang disebabkan oleh gesekan, sehingga mencegah sistem mencapai potensi penuhnya.



Gambar 8. Perbandingan Koefisien Gesek pada seluruh kondisi rasio V-cut



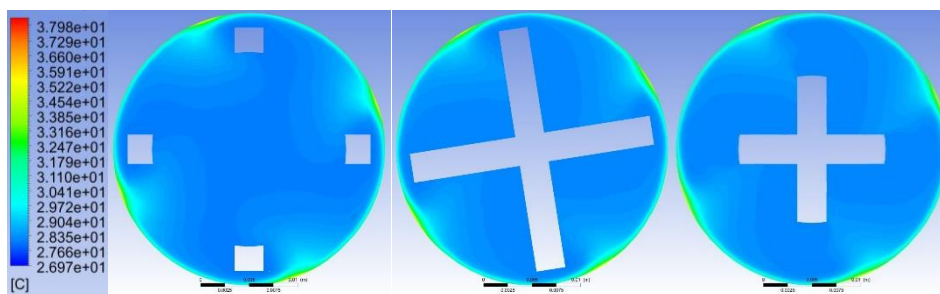
Gambar 9. Perbandingan f/f_0 pada seluruh kondisi rasio $V-cut$

Gambar 10 dan 11 menunjukkan tentang kontur kecepatan dan suhu yang terjadi pada *twisted tape inserts* dengan $V-cut$. Gambar 10 menunjukkan kontur suhu yang terjadi untuk setiap rasio pemotongan dengan mempertahankan bilangan Reynolds yang konstan. Di sisi lain, Gambar 11 menunjukkan kontur kecepatan yang terjadi untuk setiap rasio pemotongan.

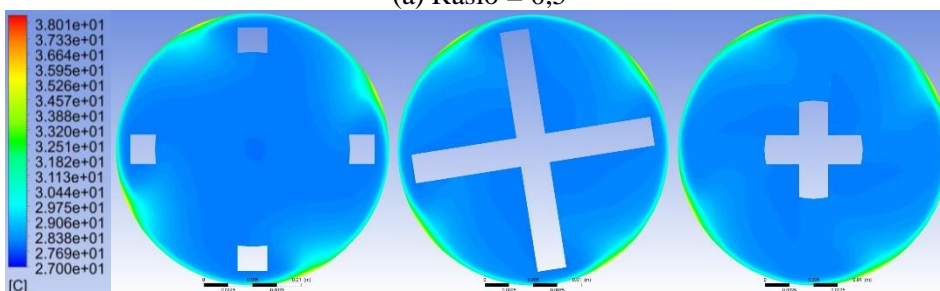
Kedua gambar tersebut dibagi menjadi tiga posisi pengamatan, yang masing-masing disebut posisi 1, 2, dan 3. Posisi 1, yang terletak di sisi kiri gambar, diambil pada bagian tengah *center clear cut*. Posisi 2, yang berada di tengah gambar, diambil pada saat terjadi peralihan antara *center clear cut* dan $v-cut$. Sementara itu, posisi 3, yang berada di sisi kanan gambar, diambil pada bagian tengah tebang $v-cut$.

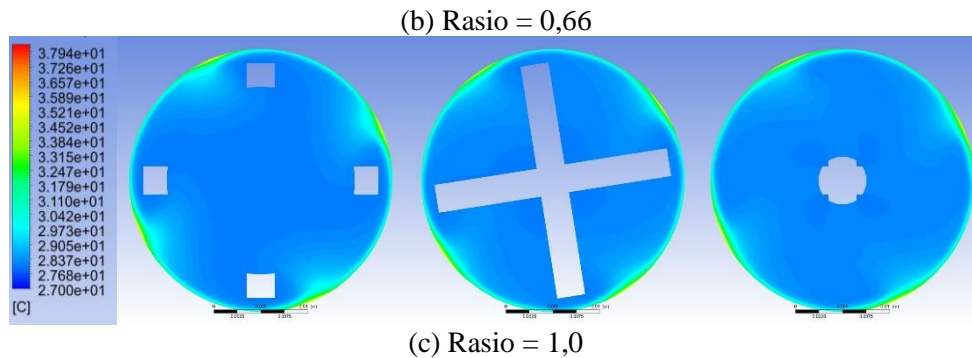
Dari hasil pengamatan terhadap Gambar 10 dan 11, tampak jelas bahwa terjadi fenomena aliran kedua yang disebabkan perlakuan pemotongan pada posisi 3. Dalam Gambar 10 yang menampilkan kontur suhu, terlihat adanya kerusakan pada lapisan batas yang terjadi akibat dari adanya aliran tersebut. Sedangkan dalam Gambar 11 yang menggambarkan kontur kecepatan, terlihat bahwa semakin tinggi rasio pemotongan, maka aliran kedua yang terbentuk semakin meningkat intensitasnya.

Akan tetapi fenomena ini tidak berpengaruh secara signifikan terhadap bilangan Nusselt ketika bilangan Reynolds berada diatas 7.000, yang menggambarkan transfer panas dalam aliran fluida seperti yang terlihat pada Gambar 7.



(a) Rasio = 0,5





Gambar 10. Distribusi Temperatur pada Re = 4.000

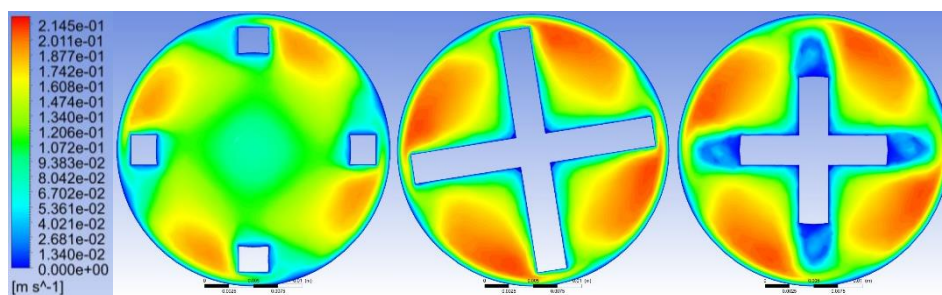
Pada Gambar 8 menunjukkan tidak terjadi perubahan yang signifikan. Hal ini menunjukkan pengaruh rasio *V-cut* tidak mengakibatkan perubahan yang drastis pada besaran gesekan. Dengan nilai gesekan yang berimpit kemungkinan perubahan akan terjadi bila dilakukan variasi pada rasio *center clear cut*. Hal ini juga mengindikasikan perubahan geometris *V-cut* lebih berperan dalam melakukan peningkatan bilangan Nusselt dibandingkan dengan penurunan koefisien gesek.

Gambar 9 menunjukkan bahwa koefisien gesek pada rasio 0,5 memiliki nilai yang tinggi, lebih dari 2,0 kali lipat dibandingkan dengan *plain twisted tape*, karena efek turbulensi dan pemisahan aliran di area *center clear cut*. Pada area ini terbentuk pusaran kecil dan perubahan arah aliran yang tidak teratur, serta pemisahan aliran. Ini menyebabkan peningkatan gaya gesek dan penurunan performa aerodinamis. Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 11, posisi gambar diambil secara potongan melintang pipa agar dapat melihat kontur suhu dan kecepatan.

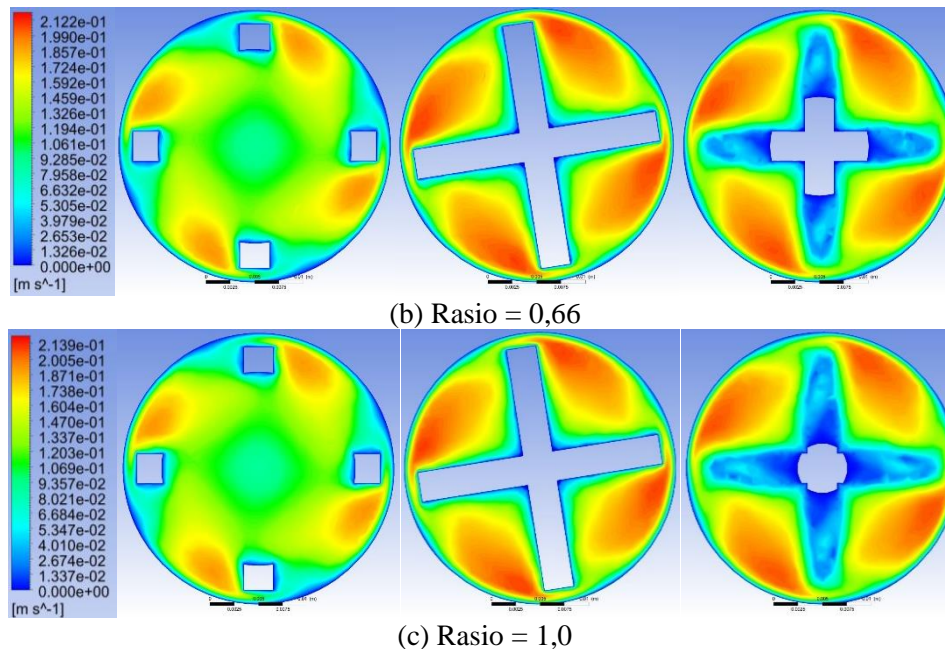
Penelitian yang telah dilakukan oleh Murugesan menghasilkan nilai transfer panas paling tinggi terjadi pada kedalaman

pemotongan yang terbesar. Pada kedalaman pemotongan paling besar terjadi vortisitas tepat setelah pemotongan. Hal ini akan meningkatkan turbulensi dan juga meningkatkan perpindahan panas. Bila dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Murugesan dkk. (Murugesan dkk., 2011), Penelitian ini memiliki karakteristik yang berlawanan untuk variasi kedalaman pemotongan. Peningkatan perpindahan panas terjadi pada kondisi kedalaman pemotongan yang terkecil. Perbedaan ini mungkin lebih disebabkan oleh adanya *center clear cut* pada *twisted tape insert* yang diujikan. Pemotongan pada bagian tengah *twisted tape* menyebabkan berkurangnya vortisitas yang terbentuk bila kedalaman pemotongan diperbesar.

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh He dkk. (He dkk., 2018) pada *twisted tape* dengan bagian tengah dipotong, menghasilkan efisiensi tidak lebih dari 1.0 karena peningkatan perpindahan panas karena pemakaian *twisted tape* tersebut menyebabkan peningkatan gesekan yang sangat signifikan, yakni lebih dari 10 kali dibandingkan dengan f_0 . Hal tersebut juga terjadi pada penelitian ini.



(a) Rasio = 0,5

Gambar 11. Distribusi Kecepatan pada $Re = 9.000$

SIMPULAN DAN SARAN

Peningkatan efisiensi maksimum secara umum mencapai 0,94. Ini disebabkan oleh fakta bahwa peningkatan tidak terjadi perubahan koefisien gesek secara signifikan. Koefisien gesek merupakan faktor yang lebih dominan dibandingkan dengan peningkatan bilangan Nusselt.

Bilangan Nusselt maksimum meningkat menjadi 1,2 yang diperoleh ketika rasio pemotongan 1,0.

Rentang koefisien gesek yang diperoleh memiliki nilai yang tinggi antara 2,0 hingga 2,2 yang terjadi pada rasio pemotongan 0,5. Tingginya nilai koefisien gesek disebabkan oleh munculnya fenomena efek drag dan aerodinamis.

Untuk mengurangi koefisien gesek yang terjadi dapat dilakukan penelitian lebih lanjut terkait pengaruh ketebalan *twisted tape* pada model sisipan yang digunakan. Sementara peningkatan perpindahan panas dapat dilakukan dengan menambahkan nanofluida atau mencari cara untuk meningkatkan perpindahan panas yang dapat merusak lapisan batas pada dinding pipa penukar kalor seperti dengan menggunakan variasi lebar pemotongan V-cut.

DAFTAR PUSTAKA

Abed, A. M., Sh. Majdi, H., Hussein, Z., Fadhil, D., dan Abdulkadhim, A. (2018).

Numerical analysis of flow and heat transfer enhancement in a horizontal pipe with P-TT and V-Cut twisted tape. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12, 749–758.

<https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.10.004>

Bhattacharyya, S., K. Vishwakarma, D., Roy, S., Biswas, R., dan Moghimi Ardekani, M. (2020). Applications of Heat Transfer Enhancement Techniques: A State-of-the-Art Review. In *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers*. IntechOpen.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.92873>

Bhuiya, M. M. K., Chowdhury, M. S. U., Saha, M., dan Islam, M. T. (2013). Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46, 49–57.

<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.012>

Bucak, H., dan Yilmaz, F. (2020). The current state on the thermal performance of twisted tapes: A geometrical categorisation approach. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 153, 107929.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.10792>

9

- C., R. B., P., K., Roy, S., dan Ganesan, R. (2022). A comprehensive review on compound heat transfer enhancement using passive techniques in a heat exchanger. *Materials Today: Proceedings*, 54, 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.541>
- Cengel, Y., dan Ghajar, A. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5th ed.). McGraw Hill.
- Dewan, A., Mahanta, P., Raju, K. S., dan Kumar, P. S. (2004). Review of passive heat transfer augmentation techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 218(7), 509–527. <https://doi.org/10.1243/0957650042456953>
- Eiamsa-ard, S., dan Promvonge, P. (2010). Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape. *Applied Thermal Engineering*, 30(13), 1673–1682. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.026>
- Frank M. White. (2016). *Fluid Mechanics* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ghalambaz, M., Arasteh, H., Mashayekhi, R., Keshmiri, A., Talebizadehsardari, P., dan Yaïci, W. (2020). Investigation of Overlapped Twisted Tapes Inserted in a Double-Pipe Heat Exchanger Using Two-Phase Nanofluid. *Nanomaterials*, 10(9), 1656. <https://doi.org/10.3390/nano10091656>
- Ghalambaz, M., Mashayekhi, R., Arasteh, H., Ali, H. M., Talebizadehsardari, P., dan Yaïci, W. (2020). Thermo-Hydraulic Performance Analysis on the Effects of Truncated Twisted Tape Inserts in a Tube Heat Exchanger. *Symmetry*, 12(10), 1652. <https://doi.org/10.3390/sym12101652>
- Gupta, K., Singh, R. K., dan Tendolkar, M. V. (2020). Modified Twisted Tape Inserts: Significance of Geometric Non-dimensional Parameters (hal. 13–26). <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2647->

3_2

- He, Y., Liu, L., Li, P., dan Ma, L. (2018). Experimental study on heat transfer enhancement characteristics of tube with cross hollow twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering*, 131, 743–749. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.029>
- Lim, K. Y., Hung, Y. M., dan Tan, B. T. (2017). Performance evaluation of twisted-tape insert induced swirl flow in a laminar thermally developing heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 121, 652–661. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.134>
- Liu, S., dan Sakr, M. (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 64–81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.021>
- Liu, X., Li, C., Cao, X., Yan, C., dan Ding, M. (2018). Numerical analysis on enhanced performance of new coaxial cross twisted tapes for laminar convective heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 1125–1136. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.052>
- Manikanta, R. V., Prabhakar, D. V. N., dan Shankar, N. V. S. (2017). Effect of Twisted Tape Insert On Heat Transfer During Flow Through A Pipe Using CFD. *International Journal of Engineering Research and Science*, 3(5), 58–63. <https://doi.org/10.25125/engineering-journal-IJOER-MAY-2017-20>
- Maradiya, C., Vadher, J., dan Agarwal, R. (2018). The heat transfer enhancement techniques and their Thermal Performance Factor. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.10.001>
- Mashoofi, N., Pourahmad, S., dan Pesteei, S. M. (2017). Study the effect of axially perforated twisted tapes on the thermal

- performance enhancement factor of a double tube heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.06.001>
- Mogaji, T. S., Kanizawa, F. T., Bandarra Filho, E. P., dan Ribatski, G. (2013). Experimental study of the effect of twisted-tape inserts on flow boiling heat transfer enhancement and pressure drop penalty. *International Journal of Refrigeration*, 36(2), 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.008>
- Mogaji, T. S., Olapojoye, A. O., Idowu, E. T., dan Saleh, B. (2022). CFD study of heat transfer augmentation and fluid flow characteristics of turbulent flow inside helically grooved tubes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(3), 90. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03299-5>
- Mousavi Ajarostaghi, S. S., Zaboli, M., Javadi, H., Badenes, B., dan Urchueguia, J. F. (2022). A Review of Recent Passive Heat Transfer Enhancement Methods. *Energies*, 15(3), 986. <https://doi.org/10.3390/en15030986>
- Murugesan, P., Mayilsamy, K., dan Suresh, S. (2010). Turbulent Heat Transfer and Pressure Drop in Tube Fitted with Square-cut Twisted Tape. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(4), 609–617. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(10\)60264-9](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(10)60264-9)
- Murugesan, P., Mayilsamy, K., Suresh, S., dan Srinivasan, P. S. S. (2011). Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(3), 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.11.010>
- Nakhchi, M. E., dan Esfahani, J. A. (2019a). Numerical investigation of rectangular-cut twisted tape insert on performance improvement of heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, 138, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.039>
- Nakhchi, M. E., dan Esfahani, J. A. (2019b). Performance intensification of turbulent flow through heat exchanger tube using double V-cut twisted tape inserts. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 141, 107533. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107533>
- Pawan A. Sawarkar; Pramod R. Pachghare; (2015). Experimental Analysis of Augmentation in Heat Transfer Coefficient Using Twisted Tape with Semi-Circular Cut Insert. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(4), 1174–1179.
- Piriyarungrod, N., Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., Pimsarn, M., dan Nanan, K. (2015). Heat transfer enhancement by tapered twisted tape inserts. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 96, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.08.002>
- Ponweiser, K., Linzer, W., dan Malinovec, M. (2004). Performance Comparison Between Wire Coil and Twisted Tape Inserts. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 11(4), 359–370. <https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.v11.i4.140>
- Rana, S., Zunaid, M., dan Kumar, R. (2021). CFD simulation for heat transfer enhancement in phase change materials. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10915–10921. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.006>
- Sarviya, R. M., dan Fuskele, V. (2018). Heat Transfer and Pressure Drop in a Circular Tube Fitted with Twisted Tape Insert Having Continuous Cut Edges. *Journal of Energy Storage*, 19, 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.07.001>
- Saysroy, A., dan Eiamsa-ard, S. (2017). Enhancing convective heat transfer in laminar and turbulent flow regions using multi-channel twisted tape inserts. *International Journal of Thermal*

- Sciences*, 121, 55–74.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.002>
- Saysroy, Anucha, dan Eiamsa-ard, S. (2017). Periodically fully-developed heat and fluid flow behaviors in a turbulent tube flow with square-cut twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering*, 112, 895–910.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.154>
- Seemawute, P., dan Eiamsa-ard, S. (2010). Thermohydraulics of turbulent flow through a round tube by a peripherally-cut twisted tape with an alternate axis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(6), 652–659.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.03.005>
- Sharma, S. K., Vidya, S., dan Srikanth, K. S. (2023). CFD Analysis to Enhance the Heat Transfer Coefficient in Micro-Channels (hal. 589–597).
https://doi.org/10.1007/978-981-16-9523-0_65
- Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., dan Ganji, D. D. (2015). Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 444–469.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.113>
- Thapa, S., Samir, S., Kumar, K., dan Singh, S. (2021). A review study on the active methods of heat transfer enhancement in heat exchangers using electroactive and magnetic materials. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4942–4947.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.382>
- Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, D. P. D. (2017). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th ed.). Wiley.
- Varun, Garg, M. O., Nautiyal, H., Khurana, S., dan Shukla, M. K. (2016). Heat transfer augmentation using twisted tape inserts: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 193–225.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.051>
- Yaningsih, I., Wijayanta, A. T., Miyazaki, T., dan Koyama, S. (2018). V-cut twisted tape insert effect on heat transfer enhancement of single phase turbulent flow heat exchanger (hal. 030038).
<https://doi.org/10.1063/1.5024097>
- Yunus A. Çengel, John M. C. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Zimparov, V. D., Angelov, M. S., dan Petkov, V. M. (2022). Maximum benefits from the use of enhanced heat transfer surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 134, 105992.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105992>