



Experimental Study of Heat Transfer Characteristics in The Hair-Pin Heat Exchanger

Aulia Arif Shalihuddin^{1*}, Teguh Hady A.², dan Prima Dewi P.²

^{1*}Mahasiswa Program Studi Sistem Pembangkit Energi, DTME, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Sukolilo Surabaya 60111

² Staff Pengajar Program Studi Sistem Pembangkit Energi, DTME, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Sukolilo Surabaya 60111

*E-mail: auliaarif666@gmail.com

Abstract

The heat transfer characteristics in the horizontal Hair-pin heat exchanger are investigated experimentally. Heat transfer coefficients were calculated and plotted with the experimental data. The inner and outer diameters of the inner tube are 10.67 and 12.09 mm. The inner tube is made from stainless steel with thickness 0.71 mm and the length of 500 mm with conductivity thermal 14.4 W/m.K. The outer tube is made from PPMA(polymethyl methacrylate) with thickness 2.27 mm and the length of 450 mm. Cold and hot water are used as working fluids in outer tube and inner tube, respectively. Flows in the inner tube and outer tube were counter flow. The mass flow rates were varied of cold water are 0.0167, 0.0194, 0.0222, 0.025 and 0.0278 kg/s. Reynolds number were got between of 1667 and 2776 in laminar flow to turbulent flow. Then, the results data of cold water are heat transfer 139,67 Watt for the lowest flowrate and 348,78 Watt for the highest flowrate. From the experimental results obtained heat transfer characteristics in Hair-pin heat exchanger, can be increased by varied the mass flow rate in cold side.

Keywords: hair-pin heat exchanger, heat transfer, Reynolds Number

Pendahuluan

Perkembangan industri pengolahan kimia, pembangkit listrik, pengkondisian udara, dan sebagainya telah banyak melakukan perpindahan energi panas dari suatu aliran fluida ke aliran fluida lainnya (Cengel, 1997). Alat yang digunakan untuk melakukan proses perpindahan energi panas tersebut salah satunya adalah *Hair-pin heat exchanger*. Pemilihan penggunaan Hair-pin heat exchanger dikarenakan cukup ekonomis dan mudah dalam perawatan, sangat cocok dengan temperatur tinggi, dan juga mudah diaplikasikan pada tekanan tinggi (Incropera dan Dewitt, 2010). Dalam jenis penukar kalor dapat digunakan berlawanan atau searah arah aliran, baik dengan cairan panas atau dingin cairan yang terkandung dalam ruang annular dan cairan lainnya dalam pipa. Alat penukar kalor jenis ini dapat digunakan pada laju alir fluida yang kecil dan tekanan operasi yang tinggi. Perpindahan kalor yang terjadi pada fluida adalah proses konveksi, sedangkan proses konduksi terjadi pada dinding pipa.

Penelitian dengan menggunakan hairpin heat exchanger ini telah banyak dilakukan, baik secara eksperimental maupun secara numerik. Dalam penelitian ini, akan dikaji tentang karakteristik heat transfer pada *Hair-pin heat exchanger* yang bertujuan untuk mendapatkan nilai karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada *Hair-pin heat exchanger*. Pada akhir penelitian ini didapatkan nilai ϵ -NTU serta tren perpindahan panas sepanjang *Hair-pin heat exchanger*.

Metode Penelitian

Suatu laju perpindahan kalor dapat diperoleh dengan memvariasikan beberapa variabel, diantaranya *mass flowrate* yang melalui suatu pipa, *heat capacity rate*, dan juga temperatur *inlet*. Jika salah satu variabel tersebut dinaikkan nilainya dapat berpengaruh juga terhadap nilai *effectiveness*(ϵ), *heat capacity rate ratio* (C_r), dan NTU (Ramesh dan Dusan, 2003).

Laju perpindahan kalor yang terjadi pada aliran yang mengalir di alat *Hairpin Heat Exchanger* dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$q_c = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

Bilangan Reynolds merupakan besaran fisis yang tak berdimensi. Bilangan ini digunakan sebagai acuan dalam membedakan aliran laminar dan turbulen di satu pihak, dan di pihak lain dapat digunakan untuk mengetahui jenis-jenis aliran yang berlangsung dalam air. Suatu aliran fluida dapat dikatakan laminar apabila nilai dari bilangan





Reynolds kurang dari atau sama dengan 2300, sedangkan aliran fluida dikatakan sebagai aliran turbulen apabila nilai bilangan Reynolds lebih besar atau sama dengan dari 10^4 (Holman, 2010)

$$Re_d = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k_f} \quad (3)$$

Bilangan Nusselt (Nu) yang dapat didefinisikan sebagai rasio perpindahan kalor konveksi fluida dengan perpindahan kalor konduksi fluida dalam kondisi yang sama. Pada penelitian ini aliran yang terjadi turbulen pada pipa yang halus (Ramesh dan Dusan, 2003). Sehingga secara matematik bilangan Nusselt dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{2}\right) Re . Pr}{C + 12.7 \left(\frac{f}{2}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (4)$$

$$C = 1.07 + \frac{900}{Re} - \frac{0.63}{1 + 10Pr} \quad (5)$$

Untuk perhitungan perpindahan kalor (*heat transfer*) dari air panas dapat dikalkulasi dari persamaan berikut.

$$Q_h = m_h \cdot C_p h \cdot (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (6)$$

Perpindahan kalor (*heat transfer*) ke air dingin dapat dikalkulasikan dari persamaan berikut.

$$Q_c = m_c \cdot C_p c \cdot (T_{c,in} - T_{c,out}) \quad (7)$$

Dan *overall heat transfer coefficient*, U_i , dapat ditentukan dari

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LMTD} \quad (8)$$

Nilai ΔT_{LMTD} didapatkan dari perbedaan temperatur rata-rata masuk, ΔT_1 , dan perbedaan rata-rata keluar, ΔT_2 , yang dibandingkan dengan nilai logaritmik dua nilai tersebut. Persamaannya dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (9)$$

Pada koefisien perpindahan kalor sisi luar, h_o , dapat diperoleh dari perhitungan hambatan termal yang terjadi pada 3 hambatan (*resistance*) secara seri, yakni secara hambatan konveksi pada permukaan dalam, hambatan konduksi pada dinding pipa, dan hambatan konveksi pada permukaan luar.

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_o \cdot A_o} + \frac{\delta_t}{k_t \cdot A_{ave}} + \frac{1}{h_i \cdot A_i} \quad (10)$$

δ_t merupakan ketebalan dari tube, A_o , luasan permukaan area luar, k_t , konduktifitas termal dari tube.

Metode $\varepsilon - NTU$ digunakan untuk mengetahui unjuk kerja dari alat *Hair-pin Heat Exchanger*. Nilai *effectiveness* (ε) merupakan bilangan tanpa dimensi yang nilainya berada pada batas $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Persamaan ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (11)$$

Unjuk kerja *Hair-pin Heat Exchanger* ini didefinisikan terlebih dahulu dengan mengetahui perpindahan panas maksimum (q_{max}) yang mungkin terjadi. Hal ini dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Jika } C_c < C_h, \text{ maka } q_{max} = C_c (T_{h,i} - T_{c,i}) = C_{min} \Delta T_{max} \quad (12)$$

$$\text{Jika } C_c > C_h, \text{ maka } q_{max} = C_h (T_{h,i} - T_{c,i}) = C_{min} \Delta T_{max} \quad (13)$$

Dari persamaan (12), perbandingan temperatur dari *effectiveness* untuk perpindahan kalor dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\varepsilon = \frac{C_h}{C_{min}} \frac{\Delta T_h}{\Delta T_{max}}, \text{ untuk } C_h = C_{min} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{C_c}{C_{min}} \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{max}}, \text{ untuk } C_c = C_{min} \quad (15)$$

Dalam parameter heat exchanger menggunakan *heat capacity rate ratio* (C_r) yang tergantung terhadap laju alir massa dan/atau temperatur dari fluida pada heat exchanger. Hal tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut (Ramesh, 2003) :

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (16)$$

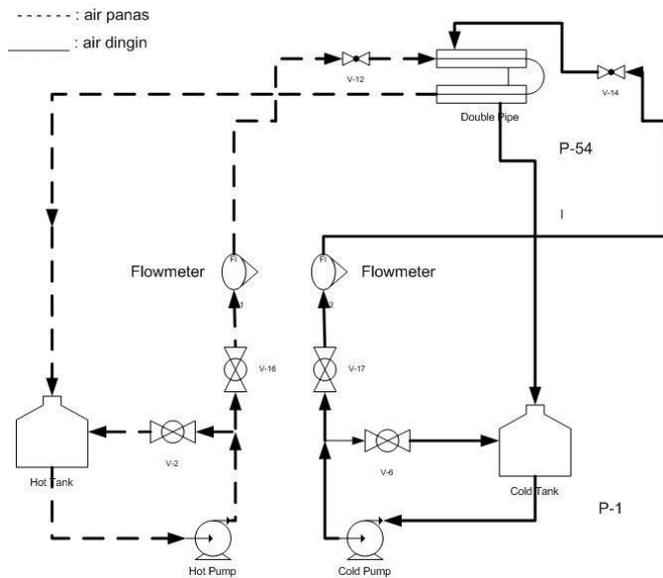
Kemudian, untuk menentukan nilai dari *Number of Transfer Units* (NTU) dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$NTU = \frac{U A}{C_{min}} \quad (17)$$

Sebuah alat *Hair-pin heat exchanger* diletakkan pada peralatan pengujian. Skema alat pengujian karakteristik *heat transfer* pada *hairpin double pipe heat exchanger* dapat dilihat pada gambar 1. Alat tersebut dibuat dari duah buah pipa *stainless steel* pada bagian *inner pipe* dan *acrylic* pada bagian *outer pipe* dengan panjang keseluruhan adalah 54 cm. Dengan konduktivitas termal pada bahan *stainless steel* adalah 14,4 W/m.K dan pada bahan *acrylic*



sebesar 0,19 W/m.K. Diameter dalam *inner pipe* (D_i) 12,10 mm sedangkan diameter luar *inner pipe* (D_o) 10,60 mm. Dan untuk diameter dalam pada *outer pipe* (d_i) 25,14 mm sedangkan untuk diameter luar *outer pipe* (d_o) 20,60 mm. Pemasangan hairpin heat exchanger dan susunan secara eksperimental pada laboratorium dapat ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 1. Diagram alir dari sistem pengujian



Gambar 2. Sistem pengujian di laboratorium. 1. Hair-pin heat exchanger. 2. Tangki fluida panas. 3. Tangki fluida dingin. 4. Pompa. 5. Box panel. 6. Flowmeter

Pada sistem pengujian alat ukur yang digunakan untuk mengukur temperatur yakni, termocouple tipe-K dan alat ukur *flowmeter*. Pada sistem pengujian, fluida panas disiklus namun untuk fluida dingin langsung dibuang agar temperatur fluida dingin terjaga konstan pada temperatur 28°C.



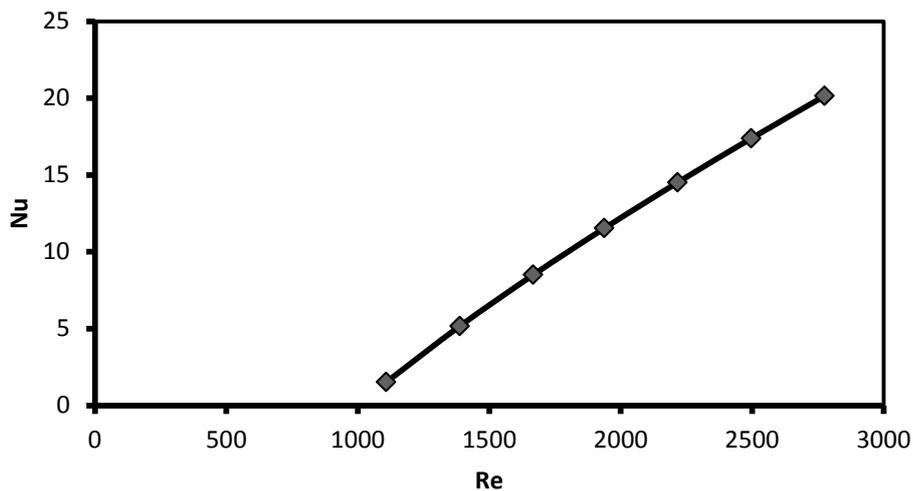
Gambar 3. Hairpin heat exchanger

Hasil dan Pembahasan

Hasil dari penelitian ini mengungkapkan bahwa karakteristik perpindahan panas pada *hairpin double pipe heat exchanger*, dapat dilihat dari laju perpindahan panas dan koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi, yang ditunjukkan melalui bilangan Nusselt pada gambar 5. Pada penelitian ini, nilai dari *flowrate* fluida panas dijaga konstan, yaitu sebesar 0,0167 kg/s, sedangkan *flowrate* fluida dingin divariasikan sebanyak 5 kali. Data pengujian dapat diamati pada tabel 1.

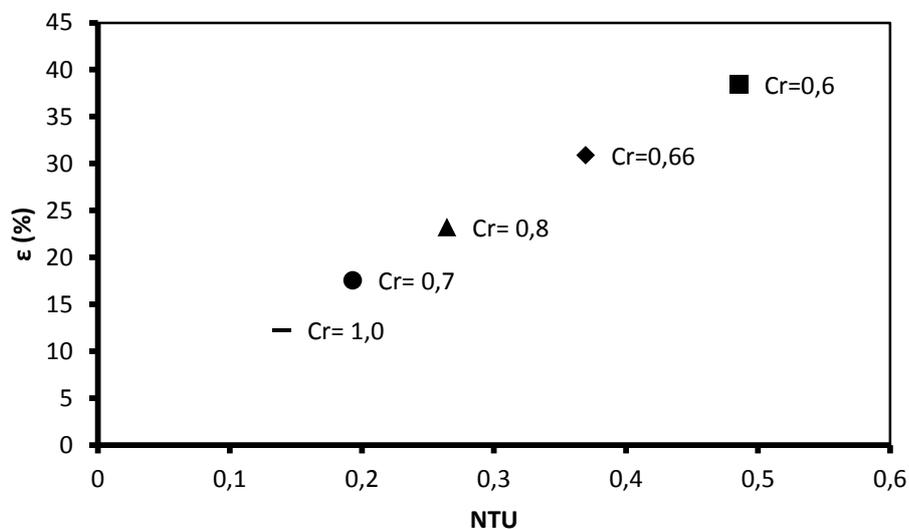
Tabel 1. Data pengujian *hairpin double pipe heat exchanger* pada flowrate panas(mh) 0,0167 kg/s

No.	m _c (kg/s)	Tip in (°C)	Tip out(°C)	Top in (°C)	Top out(°C)
1.	0,0167	47	44	30	32
2.	0,0194	47	43	30	33
3.	0,0222	47	43	30	32
4.	0,025	46	42	30	33
5.	0,0278	45	43	32	35



Gambar 4. Pengaruh Re terhadap laju perpindahan kalor

Pada gambar 4 dapat dilihat tentang karakteristik perpindahan kalor yang terjadi pada *Hair-pin Heat Exchanger*. Dari gambar 4 memperlihatkan tentang pengaruh dari kenaikan bilangan Reynolds terhadap laju perpindahan kalor, q , dan koefisien perpindahan panas konveksi, h , yang terjadi. Kenaikan harga pada koefisien perpindahan panas, h , mempengaruhi kenaikan laju perpindahan kalor, q (Ma'a dan Putra, 2012).



Gambar 5. Pengaruh Cr terhadap $\epsilon - NTU$

Selain karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 4, penelitian yang dilakukan juga menghasilkan unjuk kerja dari *Hair-pin Heat Exchanger*. Hal ini bisa dilihat dari gambar 5. Pada gambar 5 dapat dijelaskan bahwa tren yang



terjadi mengalami peningkatan dikarenakan perubahan Cr dan NTU, mempengaruhi nilai pada *effectiveness* (ϵ) yang dimiliki oleh *heat exchanger*. Adanya perubahan pada NTU dari 0,139 ke 0,264, memiliki pengaruh besar terhadap nilai *effectiveness*. Hal itu dikarenakan adanya peningkatan pada nilai C_h sebesar 69,792 W/K sehingga Cr pun menurun namun nilai *effectiveness* (ϵ) dan NTU semakin meningkat dari 12,237% hingga 38,451%. Dengan menggunakan persamaan (12) dan (18), maka akan didapatkan nilai *effectiveness* (ϵ) dan NTU. Nilai *effectiveness* (ϵ) dan NTU yang dihasilkan pada Cr 0,6 sebesar 30,451% dan 0,485. Namun sebaliknya, pada Cr 1,0 dengan *mass flowrate* 0,0167 nilai *effectiveness* dan NTU mengalami penurunan yakni, 12,237% dan 0,139. Sehingga, pada penelitian ini dapat dinyatakan bahwa dengan menjaga konstan *flowrate* fluida panas dan memvariasikan *flowrate* fluida dingin, pada Hair-pin heat exchanger dapat meningkatkan performa dari alat *heat exchanger*.

Kesimpulan

Dari data eksperimen yang ditampilkan pada penelitian ini, maka bilangan Reynolds, bilangan Nusselt, rasio kapasitas Cr, dan NTU, telah mempengaruhi karakteristik perpindahan panas dan unjuk kerja pada alat *Hair-pin Heat Exchanger* ini. Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pengaruh kenaikan bilangan Reynolds akan mempengaruhi perubahan laju perpindahan kalor yang diakibatkan adanya variasi laju massa alir dari 0,0167 kg/s hingga 0,0278 kg/s pada suatu aliran dalam pipa. Semakin besar nilai dari C_h atau C_c akan mempengaruhi besarnya peningkatan nilai pada *effectiveness* (ϵ), NTU dan laju perpindahan kalor, namun sebaliknya untuk Cr. Dengan Cr 1,0 diperoleh nilai *effectiveness* dan NTU sebesar 12,237% dan 0,139 dan Cr 0,6 diperoleh nilai 30,451% dan 0,485 untuk *effectiveness* dan NTU.

Daftar Notasi

q_c = Laju perpindahan kalor (W)

\dot{m} = Laju alir massa (kg/s)

C_p = Kalor spesifik dari fluida (J/kg . K)

T_o = Temperatur pada sisi keluar (K)

T_i = Temperatur pada sisi masuk (K)

Re_d = Bilangan Reynolds

Nu = Bilangan Nusselt

D_h = Diameter hidraulik (m)

Pr = Bilangan Prandtl

Q_h = Laju perpindahan kalor di pipa dalam (W)

C_{p_h} = Kalor spesifik fluida panas (J/kg . K)

C_{p_c} = Kalor spesifik fluida dingin (J/kg . K)

ΔT_{LMTD} = Beda temperatur rata-rata log (K atau °C)

A = Luas permukaan dalam pipa bagian dalam (m²)

ϵ = *effectiveness*

q_{max} = laju perpindahan kalor maksimum (W)

C_{min} = Nilai minimum dari C_c dan C_h (W/K)

C_{max} = Nilai maksimum dari C_c dan C_h (W/K)

C_r = *Heat capacity rate ratio*

NTU = Number Transfer Unit

U = Koefisien overall laju perpindahan kalor (W/m²K)

Daftar Pustaka

Cengel, Yunus A. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, 1997; 119, pp. 8 – 19.

Frank P. Incropera and David P. Dewitt. Fundamental of Heat and Mass Transfer. Fifth Edition, 2010. Jhon Willey and Sons.

Holman, J.P. Heat Transfer Tenth Edition. McGraw-Hill Companies, Inc, 1221 Avenue of the Americas, New York. 2010

J. Taborek. Heat Exchanger Design Handbook. Hemisphere Publishing Corporation, US. 1983

Kreith, Frank, Raj M. Manglik, and Mark S. Bohn. Principles of Heat Transfer Seventh Edition. Cengage Learning. Stamford. 1986

M.A Mehrabian, S.H. Mansouri and G.A shekhzadeh. The Overall Heat Transfer Characteristics of A Double Pipe Heat Exchanger: Comparison of Experimental Data With Predictions of Standard Correlations. Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. 2002.

Mustaza Ma'a, Ary Bachtar Krishna Putra. Karakteristik Perpindahan Panas dan Pressure Drop pada Alat Penukar Kalor pipa Ganda dengan aliran searah. Preceeding Applied Engineering Seminar 2012, hal 18-22.

Naphon, Paisarn. Heat transfer and pressure drop in horizontal double pipes with and without twisted tape insert. 2006. 166-175.

Shah, K Ramesh and Sekulic, Dusan P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley and Sons, Inc, New Jersey. 2003.





Lembar Tanya Jawab

Moderator : Hendro Risdianto (Balai Besar Pulp dan Kertas)

Notulen : Putri Restu Dewati (UPN "Veteran" Yogyakarta)

- Penanya : Ramli Sitanggang (UPN "Veteran" Yogyakarta)
- Pertanyaan : Apakah Nusselt number? Apakah Cr itu?
- Jawaban : Nusselt number merepresentasikan konduksi termalnya HE. Cr adalah rasio kapasitas panas = flowrate aliran panas/lorate aliran dingin.
- .

