



Distribusi Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Daerah *Entrance* Dan *Fully Developed* Perbandingan Empiris dan Eksperimen Pada *Double Pipe Heat Exchanger*

Mustaza Ma'a

Politeknik Caltex Riau, email: mustaza@pcr.ac.id

Abstrak

Penelitian tentang distribusi koefisien konveksi pada daerah *entrance* dan *fully developed* sangat diperhitungkan dalam dunia industri makanan, minuman, proses kimia dan farmasi. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan *Double Pipe Heat Exchanger*. Hal ini karena konstruksi yang sederhana, murah, yang tidak memerlukan permukaan perpindahan panas yang besar. Penelitian ini mengkaji tentang distribusi koefisien konveksi yang terjadi di daerah *entrance* dan *fully developed*. Fluida yang digunakan adalah air yang mengalir secara paralel. Debit aliran panas divariasikan pada 5 kecepatan aliran mulai dari 6,7 lpm hingga 20 lpm dengan laju aliran 0,11 kg/s hingga 0,33 kg/s menggunakan temperatur dijaga pada 60°C. Sedangkan debit fluida dingin divariasikan pada 4 kecepatan aliran mulai 10 lpm hingga 20 lpm dengan laju aliran 0,17 kg/s hingga 0,33 kg/s dengan temperatur 32°C. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah distribusi koefisien perpindahan panas secara konveksi yang terjadi pada daerah *entrance* dan *fully developed*. Batas daerah *entrance* pada *Double Pipe Heat Exchanger* ini adalah 30 cm. Selanjutnya masuk pada daerah *fully developed*, seiring dengan bertambah tebalnya *boundary layer* termal hingga mencapai konstan.

Kata kunci: koefisien konveksi, perpindahan panas, *entrance*, *fully developed*, *double pipe heat exchanger*

Abstract

Research on the distribution of convection coefficient in the *entrance* and *fully developed* area is highly regarded in food, beverage, chemical and pharmaceutical processes. This research was carried out experimentally by using *Double Pipe Heat Exchanger*. This is because the construction is simple, inexpensive, that does not require a large heat transfer surface. This study examined the distribution coefficient of convection occurs in the *entrance* area and *fully developed*. Fluid used water flowing in parallel. Heat flow rate varied at 5 flow rate ranging from 6.7 lpm to 20 lpm at a flow rate of 0.11 kg / s up to 0.33 kg / s using the temperature is maintained at 60°C. While the cold fluid discharge flow rate varied 4 from 10 lpm to 20 lpm at a flow rate of 0.17 kg / s up to 0.33 kg / s with a temperature of 32°C. The results obtained in this study is the convection heat transfer coefficient distribution that occurred in the *entrance* and *fully developed*. Border *entrance* in *Double Pipe Heat Exchanger* is 30 cm. The next entry in *fully developed* areas, along with the thermal *boundary layer* thickness increases until it reaches a constant.

Keywords: convection coefficient, heat transfer, *entrance*, *fully developed*, *double pipe heat exchanger*

1. Pendahuluan

Perkembangan industri terutama di bidang teknologi semakin membutuhkan banyak alat yang digunakan untuk memindahkan energi panas dari sistem ke lingkungan atau bagian lain yang berbeda dari sistem. Industri pengolahan kimia, *refrigerasi*, dan industri lainnya sudah banyak melakukan perpindahan energi panas dari suatu aliran ke aliran lainnya [1-3]. Salah satu alat yang digunakan untuk melakukan proses pemindahan energi panas tersebut adalah *Double Pipe Heat Exchanger*. Tipe ini dipilih dikarenakan harga murah dengan konstruksi yang cukup mudah dikerjakan. Dengan jumlah ruang yang lebih tinggi ditempati dibandingkan dengan tipe lainnya [3]. Tipe lain yang digunakan untuk memperlihatkan proses pemindahan panas dan karakteristik perpindahan panas juga dilakukan pada tipe *Rectangular Channel* [4].

Penelitian yang sering dilakukan pada *Double Pipe Heat Exchanger* ini adalah mencari karakteristik aliran maupun perpindahan panas yang terjadi [1-3]. Salah satu karakteristik dari perpindahan panas yang terjadi pada *Double Pipe Heat Exchanger* ini adalah tentang distribusi koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi pada daerah *entrance* dan *fully developed*. Hampir serupa dengan yang dilakukan pada tipe *Rectangular Channel*, perpindahan panas konveksi juga diteliti pada tipe ini [4]. Hasil penelitian memperlihatkan tren distribusi koefisien perpindahan panas konveksi pada daerah *entrance* dan *fully developed*, sama baik secara eksperimen maupun secara empiris. Koefisien perpindahan panas konveksi memiliki distribusi nilai yang tinggi pada daerah dekat *inlet* yang kemudian menurun seiring dengan menjauh daerah *inlet* yang bersamaan dengan bertambah tebalnya *boundary layer thermal* hingga mencapai daerah *fully developed* [4,5]. Dikatakan bahwa penelitian yang sering dilakukan sebelumnya kebanyakan pada daerah *fully developed*. Hanya sedikit yang meneliti tentang daerah *entrance*. Apalagi yang membahas tentang daerah *entrance* dan *fully developed* [4].

2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah melihat karakteristik perpindahan panas melalui distribusi koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi pada daerah *entrance* dan *fully developed*. Penelitian dilakukan secara eksperimental. Setelah didapatkan distribusi koefisien perpindahan panas konveksi melalui eksperimen kemudian hasilnya dibandingkan dengan distribusi koefisien perpindahan panas konveksi secara empiris. Perbandingan inilah yang akan diperlihatkan dalam penelitian ini.

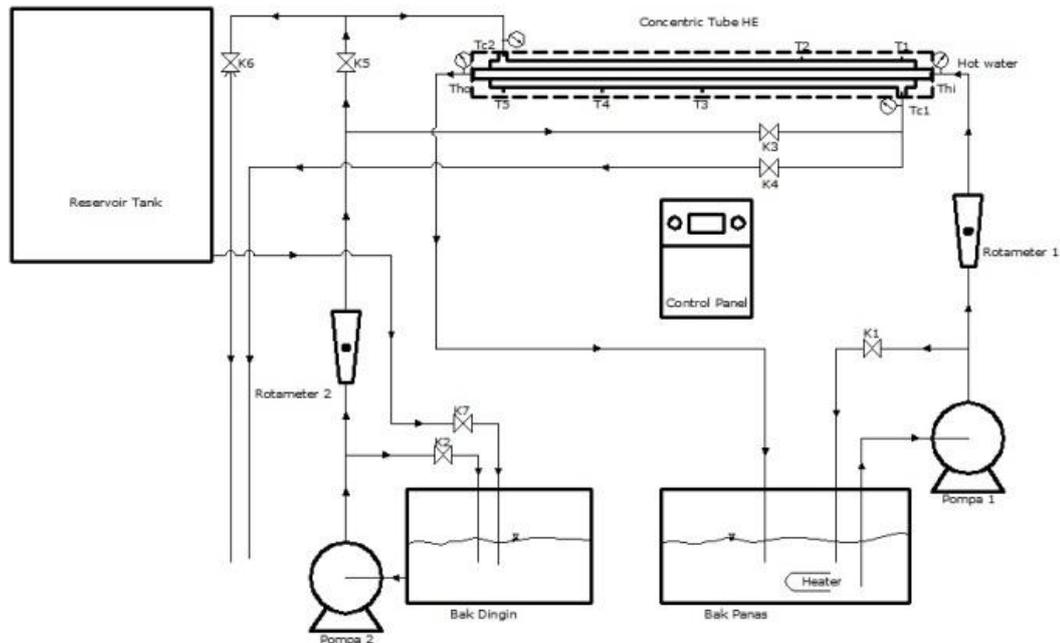
3. Metoda Penelitian

Melalui penelitian dengan memindahkan energi panas ini, dengan menggunakan eksperimen *apparatus* berupa *Double Pipe Heat Exchanger*, karakteristik perpindahan panas dapat diperlihatkan. Salah satunya adalah distribusi koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi pada daerah *entrance* dan *fully developed*.

Eksperimen *apparatus* pada penelitian ini dapat dilihat dari Gambar 1. Pada eksperimen *apparatus* ini digunakan dua bak penampung. Masing-masing untuk fluida panas dan dingin. Fluida panas mengalir dari bak penampung panas menggunakan pompa 1 menuju *Double Pipe Heat Exchanger*, yang pada akhirnya akan kembali menuju bak penampung panas. Aliran fluida panas dijaga temperaturnya pada suhu 60°C dengan menggunakan *heater* dan diatur melalui sebuah *thermostat*.

Sedangkan untuk aliran fluida dingin dari bak penampung mengalir menuju *Double Pipe Heat Exchanger* menggunakan pompa 2. Aliran fluida dingin tersebut berasal dari tangki *reservoir* yang temperaturnya berkisar pada 32°C masuk ke bak penampung dingin melalui katup 7. Keluaran aliran fluida dingin tersebut dari *Double Pipe Heat Exchanger* langsung dibuang. Hal ini dimaksudkan untuk menjaga temperature dingin tetap pada 32°C.

Dua buah *Rotameter* dipasang pada kedua aliran fluida baik panas maupun dingin. *Rotameter* dipasang untuk melihat debit aliran fluida. Pemasangan *Rotameter* 1 ditempatkan setelah pompa 1. Begitu juga dengan *Rotameter* 2 yang ditempatkan setelah pompa 2. Sebuah katup pada masing–masing aliran digunakan untuk *bypass* aliran kembali menuju bak penampung masing–masing fluida. Katup tersebut digunakan untuk mengatur besarnya laju aliran yang mengalir. Katup 1 digunakan untuk mengatur laju aliran fluida panas sedangkan katup 2 digunakan untuk mengatur laju aliran fluida dingin.



Gambar 1. Eksperimen Apparatus

Untuk melihat nilai tekanan pada *Double Pipe Heat Exchanger*, dipasang *Pressure Gauge* pada masing–masing *inlet* aliran fluida panas maupun fluida dingin dan *outlet* aliran fluida panas dan dingin. Sebanyak 9 unit *thermocouple* dipasang pada eksperimen *apparatus* ini. Tujuannya untuk mendapatkan keseluruhan data temperature baik *inlet* pada masing–masing fluida panas dan dingin, maupun *outlet* pada fluida panas dan dingin tersebut. Sebanyak 5 unit *thermocouple* dipasang di sepanjang bagian luar *annulus* tabung *Double Pipe Heat Exchanger* ini. Seluruh data temperatur dapat dilihat nilainya pada *LCD Display* yang diletakkan pada sebuah *Control Panel*.

Pada penelitian ini dilakukan dengan jenis aliran yang mengalir pada *Double Pipe Heat Exchanger* tersebut, yakni searah. Untuk mendapatkan aliran *parallel* maka katup K3 dan katup K6 dibuka. Sedangkan katup K4 dan katup K5 ditutup. Saat dalam kondisi seperti ini aliran fluida panas dipompa mengalir dari bak penampung fluida panas melewati *Rotameter* 1 masuk ke tabung *Double Pipe Heat Exchanger* melalui *inlet*. Sedangkan dari *outlet* keluar fluida panas bersirkulasi tertutup kembali pada bak penampung fluida panas. Aliran fluida dingin dipompa mengalir dari bak penampung fluida dingin melalui *Rotameter* 2 masuk melalui katup K3 menuju tabung *Double Pipe Heat Exchanger* dan keluar melalui katup K6.

Pada eksperimen *apparatus* diletakkan sebuah tabung *Double Pipe Heat Exchanger*. Tabung *Double Pipe Heat Exchanger* tersebut terbuat dari dua buah pipa berbahan *stainless steel*. Adapun detail dimensi pada tabung *Double Pipe Heat Exchanger* tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Dimensi Double Pipe Heat Exchanger

No	Deskripsi	Dimensi (m)
1	Diameter <i>Inner</i> Tabung Dalam	0,0107
2	Diameter <i>Outer</i> Tabung Dalam	0,0127
3	Diameter <i>Inner</i> Tabung Luar	0,0234
4	Diameter <i>Outer</i> Tabung Luar	0,0254
5	Panjang Alat <i>Heat Exchanger</i>	1,02

3.1 Persamaan Matematis

Karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada aliran yang mengalir pada tabung *Double Pipe Heat Exchanger*, diantaranya adalah laju perpindahan panas dan koefisien perpindahan panas konveksi yang dihasilkan dari penelitian ini. Persamaannya dapat dilihat dari persamaan berikut.

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

$$h = \frac{q}{A(T_s - T_m)} \quad (2)$$

Setelah temperatur rata-rata didapatkan maka dapat dicari T_m . Sedangkan nilai T_s merupakan temperatur lokal yang didapat dari susunan *thermocouple* di dinding luar *annulus* sepanjang tabung *Double Pipe Heat Exchanger*.

Bilangan Nusselt dan bilangan Reynold pada penelitian ini didapatkan melalui persamaan.

$$Nu = hD/k \quad (3)$$

$$Re = 4\dot{m}/\pi D\mu \quad (4)$$

3.2 Metoda Logarithmic Mean Temperature Difference (ΔT_{LMTD})

Dengan menggunakan perbedaan temperatur rata-rata secara logaritmik (ΔT_{LMTD}) yang terjadi maka dapat dilakukan perancangan dan perhitungan unjuk kerja dari *Double Pipe Heat Exchanger* ini^[1,3,6]. melalui Persamaan (6)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (5)$$

Laju perpindahan panas dapat dicari melalui persamaan

$$q = UA\Delta T_{LMTD} \quad (6)$$

Beberapa asumsi harus dilakukan untuk menggunakan Persamaan 5 dan 6 tersebut, yakni:

1. Kondisi *steady state*.
2. Konduksi terjadi pada satu dimensi ke arah radial pipa.

3. Nilai U konstan sepanjang pipa.
4. Perpindahan panas hanya pada kedua pipa.
5. Energi kinetik dan potensial diabaikan.

Pada aliran *parallel* berlaku persamaan

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{ci} \quad (7)$$

Dan

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{co} \quad (8)$$

Aliran *counterflow*, berlaku sebagai berikut:

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co} \quad (9)$$

Dan

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci} \quad (10)$$

3.3 Metoda *Effectiveness* – NTU (ϵ -NTU)

Nilai *effectiveness* didapatkan dari perbandingan antara perpindahan panas aktual dibanding dengan perpindahan panas maksimum dengan nilai $0 \leq \epsilon \leq 1$ [5]. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut

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

Dimana

$$\text{Jika } C_c < C_h, \text{ maka } q_{max} = C_c(T_{hi} - T_{ci}) \quad (12)$$

$$\text{Jika } C_c > C_h, \text{ maka } q_{max} = C_h(T_{hi} - T_{ci}) \quad (13)$$

Sehingga

$$\epsilon = f \left(NTU, \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \quad (14)$$

Dimana NTU dinyatakan dalam

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (15)$$

Nilai C_{min} diperoleh untuk nilai terkecil dari:

$$C_c = \dot{m}_c C p_c \quad (16)$$

Atau

$$C_h = \dot{m}_h C p_h \quad (17)$$

3.4 Pendekatan Empiris

Pembandingan antara hasil eksperimen dengan nilai pendekatan empiris [7] juga telah dilakukan dengan korelasi *Hausen*, *Sieder and Tate*, Prediksi *Keys* dan *Sellar*, *Tribus* dan *Klein*. Pendekatan empiris korelasi *Hausen* digunakan untuk aliran yang mengalir pada tabung luar. Melalui persamaan berikut

$$D_h = D_i - D_o \quad (18)$$

Kemudian dilakulasikan dengan pendekatan empiris korelasi *Hausen* melalui persamaan

$$N_u = 3,66 + \frac{0,0688G_z}{1+0,04G_z^3} \quad (19)$$

Dimana G_z adalah bilangan *Graetz* yang dapat didefinisikan sebagai berikut

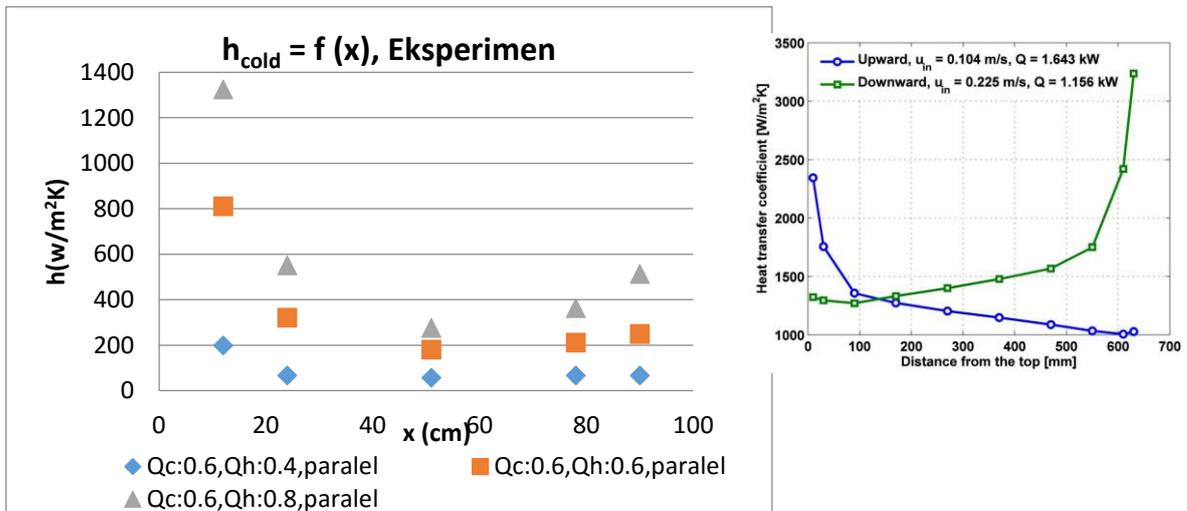
$$G_z = Re Pr D_h/L \quad (20)$$

4. Hasil dan Diskusi

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa dalam karakteristik perpindahan panas pada *Double Pipe Heat Exchanger* memiliki *tren* yang menyerupai dari penelitian yang dilakukan Daeseong Jo et al [4]. *Tren* tersebut diawali dengan nilai koefisien yang besar pada saat $x = 0$ cm, yang kemudian menurun signifikan pada daerah *entrance* hingga mencapai daerah *inlet* $x = 30$ cm. Dan kemudian konstan hingga mencapai *outlet*. Karakteristik yang dibahas pada penelitian ini adalah distribusi koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi pada daerah *entrance* dan *fully developed*.

Pada Gambar 2 dapat dilihat grafik distribusi koefisien perpindahan panas konveksi yang dilakukan secara eksperimen. Nilai koefisien konveksi pada daerah *inlet* (dimana x mendekati 0), memiliki nilai 200 W/m²K untuk $Q_{hot} = 0,4$ m³/h dan $Q_{cold} = 0,6$ m³/h. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa pada daerah *entrance* dimana $x = 0$ nilai koefisien perpindahan panas konveksi bernilai sangat besar secara ekstrim [5]. Penyebab terjadinya hal ini adalah karena ketebalan dari *boundary layer thermal* adalah nol pada daerah *entrance*.

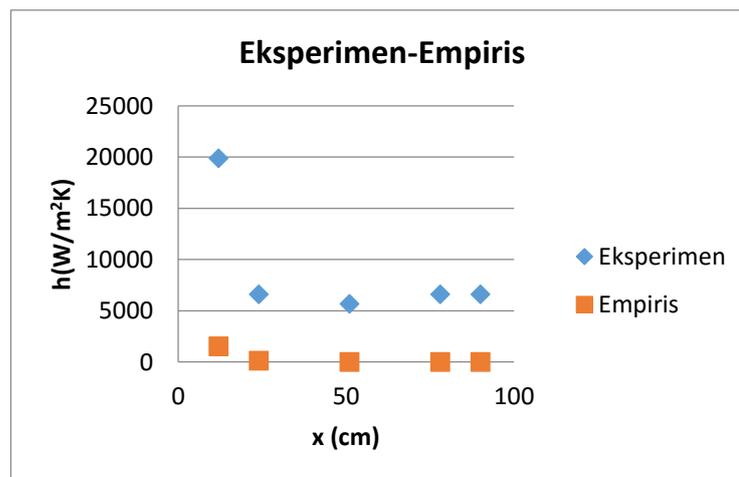
Namun seiring dengan terbentuknya *boundary layer thermal* pada aliran internal, maka nilai koefisien perpindahan panas konveksi menjadi turun. Hingga mencapai nilai konstan sehubungan dengan tercapainya kondisi *fully developed* [4]. Gambar 2 menunjukkan hasil penelitian bahwa daerah *entrance* pada tabung *Double Pipe Heat Exchanger* ini dimulai dari *inlet* hingga $x = 30$ cm.



Gambar 2. Distribusi koefisien konveksi eksperimen

Terlihat jelas untuk garis pada grafik distribusi koefisien perpindahan panas konveksi dengan $Q_{hot} = 0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ dan $Q_{cold} = 0,6 \text{ m}^3/\text{h}$, bahwa kondisi entrance diakhiri pada $x = 30 \text{ cm}$. Selanjutnya masuk pada daerah fully developed, seiring dengan bertambahnya tebalnya boundary layer thermal, hingga mencapai konstan. Hal ini dapat dibandingkan dengan hasil penelitian lain dimana hasilnya bahwa daerah entrance berada dekat dengan inlet [4]. Dimana pada daerah inlet koefisien perpindahan panas konveksi sangat besar. Pada gambar 2 insert, juga memperlihatkan setelah melewati daerah entrance maka koefisien perpindahan panas konveksi menurun secara linear seiring dengan bertambahnya jarak terhadap inlet [4].

Pada gambar 3 dapat dilihat hasil perbandingan distribusi koefisien perpindahan panas konveksi secara eksperimen dibanding dengan cara empiris. Cara empiris seperti dikatakan sebelumnya menggunakan metoda empiris korelasi *Hausen*. Seperti yang juga dilakukan oleh penelitian lain yang membandingkan hasil eksperimen terhadap empiris [7]. Tentu saja ini didukung oleh literature dasar perpindahan panas [5].



Gambar 3. Perbandingan distribusi koefisien konveksi eksperimen dan empiris

Dari gambar 3 dapat dilihat bahwa tren yang dihasilkan oleh distribusi koefisien perpindahan panas konveksi secara empiris sama dengan eksperimen. Keduanya menunjukkan

koefisien perpindahan panas konveksi turun dan konstan setelah mencapai $x = 30$ cm. sehingga daerah *entrance* yang dihasilkan pada *Double Pipe Heat Exchanger* ini adalah hingga mencapai $x = 30$ cm. Selanjutnya seiring dengan semakin menebalnya *boundary layer thermal*, maka terbentuk daerah *fully developed*.

5. Kesimpulan

Dari data eksperimen yang dihasilkan pada penelitian ini, maka didapatkan kesimpulan bahwa daerah *entrance* pada tabung *Double Pipe Heat Exchanger* ini mulai dari $x = 0$ hingga $x = 30$ cm. Hal ini dilihat dari hasil $Q_{hot} = 0,4$ m³/h dan $Q_{cold} = 0,6$ m³/h, menunjukkan koefisien perpindahan panas konveksi pada x mendekati nol menghasilkan nilai yang sangat besar. Dan menurun secara signifikan, hingga mencapai nilai konstan dimulai pada $x = 30$ cm. Selanjutnya masuk ke daerah *fully developed* seiring dengan semakin menebalnya *boundary layer thermal*.

Nomenklatur

A : luas permukaan tabung (m²)

D : diameter tabung (m)

h : koefisien perpindahan panas (W/m²K)

k : konduktivitas termal (W/mK)

L : panjang penukar kalor (m)

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

q : laju perpindahan panas (W)

U : koefisien perpindahan panas overall (W/m²K)

ΔT_1 : beda temperatur masuk (K)

ΔT_2 : beda temperatur keluar (K)

ρ : density (kg/m³)

μ : viskositas dinamis (kg/m.s)

Daftar Pustaka

- [1] Mustaza Ma'a, "Karakteristik Perpindahan Panas pada Double Pipe Heat Exchanger, perbandingan aliran parallel dan counterflow", Jurnal Teknik Elektro dan Komputer, Vol 1, No 2, Oktober 2013, hal 161 – 168.
- [2] Warakorm et al, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in a Double-pipe Heat Exchanger Fitted with a Tubulator".
- [3] Mustaza Ma'a, Ary Bachtiar Krishna Putra, "Karakteristik Perpindahan Panas dan Pressure Drop pada Alat Penukar Kalor tipe Pipa Ganda dengan aliran searah", Proceeding Applied Engineering Seminar 2012, hal 18-22.
- [4] Daeseong Jo et al, "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer In A Narrow Rectangular Channel For Upward And Downward Flows", Nuclear Engineering And Technology, Vol 46, No 2, April 2014, hal 195 – 206.
- [5] Incropera, Frank P, Davit P. Dewit, "Fundamental of Heat and Mass Transfer", Fifth Edition, John Willey and Sons, Inc, New York, 2002.
- [6] Rennie, Timothy J, Raghavan, Vijaya G.S, "Experimental studies of a double pipe helical heat exchanger", Experimental Thermal and Fluid Science, 29 (2005) 919-924.
- [7] Mehrabian, M.A, Mansouri S.H, and Sheikhzadeh G A, "The overall heat transfer characteristics of a double pipe heat exchanger : comparison of experimental data with predictions of standard correlations", IJE Transaction B : Applications, Vol 15 No 4, December 2002, 395 – 406.