บทที่ 7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchangers)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมีที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง วิศวกรควรมีความรู้ที่จะคำนวณการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิศวกรต้องมีความรู้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิการพาความร้อน การส่งผ่านของความร้อน และความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล

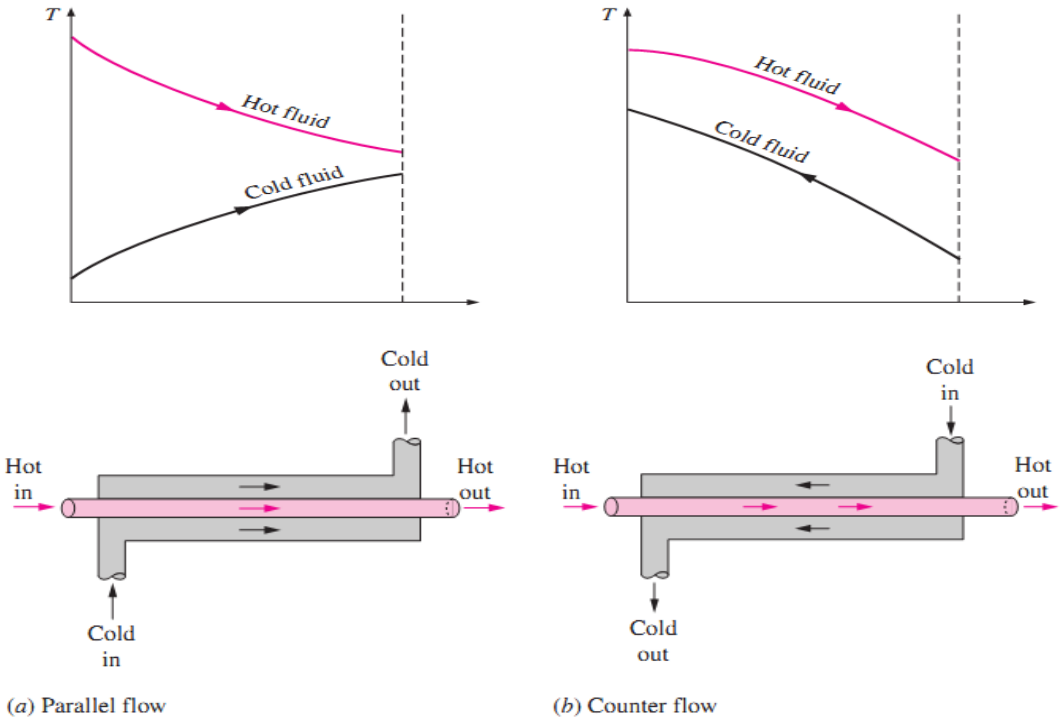
ในปัจจุบัน กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสภาวะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่

หน้าที่หลักของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการ และมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีใช้และเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับต้นทุนของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์ การเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำอย่างระมัดระวัง เงื่อนไขที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุสาหกรรมก็คือ ความมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงและราคาถูก

7.1. ชนิดของ Exchangers (Types of Exchangers)

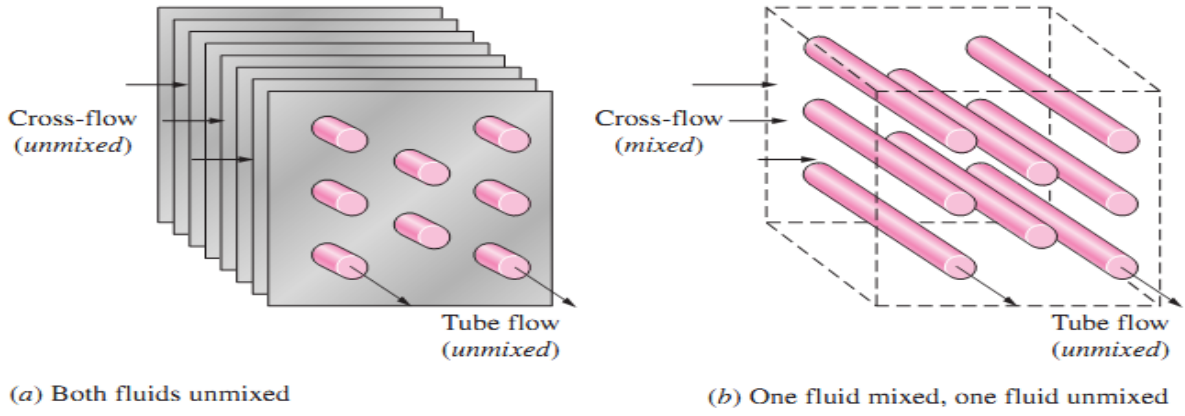
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบการจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Concentric tube or Double pipe) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้อาจอยู่ในลักษณที่ท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกันดังรูปที่ 1 ส่วนการไหลของของไหล อาจไหลสวนทางกัน เรียกว่า counter flow หรือไหลขนานกัน เรียกว่า parallel flow



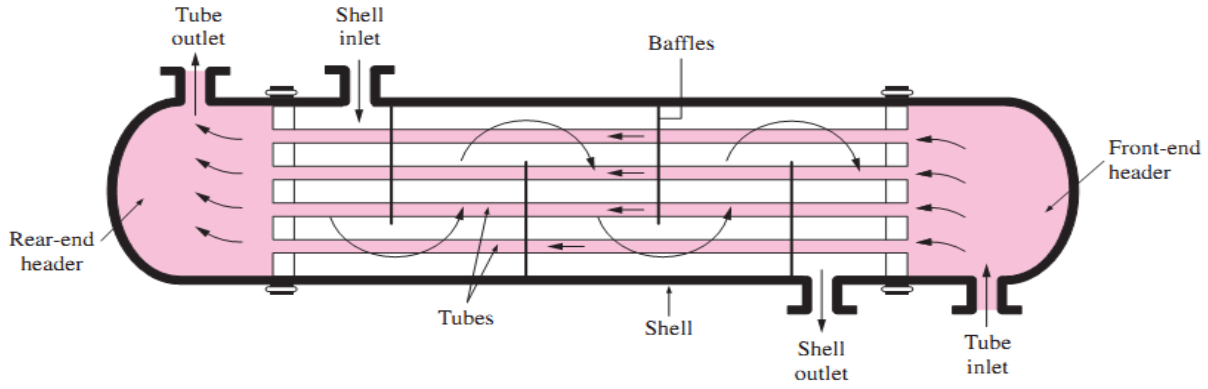
รูปที่ 7.1 ลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (double-pipe heat exchanger)

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (Cross flow) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลจะไหลในทิศทางตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.2 การสร้างนั้นอาจให้อยู่ในลักษณะของไหลเที่ยวเดียว (single pass) หรือ ไหลสองเที่ยว (double pass) หรือมากกว่าก็ได้

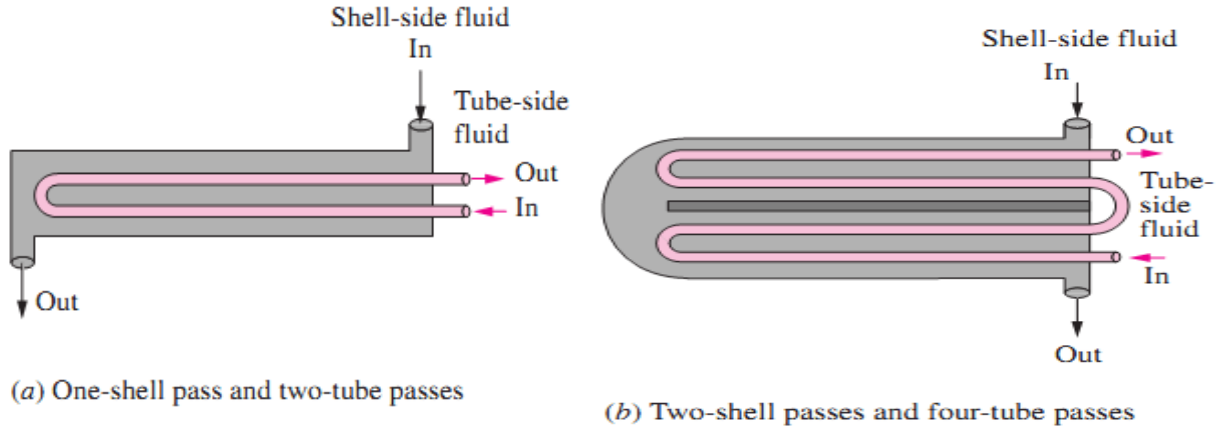


รูปที่ 7.2 การไหลที่แตกต่างกันใน cross flow heat exchangers

3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell and tube) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ของไหลอย่างนึงจะอยู่ในเชลล์ และอีกอย่างหนึ่งจะอยู่ในท่อ สำหรับการไหลนั้นจะอยู่ในลักษณะไหลสวนทาง หรือไหลขนานก็ได้ หรือทั้งสองอย่างในเครื่องเดียวกันก็ได้ นอกจากนี้อาจออกแบบให้ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกับท่อก็ได้



รูปที่ 7.3 Shell and tube heat exchangers 1 shall pass and 1 tube pass (1-1 exchanger);



รูปที่ 7.4 Multi-pass flow arrangements in shell-and-tube heat exchangers.

นอกจากนี้ยังสามารถการแบ่งประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ แบ่งตามสภาวะของของไหลที่ใช้ และแบ่งตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้คือ

การแบ่งตามสภาวะของไหลที่ใช้

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว-ของเหลว เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด เช่น น้ำมันก้นหอกลั่นและน้ำมันดิบที่ป้อนเข้าหอกลั่น เป็นต้น

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว-ของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด โดยของเหลวชนิดหนึ่งจะเปลี่ยนสภาวะเป็นก๊าซหรือระเหยเป็นไอในระหว่างแลก เปลี่ยนความร้อน เช่น เครื่องต้ม ซ้ำ (Re-boiler) ของหอกลั่นน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ก๊าซ ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ ไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว เช่น เครื่องอุ่นอากาศที่ใช้ก๊าซทิ้งเป็นแหล่งความร้อน
4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ก๊าซ ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ โดยชนิดหนึ่งจะมีการควบแน่นเป็นของเหลว เช่น เครื่องกระจายความร้อน (Radiator) สำหรับทำความอบอุ่นในห้อง โดยทำอากาศให้อุ่นด้วยไอน้ำ
5. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ของเหลว ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ โดยชนิดหนึ่งเป็นก๊าซและอีกชนิดหนึ่งเป็นของเหลว เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อน ที่ใช้ก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน
6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ เช่น หม้อไอน้ำแบบท่อซึ่งระเหยน้ำให้เป็นไอน้ำด้วยก๊าซสันดาป และเครื่องควบแน่น ซึ่งควบแน่นไอให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน

การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์การใช้งาน

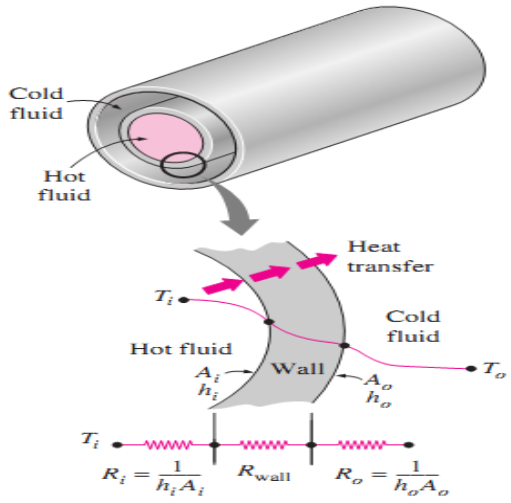
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งตามประเภทจุดประสงค์การใช้งานหรือลักษณะการใช้งานนั้น ได้แก่

1. เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเดี่ยว (Concentrator) การใช้งานคือการระเหยของเหลวให้เป็นไอเพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นให้เป็นประโยชน์ หรือเพื่อให้ได้ของเหลวที่เข้มข้นขึ้น
2. เครื่องอุ่น หรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้ของไหลร้อนล่วงหน้า ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ โดยทั่วไปมักจะเรียกชื่อตามตำแหน่งข้างหน้าของการใช้งาน หรือตามประเภทของของ ไหลที่ถูกอุ่นให้ร้อน เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (Boiler Feed Water Preheater) เป็นต้น
3. เครื่องทำให้ร้อน (Heater) จุดประสงค์ก็เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับของไหลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น
4. เครื่องทำให้ร้อนยิ่งยวด (Superheat-heater) เครื่องนี้จะทำหน้าที่เพิ่มความร้อนให้กับของไหลที่ถูกทำให้ร้อนมาแล้ว เพื่อที่จะทำให้อยู่ในสภาพร้อนยิ่งยวด
5. เครื่องต้มซ้ำ (Re-boiler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนให้กับของเหลวเพื่อที่จะระเหยให้เป็นไออีก ครั้ง
6. เครื่องควบแน่น (Condenser) จุดประสงค์ที่สำคัญก็เพื่อควบไอให้กลายเป็นของเหลว เช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำ
7. เครื่องควบแน่นหมด (Total Condenser) เครื่องนี้เป็นเครื่องควบแน่นชนิดหนึ่ง ที่ใช้กับหอกลั่นได้รับการออกแบบให้สามรถควบแน่นไอที่ออกมาจากยอดหอกลั่นได้ ทั้งหมด

8. เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial Condenser) เครื่องควบแน่นประเภทผลิตขึ้นใช้กับหอกลั่น มีจุดประสงค์เพื่อควบแน่นบางส่วนให้กลายเป็นของเหลว
9. เครื่องระบายความร้อน (Cooler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับของไหลเพื่อลดอุณหภูมิของของไหล
10. เครื่องทำให้เย็นจัด (Chillier) ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้ต่ำลงมาก โดยใช้สารทำความเย็น (Refrigeration) เช่น ฟรีออน แอมโมเนีย เป็นต้น

7.2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat transfer coefficient)

เรื่องที่สำคัญเป็นอันดับแรกในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับ เซลล์ในเชิงความร้อนก็คือการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของ ไหลสองชนิด นั้นได้นิยามความหมายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลที่ มีอุณหภูมิเป็น T_h กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น T_c ที่กั้นโดยผนังทึบด้วยสมการ



เรื่องที่สำคัญเป็นอันดับแรกในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับ เซลล์ในเชิงความร้อนก็คือการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของ ไหลสองชนิด นั้นได้นิยามความหมายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลที่ มีอุณหภูมิเป็น T_h กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น T_c ที่กั้นโดยผนังทึบด้วยสมการ (7.1)

รูปที่ 7.5 Thermal resistance network associated with heat transfer in a double-pipe heat exchanger.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \qquad (7.1)$$

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o \qquad (7.2)$$

เมื่อ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat transfer coefficient, W/m^2 °C)

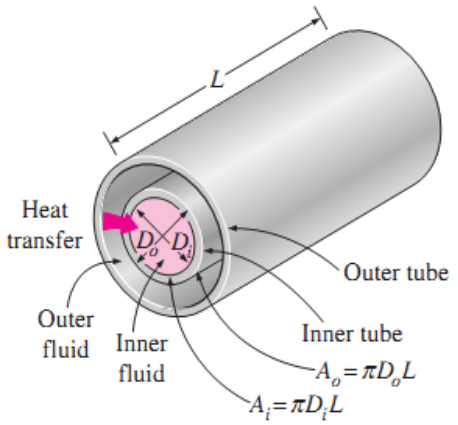
กำจัด ΔT ออกไป สมการ (7.1) ก็จะลดรูปลงดังสมการ (7.2)

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_iA_i} = \frac{1}{U_oA_o} = R = \frac{1}{h_iA_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_oA_o} \quad (7.3)$$

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (7.4)$$

$$A_s = A_{total} = A_{fin} + A_{unfinned} \quad (7.5)$$

$$A_s = A_{unfinned} + \eta_{fin}A_{fin} \quad (7.6)$$



สำหรับในกรณีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกอบด้วยท่อสองขนาดซ้อนร่วมแกนเดียวกันนั้น (double-pipe) ดังรูปที่ 7.6 มี $A_i = \pi D_i L$ และ $A_0 = \pi D_0 L$ ดั้งนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อกรณีนี้จะมีค่าเป็น

$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \quad (7.7)$$

เมื่อ k = thermal conductivity, L = length of the tube จะได้ ผลรวมของความต้านทาน (total thermal resistance)

รูปที่ 7.6 The two heat transfer surface areas associated with a double-pipe heat exchanger (for thin tubes, $D_i \approx D_o$ and thus $A_i \approx A_o$).

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_iA_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_oA_o} \quad (7.8)$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_iA_i\Delta T = U_oA_o\Delta T \quad (7.9)$$

เมื่อ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat transfer coefficient, W/m^2 °C)

กำจัด ΔT ออกไป สมการ (7.9) ก็จะลดรูปลงดังสมการ (7.10)

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_iA_i} = \frac{1}{U_oA_o} = R = \frac{1}{h_iA_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_oA_o} \quad (7.10)$$

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (7.11)$$

$$A_s = A_{total} = A_{fin} + A_{unfinned} \quad (7.12)$$

$$A_s = A_{unfinned} + \eta_{fin} A_{fin} \quad (7.13)$$

7.3. Fouling Factor

เมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไประยะหนึ่ง สิ่งสกปรกจากของไหลจะเริ่มจับติดกับผิวของโลหะ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวของโลหะต่ำลง ดังนั้น หากทำการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยไม่ได้คำนึงถึงค่าของความต้านทานอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกเหล่านี้ที่ผนังของโลหะ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนตามที่ได้ทำนายไว้ ด้วยเหตุนี้ การคำนึงถึงผลเสียของสิ่งสกปรกที่เกาะติดผิวของโลหะไว้ล่วงหน้าจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

ปริมาณที่บ่งบอกถึงสิ่งสกปรกเหล่านี้ เรียกว่า Fouling Factor (R_f) หมายถึง ค่าความต้านทานอันเกิดจากสิ่งสกปรกที่ผนัง (m^2K/W)

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_0 A_0} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(\frac{D_0}{D_i})}{2\pi kL} + \frac{R_{f,0}}{A_0} + \frac{1}{h_0 A_0} \quad (7.14)$$

$$U_i = \frac{1}{1/h_i + 1/h_{di} + (r_0 - r_i)A_i/k_A A_{A\,lm} + A_i/A_0 h_0 + A_i/A_0 h_{do}} \quad (7.15)$$

ตารางที่ 7.1 Typical fouling coefficients

	hd (W/m^2 K)	hd (btu/h ft^2 ^oF)
Distilled and seawater	11350	2000
City water	5680	1000
Muddy water	1990-2840	350-500
Gases	2840	500
Vaporizing liquids	2840	500
Vegetable and gas oils	1990	350

7.4. การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Analysis of heat exchangers)

ในการออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในงานทางวิศวกรรมนักศึกษา จำต้องมีความสามารถในการคาดคะเนอุณหภูมิตรงทางออกของของไหลร้อนและเย็นและ สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างของของไหลร้อนและเย็นได้เมื่อ ทราบอัตราการไหลของมวลของของไหล ในที่นี้จะกล่าวถึงการหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (Log Mean Temperature Difference, or LMTD) และวิธี ประสิทธิผล NTU (Effectiveness-NTU)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยปกติมักใช้เป็นเวลานานโดยไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทำงาน ดังนั้นอาจสมมุติว่าอุปกรณ์มีการไหลแบบสภาวะคงที่ คุณสมบัติของไหล เช่น อุณหภูมิ ความเร็วที่ทางออก หรือทางเข้ามีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และ พลังงานศักย์ ความร้อนจำเพาะ ของของไหลจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าคงที่ การนำความร้อนตามแนวแกนของท่อมีไม่ค่อยมีความสำคัญและจะไม่นำมาคิดก็ได้ สุดท้ายสมมุติให้ผิวนอกสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนเป็นอย่างดีจนไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่ร้อน เท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของไหลเย็น ดังสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc}(T_{c,out} - T_{c,in}) \tag{7.16}$$

และ

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph}(T_{h,out} - T_{h,in}) \tag{7.17}$$

เมื่อ ตัวห้อย h และc สำหรับของไหลร้อนและของไหลเย็น ตามลำดับ และ

$\dot{m}_c$, $\dot{m}_h$	=	อัตราการไหลของมวล (mass flow rates)
C_{pc}, C_{ph}	=	ความร้อนจำเพาะ (specific heats)
$T_{c, out}$, $T_{h, out}$	=	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกจากท่อ (outlet temperature)
$T_{c, in}$, $T_{h, in}$	=	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าท่อ (inlet temperature)

ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อความสะดวกมักรวมอัตราการไหลของมวลและความร้อนจำเพาะของของไหลเข้าด้วย กันเป็นจำนวนหนึ่งที่เรียกว่า “ อัตราความจุความร้อน (Heat Capacity Rate), C “ดังนี้

$$C = \dot{m} C_p \tag{7.18}$$

สำหรับของไหลร้อน $C_h = \dot{m}_h C_{ph}$ และสำหรับของไหลเย็น $C_c = \dot{m}_c C_{pc}$ (7.19)

เขียนสมการ (7.18) และ (7.19) ในรูปของอัตราความจุความร้อน คือ

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,out} - T_{c,in}) \tag{7.20}$$

$$\dot{Q} = C_h(T_{c,in} - T_{h,out}) \tag{7.21}$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่ากับอัตราความจุความร้อนของของไหลคูณกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหล อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้ในรูปของความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลที่ร้อนและเย็นโดยที่

$$\Delta T = T_h - T_c \tag{7.22}$$

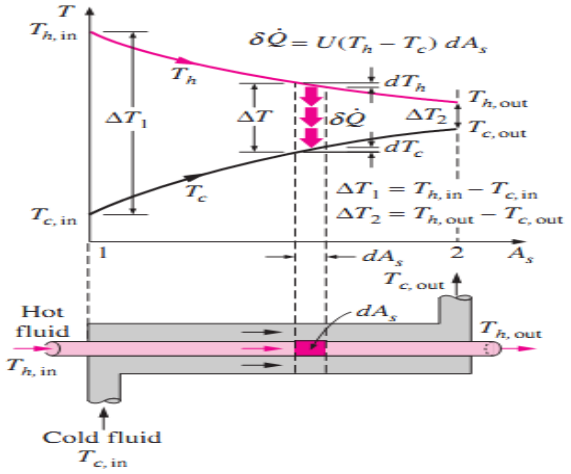
อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้หาจากกฎการเย็นตัวของนิวตันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แต่เนื่องจาก ΔT อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีรูปสมการเป็น

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_m \tag{7.23}$$

เมื่อ A พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน และ คือความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมระหว่างของไหล 2 ชนิด

7.5. วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (The log mean temperature difference (LMTD) method)

อุณหภูมิของของไหลต่าง ๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นปกติแล้วจะมีค่าไม่คงที่ แต่จะแปรค่าจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่งเมื่อมีความร้อนไหลจากของไหลที่ร้อนไปของไหลที่เย็นกว่า ดั้งนั้นถึงแม้ว่าความต้านทานความร้อนตามทางของไหลจะมีค่าคงที่ก็ตาม อัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามเส้นการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้เพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามความแตกต่างของอุณหภูมิของไหลร้อนและของไหลเย็นที่แต่หน้าตัด ดังรูปที่ 7.7 ระยะห่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสองจะเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลทั้งสอง



รูปที่ 7.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลไหลสวนทางกัน

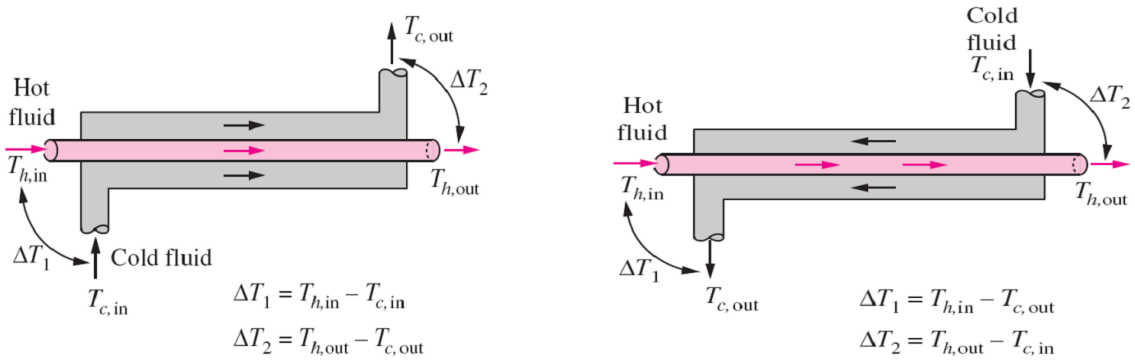
รูปที่ 7.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลไหลสวนทางกัน เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็นมีค่าสูงที่ทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่จะลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียลกับทางออก และอุณหภูมิของของเหลวร้อนจะลดลงขณะที่อุณหภูมิของของเหลวเย็นเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของของเหลวเย็นไม่สามารถเพิ่มสูงเกินอุณหภูมิของของเหลวที่ร้อนได้ไม่ว่าจะอยู่ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนานแค่ไหนก็ตาม

ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้นั้นล้วนแต่ต้องหาโดยการอินทิเกรตจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่ไหลผ่านพื้นที่ dA ซึ่งเป็นพื้นที่เล็ก ๆ ให้ทั่วพื้นที่ A ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนตลอดความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการที่ (7.24)

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_m \tag{7.24}$$

เมื่อ

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \qquad (7.25)$$



(a) Parallel Flow Heat Exchanger **(b) Counter Flow Heat Exchanger**

รูปที่ 7.8 แสดงค่า ΔT_1 และ ΔT_2 ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (a) ไหลทิศทางเดียว (b)ไหลสวนทาง

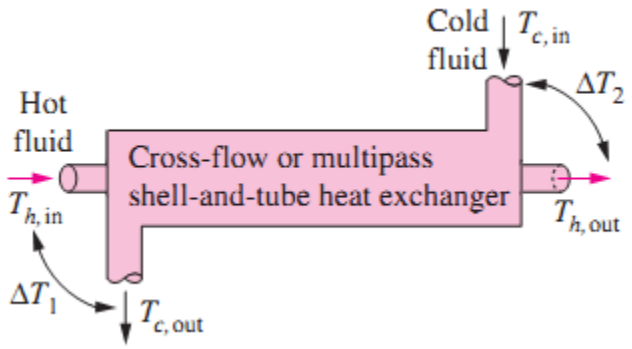
Multi-pass and Cross-Flow Heat Exchangers: Use of a Correction Factor

ค่า LMTD มีประโยชน์เพียงแค่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างหยาบ ๆ ทั้งนี้เพราะโดยปกติแล้วค่าของ U นี้จะไม่คงที่ อย่างไรก็ตามในการออกแบบนั้นมักจะนำเอาค่า U ของหน้าตัดที่อยู่กึ่งกลางปลายทั้งสอง ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในการคำนวณโดยถือว่ามีค่าคงที่ แต่ถ้าหากค่า U นี้แปรค่ามากก็จะต้องคำนวณหาทีละขั้นตอนโดยการนำค่า U นั้นไปแทนค่าลงในสมการแล้วอินทิเกรตหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอีกทีหนึ่ง สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ซับซ้อน เช่น แบบท่อกับเซลล์ที่ของไหลในท่อและในเซลล์ไหลผ่านเครื่องหลายเที่ยวหรือ หลายกลับ หรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลมีการคลุกเคล้าปนกัน และไม่คลุกเคล้า จะหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยโดยวิธีคณิตศาสตร์ได้ยากมาก วิธีที่นิยมใช้กันก็คือ ให้ดัดแปลงค่า LMTD ที่จะนำไปใช้งานโดยการคูณด้วยแก้ F ที่อยู่ในรูปเส้นกราฟ ในการหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่แท้จริงของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้น ให้คูณค่า LMTD ของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกันที่ใช้ข้อมูลอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้นด้วยแฟคเตอร์แก้ (F) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละระบบดังนั้น

$$\Delta T_{lm} = F\Delta T_{lm,CF} \qquad (7.26)$$

เมื่อ F is the correction factor $\Delta T_{lm,}$ CF is the log mean temperature difference for a counter flow heat exchanger *และ* $\Delta T_{lm,}$ is the actual log mean temperature difference

ตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 shell-and-tube heat exchangers

Correction factor (F) สามารถหาได้จากรูปที่ 7.10-7-13

Heat transfer rate:

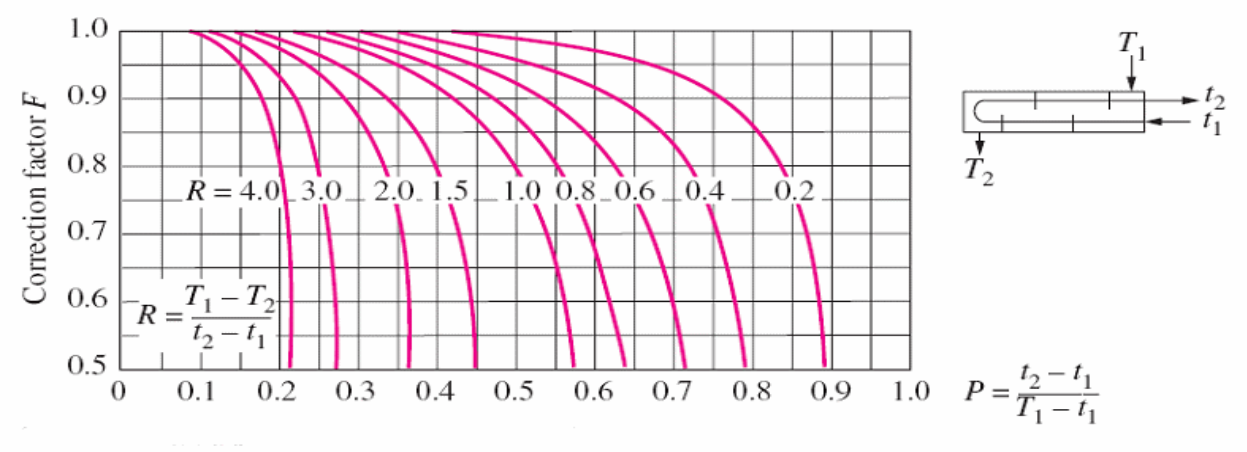
$$Q = UA_s F \Delta T_{lm,CF}$$

เมื่อ $$\Delta T_{lm,CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

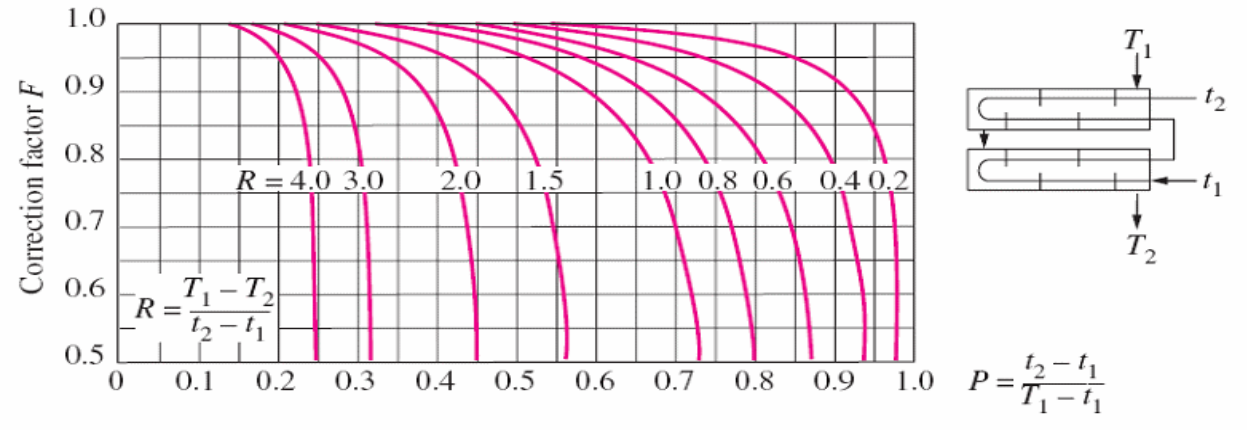
$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$$

และ F หาจากรูป (7.10-7.13)

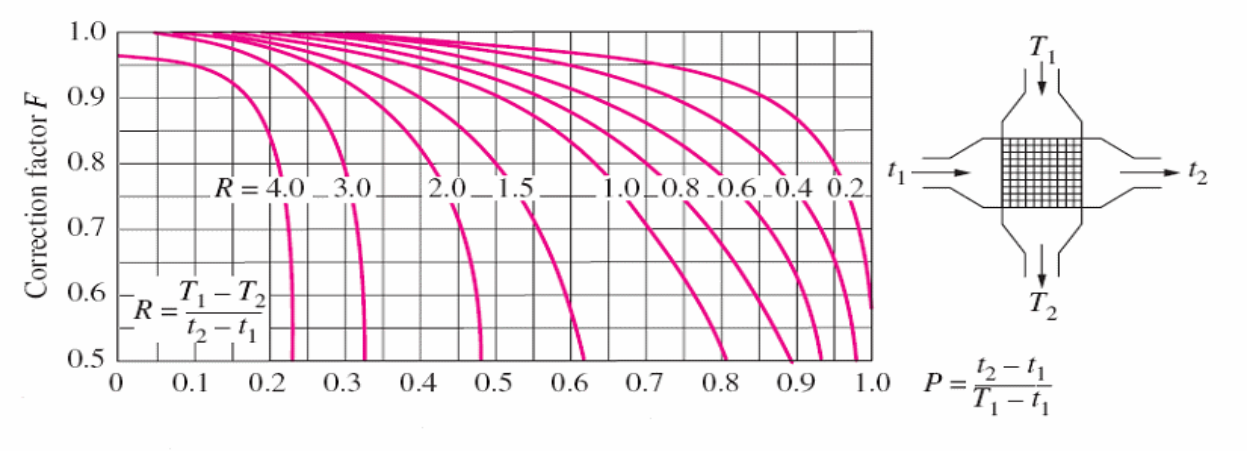


รูปที่ 7.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลซับซ้อนที่ของไหลในเชลล์ไหลผ่านเครื่องเที่ยวเดียวส่วนในท่อไหลผ่านเครื่อง 2,4,6,8,10,12 เที่ยว

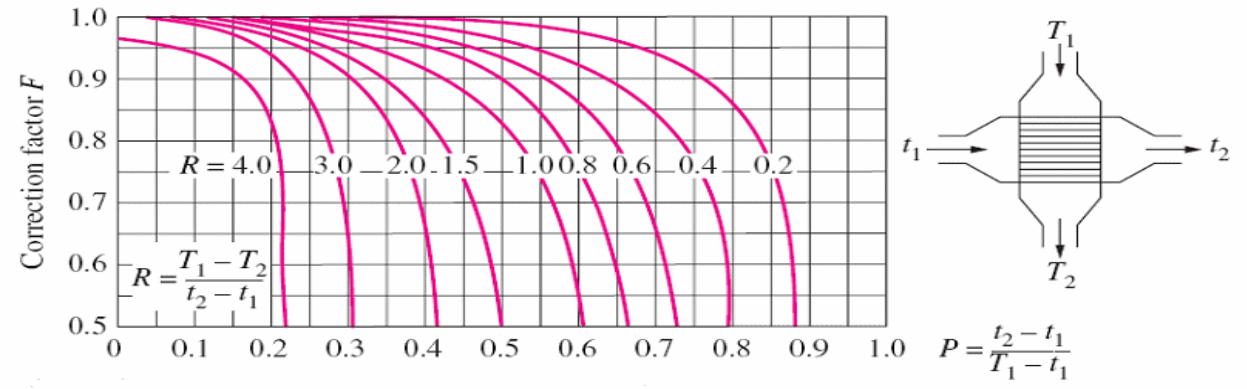


รูปที่ 7.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลซับซ้อนที่ของไหลในเชลล์ไหลผ่านเครื่อง 2 เที่ยว

ส่วนในท่อไหลผ่านเครื่อง 4,8,12,16,18,20,24 เที่ยว



รูปที่ 7.12 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลในเชลล์มีการคลุกเคล้าปนกัน ส่วนของไหลในท่อไม่มีการคลุกเคล้าปนกัน และไหลผ่านเครื่อง เพียงเที่ยวเดียวหรือกลับเดียว



รูปที่ 7.13 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลแต่ละชนิดไม่มีการคลุกเคล้าปนกัน ของไหลในท่อไหลผ่านเครื่องเดียว

ส่วนค่าที่อยู่ในแกนนอนของกราฟนั้นก็คืออัตราส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิที่อยู่ในสมการ

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{t_2 - t_1}}{\mathrm{T_1 - t_1}} \qquad (7.27)$$

เมื่อ ตัวห้อย 1 และ 2 คือ ทางเข้า (inlet) และทางออก (outlet) ตามลำดับ สำหรับ shell-and-tube heat exchangers: T และ t คือ ของไหลในท่อ (tube) และของไหลในเชลล์ (shell)

อัตราส่วน P นี้เป็นตัวที่จะชี้ให้ทราบว่าของไหลนั้นร้อนขึ้นหรือเย็นตัวลงอย่างแท้จริง และ P นี้จะมีค่าตั้งแต่ 0-1.0 เมื่อเป็นกรณีที่อุณหภูมิที่ไหลเข้าของของไหลร้อนเท่ากับอุณหภูมิที่ไหลออกของของไหลเย็น สำหรับ R ของเส้นกราฟแต่ละเส้นนั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างผลคูณของอัตราการไหลโดยมวลกับ ความร้อนจำเพาะของของไหล

ทั้งสอง อัตราส่วนนี้ยังมีอัตราส่วนเท่ากับค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลใน เซลล์หารด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในท่อด้วยฉะนั้น

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{(mC_p)_{tube\ side}}{(mC_p)_{shell\ side}} \tag{7.28}$$

สำหรับค่า R มาใช้งานนั้นก็ไม่ต้องคำนึงถึงเลยว่าของไหลร้อนจะไหลในเซลล์หรือไหลในท่อ และ ถ้าหากของไหลชนิดหนึ่งชนิดใดมีอุณหภูมิคงที่แล้ว ก็ไม่คำนึงถึงทิศทางการไหลของของไหลที่มีอุณหภูมิคงที่นั้น ทั้งนี้เพราะ F จะมีค่าเท่ากับ 1 และสามารถนำเอาค่า LMTD ไปใช้งานได้เลย

7.6. วิธีการของค่าประสิทธิผล-เอ็นทียู (The effectiveness-NTU method)

วิธีการของ LMTD ที่ใช้วิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนำมาใช้ประโยชน์เมื่อเราทราบค่า อุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้สามารถหา ค่าได้ง่ายขึ้น LMTDเป็นวิธีที่ง่ายกับการคำนวณและการไหลของความร้อน พื้นที่ผิวหรือค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเท ความร้อนอาจหาได้ เมื่ออุณหภูมิที่เข้าหรือออกเป็นค่าที่นำมาประเมินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นั้นการวิเคราะห์มักรวมลำดับขั้นตอนการอิเทอเรตีฟเพราะว่าค่าของ ล็อกอยู่ในเทอมของ LMTD ใน กรณีเหล่านี้การวิเคราะห์ถูกจัดให้อยู่ในรูปที่ง่ายมากขึ้นโดยการใช้วิธีการ พื้นฐานที่เป็นค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการถ่ายเทความร้อนที่ให้ด้วยปริมาณของความร้อน ดังวิธีการของค่าประสิทธิผลมักมีข้อได้เปรียบมากกว่าปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ ด้วยการเปรียบเทียบระหว่าสงประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้เป็นเหตุผลของการเลือกประเภทที่เหมาะที่สุดให้เป็นไปตาม วัตถุประสงค์ของการถ่ายเทความร้อนนั้น

เรากำหนดประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิผล } (\varepsilon) = \frac{q}{q_{max}} = \frac{\text{Actual heat transfer rate}}{\text{Maximum possible heat transfer rate}} \tag{7.29}$$

การถ่ายเทความร้อนที่ได้จริงอาจคำนวณได้ทั้งการคำนวณพลังงานที่สูญเสียโดยออกจากของไหลร้อนหรือค่าของพลังงานโดยของไหลเย็นที่รับความร้อนเพิ่ม พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนานกันและแบบไหลตัดกัน สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลขนานกันได้สมการดังนี้

การถ่ายเทความร้อนที่ได้จริงอาจคำนวณได้ทั้งการคำนวณพลังงานที่สูญเสียโดยออกจากของไหลร้อนหรือค่าของพลังงานโดยของไหลเย็นที่รับความร้อนเพิ่ม พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนานกันและแบบไหลตัดกัน สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลขนานกัน จากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่ร้อน เท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของไหลเย็น ได้สมการ (7.30)

$$q = C_c(T_{c,out} - T_{c,in}) = C_h(T_{h,in} - T_{h,out}) \tag{7.30}$$

$$q_{max} = C_{min}\left(T_{h,in} - T_{c,in}\right) \tag{7.31}$$

$$q = \varepsilon q_{max} = \varepsilon C_{min}\left(T_{h,in} - T_{c,in}\right) \tag{7.32}$$

สำหรับ double-pipe parallel flow heat exchanger

$$\ln\frac{T_{h,out}-T_{c,out}}{T_{h,in}-T_{c,in}} = -\frac{UA_s}{C_c}\left(1+\frac{C_c}{C_h}\right) \tag{7.33}$$

จากสมการ (1.73)

$$T_{h,out} = T_{h,in} - \frac{C_c}{C_h}\left(T_{c,out} - T_{c,in}\right) \tag{7.34}$$

แทนสมการ (7.34) ลงใน (7.33)

$$\ln\frac{T_{h,in}-T_{c,in}+T_{c,in}-T_{c,out}-\frac{C_c}{C_h}\left(T_{c,out}-T_{c,in}\right)}{T_{h,in}-T_{c,in}} = -\frac{UA_s}{C_c}\left(1+\frac{C_c}{C_h}\right) \tag{7.35}$$

จัดรูปแบบสมการ (7.35) ใหม่

$$\ln\left[1-\left(1+\frac{C_c}{C_h}\right)\frac{C_c\left(T_{c,out}-T_{c,in}\right)}{C_h\left(T_{h,in}-T_{c,in}\right)}\right] = -\frac{UA_s}{C_c}\left(1+\frac{C_c}{C_h}\right) \tag{7.36}$$

จากนิยามของประสิทธิผล (ε)

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_c\left(T_{c,out}-T_{c,in}\right)}{C_{min}\left(T_{h,in}-T_{c,in}\right)} \rightarrow\rightarrow\rightarrow \frac{\left(T_{c,out}-T_{c,in}\right)}{\left(T_{h,in}-T_{c,in}\right)} = \varepsilon\frac{C_{min}}{C_c} \tag{7.37}$$

แทนสมการ (7.37) ลงใน (7.36) แก้สมการหาค่า ประสิทธิผล (ε) สำหรับ parallel flow heat exchanger ดังสมการ (7.38)

$$\varepsilon_{\text{parallel flow}} = \frac{1-\exp\left[\frac{-UA_s}{C_c}\left(1+\frac{C_c}{C_h}\right)\right]}{\left(1+\frac{C_c}{C_h}\right)\frac{C_{min}}{C_c}} \tag{1.38}$$

$$\varepsilon_{\text{parallel flow}} = \frac{1-\exp\left[\frac{-UA_s}{C_{min}}\left(1+\frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right]}{1+\frac{C_{min}}{C_{max}}} \tag{7.39}$$

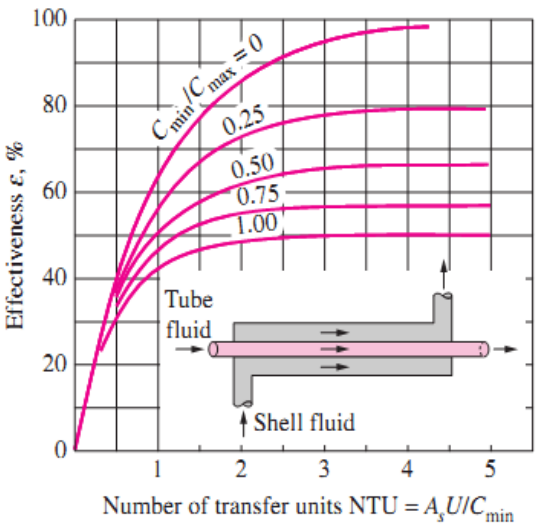
นิยาม NTU ; $$\mathrm{NTU} = \frac{\mathrm{UA_s}}{\mathrm{C_{min}}} = \frac{\mathrm{UA_s}}{(\dot{m}\mathrm{C_p})_{\mathrm{min}}} \quad (7.40)$$

$$\varepsilon = \mathrm{function}(\mathrm{UA_s}/\mathrm{C_{min}},\ \mathrm{C_{min}}/\mathrm{C_{max}}) = \mathrm{function}(\mathrm{NTU}, \mathrm{c}) \quad (7.41)$$

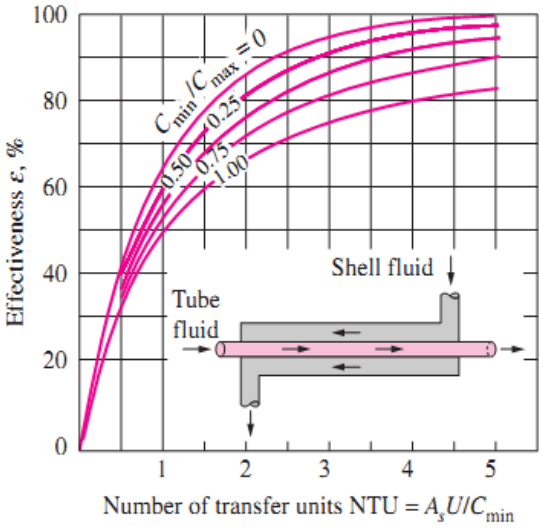
กลุ่มของเทอม UA/C_{min} เรียกว่าจำนวนของหน่วยการถ่ายเทซึ่งบ่งชี้ถึงขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Kays และ London ได้แสดงอัตราส่วนของค่าประสิทธิผลสำหรับ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทต่าง ๆ และผลลัพธ์บางส่วนนั้นทำการวิเคราะห์โยการใช้ชาร์ท ขณะที่ชาร์ทค่าประสิทธิผล เอ็นทียูสามารถใช้ได้ดีกับปัญหาที่ต้องการออกแบบที่มีการประยุกต์ใช้ได้ เที่ยงตรงมากกว่าที่ได้จากการอ่านจากกราฟ ในขณะที่ลำดับขั้นตอนการออกแบบยุ่งยากนั้นอาจจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยซึ่งเป็นการนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ และใช้สมการตามตารางที่ 7.2 (สำหรับ Effectiveness relation) ตารางที่ 7.3 (สำหรับ NTU relation) และรูปที่ 7.14-7.16

ตารางที่ 7.2 Effectiveness relations for heat exchangers (Kays and London): $\mathrm{NTU} = \mathrm{UA_s}/\mathrm{C_{min}}$ and $\mathrm{c} = \mathrm{C_{min}}/\mathrm{C_{max}} = (\mathrm{m}\cdot\mathrm{C_p})_{\mathrm{min}}/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{C_p})_{\mathrm{max}}$

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1. Double pipe:	
Parallel-flow	$\varepsilon = \frac{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1+\mathrm{c})]}{1+\mathrm{c}}$
Counter-flow	$\varepsilon = \frac{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1-\mathrm{c})]}{1-\mathrm{c}\exp[-\mathrm{NTU}(1-\mathrm{c})]}$
2. Shell-and-tube:One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$\varepsilon = 2\left\{1+\mathrm{c}+\sqrt{1+\mathrm{c}^2}\,\frac{1+\exp[-\mathrm{NTU}\sqrt{1+\mathrm{c}^2}]}{1-\exp[-\mathrm{NTU}\sqrt{1+\mathrm{c}^2}]}\right\}^{-1}$
3. Cross-flow (single-pass)	
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1-\exp\left\{\frac{\mathrm{NTU}^{0.22}}{\mathrm{c}}[\exp(-\mathrm{c}\,\mathrm{NTU}^{0.78})-1]\right\}$
C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$\varepsilon = \frac{1}{\mathrm{c}}(1-\exp\{1-\mathrm{c}[1-\exp(-\mathrm{NTU})]\})$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$\boldsymbol{\varepsilon} = 1-\exp\left\{-\frac{1}{\mathrm{c}}[1-\exp(-\mathrm{c}\,\mathrm{NTU})]\right\}$
4. All heat exchangers with c = 0	$\varepsilon = 1-\exp(-\mathrm{NTU})$

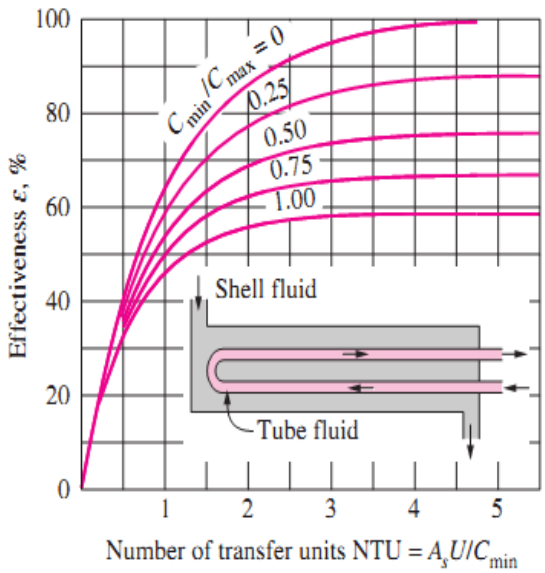


(*a*) Parallel-flow

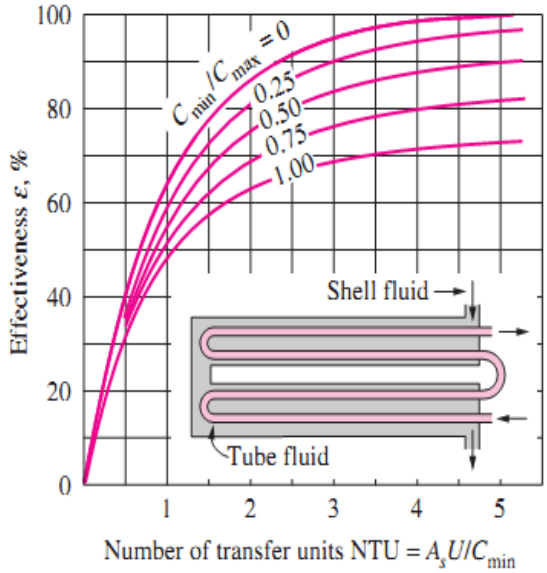


(*b*) Counter-flow

รูปที่ 7.14 ค่าประสิทธิผล (ε) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน; (a) ไหลทางเดียวกัน (parallel flow exchanger), (b) ไหลสวนทางกัน (counter flow exchanger)

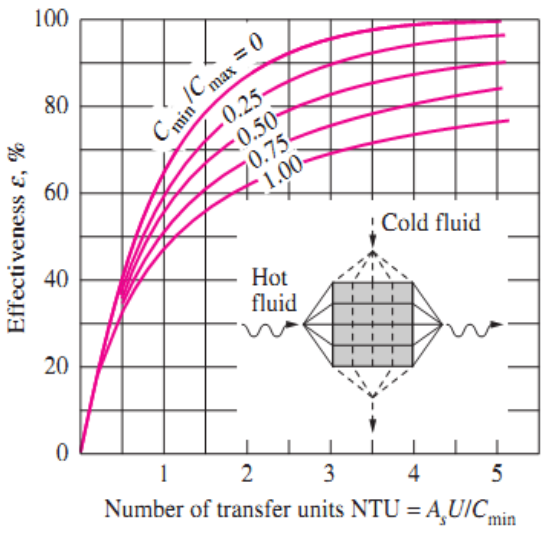


(*c*) One-shell pass and 2, 4, 6, … tube passes

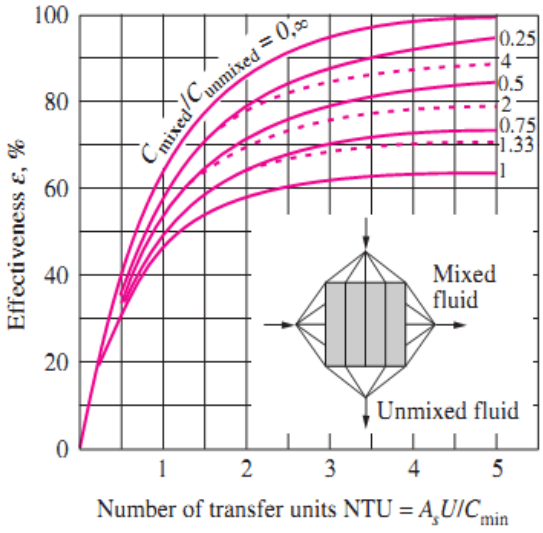


(*d*) Two-shell passes and 4, 8, 12, … tube passes

รูปที่ 7.15 ค่าประสิทธิผล (ε) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน**;** (c) One-shell pass and 2, 4, 6, tube passes**,** (d) Two-shell passes and 4, 8, 12, tube passes



(e) Cross-flow with both fluids unmixed



(f) Cross-flow with one fluid mixed and the other unmixed

รูปที่ 7.16 ค่าประสิทธิผล (ε) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน; (e) Cross-flow with both fluids unmixed and (f) Cross-flow with one fluid mixed and the other unmixed

ตารางที่ 7.3 NTU relations for heat exchangers (Kays and London): $\mathrm{NTU} = \mathrm{UA_s}/\mathrm{C_{min}}$ and $\mathrm{c} = \mathrm{C_{min}}/\mathrm{C_{max}} = (\mathrm{m}\cdot\mathrm{C_p})_{\mathrm{min}}/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{C_p})_{\mathrm{max}}$

Heat exchanger type	NTU relation
1. Double pipe:	
Parallel-flow	$\mathrm{NTU} = -\frac{\ln[1-\varepsilon(1+c)]}{1+c}$
Counter-flow	$\mathrm{NTU} = \frac{1}{c-1} ln\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon c-1}\right)$
2. Shell-and-tube:One-shell pass 2, 4, . . tube passes	$\mathrm{NTU} = -\frac{1}{\sqrt{1+c^2}} ln\left(\frac{2/\varepsilon-1-c-\sqrt{1+c^2}}{2/\varepsilon-1-c+\sqrt{1+c^2}}\right)$
3. Cross-flow (single-pass)	
C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$\mathrm{NTU} = -\ln\left[1+\frac{\ln(1-\varepsilon c)}{c}\right]$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$\mathrm{NTU} = -\frac{\ln[c\ln(1-\varepsilon)+1]}{c}$
4. All heat exchangers with c = 0	$\mathrm{NTU} = -\ln(1-\varepsilon)$