

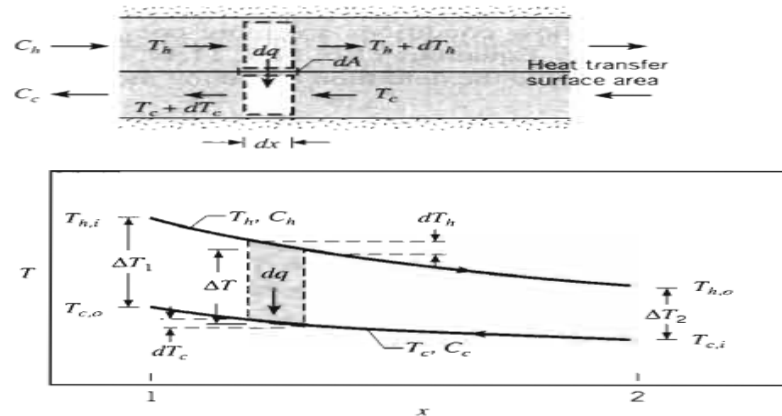
BAB II

DASAR TEORI

Analisis perpindahan panas dapat dilakukan dengan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) atau ΔT_{lm} . Namun metode ini digunakan bila temperatur fluida masuk dan temperatur fluida keluar ditentukan besarnya atau dapat ditentukan dari persamaan kesetimbangan energi, sehingga nilai dari ΔT_{lm} dapat ditentukan. Tetapi jika hanya temperatur fluida masuk yang diketahui, penggunaan metode (LMTD) memerlukan prosedur coba – coba sehingga tidak praktis. Oleh karena itu, lebih baik menggunakan metode lain yaitu dengan metode effectiveness – NTU (ϵ – NTU method). Disamping itu, metode LMTD cocok digunakan untuk mendesain heat exchanger sedangkan metode ϵ – NTU cocok untuk analisis performa dari suatu heat exchanger yang sudah ada.

2.1 Definisi

Untuk mendefinisikan effectiveness alat penukar panas, pertama kita harus menentukan kemungkinan laju perpindahan panas maksimum (*maximum possible heat transfer rate*), q_{max} pada alat penukar panas. Laju perpindahan panas ini secara prinsip dapat dicapai pada alat penukar panas counterflow, gambar 2.1, dengan panjang tak terhingga.



Gambar 2.1 Distribusi temperatur untuk counterflow heat exchanger

Alat penukar panas pada kondisi ini, kemungkinan perbedaan temperatur maksimum pada fluida adalah $T_{h,i} - T_{c,i}$. Untuk menggambarkan hal ini, perhatikan kondisi dimana $C_c < C_h$ dari persamaan 2.1 dan 2.2, [1] maka $[dT_c] > [dT_h]$.

$$dq = -\dot{m}_h C_{p,h} dT_h = -C_h dT_h \quad (2.1)$$

$$dq = \dot{m}_c C_{p,c} dT_c = C_c dT_c \quad (2.2)$$

Kemudian fluida dingin akan mengalami perubahan temperatur yang besar dan jika $L \rightarrow \infty$, maka fluida dingin tersebut akan dipanaskan mencapai panas ($T_{c,o} = T_{h,i}$). Berdasarkan persamaan maka akan didapat persamaan 2.3. [1]

$$C_c < C_h : q_{\max} = C_c (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.3)$$

Demikian pula jika $C_h < C_c$ fluida panas akan mengalami perubahan temperatur terbesar dan akan menjadi dingin pada temperature masukan dari fluida yang dingin ($T_{h,o} = T_{c,i}$). Kemudian dari persamaan 2.4 maka didapatkan persamaan 2.5. [1]

$$q = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.4)$$

$$C_h < C_c : q_{\max} = C_h (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.5)$$

Dari hasil tersebut kita dapatkan kondisi umum : [1]

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.6)$$

Dimana C_{\min} sama dengan C_c atau C_h , mana yang lebih kecil. Untuk temperatur masuk fluida panas dan dingin yang telah diketahui, dari persamaan 2.6 diatas dapat digunakan untuk menghitung kemungkinan besarnya laju perpindahan panas maksimum yang dialami oleh alat penukar panas.

Sekarang sangat logis untuk mendefinisikan effectiveness (ε) sebagai perbandingan antara laju perpindahan panas aktual untuk sebuah alat penukar panas pada kemungkinan laju perpindahan panas maksimum, dan dinyatakan sebagai, [1]

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (2.7)$$

Dari persamaan 2.3, 2.5 dan 2.7 diatas didapat bahwa : [1]

$$\varepsilon = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.8)$$

atau [1]

$$\varepsilon = \frac{C_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.9)$$

Dari definisi effectiveness, yang tidak berdimensi harus pada range $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Jika ε , $T_{h,i}$ dan $T_{c,i}$ diketahui, laju perpindahan panas aktual untuk alat penukar panas dapat ditentukan dengan persamaan, [1]

$$q = \varepsilon C_{\min} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.10)$$

Untuk setiap alat penukar panas itu dapat ditunjukkan bahwa : [1]

$$\varepsilon = f \left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \quad (2.11)$$

dimana C_{\min}/C_{\max} adalah sama dengan C_c/C_h atau C_h/C_c , tergantung pada besaran relatif antara laju kapasitas fluida panas dan dingin. Satuan jumlah perpindahan

NTU (Number of Thermal Unit) adalah parameter yang tidak berdimensi yang kegunaannya sangat luas pada analisis alat penukar panas dan didefinisikan sebagai, [1]

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (2.12)$$

Kemudian itu menyatakan laju perpindahan panas per derajat perbedaan temperatur rata-rata antara fluida, persamaan $q = UA \Delta T_{lm}$, terhadap laju perpindahan panas per derajat perubahan temperatur untuk fluida yang mempunyai laju kapasitas panas minimum.

2.2 Hubungan Effectiveness - NTU

Untuk menentukan bentuk spesifik dari hubungan Effectiveness – NTU, persamaan 2.12, dengan memperhatikan alat penukar aliran paralel $C_{\min} = C_h$, maka dari persamaan 2.9 kemudian kita dapatkan: [1]

$$\varepsilon = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} \quad (2.13)$$

dan dari persamaan 2.2 dan 2.4 kemudian didapat bahwa, [1]

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{\dot{m}_h C_{ph}}{\dot{m}_c C_{pc}} = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ho}} \quad (2.14)$$

Sekarang perhatikan persamaan 2.15 dibawah ini: [1]

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (2.15)$$

Dari persamaan 2.15 dapat dinyatakan sebagai: [1]

$$\ln \left(\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} \right) = -\frac{UA}{C_{\min}} \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \quad (2.16)$$

Atau dari persamaan 2.12, [1]

$$\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} = \exp \left\{ -NTU \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right\} \quad (2.17)$$

Dengan menyusun suku sebelah kiri persamaan ini sebagai berikut: [1]

$$\frac{T_{h_o}-T_{c_o}}{T_{c_o}-T_{c_i}} = \frac{T_{h_o}-T_{h_i}+T_{h_i}-T_{c_o}}{T_{h_i}-T_{c_i}} \quad (2.18)$$

Dan memasukkan untuk T_{c_o} dari persamaan 2.14, sehingga didapat: [1]

$$\frac{T_{h_o}-T_{c_o}}{T_{h_i}-T_{c_i}} = \frac{(T_{h_o}-T_{h_i})+(T_{h_i}-T_{c_i})-(C_{\min}/C_{\max})(T_{h_i}-T_{h_o})}{T_{h_i}-T_{c_i}} \quad (2.19)$$

Atau dari persamaan 2.13, [1]

$$\begin{aligned} \frac{T_{h_o}-T_{c_o}}{T_{h_i}-T_{c_i}} &= -\varepsilon + 1 - (C_{\min}/C_{\max})\varepsilon \\ &= 1 - \varepsilon \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Masukkan persamaan diatas dalam persamaan 2.17 dan menjawab untuk ε , kemudian kita dapatkan untuk alat penukar panas aliran paralel (parallel-flow-heat exchanger), [1]

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NTU(1+(C_{\min}/C_{\max}))\}}{1+(C_{\min}/C_{\max})} \quad (2.21)$$

Karena akan didapat hasil yang sama persis untuk $C_{\min} = C_c$, persamaan 2.21 berguna untuk setiap alat penukar panas aliran paralel, tanpa memperhatikan apakah laju kapasitas panas minimum terjadi pada fluida panas atau dingin.

2.3 Hubungan Effectiveness – NTU pada Alat Penukar Panas Aliran melintang (Cross-Flow)

Hasil bentuk yang mirip dengan alat penukar panas aliran paralel telah dikembangkan untuk bermacam-macam alat penukar panas. Untuk alat penukar panas aliran melintang (cross-flow) dengan satu fluida bercampur (mixed) sedangkan fluida yang lain tidak bercampur (unmixed), [1]

$$\varepsilon = (1/C_r) \left\{ 1 - \exp\left(C_r(1 - \exp(-NTU)) \right) \right\} \quad (2.22)$$

jika C_{\max} pada fluida yang bercampur (mixed) dan C_{\min} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) atau, [1]

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[C_r^{-1}\{1 - \exp(-C_r(NTU))\}\right] \quad (2.23)$$

jika C_{\max} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) dan C_{\min} pada fluida yang bercampur (mixed).

Dalam bentuk perhitungan desain alat penukar panas, akan lebih mudah menggunakan hubungan ε -NTU dalam bentuk, [1]

$$NTU = f\left(\varepsilon, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (2.24)$$

Dari persamaan 2.24 akan didapat persamaan sebagai berikut: [1]

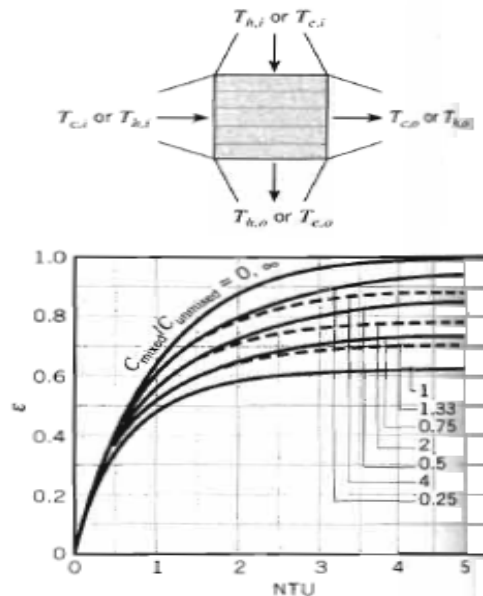
$$NTU = -\ln\left\{1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right\} \quad (2.25)$$

jika C_{\max} pada fluida yang bercampur (mixed) dan C_{\min} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) atau, [1]

$$NTU = \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln\{C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1\} \quad (2.26)$$

jika C_{\max} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) dan C_{\min} pada fluida yang bercampur (mixed).

Hubungan antara ε -NTU dapat ditampilkan dalam grafik sebagai berikut:



Gambar 2.2 Hubungan *Effectiveness* – *NTU* pada Alat Penukar Panas Aliran melintang (*Cross-Flow*) dengan satu fluida bercampur (*mixed*) sedangkan fluida yang lain tidak bercampur (*unmixed*)