(12) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

(HEAT EXCHANGER)

12.1) คำนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างว้างขวาง วิศวกรควรมีความรู้ที่จะคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ การออกแบบครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิศวกรจะต้องมีความรู้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การส่งานของความร้อนและความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล

ในปัจจุบัน กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนได้แพร่หลายไปในระเทศต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว และเพื่อให้การใช้พลังงานความร้อนเป็นไปอย่างถูกหลักการ กระบวนารเหล่านี้มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมน้ำมันครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสภาวะของอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนาหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนเอาความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่

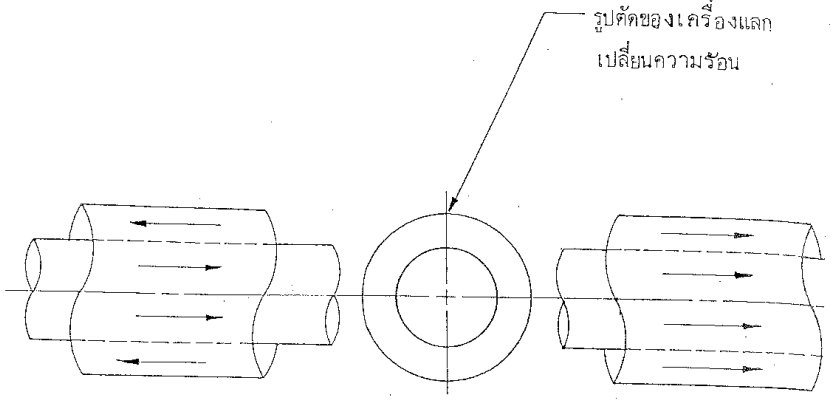
หน้าที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ย่างถูกหลักการ และมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีใช้และวิธีเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีความมพันธ์อย่างแน่นแฟ้นกับหลักเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์อย่างมากวย การเลือกเครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อน จะต้องทำอย่างระมัดระวังมาก เงื่อนไขที่สำคัญอันหนึ่งาหรับการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งรวมถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ ความมีระสิทธิภาพในการทำงานสูงและราคาถูก

12.2) ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบ การจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำด้โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของเครื่องแลกปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก โดยทั่วๆ ไปแล้วอาจจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนออกได้เป็น 3 แบบคือ

12.2.1) แบบท่อสองชั้น (concentric tube)

ชนิดท่อสองชั้น (concentric tube) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ อาจอยู่ในลักษณะของท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 12.1 ส่วนการไหลของของไหลนั้น อาจไหลสวนางกัน เรียกว่า counter flow หรือไหลขนานกัน (ในทิศเดียวกัน) เรียกว่า parallel flow

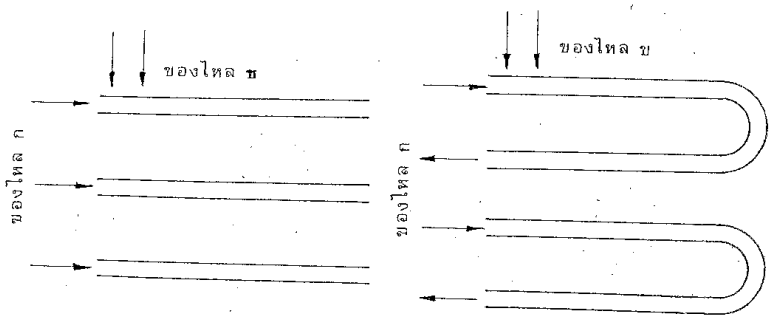


(ก) แบบไหลสวนทางกัน (ข) แบบไหลขนานกัน

รูปที่ 12.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสองชั้นแบบไหลสวนทาง (counter flow) และแบบไหลขนาน (parallel flow)

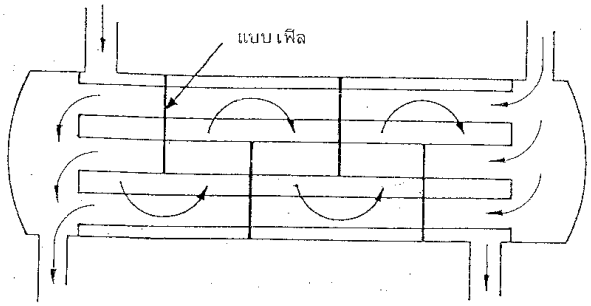
(12.2.2) แบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (cross flow)

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลจะไหลในทิศทางตั้งฉากต่อกัน ดังในรูปที่ 12.2 การสร้างนั้นอาจจะให้อยู่ในลักษณะของไหลเที่ยวเดียว (single pass) หรือสองเที่ยว (double pass) หรือมากกว่านี้ก็ได้

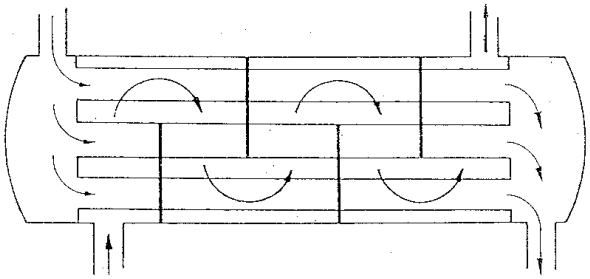


(ก) แบบไหลเที่ยวเดียว (ข) แบบไหลสองเที่ยว

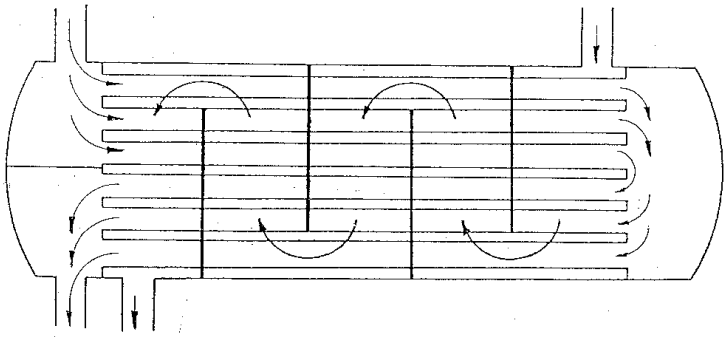
รูปที่ 12.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน



(ก) แบบไหลสวนทาง



(ข) แบบไหลขนาน



(ค) แบบไหลสวนทาง และไหลขนานผสมกัน

รูปที่ 12.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อชนิดต่าง ๆ

(12.2.3) แบบเชลล์และท่อ (shell and tube)

แบบเชลล์และท่อ (shell and tube) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ ของไ
อย่างหนึ่งจะอยู่ในเชลล์ และอีกอย่างหนึ่งจะอยู่ในท่อ ส่วนการไหลนั้นอาจอยู่ในลักษณะแบบไหลสวนท
หรือแบบไหลขนานกัน หรือทั้งไหลสวนทางและไหลขนานในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเดียวกันก็
นอกจากนี้ของไหลอาจจะมีทิศทางตั้งฉากกับท่อด้วยดังแสดงในรูปที่ 12.3

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อนั้น เพื่อเพิ่มความเร็วและความอ
ของของไหลในเชลล์ ในการที่จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน มักจะใส่แผ่นเหล็กบังคับการไหลไ
เชลล์ซึ่งเรียกว่าแผ่นแบบเฟิลไว้ด้วยดังแสดงในรูปที่ 12.3 แผ่นแบบเฟิลนี้ใช้สำหรับยึดท่อภา
เชลล์ด้วย

รูปที่ 12.4ก แสดงรายละเอียดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ
ที่ 12.4ข ทั้งหมด แสดงถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากชนิดต่าง ๆ เครื่อง
เปลี่ยนความร้อนเหล่านี้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด (compact heat exchang
ซึ่งเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในกรณีที่ต้องการจะถ่ายเทความร้อนจำนวนมากแต่มีที่สำหรับติ
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จำกัด เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะจัดอยู่ในประเภทกระทัดรัดไ
ควรมีพื้นที่สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนเกิน 700 m^2 ในปริมาตรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1

(12.3) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (temperature variatio

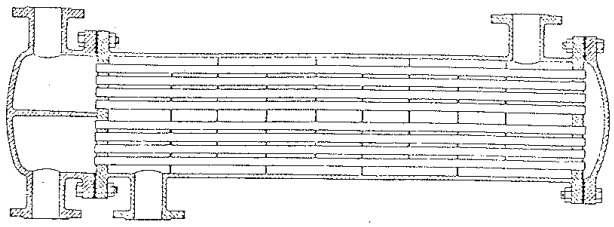
ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของไหลจะถ่ายเทความร้อนให้แก่กัน ดังนั้น ถ้าของ
ไม่มีการเปลี่ยนสภาวะ (คือ เปลี่ยนจากไอเป็นของเหลวหรือของเหลวเป็นไอ) อุณหภูมิของของไ
สองนั้น ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยขณะที่ของไหลไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การศึกษาเกี่ย
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมีความสำคัญมากในการคำนวณเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

(12.3.1) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน

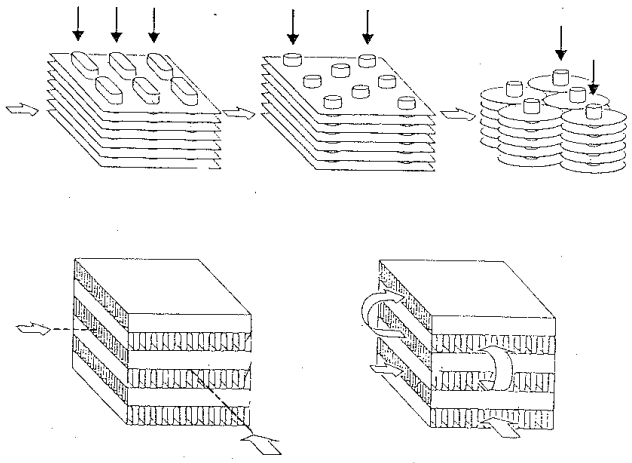
สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน อุณหภูมิของทั้งของไหลที่ร้อน และ
จะค่อย ๆ มีค่าเข้าใกล้กัน ถ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความยาวถึง ∞ อุณหภูมิของของไ
สองจะเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 12.5

(12.3.2) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง เราจะมี 2 กรณีด้วยกัน ดัง
ในรูปที่ 12.6ก และ 12.6ข ในกรณีที่แสดงไว้ในรูปที่ 12.6ก $m_c c_c > m_h c_h$
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยาวถึง ∞ T_{ho} จะมีค่าเท่ากับ T_{ci} ในกรณีที่แสดงไว้ใ
12.6ข $m_h c_h > m_c c_c$ ถ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยาวถึง ∞ T_{co} จะมีค่าเท่ากับ

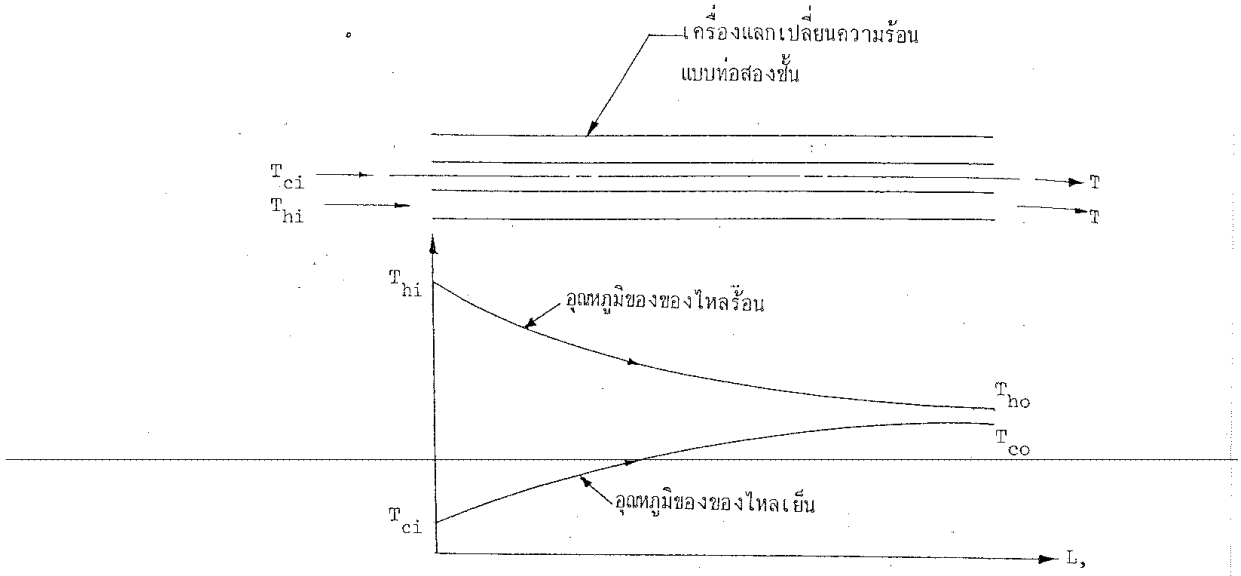


(ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ



(ข) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด

รูปที่ 12.4 รายละเอียดภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัดแบบต่าง ๆ



รูปที่ 12.5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน

(12.4) อัตราส่วนของความจุความร้อน (Capacity Ratio, C) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

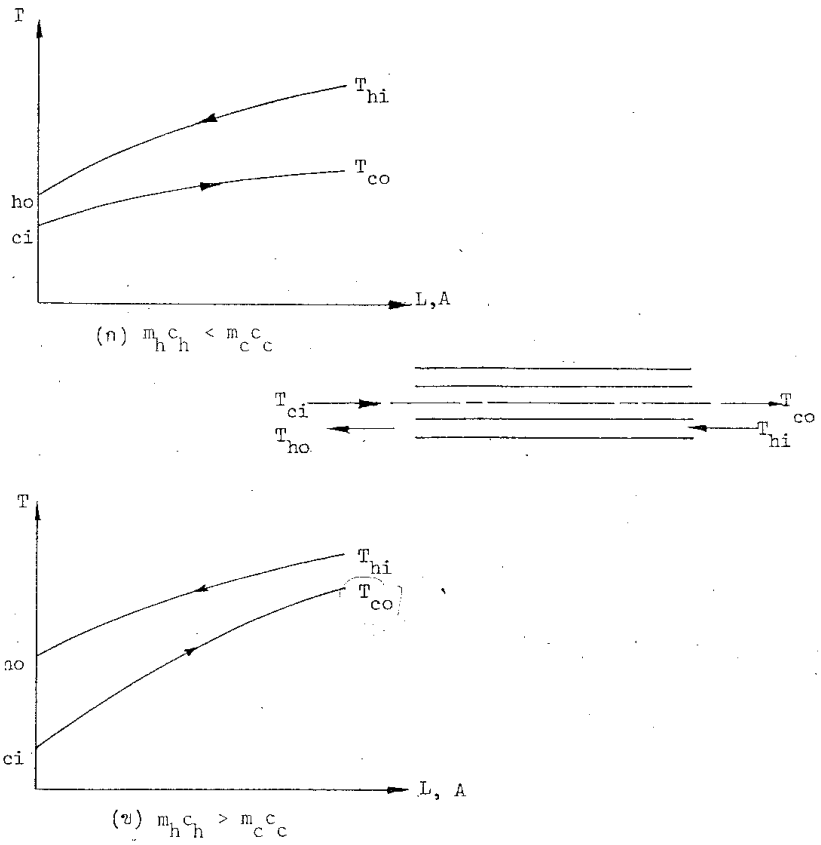
(12.4.1) อัตราส่วนความจุความร้อน

อัตราส่วนของความจุความร้อน (C) ของของไหล ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนของผลคูณของ อัตราการไหลของของไหล (m) กับความร้อนจำเพาะ (c) ของของไหลทั้งสเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยให้ค่าที่ต่ำกว่าเป็นเศษ และค่าที่สูงกว่าเป็นส่วน ซึ่งจะเขียนได้ดังสำหรับ $m_h c_h > m_c c_c$

$$C = \frac{m_c c_c}{m_h c_h} \quad \text{หรือ} \quad C = \frac{(mc)_{min}}{(mc)_{max}}$$

สำหรับ $m_h c_h < m_c c_c$

$$C = \frac{m_h c_h}{m_c c_c} \quad \text{หรือ} \quad C = \frac{(mc)_{min}}{(mc)_{max}}$$



รูปที่ 12.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง

ดังนั้นโดยทั่ว ๆ ไป จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$C = \frac{(mc)_{min}}{(mc)_{max}} \qquad (12.1)$$

ค่า mc ของของไหลจะเป็นเครื่องชี้ว่า ของไหลนั้น จะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากน้อยเพียงใดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ของไหลที่มีค่า mc สูง ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะน้อย ของไหลที่มีค่า mc ต่ำ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่ามากกว่า

(12.4.2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)

ในหัวข้อที่ (3.5) ได้อธิบายเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังร
ผนังรูปทรงกระบอกไว้อย่างละเอียดแล้ว ดังที่แสดงให้เห็นในหัวข้อ (3.5) การถ่ายเทความร้อ
กรณีของผนังรายและผนังรูปทรงกระบอก สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความต้านทานที่ผิวของผนัง
ความต้านทานของผนังได้ เครื่องมือถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะให้ของไหลเคลื่อนที่ในท่อกลม
จึงจะกล่าวเฉพาะผนังรูปทรงกระบอก

สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกชั้นเดียว ค่าสัมประสิทธิ์การ
ความร้อนซึ่งขึ้นกับพื้นที่ภายในท่อ จะเขียนได้จากสมการที่ (3.13) ดังนี้คือ

$$U_i = \left[\frac{1}{h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\frac{k_1}{r_1}} + \frac{1}{\frac{h_o r_o}{r_i}} \right]^{-1}$$

โดยที่ $r_2 - r_1$ คือความหนาของผนัง

เนื่องจากท่อทำจากโลหะที่มีผนังบางมาก และมีค่าการนำความร้อนสูงมาก ค่าสัม
การถ่ายเทความร้อนเขียนได้ดังนี้

$$U_i = \left[\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad ($$

ในกรณีที่ผิวภายนอกของท่อติดครีบ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะหาได้โดย
(9.8) ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$U_i = \left[\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o \left\{ \left(\frac{A_o}{A_i}\right) + \eta_F \left(\frac{A_F}{A_i}\right) \right\}} \right]^{-1}$$

โดยที่ A_i คือพื้นที่ผิวภายในต่อหน่วยความยาวของท่อ
A_o คือพื้นที่ผิวภายนอกต่อหน่วยความยาวของท่อ (ไม่รวมส่วนที่ถูกครีบทับอยู่)
A_F คือพื้นที่ผิวของครีบต่อหน่วยความยาวของท่อ
η_F คือประสิทธิภาพของครีบ

.5) ประสิทธิผล (Effectiveness) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E)

ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเท ๆ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทได้มากที่สุด

จะเห็นได้ว่า ความร้อนจะถ่ายเทได้มากที่สุด เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบสวนทาง จากรูปที่ 12.5 จะเห็นว่า ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน อุณหภูมิของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่า จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเข้าใกล้อุณหภูมิของของไหลที่ร้อนกว่าตอนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรืออาจจะกล่าวได้ว่า T_{co} จะต้องน้อยกว่า T_{ho} เสมอ แต่จากรูปที่ 12.6 เห็นว่า ถ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบไหลสวนทางแล้ว เป็นไปได้ที่ T_{co} จะมากกว่า T_{ho}

ในกรณีที่ $m_c c_c > m_h c_h$ (รูปที่ 12.6) ความร้อนที่ถ่ายเทจริง ๆ เท่ากับ $_h(T_{hi} - T_{ho})$

ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะถ่ายเทได้มากที่สุด เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนร้อนนี้ มีความยาวเป็น ∞ นั่นก็คือ $T_{ho} \longrightarrow T_{ci}$

ดังนั้น ความร้อนที่ถ่ายเทมากที่สุด $= m_h c_h (T_{hi} - T_{ci}) = (mc)_{min}(T_{hi} - T_{ci})$

ดังนั้น ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเขียนได้ดังนี้ คือ

$$E = \frac{m_h c_h (T_{hi} - T_{ho})}{(mc)_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \qquad (12.3)$$

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่ $m_h c_h > m_c c_c$

$$E = \frac{m_c c_c (T_{co} - T_{ci})}{(mc)_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \qquad (12.4)$$

6) นัมเบอร์ ออฟ ทรานสเฟอร์ยูนิต (Number of Transfer Unit - NTU)

NTU คือ อัตราส่วนระหว่างผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (overall ficient of heat transfer - U) และพื้นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (surface - A) ต่อผลคูณของอัตราการไหล (m) และความร้อนจำเพาะ (c) ที่มีค่าน้อยกว่า

สำหรับ $m_h c_h > m_c c_c$, $NTU = \frac{UA}{m_c c_c}$ (12.5)

สำหรับ $m_h c_h < m_c c_c$, $NTU = \frac{UA}{m_h c_h}$ (12.6)

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะเขียนได้ว่า

$$NTU = \frac{UA}{(mc)_{min}} \qquad (12.$$

(12.7) การเปลี่ยนสภาวะ (Changing of Phase)

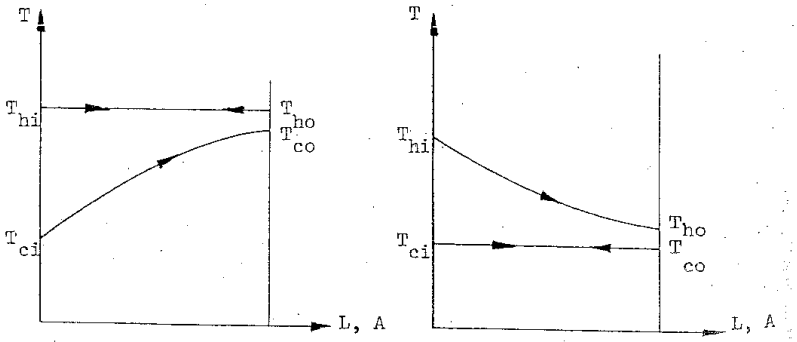
ในกรณีที่ของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนสภาวะจากไอเป็นของเหลว หรือจากของเหลวเป็นไอ อุณหภูมิระหว่างการเปลี่ยนสภาวะจะไม่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นไปดังรูปที่ 12.7

ในกรณีนี้ อัตราส่วนของความจุความร้อน (C) จะมีค่าดังต่อไปนี้ คือ

$$C = \frac{(mc)_{min}}{(mc)_{max}} = 0 \qquad (12.$$

ทั้งนี้เพราะว่าในกรณีของการเปลี่ยนสภาวะ ค่าของความร้อนจำเพาะจะสูงมาก ซึ่งจะทำให้

ของ $(mc)_{max} \longrightarrow \infty$



(ก) การควบแน่น (ข) การระเหย

รูปที่ 12.7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อของไหลกำลังเปลี่ยนสภาวะ

.8) ความสัมพันธ์ระหว่าง E, C และ NTU

ความสัมพันธ์ของปริมาณเหล่านี้ จะมีประโยชน์มากในการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในขั้นแรกจะพิจารณาถึงกรณีของการเปลี่ยนสภาวะดังแสดงในรูปที่ 12.7ค

พิจารณาถึงพื้นที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน dA และในบริเวณนี้ อุณหภูมิของของที่ร้อนกว่าลดลง dT_h

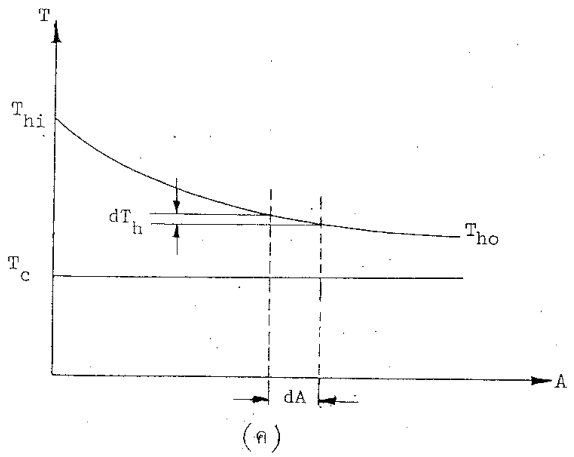
อัตราการสูญเสียความร้อนของของไหลที่ร้อนกว่า = $dQ = - m_h c_h dT_h$

ความร้อนจำนวนเดียวกันนี้ จะเคลื่อนที่มายังของเหลวที่กำลังระเหยอยู่ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$dQ = U\, dA\, (T_h - T_c)$$

ดังนั้น เราจะได้ว่า

$$- m_h c_h dT_h = U\, dA\, (T_h - T_c)$$



(ค)

รูปที่ 12.7ค การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในขบวนการระเหยตัวของของเหลว

$$\int_{T_{hi}}^{T_{ho}} \frac{dT_h}{T_h - T_c} = - \int_0^A \frac{U dA}{m_h c_h}$$

$$\ln\left[\frac{T_{ho} - T_c}{T_{hi} - T_c}\right] = -\frac{UA}{m_h c_h}$$

$$\frac{T_{ho} - T_c}{T_{hi} - T_c} = \exp\left[-\frac{UA}{m_h c_h}\right]$$

$$1 - \frac{T_{ho} \quad T_c}{T_{hi} - T_c} = 1 - \exp\,[-\,NTU]$$

$$\frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_c} = 1 - \exp\,[-\,NTU]$$

หรือ $E = 1 - \exp[-NTU]$

ในทำนองเดียวกัน อาจหาความสัมพันธ์ระหว่าง E, C และ NTU ได้ในกรณีของแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบไหลขนานและแบบไหลสวนทาง ความสัมพันธ์ในกรณีต่าง ๆ สรุปได้

สำหรับการเปลี่ยนสภาวะของสาร

$$E = 1 - e^{-NTU} \qquad ($$

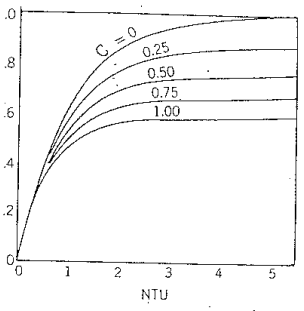
สำหรับแบบไหลสวนทาง

$$E = \frac{1 - e^{-NTU(1 - C)}}{1 - Ce^{-NTU(1 - C)}} \qquad (1$$

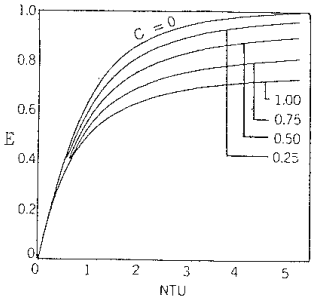
สำหรับแบบไหลขนาน

$$E = \frac{1 - e^{-NTU(1 + C)}}{1 + C} \qquad (1$$

จะเห็นได้ว่า เราได้ความสัมพันธ์ระหว่าง E, C และ NTU ในกรณีง่าย ๆ สัมพันธ์ของปริมาณดังกล่าว ในกรณีที่ยุ่งยากมากขึ้น จะหาได้จากรูปที่ 12.8

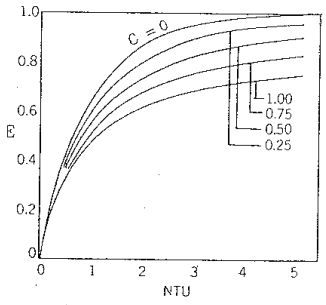


ชลล์ครั้งเดียวและจำนวนครั้งที่ท่อ
ชลล์เป็น 2,4,6,8,....



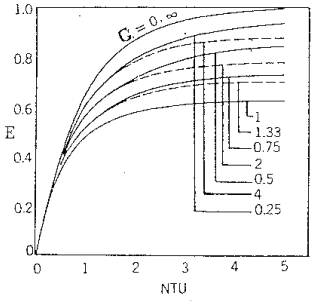
ผ่านเชลล์ 2 ครั้งและจำนวนครั้งที่ท่อ
ผ่านเชลล์เป็น 4,8,12,16,....

ครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ



งไหลแต่ละชนิดไม่ผสมกัน

C= (mc)mixed/((mc) unmixed



ของไหลชนิดหนึ่งผสมกันแต่ของไหล
อีกชนิดหนึ่งไม่ผสมกัน

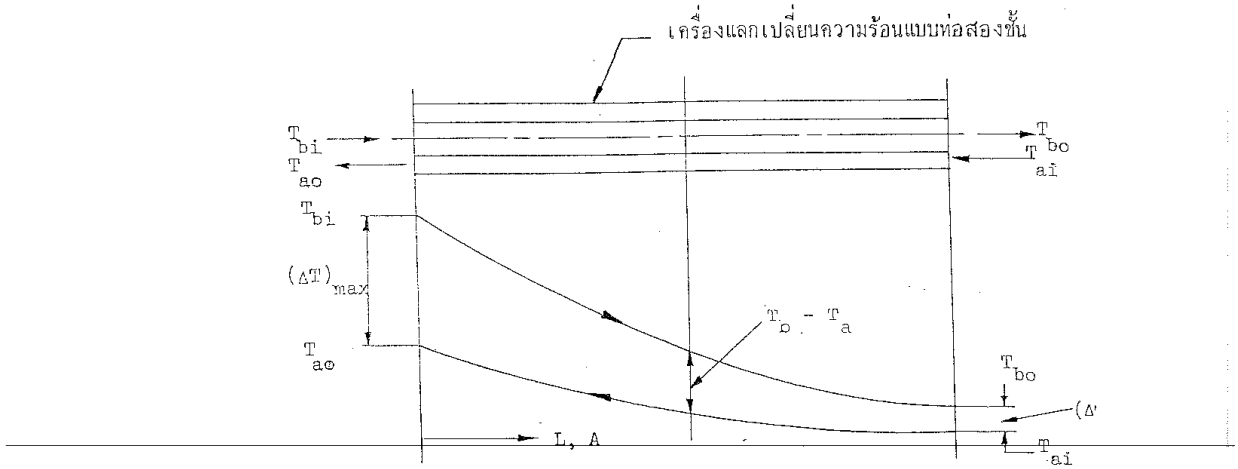
) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลตั้งฉากกัน

ที่ 12.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง E,C และ NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ เชลล์และท่อและแบบไหลตั้งฉาก (จาก Incropera and Dewitt [13])

12.9) ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหล (Effective Mean Temperature Difference) (EMTD)

จะเห็นได้ว่า ของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวเอง ขณะที่ไหล ดังนั้น การคำนวณหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยใช้ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (arithmetic mean) มาลบกัน จึงให้ผลคลาดเคลื่อนจากความจริงมาก เราจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการคำนวณหาแตกต่างของอุณหภูมิของไหลที่ถูกต้อง

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปที่ 12.9 เราสมมุติว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้รับการหุ้มด้วยฉนวนเป็นอย่างดี ความร้อนที่ให้โดยของไหลที่ร้อน จะเท่ากับความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ



รูปที่ 12.9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบไหล

ถ้า dQ เป็นอัตราความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างของไหล จะเขียนได้ว่า

$$dQ = m_a c_a dT_a = m_b c_b dT_b$$

อินทิเกรทจะได้ว่า

$$Q = m_a c_a T_a + C_1$$ โดยที่ C_1 คือปริมาณที่มีค่าคงที่

ได้ว่า ที่ $x = 0$, $T = T_{ao}$ ดังนั้น $C_1 = -m_a c_a T_{ao}$ แทนค่าจะได้

$$Q = m_a c_a (T_a - T_{ao})$$

หรือ $$T_a = \frac{Q}{m_a c_a} + T_{ao}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$T_b = \frac{Q}{m_b c_b} + T_{bi}$$

ผลต่างระหว่างของไหล จะเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\Delta T = T_b - T_a = Q\left[\frac{1}{m_b c_b} - \frac{1}{m_a c_a}\right] + (T_{bi} - T_{ao})$$

ดิฟเฟอร์เรนชิเอท จะได้ว่า

$$\frac{d(\Delta T)}{dQ} = \frac{1}{m_b c_b} - \frac{1}{m_a c_a} \qquad (1)$$

การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้งสอง จะเขียนให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U, ได้ดังนี้คือ

$$dQ = U\, dA\, \Delta T \qquad (2)$$

จาก (1) และ (2) จะได้

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \left[\frac{1}{m_b c_b} - \frac{1}{m_a c_a}\right] U\, dA$$

อินทิเกรท จะได้

$$\ln(\Delta T) = \left[\frac{1}{m_b c_b} - \frac{1}{m_a c_a}\right] UA + C_2$$

โดยที่ C_2 คือ ปริมาณที่มีค่าคงที่

ที่ $x = 0$, $A = 0$, $\Delta T = T_{bi} - T_{ao}$, $C_2 = \ln(T_{bi} - T_{ao})$

ที่ $x = L$, $A = A_t$, $\Delta T = T_{bo} - T_{ai}$

เค่า C_2 ที่ $A = A_t$ เราจะได้

$$\ln(T_{bo} - T_{ai}) = \left[\frac{1}{m_b c_b} - \frac{1}{m_a c_a}\right] U A_t + \ln(T_{bi} - T_{ao})$$

$$\ln \frac{T_{bo} - T_{ai}}{T_{bi} - T_{ao}} = \left[\frac{1}{m_b c_b} - \frac{1}{m_a c_a}\right] UA_t \qquad (3)$$

ถ้าพิจารณาความร้อนที่ถ่ายเทภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด จะได้ว่า สำหรับของ a

$$Q = m_a c_a (T_{ai} - T_{ao})$$

หรือ $T_{ai} - T_{ao} = \frac{Q}{m_a c_a}$

สำหรับของไหล b

$$Q = m_b c_b (T_{bo} - T_{bi})$$

หรือ $T_{bo} - T_{bi} = \frac{Q}{m_b c_b}$

ดังนั้น

$$(T_{bo} - T_{bi}) - (T_{ai} - T_{ao}) = Q \left[\frac{1}{m_b c_b} + \frac{1}{m_a c_a} \right]$$

แทนค่า

$\left(\frac{1}{m_b c_b}\right) - \left(\frac{1}{m_a c_a}\right)$ จาก (4) ใน (3)

$$\ln \frac{T_{bo} - T_{ai}}{T_{bi} - T_{ao}} = \frac{(T_{bo} - T_{bi}) - (T_{ai} - T_{ao})}{Q} UA_t$$

$$Q = \frac{(T_{bo} - T_{bi}) - (T_{ai} - T_{ao})}{\ln\left[\frac{T_{bo} - T_{ai}}{T_{bi} - T_{ao}}\right]}$$

$$= \frac{(T_{bo} - T_{ai}) - (T_{bi} - T_{ao})}{\ln\left[\frac{T_{bo} - T_{ai}}{T_{bi} - T_{ao}}\right]} UA_t$$

ถ้าให้

$$Q = UA_t (EMTD) = UA_t (\Delta T)_m$$

โดยที่ EMTD (Effective mean temperature difference) คือความแตกต่างอุณหภูมิโดยเฉลี่ยที่ถูกต้อง เมื่อเปรียบเทียบ (5) และ (6) จะได้

$$= \frac{(T_{bo} - T_{ai}) - (T_{bi} - T_{ao})}{\ln\left[\frac{T_{bo} - T_{ai}}{T_{bi} - T_{ao}}\right]}$$

จากรูปที่ 12.9 จะได้ว่า $T_{bo} - T_{ai} = (\Delta T)_{max}$ และ $T_{bi} - T_{ao} = (\Delta T)_{min}$

ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลทั้งสอง จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$\text{EMTD} = (\Delta T)_m = \frac{(\Delta T)_{max} - (\Delta T)_{min}}{\ln\left(\frac{(\Delta T)_{max}}{(\Delta T)_{min}}\right)} \qquad (12.12)$$

เราสามารถพิสูจน์ได้ว่า ถ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบไหลขนาน สมการ
คำนวณค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลก็จะเหมือนกับสมการที่ (12.12)

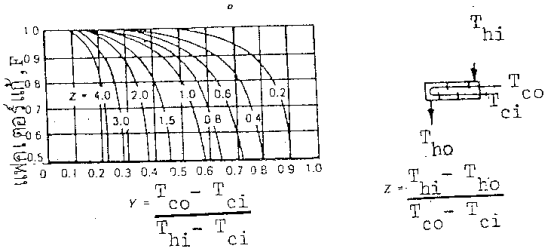
(0) การคำนวณความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ชนิดเชลล์และท่อ และแบบไหลตั้งฉาก

สมการที่ใช้สำหรับคำนวณความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความ
คือสมการที่ (12.12) ใช้ได้เฉพาะในกรณีง่าย ๆ ที่ของไหลไหลสวนทางกันเพียงครั้งเดียว ดัง
ในรูปที่ 12.9 ในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ และแบบไหลตั้งฉากกัน
ะการไหลจะยุ่งยากมากขึ้น สมการนี้ไม่สามารถจะใช้ได้โดยตรง การวิเคราะห์เพื่อหาความแตก-
องอุณหภูมิของของไหลยุ่งยากและใช้เวลามาก

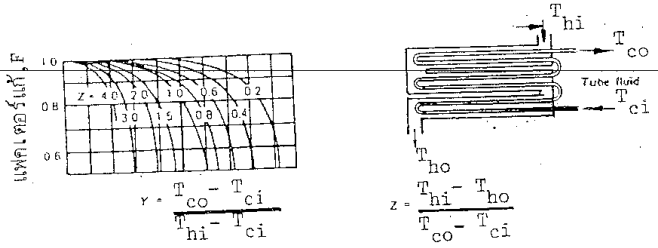
ถ้าให้ความแตกต่างของอุณหภูมิในกรณีเหล่านี้มีค่า $(\Delta T)_{mc}$ วิธีการที่สะดวกที่สุดก็คือ
$(\Delta T)_{mc}$ ให้อยู่ในรูปของความแตกต่างของอุณหภูมิ ของแบบไหลสวนทางกันอย่างง่าย ๆ
ดังนี้คือ
c

$$(\Delta T)_{mc} = F(\Delta T)_m \qquad (12.13)$$

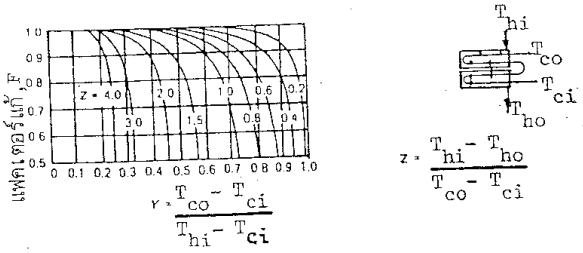
ค่าของ F เรียกว่า แฟคเตอร์แก้ (correction factor) มีผู้เสนอไว้สำหรับ
งแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 12.10 สำหรับแบบเชลล์และท่อ และในรูป
.11 สำหรับแบบไหลตั้งฉาก



(ก) เชลล์ผ่านครั้งเดียว จำนวนครั้งของท่อที่ผ่านเชลล์เป็น 2, 4, 6, 8.....

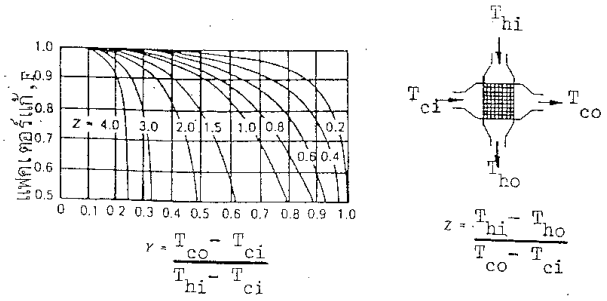


(ข) เชลล์ผ่านครั้งเดียว จำนวนครั้งของท่อที่ผ่านเชลล์ 3, 6, 9, 12.....

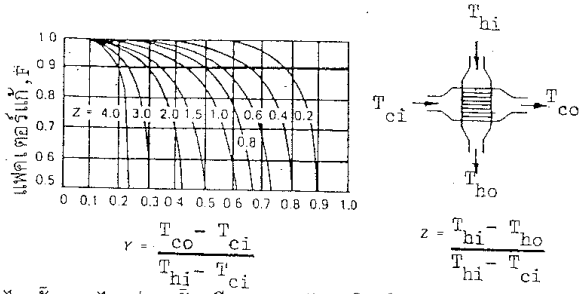


(ค) เชลล์ผ่านสองครั้ง จำนวนครั้งของท่อที่ผ่านเชลล์เป็น 4, 8, 12, 16....

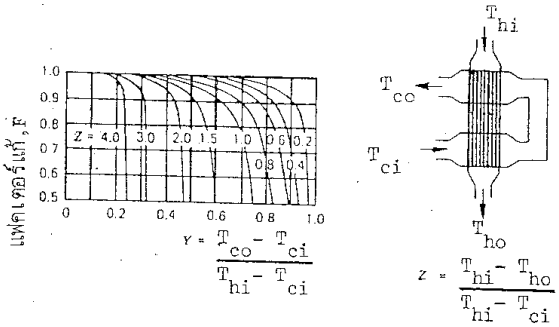
รูปที่ 12.10 แฟคเตอร์แก้ (Correction Factor) ของแบบเชลล์และท่อในกร
(จาก Welty, [12])



(ก) ของไหลทั้งสองไหลผ่านครั้งเดียว ของไหลไม่ผสมกันระหว่างไหล



(ข) ของไหลทั้งสองไหลผ่านครั้งเดียว ของไหลชนิดหนึ่งผสมกันระหว่างไหล ของไหลอีกชนิดหนึ่งไม่ผสมกัน



(ค) ของไหลไหลผ่านกันสองครั้งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 12.11 แฟคเตอร์แก้ (Correction Factor) สำหรับแบบไหลตั้งฉาก (cross flow) ในกรณีต่าง ๆ (จาก Welty,[12])

.11) ฟาวลิ่งแฟคเตอร์ (Fouling Factor)

เมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไประยะหนึ่ง สิ่งสกปรกจากของไหลจะเริ่มจับติดกับองโลหะ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวของโลหะต่ำลง ดังนั้น หากทำการคำนวณออกแบบองแลกเปลี่ยนความร้อนโดยไม่ได้คำนึงถึงค่าของความต้านทานอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกเหล่านี้ที่ผนังโลหะ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนตามที่ได้ทำนายไว้ ด้วยเหตุนี้ การงถึงผลเสียของสิ่งสกปรกที่เกาะติดผิวของโลหะไว้ล่วงหน้าเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

ปริมาณที่ได้บ่งถึงผลของสิ่งสกปรกนี้ เรียกว่า ฟาวลิ่งแฟคเตอร์ (Fouling Factor) ลิ่งแฟคเตอร์ คือ ค่าความต้านทานอันเกิดจากสิ่งสกปรกที่ผนัง จะมีหน่วยเป็นส่วนกลับของค่าสัม-สิทธิ์การพาความร้อน คือ m^2K/W หรือ $^oF\ ft^2\ hr/Btu$

ถ้าให้ R_f เป็นค่าฟาวลิ่งแฟคเตอร์ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังชั้นเดียว ตามสมการที่ (3.8) ซึ่งมีค่า

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{l}{k} + \frac{1}{h_o} \right)^{-1}$$

เมื่อรวมฟาวลิ่งแฟคเตอร์เข้าไปด้วย สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{l}{k} + \frac{1}{h_o} + R_{fi} + R_{fo} \right)^{-1} \qquad (12.14)$$

ตารางที่ 12.1 ค่าฟาวลิ่งแฟคเตอร์ (R_f) (จาก Incropera and Dewitt [13]))

ประเภทของของไหล	ฟาวลิ่งแฟคเตอร์ (R_f) m^2K/W
น้ำทะเลอุณหภูมิสูงกว่า 50 °C	0.0001
น้ำทะเลอุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C	0.0002
น้ำจืดตามแม่น้ำอุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C	0.0004 – 0.0006
น้ำมันเตา	0.001
ไอแอลกอฮอล์	0.0001
ไอน้ำ	0.0001
อากาศ	0.0004
น้ำยาในเครื่องทำความเย็นที่เป็นของเหลว	0.0002

ในกรณีของผนังรูปทรงกระบอก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเขียนได้จาก (3.13) ได้ดังนี้คือ

$$U_i = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\frac{k}{r_1}} + \frac{1}{\frac{h_o r_2}{r_1}} \right)^{-1}$$

เมื่อรวมเอาฟาวลิ่งแฟคเตอร์เข้าไปด้วยแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ เขียนได้ดังนี้

$$U_i = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\frac{k}{r_1}} + \frac{1}{\frac{h_o r_2}{r_1}} + R_{fi} + R_{fo}\frac{r_1}{r_2} \right)$$

โดยที่ R_{fi} เป็นฟาวลิ่งแฟคเตอร์ของผนังด้านใน
R_{fo} เป็นฟาวลิ่งแฟคเตอร์ของผนังด้านนอก

ลักษณะของสิ่งสกปรกที่เกาะติดผิวถ่ายเทความร้อน มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับประเภทของที่ใช้ และลักษณะการใช้งาน โดยอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมา ค่าฟาวลิ่งแฟคเตอร์สามารถที่จะเก็บรวมไว้ได้ และแสดงไว้ในตารางที่ 12.1

:.12) การคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

:.12.1) การคำนวณโดยใช้ E และ NTU

ปัญหาในการคำนวณเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งออกได้เป็นสองประเภท เภทแรกคือการหาคุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเกี่ยวกับการคำนวณปริมาณที่สำคัญ ๆ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่แล้ว เช่นอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) และอุณหภูมิของของไหล เภทที่สอง คือการหาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเกี่ยวกับการหาพื้นที่ของการถ่ายเท มร้อนเมื่อกำหนดค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนมาให้

หาคุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่แล้ว เมื่อรู้พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (A) ค่า อุณหภูมิของของไหลตอนเข้า (T_{ci} และ T_{hi}) และอัตราการไหล (m_c และ m_h) ค่าของสัม สิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) ก็จะหาได้จากคุณสมบัติของของไหล จะต้องคำนวณหาค่าอัตรา ถ่ายเทความร้อน และอุณหภูมิของของไหลตอนออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณจะทำเป็นขั้นตอนดังนี้

(1) หาค่า $C = \frac{(mc)_{min}}{(mc)_{max}}$ และ $NTU = \frac{UA}{(mc)_{min}}$ จากข้อมูลที่รู้แล้ว

(2) จากค่า C และ NTU ค่าของ E จะหาได้จากสมการหรือกราฟ

(3) จากค่าของ E ค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนจะหาได้จาก

$$E = \text{(ค่าการถ่ายเทความร้อน)} / \text{(ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด)}$$

(4) คำนวณค่าของอุณหภูมิของของไหลที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการต่อไปนี้

$$T_{ho} = T_{hi} - Q/m_h c_h$$

$$T_{co} = T_{ci} + Q/m_c c_c$$

หาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับปัญหาประเภทนี้ ค่าที่รู้คืออัตราการไหล อุณหภูมิที่เข้า และออกจากเครื่อง าเปลี่ยนความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(U) ลักษณะการไหลของของไหล และอัตรา ถ่ายเทความร้อน จะต้องคำนวณหาค่าพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อน (A)

ตารางที่ 12.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีต่าง ๆ โดยประมาณ (จาก Kreith [2])

ประเภทของของไหล	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U (W/m^2K)
ระหว่างน้ำกับอากาศที่มีความดัน	60 - 180
ระหว่างน้ำกับน้ำ	800 - 1500
ระหว่างน้ำกับน้ำมันเบนซิน	300 - 500
ระหว่างน้ำกับแอลกอฮอล์	250 - 800
ระหว่างน้ำกับน้ำมันหล่อลื่น	100 - 300
ระหว่างน้ำกับฟรีออน-12 ที่กำลังควบแน่น	300 - 900
ระหว่างน้ำกับแอมโมเนียที่กำลังควบแน่น หรือระเหย	800 - 1500
ระหว่างไอน้ำกับน้ำ	2000 - 3500
ระหว่างไอน้ำกับก๊าซอย่างอื่น	30 - 300

ขั้นตอนในการคำนวณมีดังต่อไปนี้คือ

(1) จากค่าอุณหภูมิของของไหลที่เข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คำนวณ E ได้จากสมการ

$$E = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} \quad \text{หรือ}$$

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

(2) คำนวณค่าของ C จาก

$$C = \frac{(mc)_{min}}{(mc)_{max}}$$

(3) จากค่าของ E และ C หาค่าของ NTU จากสมการหรือกราฟ

(4) ค่าของ A จะหาได้จาก

$$NTU = \frac{UA}{(mc)_{min}}$$

12.2) การคำนวณโดยทั่ว ๆ ไป

การคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเกี่ยวกับการคำนวณพื้นที่สำหรับที่จะเทความร้อนปริมาณที่ต้องการ เมื่อรู้อัตราการไหล และอุณหภูมิของของไหลที่เข้าและออกจากงแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ ผู้ออกแบบยังต้องกำหนดขนาดของส่วนต่าง ๆ ของเครื่องแลกยนความร้อน เช่น ขนาดของท่อ ความยาวของท่อที่ใช้ ระยะระหว่างท่อ และลักษณะการวางท่อ ฉ่น การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เรายังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องขึ้น ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องควรใช้จ่ายรวมต่ำสุด

ในการคำนวณพื้นที่ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน เราใช้สมการดังต่อไปนี้

$$Q = U A (\Delta T)_m$$

ในกรณีนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อน หากไม่รู้ค่า สามารถที่จะคำนวณได้จากอัตราการไหลและภูมิของของไหลดังนี้คือ

$$Q = m_c c_c (\Delta T)_c = m_h c_h (\Delta T)_h$$

ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) คำนวณได้จากสมการที่ (3.13) และ (3.14) ค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีต่าง ๆ นั้น ได้ให้วิธีการคำนวณไว้ในเรื่องการพาความ ในการคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะต้องนำเอาค่าของฟาวลิ่งแฟคเตอร์มาคิดด้วย

สำหรับค่าของความแตกต่างของอุณหภูมิ $(\Delta T)_m$ คำนวณได้จากวิธีที่ให้ไว้ในสมการที่ (12.13)

ในกรณีที่ต้องการออกแบบโดยไม่ต้องการผลละเอียดนัก หรือต้องการประมาณค่าของพื้นที่เครื่องถ่ายเทความร้อนก่อน ค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยประมาณจะหาได้จากตารางที่ 2

ในการคำนวณออกแบบที่กล่าวมาแล้ว เป็นการคำนวณเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนอย่าง ว ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น เราต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายด้วย ในการคำนวณที่ งาจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เราสามารถจะทำให้ขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเล็กลง การเพิ่มสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนขึ้น ซึ่งก็อาจทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของของง างด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านขึ้น การกระทำดังกล่าวจะทำให้ราคาของเครื่องแลกเปลี่ยน งร้อนต่ำลง แต่การที่เราไปเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นจะทำให้การสูญเสียความดันของของไหล ขึ้น ซึ่งจะทำให้เราต้องเสียค่าใช้จ่ายในเรื่องของพลังงานเพิ่มขึ้น ดังนั้น เราก็ยังไม่แน่ใจว่าขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรจะเป็นเท่าใด จึงจะดีที่สุด

หลักการที่จะนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ จะต้องให้ค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำสุด ค่าใช้จ่ายรวมนี้หมายถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกยนความร้อน รวมกับค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพลังงานในช้บเคลื่อนของไหล

ถ้าให้ค่าใช้จ่ายรวมเป็น C_T ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน C_1 และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็น C_2 หลักการคำนวณออกแบบต้องให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เหล่านี้ เมื่อแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน เช่น เป็นค่าหน่วยเวลา มีค่าต่ำสุด ซึ่งอาจเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$C_T = C_1 + C_2 = \text{น้อยที่สุด}$$

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน C_1 จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของเทความร้อนเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น อาจเขียนได้ว่า ค่าใช้จ่ายส่วนนี้ เป็นฟังก์ชั่นของพื้นที่ดังนี้

$$C_1 = F_1(A)$$

ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะขึ้นอยู่กับการสูญเสียความนั้น เขียนได้ว่า ค่าใช้จ่ายส่วนนี้ เป็นฟังก์ชั่นของการสูญเสียความดันดังนี้

$$C_2 = F_2(\Delta P)$$

ถ้ารู้ราคาของวัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และราคาพลังงานที่ใช้เคลื่อนของไหล ก็สามารถหาค่า A และ ΔP ที่จะให้ $C_1 + C_2$ มีค่าต่ำสุดได้

โดยหลักการออกแบบที่กล่าวมาแล้ว ขนาดของเครื่องถ่ายเทความร้อนในแต่ละไม่เท่ากันก็ได้ เพราะราคาพลังงานและราคาวัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในแต่ละแห่ง ในที่ ๆ มีราคาพลังงานสูงแต่ราคาวัสดุต่ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจมีแต่ความเร็วของของไหลต่ำ ในที่ ๆ มีราคาพลังงานต่ำแต่ราคาวัสดุสูง เครื่องแความร้อนอาจมีขนาดเล็ก และมีความเร็วของของไหลสูง

13) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด (Compact Heat Exchangers)

เมื่อพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า
า 700 m^2/m^3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะถูกจำแนกให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
ระทัดรัด (compact heat exchangers) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ส่วนมากใช้เมื่อ
หลเป็นก๊าซ ซึ่งให้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัดนี้
ยแบบ ข้อมูลเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของของไหล จะหาได้จากการ
รทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหล่านี้

ตัวอย่างของข้อมูลเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันของเครื่องแลก
นความร้อนแบบกระทัดรัดนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 12.12 และ 12.13 จะเห็นได้ว่าข้อมูลเหล่านี้
ไว้ในรูปของแฟคเตอร์ เจโคล์เบิร์น ($J_c = S_t P_r^{2/3}$) และตัวเลขเรย์โนลด์ (R_e)

ในกรณีนี้ค่าของตัวเลขสแตนตัน ($S_t = h/Gc_p$) และตัวเลขเร
($R_e = Gd_h/\mu$) คำนวณได้จากความเร็วเชิงมวล (G) ที่มีค่าสูงสุด ซึ่งหาได้โดยสมการดัง

$$G = \frac{m}{A_{min}} \quad (1$$

โดยที่ m คืออัตราการไหลของของไหล ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
A_{min} พื้นที่สำหรับก๊าซไหลที่เล็กที่สุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิค (d_h) จะคำนวณได้จาก

$$d_h = \frac{4LA_{min}}{A} \quad (12.$$

โดยที่ L คือความยาวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่าน
A คือพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อน

ดังนั้น จากข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด (รูปที่ 12.12 12.13) จะคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ นอกจากข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าส ประสิทธิ์การพาความร้อนแล้ว รูปที่ 12.12 และ 12.13 ยังใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสี (f) ซึ่งใช้ในการคำนวณการสูญเสียความดันได้

การสูญเสียความดันเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัด จะคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

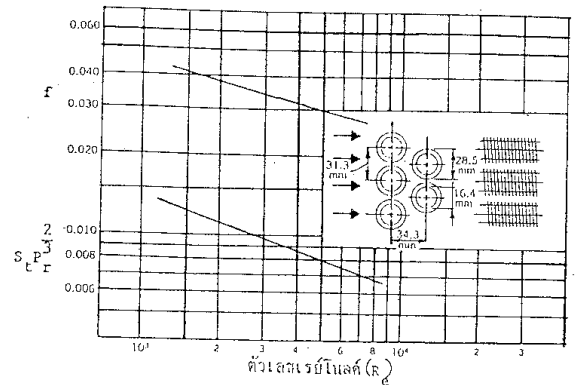
$$\Delta P = \frac{G^2}{2\rho_i}\left[\left(1+\beta^2\right)\left(\frac{\rho_i}{\rho_o}-1\right) + f\left(\frac{A}{A_{min}}\right)\left(\frac{\rho_i}{\rho_m}\right)\right] \quad (12$$

ในสมการที่ (12.18) $\beta = \frac{A_{min}}{A_{fr}}$

โดยที่ A_{fr} คือพื้นที่สำหรับการเคลื่อนที่ของของไหลที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความ

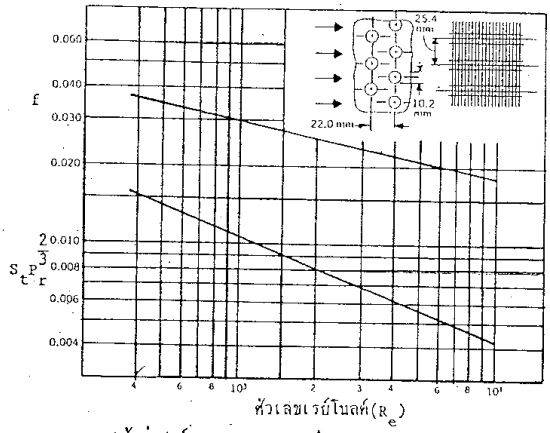
$$\rho_m = 2\left(\frac{1}{\frac{1}{\rho_i}+\frac{1}{\rho_o}}\right)$$

ρ_i และ ρ_o คือค่าความหนาแน่นของของไหลตอนเข้าและออกจากเครื่องแลก ความร้อนตามลำดับ



เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ = 16.4 mm
ความห่างของครีบ = 275 ครีบต่อความยาว 1 m
เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิคส์ของช่องการไหล, (d_h) = 6.68 mm
ความหนาของครีบ (t) = 0.254 mm
พื้นที่สำหรับการไหล/พื้นที่ด้านหน้า = 0.449
พื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อน/ปริมาตรทั้งหมด = 269 m^2/m^3
พื้นที่ของครีบ/พื้นที่ทั้งหมด = 0.830

รูปที่ 12.12 การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดครีบกลม (CF-7.0-5/8J) (จาก Kays and London [29])

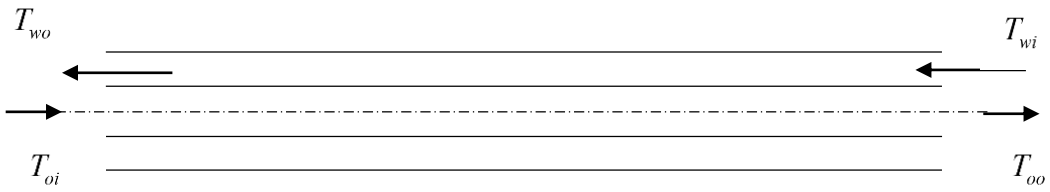


เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ = 10.2 mm
ความห่างของครีบ = 315 ครีบต่อความยาว 1 m
เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิคส์ของช่องการไหล, (d_h) = 3.63 mm
ความหนาของครีบ = 0.330 mm
พื้นที่สำหรับการไหล/พื้นที่ด้านหน้า = 0.534
พื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อน/ปริมาตรทั้งหมด = 587 m^2/m^3
พื้นที่ของครีบ/พื้นที่ทั้งหมด = 0.913

รูปที่ 12.13 การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดครีบกลม (CF-8-0-3/8J) (จาก Kays and London [29])

แบบทดสอบก่อนเรียน

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งใช้สำหรับทำความเย็นให้น้ำมัน เป็นแบบไหลสวนทาง ดังแสดงในรูป น้ำมันที่ต้องการทำให้เย็น มีอัตราการไหล 0.485 kg/s และมีอุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 130 องศาเซลเซียส น้ำที่ใช้ในการทำความเย็นมีอัตราการไหล 0.321 กิโลกรัม/วินาที และมีอุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 145 องศาเซลเซียส ถ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อน 2.15 ตารางเมตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่า 500 วัตน์/ตารางเมตร .เคลวิน ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมันมีค่า 2220 จูลน์/กิโลกรัม.เคลวิน จงคำนวณค่าอุณหภูมิของน้ำมันและน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ตารางบันทึกข้อมูล

	น้ำร้อน			น้ำเย็น					
	Tเข้า	Tกึ่งกลาง	Tออก	Tเข้า	Tกึ่งกลาง	Tออก			