บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลการทดลองและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

6.1 การคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์มีสองประเด็นใหญ่ ดังเช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทั่วไป ประเด็นแรกคือ การประเมินอัตราการถ่ายเทความร้อน (rating) เมื่อกำหนดพื้นที่การถ่ายเทความร้อนให้ ประเด็นที่สองคือ การคำนวณขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (sizing) หรือการคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเมื่อกำหนดเงื่อนไขการทำงานให้

การวิเคราะห์แก้ปัญหาทั้ง 2 ชนิดนี้ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทั่วไป มีวิธีแก้ปัญหาที่นิยมกันอยู่ 2 ชนิด ซึ่งจะนำวิธีทั้ง 2 ชนิดนี้มาใช้ในการแก้ปัญหาในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

(1) วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยรูปจำลองการนำความร้อน (conductance model) เป็นพื้นฐานในการประมาณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ความร้อนถูกส่งผ่านในแต่ละขบวนการ (11), (26), (28) (29), (30)

(2) วิธีวิเคราะห์ซึ่งพัฒนาโดย Kays และ London (31) โดยใช้ effectiveness number of transfer unit ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์จะอาศัยวิธีนี้วิเคราะห์ในเงื่อนไขของ liquid coupled indirect type ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบธรรมดา (32), (33)

6.2 วิธีวิเคราะห์คำนวณโดยอาศัยรูปจำลองการนำความร้อน (Conductance model)

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกำหนดโดยสมการ (6.1)

$$Q_T = \sum_{p=1}^{n} Q_p = UA_T (\Delta T)_{lm} = K_t (\Delta T)_{lm} \quad (6.1)$$

Q_t = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Watt)

Q_p = อัตราการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ 1 แท่ง ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

A_t = พื้นที่ผิวทั้งหมดของการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

K_{tT} = ความนำความร้อน (Watt/° C)

$(\Delta T)_{lm}$ = ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม

กรณีไหลสวนทางกัน

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \dfrac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

T_{hi} , T_{ho} = อุณหภูมิของของไหลร้อนที่ผ่านเข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตามลำดับ (° C)

T_{ci} , T_{co} = อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ผ่านเข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตามลำดับ (° C)

ค่า Q_p ในสมการ (6.1) หาได้ตามหัวข้อ 5.1 ยกเว้นการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มชั้นนอก เป็นการหาสัมประสิทธิ์ของฟิล์มที่อยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีผู้สร้างสมการ (21), (27), (34) สำหรับหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มชั้นนอกในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในที่นี้จะใช้สมการของ Zukauskas (21) ตามสมการ (6.2)

$$\frac{h_m D}{\mu_l} = C_2 \, Re^m \, Pr^{0.36} \left[\frac{Pr}{Pr_w}\right]^n \quad (6.2)$$

$n = 0$ สำหรับก๊าซ และ $n = 0.25$ สำหรับของเหลว ส่วนค่า C_2 และ m หาได้จากตาราง ข. 1 ในภาคผนวก ข

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มักจะต้องกำหนดพื้นที่ส่วนไหนที่จะใช้เป็นฐานอ้างอิง ในที่นี้ จะใช้พื้นที่ผิวภายในแท่งฮีทไปป์ทั้งแท่งเป็นฐานอ้างอิง

$$\frac{1}{U_i A_{it}} = \frac{1}{h_{oh} A_{oht}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ht}} + \frac{1}{h_{ih} A_{iht}} + \frac{1}{h_{ic} A_{ict}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ct}} + \frac{1}{h_{oc} A_{oct}} \qquad (6.3)$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{A_{it}}{h_{oh} A_{oht}} + \frac{A_{it} \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ht}} + \frac{A_{it}}{h_{ih} A_{iht}} + \frac{A_{it}}{h_{ic} A_{ict}} + \frac{A_{it} \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ct}} + \frac{A_{it}}{h_{oc} A_{oct}} \qquad (6.4)$$

U_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้พื้นที่ภายในแท่งฮีทไปป์เป็นฐานอ้างอิง (Watt/m^2 - ° C)

A_{it} = พื้นที่ผิวภายในรวมของแท่งฮีทไปป์ทุกแท่ง (m)

A_{oht} , A_{oct} = พื้นที่ผิวภายนอกรวมของท่อฮีทไปป์ ด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (m^2)

A_{iht} , A_{ict} = พื้นที่ผิวภายในรวมของท่อฮีทไปป์ ด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (m^2)

L_{ht} , L_{ct} = ความยาวรวมของท่อฮีทไปป์ ด้านร้อนและด้านเย็นตามลำดับ (m)

k = ความนำความร้อนของวัสดุที่ทำท่อฮีทไปป์ (Watt/m- ° C)

h_{oh} , h_{oc} หาได้ตามสมการ (6.2) ส่วนค่า h_{ih} , h_{ic} หาได้ตามหัวข้อ 5.1 ต่อไปนี้เป็นลักษณะของโจทย์การคำนวณและแนวทางในการคำนวณ

(a) โจทย์การคำนวณแบบที่ 1 เป็นการหาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นั่นคือหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนหรือหาจำนวนแท่งของฮีทไปป์ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีขั้นตอนการหาดังนี้

(1) คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเงื่อนไขที่โจทย์กำหนดให้

(2) คำนวณค่า K_T หรือ UA_T จากสมการ (6.1) โดยใช้ $(\Delta T)_{lm}$ จากเงื่อนไขของโจทย์

(3) คำนวณหาจำนวนแท่งฮีทไปป์ที่ใช้โดย การสุ่มเดา ดังนี้

ก. กำหนด I.D., O.D., L, L_c, L_h ของฮีทไปป์ 1 แท่ง

ข. กำหนดวัสดุที่ใช้ทำฮีทไปป์ , ของไหลใช้งานภายในแท่งฮีทไปป์ , ปริมาณของไหลที่เหมาะที่จะบรรจุในฮีทไปป์ (ประมาณ 15-20 % ของปริมาตรภายในแท่งฮีทไปป์)

ค. วิธีเรียงแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ง. หาค่า K_p (ของ 1 แท่ง) ตามหัวข้อ 5.1 และ 6.2

จ. กำหนดจำนวนแท่งฮีทไปป์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (6.4)

$$n = \frac{K_T}{K_p} \qquad (6.5)$$

ถ้าจำนวนแท่งฮีทไปป์มากหรือน้อยเกินไปควรปรับ ข้อ ก , ข และ ค ใหม่ แล้วคำนวณใหม่จนกว่าจะได้จำนวนและขนาดที่เหมาะสม

(b) โจทย์การคำนวณแบบที่ 2 เป็นการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อกำหนดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ให้ และกำหนดลักษณะแท่งฮีทไปป์ไว้ให้แล้ว ซึ่งมีขั้นตอนการหาดังนี้

ก. คำนวณ K_p หรือ UA_p ตามหัวข้อ 5.1

ข. $K_T = nK_p$

ค. สมมติอุณหภูมิสายออกของสายเย็นจะได้อุณหภูมิสายออกของสายร้อน

$$Q_T = K_T (\Delta T)_{lm} = F_c C_{pc} \Delta T_c = F_h C_{ph} \Delta T_h \qquad (6.6)$$

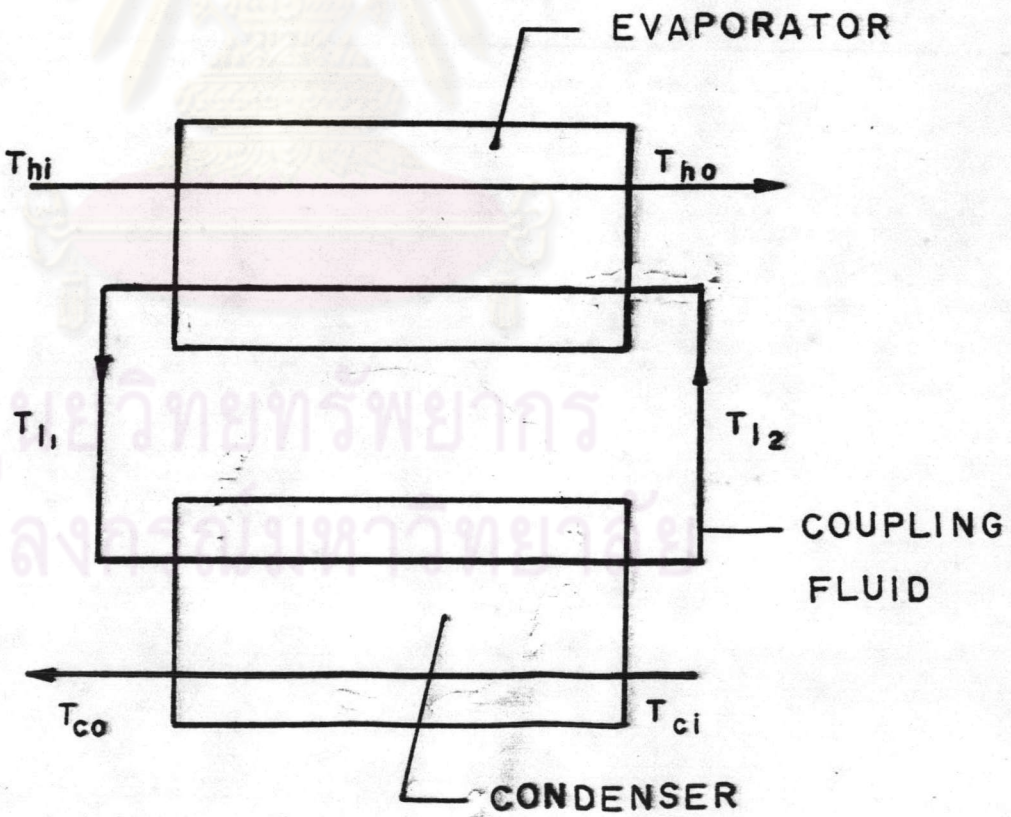
แล้วหาค่า $(\Delta T)_{lm}$ จากนั้น คำนวณหา Q_T จากสมการ (6.6) ถ้า Q_T ที่ได้ไม่เท่ากับ Q_T ที่เกิดจากการสมมติก็ให้สมมติค่า T_e สายออกใหม่

6.3 วิธีวิเคราะห์โดยความสัมพันธ์ของ effectiveness - number of Transfer unit (E-NTU)

วิธีนี้พิจารณาการส่งผ่านความร้อนของท่อฮีทไปป์ เป็น liquid coupled indirect type ดังแสดงในรูป 6.1 สมมติฐานดังนี้

(1) อุณหภูมิภายในแท่งฮีทไปป์เท่ากับตลอดทั้งแท่งและมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของไออิ่มตัวของของไหลใช้งานภายในแท่งฮีทไปป์ (T_s)

(2) ไม่มีการส่งผ่านความร้อน ตามแนวในเนื้อผนังท่อ



รูป 6.1 แบบจำลองการส่งผ่านความร้อนเป็น liquid coupled indirect type ของฮีทไปป์ 1 แท่ง

รูป 6.1 แสดงแบบจำลองของแนวคิดการส่งผ่านความร้อนแบบ liquid coupled indirect type ในรูปนี้ของไหลร้อนอุณหภูมิ T_{h1} ไหลเข้ามาถ่ายเทความร้อนให้แท่งฮีทไปป์ และไหลออกไปที่อุณหภูมิ T_{ho} ความร้อนที่ถูกถ่ายเทเข้าสู่ฮีทไปป์จะทำให้ของไหลใช้งานอุณหภูมิ T_{12} ระเหยและเพิ่มอุณหภูมิเป็นไอที่ T_{11} ไอของไหลใช้งานนี้เมื่อถึงช่วงการควบแน่น จะควบแน่นเป็นของเหลวและลดอุณหภูมิเป็น T_{12} ในขณะเดียวกับที่ถ่ายเทความร้อนให้ของไหลเย็นภายนอก ทำให้ของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิ T_{ci} ร้อนขึ้นเป็น T_{co} ในที่นี้จะถือว่า $T_{11} = T_{12} = T_{\infty}$

<u>จากคำนิยาม</u>

$$\text{Effectiveness (E)} = \frac{\text{actual heat transfer rate}}{\text{maximum posible heat transfer rate from one stream to the other}}$$

$$= \frac{Q}{Q_{max}} \qquad (6.7)$$

เนื่องจาก $Q_{max} = (mc_p)_{min} (T_{h1} - T_{c1})$ (6.8)

$$Q = E (mc_p)_{min} (T_{h1} - T_{c1}) \qquad (6.9)$$

$$E = \frac{Q}{(mc_p)_{min} (T_{h1} - T_{c1})} \qquad (6.10)$$

$$Q = m_h c_{ph} (T_{h1} - T_{ho}) = m_c c_{pc} (T_{co} - T_{c1}) \qquad (6.11)$$

แทนค่าสมการ (6.11) ในสมการ (6.10) จะได้

$$E = \frac{C_h (T_{h1} - T_{ho})}{C_{min} (T_{h1} - T_{c1})} \qquad (6.12)$$

$$E = \frac{C_c (T_{co} - T_{c1})}{C_{min} (T_{h1} - T_{c1})} \qquad (6.13)$$

$$C_h = m_h c_{ph} \quad , \quad C_c = m_c c_{pc} \qquad (6.14)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$C_{min} = (m\ C_p)_{min} \qquad (6.15)$$

นิยามให้ Number of heat transfer units (NTU) เป็น

$$NTU = \frac{A\ U_m}{C_{min}} \qquad (6.16)$$

U_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A = พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน

E = Effectiveness

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (Watt)

Q_{max} = อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Watt)

m = อัตราไหลของของไหล (Kg/sec)

C_p = ความจุความร้อน (Watt/Kg $^\circ$ C)

$(m\ C_p)_{min}$ = $m\ C_p$ ค่าที่น้อย

T_{hi} , T_{ho} = อุณหภูมิของของไหลร้อนที่ไหลเข้าและไหลออก ตามลำดับ ($^\circ$ C)

T_{ci} , T_{co} = อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลเข้าและไหลออก ตามลำดับ ($^\circ$ C)

U_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A = พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน

Subscripts

h ของไหลร้อน

c ของไหลเย็น

ในกรณีของไหลที่จะมาแลกเปลี่ยนความร้อนไหลสวนทางกัน สำหรับ 1 แถว จะได้

$$NTU_h = \frac{U_h\ A_h}{C_h} \qquad (6.17)$$

$$NTU_c = \frac{U_c\ A_c}{C_c} \qquad (6.18)$$

ในกรณี $C_c > C_h$ เราสามารถอนุพันธ์สมการต่อไปนี้ได้ตาม Kays และ London (31)

Effectiveness ของสายร้อน

$$E_h = 1 - EXP(-NTU_h) = (T_{hi} - T_{ho})/(T_{hi} - T_m) \quad (6.19)$$

Effectiveness ของสายเย็น

$$E_c = 1 - EXP(-NTU_c) = (T_{co} - T_{ci})/(T_m - T_{ci}) \quad (6.20)$$

จากสมการ (6.12), (6.13), (6.14) จะได้ overall effectiveness ของฮีทไปป์ 1 แท่ง

$$E = \frac{C_c (T_{co} - T_{ci})}{C_h (T_{hi} - T_{ci})} = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} \quad (6.21)$$

จากสมการ (6.19), (6.20)

$$T_m = T_{hi} - \frac{(T_{hi} - T_{ho})}{E_h} = T_{ci} - \frac{(T_{co} - T_{ci})}{E_c} \quad (6.22)$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_h} + \frac{C_h/C_c}{E_c}} \quad (6.23)$$

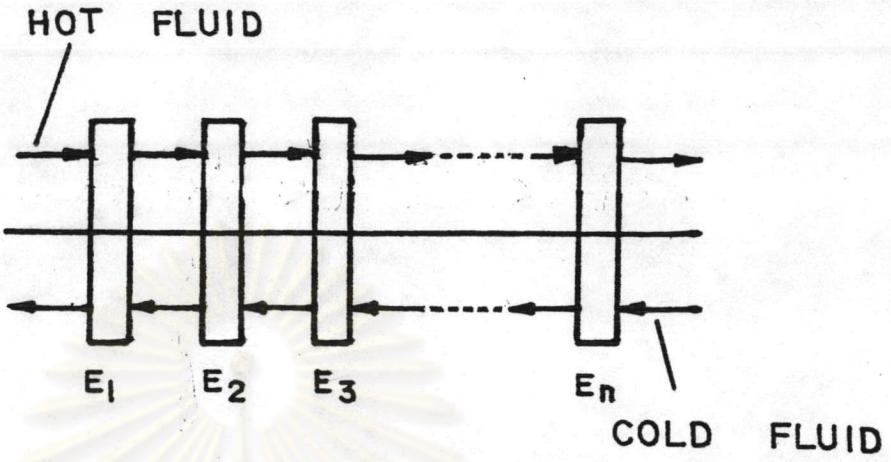
กรณี $C_h > C_c$ ในทำนองเดียวกันจะได้

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{C_c/C_h}{E_h}} \quad (6.24)$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_{min}} + \frac{m}{E_{max}}} \quad (6.25)$$

$$m = C_{min} / C_{max} \quad (6.26)$$

เมื่อมีฮีทไปป์ n แถว ดังรูป 6.2 โดยอาศัย equilibrium line ตามแบบ Kays และ London (81) จะได้ Overall effectiveness ของ n แถว หรือ n แท่ง (E_n) ดังนี้



รูป 6.2 ฮีทไปป์วางเรียงกัน n แถว

$$E_n = \frac{\left[\frac{1 - mE}{1 - E}\right]^n - 1}{\left[\frac{1 - mE}{1 - E}\right]^n - m} \qquad (6.27)$$

ถ้า $m = 1$

$$E_n = \frac{nE}{1 + (n-1)E} \qquad (6.28)$$

เมื่อพิจารณาการไหลตามกัน

$$E_n = \frac{1 - [1 - E(1 + m)]^n}{(1 + m)} \qquad (6.29)$$

ถ้า $m = 1$

$$E_n = \frac{1 - (1 - 2E)^n}{2} \qquad (6.30)$$

แนวทางในการแก้ปัญหาโจทย์ 2 ประเภท คือ การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและการกำหนดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามวิธี E-NTU ดังต่อไปนี้

(a) โจทย์คำนวณแบบที่ 1 นั่นคือการหาขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีขั้นตอนการหาดังนี้

(1) คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเงื่อนไขที่โจทย์กำหนดให้

(2) หา E_n จากสมการ (6.2)

(3) หาคุณสมบัติของฮีทไปป์

(ก) กำหนด ID, OD, L, L_c, L_h ของฮีทไปป์

(ข) กำหนดวัสดุและของไหลใช้งาน

(ค) กำหนดวิธีวางเรียงท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

(ง) คำนวณหาค่า R_1 ถึง R_7 ตามวิธีในหัวข้อ 5.1 และ 6.2

(จ) หา E_h จากสมการ (6.19)

E_c จากสมการ (6.20)

(ฉ) หา E จากสมการ (6.25)

(ช) หาจำนวนแท่งฮีทไปป์จากข้อ 2 และสมการ (6.27) ถึง (6.30)

ถ้าจำนวนแท่งฮีทไปป์มากหรือน้อยเกินไปควรปรับข้อ ก , ข และ ค ใหม่

(b) โจทย์คำนวณแบบที่ 2 นั่นคือการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อกำหนดขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและกำหนดลักษณะฮีทไปป์ให้ มีขั้นตอนการหาดังนี้

(1) จากลักษณะเงื่อนไขโจทย์ สามารถหาค่า R_1 ถึง R_7 ได้ตามวิธีในหัวข้อ 5.1 และ 6.2

(2) หาค่า E_h จากสมการ (6.19)

E_c จากสมการ (6.20)

(3) หา E จากสมการ (6.25)

(4) รู้ค่า n จากโจทย์กำหนด หาค่า E_n ตามสมการ (6.27) ถึง (6.30)

(5) หาค่าอุณหภูมิสายออกจากสมการ (6.21)

(6) หาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการ (6.6)

6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

พบว่าที่มุมเอียงต่าง ๆ กัน (5°, 25°, 40°, 70°, 90°) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีสมรรถนะการทำงานต่างกันด้วย และมุม 90° จะให้สมรรถนะสูงสุด เมื่อทำการทดลองที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน โดยมีมุมเอียงคงที่ พบว่าถ้าอัตราการไหลของของไหลร้อนและเย็นต่างเร็วขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะสูงขึ้นด้วย ที่อุณหภูมิน้ำร้อนสายเข้า 60° C น้ำเย็นสายเข้า 30° C ที่มุม 90 องศาพบว่าค่า UA_T ของเครื่องเท่ากับ 60 - 100 Watt/° C หรือ 0.25 - 0.43 Watt/° C แท่ง เมื่อเพิ่ม Reynolds number ในช่วง 50 - 350 นั่นคืออัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่อแท่งของฮีทไปป์ในเครื่องเท่ากับ 6 - 12 Watt/แท่ง อนึ่ง ผลการทดลองที่มุมเอียงต่าง ๆ กันและอัตราการไหลต่าง ๆ ได้ค่า UA_T 30 - 100 Watt/° C หรือ 0.12 - 0.43 Watt/° C /แท่ง นั่นคืออัตราการถ่ายเทความร้อนรวมเท่ากับ 3 - 12 Watt/แท่ง (ดูรูป 4.3 - 4.5)

การทดลองเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของร้อนสายเข้า (50 °C, 60 °C, 70 °C 80 ° C) โดยให้อุณหภูมิน้ำเย็นสายเข้าคงที่ตามอุณหภูมิห้องพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนสูงขึ้น แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงนัก ดูรูป 4.6, 4.7

รูป 4.8 ถึง 4.12 แสดงการกระจายของอุณหภูมิผิวของแท่งฮีทไปป์ไร้วิกค์ที่วางอยู่ตรงกลางของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ จะเห็นว่าอุณหภูมิของช่วงการควบแน่นจะค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งช่วง และจะยิ่งสม่ำเสมอคงที่มากขึ้นเมื่ออัตราไหลสูงขึ้น ส่วนในช่วงการระเหยจะพบว่าที่ตำแหน่งบริเวณใกล้ก้นหลอดจะมีอุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราไหลต่ำทำให้เกิดการไหลเป็นชั้น ๆ ชั้นล่างจะมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ

จากการกระจายของอุณหภูมิบนผิวแท่งฮีทไปป์ 1 แท่ง บริเวณตรงกลางและบริเวณอื่น ๆ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้พบว่า ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการไหลเป็นชั้น ๆ จริง โดยมีอุณหภูมิของแต่ละชั้นต่างกัน ชั้นล่างจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้นบน ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีลักษณะซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

รูป 6.4 , 6.5 แสดงให้เห็นการกระจายอุณหภูมิภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นไปอย่างซับซ้อนมาก นั่นคือมีการกระจายอุณหภูมิเป็นชั้น ๆ และภายในชั้นเดียวกันก็ยังมีอุณหภูมิต่าง ๆ กัน ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทำให้ค่าของ h_{oh} , h_{oc} ที่หาได้จากสมการ (6.2) นั้นไม่ตรงกับความเป็นจริง รูป 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re ทดลองและที่ได้จากการคำนวณ โดยสมการ (6.2) จะเห็นว่าค่า Nu ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่าค่าคำนวณพอสมควร นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลองเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็น (ดูรูป 4.3, 4.4, 4.5) ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ความต้านทานของฟิล์มชั้นนี้มีบทบาทสำคัญในการกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องที่ทดลอง อนึ่ง สมการการทดลองที่ได้จากรูป 6.6 เป็นดังนี้

$$Nu = 0.26\ Re^{0.48} \qquad (6.31)$$

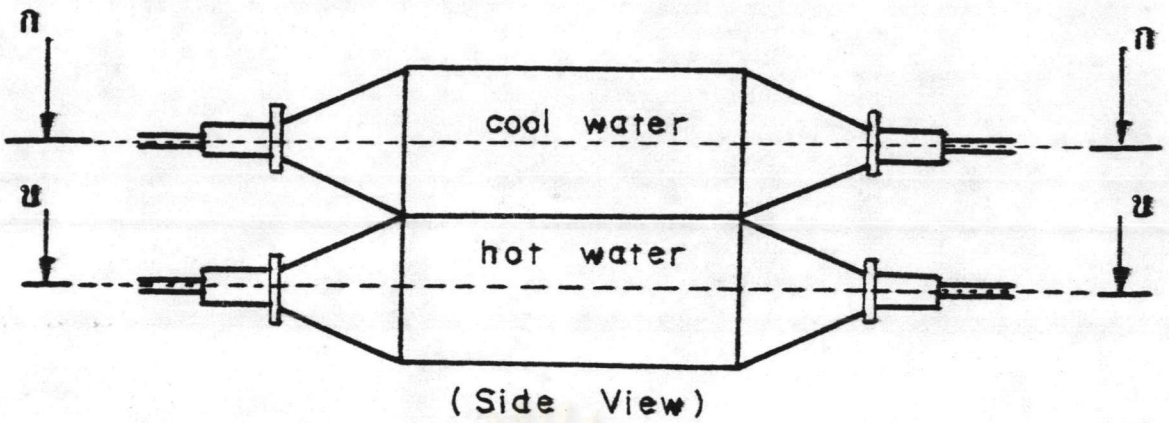
ในที่นี้ Re คำนวณได้ดังนี้ $Re = G_{max}\ D/\mu_l$

G_{max} = อัตราการไหลสูงสุด (Kg/sec)

D = รัศมีภายนอกท่อ (m)

μ_l = ความหนืดของของไหล (Kg/m-sec)

สมการ (6.31) นี้ใช้ได้กับเงื่อนไขการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เท่านั้น ซึ่งมีค่า Re ต่ำ และมีการกระจายของอุณหภูมิเป็นชั้น ๆ



รูป 6.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

37		37		30
35	36	37	39	39
36		37		39

ภาพตัด ก - ก
(cool water)

59		61		63
55	56	57	58	61
49		56		59.5

ภาพตัด ข - ข
(hot water)

รูป 6.4 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ระดับเดียวกันภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อัตราไหล 4 ลิตร/นาที มุม 90°

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

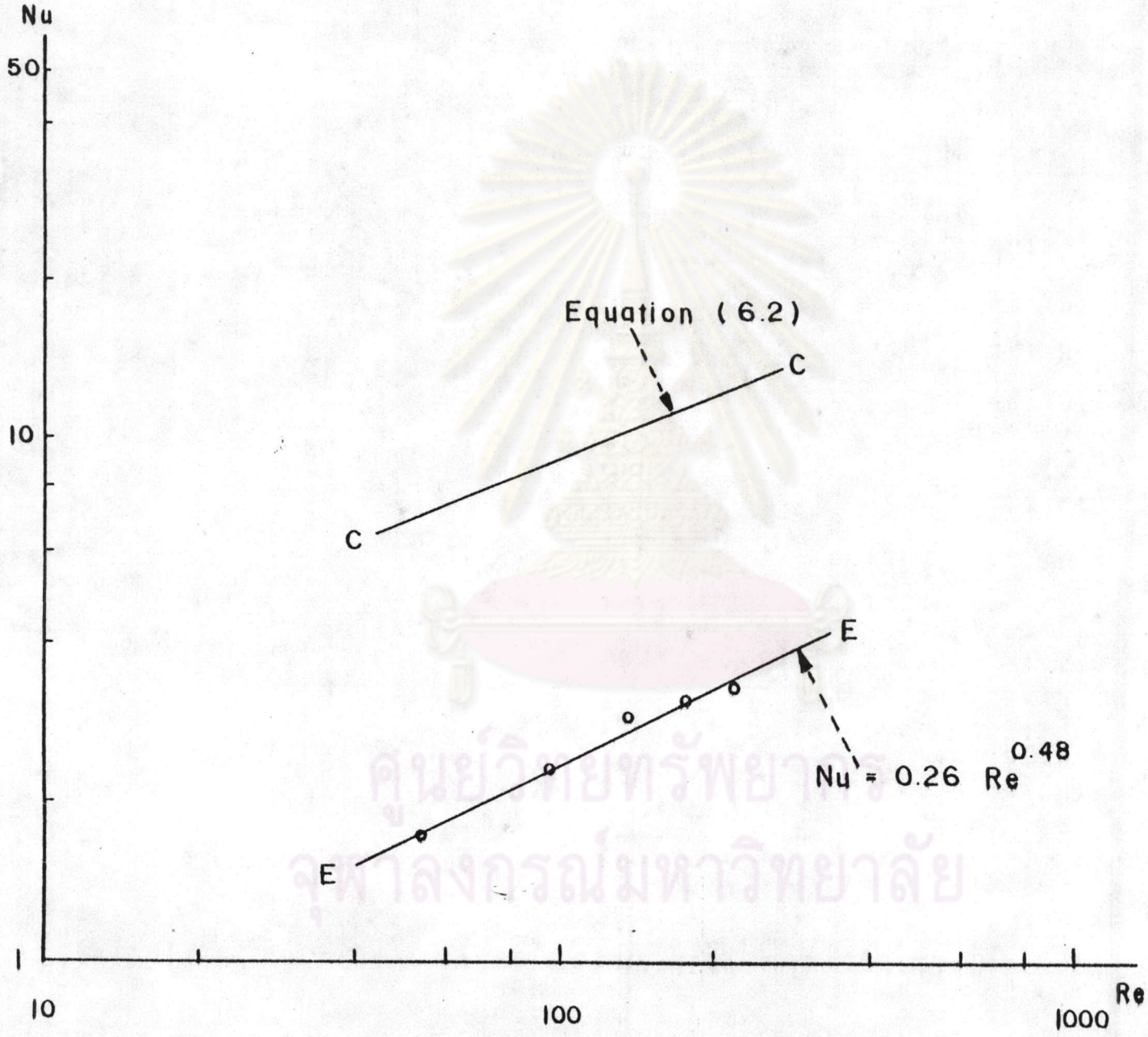
43		45		47
35	36	37	39	39
31		35		30

ภาพตัด ก - ก
(cool water)

61		61		62
55	56	57	58	61
40		46		41

ภาพตัด ข - ข
(hot water)

รูป 6.5 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ระดับต่างกัน (ตั้งฉากกับทิศทางการไหล) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่อัตราไหล 4 ลิตร/นาที มุม 5°



รูป 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.5 ตัวอย่างการคำนวณโจทย์แบบที่ 2

ตัวอย่างต่อไปนี้เป็นการสาธิตวิธีการคำนวณในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยอาศัยข้อมูลจริงของการทดลอง ซึ่งจะคำนวณโดยวิธีการทั้ง 2 แบบ ดังนี้

(ก) การคำนวณโดยวิธี conductance ตามที่กล่าวมาในหัวข้อ 6.2

<u>ตัวอย่าง 6.1</u> เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 18 x 19 ซม. ซึ่งประกอบด้วยท่อฮีทไปป์แก้ว 240 แท่ง วางเรียงกันแบบแนวเหลื่อมกัน (staggered) มี pitch ห่างกัน 2 ซม. ท่อฮีทไปป์แก้วมี I.D. 0.8 ซม. O.D 1 ซม. มีความยาวรวม L = 36 ซม. L_h = 16 ซม. L_c = 16 ซม. กล่องน้ำร้อนมีน้ำร้อนไหลเข้าด้วยความเร็ว 4 ลิตร/นาที อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้า 60 ° C กล่องน้ำเย็นมีน้ำเย็นไหลเข้ามาด้วยความเร็ว 4 ลิตร/นาที อุณหภูมิน้ำเย็นทางเข้า 31 ° C จงหาอุณหภูมิทางออกของน้ำทั้ง 2 ด้าน

สมมติให้อุณหภูมิทางออกของน้ำร้อน 55.00 ° C

$$Q = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = m_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

$$m_h = \frac{4}{60 \times 1000} \frac{m^3}{sec} (983.2 \ Kg/m^3) = 0.0655 \ Kg/sec$$

$$m_c = \frac{4}{60 \times 1000} \frac{m^3}{sec} (995.4 \ Kg/m^3) = 0.0664 \ Kg/sec$$

$$Q = (0.0655 \ Kg/sec)(4184.4 \ J/Kg-^\circ C)(60 - 55.00)$$

$$= 1370 \ Watt$$

หา T_{co}

$$1370 \ Watt = (0.0664 \ Kg/sec)(4178.4 \ J/Kg-^\circ C)(T_{co} - T_{ci})$$

$$T_{co} - T_{ci} = 4.94 \ ^\circ C$$

$$T_{co} = 4.94 + 31 = 35.94 \ ^\circ C$$

$$(\Delta T)_{ln} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}}$$

$$= \frac{(60 - 35.94) - (55.00 - 31)}{\ln \frac{60 - 35.94}{55.00 - 31}} = 24.03 \ ^\circ C$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฮีทไปป์ 1 แท่ง

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อจากการทดลองได้

$h_m = 106.2 \quad W/m^2-^\circ C$

$h_7 A_{oc} = (106.2)(\pi)(0.01)(0.16) = 0.5338 \quad W/^\circ C$

หา h_m ของ 1 แท่ง

$Q_c = 1370/240 = 5.71$

$$h_{ic} = 1.47 \; k \left[\frac{H_{fg} \; g \; \rho_l^2 \; A}{4 \; Q_c \; L_c \; \mu_l} \right]^{1/3}$$

$$h_m = 1.47(0.613) \left[\frac{(2,428,000)(9.8)(995.37)^2 (0.00527)}{4 \; (5.71) \; (0.16) \; (0.0007808)} \right]^{1/3}$$

$= 31701.3$

$h_m A_{ic} = (31701.3)(\pi)(0.008)(0.16) = 127.4785^\circ C$

หา h_3

$$h_{inp} = \frac{Q^{1-r} \; C_{pl}}{A_{in} \; C_{sf} \; H_{fg} \; Pr} \left[\frac{1}{A_{in} \; \mu_l \; H_{fg}} \sqrt{\frac{g_c \; \sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{-r}$$

$Q = 5.71$

$A_{in} = 0.00527$

$H_{fg} = 2,428,000$

$Pr = 2.998$

$\mu_l = 0.0007808$

$\sigma = 0.07$

$\rho_l - \rho_v = 995.37 - 0.03 = 995.34$

$r = 0.498 \; , \; 1 - r = 1 - 0.498 = 0.502$

$C_{sf} = 0.242$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$h_s = \frac{(5.71)^{.502}\ (4178.4)}{(0.00527)(0.242)(2,428,000)(2.998)} \times \left[\frac{1}{+\ (0.00527)(0.0007808)(2,428,000)\sqrt{\frac{.07}{9.8(995.34)}}}\right]^{-.498}$$

$$= 64.836$$

$$h_{inf} = 1.47\ k \left[\frac{H_{fg}\ g\ \rho_l^2\ A_{if}}{4\ Q\ L_{fp}\ \mu_l}\right]^{1/3}$$

$k = 0.613$ W/m-°C

$H_{fg} = 2,428,000$ J/Kg

$= 995.37$ Kg/m³

$A_{if} = D_i\ L_f = (0.008)(0.1) = 0.002513$ m²

$Q = 5.71$ W

$L_f = 0.1$ m

$= 0.0007808$ Kg/m-sec

$$h_{inf} = (1.47)(0.613)\left[\frac{(2,428,000)(9.8)(995.37)^2(.002513)}{(4)(5.71)(0.1)(0.0007808)}\right]^{1/3}$$

$$= 28,968.6 \text{ W/m}^2\text{-°C}$$

$$h_s\ A_{ih} = h_{inp}\ A_{ip} + h_{inf}\ A_{if}$$

$$A_{ip} = D\ L_p = (0.008)(0.06) = 0.001508 \text{ m}^2$$

$$h_s\ A_{ih} = (64.836)(0.001508) + (28,968.6)(0.002513)$$

$$= 0.0978 + 72.7981 = 72.8959 \text{ W/°C}$$

$$\frac{1}{UA_T} = \frac{1}{nh_{oh}\ A_{oh}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k\ L_h\ n} + \frac{1}{n\ h_s\ A_{ih}} + \frac{1}{n\ h_s\ A_{ic}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k\ L_c\ n} + \frac{1}{n\ h_w\ A_{oc}}$$

$$\frac{1}{UA_T} = \frac{1}{(240)(0.5338)} + \frac{\ln(1.25)}{2(\pi)(1.15)(0.16)(240)} + \frac{1}{(240)(72.8959)} +$$

$$\frac{1}{(240)(127.4785)} + \frac{\ln(1.25)}{2\pi(1.15)(0.16)(240)} + \frac{1}{(240)(0.5338)}$$

$$= 0.00781 + 0.0008 + 0.00006 + 0.00003 + 0.0008 +$$

$$+ 0.00781 = 0.01731$$

$$UA_t = 57.8 \quad W/^\circ C$$

$$Q = UA_t (\Delta T)_{ln}$$

$$= (57.8)(24.03) = 1388 \quad Watt$$

ถ้าค่า Q ที่คำนวณได้ไม่ตรงกับที่สมมติขึ้นมา ให้สมมติค่าอุณหภูมิทางออกของน้ำร้อนหรือน้ำเย็นใหม่ และทำตามทำนองเดียวกับที่ทำมา ค่า Q ที่คำนวณได้ใกล้เคียงมากกับค่า Q ที่สมมติขึ้นมา ดังนี้

$$T_{co} = 35.94 \ ^\circ C \ , \ T_{ho} = 55.00 \ ^\circ C$$

(ข) การคำนวณโดยวิธี E - NTU ตามที่กล่าวถึงในหัวข้อ (6.3)

<u>ตัวอย่าง 6.2</u> โจทย์เดียวกับตัวอย่าง 6.1

จากตัวอย่าง 6.1 ได้ $h_1 A_{oh} = 0.5338 \quad W/^\circ C$

$h_3 A_{ih} = 72.7981 \quad W/^\circ C$

$h_5 A_{ic} = 127.4785 \quad W/^\circ C$

$h_7 A_{oc} = 0.5338 \quad W/^\circ C$

$$\frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{h_1 A_{oh}} + \frac{\ln (r_o/r_i)}{2\pi k L_h} + \frac{1}{h_3 A_{ih}}$$

$$= \frac{1}{0.5338} + \frac{\ln 1.25}{2\pi(1.15)(0.16)} + \frac{1}{72.8959}$$

$$= 1.8734 + 0.1930 + 0.0137 = 2.0801$$

$$U_h A_h = 0.4807 \quad W/^\circ C$$

$$C_h = m_h C_{ph} = (0.0655)(4184.4) = 274.0782 \quad W/^\circ C$$

$$NTU_h = \frac{U_h A_h}{C_h} = \frac{0.4807}{274.0782} = 0.00175$$

$$\frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{h_5 A_{ic}} + \frac{\ln (r_o/r_i)}{2\pi k L_c} + \frac{1}{h_7 A_{oc}}$$

$$= \frac{1}{127.4785} + \frac{\ln 1.25}{2\pi(1.15)(0.16)} + \frac{1}{0.5338}$$

$$= 0.0078 + 0.1930 + 1.8734 = 2.0742$$

$$U_c A_c = 0.4821$$

$$C_c = m_c C_{pc} = (0.0664)(4178.4) = 277.4458 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$NTU_c = \frac{U_c A_c}{C_c} = \frac{0.4821}{277.4458} = 0.00174 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$E_h = 1 - EXP(-NTU_h)$$

$$= 1 - EXP(-0.00175) = 0.00175$$

$$E_c = 1 - EXP(-NTU_c)$$

$$= 1 - EXP(-0.00174) = 0.00174$$

$C_c > C_h$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_h} + \frac{C_h/C_c}{E_c}}$$

$$m = C_h/C_c = 274.0782 / 277.4458 = 0.9879$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{0.00175} + \frac{0.9879}{0.00174}} = \frac{1}{571.4286+567.7586} = \frac{1}{1139.1872}$$

$$= 0.00088$$

$n = 240$, การไหลเป็นแบบสวนทางกัน

$$E_n = \frac{\left[\frac{1 - mE}{1 - E}\right]^n - 1}{\left[\frac{1 - mE}{1 - E}\right]^n - m}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$E = \frac{\left[\frac{1 - (0.9879)(0.00088)}{1 - 0.00088}\right]^{240} - 1}{\left[\frac{1 - (0.9879)(0.00088)}{1 - 0.00088}\right]^{240} - 0.9879}$$

$$E_n = 0.1747$$

$$E_n = \frac{C_c\ (T_{co} - T_{ci})}{C_h\ (T_{hi} - T_{ci})} = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$0.1747 = \frac{277.4458}{274.0782}\ \frac{(T_{co} - 31)}{(60 - 31)}$$

$$T_{co} - 31 = 5.00$$

$$T_{co} = 5.00 + 31 = 36$$

$$E_n = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$0.1747 = \frac{60 - T_{ho}}{60 - 31}$$

$$60 - T_{ho} = 5.07$$

$$T_{ho} = 54.93\ ^{\circ}C$$

∴ ค่าอุณหภูมิทางออกที่คำนวณได้โดยวิธี E-NTU นี้ คือ

$$T_{co} = 36\ ^{\circ}C$$

$$T_{ho} = 54.93\ ^{\circ}C$$

ในขณะที่ค่าการทดลองของอุณหภูมิของทางออกสายน้ำเย็นและน้ำร้อน คือ 36, 55 °C ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทั้ง 2 วิธี กับค่าการทดลองมีค่าใกล้เคียงถูกต้องกัน อนึ่ง ในทั้ง 2 ตัวอย่างจะเห็นว่าค่า h_3 และ h_5 มีค่าสูงมาก ดังนั้นในการคำนวณอย่างคร่าว ๆ จึงอาจตัดทั้ง 2 ค่านี้ได้ จากข้อมูลในการคำนวณจะพบว่า ค่า h_1 และ h_7 เป็นค่าที่ต่ำมาก จึงเป็นตัวกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการทดลองนี้

การคำนวณโดยวิธีรูปจำลองการนำความร้อน และ E-NTU ในกรณีที่โจทย์มิได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในแท่งฮีทไปป์มาให้เรา จะ

ต้องสมมติอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นมาเองและทำสุ่มหาค่า Q ไปจนกว่าจะพบค่า Q ที่เหมาะสม จากนั้นจึงหาอุณหภูมิของสายออกทั้ง 2 สายได้ ดังนั้นวิธีคำนวณทั้งสองไม่ได้แตกต่างกันมากนัก แต่ถ้าหากว่าโจทย์ได้บอกสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในแห่งฮีทไปป์มาให้ การแก้ปัญหาโจทย์ประเภทที่ 2 นี้โดยวิธี E-NTU จะสะดวกกว่าวิธีรูปจำลองการนำความร้อน เพราะว่าไม่ต้องทำการสุ่มหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม

6.6 ตัวอย่างการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์ในอุตสาหกรรม

<u>ตัวอย่างที่ 6.3</u> เราต้องการคำนวณขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ไร้วิกค์ซึ่งจะใช้ในการเก็บความร้อนทิ้งจากก๊าซที่ปล่อยออกจากหม้อไอน้ำ เพื่อไปใช้ในการอุ่นอากาศที่จะส่งเข้าไปสันดาปเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ ก๊าซร้อนที่ออกจากหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิ 185 $^{\circ}$C และถูกปล่อยออกมาด้วยอัตรา 3,600 m^3 (0 $^{\circ}$C, 1 atm)/ชม. ส่วนอากาศที่ใช้ในการสันดาปจะถูกป้อนด้วยอัตรา 3,000 m^3 (0 $^{\circ}$C, 1 atm)/ ชม. ที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}$C จงคำนวณขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีที่ต้องการอุ่นอากาศเป็น 85 $^{\circ}$C ก๊าซร้อนและอากาศมีคุณสมบัติ ดังนี้

	ก๊าซร้อน	อากาศ
ความหนาแน่น (Kg/m^3)(0 $^{\circ}$C, 1 atm)	1.35	1.29
ความจุความร้อน (Kcal/Kg $^{\circ}$C)	0.28	0.25

สำหรับตัวท่อฮีทไปป์ที่จะใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวท่อทำด้วยทองแดงมีน้ำเป็นของเหลวใช้งานโดยบรรจุน้ำสูง 32 ซม. ตัวท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.0191 m. และมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.0166 m. ด้านนอกของท่อมีครีบรูปจานกลมติดอยู่ตลอด ตัวท่อยาว 1.6 เมตร เวลาติดตั้งจะให้ส่วนที่อยู่ในช่วงก๊าซร้อนไหลผ่านยาว 0.8 เมตร ช่วงก๊าซเย็นไหลผ่าน 0.8 เมตร

วิธีคำนวณ 1) ดุลย์ความร้อน

อากาศ : อัตราไหล 3,000 m^3/ชม. ความหนาแน่น 1.29 Kg/m^3 ความจุความร้อน 0.25 Kcal/Kg° C อุณหภูมิทางเข้า 25° C อุณหภูมิทางออก 85 ° C

$$Q = m_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

$$m_c = F_c = \frac{3,000}{3,600} (1.29) = 1.075 \text{ Kg/sec}$$

$$C_{pc} = 0.25 \text{ Kcal/Kg° C}$$

$$T_{co} - T_{ci} = 85 - 25 = 60 \text{ ° C}$$

$$Q = (1.075)(0.25)(60) = 16.125 \text{ Kcal/sec}$$

ก๊าซร้อน : อัตราไหล 3,600 m^3/ชม. ความหนาแน่น 1.35 Kg/m^3 ความจุความร้อน 0.28 Kcal/Kg-° C อุณหภูมิทางเข้า 185 ° C

$$Q = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho})$$

$$Q = 16.125 \text{ Kcal/sec}$$

$$m_h = F_h = \frac{3,600}{3,600} (1.35) = 1.35 \text{ Kg/sec}$$

$$C_{ph} = 0.28 \text{ Kcal/Kg° C}$$

$$T_{hi} - T_{ho} = 185 - T_{ho}$$

แทนค่า $16.125 = (1.35)(0.28)(185 - T_{ho})$

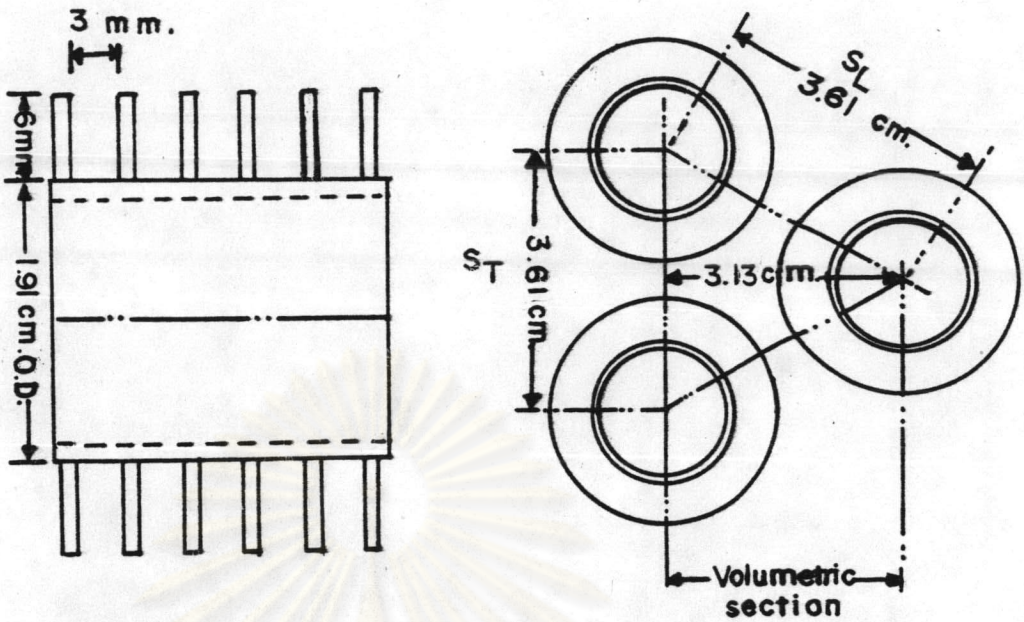
$$T_{ho} = 185 - 42.66 = 142.34 \text{ ° C}$$

2) ออกแบบขนาดครีบและการจัดวางท่อ (34)

กำหนดให้ความเร็วไหลผ่าน (face velocity) ประมาณ 3 เมตร/วินาที

∴ กล่องก๊าซร้อนมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.8 x 0.375 เมตร

กล่องอากาศเย็นมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.8 x 0.375 เมตร ให้ครีบสูง 6 มม. หนา 0.8 มม. วางห่างกันแต่ละแผ่น 3 มม. เป็นครีบอะลูมิเนียม จะวางท่อฮีทไปป์ตามพื้นที่หน้าตัดได้ 10 ท่อ แต่ละท่อห่างกัน (pitch) 3.61 ซม. วางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า แถวต่อมาจะวางท่อได้ 9 ท่อ



รูป 6.7 การติดครีบและการจัดวางท่อ

3) หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อฮีทไปป์ 1 ท่อ

ซึ่งหาได้ตามหนังสือ (35) และตามหัวข้อ 5.1 ดังนี้

(ก) หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มชั้นนอกตาม (35)

หา Equivalent diameter (d_e) ดูรูป 6.7

$$D_e = \frac{2 \text{ (fin area + bare tube area)}}{\pi \text{ (projected perimeter)}}$$

Fin area (A_f) = π (รัศมีวงนอกครีบ - รัศมีวงนอกท่อ) x (2 หน้า)

x $\frac{(1,000)}{3}$ m^2/m ของท่อ

$$= \pi(0.01555^2 - 0.00955^2)\ (2)\ \frac{(1000)}{3}$$

A_f = 0.31542 m^2/m ของท่อ

Bare tube are (A_b) = π (0.0191)(1) - π (0.0191)(0.0008) x $\frac{(1,000)}{3}$

= 0.044 m^2/m ของท่อ

แทนค่า

$$D_e = \frac{2\ (0.31542 + 0.044)}{(9.46667)}$$

= 0.02417 m

หา Minimum free flow area (A_{min}) ของทั้งด้านก๊าซร้อนและอากาศ ซึ่งเท่ากัน

$$A_{min} = 0.8 \times 0.375 - 10((0.0191)(0.8) + (2)(0.8) \times (0.0008)(0.006)\frac{(1,000)}{3})$$

= 0.1216 m^2

อัตราไหลสูงสุด $G_{max} = m/A_{min}$

<u>ก๊าซร้อน</u> $G_{max} = m_h/A_{min}$

= (1.35)/(0.1216) = 11.10197 Kg/m^2 sec

อุณหภูมิก๊าซร้อน = (185 + 142.34) / 2

= 163.67 °C

= 0.000025 Kg/m-sec

$Re_h = De\ G_{max} / \mu_l$

= (0.02417)(11.10197) / (0.000025)

= 10,733

นำค่า Re_h ไปเปิดรูป ข.1 หาค่า $J = h_f \frac{De}{k}\left[\frac{C_p \mu_l}{k}\right]^{-1/3}$

ได้ J = 37

$$J = h_f \frac{De}{k}\left[\frac{C_p \mu_l}{k}\right]^{-1/3}$$

$$h_f = \frac{J\ k}{De}\left[\frac{C_p \mu_l}{k}\right]^{-1/3}$$

$k = 0.03707 \quad W/m^{\circ}C$

$C_p = 1020.7 \quad J/Kg^{\circ}C$

$$h_f = \frac{(73)(0.03707)}{(0.02417)} \left[\frac{(1020.7)(0.000025)}{(0.03707)}\right]^{1/3}$$

$= 98.85697 \quad W/m^{2\circ}C$

R_h (fouling factor) $= 0.0001 \quad m^2 hr^{\circ}C/Kcal$

$= 0.000116 \quad m^{2\circ}C/W$

$h_r = 86404.2 \quad W/m^{2\circ}C$

$$\frac{1}{h_{oh}} = \frac{1}{h_r} + \frac{1}{h_f}$$

$$= \frac{1}{86404.2} + \frac{1}{98.85697} = 0.000116 + 0.010116$$

$= 0.010232$

$h_{oh} = 97.7362 \quad W/m^{2\circ}C$

หา Fin efficiency

k ของอะลูมิเนียมที่ 160 $^{\circ}C$ = 188 $W/m^{\circ}C$

ความหนาของครีบ (t) = 0.0008 m

h = 97.7362 $W/m^{2\circ}C$

ความสูงของครีบ (L) = 0.006 m

$L\sqrt{2h/kt} = 0.006 \quad 2(97.7362)/(188)(0.0008)$

$= 0.22$

$r_o/r_i = 0.01555 / 0.00955 = 1.628$

นำค่า $L\sqrt{2h/kt}$ และ r_o/r_i ไปเปิดกราฟรูป ข.2 จะได้ Fin efficiency (η) = 0.98

$\therefore$ Effective area $= A_b + A_f$

$= 0.044 + (0.98)(0.31542)$

$= 0.351 \quad m^2/m$ ของท่อ

Effective area ของฮีทไปป์ 1 ท่อ ด้านก๊าซร้อน = 0.2808 m^2

อากาศ

G_{max} = m_c / A_{min}

= 1.075 / 0.1216

= 8.84046 Kg/m^2-sec

อุณหภูมิอากาศ = (25 + 85) / 2 = 55 ° C

= 0.0000203 Kg/m-sec

Re_c = De G_{max} / μ_l

= (0.02417)(8.84046) / (0.0000203)

= 10526

นำค่า Re_c ไปเปิดค่า J ในรูป ข. 1

ได้ J = 73

k = 0.028135 W/m-° C

C_p = 1007.4 J/Kg° C

แทนค่า

$$h_f = \frac{(73)(0.028135)}{(0.02417)} \left[\frac{(1007.4)(0.0000203)}{(0.028135)}\right]^{1/3}$$

= 76.40295 W/m^2 ° C

R_c (fouling factor) = 0.0001 m^2 hr° C /Kcal

∴ h_r = 86404.2 W/m^2 ° C

$$\frac{1}{h_{oc}} = \frac{1}{h_r} + \frac{1}{h_f}$$

$$= \frac{1}{86404.2} + \frac{1}{76.40295}$$

= 0.000012 + 0.013088

= 0.0131

h_{oc} = 76.33545 W/m^2 ° C

หา Fin efficiency

k ของอลูมิเนียมที่ 55 ° C = 171 W/m° C

ความหนาของครีบ (t) = 0.0008 m

h = 76.33545 W/m^2 ° C

ความสูงครีบ (L) = 0.006 m

$L\sqrt{2h / kt} = 0.006\ \ 2(76.3354) / (171)(0.0008)$

$= 0.2$

$r_o / r_i = 1.628$

นำค่า $L\sqrt{2h / kt}$ และ r_o / r_i เปิดกราฟรูป ข. 2 ได้ fin efficiency (η) 0.985

Effctive area $= A_b + A_f$

$= 0.044 + (0.985)(0.31542)$

$= 0.35469\ m^2$ /m ของท่อ

Effective area ของฮีทไปป์ 1 ท่อ ด้านอากาศ = 0.28375 m^2 หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในจะต้องใช้วิธี สุ่มคำตอบ เนื่องจากไม่รู้อุณหภูมิผิวภายในและอุณหภูมิไอ (T_v) เพื่อมาคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลใช้งาน

จาก $Q = UA\ \Delta T$

$\Delta T = 163.67 - 55 = 108.67\ ^\circ C$

สมมติว่าแท่งฮีทไปป์ไม่มีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในแท่ง

$$\frac{1}{(UA)_j} = \frac{1}{h_{oh} A_{oh}} + \frac{\ln (r_o/r_i)}{2\pi k l_h} + \frac{\ln (r_o/r_i)}{2\pi k L_c} + \frac{1}{h_{oc} A_{oc}}$$

$$= \frac{1}{(97.7362)(0.2808)} + \frac{\ln (0.00955/0.0083)}{2\pi (377)(0.8)} +$$

$$\frac{\ln (0.00955/0.0083)}{2\pi (382)(0.8)} + \frac{1}{(76.33545)(0.28375)}$$

$= 0.03643 + 0.00007 + 0.00007 + 0.04617$

$\frac{1}{(UA)_j} = 0.08274$

$(UA)_j = 12.08605\ W/m^2\ ^\circ C$

แทนค่า

$Q = (12.08605)(108.67)$

$= 1313.39$ Watt

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนฟิล์มด้านในของช่วงควบแน่น

$$h_{ic} = 1.47\ k_l \left[\frac{H_{fg} A g \rho_l^2}{4 Q_c L_c \mu_l}\right]^{1/3}$$

k ของน้ำ = 0.646 W/m° C

h_{fg} = 2,370,000 J/Kg

A = $\pi D_i L_c$ = (0.0166)(0.8)

= 0.04172 m^2

g = 9.81 m/sec^2

ρ_l = 985.732 Kg/m^3

Q_c = 1643 W

L_c = 2 m

= 0.000504 Kg/m-sec

$$h_{ic} = (1.47)(.646)\left[\frac{(2,370,000)(.04172)(9.81)(985.732)^2}{4\,(1313)(0.8)(0.000504)}\right]^{1/3}$$

= 7250.39 W/m^2 ° C

สมมติให้ฮีทฟลักส์เท่ากันตลอดทั้งช่วงการระเหย

Q/A = 1313 / (π (0.0166)(0.8))

= 31.471.45 W/m^2

$$h_{inp} = \frac{C_p\,(Q/A)^{1-r}}{H_{fg}\,Pr\,C_{sf}}\left[\frac{1}{\mu_l\,H_{fg}}\sqrt{\frac{g_c\,\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}}\right]^{-r}$$

C_p = 4216 J/Kg° C

H_{fg} = 2,257,000 J/Kg

$Pr = \frac{C_p \mu_l}{k}$ = 1.75

C_{sf} = 0.013

r = 0.33 , 1-r = 0.67

g_c = 1 Kg.m/(N.sec^2)

g = 9.81 m/sec^2

σ = 0.0589 N/m

$\rho_l - \rho_v$ = 958.384 - 0.597 = 957.787 Kg/m^3

μ_l = 0.0002818 Kg/m.sec

$$h_{inp} = \frac{(4216)(31,471.45)^{0.67}}{(2,257,000)(1.75)(0.013)} \times \left[\frac{1}{(0.0002818)(2,257,000)}\sqrt{\frac{1(0.0589)}{(9.81)(957.787)}}\right]^{-0.33}$$

$$= 5147.59 \quad W/m^2.^\circ C$$

$$h_{inf} = 1.47\ k_l \left[\frac{H_{fg}\ g\ \rho_l^2}{4\ (Q/A)\ L_f\ \mu_l}\right]^{1/3}$$

$k_l = 0.68 \quad W/m.^\circ C$

$H_{fg} = 2,257,000 \quad J/Kg$

$g = 9.81 \quad m/sec^2$

$\rho_l = 958.384 \quad Kg/m^3$

$Q/A = 31,471.45 \quad W/m^2$

$L_f = 0.8 - 0.32 = 0.48 \quad m$

$\mu_l = 0.0002818 \quad Kg/m\text{-}sec$

$$h_{inf} = (1.47)(0.68)\left[\frac{(2257000)(9.81)(958.384)^2}{4(31,471.45)(0.48)(0.0002818)}\right]^{1/3}$$

$$= 10605.55 \quad W/m^2\ ^\circ C$$

$$\frac{1}{h_i A_i} = \frac{1}{h_{ic} A_{ic}} + \frac{1}{h_{inp} A_{ip} + h_{inf} A_{if}}$$

$A_{ip} = D\ L = (0.0166)(0.32) = 0.01669$

$A_{if} = D\ L = (0.0166)(0.48) = 0.02503$

$$= \frac{1}{(7250.39)(0.04172)} + \frac{1}{(5147.59)(.01669)+(10605.55)(.02503)}$$

$$= 0.0033059 + 0.0028458$$

$$\frac{1}{h_i A_i} = 0.006152$$

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{UA_j} + \frac{1}{h_i A_i}$$

$$= 0.08274 + 0.006152 = 0.08889$$

$UA = 11.25$

$Q = (11.25)(108.67)$

$= 1222.5375$ Watt

จะเห็นว่าค่า Q ที่ได้ไม่ตรงกับที่สมมติตอนแรก จึงต้องใช้วิธีสุ่มหาค่า Q ไปเรื่อย ๆ จนค่า Q ที่สมมติขึ้นเท่ากับค่า Q ที่คำนวณได้ ก็จะได้ค่า Q และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในตามต้องการ

สมมติให้ $Q = 1223.8$ Watt

$$h_{ic} = (1.47)(0.646)\left[\frac{(2,370,000)(0.04172)(9.81)(985.732)^2}{4\,(1223.8)(0.8)(0.000504)}\right]^{1/3}$$

$= 7422.43$ Watt/m^2 $^\circ$C

$Q/A = 1223.8 / 0.04172 = 29333.65$ Watt/m^2

$$h_{ihp} = \frac{(4216)(29333.65)^{0.67}}{(2,257,000)(1.75)(0.013)} \times \left[\frac{1}{(0.0002818)(2,257,000)}\sqrt{\frac{(0.0589)}{(9.81)(957.787)}}\right]^{-0.33}$$

$= 4910.6$ W/m^2.$^\circ$C

$$h_{ihf} = (1.47)(0.68)\left[\frac{(2,257,000)(9.81)(958.384)^2}{4(29333.65)(0.48)(0.0002818)}\right]^{1/3}$$

$= 10857.17$ W/m^2.$^\circ$C

$$\frac{1}{h_i A_i} = \frac{1}{(7422.43)(0.04172)} + \frac{1}{(4910.6)(.01669)+(10857.17)(.02503)}$$

$= 0.003229 + 0.002827$

$= 0.006056$

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{UA_j} + \frac{1}{h_i A_i}$$

$= 0.08274 + 0.006056$

$= 0.088796$

UA = 11.262

Q = UA ΔT

= (11.262) (108.67)

= 1223.8 Watt

จะเห็นว่าค่า Q ที่สมมติขึ้นตรงกับ Q ที่คำนวณได้ ดังนั้นฮีทไปป์ 1 แท่ง จึงนำความร้อนได้ 1577.9 Watt ในเงื่อนไขที่กำหนดให้

<u>วิธีที่ 1</u> การหาจำนวนแท่งฮีทไปป์โดยวิธีง่าย ๆ

$\therefore$ จำนวนแท่ง = <u>อัตราการส่งผ่านความร้อนทั้งหมด</u>
อัตราการส่งผ่านความร้อน 1 แท่ง

$$= \frac{16.125 \times 4184}{1223.8}$$

$$= \frac{67467}{1223.8}$$

จำนวนแท่งฮีทไปป์ที่ใช้ = 55.13 แท่ง

ดังนั้นจึงจัดแท่งฮีทไปป์เป็น 10 แท่ง 3 แถว คิดเป็น 30 แท่ง

9 แท่ง 3 แถว คิดเป็น <u>27</u> แท่ง

รวมทั้งสิ้น <u>57</u> แท่ง

<u>วิธีที่ 2</u> การคำนวณหาจำนวนแท่งฮีทไปป์โดยวิธีรูปจำลองนำความร้อน

ถ้าหากรู้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถหาจำนวนแท่งฮีทไปป์ได้โดยหาค่า U ในที่นี้ ใช้พื้นที่ผิวภายในเป็นฐานอ้างอิง สมการ (6.4)

$$\frac{1}{U_i} = \frac{A_{it}}{h_{oh} A_{oht}} + \frac{A_{it} \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ht}} + \frac{A_{it}}{h_{ih} A_{iht}} + \frac{A_{it}}{h_{ic} A_{ict}} + \frac{A_{it} \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_{ct}} + \frac{A_{it}}{h_{oc} A_{oct}}$$

n = จำนวนแท่งฮีทไปป์ที่จะหา

$$A_{it} = n \pi D_i L_p = n \pi (0.0166)(1.6)$$
$$= 0.08344\ n$$
$$A_{iht} = A_{ict} = n \pi (0.0166)(0.8)$$
$$= 0.04172\ n$$
$$A_{oht} = 0.2808 \quad m^2$$
$$A_{oct} = 0.28375 \quad m^2$$
$$L_{ht} = L_{ct} = 0.8\ n$$
$$r_o/r_i = 0.00955/0.0083 = 1.1506$$

$$h_{ih} A_{ih} = h_{ihp} A_{ipt} + h_{ihf} A_{ift}$$
$$= (4910.6)(0.01669) + (10605.55)(0.02503)$$
$$= 81.958 + 265.4569 = 347.415$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{0.08344\ n}{(97.7326)(0.2808\ n)} + \frac{(0.08344\ n)\ \ln 1.1506}{2\pi (377)(0.8\ n)}$$
$$+ \frac{0.08344\ n}{347.415} + \frac{(0.08344\ n)}{(5342.13)(0.04172n)} + \frac{(0.08344n)\ \ln 1.1506}{2\pi (382)(0.8\ n)}$$
$$+ \frac{(0.08344\ n)}{(76.3355)(0.28375\ n)}$$
$$= 0.003041 + 0.000006 + 0.000240 + 0.000374 + 0.000006$$
$$+ 0.003852$$
$$= 0.007519$$
$$U_i = 132.996 \quad W/m^2\ ^\circ C$$

$$Q = U_i A_{it} (\Delta T)_{ln}$$
$$A_{it} = \frac{Q}{U_i (\Delta T)_{ln}}$$
$$(\Delta T)_{ln} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln (T_{hi} - T_{co}) / (T_{ho} - T_{ci})}$$
$$= \frac{(185 - 85) - (142.34 - 25)}{\ln (185 - 85)/(142.34 - 25)}$$
$$= 108.44 \quad ^\circ C$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$Q = 16.125 \text{ Kcal/sec} = 67467 \text{ Watt}$$

$$A_{it} = \frac{67467}{(132.996)(108.44)}$$

$$= 4.678 \text{ m}^2$$

$$A_{it} = A_{ip}\, n$$

$$n = \frac{A_{it}}{A_{ip}} = \frac{662.1597}{(0.0166)(1.6)}$$

$$= 56.06 \text{ แท่ง}$$

<u>วิธีที่ 3</u> การคำนวณหาจำนวนแท่งฮีทไปป์โดยวิธี E-NTU ตามหัวข้อ (6.3)

$$\frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{h_{oh} A_{oh}} + \frac{\ln (r_o/r_i)}{2\pi K L_h} + \frac{1}{h_{ih} A_{ih}}$$

$$\frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{(97.7326)(0.2808)} + \frac{\ln (.00955/.083)}{2\pi(377)(0.8)} + \frac{1}{347.415}$$

$$= 0.03644 + 0.00007 + 0.00288$$

$$= 0.03939$$

$$U_h A_h = 25.3872 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$C_h = m_h C_{ph}$$

$$= (1.35)(0.28) = 0.378 \text{ Kcal/sec}^\circ\text{C}$$

$$= 1581.552 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$NTU_h = \frac{U_h A_h}{C_h}$$

$$= \frac{25.3872}{1581.552} = 0.01605$$

$$\frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{h_{oc} A_{oc}} + \frac{\ln (r_o/r_i)}{2\pi K L_c} + \frac{1}{h_{ic} A_{ic}}$$

$$= \frac{1}{(76.3355)(0.28375)} + \frac{\ln (0.00955/0.0083)}{2\pi (382)(0.8)} + \frac{1}{(5342.13)(0.04172)}$$

$$= 0.04617 + 0.00007 + 0.00449$$

$$= 0.05073$$

$$U_c A_c = 19.7122$$

$$C_c = m_c C_{pc}$$

$$= (1.075)(0.25) = 0.26875 \quad \text{Kcal/sec}^{\circ}\text{C}$$

$$= 1124.45 \quad \text{W/}^{\circ}\text{C}$$

$$NTU_c = \frac{U_c A_c}{C_c}$$

$$= \frac{19.7122}{1124.45} = 0.01753$$

$$E_h = 1 - \exp(-NTU_h)$$

$$= 1 - \exp(-0.01605) = 0.01592$$

$$E_c = 1 - \exp(-NTU_c)$$

$$= 1 - \exp(-0.01753) = 0.01738$$

$$m = C_c / C_h = 1124.45 / 1581.552 = 0.71098$$

$C_h > C_c$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \frac{C_c / C_h}{E_h}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0.01738} + \frac{0.71098}{0.01592}}$$

$$= \frac{1}{102.2043} = 0.00978$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$E_n = \frac{\left[\frac{1 - mE}{1 - E}\right]^n - 1}{\left[\frac{1 - mE}{1 - E}\right]^n - m}$$

$$E_n = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$= \frac{85 - 25}{185 - 25} = 0.375$$

$$\frac{1 - mE}{1 - E} = \frac{1 - (0.71098)(0.00978)}{1 - 0.00978}$$

$$= 1.00285$$

แทนค่า

$$0.375 = \frac{(1.00285)^n - 1}{(1.00285)^n - 0.71098}$$

$$(0.375)(1.00285)^n - 0.26662 = (1.00285)^n - 1$$

$$(0.625)(1.00285)^n = 0.73338$$

$$(1.00285)^n = 1.173408$$

$$n \ln (1.00285) = \ln (1.173408)$$

$$n = \frac{\ln (1.17341)}{\ln (1.00285)}$$

$$= 56.19$$

∴ จำนวนแท่งฮีทไปป์ที่ใช้ 56.19 แท่ง

จะเห็นว่าวิธีทั้ง 3 ที่ทำมาให้ผลใกล้เคียงกันหมด

4) หาความดันสูญเสียภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (35)

<u>ด้านก๊าซร้อน</u>

$$De_v = \frac{4 \text{ (net free volume)}}{\text{friction surface}}$$

จากรูป 6.7

Net free volume = $0.8 \times 0.375 \times 0.0313 - 1/2\ (10 + 9)$
$\pi/4\ (0.0191)^2\ (0.8) - 1/2\ (10 + 9)$
$\pi/4(0.0311^2 - 0.0191^2)(0.0008)\frac{(1000)}{3}(0.8)$

$= 0.00939 - 0.00218 - 0.00096$

$= 0.00625 \quad m^3$

Friction surface = $1/2\ (10 + 9)\ (A_b + A_f)\ (L)$

$= (9.5)(0.044 + 0.31542)(0.8)$

$= 2.73159 \quad m^2$

$D'_{ev} = 4\ (0.00625) / 2.73159$

$= 0.00915 \quad m.$

$Re'_m = D'_{ev}\ G_{max} / \mu_l$

$= (0.00915)(11.10197) / (0.000025)$

$= 4063.3$

นำค่า Re'_m ไปเปิดกราฟรูป ข. 1 จะได้ $f = 0.0027\ ft^2/in^2$

$$\Delta P = \frac{f\ G^2_{max}\ L'_p}{5.22 \times 10^{10} \times D'_{ev}\ s'\ \phi_s} \left[\frac{D'_{ev}}{S_T}\right]^{0.4} \left[\frac{S_L}{S_T}\right]^{0.6}$$

ΔP = ความดันสูญเสีย (psi)

f = friction factor (ft^2/in^2)

G_{max} = อัตราไหล ($lb/hr.ft^2$)

L'_p = the length of the path (ft)

D'_{ev} = Volumetric equivalent diameter (ft)

S' = Specific gravity

ϕ_s = viscosity ratio $(\mu / \mu_{fw})^{0.14}$

S_T = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของท่อด้านหน้าทางเข้า รูป (6.7) (ft)

S_L = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของท่อที่อยู่ใกล้ที่สุด รูป (6.7) (ft)

G_{max} = 11.10197 $Kg/m^2.sec$

= 8168.742 lb/ft^2hr

L_p' = 3.13 x 6 = 18.78 ซม.

= 0.616 ft

D_{mv}' = 0.00915 m = 0.03 ft

= 1.35 Kg/m^3

S' = $\frac{1.35}{1000}$ = 0.00135

S_T = 1.61 ซม. = 0.0528 ft

$\frac{S_L}{S_T}$ = $\frac{1.61^{0.6}}{1.61}$ = 1

$(D_{mv}'/S_T)^{0.4}$ = $(0.03 / 0.0528)^{0.4}$ = 0.80

= 1

แทนค่าลงในสมการ

$$\Delta P = \frac{(0.0027)(8168.742)^2(0.616)(0.80)(1)}{5.22 \times 10^{10} \quad (0.03)(0.00135)(1)}$$

= 0.042 psi

<u>ด้านอากาศ</u>

Re_m' = D_{mv}' G_{max} / μ_l

= (0.00915)(8.84046) / (0.0000203)

= 3985

นำค่า Re_m' ไปเปิดกราฟรูป ข. 1 จะได้ f ประมาณ 0.0027 ft^2/in^2

G_{max} = 8.84046 $Kg/m^2.sec$

= 6504.74 lb/ft^2hr

$$\Delta P = \frac{(0.0027)(6504.74)^2 \ (0.616)(0.80)(1)}{5.22 \times 10^{10} \quad (0.03) \ (0.00135)(1)}$$

ΔP = 0.027 psi

สรุปผลการคำนวณ

จะต้องฮีทไปป์จำนวน 56 แท่ง ซึ่งสามารถจัดได้เป็น 10 แท่ง 3 แถว และ 9 แท่ง 3 แถว รวมทั้งสิ้น 57 แท่ง ขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็น กว้าง x ยาว x หนา = 0.375 x 1.6 x 0.2 เมตร โดยแต่ละกล่องจะมีขนาดเท่ากันเป็น กว้าง x ยาว x หนา = 0.375 x 0.8 x 0.2 เมตร สามารถถ่ายเทความร้อนในอัตรา 58,050 Kcal/hr. ในเงื่อนไขที่กำหนดให้ เกิดความดันสูญเสียด้านก๊าซร้อน 0.042 psi , ด้านอากาศ 0.027 psi

สรุปการแก้ปัญหาโจทย์ในการออกแบบ ถ้าโจทย์มิได้กำหนดลักษณะของแท่งฮีทไปป์อะไรมาให้ เราสามารถแก้ปัญหาได้ตามวิธีที่กล่าวมาแล้ว และหาจำนวนแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีง่าย ๆ ในวิธีที่ 1 ได้ แต่ถ้าโจทย์ได้บอกสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในแท่งฮีทไปป์มาให้ เราสามารถคำนวณจำนวนแท่งฮีทไปป์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีการที่ 2 และ 3 คือรูปจำลองการนำความร้อน (conductance) และ E-NTU โดยทั้ง 2 วิธี ให้ผลเหมือนกัน

6.7 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เนื่องจากในการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาบางอย่างค่อนข้างยุ่งยาก จึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมา เพื่อทำให้การคำนวณสะดวกขึ้น โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมามี

1. โปรแกรมการหาค่าคงที่ในสมการการเดือดของ Rohsenow
2. โปรแกรมการหาสมการถดถอยเชิงเส้น
3. โปรแกรมหาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งใช้ได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 5 - 95 °C
4. โปรแกรมการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ ซึ่งใช้กับฮีทไปป์ที่บรรจุของไหลใช้งานเป็นน้ำ

5. โปรแกรมการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ ซึ่งใช้ฮีทไปป์ที่บรรจุของเหลวใช้งานเป็นน้ำ

(ก) Algorithm ของโปรแกรมการหาค่าคงที่ในสมการการเดือดของ Rohsenow

1. ใส่ข้อมูลของแท่งฮีทไปป์ ดังนี้ คือ จำนวนข้อมูล r_o , r_i , K L_c , L_h , Q , T_{oh} , T_{oc}
2. หาอุณหภูมิของ T_{ih} , T_{ic} และสุ่มหาอุณหภูมิไอ (T_v)
3. คำนวณ C_{sf} และ r โดย Least square method
4. หาค่า h_{ih} , h_{ic} , UA (คำนวณ) , UA (ทดลอง)
5. หา Variance ของ UA (คำนวณ) , UA (ทดลอง)
6. พิมพ์ค่า C_{sf} , r , Variance , UA (คำนวณ) , UA (ทดลอง)

(ข) Algorithm ของโปรแกรมการหาสมการถดถอยเชิงเส้น

1. ใส่จำนวนข้อมูล , ข้อมูลบนแกน x , ข้อมูลบนแกน y
2. หาค่าคงที่ A , B ของสมการ $y = AX^B$
3. พิมพ์ค่า A , B

(ค) Algorithm ของโปรแกรมหาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ

1. ใส่อุณหภูมิน้ำที่ต้องการคำนวณ
2. คำนวณคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ
3. พิมพ์ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ง) Algorithm ของโปรแกรมการคำนวณการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

1. ใส่ข้อมูลของแท่งฮีทไปป์ ดังนี้ คือ r_o , r_i , K , L_c , L_h , A_{oh} , A_{oc} , C_{wf} , r
2. ใส่ข้อมูลของของไหลที่ถ่ายเทความร้อน m_c , m_h , T_{hi} , T_{ho} , T_{ci} , T_{co} , C_{pc} , C_{ph} , h_{oh} , h_{oc}
3. คำนวณหาค่า h_{ih} , h_{ic} โดยสุ่มค่า Q_p ที่เหมาะสม
4. หาจำนวนแท่งฮีทไปป์
5. พิมพ์จำนวนแท่งฮีทไปป์ที่ใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย