เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

HEAT EXCHANGER

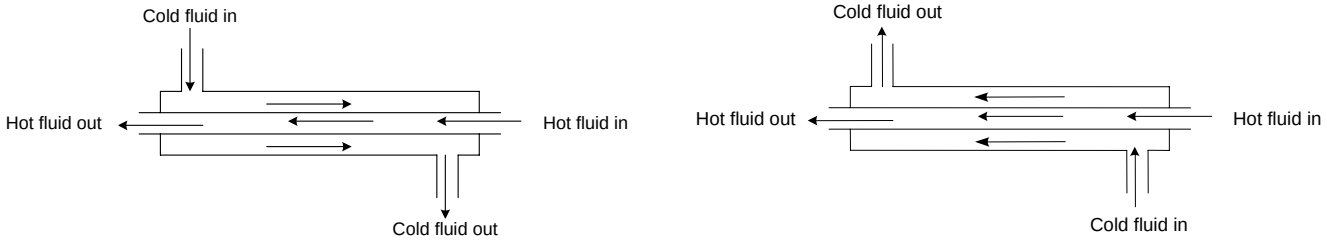
กล่าวนำ

ในงานทางวิศวกรรมหลายประเภทต้องอาศัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน เช่น การระบายความร้อนของหม้อน้ำในรถยนต์ การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคอยล์เย็นกับอากาศเพื่อจ่ายอากาศเย็นไปยังห้องปรับอากาศ ฯลฯ เป็นต้น การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองชนิดนี้ล้วนใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(Heat exchanger) ทั้งสิ้น ซึ่งการทำงานอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนใช้ทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน รวมถึงใช้ทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในงานที่เหมาะสมต่อไป

ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การจำแนกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อาจแบ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ตามลักษณะการไหลของของไหล และแบ่งตามลักษณะรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1) แบ่งตามลักษณะการไหลของของไหล สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้
   - การไหลแบบทางเดียวกัน (parallel flow)
   - การไหลสวนทางกัน (counter flow)
   - การไหลตั้งฉากกัน (cross flow)
2) แบ่งตามลักษณะของรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้
   - ***แบบท่อสองชั้น*** *(double pipe)* เป็นชนิดที่สามารถสร้างได้ง่ายที่สุด ลักษณะเป็นท่อสองท่อสวมกัน โดยของไหลในแต่ละท่ออาจเป็นของไหลต่างชนิดกัน หรือชนิดเดียวกันก็ได้แต่อุณหภูมิต้องแตกต่างกัน ซึ่งใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสอง ลักษณะการไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ยังแบ่งการไหลได้อีกสองแบบ คือ การไหลแบบทางเดียวกัน(parallel flow) และ การไหลแบบสวนทางกัน(counter flow)

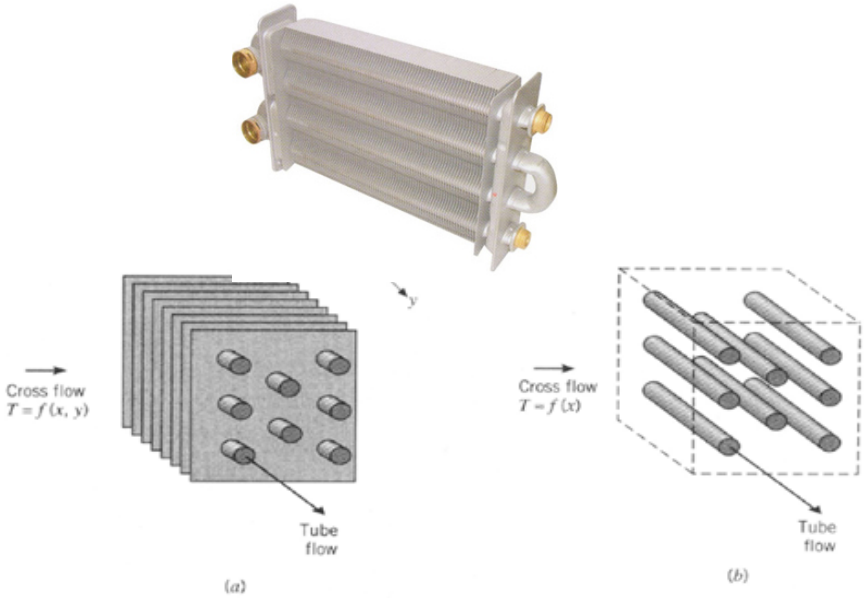


1)การไหลแบบสวนทางกัน 2)การไหลแบบทางเดียวกัน

รูปที่1) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

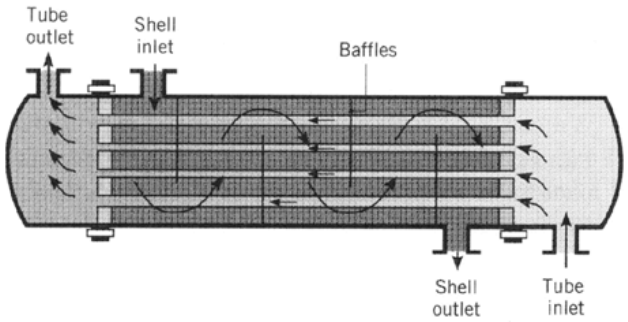
   - ***แบบกะทัดรัด*** *(compact)* โดยส่วนใหญ่ลักษณะการไหลในเครื่องชนิดนี้จะเป็นการไหลแบบตั้งฉากกัน(cross flow) และมักจะเป็นการในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับของเหลว เช่น หม้อน้ำในรถยนต์ เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับอากาศเย็น จากรูปจะพบว่ามีการติด fin เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ เพราะค่าความหนาแน่นของอากาศต่ำกว่าน้ำประมาณ 1000 เท่า ดังนั้นถ้าต้องการดึง

ความร้อนที่เท่ากันก็จำเป็นต้องเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน แต่ผลที่ตามมาก็คือเมื่อเพิ่มพื้นที่แรงเสียดทานก็เพิ่มขึ้นด้วย จึงจำเป็นต้องให้งานในการขับอากาศเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มักจะพบว่ามีการติดพัดลมช่วยในการขับการไหลของอากาศ จากรูปที่ 2 มีครีบและของไหลแต่ละชนิดไม่ผสมผสานกัน แบบไม่มีครีบทำให้ของไหลนอกท่อผสมผสานกัน



รูปที่2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

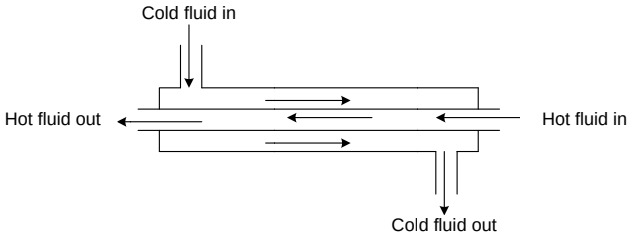
- ***แบบท่อและเปลือก (shell and tube)*** การไหลของไหลชนิดหนึ่งจะอยู่ในท่อ(tube) และของไหลอีกชนิดหนึ่งจะอยู่ในเปลือก(shell) และมักจะพบว่าการจับยึดระหว่างพนังกับท่อโดยใช้แผ่นกั้น(baffles) หน้าที่สำคัญอีกประการที่สำคัญของ baffles คือช่วยไม่ให้การไหลใน shell รัดวงจร กล่าวคือให้ของไหลใน shell ถ่ายเทความร้อนกับของไหลที่อยู่ในท่อได้อย่างเต็มที่ ซึ่งจะทำให้การไหลเป็นการไหลแบบตั้งฉากกัน และสวนทางกันหรือขนานกันในบางตำแหน่ง



รูปที่3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก

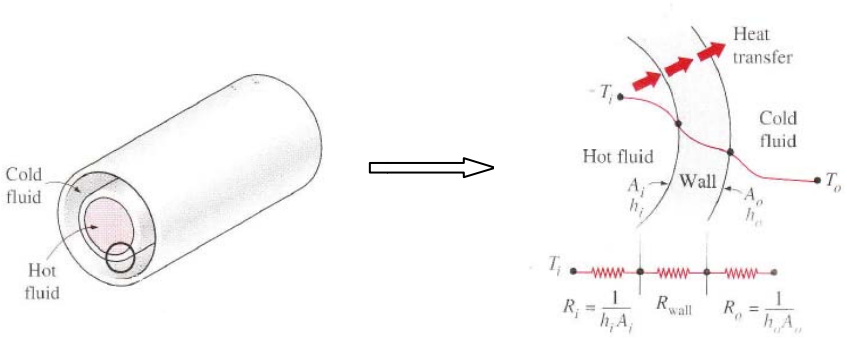
ในปฏิบัติการในครั้งนี้จะศึกษาเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทท่อสองชั้น(Double pipe) เท่านั้น

ทฤษฎี Double pipe heat exchanger



รูปที่4) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ 2 ชั้น ที่ใช้ทดลองในปฏิบัติการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็น โดยการทดลองเพื่อหาค่า U (Overall heat transfer coefficient) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในการวิเคราะห์อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็น โดยที่น้ำร้อนกับน้ำเย็นจะไม่สัมพัทธ์กัน



รูปที่5) Thermal resistance network ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

จากรูปถ้าพิจารณาเป็นแบบ Thermal resistance network จะพบว่าเป็นการต่อแบบอนุกรม ความค่าความร้อนที่ส่งผ่านจะมีค่าเท่ากัน คือ $\dot{Q} = \dot{Q}_{conv1} = \dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv2}$ ซึ่งค่า

Heat convection: $\dot{Q}_{conv1} = h_i A_i (T_i - T_{wall,in})$ และ $\dot{Q}_{conv2} = h_o A_o (T_{wall,out} - T_o)$

Heat conduction: $\dot{Q}_{cond} = -kA\dfrac{dT}{dr}$

$$\dot{Q}_{cond} = -k2r\pi L\frac{dT}{dr}$$

$$\dot{Q}_{cond}\int_{r_i}^{r_o}\frac{1}{r}dr = -2\pi Lk\int_{T_{wall,in}}^{T_{wall,out}} TdT$$

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{2\pi Lk(T_{wall,in} - T_{wall,out})}{\ln\left(\dfrac{r_o}{r_i}\right)}$$

ดังนั้น จะได้ว่า $\dot{Q} = h_i A_i (T_i - T_{wall,in}) = \dfrac{2\pi Lk(T_{wall,in} - T_{wall,out})}{\ln\left(\dfrac{r_o}{r_i}\right)} = h_o A_o (T_{wall,out} - T_o)$ หรือ

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_{wall,in})}{\frac{1}{h_i A_i}} = \frac{(T_{wall,in} - T_{wall,out})}{\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk}} = \frac{(T_{wall,out} - T_o)}{\frac{1}{h_o A_o}}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_o A_o}} = \frac{\Delta T}{R_{conv1} + R_{cond} + R_{conv2}}$$

โดยที่ $R_{conv1} = \frac{1}{h_i A_i}, R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk}, R_{conv2} = \frac{1}{h_o A_o}$

สรุปจากการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน จะได้ค่าความร้อนที่ส่งถ่ายเป็น

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_o A_o}}} \quad \text{.....(*)}$$

The overall heat transfer coefficient: U (w/m^2. $^\circ$C)

ค่าความร้อนที่วิเคราะห์โดยใช้ค่า Overall heat transfer coefficient สามารถหาได้ดังสมการความสัมพันธ์

$$\boxed{\dot{Q} = U\bar{A}\Delta T} \quad \text{.....(**)}$$

ΔT : Temperature difference หรืออาจใช้ log mean temperature difference

U : Overall heat transfer coefficient (w/m^2. $^\circ$C)

$\bar{A}$: Heat transfer area (m^2) ถ้า ผนังท่อบางใช้ค่าเฉลี่ยระหว่าง A_i กับ A_o ถ้าผนังท่อหนาอาจใช้ Log mean area

จากสมาการที่ (*) และ (**) สามารถหาค่า U ได้โดย

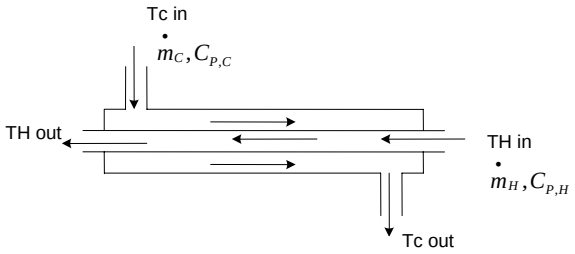
(*) = (**) จะได้

$$\boxed{U = \frac{1}{\bar{A}} \bullet \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_o A_o}}} \quad \text{.....(***)}$$

ดังนั้นจาก(***) สามารถหาค่า U ได้ ถ้าทราบค่าตัวแปรทุกตัว ซึ่งค่า A,r หาได้จากขนาดของเครื่อง ค่า k หาจากตาราง คุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุพอหาได้ไม่อยาก แต่ค่า h นั้นอาจหาได้ไม่ง่ายนักเพราะขึ้นกับรูปแบบการไหล โดยหาจากความสัมพันธ์

$Nu = \frac{hD}{k} = cR_e^{\ a}P_r^{\ b}$ โดยค่า c a b เป็นค่าคงที่ ขึ้นกับรูปแบบการไหล ดังนั้นจากวิธีข้างต้นอาจค่า U ได้ไม่ง่ายนัก

การวิเคราะห์อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์



รูปที่6) ลักษณะการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

จากรูป สามารถวิเคราะห์ โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ได้ดังนี้

อัตราความร้อนที่น้ำร้อนปล่อยออก (Heat power emitted) $\dot{Q}_H = \dot{m}_H\, C_{P,H}\left(T_{H,in} - T_{H,out}\right)$ (1)

อัตราความร้อนที่น้ำเย็นได้รับ (Heat power absorbed) $\dot{Q}_C = \dot{m}_C\, C_{P,C}\left(T_{C,out} - T_{C,in}\right)$ (2)

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นเนื่องจากลักษณะของ Thermal resistance network เป็นการต่อแบบอุกรม ดังนั้นค่า Heat power emitted กับค่า Heat power absorbed ควรที่จะเท่ากัน (ถ้าไม่มีการศูนย์เสีย) แต่ในทางปฏิบัติแล้วมีการศูนย์เกิดขึ้นดังนั้น

Heat power lost = heat power emitted - heat power absorbed (3)

และค่าความสามารถในการดึงความร้อนออกจากน้ำร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือที่เรียกว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน หาได้จาก

$$\text{Efficiency},\ \eta = \frac{\text{heat power absorbed}}{\text{heat power emitted}} \times 100\% \quad (4)$$

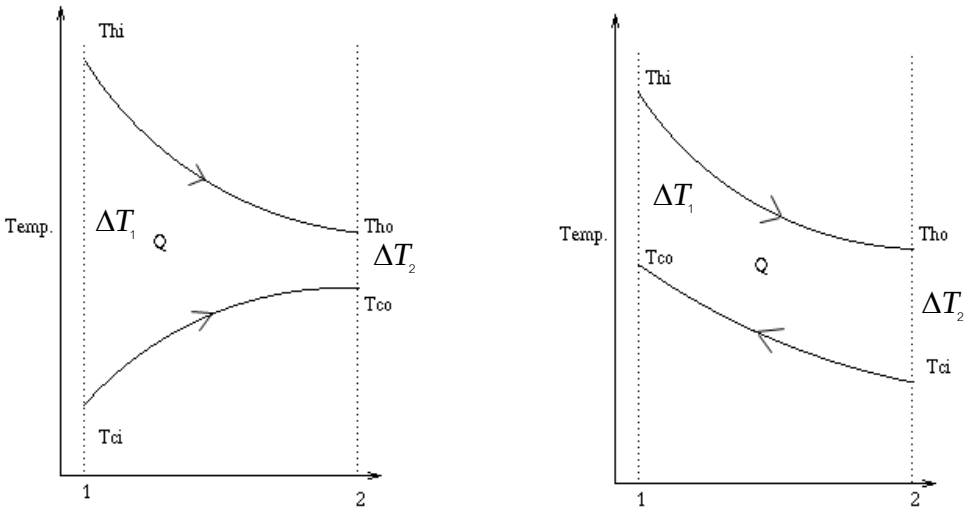
จากวิเคราะห์โดยใช้ *first law of thermodynamics* สามารถคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้สามารถดึงออกได้ (Heat power absorbed) ซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากับ $\dot{Q} = U\bar{A}\Delta T_{lm}$ ด้วย

ดังนั้น ก็สามารถหาค่า U (Overall heat transfer coefficient) ได้เป็น

$$\text{Overall heat transfer coefficient U} = \frac{\text{heat power absorbed}}{\text{heat transmission area x } \Delta T_{lm}} \quad (5)$$

$$\text{Log mean temperature difference } \Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (6)$$

โดย ΔT_1 และ ΔT_2 Temperature difference ขึ้นกับลักษณะการไหลว่าเป็นการไหลแบบขนานกัน หรือสวนทางกันซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูป



Parallel flow Counter flow

รูปที่7) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ในการหาประสิทธิภาพของแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถหาได้สองวิธีหลักๆด้วยกัน คือวิธีของ Log mean temperature difference และ Effectiveness-NTU method

1) The Log mean temperature difference method (LMTD)

จริงๆแล้วการคำนวณค่าความร้อนด้วยวิธีนี้ได้นำเสนอไว้แล้วในข้างต้นแต่ยังไม่ได้บอกว่ากรรมวิธีนี้มีชื่อเรียกว่าอะไร วิธีของ Log mean temperature difference method (LMTD) คำนวณค่าความร้อนจากสมการ $\dot{Q} = U\overline{A}\Delta T_{lm}$ ในการคำนวณค่าความร้อนนี้ จะต้องทราบของอุณหภูมิทุกค่า เพื่อคำนวณหา ΔT_{lm}

การออกแบบ เพื่อหาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย LMTD สามารถทำได้ตามลำดับดังนี้

1) เลือกชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เละลักษะการใช้งาน(ทิศทางการไหล)
2) คำนวณค่าตัวแปรต่างๆที่ยังไม่ทราบค่า เช่น $\dot{Q}$ อุณหภูมิที่ทางออก อาจคำนวณโดยใช้ *first law of thermodynamics*
3) คำนวณ Log mean temperature difference
4) เลือกหรือคำนวณค่า Overall heat transfer coefficient U
5) คำนวณหา heat transfer area A
6) ควรเลือกเครื่องที่มี heat transfer area มากกว่าหรือเท่ากับ heat transfer area ที่คำนวณมาได้

2) The Effectiveness-NUT method

เนื่องการคำนวณด้วยวิธีของ LMTD นั้นจะต้องทราบอุณหภูมิที่ทางออกทุกค่าก่อนจึงจะคำนวณต่อได้ ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของวิธี LMTD ดังนั้นจึงมีกรรมวิธีของ Effectiveness-NUT method (Kays and London 1955) ใช้ในการคำนวณปัญหาประเภทนี้

นิยามของ Heat transfer effectiveness ε

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{\text{Actual heat transfer rate}}{Maximum\ possible\ heat\ transfer\ rate} \tag{7}$$

$\dot{Q} = C_c(T_{c,out} - T_{c,in}) = C_h(T_{h,in} - T_{h,out})$ เมื่อ $C_c = \dot{m}_c\, C_{p,c}$, $C_h = \dot{m}_h\, C_{p,h}$ เรียกว่า heat transfer rate

โดยที่ $\dot{Q}_{\max} = C\Delta T_{\max}$

ค่า $\Delta T_{\max}$ ที่เป็นไปได้ ถ้าพิจารณาที่น้ำร้อน $\Delta T = \left(T_{h,in} - T_{h,out}\right)$ ถ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถลดอุณหภูมิ $T_{h,out}$ ได้มากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ $T_{c,in}$ ดังนั้น $\Delta T_{\max}$ ที่เป็นไปได้คือ $\Delta T_{\max} = \left(T_{h,in} - T_{c,in}\right)$

ส่วนค่า Heat transfer rate (C) นั้นให้เลือกระหว่าง C_c, C_h ตัวไหนมีค่าน้อยให้ใช้ตัวนั้นในการคำนวณ เพราะถ้าใช้ตัวที่มีค่ามากแล้วจะทำ $\dot{Q}_{\max}$ มากเกินไป และเมื่อใช้ค่านี้คำนวณย้อนหา $T_{h,out}$ จะทำให้มีค่าต่ำกว่า $T_{c,in}$ ซึ่งขัดกับกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนั้นจะได้ $\dot{Q}_{\max}$ เป็น

$$\dot{Q}_{\max} = C_{\min}\left(T_{h,in} - T_{c,in}\right) \tag{8}$$

ดังนั้นจะได้ $\varepsilon = \dfrac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \dfrac{C_c\left(T_{c,out} - T_{c,in}\right)}{C_{\min}\left(T_{h,in} - T_{c,in}\right)}$ (9)

จาก(9) ที่ยังไม่ทราบค่าคือ $T_{c,out}$ ซึ่งมาหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าอัตราความร้อนที่คำนวณได้จาก *first law of thermodynamics* และ LMTD

$$\dot{Q} = C_h\left(T_{h,in} - T_{h,out}\right) \tag{10}$$

$$\dot{Q} = C_c\left(T_{c,out} - T_{c,in}\right) \tag{11}$$

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} \tag{12}$$

จาก(10) - (12) ตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าคือ $T_{h,out}$ และ $T_{c,out}$ นอกนั้นเป็นตัวแปรที่ทราบค่าแล้ว

ถ้าแก้สมการ (10) - (12) จะไม่ขอแสดงรายระเอียดในที่นี้ จะสามารถคำนวณ $T_{h,out}$ และ $T_{c,out}$ เป็นฟังก์ชันของ $C_h, C_c, U, A, T_{h,in}, T_{c,in}$ ได้

จากนั้นแทนค่า $T_{c,out} = f^{n}(C_h, C_c, U, A, T_{h,in}, T_{c,in})$ ลงในสมการที่ (9) ก็สามารถคำนวณ effectiveness ε ได้

ดังนั้นจึงขอสรุปค่า Effectiveness ε สำหรับ Double pipe heat exchanger ดังนี้

1) Parallel flow $\varepsilon_{parallel-flow} = \frac{1-\exp[-NTU(1+c)]}{1+c}$

2) Counter flow $\varepsilon_{counter-flow} = \frac{1-\exp[-NTU(1+c)]}{1-c\exp[-NTU(1+c)]}$

โดย

$-NTU = \frac{UA}{C_{min}} = \frac{UA}{(\dot{m}C_p)_{min}}$; NTU : Number of heat transfer unit

$c = \frac{C_{min}}{C_{max}}$; c : capacity ratio

การออกแบบ หาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีของ Effectiveness-NUT method สามารถทำได้ตามลำดับดังนี้

1) เลือกชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทราบค่า U และลักษณะการใช้งาน(ทิศทางการไหล)
2) คำนวณค่า capacity ratio c, Effectiveness ε
3) คำนวนค่า *NTU* จากความสัมพันธ์ $\varepsilon = f^n(NTU, c)$
4) คำนวนหา heat transfer area A จาก $NTU\frac{UA}{C_{min}}$
5) ควรเลือกเครื่องมือที่มี heat transfer area มากกว่าหรือเท่ากับ heat transfer area ที่คำนวณมาได้

แนะนำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะเฉพาะทางเทคนิค

Electrical

- Voltage	230 VAC Phase+Neutral+Earth
- Amperage	10 A
- frequency	50 Hz

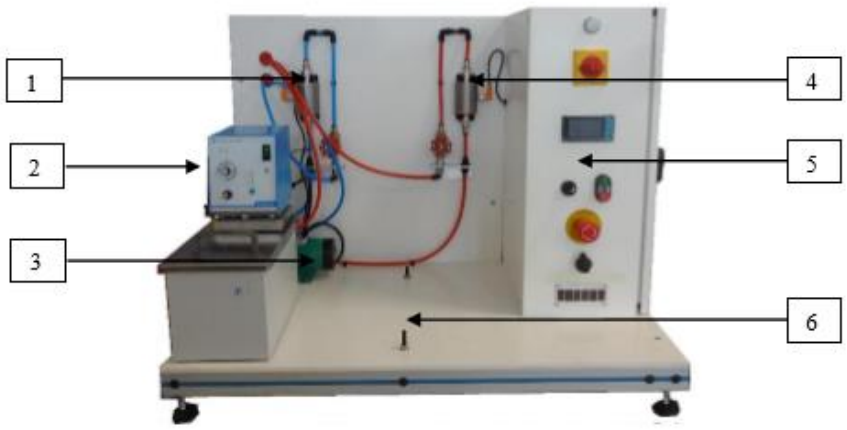
Hot water supply

- Temperature	$25℃ < T < 60℃$
- Flow rate	90 L/h maximum

Cold water rejected

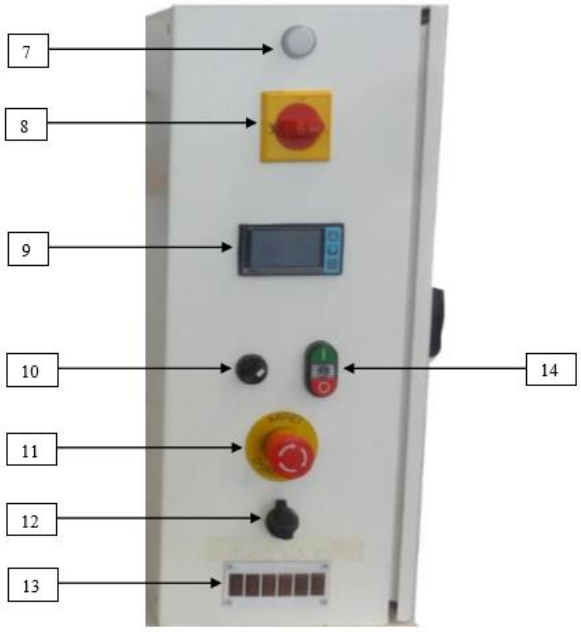
- Temperature	$5℃ < T < 25℃$
- Flow rate	200 L/h maximum

ส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากบริษัท DIDATEC รุ่น BET 011

1. Flow meter และ Control valve ของน้ำเย็น
2. Tank เก็บน้ำ (สำหรับน้ำร้อน) เป็นถังที่ทำจาก Stainless steel สามารถบรรจุน้ำร้อนได้ 5 ลิตร ภายในมีคอยล์ร้อนในการสร้างความร้อนให้กับน้ำร้อน
3. Pump น้ำร้อน
4. Flow meter และ Control valve ของน้ำร้อน
5. Electrical box
6. บริเวณพื้นที่ในการทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 9 แสดงส่วนประกอบของ Electrical box รุ่น BET 011

7. ไฟสีขาวแสดงการทำงาน
8. Main power ควบคุมการจ่ายไฟ
9. หน้าจอแสดง อุณหภูมิ และอัตราการไหล
10. ปุ่มเริ่มการทำงานของ Pump น้ำร้อน
11. ปุ่มกด Emergency Stop
12. USB คอมพิวเตอร์
13. Socket เชื่อมต่อกับสาย Thermocouple
14. ปุ่ม General shutdown

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการทดลอง

1. Concentric หรือ Double pipe

   มีลักษณะเป็นท่อสองชั้นสวมกัน

   ทิศทางการไหลเป็นแบบ Counter flow และ Parallel flow

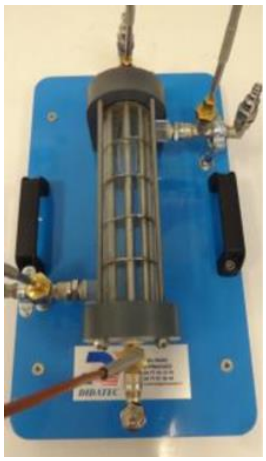
   พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน 270 cm^2

2. Shell and Tube

   มีท่อขนาดเล็กจำนวนมากอยู่ภายในเปลือก และมี baffles ยึดระหว่างเปลือกและท่อ

   ทิศทางการไหลเป็นแบบ Counter flow และ Parallel flow

   พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน 244 cm^2



3. Flat Plate

   มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะประกบกันหลายแผ่น ภายในมีช่องให้ของไหลไหลผ่าน

   ทิศทางการไหลเป็นแบบ Counter flow และ Parallel flow

   พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน 0.16 m^2

ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Concentric , Shell and Tube และ Flat plate

1. นำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการทำการทดลองวางบริเวณพื้นที่ทำการทดสอบ

2. เสียบสายน้ำร้อน กับน้ำเย็น เข้ากับอุปกรณ์ที่ทำการทดลอง กำหนดทิศทางการไหลเป็นแบบ Counter flow

3. เสียบสาย Thermocouple เข้ากับ Socket

4. เช็คดูระดับน้ำในถังน้ำร้อน หากระดับน้ำต่ำเกินไปให้เติมน้ำกลั่นเพิ่ม

5. เปิดวาล์วน้ำร้อน ปรับอัตราการไหลน้ำร้อนคงที่เป็น 90 L/h

6. เปิดวาล์วน้ำเย็น ปรับอัตราการไหลน้ำเย็นเป็น 200 L/h , 120 L/h , 60 L/h (ทำการทดลองทีละอัตราการไหล)

7. ตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนไปที่ 60 ℃

8. เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนสูงจนถึงค่าที่ตั้งไว้ให้รอประมาณ 5 นาที แล้วอ่านค่าอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ และอัตราการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็น แล้วบันทึกลงในตารางผลการทดลอง

9. คำนวณค่าต่างๆ ที่กำหนดไว้ในตาราง

ตารางผลการทดลอง

	Concentric			**Shell and Tube**			**Flat Plate**		
	Counter flow			Counter flow			Counter flow		
$\dot{\forall}_h$ (L/h)									
$\dot{\forall}_c$ (L/h)									
$T_{h,in}$ (℃)									
$T_{h,out}$ (℃)									
$T_{c,in}$ (℃)									
$T_{c,out}$ (℃)									

ตารางการคำนวณ

	Concentric			**Shell and Tube**			**Flat Plate**		
$T_{h,avg}$ (℃)									
$T_{c,avg}$ (℃)									
ρ_h (kg/m^3)									
ρ_c (kg/m^3)									
$C_{p,h}$ (J/kg. ℃)									
$C_{p,c}$ (J/kg. ℃)									
$\dot{m}_h$ (kg/s)									
$\dot{m}_c$ (kg/s)									
ΔT_h (℃)									
ΔT_c (℃)									
$\dot{Q}_h$ (W)									
$\dot{Q}_c$ (W)									
ΔT_{lm}									
u (W/m^2. ℃)									
ε									
η *(%)*									

ค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

VOLUME PROPERTIES OF ORDINARY WATER
G.S. KELL
(Specific volume v, density p, thermal expansivity α = d ln v/dt = d ln p/dt, compressibility k = -d ln v/dp = d ln p/dp

t, °C	p, G./ML	t, °C	p, G./ML	t, °C	p, G./ML
-6	0,999102	36	0,993716	78	0,973055
-5	0,999283	37	0,993360	79	0,972439
-4	0,999441	38	0,992997	80	0,971819
-3	0,999578	39	0,992626	81	0,971193
-2	0,999694	40	0,992247	82	0,970562
-1	0,999790	41	0,991861	83	0,969926
0	0,999868	42	0,991467	84	0,969286
1	0,999927	43	0,991067	85	0,968640
2	0,999968	44	0,990659	86	0,967990
3	0,999992	45	0,990244	87	0,967335
4	1,000000	46	0,989822	88	0,966674
5	0,999992	47	0,989393	89	0,966009
6	0,999968	48	0,988957	90	0,965340
7	0,999930	49	0,988515	91	0,964665
8	0,999877	50	0,988066	92	0,963986
9	0,999809	51	0,987610	93	0,963302
10	0,999728	52	0,987148	94	0,962613
11	0,999634	53	0,986680	95	0,961920
12	0,999526	54	0,986205	96	0,961222
13	0,999406	55	0,985723	97	0,960519
14	0,999273	56	0,985236	98	0,959812
15	0,999129	57	0,984743	99	0,959100
16	0,998972	58	0,984243	100	0,958384
17	0,998804	59	0,983737	101	0,957662
18	0,998625	60	0,983226	102	0,956937
19	0,998435	61	0,982708	103	0,956207
20	0,998234	62	0,982185	104	0,955472
21	0,998022	63	0,981655	105	0,954733
22	0,997801	64	0,981120	106	0,953989
23	0,997569	65	0,980580	107	0,953240
24	0,997327	66	0,980034	108	0,952488
25	0,997075	67	0,979482	109	0,951730
26	0,996814	68	0,978924	110	0,950968
27	0,996544	69	0,978361		
28	0,996264	70	0,977793		
29	0,995976	71	0,977219		
30	0,995678	72	0,976640		
31	0,995372	73	0,976056		
32	0,995057	74	0,975466		
33	0,994734	75	0,974871		
34	0,994403	76	0,974271		
35	0,994063	77	0,973665		

ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ