

ANALISIS PERPINDAHAN KALOR PADA *STRAIGHT TUBE DOUBLE V- CUT TWISTED TAPE INSERT* PADA *HORIZONTAL STABILIZER*

¹Winda Partini, ²Gaguk Marausna, ³Farid Jayadi

Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta

Abstrak

Pesawat turboprop kebanyakan melakukan penerbangan di atas 10.000 ft, pada ketinggian ini dapat terjadi icing salah satunya pada bagian *leading edge horizontal stabilizer*. Bentuk gangguan tersebut berupa terjadinya penumpukan bunga es pada *leading edge*. Oleh karena itu *leading edge* dari wing pada *horizontal stabilizer* harus bebas dari kontaminasi. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan variabel *double v-cut twisted tape insert* yang memanfaatkan perpindahan kalor dari heatgun terhadap variabel geometri yang berbeda. Pada penelitian ini akan membandingkan nilai perpindahan kalor dengan penurunan tekanan. Hasil dari penelitian ini, dari ke empat parameter twist ratio menunjukkan bahwa penambahan vortex generator tipe *double v-cut twist ratio 5.7* dengan nilai bilangan Reynold (Re) 4121.75 meningkat 16.61%, bilangan Nusselt (Nu) 15.66 meningkat 13.54%, dapat meningkatkan karakteristik perpindahan kalor sebesar 11.02 Watt pada heater pipa konsentrik. Memiliki nilai rata-rata perpindahan kalor konveksi tertinggi sebesar 24.56 $W/m^2 \cdot K$ dengan peningkatan 13.35% dibandingkan dengan twist 4.8 dan 7, penurunan tekanan (ΔP) dengan nilai 10.14 Pa serta faktor gesekan (f) 0.0412. Hal ini terjadi karena efek dari perbedaan geometri twist yang mempengaruhi intensitas perpindahan panas. Maka geometri twist 5.7 lebih baik dibandingkan geometri twist yang lain.

Kata kunci: kalor, anti icing, horizontal stabilizer, heater, v-cut twisted

Abstract

Turboprop aircrafts mostly fly above 10,000 ft. At this altitude there can be icing, one of which is on the *leading-edge horizontal stabilizer*. The form of the disturbance is in the form of frost accumulation on the *leading edge*. Therefore, the *leading edge* of the wing on the *horizontal stabilizer* must be free from contamination. This study used an experimental method with a variable *double v-cut twisted tape insert* that utilized heat transfer from a heat gun to different geometric variables. This research compared the value of heat transfer with pressure drop. The results of this study, of the four twist ratio parameters, show that the addition of a vortex generator type *double v-cut twist ratio 5.7* with a Reynold (Re) number value of 4121.75 increased by 16.61%, Nusselt number (Nu) 15.66 increased by 13.54%, can improve displacement characteristics. heat of 11.02 Watt on concentric pipe heater. It has the highest average value of convection heat transfer of 24.56 $W/m^2 \cdot K$ with an increase of 13.35% compared to twist 4.8 and 7, pressure drop (ΔP) with a value of 10.14 Pa and friction factor (f) 0.0412. This happens because of the effect of the difference in twist geometry which affects the heat transfer intensity. So 5.7 twist geometry is better than other twist geometries.

Keywords: heat, anti-icing, horizontal stabilizer, heater, v-cut twisted

Pendahuluan

Pesawat turboprop mendapatkan gaya dorong yang dihasilkan oleh *propeller* sedangkan pesawat *tubo fan* dan *turbojet* mendapatkan gaya dorong yang dihasilkan oleh *exhaust* pembakaran. Pesawat memiliki *stabilizer* yang digunakan untuk menstabilkan pergerakan pesawat. *Stabilizer* dibagi menjadi 2, yaitu *vertical stabilizer* dan *horizontal stabilizer*, pada *vertical stabilizer* terdapat *rudder* dan *horizontal stabilizer* terdapat *elevator*. Pesawat turboprop kebanyakan melakukan penerbangan di atas 10.000 ft, pada ketinggian ini dapat terjadi icing salah satunya pada bagian *leading edge horizontal stabilizer*. Hal ini dapat menyebabkan aliran udara tidak berbentuk *streamline* pada *horizontal stabilizer* dan dapat mengganggu pergerakan *elevator*. Karena pentingnya faktor keselamatan, maka perlu dijaga *horizontal stabilizer* dari gangguan yang dapat menyebabkan icing. Oleh karena itu *leading edge* dari wing pada *horizontal stabilizer* harus bebas

¹Email Address : wndprtn@gmail.com

Received 05 Juni 2021, Available Online 30 Juli 2021

dari kontaminasi.

Anti icing system merupakan sistem yang digunakan untuk menjaga *leading edge wing* agar tidak terjadi kontaminasi pada saat pesawat sedang terbang. Selama ini anti *icing* yang menggunakan pemanas atau *heater* yg salah satu sumber energinya dihasilkan dari *bleed air*. Analisa ini difokuskan pada pesawat jenis *engine turboprop*, karena pada pesawat jenis *turbo fan* dan *turbojet* sistem pemanasnya dibantu oleh *exhaust engine*.

Kumar *et al.* (2018) juga melakukan penelitian yang sama tetapi dengan menggunakan nanofluida Fe₃O₄ dengan bilangan Reynolds 16.000 s/d 32.000. Hasil dari penelitian ini bilangan Nusselt tanpa penambahan *twisted tape* sebesar 14,76% dan dengan penambahan *twisted tape* sebesar 38,75%. Pada konsentrasi volume 0,06% dan bilangan Reynolds 30.000 dibandingkan dengan data air, dan hasil faktor gesekan 1.092 kali (tanpa penambahan *twisted tape*) dan 1.251 kali (dengan penambahan *twisted tape*).

Sivakaumar *et al.* (2020) melakukan penelitian yang sama tetapi tidak menggunakan nanofluida dan menambahkan *triangular cut twisted tape* (TCTT) dan *circular cut twisted tape* (CCTT). Perpindahan panas dianalisis dalam kondisi aliran berputar menggunakan simulasi CFD yang digunakan untuk meningkatkan laju perpindahan panas fluida atau laminar. Hasil penelitian ini menunjukkan perbandingan angka Reynolds dan Nusselt, jumlah angka Nusselt pada TCTT memberi nilai yang lebih tinggi dari CCTT.

Naveenkumar *et al.* (2020) melakukan penelitian yang sama dengan penambahan *twisted tape* dan nano fluida Al₂O₃ berbasis air. Percobaan dilakukan dengan menggunakan nanofluida Al₂O₃ dengan konsentrasi volume 0,3% pada batas fluks panas tetap (ϕ). Dengan bilangan Reynolds 500 s/d 20.000. Analisis dilakukan dalam tabung bundar polos dengan penambahan ($Y=6$, $Y=4$) untuk kondisi aliran laminar dan turbulen.

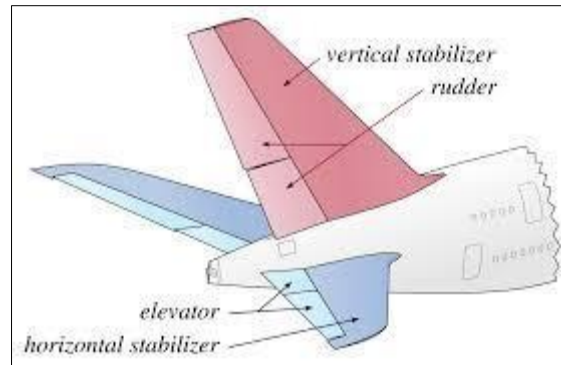
Fagr *et al.* (2020) melakukan penelitian yang sama dengan menambahkan *twisted tape* konfigurasi baru, Percobaan dilakukan dengan cara fluks panas konstan disuplai ke permukaan tabung dan fluida kerjanya adalah udara yang dialirkan dengan aliran turbulen $10000 \leq Re \leq 40000$. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan dalam faktor kinerja termal antara beberapa kasus yang diteliti dari penambahan *tapered twisted tape* dan kasus penambahan *typical twisted tape*. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kinerja termal dari tabung polos dengan penambahan *twisted tape* ($Y = 4$) & Al₂O₃ nanofluida lebih tinggi dari penambahan *twisted tape* ($Y = 6$) & nanofluida Al₂O₃.

Penggunaan alat *heater* dengan variasi *double v-cut twisted tape insert* untuk mencegah terjadi *icing* dengan memanfaatkan kalor dari *bleed air* guna mengetahui karaktersistik perpindahan kalor dan pengaruh geometri *twist* terhadap *pressure drop* dengan menggunakan metode eksperimental.

Landasan Teori

Stabilizer

Stabilizer merupakan bagian dari pesawat yang berfungsi untuk menjaga kestabilan pesawat saat terbang. bidang *stabilizer* pada pesawat ada dua yaitu, *horizontal stabilizer* dan *vertical stabilizer*. *Horizontal stabilizer* merupakan permukaan aerodinamis yang dapat digerakkan untuk memberikan kestabilan pada sumbu lateral. Pada bidang *horizontal* dipasang bidang kontrol *elevator*. Sedangkan *vertical stabilizer* merupakan bagian yang mestabilkan bagian sumbu vertikal dan dipasang bidang kontrol *rudder*.



Gambar 1. Bagian Stabilizer

Sumber: www.wikipedia.org

Airfoil Contamination

Airfoil contamination merupakan sebuah kondisi yang terjadi karena interaksi antara *airfoil* dengan udara yang melewati *airfoil* sehingga terjadinya pembentukan es (*icing*) ataupun bunga es (embun beku) pada bagian depan *airfoil* (*leading edge*). Jika terjadi penumpukan es pada bagian ini akan mengakibatkan aliran laminar yang melewati penampang *airfoil* menjadi aliran turbulen. Kondisi *icing* dapat terjadi pada temperature dibawah 0°C dan di atas -40°C serta pada ketinggian

10.000 *ft* dan dapat terjadi *visible moisture* (uap air yang terlihat seperti kabut, awan dll). Bentuk kontaminasi tersebut jika menumpuk pada *airfoil* akan mengurangi kapasitas daya angkatnya, dikarenakan es yang menumpuk dapat merubah bentuk *airfoil* yang mengganggu aliran udara dan membuatnya menjadi kurang efisien.

Anti Icing

Anti icing merupakan suatu alat yang terdapat pada pesawat yang berfungsi sebagai pencegah terjadinya penumpukan es pada *airfoil*, *window passenger* dan *windshield*. Pada saat ini alat pencegahan terjadinya *icing* yang digunakan pada pesawat terbang komersil yaitu *electric heater* menggunakan sistem elemen pemanas yang dapat memanaskan *leading edge* bila dialiri listrik.

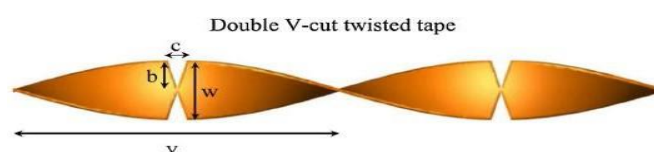
Bleed Air

Bleed Air merupakan udara bertekanan yang dihasilkan oleh *engine* setelah proses kompresi dan sebelum masuk ke dalam *combution chamber*.

Heater

Heater merupakan salah satu jenis dari *heat exchanger* yang berfungsi untuk memanaskan. *Heater* adalah suatu objek yang memancarkan atau menyebabkan suatu bagian lain menerima temperatur yang lebih tinggi. Di kehidupan sehari-hari biasanya digunakan untuk menghasilkan panas. *Heater* yang akan digunakan dalam penelitian ini jenis *v-cut twisted tape insert* dengan beberapa geometri *twist* ditujukan untuk mengetahui efektivitas perpindahan kalor yang dihasilkan, sehingga dapat mencegah terjadinya pembentukan es.

Vortex Generator



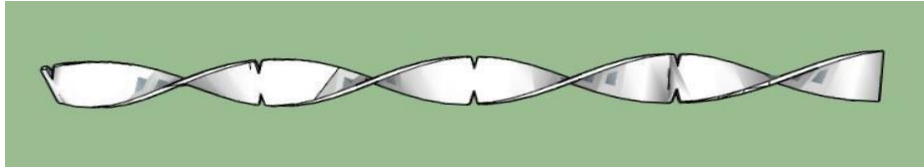
Gambar 2. Geometri Double V-cut Twisted

Menurut Yaningsih dan Istanto, T (2013), untuk menghitung *twist ratio double v-cut* digunakan rumus berikut:

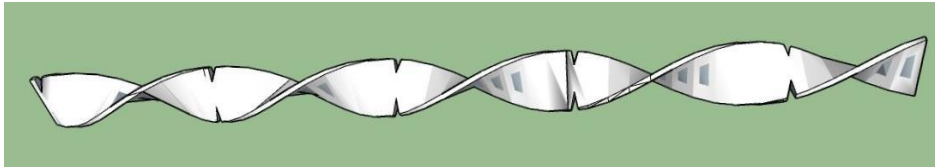
$$Twist\ Ratio = \frac{y}{w} \tag{1}$$

Kemudian untuk menentukan *double V-cut ratio* menggunakan rumus berikut:

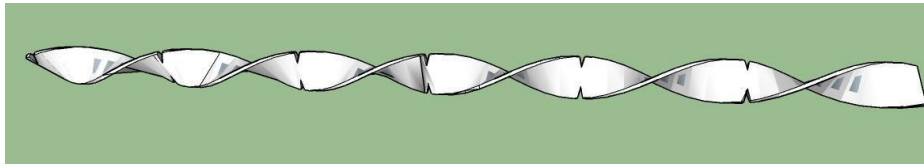
$$V - cut\ Ratio = \frac{b}{c} \tag{2}$$



Gambar 3. *Double V-cut Twisted 1*



Gambar 4. *Double V-cut Twisted 2*



Gambar 5. *Double V-cut Twisted 3*

Tabel 1. Geometri *Double V-cut Twisted Heater*

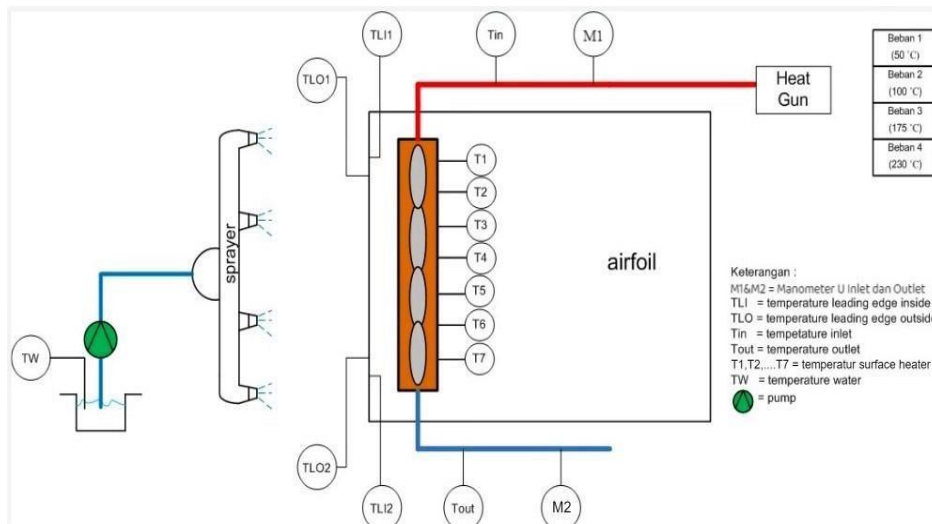
Jenis twist	Jumlah twist	LT (m)	Lt (m)	Dt (m)	δ (m)	w (m)	y (m)	y/w (m)	b (m)	c (m)	Cut ratio (m)
1	3	43.5	43.5	0.19	0.0001	0.15	1.05	0.700	0.005	0.005	0.001
2	4	43.5	43.5	0.19	0.0001	0.15	0.855	0.570	0.005	0.005	0.001
3	5	43.5	43.5	0.19	0.0001	0.15	0.724	0.483	0.005	0.005	0.001

Peningkatan perpindahan panas karena *vortex generator* dihubungkan dengan peningkatan kehilangan tekanan. Kenaikan kehilangan tekanan adalah karena *vortex generator* membentuk gaya seret (*drag*), perubahan gesekan dinding, dan dalam situasi non periodik, perubahan dalam fluks dan momentum. Pada penelitian membandingkan karakteristik perpindahan panas dan faktor gesekan pada *heater* pipa konsentrik dengan penambahan *double v-cut twisted* yang bertujuan membangkitkan aliran turbulen, dimana bentuk dari *v-cut twisted* berguna untuk mengurangi terjadinya *pressure drop*.

Pada penelitian ini *vortex generator double v-cut twisted* dan *prototype* airfoil menggunakan bahan aluminium dan untuk pipa konsentriknya menggunakan pipa tembaga 3/8". Karena nilai konduktivitas dari bahan tersebut cukup baik dalam menghantarkan kalor, ringan serta mudah dibentuk.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimental dengan menggunakan *heatgun* sebagai sumber fluida panas untuk mencegah terjadi icing. Ada beberapa tahapan yaitu proses manufaktur, pengujian, dan analisis data. Pada Gambar 6 menunjukkan skema rangkaian penelitian yang digunakan.



Gambar 6. Skema Rangkaian Penelitian

Penelitian ini menggunakan *heat gun* sebagai sumber udara panas, dialirkan menuju *inlet heater* menggunakan pipa tembaga yang diukur tekanannya menggunakan manometer U. Pada *heater* ini kalor dari gas buang (*heatgun*) dilepas oleh heater ke *leading edge*, kalor dilepaskan digunakan untuk mencegah terjadinya *icing*. Pada heater dan *leading edge* diukur temperturnya menggunakan termokopel. Pada *leading edge* dikondisikan terjadi *icing* menggunakan air yang disemprotkan menggunakan *sprayer* kearah *leading edge*. Setelah udara panas melewati *heater*, kemudian keluar melalui *outlet* pipa tembaga yang diukur menggunakan manometer U.

Bilangan Reynolds (Re)

Menurut Cengel dan C. J. M. (2013) bilangan *Reynolds* adalah bilangan yang tidak berdimensi yang menjelaskan tentang rasio antara gaya inersia terhadap viskos yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya dengan kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran yaitu untuk aliran laminar $Re < 2300$, transisi $Re > 2300 - < 10.000$ dan aliran turbulen $Re > 10.000$. Untuk mengetahui jenis aliran digunakan persamaan Bilangan *Reynolds* dapat ditentukan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho v D t}{\mu} \tag{3}$$

Bilangan Nusselt (Nu)

Menurut Cengel (2006) bilangan *Nusselt* merupakan bilangan yang menunjukkan proses perpindahan panas pada dinding pipa atau lapisan batas (*boundary layer*). Nilai 0,023 merupakan ketetapan dalam rumus bilangan *Nusselt* yang digunakan untuk menghitung proses perpindahan panas dalam *tube*. Sedangkan 0,4 menunjukkan bahwa aliran fluida yang mengalir dalam *tube* adalah fluida panas sehingga menggunakan angka tersebut. Bilangan *Nusselt* dapat ditentukan dengan persamaan:

$$Nu = 0,023 . Re^{0,8} . Pr^{0,4} \tag{4}$$

Perpindahan Kalor (Q)

Menurut Cengel (2006) perpindahan kalor merupakan suatu energi yang dapat berpindah karena adanya perbedaan temperatur. Perpindahan kalor yang terjadi didalam *leading edge* dan rasio *twisted* tergantung pada geometri dan dimensinya. Analisa perpindahan kalor dalam sisi *heater* memperhitungkan banyaknya kalor yang tersalurkan. Perpindahan kalor dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q = m . Cp . (\Delta t) \tag{5}$$

Faktor Gesek (f)

Menurut Cengel (2006) faktor gesek merupakan gaya yang berlawanan arah dengan gerak benda. Gaya terjadi akibat sentuhan antara benda dengan bidang lintasannya, sehingga tercipta suatu gesekan. Dimana nilai 0,79 merupakan ketetapan dalam rumus perhitungan faktor gesekan untuk pipa konsentrik atau pipa lurus tanpa lubang bagian sisi-sisinya. Untuk menghitung gaya gesek digunakan persamaan dari :

Smooth tubes:

$$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (6)$$

Koefisien Perpindahan Kalor konveksi (h)

Menurut Cengel (2006) perpindahan kalor secara konveksi merupakan suatu perpindahan panas melalui aliran zat yang perantaranya ikut berpindah. Pada saat partikel berpindah dan kalor merambat, terjadilah suatu konveksi. Konveksi ini terjadi pada zat cair dan juga gas. Koefisien perpindahan kalor konveksi ini dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$h = \frac{Nu.k}{Dt} \quad (7)$$

Pressure Drop (ΔP)

Menurut Cengel dan C. J. M. (2013) *pressure drop* adalah penurunan tekanan yg terjadi didalam sistem pipa akibat panjangnya lintasan yang dilalui dan adanya gangguan di dalam lintasan yang dilalui.

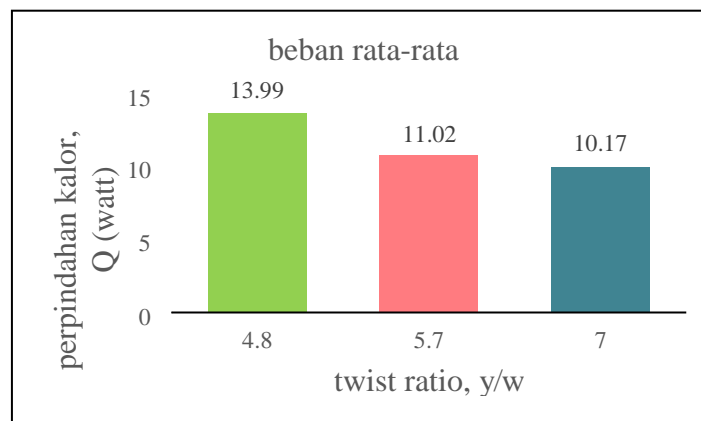
Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung *pressure drop* sebagai berikut:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{Cp.v^2}{2} \quad (8)$$

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh geometri *double v-cut twisted* terhadap perpindahan kalor (Q)

Pada Gambar 7 terlihat bahwa *twist ratio* mempengaruhi perpindahan kalo yang terjadi. Pada *twist ratio* 4.8 memiliki rata-rata perpindahan kalor terbesar. Bila dibandingkan dengan rata-rata perpindahan kalor terkecil pada *twist ratio* 7 terjadi penurunan perpindahan kalor sebesar 37.46%. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh *twist* dapat menciptakan aliran turbulen yang dapat meningkatkan perpindahan kalor pada pipa konsentrik sehingga dapat memaksimalkan terjadi perpindahan kalor.

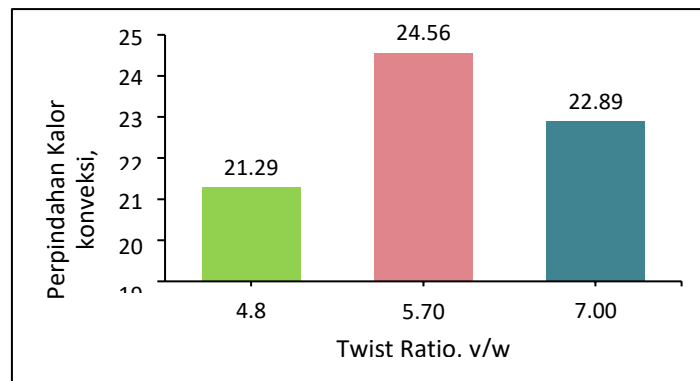


Gambar 7. Grafik pengaruh *twist ratio* terhadap perpindahan kalor pada beban rata-rata

Pengaruh geometri *double v-cut twisted* terhadap perpindahan kalor konveksi (h)

Pada Gambar 8 terlihat bahwa *twist ratio* mempengaruhi perpindahan kalor konveksi yang terjadi. Pada *twist ratio* 4.8 memiliki rata-rata perpindahan kalor konveksi terkecil, kemudian terjadi peningkatan

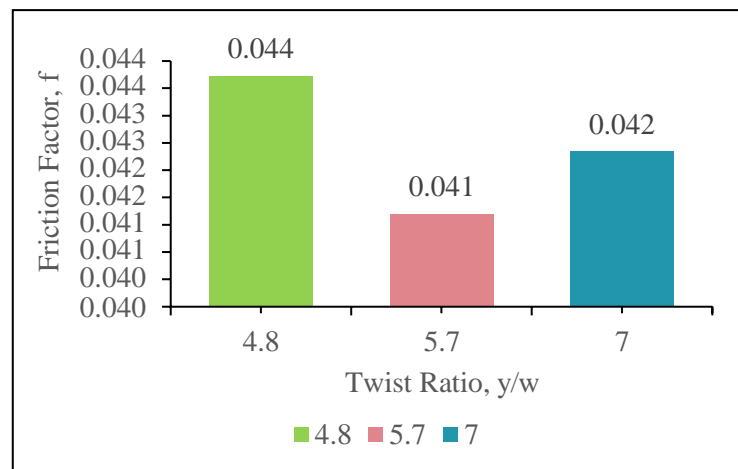
perpindahan kalor konveksi sebesar 13.35%. Pada *twist ratio* 5.7 memiliki nilai rata-rata perpindahan kalor terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh *twist* dapat menciptakan aliran turbulen yang dapat meningkatkan perpindahan kalor pada pipa konsentrik sehingga dapat memaksimalkan terjadi perpindahan kalor secara konveksi.



Gambar 8. Grafik pengaruh *twist ratio* terhadap perpindahan kalor konveksi pada beban rata-rata

Pengaruh geometri *double v-cut twisted* terhadap faktor gesekan (f)

Pada Gambar 9 terlihat bahwa *twist ratio* mempengaruhi faktor gesekan yang terjadi. Pada *twist ratio* 4.8 memiliki rata-rata faktor gesekan terbesar. Bila dibandingkan dengan rata-rata perpindahan kalor terkecil pada *twist ratio* 5.7, kemudian terjadi penurunan faktor gesekan sebesar 6.15%. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh *twist* dapat menciptakan efek turbulensi sehingga memaksimalkan faktor gesekan yang dapat meningkatkan terjadinya penurunan tekanan pada pipa konsentrik.



Gambar 9. Grafik pengaruh *twist ratio* terhadap faktor gesekan pada beban rata-rata

Pengaruh geometri *double v-cut twisted* terhadap *pressure drop* (ΔP)

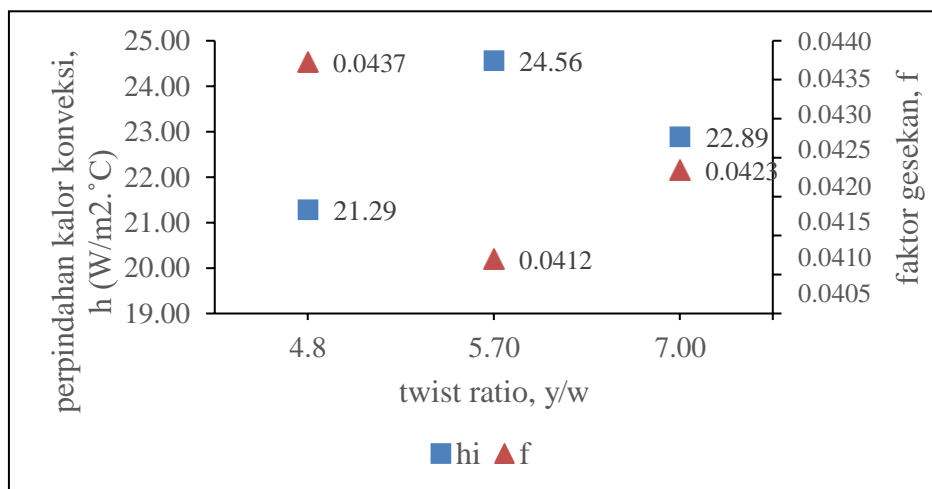
Pada Gambar 10 terlihat bahwa *twist ratio* mempengaruhi *pressure drop* yang terjadi. Pada *twist ratio* 5.7 memiliki rata-rata faktor gesekan terbesar bila dibandingkan dengan yang lain. Hal ini terjadi karena aliran sekunder yang diciptakan oleh geometri *twist* meningkatkan koefisien perpindahan kalor dan juga meningkatkan *pressure drop* di dalam *tube*.



Gambar 10. Grafik pengaruh geometri *double v-cut twist* terhadap *pressure drop* pada beban rata-rata

Korelasi pengaruh faktor gesekan (f) terhadap perpindahan kalor konveksi (h)

Pada Gambar 11 di bawah memperlihatkan nilai rata-rata perpindahan kalor konveksi terbesar ada pada rasio *twist* 5.7 dengan nilai $24.56 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dan nilai faktor gesekan 0.0412 bila dibandingkan dengan perpindahan kalor konveksi terkecil ada pada rasio *twist* 4.8 dengan nilai $21.29 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dan nilai faktor gesekan 0.0437 . jadi semakin kecil faktor gesekan maka akan semakin besar peningkatan kalor konveksi. Hal ini terjadi karena efek dari perbedaan geometri *twist* yang mempengaruhi intensitas perpindahan panas. Maka geometri *twist* 5.7 lebih baik, karena nilai dari faktor gesekan lebih kecil, yang dimana keadaan tersebut akan meningkatkan interaksi perpindahan panas jika dibandingkan geometri yang lain.



Gambar 11 Grafik pengaruh faktor gesekan (f) terhadap perpindahan kalor konveksi (h)

Kesimpulan

1. Pengaruh geometri *double v-cut twist* pada *heater* dapat menciptakan aliran turbulen (Re), meningkatkan proses perpindahan kalor (Nu), meningkatkan perpindahan kalor (Q) dan meningkatkan koefisien perpindahan kalor konveksi (h) pada pipa konsentrik. Dari ke empat parameter tersebut menunjukkan bahwa penambahan *vortex generator* tipe *double v-cut twist* dapat meningkatkan karakteristik perpindahan kalor pada heater pipa konsentrik. Dari tiga geometri *double v-cut twist* tersebut *twist ratio* 5.7 Memiliki nilai bilangan *Reynold* (Re) 4121.75, bilangan *Nusselt* (Nu) 15.66, perpindahan kalor (Q) 11.02 W, dan nilai (h) $24.56 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ adalah yang paling baik bila dibandingkan dengan yang lain.
2. Pengaruh geometri *double v-cut twist* pada *heater* dapat menghambat aliran sehingga memaksimalkan pelepasan kalor secara merata yang terjadi disepanjang pipa konsentrik. Konsekuensi dari kondisi ini dapat meningkatkan *pressure drop* yang terjadi. Pada *double v-cut*

twist ratio 5.7 memiliki rata-rata faktor gesekan terkecil sebesar 0.0412 dan *pressure drop* yang tertinggi sebesar 10.14 Pa, bila dibandingkan dengan yang lain. Jadi dengan penambahan *vortex generator double v-cut twist* dapat menurunkan faktor gesekan dan menaikkan *pressure drop* yang terjadi pada *heater* pipa konsentrik.

Daftar Notasi dan Simbol

Bilangan tak berdimensi

f	= faktor gesekan
Nu	= bilangan <i>Nusselt</i>
Pr	= bilangan <i>Prandtl</i>
Re	= bilangan <i>Reynold</i>

Notasi

A	= luas <i>tube</i> (m ²)
C_p	= <i>specific heat</i> (J/kg.K)
D_t	= diameter <i>tube</i> (m)
h	= koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m ² . °C)
k	= <i>thermal conductivity</i> (W/m. °C)
Q	= kalor yang dilepaskan fluida panas (W)
y	= <i>tape pitch</i> (mm)
w	= <i>tape width</i> (mm)
y/w	= <i>twist ratio</i>
b	= <i>V-cut depth</i> (mm)
c	= <i>V-cut width</i> (mm)
b/c	= <i>cut ratio</i>

Simbol-simbol Yunani

ΔP	= <i>pressure drop</i> (Pa)
ΔT	= selisih temperature (°C)
\dot{m}	= <i>mass flow rate</i> (kg/s)
ρ	= <i>density of air</i> (kg/m ³)
ν	= <i>kinematic viscosity</i> (m ² /s)
μ	= <i>dynamic viscosity</i> (m ² /s)

Daftar Pustaka

- Cengel, Y. A. (2006). A Practical Approach. In *Heat Transfer* (Vol. 37, Issue 9, pp. 61–65).
- Cengel, Y. A. & C. J. M. (2013). Fundamentals and Applications. In *Fluid Mechanics* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699).
- Fagr, M. H., Rishak, Q. A., & Mushatet, K. S. (2020). Performance evaluation of the characteristics of flow and heat transfer in a tube equipped with twisted tapes of new configurations. *International Journal of Thermal Sciences*, 153(February), 106323. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106323>.
- Ravi Kumar, N. T., Bhramara, P., Kirubeil, A., Syam Sundar, L., Singh, M. K., & Sousa, A. C. M. (2018). Effect of twisted tape inserts on heat transfer, friction factor of Fe₃O₄ nanofluids flow in a double pipe U-bend heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 95, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.03.020>.
- Sivakumar, K., Rajan, K., Mohankumar, T., & Naveenchnadran, P. (2020). Analysis of heat transfer characteristics with triangular cut twisted tape (TCTT) and circular cut twisted tape (CCTT) inserts. *Materials Today: Proceedings*, 22(xxxx), 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.212>.
- Naveenkumar, R., Ramesh Kumar, S., Giridharan, R., & Senthil Kumaran, S. (2020). Thermal Performance Enhancement in a Plain Tube fitted with perforated twisted tape insert using water based Al₂O₃ Nanofluid. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2274–2282. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.348>.