บทที่ 4

อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ คอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน ที่ใช้ศึกษาเป็นระบบการนำพลังงานกลับคืนระหว่างอากาศกับอากาศซึ่งสร้างขึ้นโดย บริษัท ยูนิแฟ็บ อีควิปเม้นต์ จำกัด ร่วมกับภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ดูรูปที่ 4.2) คอยล์แต่ละชุดประกอบด้วยท่อทองแดงชนิดผิวในเป็นเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว จำนวน 4 แถว ในแต่ละแถวมีท่อทองแดง 24 ท่อ ท่อเฮดเดอร์ขนาด 7/8 นิ้ว 2 ท่อ ลักษณะของการวางท่อเป็นแบบเหลื่อมกัน ติดครีบอลูมิเนียมด้วยความถี่ 13 ครีบ/นิ้ว ทั้งคอยล์ระเหยและคอยล์ควบแน่นมีขนาดเท่ากันคือพื้นที่หน้าตัด 60 x 40 ตารางเซนติเมตร ต่อถึงกันโดยใช้ท่อทองแดงขนาด 7/8 นิ้ว สำหรับท่อไอระเหย และขนาด 4/8 นิ้ว สำหรับท่อของเหลวควบแน่นไหลกลับ โดยคอยล์ทั้งสองวางในแนวดิ่งกับระนาบ มีของเหลวใช้งาน คือ ฟรีออน 22

รูปที่ 4.1 แสดงไดอะแกรมการไหลและเครื่องมือวัดในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ คอยล์ ลูปเทอร์โมไซฟอน สายลมร้อนและสายลมเย็นไหลสวนทิศกันโดยใช้เครื่องปรับอากาศเป็นอุปกรณ์ในการผลิตลมเย็น(รูปที่ 4.5) ส่วนสายลมร้อนใช้อากาศที่อุณหภูมิห้อง อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิคือเทอร์โมมิเตอร์อย่างละเอียด (ความละเอียดสุด 0.1 องศาเซลเซียส) ส่วนการวัดความเร็วของอากาศใช้ฮ๊อตไวย์แอนีโมมิเตอร์ (ดูรูปที่ 4.7) สอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความดันลดที่คร่อมคอยล์แต่ละอัน ซึ่งจะใช้มาโนมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดผลต่างความดัน และนำค่าที่ได้ไปสร้างเป็นเส้นกราฟอ้างอิงระหว่างความดันลดกับความเร็ว(ดูภาคผนวก ง) โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์เป็นดังนี้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เทอร์โมมิเตอร์

แดมเปอร์

(M) มาโนมิเตอร์

1 แผนคอยล์ของเครื่องปรับอากาศ

2 กล่องยีตเทอร์

3 เยดเดอร์

4 พัดลมดูดอากาศ

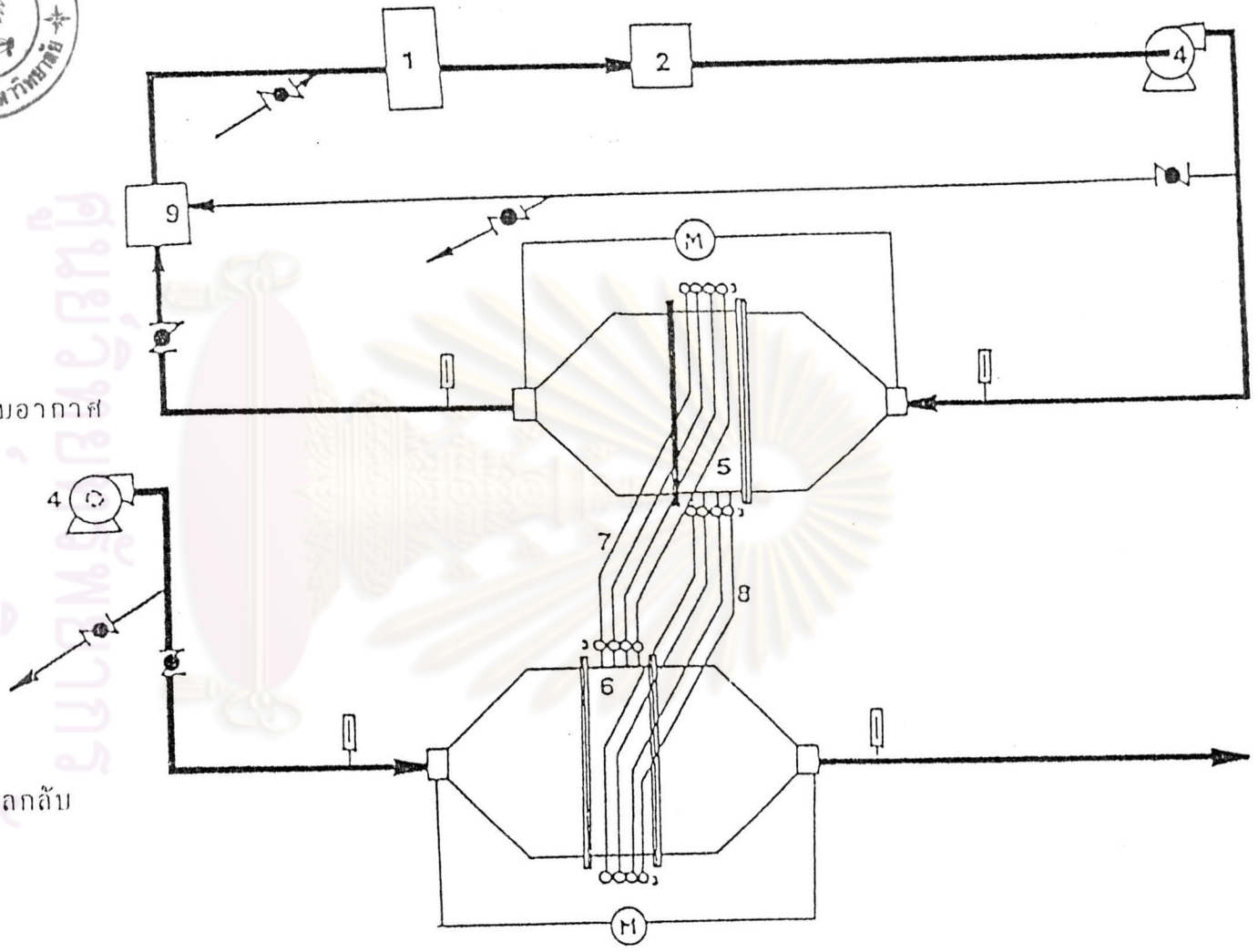
5 คอยล์ควบแน่น

6 คอยล์ระเหย

7 ท่อไอระเหย

8 ท่อของเหลวควบแน่นไหลกลับ

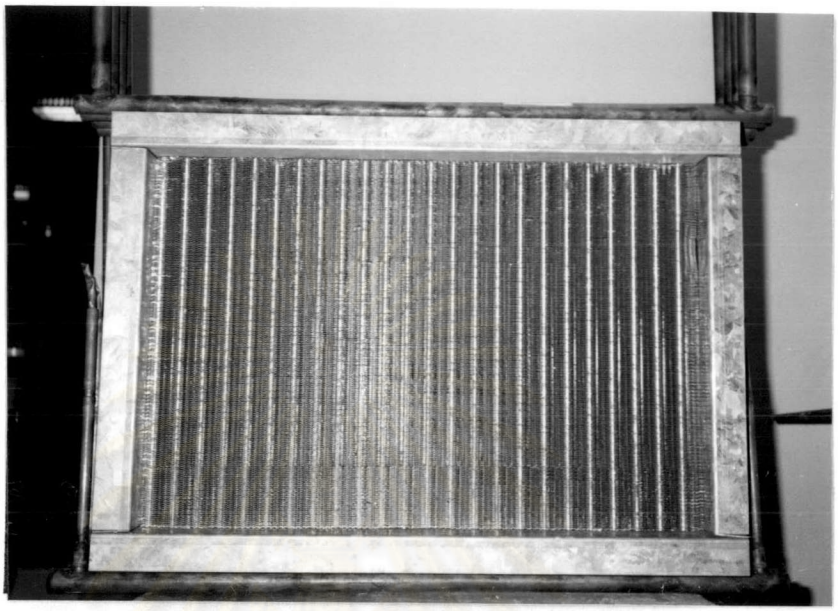
9 กล่องผสมลม



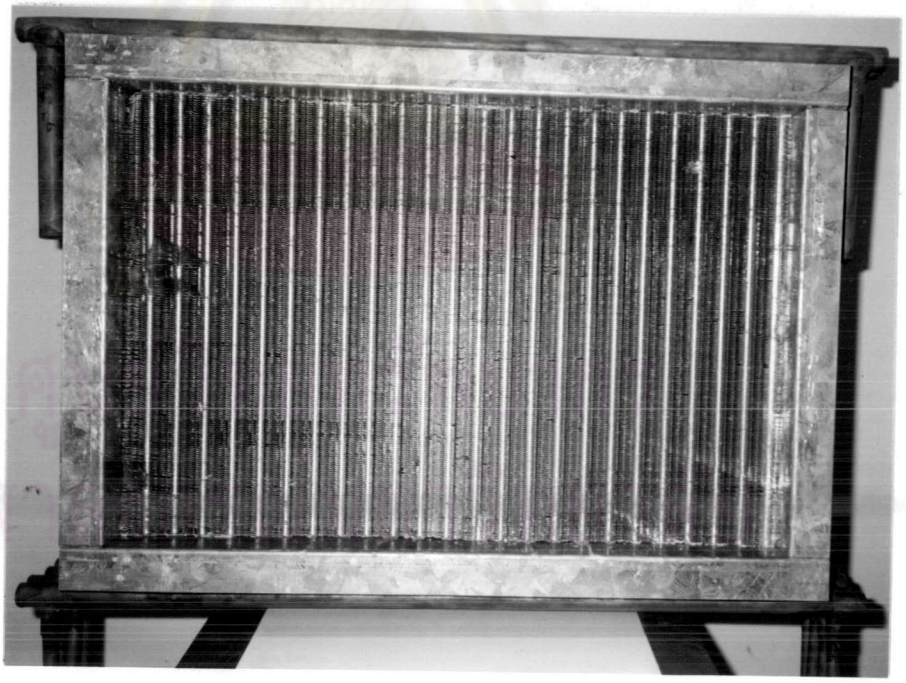
รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมการไหล และเครื่องมือวัด

1) คอยล์ระเหยและคอยล์ควบแน่น

รูปที่ 4.2 แสดงคอยล์ระเหยและคอยล์ควบแน่นก่อนการต่อท่อไอระเหย และท่อของเหลวควบแน่นไหลกลับซึ่งรายละเอียดได้อธิบายมาแล้ว



(ก) คอยล์ระเหย

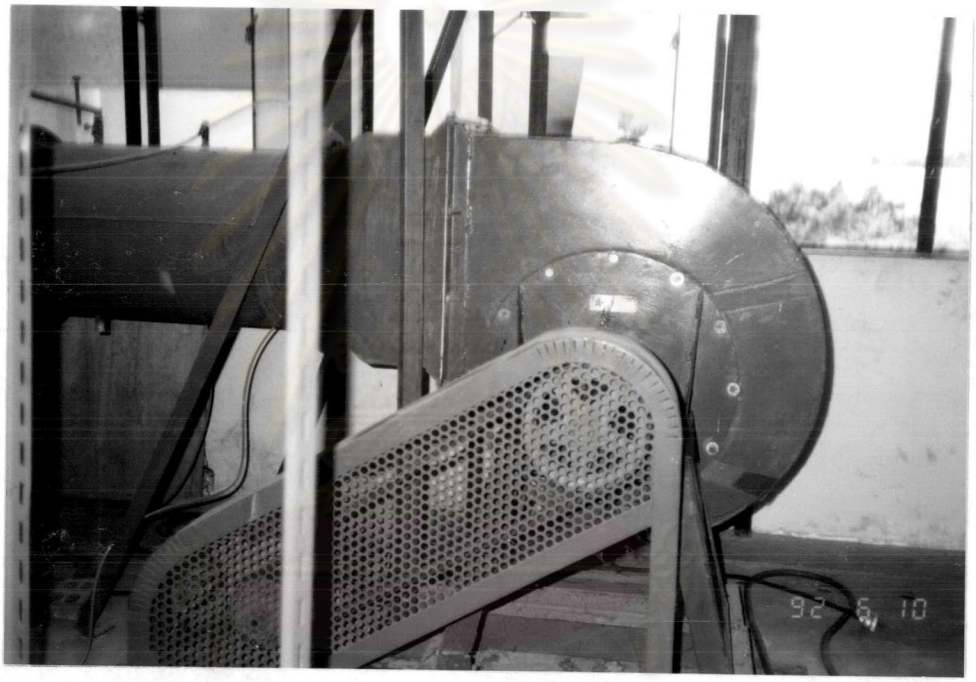


(ข) คอยล์ควบแน่น

รูปที่ 4.2 คอยล์ระเหยและคอยล์ควบแน่น

2) พัดลมด้านร้อน

พัดลมด้านร้อนมีมอเตอร์ขนาด 7.5 แรงม้า มีใบพัดเป็นแบบโค้งไปข้างหน้า ทำหน้าที่ส่งลมที่อุณหภูมิห้องไปยังคอยล์ระเหยและเพื่อให้ได้ปริมาณลมตามที่ต้องการจึงต้องมีท่อเบี่ยงพร้อมแดมเปอร์ช่วยควบคุมปริมาณลม

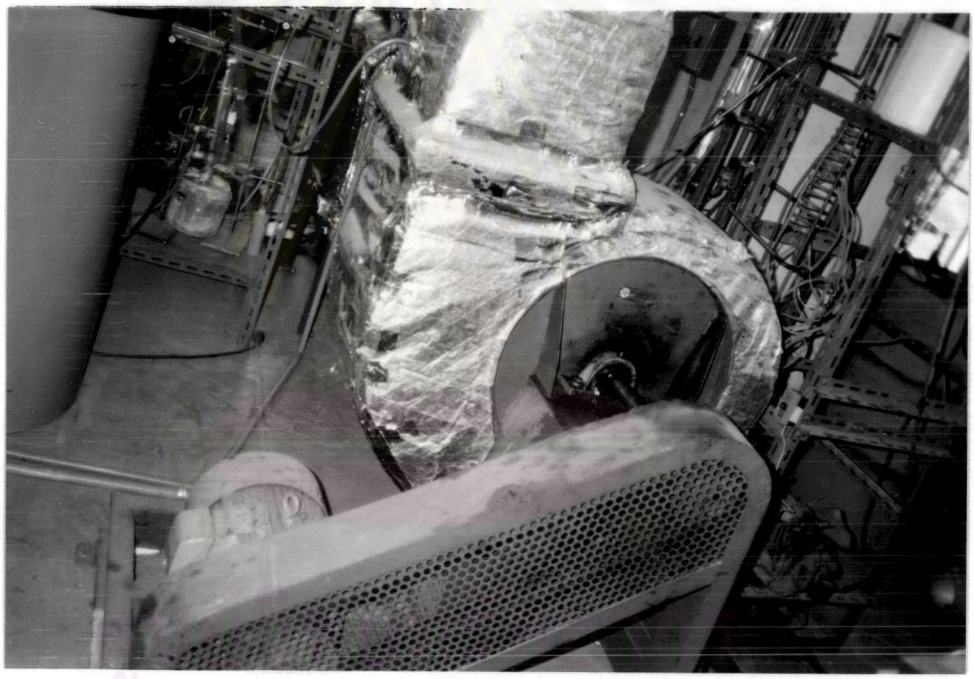


รูปที่ 4.3 พัดลมด้านร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) พัดลมด้านเย็น

พัดลมด้านเย็นมีมอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า ใบพัดเป็นแบบโค้งไปข้างหลัง ทำหน้าที่ส่งลมเย็นจากระบบเครื่องปรับอากาศไปยังคอยล์ควบแน่นและเพื่อให้ได้ปริมาณลมตามที่ต้องจึงมีท่อเบี่ยงพร้อมแดมเปอร์ช่วยควบคุมปริมาณลมเช่นเดียวกัน เนื่องจากระบบของท่อในส่วนนี้มีความดันลดมากจึงจำเป็นต้องใช้พัดลมแบบนี้และขนาดของมอเตอร์จึงโตขึ้น

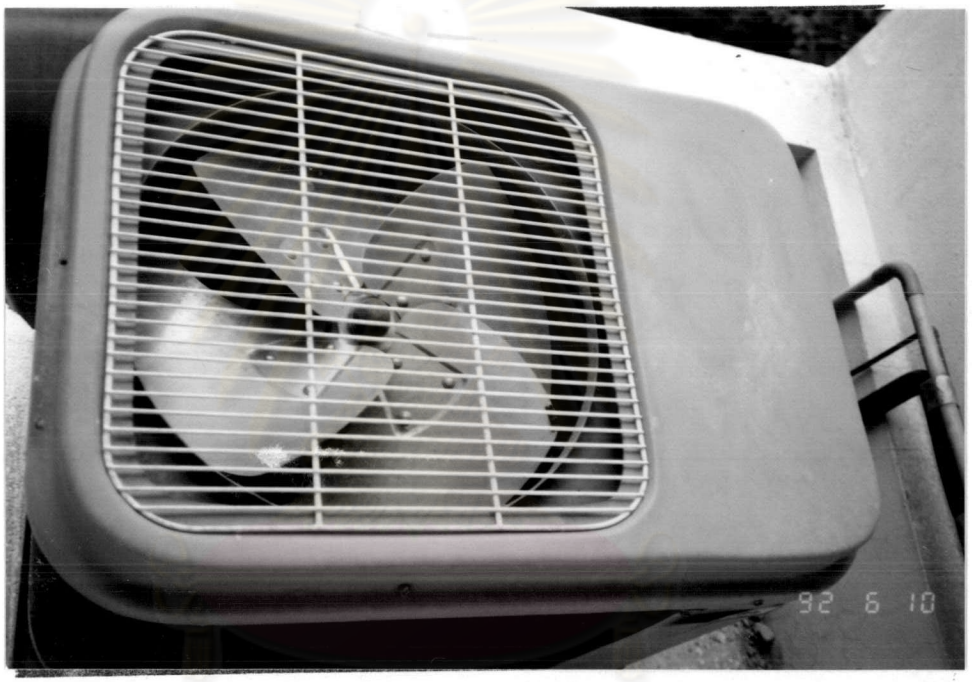


รูปที่ 4.4 พัดลมด้านเย็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) เครื่องปรับอากาศ

เครื่องปรับอากาศที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 38300 บีทียู/ชม. ซึ่งทำหน้าที่ผลิตลมเย็นเพื่อใช้ในการทดลองโดยการต่อระบบท่อของคอยล์ควบแน่นเข้ากับหน่วยแฟนคอยล์ของเครื่องปรับอากาศ



(ก) หน่วยควบแน่นของเครื่องปรับอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ข) หน่วยแฟน คอยล์ของเครื่องปรับอากาศ

รูปที่ 4.5 ระบบเครื่องปรับอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

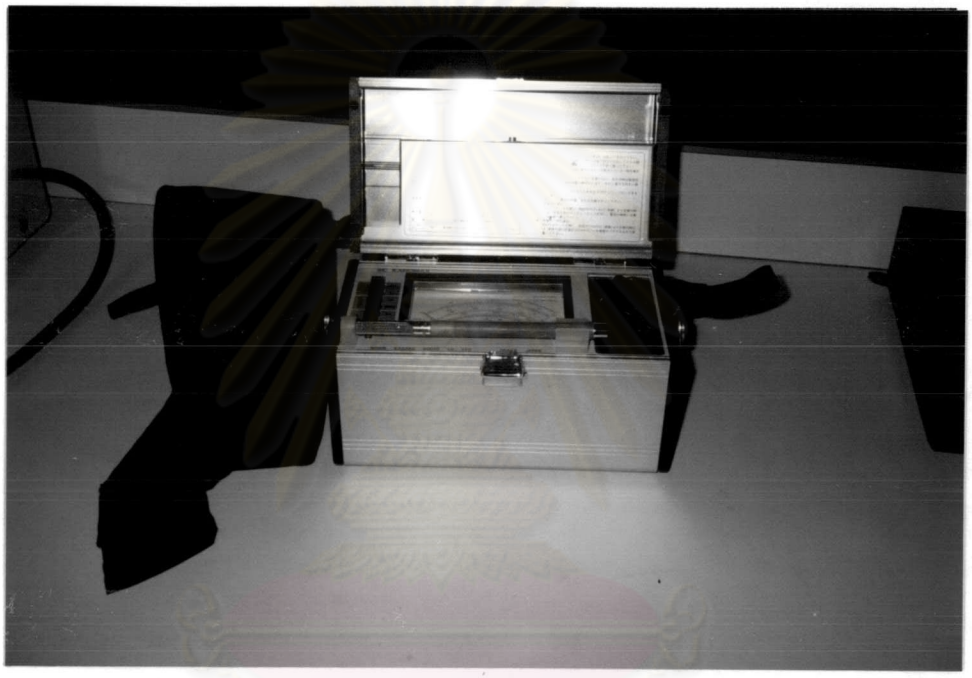
5) ฮีตเทอร์

ฮีตเทอร์ที่ใช้มีขนาดตัวละ 1500 วัตต์ จำนวน 3 ตัว ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับลมเย็นที่มาจากหน่วยแฟน คอยล์ การควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยต่อฮีทเตอร์เข้ากับวารีแอคเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าเข้าฮีตเทอร์ ในการติดตั้งฮีตเทอร์จะออกแบบให้แต่ละตัวเป็นชุดรูปตัวเอ็มวางขนานกันโดยให้ตั้งฉากกับการไหลของลมเย็นและเพื่อให้อากาศหลังได้รับความร้อนมีการกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอจึงมีกล่องฮีทเตอร์ติดตั้งเข้าไปดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 ฮีตเทอร์และกล่องฮีตเทอร์

6) ฮ๊อทไวย์แอนีโมมิเตอร์

ฮ๊อทไวย์แอนีโมมิเตอร์เป็นรุ่น 24-6111 ทำหน้าที่วัดความเร็วของลม ตามรูปที่ 4.7



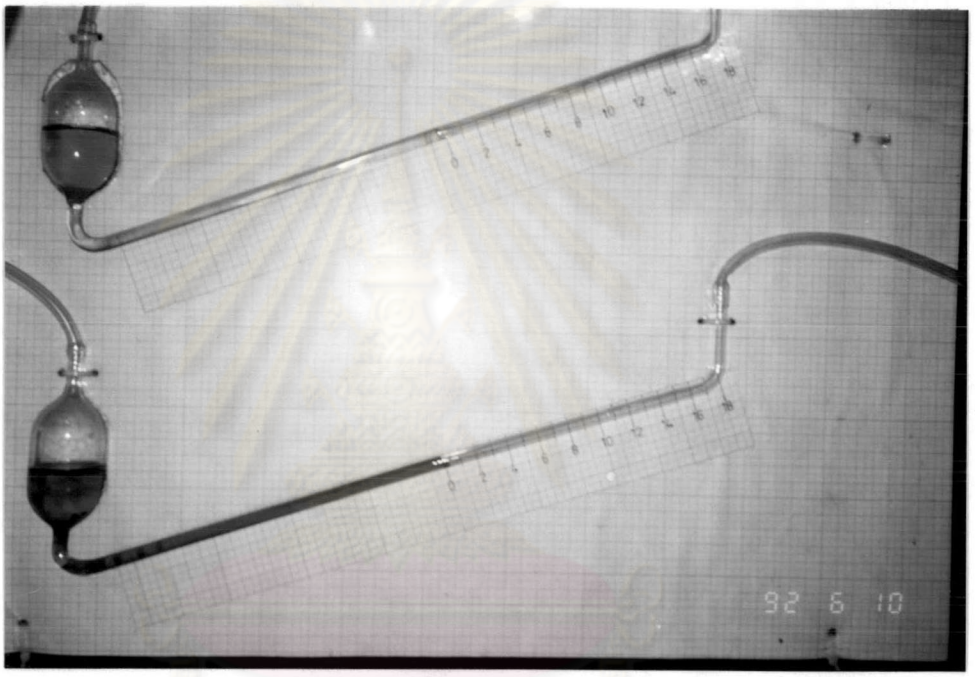
รูปที่ 4.7 ฮ๊อตไวย์แอนีโมมิเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7) มาโนมิเตอร์

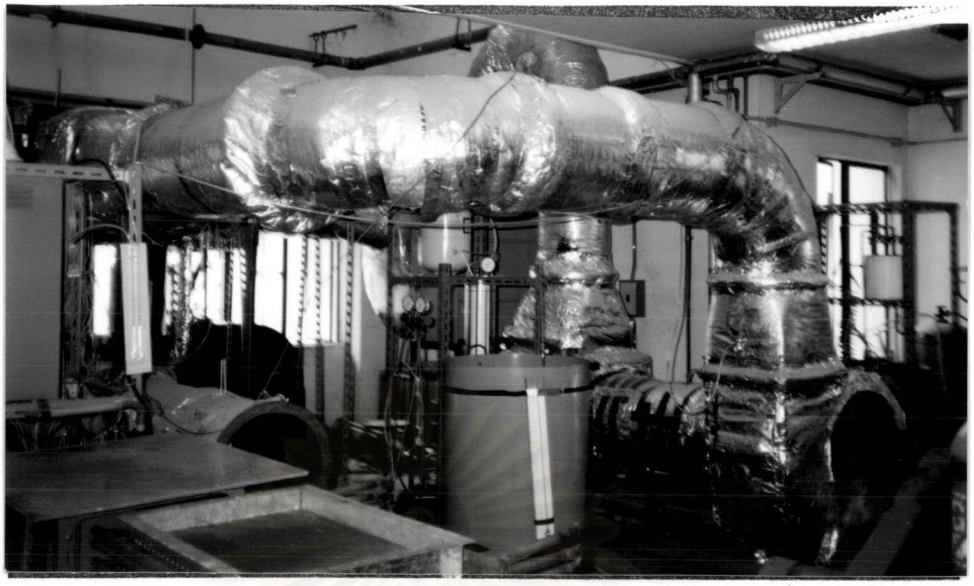
มาโนมิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบเอียงแขนข้างหนึ่ง ภายในบรรจุน้ำผสมสีเพื่อให้อ่านง่าย มีมุมระหว่างขาสองข้าง 70 องศา เพื่อสามารถอ่านค่าได้ละเอียดขึ้น ดังรูปที่ 4.8

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 มาโนมิเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ชุดทดสอบสมรรถนะ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ลูป เทอร์โมไซฟอน

รูปที่ 4.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน หลังต่อท่อไอระเหยและท่อของเหลวควบแน่นไหลกลับ

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

4.2.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1. บรรจุปริมาณของฟรีออน 22 ในท่อของคอยล์ระเหยให้ได้เปอร์เซนต์ของความยาวท่อที่ต้องการ โดยเทอร์โมไซฟอนแต่ละลูปมีปริมาณของเหลวบรรจุเท่ากัน

2. เปิดพัดลมและปรับความเร็วด้วยวาล์ว ให้ลมร้อนและลมเย็นมีความเร็วเท่ากัน ตามค่าที่ต้องการ

3. เปิดเครื่องปรับอากาศ และควบคุมอุณหภูมิของลมเย็นด้วยฮีตเทอร์ ส่วนอุณหภูมิลมร้อนเป็นตามอุณหภูมิห้อง

4. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ให้บันทึกความเร็วลมและอุณหภูมิทางเข้าทางออกของลมทั้งสองสาย

5. ทำขั้นตอนที่ 3 และ 4 ซ้ำ สำหรับอุณหภูมิต่อไป (ในการทดลองนี้ควบคุมอุณหภูมิสายเย็น 15,20,25 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ)

6. ทำขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 สำหรับความเร็วลมต่อไป (ในการทดลองนี้ความเร็ว 1,1.5,2 และ 2.5 เมตร/วินาที)

7. ทำขั้นตอน 2 ถึง 6 สำหรับค่าต่อไปของเปอร์เซนต์บรรจุของไหลใช้งานในคอยล์ระเหย

4.2.2 การทดลองเพื่อสร้างสหสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อน

1. ให้ลมเย็นคงที่ที่ 28 องศาเซสเซียส ส่วนลมร้อนเป็นอุณหภูมิห้อง

2. เปลี่ยนความเร็วของลมทั้งสองสายให้มีค่า Re^* เป็น 0.25,0.5, 1,2 และ 4 ตามลำดับ (Re^* คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ด้านลมร้อนต่อตัวเลขเรย์โนลด์ด้านลมเย็น)

3. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ให้บันทึกความเร็วลมและอุณหภูมิทางเข้าทางออกของลมทั้งสองสาย

4.2.3 ศึกษาฮีสเทอรีซีส

1. ให้ความเร็วของลมร้อนและลมเย็นคงที่

2. ให้อุณหภูมิของลมเย็นเริ่มต้น ที่ 30 องศาเซลเซียส ส่วนลมร้อนเป็นอุณหภูมิห้อง

3. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ให้บันทึกความเร็วลมและอุณหภูมิทางเข้าทางออกของลมทั้งสองสาย

4. ลดอุณหภูมิของลมเย็นลงเป็น 25,20 และ 15 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และทำตามข้อ 3

5. จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิลมเย็นขึ้นจาก 15 เป็น 20,25 และ 30 องศาเซสเซียส ตามลำดับและทำตามข้อ 3

6. ทำตามขั้นตอน 4 และ 5 ซ้ำอีกครั้ง .

4.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

4.3.1 ในการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบ คอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอนระหว่างของไหลที่ไหลสวนทางกัน จะวัดอุณหภูมิที่เข้าและออกของแต่ละสายพร้อมกับความเร็ว การประมาณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จากอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหาได้ดังนี้

$$Q = m_h C_{ph}(T_{hi}-T_{ho}) \qquad (1)$$

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

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหาได้จาก

$$Q = UA(\Delta T)_{lm}$$

$$U = \frac{Q}{A(\Delta T)_{lm}}$$

ในกรณีไหลสวนทางกัน

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_{hi}-T_{co})-(T_{ho}-T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{hi}-T_{co}}{T_{ho}-T_{ci}}\right)} \qquad (2)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

i1716268A

4.3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ ลูป เทอร์โมไซฟอน (และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป) ที่มีอยู่แล้ว สะดวกที่จะใช้วิธีของประสิทธิผล (effectiveness) ในการปฏิบัติงานวิธีประสิทธิผลเหมาะกับการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านการกำหนดอัตรา (rating) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่กำหนดพื้นที่ถ่ายเทความร้อนไว้แล้วมากกว่าด้านการกำหนดขนาด (sizing) ของเครื่องที่จะสร้างใหม่ นั่นคือในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นและหาอุณหภูมิทางออกของของไหล ถ้าใช้วิธีประสิทธิผลจะสะดวกกว่าวิธี LMTD มาก เพราะไม่ต้องทำการคำนวณซ้ำซากในการหาคำตอบ ตลอดจนผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิธัม วิธีประสิทธิผลยังเหมาะในงานตรวจสอบคุณภาพ และปรับปรุงคุณภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอีกด้วย

โดยนิยามประสิทธิผลเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นดังนี้

$$\text{ประสิทธิผล} = \frac{\text{การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริง}}{\text{การถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จะเป็นไปได้}}$$

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงสามารถคำนวณได้จากความร้อนที่ของไหลร้อนคายออกหรือความร้อนที่ของไหลเย็นรับเข้ามา ส่วนการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จะเป็นไปได้ในกรณีการไหลสวนทางกัน(ดูรูปที่ 4.11) สามารถหาได้จากค่าต่ำกว่าของ W ระหว่างสายของไหลร้อนและสายของไหลเย็นคูณด้วยผลต่างอุณหภูมิระหว่างทางเข้าของสายของไหลร้อนกับสายของไหลเย็น นั่นคือคำนวณหาค่าประสิทธิผลได้จาก

$$\varepsilon = \frac{W_s(T_1-T_2)}{W_{min}(T_1-T_3)} = \frac{W_e(T_4-T_3)}{W_{min}(T_1-T_3)} \qquad (3)$$

ในที่นี้

การถ่ายเทความร้อนจริง = $W_s(T_1-T_2)$ = $W_e(T_4-T_3)$

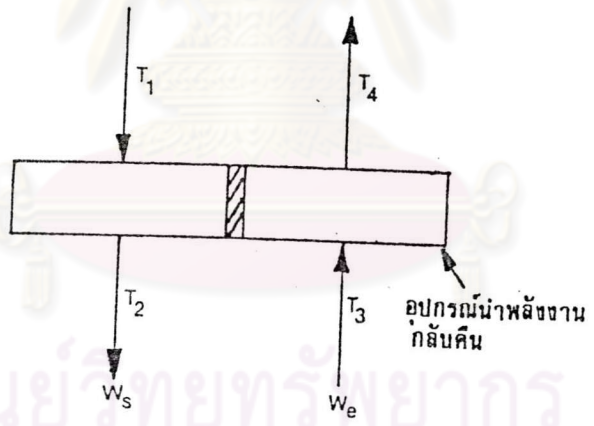
การถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ = $W_{min}(T_1-T_3)$

W_s = (ความร้อนจำเพาะ)x(อัตราการไหลเชิงมวล) ของสายร้อน

W_e = (ความร้อนจำเพาะ)x(อัตราการไหลเชิงมวล) ของสายเย็น

W_{min} = ค่าต่ำสุดระหว่าง W_s และ W_e

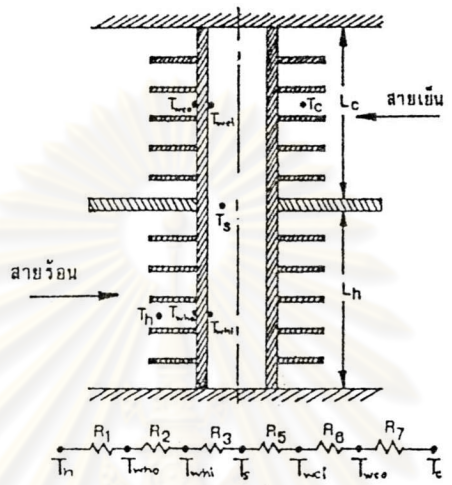
สรุปแล้ว ค่าประสิทธิผลหมายถึงอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงต่อการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า W ของสายของไหล ผลต่างอุณหภูมิระหว่างทางเข้าของสายของไหลร้อนกับสายของไหลเย็น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่อง และขนาด(พื้นที่ถ่ายเทความร้อน)ของเครื่อง



รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 การประเมินสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หรือ ทำนายสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรวม หาในเชิงทฤษฎีได้โดยอาศัยแบบจำลองการนำความร้อน (heat conductance model) ในรูปที่ 4.12 แสดงแบบจำลองทางทฤษฎี ถ้าสมมุติให้การนำความร้อนผ่านผนังท่อในแนวแกนมีน้อยมากจะได้ว่า



รูปที่ 4.12 แบบจำลองทางทฤษฎี

อัตราการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์หนึ่งแท่ง

$$q_p = \left|\frac{1}{R}(T_h - T_c)\right|_p \qquad (4)$$

เมื่อ

$$R = \sum_{j=1}^{7} R_j$$

โดยที่ R_4 มีค่าน้อยมาก ($R_4 = 0$)

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องถ่ายเทความร้อนแบบฮีทไปป์คือ

$$Q = \sum_{p=1}^{n} q_p = UA(\Delta T)_{lm}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ n คือ จำนวนของแท่งฮีทไปป์ในเครื่อง ดังนั้น

$$U = \frac{\sum_{p=1}^{n} q_p}{A(\Delta T)_{lm}}$$

อนึ่งความต้านทานความร้อนแต่ละตัวมีค่าดังนี้

$$R_1 = \frac{1}{h_{oh}A_{oh}} \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{cop}L_h} \quad (6)$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{ih}A_{ih}} \quad (7)$$

$$R_5 = \frac{1}{h_{ic}A_{ic}} \quad (8)$$

$$R_6 = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{cop}L_c} \quad (9)$$

$$R_7 = \frac{1}{h_{oc}A_{oc}} \quad (10)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

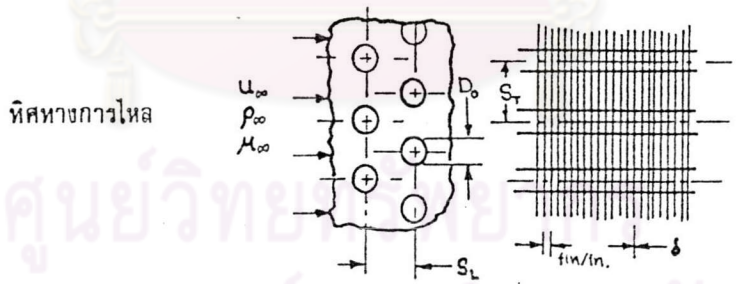
ความต้านทางความร้อน R_4 จะมีบทบาทสำคัญก็ต่อเมื่อการไหลของไอภายในท่อฮีทไปป์มาถึงสภาวะติดขัด (Choking) เท่านั้น โดยทั่วไปมีค่าน้อยมาก และในที่นี้ไม่น่ามาคิด ความต้านทานความร้อนแต่ละตัวประเมินค่าได้ตามลักษณะต่อไปนี้

1. ความต้านทานความร้อนของฟิล์มของไหลภายนอกท่อ R_1 และ R_7 (Lee และ Clements ,1983)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_{oh} และ h_{oc} ใน R_1 และ R_7 ตามลำดับ สามารถหาได้โดยการถัวเฉลี่ยระหว่างการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นครีบบนผนังท่อและการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อส่วนที่ไม่ได้ติดครีบ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบรูปคลื่น (wavy fins) h_f สามารถประมาณได้จากครีบที่มีรูปร่างแบบแผ่นราบ (flat plate) ความยาวประสิทธิผลของครีบ l_f คือระยะครึ่งหนึ่งระหว่างผิวของท่อที่อยู่ติดกัน(Kays และ London ,1964) อนึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบแผ่นราบจะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของชั้นขอบเขตที่ไหลแบบปั่นป่วน (turbulent boundary layer)ผ่านแผ่นราบเพราะว่าของไหลที่ไหลใกล้ครีบจะเกิดการปั่นป่วนโดยจะเริ่มเกิดขึ้นที่ขอบของครีบ จึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดเป็นชั้นขอบเขตแบบชั้นๆได้ (laminar baundary layer)

ค่าเฉลี่ยของ h_f ในช่วงความยาวของครีบ l_f สามารถหาได้โดยใช้สมการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ คือ



$$St = 0.036 \left(\frac{l_f u_\infty \rho_\infty}{\mu_\infty}\right)^{-0.2} (Pr)^{-2/3} \qquad (11)$$

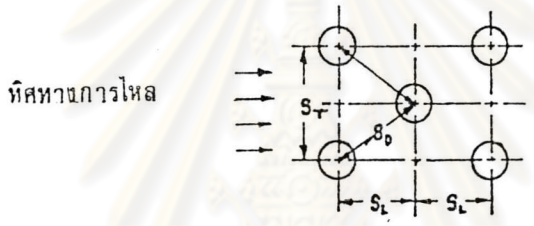
เมื่อ $St = \dfrac{h_f}{C_{p\infty} u_\infty \rho_\infty}$ และ $Pr = \dfrac{C_{p\infty} \mu_\infty}{k}$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อส่วนที่ไม่ได้ติดครีบ หาได้จากสหสัมพันธ์มาตรฐานสำหรับของไหลที่ไหลผ่านกลุ่มท่อ ดังนี้

$$Nu = BC_z Re^m Pr^n \qquad (12)$$

เมื่อ $Nu = \frac{h_b D_o}{k}$ และ $Re = \frac{D_o G_{max}}{\mu}$

เมื่อ B และ m ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะจากจุดกึ่งกลางระหว่างท่อในแถวเดียวกันไปยังจุดศูนย์กลางของท่อแถวถัดไป(longitudinal pitch)กับระยะห่างระหว่างท่อในแถวเดียวกัน(transverse pitch)S_L/S_T



C_z เป็นแฟคเตอร์สหสัมพันธ์ซึ่งขึ้นกับรูปร่างและจำนวนแถวในกลุ่มท่อ โดยทั่วไป n มีค่าประมาณ 1/3 สำหรับกรณีที่อากาศไหลผ่านกลุ่มท่อ

สรุปแล้วสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มผิวนอกประเมินได้ดังนี้

สำหรับด้านการระเหย (R_1)

$$h_{oh} = \frac{(\eta_{fh} A_f h_{fh} + A_b h_{bh})}{(A_f + A_b)}$$

สำหรับด้านการควบแน่น (R_7)

$$h_{oc} = \frac{(\eta_{fc} A_f h_{fc} + A_b h_{bc})}{(A_f + A_b)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ประสิทธิภาพของครีบหาได้จาก

$$\eta_f = \frac{\tanh ml_f}{ml_f}$$

$$ml_f = l_f \sqrt{\frac{2h_f}{k_f \delta}}$$

2. ความต้านทานความร้อน R_2 และ R_6

R_2 และ R_6 เป็นความต้านทานความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อด้านการระเหยและการควบแน่น สามารถหาค่าได้โดยใช้สมการการนำความร้อนที่ได้กล่าวมาข้างต้น

3. ความต้านทานความร้อน R_3 และ R_5

เป็นความต้านทานความร้อนภายในท่อฮีทไปป์ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_{ih} และ h_{ic} ในส่วนการระเหยและส่วนการควบแน่น (R_3 และ R_5) ตามลำดับ คำนวณหาได้จากสหสัมพันธ์ ดังนี้

ในกรณีของส่วนการระเหย h_{ih} หาได้จากสหสัมพันธ์สำหรับการเดือดของRohsenow ดังนี้

$$\frac{C_{pl}(T_w-T_s)}{h_{fg}} = C_{sf}(Pr_l)^{1.7}\left(\frac{h_{ih}(T_w-T_s)}{\mu_l h_{fg}}\sqrt{\frac{g_c\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}}\right)^{-0.33} \qquad (13)$$

เมื่อนิยามให้ $q_h = \frac{Q_h}{A_{ih}} = h_{ih}(T_w-T_s)$

จะได้ $$h_{ih} = \frac{C_{pl}(Q_h/A_{ih})^{0.67}}{h_{fg}(pr_l)^{1.7}C_{sf}}\left(\frac{1}{\mu_l h_{fg}}\sqrt{\frac{g_c\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}}\right)^{-0.33}$$

เมื่อ $Pr_l = \frac{C_{pl}\mu_l}{k_l}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีของส่วนการควบแน่น h_{ic} หาได้จากสหสัมพันธ์ของการควบแน่นแบบฟิล์มดังนี้

$$h_{ic} = 1.47 k_l \left(\frac{h_{fg} A_{ic} g \rho_l^2}{4 Q_c L_c \mu_l} \right)^{1/3} \qquad (14)$$

จะเห็นว่าสามารถหาความต้านความร้อนต่างๆได้ โดยใช้วิธีการคำนวณแบบเดาซ้ำเมื่อต้องการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หรือสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรวม ส่วนตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้ในภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย