

STUDI EKSPERIMENTAL *HEAT TRANSFER* PADA *HEAT EXCHANGER* DENGAN METODE PASIF GUNA MENGATASI ICING PADA *PISTON ENGINE*

¹Stefanus Fendy Pradana, ²Gaguk Marausna, ³Farid Jayadi

Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta

Abstrak

Heat exchanger merupakan suatu alat yang dimana terjadi perpindahan panas diantara dua fluida atau lebih pada temperatur yang berbeda, dimana fluida tersebut keduanya mengalir didalam sistem. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi pitch recoil vortex generator terhadap koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U_o), penurunan pressure drop (ΔP) dan efektivitas (ϵ) pada *heat exchanger*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental dengan membuat prototype, mensimulasikan sebuah alat *heat exchanger* yang memanfaatkan gas buang mesin genset sebagai pencegah icing pada karburator piston engine. Vortex generator yang digunakan pada penelitian ini berupa recoil ukuran 1.5 cm, 2.5 cm dan 3.5 cm serta twisted empat dibuat konstan guna menghasilkan aliran sekunder. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan geometri vortex generator berupa variasi recoil dan twisted insert di dalam pipa konsentrik dapat menciptakan aliran sekunder berupa turbulen dan memaksimalkan perpindahan kalor ke media yang bertemperatur lebih rendah dalam hal ini adalah udara di shell serta dapat memaksimalkan pelepasan kalor pada fluida bertemperatur tinggi dari gas buang, sebaliknya terjadi penyerapan kalor secara maksimal juga di fluida yang bertemperatur rendah pada shell. Maka kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan geometri variasi pitch recoil vortex generator dapat mempengaruhi koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U_o) dengan hasil perhitungan menunjukkan pada rata-rata ratio 0.85 menghasilkan sebesar $13 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, ratio 1.31 sebesar $9.4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dan ratio 1.61 sebesar $8.9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, penurunan pressure drop (ΔP) dengan hasil perhitungan menunjukkan rata-rata ratio 0.85 menghasilkan sebesar 21 Pa, ratio 1.31 sebesar 19 Pa dan ratio 1.62 sebesar 18 Pa dan efektivitas (ϵ) pada *heat exchanger* dengan hasil perhitungan menunjukkan rata-rata ratio 0.85 menghasilkan sebesar 70.6%, ratio 1.31 sebesar 66.1% dan ratio 1.62 sebesar 65.5%.

Kata kunci : icing, *heat exchanger*, vortex generator, prototype

Abstract

The *heat exchanger* is a device where there's heat transfer between two fluids or more at different temperatures, where the fluid is flowing in the system. The purpose of this research is to determine the effect of the influence of variations in pitch recoil vortex generator against the heat transfer coefficient is thorough (U_o), the decrease in pressure drop (ΔP), and effectiveness (ϵ) of the *heat exchanger*. The method used in this research is experimental with making a prototype, to simulate a tool *heat exchanger* utilizing the exhaust gas of the engine- generator set as the prevention of icing in carburetor piston engines. The vortex generator used in this research form of recoil is the size of 1.5 cm, 2.5 cm and 3.5 cm as well twisted four made constant to produce secondary flow. The result showed that the change in geometry of the vortex generator form the variation of recoil and twisted insert in the pipe concentric can create a secondary flow in from turbulence and maximize heat transfer to the media of lower temperature in this case air in the shell an can maximize the heat release in the fluid with high temperature from the exhaust gas, the opposite happens to the absorption of heat by the maximum also in fluid the low temperature on the shell. Then the conclusion of this research shows that changes in the geometry variations of the pitch recoil vortex generator can effect the coefficient oh heat transfer thoroughly (U_o) with the calculation result show the average ratio of 0.85 produces $13 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, ratio 1.31 produces $9.4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ and ratio 1.61 produces $8.9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, the decrease in pressure drop (ΔP) with the calculation result show the average ratio of 0.85 produces 21 Pa, ratio 1.31 produces 19 Pa and ratio 1.62 produces 18 Pa, and effectiveness (ϵ) of the *heat exchanger* with the calculation result show the average ratio of 0.85 produces 70.6%, ratio 1.31 produces 66.1% and ratio 1.62 produces 65.5%.

Keywords : icing, *heat exchanger*, vortex generator, prototype

¹ Email Address : stefanusfendy@gmail.com

Received 05 Juni 2021, Available Online 30 Juli 2021

Pendahuluan

Pesawat terbang merupakan alat transportasi yang sering digunakan untuk menempuh jarak jauh dengan waktu yang relatif singkat. Dalam hal ini, faktor keselamatan merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan. Baik sebelum melakukan penerbangan, selama penerbangan dan setelah melakukan operasi penerbangan. Hal yang dapat menyebabkan terjadinya kecelakaan pada pesawat salah satunya terjadinya pembentukan es atau *icing* yang terjadi pada komponen *piston engine* tepatnya karburator.

Icing pada karburator dapat mempengaruhi efisiensi dan performa dalam berbagai hal termasuk pada performa *piston engine* yang dapat menyebabkan kematian atau tidak berfungsinya karburator pada saat penerbangan. Dari terjadinya *icing* pada karburator dapat dicegah dengan memanfaatkan gas buang dari *exhaust* pada *piston engine*.

Kasmara dan Marausna (2020) menerapkan sistem *anti icing* dengan memanfaatkan kalor bertemperatur tinggi dari gas buang mesin pesawat. Dari hasil eksperimental yang telah dilakukan menunjukkan bahwa terjadi aliran turbulen sehingga dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas sehingga mempengaruhi perubahan parameter kinerja pemanas. Pada penerapan lain gas buang dapat dimanfaatkan pada alat *heat exchanger* yang menggunakan kalor bertemperatur tinggi dan rendah sebagai pemanasannya.

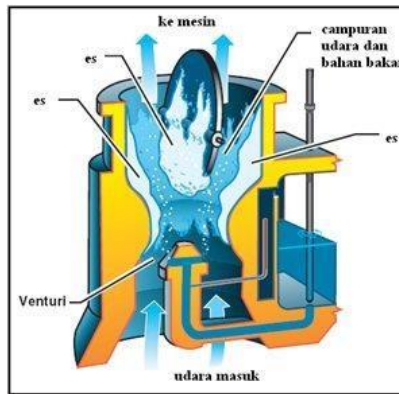
Kasmara *et al* (2016) efektivitas alat penukar kalor (*heat exchanger*) dengan variasi *helical coil tube* dapat dimanfaatkan dengan menggunakan panas dari gas buang mesin diesel dapat mempengaruhi dari diameter kumparan *helical coil tube*, jarak kumparan *helical coil tube* dan putaran mesin diesel. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan *shell helical coil heat exchanger* dapat memaksimalkan pemanfaatan limbah gas untuk memanaskan solar pada berbagai putaran operasional mesin diesel. Pada penelitian yang telah terjadi pada alat *heat exchanger* memiliki beberapa tipe dengan masing – masing variasi variable yang dapat dimanfaatkan sebagai alat penukar kalor.

Pemanfaatan udara gas buang mesin genset dan udara dari *blower* serta *fan* sebagai fluida yang bekerja pada alat *heat exchanger* guna mengetahui seberapa efektifitas dan kemampuan menukar kalor pada alat ini dengan menggunakan metode eksperimental.

Landasan Teori

Karburator

Prinsip kerja karburator pada dasarnya bekerja menggunakan *Prinsip Bernoulli*, dimana semakin cepat udara bergerak maka semakin kecil tekanan statisnya, namun makin tinggi tekanan dinamisnya. Karburator dapat terjadi pembentukan es atau *icing* akibat pengaruh pada ketinggian, suhu serta kerapatan udara yang terjadi pada pesawat. Pembentukan es dapat mengakibatkan tidak berfungsinya karburator sebagai tempat bercampurnya *fuel* dengan udara yang masuk. Kondisi *icing* didefinisikan bisa terjadi pada suhu di bawah 10°C dan diatas -40°C dan terdapat *visible moisture* (uap air yang terlihat seperti kabut, awan dll). Jadi kalau cuaca berkabut atau hujan dan suhu berada dibawah 10°C maka siap – siaplal untuk menghadapi *icing condition*. Dari kondisi *icing* dapat menyebabkan kondisi yang berbahaya termasuk pada komponen *carburetor*, untuk pesawat dengan mesin piston dapat terjadi *icing* akibat es yang terbentuk di *carburetor* akan menghambat aliran udara dan bahan bakar yang akan masuk silinder.



Gambar 1. Carburetor icing
Sumber : Fadjar Nugroho (2008)

Metode pasif

Metode pasif merupakan metode yang meredam suatu aliran dengan lintasan yang pendek. Alat-alat perekayasa aliran *vortex* membentuk sebuah kelompok penting dari teknik peningkatan perpindahan panas pasif. Variasi *pitch recoil* dengan *twisted* merupakan gangguan aliran yang digunakan dalam sistem penukar kalor ini. *Heat exchanger* dengan tipe yang sama yaitu *shell* dan *tube* merupakan salah satu metode yang dipergunakan pada pengujian lain dengan perbedaan pada *vortex generator* serta aliran yang digunakan pada penelitian.. Alat *heat exchanger* penelitian inilah yang dipergunakan pada metode pasif dengan menggunakan dua fluida berbeda dan temperatur berbeda, begitu juga aliran yang dipergunakan yaitu aliran *counter flow*.

Vortex generator

Peningkatan perpindahan panas dengan pembangkitan *vorteks* adalah sebuah metode pasif yang mengandalkan pada pembangkitan dengan sengaja *streamwise vortices* untuk meningkatkan perpindahan panas. *Vorteks* memiliki dua fitur yang meningkatkan proses transport, yaitu *vorteks* berputar-putar dan menggoyahkan (destabilisasi) medan aliran, sehingga aliran laminar yang stabil akan berubah menjadi turbulen.

Vortex generator yang digunakan berupa variasi *pitch recoil* dan *twisted* (empat), dimana pada *recoil* menggunakan kawat berbahan besi sedangkan pada *twisted* berbahan aluminium. Penggunaan material tersebut dikarenakan sebagai penghantar panas yang cukup pada penelitian ini. Dengan penambahan *vortex generator* diharapkan akan meningkatkan aliran turbulen yang terjadi pada *tube*.

Perpindahan kalor

Perpindahan kalor yang terjadi pada alat penukar kalor *shell side and tube side* sangat tergantung pada bentuk geometri dan dimensinya. Analisa perpindahan kalor dalam sisi *tube side* dilakukan dengan memperhitungkan jumlah kalor yang diserap oleh bahan bakar di dalam *tube side*.

$$Q = m \cdot Cp \cdot (\Delta t) \quad (1)$$

Reynold number

Bilangan reynolds adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viskos* yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk menentukan jenis aliran yang berbeda, seperti laminar dengan ketentuan nilai Bilangan Reynolds

< 2300 , transisi $2300 \text{ Re} < 10000$ dan turbulen < 10000 bilangan ini merupakan salah satu bilangan tak berdimensi.

$$Re = \frac{v d}{\nu} \quad (2)$$

Bilangan *nusselt*

Bilangan *nusselt* adalah rasio resistansi termal konduksi terhadap resistansi termal konveksi dari fluida. Menurut Schmidt's (1987), jika alirannya di dalam *tube* adalah turbulen maka nilai bilangan *nusselt* dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \quad (3)$$

Koefisien perpindahan kalor

Nilai koefisien perpindahan kalor permukaan dalam dan luar *tube*, menurut Cengel (2015) dapat ditentukan dengan persamaan;

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d} \quad (4)$$

Koefisien perpindahan kalor menyeluruh

Cengel (2015) menjelaskan nilai koefisien perpindahan kalor menyeluruh dipengaruhi oleh faktor pengotoran (*fouling factor*) yang merupakan resistansi atau tahanan.

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_{cold}} + \frac{1}{h_{hot}}} \quad (5)$$

Metode NTU (*Number of Transfer Unit*)

Menurut Cengel (2015), parameter yang menunjukkan tentang ukuran dari suatu alat penukar kalor adalah NTU (*number of transfer units*) dapat ditentukan dengan persamaan;

$$NTU = \frac{U_o A_o}{C_{min}} \quad (6)$$

$$\text{Untuk fluida dingin} \quad : C_c = \dot{m}_c C p_c \quad (7)$$

$$\text{Untuk fluida hot} \quad : C_h = \dot{m}_h C p_h \quad (8)$$

Efektivitas alat penukar kalor

Cengel (2015) menjelaskan analisis akan lebih mudah dilakukan dengan menggunakan metode yang berdasarkan atas efektivitas penukar kalor dalam memindahkan sejumlah kalor tertentu. Metode efektivitas ini juga mempunyai beberapa keuntungan untuk menganalisa persoalan dimana harus membandingkan berbagai jenis penukar kalor guna memilih jenis yang terbaik untuk melaksanakan sesuatu tugas pemindahan kalor tertentu.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - c \exp[-NTU(1-c)]} 100\% \\ &= \frac{C_{min}}{C_{maks}} \end{aligned} \quad (9)$$

Penurunan tekanan (*pressure drop*)

Kakac (2002) menjelaskan *pressure drop* atau penurunan tekanan yang terjadi pada *tube* karena

faktor gesekan yang terjadi pada aliran.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_t} \rho \frac{V_h^2}{2} \quad (10)$$

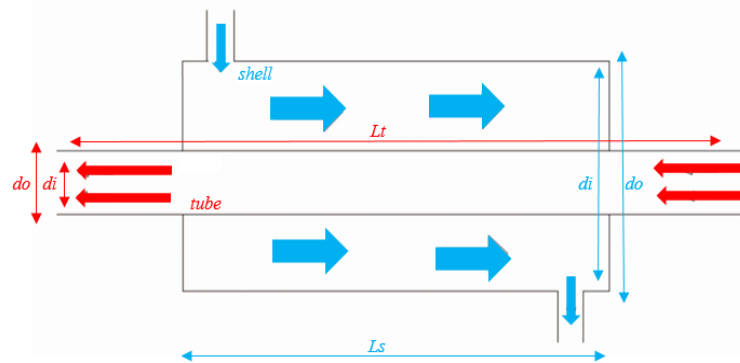
Faktor gesekan yang terjadi pada tube side dengan aliran turbulen menurut Srinivasan (1970) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (11)$$

dimana syarat: $10^4 < Re < 10^6$

Metode Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimental yaitu membuat *prototype* dengan mensimulasikan sebuah alat *heat exchanger* yang memanfaatkan gas buang mesin genset sebagai pencegah *icing* pada karburator *piston engine*. Penelitian yang dilakukan yaitu menggunakan variabel bebas, dimana variabel bebas ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3

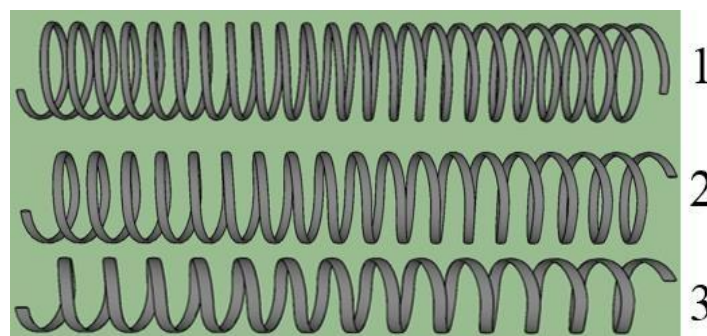


Gambar 2. Penampang *heat exchanger*

Tabel 1. Karakteristik geometri *heat exchanger*

Geometri	L (m)	d_i (m)	d_o (m)	T (m)
<i>tube</i>	0.43	0.08255	0.0886	0.00605
<i>Shell</i>	0.6	0.0252	0.2145	0.00375

Adapun bentuk *recoil* dan *twist* pada variabel bebas :

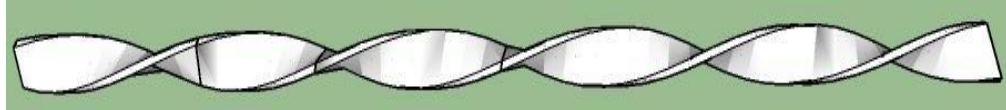


Gambar 3. Penampang *recoil*

Tabel 2. Karakteristik geometri recoil

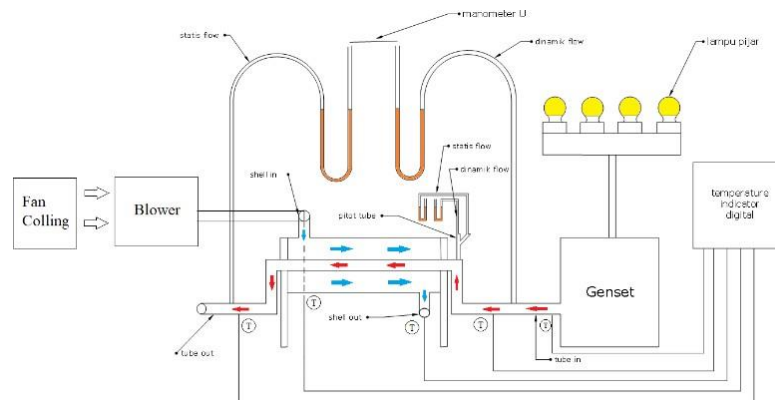
No. Coil	L_{re} (m)	n_{re} (m)	P_{re} (m)	D_{ire} (m)	D_{ore} (m)	t_{re} (m)	P/d
1	0.43	22	0.015	0.0161	0.0177	0.0055	0.85
2	0.412	14	0.025	0.0161	0.0177	0.003	1.31
3	0.442	10.5	0.035	0.0161	0.0177	0.00325	1.69

Dengan *twist*:

**Gambar 4. Penampang *twist*****Tabel 3. Karakteristik geometri *twist***

No.	L_{tw} (m)	W_{tw} (m)	t_{tw} (m)	P_{tw} (m)
1.	0.435	0.015	0.007	0.125

Penelitian ini menggunakan skema perencanaan guna mempermudah untuk memahami pengambilan data, berikut skema penelitian:

**Gambar 5. Skema instalasi rangkaian pengujian**

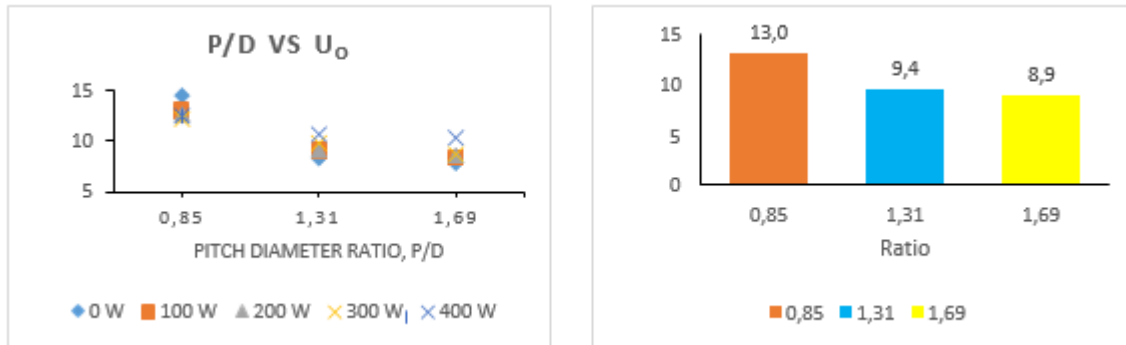
Heat exchanger yang memanfaatkan udara panas dari gas buang dari mesin genset dan udara dingin dari *blower* dengan tambahan *fan*. Gas buang dari genset mengalir melewati pipa yang terhubung dengan *tube* sedangkan udara dingin yang berasal *blower* dan *fan* mengalir melewati *shell* yang sudah terhubung dengan pipa. Pemanfaatan *heat exchanger* ini yang memindahkan kalor dari fluida bertemperatur tinggi ke fluida bertemperatur rendah. Dengan menggunakan beban lampu 100 W, 200 W, 300 W dan 400 W guna mensimulasikan kondisi-kondisi pada pesawat yang tidak konstan contohnya pada *piston engine*. Pada penelitian ini menggunakan manometer U yang terdapat pada *tube in* dan *tube out* untuk mengetahui tekanan pada *shell in* dan *shell out* sehingga mengetahui kecepatan aliran yang diukur menggunakan anemometer. Pada suhu menggunakan lima termokopel yang terpasang pada genset (gas buang), *tube in*, *tube out*, *shell in* dan *shell out*. Data mentah yang di dapat pada peneliiian ini yaitu T_{hi} , T_{ho} , T_{ci} , T_{co} , T_{genset} , V_h dan V_c . Sehingga data mentah yang didapat saat eksperimental dapat dikelola hingga mendapatkan data yang di inginkan.

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh variasi *pitch recoil vortex generator* terhadap koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U_o)

Pada Gambar 6 memperlihatkan semakin meningkat rasio *pitch* diameter maka terjadi penurunan

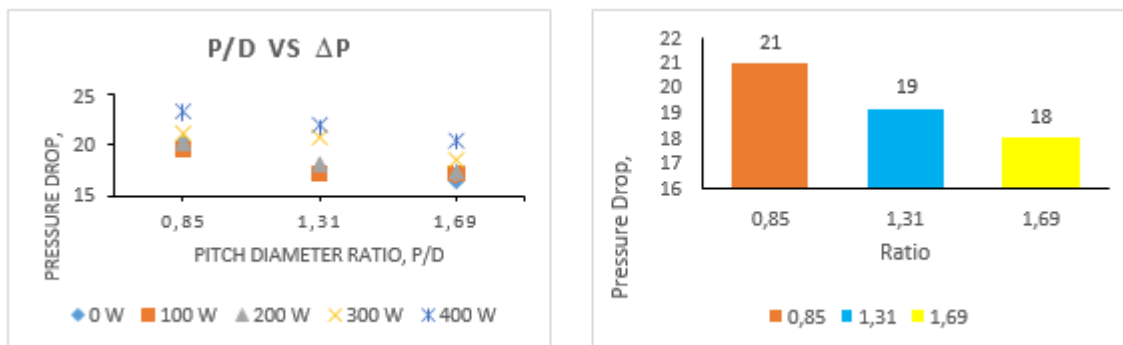
pada koefisien perpindahan kalor menyeluruh. Terlihat koefisien perpindahan kalor menyeluruh terbesar terjadi pada rasio *pitch* diameter 0.85 sedangkan terkecil terjadi pada rasio *pitch* diameter 1.69. Penurunan koefisien perpindahan kalor menyeluruh di pengaruhi oleh koefisien perpindahan kalor konveksi pada sisi luar (h_{cold}) serta koefisien perpindahan kalor konveksi pada sisi dalam (h_{hot}). Hal ini menunjukkan pengaruh *recoil* dengan *twisted* mempengaruhi penurunan koefisien perpindahan kalor menyeluruh.



Gambar 6. Grafik koefisien perpindahan kalor menyeluruh

Pengaruh variasi *pitch recoil vortex generator* terhadap penurunan *pressure drop* (ΔP) di dalam *tube*

Pada Gambar 7 memperlihatkan semakin meningkat rasio *pitch* per diameter mengalami penurunan pada *pressure drop* pada beban 0 W, 100 W, 200 W, 300 W dan 400 W. Terlihat *pressure drop* pada beban rata-rata terbesar terjadi pada rasio *pitch* diameter 0.85 sedangkan terkecil terjadi pada rasio *pitch* diameter 1.69. Hal ini menunjukkan semakin terjadinya penurunan *pressure drop* pada gas buang dapat mengalir secara linear, aliran tersebut dapat terlihat pada Bilangan Reynolds pada sisi luar maupun dalam yang terjadi penurunan. Penurunan *pressure drop* terjadi akibat pengaruh dari variasi *pitch recoil* dan *twisted*.

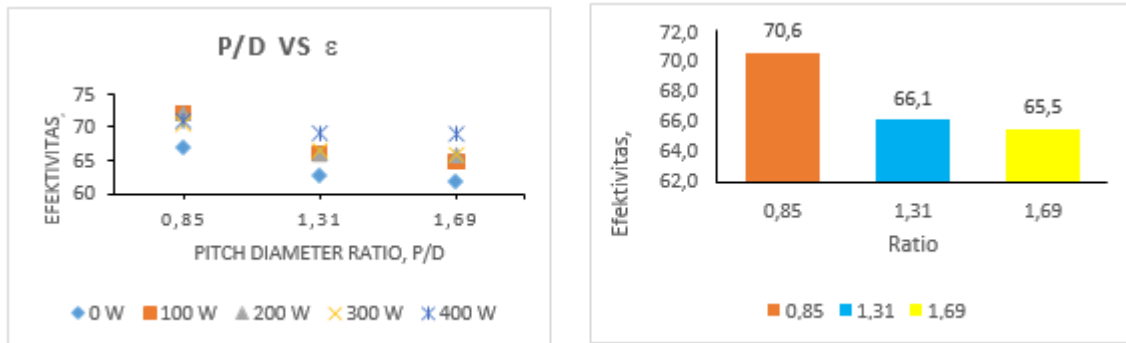


Gambar 7. Grafik *pressure drop*

Pengaruh variasi *pitch recoil vortex generator* terhadap efektifitas (ϵ)

Gambar 8 memperlihatkan semakin meningkat rasio *pitch* diameter maka terjadi penurunan pada efektifitas. Terlihat efektifitas terbesar terjadi pada rasio *pitch* diameter 0.85 sedangkan terkecil terjadi pada rasio *pitch* diameter 1.69. Hal ini menunjukkan pengaruh variasi *recoil* dengan *twisted* mempengaruhi penurunan efektifitas. Variasi geometri pada *recoil* dengan *twisted* mempengaruhi nilai dari NTU sebagai alat penukar kalor sehingga terjadi penurunan pada setiap *ratio* efektifitas. Efektivitas mempengaruhi suatu alat *heat exchanger* sebagai pencegah *icing* karena semakin besar efektifitas suatu alat maka semakin memperkecil pula kegagalan pada alat tersebut dalam

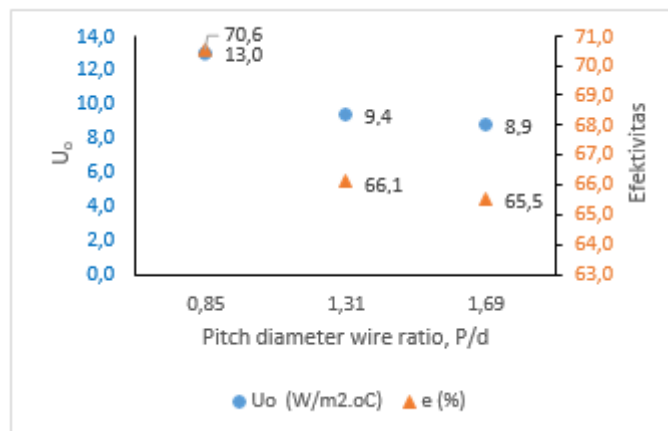
hal ini *heat exchanger*. Efektifitas mempengaruhi berapa besar efektif suatu alat yaitu *heat exchanger*. Hasil diperoleh secara pengolahan data yang telah didapatkan dan secara teoritis bahwa *heat exchanger* tipe *shell* dan *tube* dapat mencegah terjadinya pembentukan es (*icing*) sebesar $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan efektifitas sebesar 70.6%.



Gambar 8. Grafik efektifitas

Hubungan variasi *pitch recoil vortex generator* terhadap koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U_o) dengan efektifitas (ϵ)

Pada Gambar 9 memperlihatkan pada *pitch* diameter *wire ratio* (P/d) 0.85 dengan koefisien kalor menyeluruh (U_o) sebesar $13.0\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ dan efektifitas 70.6% merupakan yang terbaik dari P/d 1.31 dan 1.69. Hal ini terjadi karena pengaruh kerapatan *recoil* sebesar 1.5 cm dengan kombinasi *twisted 4* dapat meningkatkan koefisien perpindahan kalor menyeluruh pada *heat exchanger*, menciptakan aliran turbulen sekunder dan memaksimalkan perpindahan kalor.



Gambar 9. Grafik hubungan variasi *pitch recoil vortex generator* terhadap koefisien perpindahan kalor menyeluruh dengan efektifitas

Kesimpulan

1. Pengaruh perubahan geometri *vortex generator* berupa variasi *recoil* dan *twisted insert* di dalam pipa konsentrik dapat menciptakan aliran sekunder berupa turbulen dan memaksimalkan perpindahan kalor ke media yang bertemperatur lebih rendah dalam hal ini adalah udara di *shell*. Hasil perhitungan menunjukkan pada rata-rata *ratio* 0.85 menghasilkan sebesar $13\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$, *ratio* 1.31 sebesar $9.4\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ dan *ratio* 1.61 sebesar $8.9\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$. Jadi dapat disimpulkan bahwa perubahan geometri variasi *pitch recoil vortex generator* dapat mempengaruhi koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U_o) pada *heat exchanger*.
2. Pengaruh penambahan variasi *pitch recoil* dengan *twisted insert vortex generator* di dalam

pipakonsentrik dapat mengganggu aliran sehingga aliran dapat berubah dari laminar menjadi turbulen. Hasil perhitungan menunjukkan rata-rata *ratio* 0.85 menghasilkan sebesar 21 Pa, *ratio* 1.31 sebesar 19 Pa dan *ratio* 1.62 sebesar 18 Pa. Efek aliran turbulen meningkatkan gesekan pada penampang pipa sehingga menurunkan *pressure drop* yang terjadi pada pipa konsentrik yang memaksimalkan perpindahan kalor.

3. Pengaruh penambahan variasi *pitch recoil* dengan *twisted insert vortex generator* di dalam pipa konsentrik memaksimalkan pelepasan kalor pada fluida bertemperatur tinggi dari gas buang, sebaliknya terjadi penyerapan kalor secara maksimal juga di fluida yang bertemperatur rendah pada *shell*. Jadi dapat disimpulkan bahwa penambahan variasi *pitch recoil* dengan *twisted insert vortex generator* dapat meningkatkan efektivitas *heat exchanger*. Pada penelitian ini performa yang terbaik adalah *heat exchanger* dengan penambahan variasi *pitch recoil* dengan *twisted insert vortex generator* dengan rasio *pitch* diameter (P/d) 0.86.

Daftar Notasi dan Simbol

Bilangan tak berdimensi

Nu_h	: bilangan Nusselt di dalam <i>tube</i>
Nu_c	: bilangan Nusselt di luar <i>tube</i>
Re_h	: bilangan Reynolds di dalam <i>tube</i>
Re_c	: bilangan Reynolds di luar <i>tube</i>
Pr	: bilangan Prandtl di dalam <i>tube</i>
f	: faktor gesekan
P/d	: <i>pitch</i> per diameter

Notasi

Q	: kalor yang dilepaskan atau diterima (W)
Q_h	: kalor yang dilepaskan fluida panas (W)
Q_c	: kalor yang dilepaskan fluida dingin (W)
\dot{m}_h	: laju aliran massa gas buang (kg/s)
\dot{m}_c	: laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
Cp_h	: kalor jenis gas buang (J/kg °C)
Cp_c	: kalor jenis bahan bakar (J/kg °C)
T_{hi}	: temperatur gas buang masuk <i>shell</i> (°C)
T_{ho}	: temperatur gas buang keluar <i>shell</i> (°C)
T_{ci}	: temperatur bahan bakar masuk <i>tube</i> (°C)
T_{co}	: temperatur gas buang keluar <i>tube</i> (°C)
h_{hot}	: koefisien perpindahan kalor permukaan dalam <i>tube</i> (W/m ² .C)
h_{cold}	: koefisien perpindahan kalor permukaan luar <i>tube</i> (W/m ² .C)
k	: koefisien perpindahan kalor konduksi dinding (W/m ² .C)
v_h	: kecepatan masuk <i>tube</i> (m/s)
v_c	: kecepatan keluar <i>tube</i> (m/s)
d_h	: diameter luar <i>tube</i> (m)
d_{ti}	: diameter keluar <i>tube</i> (m)
ν	: kinematic viscosity (m ² /s)
D_{si}	: diameter <i>shell inside</i> (m)
D_{ti}	: diameter <i>tube inside</i> (m)
U_o	: koefisien perpindahan kalor menyeluruh (W/m ² .C)
A_o	: luas permukaan perpindahan kalor menyeluruh (m ²)

ΔT_{lm}	: selisih temperatur rata-rata logaritma ($^{\circ}\text{C}$)
NTU	: <i>Number of Transfer Units</i>
C_h	: laju kapasitas kalor gas buang ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)
C_c	: laju kapasitas kalor bahan bakar ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)
C_{min}	: nilai C yang terkecil antara C_c dan C_h ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)
ε	: efektivitas alat penukar kalor (%)
c	: perbandingan laju kapasitas kalor minimum dengan laju kapasitas kalor maksimum ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)
ΔP	: penurunan tekanan (Pa)
L	: panjang tube (m)
ρ	: <i>density</i> (kg/m^3)
L_t	: panjang <i>tube</i> atau <i>shell</i> (m)
L_{re}	: panjang <i>recoil</i> (m)
L_{tw}	: panjang <i>twist</i> (m)
d_i	: diameter dalam <i>tube</i> atau <i>shell</i> (m)
d_o	: diameter luar <i>tube</i> atau <i>shell</i> (m)
D_{ire}	: diameter <i>recoil</i> (m)
D_{ore}	: diameter <i>recoil</i> (m)
n_{re}	: jumlah <i>recoil</i> (m)
P_{re}	: <i>pitch recoil</i> (m)
t	: tebal <i>tube</i> atau <i>shell</i> (m)
t_{re}	: tebal <i>recoil</i> (m)
W_{tw}	: lebar <i>twist</i> (m)
t_{tw}	: tebal <i>twist</i> (m)
P_{tw}	: <i>pitch twist</i> (m)

Daftar Pustaka

- Ayare, A. A., and Anjarlekar, S. D., “Experimental Study on Helical Coil Heat Exchanger”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, no. 7(5), pp. 56-59, 2017.
- Cengel, Y. A. *Heat and Mass Transfer* 5th ed, New York: McGraw Hill, 2015.
- Cong Qi., “Effect of rotating twisted tape on thermo-hydraulic performances of nanofluids in heat-exchanger systems”. *Jurnal Energy Conversion and Management*, no. 166, pp. 744-757, 2018.
- Kasmara, J dan Marausna, G., “Investigasi Eksperimental *Anti-Icing System* dengan Memanfaatkan Kalor Dari Gas Buang *Engine Pesawat Terbang*”, *Jurnal Teknik, Elektronik*, no. 1, vol. 6, pp. 40-48, 2020.
- Kasmara, J., “Studi Eksperimental Efektivitas Alat Penukar Kalor Shell Helical Coil Tube dengan Memanfaatkan Limbah Panas Gas Buang Mesin Diesel Sebagai Pemanas Bahan Bakar Solar” *Tesis S2 Teknik Mesin Universitas Gajah Mada (UGM)*, Yogyakarta, 2016.
- Kumar, R, T, N., “Effect of twisted tape inserts on heat transfer, friction factor of Fe_3O_4 nanofluids flow in a double pipe U-bend heat exchanger”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, no. 95, pp. 53-62, 2018.
- Rico, M, D, J., “Experimental characterization of a double tube heat exchanger with inserted twisted tape elements”, *Journal Applied Thermal Engineering*, no. 174, pp. 1-13, 2020.
- Rifa, I, A., “studi Eksperimental Perpindahan Kalor Konveksi, Penurunan Tekanan dan Faktor Gesekan Pada Alat Penukar Kalor Menggunakan *Micro-Fin Tube*”, *Jurnal Mekanika*, no. 1, vol. 18, pp. 9-13, 2019.
- Smusz, R., “Analytical and experimental analysis of tube coil heat exchanger”, *European Thermal- Sciences Conference*, no. 745(3), pp. 1-6, 2016.
- Sudrajat, J., “Analisis Kinerja Heat Exchanger Shell & Tube Pada Sistem COG Booster Di Integrated Steel Mill Krakatau”, *Jurnal Teknik Mesin*, no. 6(3), pp. 174-181, 2017.
- Zainuddin, Jufrizal, and Eswanto, “Pemilihan Kapasitas Panas Dan Temperatur Udara Alat Penukar Kalor Shell Helical Coil Multi Tube Untuk Kebutuhan Pengereng Gabah Tipe Rotari Dengan Memanfaatkan Thermal Gas Buang Mesin Diesel”. *Mekanika*, no. 15(2), pp. 1-7, 2016.