บทที่ 2

ทฤษฎีและการคำนวณฮีทไปป์

ทฤษฎี

1.ส่วนประกอบของอากาศ (Composition of Air)

อากาศเป็นส่วนผสมทางกลของก๊าซและไอน้ำ อากาศแห้ง(อากาศที่ไม่มีไอน้ำ) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยไนโตรเจน (78% โดยปริมาตร) และออกซิเจน (21%) ฯลฯ จำนวนไอน้ำในอากาศจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับสถานที่ และสภาวะอากาศ

2.ไซโครเมตริกส์ (Psychometric)

คือ การศึกษาคุณสมบัติของอากาศชื้น หรืออากาศซึ่งมีไอน้ำผสมอยู่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นในระบบปรับอากาศ และระบบทำความเย็นต่าง ๆ

3.กฎดัลตันของความดันย่อย (Dalton's Law of Partial Pressure)

กฎดัลตันของความดันแสดงให้เห็นถึงผลที่ว่า ส่วนผสมทางกลใด ๆ ของก๊าซและไอ (สิ่งเหล่านี้รวมตัวกันทางเคมี) ความดันที่เกิดขึ้นจะเท่ากับผลรวมของความดันของก๊าซแต่ละชนิดที่กระทำกับภาชนะบรรจุ

อากาศเป็นส่วนผสมทางกลของก๊าซ และไอน้ำ ก็จะเป็นไปตามกฎของดัลตัน ความกดดันของบรรยากาศจะเท่ากับ ผลรวมของความดันของก๊าซแห้ง และไอน้ำ (แต่ความดันของไอน้ำจะน้อยกว่าความดันของอากาศแห้งมาก เพราะมวลน้อยกว่ามาก)

4.อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point Temperature: DP)

คืออุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มกลั่นตัวเป็นน้ำโดยที่ความดันไอคงเดิม นั่นคืออุณหภูมิไออิ่มตัวที่ตรงความดันไอขณะนั้น

5.ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute Humidity)

ไอน้ำในอากาศเรียกว่า ความชื้น ความชื้นสมบูรณ์ของอากาศที่กำหนดให้ในสภาวะใด ๆ คือ มวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศที่สภาวะนั้น ความชื้นสัมบูรณ์หรืออาจจะเรียกว่า ความหนาแน่นไอ

6.ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity: RH)

ความชื้นสัมพัทธ์ หมายถึง อัตราส่วนความดันของไอน้ำในอากาศที่มีอยู่ในอากาศชื้นกับความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน หรือหมายถึง สัดส่วนโดยโมล์ของไอน้ำกับสัดส่วนโดยโมล์ของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันเดิม

$$RH = P_v / P_{vs} = y_v / y_{vs}$$
$$P_v = P - P_a = \phi \cdot P_{vs}$$

7.อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio or Specific Humidity:w,W)

อัตราส่วนความชื้น บางครั้งเรียกว่า ความชื้นจำเพาะ หมายถึง มวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้ง

$$w = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{M_v P_v V / RT}{M_a P_a V / RT}$$
$$w = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} = \frac{18.015 P_v}{28.97 P_a} = \frac{0.622 P_v}{P_a}$$
$$\therefore W = \frac{0.622 P_v}{P - P_v}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ กับ w

$$w = \frac{0.622 \cdot \phi \cdot P_{vs}}{P - \phi \cdot P_{vs}}$$
$$\phi = \frac{w \cdot P}{P_{vs}(0.622 + w)}$$

8.องศาของการอิ่มตัว (Degree of Saturation,μ)

$$\mu = \frac{w}{w_s} = \frac{(m_v / m_a)}{(m_{vs} / m_a)} = \frac{m_v}{m_{vs}}$$

w_s = อัตราส่วนความชื้นของไออิ่มตัวทีอุณหภูมิ และความดันเดิม

9.เอนธาลปีของอากาศ(ชื้น)

เอนธาลปีของอากาศและน้ำสามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศ และตารางไอน้ำ และสามารถหาได้จากสูตรโดยใช้หลักการต่อไปนี้

- เอนธาลปีของน้ำ (h_f)

เอนธาลปีของน้ำ(ของเหลว) ที่ 0°C มีค่าเป็นศูนย์ (h_f = 0 kJ/kg) ค่าความร้อนจำเพาะ © ของน้ำประมาณ 4.186 kJ/kg°C ดังนั้นสูตรสำหรับหาค่าเอนธาลปีของน้ำ (h_f) คือ

$h_f = 4.186t$ kJ/kg เมื่อ t = temperature (°C)

- เอนธาลปีของไอน้ำ (h_v)

เอนธาลปีของไอน้ำที่ 0°C มีค่าประมาณ 2501 kJ/kg และไอน้ำมีความร้อนจำเพาะประมาณ 1.86 kJ/kg°C (จาก ASHRAE) ดังนั้นสูตรสำหรับหาค่าเอนธาลปีของไอน้ำ คือ

$h_v = 2501+1.86t$ kJ/kg เมื่อ t = temperature (°C)

- เอนธาลปีของอากาศ (h_a)

จาก ASHRAE เอนธาลปีของอากาศที่ 0°C จะมีค่าเป็นศูนย์ และอากาศมีความร้อนจำเพาะประมาณ 1 kJ/kg°C ดังนั้น สูตรสำหรับหาค่าเอนธาลปีของอากาศคือ

$h_a = t$ kJ/kg; t = temperature (°C)

- เอนธาลปีของอากาศชื้น (อากาศ+ไอน้ำ) (h)

$h = h_a+wh_v$; w = อัตราส่วนความชื้น kJ/kg_{da}

จากค่าเอนธาลปีของอากาศ และเอนธาลปีของไอน้ำจะได้

$h = t+w(2501+1.86t)$ kJ/kg_{da}

ถ้าพิจารณาผลต่างของเอนธาลปีของอากาศชั้นทั้งสองสภาวะจะได้

$(h_2-h_1) = (t_2-t_1)+2501(w_2-w_1)+1.86(t_2w_2-t_1w_1)$ kJ/kg_{da}

$$(h_2-h_1) = (1+1.86w_m)(t_2-t_1)+(2501+1.86t_m)(w_2-w_1)\ kJ/kg_{da}$$

โดย $w_m = (w_1+w_2)/2$ และ $t_m = (t_1+t_2)/2$

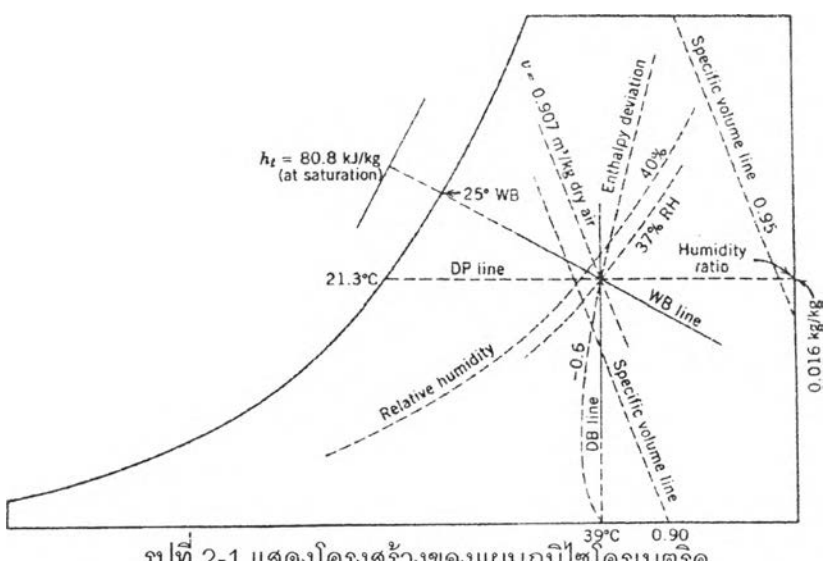
- เอนธาลปีของอากาศ คือ ผลรวมของความร้อนสัมผัสของอากาศ (เอนธาลปีของอากาศแห้ง) ละความร้อนแฝงของอากาศแห้ง (เอนธาลปีของไอน้ำ)

$$h = h_s + h_L$$

10.อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Dry Bulb Temperature:DB and Wet Bulb Temperature:WB)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง หมายถึง อุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้ง ในการวัดต้องให้กระเปาะอยู่ในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก เพื่อให้ค่าที่อ่านได้ถูกต้อง และป้องกันค่าที่ผิดพลาดจากการแผ่รังสี

อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ อุณหภูมิที่น้ำระเหยไปในอากาศจนทำให้อากาศ และน้ำมีอุณหภูมิเดียวกัน และอากาศก็อิ่มตัว โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อน กระบวนการนี้เรียกว่า Adiabatic Saturation Process



รูปที่ 2-1 แสดงโครงสร้างของแผนภูมิไซโครเมตริค

11.แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychometric Charts)

แผนภูมิไซโครเมตริกเป็นกราฟซึ่งแสดงคุณสมบัติของอากาศดังแสดงในรูป ค่าที่กำหนดในแผนภูมิเป็นค่าที่ได้จากอากาศมาตรฐาน และที่ความกดดันของบรรยากาศ

ตารางดังรูป เป็นการแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทั่ว ๆ ไปของแผนภูมิไซโครเมตริก และคุณสมบัติพื้นฐานบางอันของอากาศ

(1) เส้นในแนวดิ่งของแผนภูมิเป็นเส้นอุณหภูมิ DB คงที่

(2) เส้นในแนวราบเป็นเส้นอุณหภูมิ DP คงที่ และอัตราส่วนความชื้น

(3) เส้นที่ลากทแยงมุมเป็นเส้นอุณหภูมิ WB คงที่

(4) ส้นที่ลากในแนวดิ่ง แต่เฉียงมาทางด้านซ้าย เป็นเส้นปริมาตรจำเพาะคงที่

(5) เส้นโค้งที่ลากจากด้านล่างซ้ายมือไปยังด้านขวามือบนแผนภูมิ เป็นเส้นความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และส่วนโค้งทางซ้ายสุดของแผนภูมิเป็นเส้น 100% RH และเป็นที่รู้จักกันเป็นเส้นอิ่มตัวของอากาศ

(6) เส้นโค้งหักเห (Deviation curve) เป็นเส้นของเอนธาลปีที่ผิดไปจากเอนธาลปีจำเพาะ

12. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น เอนธาลปี และอัตราส่วนความร้อนสัมผัส (SHR)

จากสูตร และไซโครเมตริคชาร์ท จะเห็นได้ว่า สเกลการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้น (Δw) และเอนธาลปี (Δh) ค่อนข้างจะสม่ำเสมอ ประมาณได้ว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกัน หมายความว่า ในกระบวนการใด ๆ ถ้าอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงเอนธาลปี และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นเท่ากัน เส้นกระบวนการจะต้องขนานกันบนไซโครเมตริคชาร์ท

$$(\Delta h / \Delta w)_{1\ 2} = (\Delta h / \Delta w)_{3\ 4}$$
$$(h_2 - h_1)/(w_2 - w_1) = (h_4 - h_3)/(w_4 - w_3)$$

ซึ่งก็คือเส้นกระบวนการ 1-2 จะต้องขนานกับเส้นกระบวนการ 3-4

13. อัตราส่วนความร้อนสัมผัส (Sensible Heat Ratio: SHR)

ในระบบการให้ความเย็นหรือลดความชื้น ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat: SH) และความร้อนแฝง (Latent Heat: LH) จะคายออกขณะผ่านท่อเย็น ผลรวมของความร้อนทั้งสองนี้เป็นความร้อนทั้งหมด (Total Heat: TH)

อัตราส่วนความร้อนสัมผัส (SH) คือ อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัส (SH) และการเปลี่ยนแปลงความร้อนทั้งหมด (TH)

$$SHR = SH / TH = SH / (SH + LH)$$

จากสมการ $h_2 - h_1 = (1 + 1.86w_m)(t_2 - t_1) + (2501 + 1.86t_m)(w_2 - w_1)$

นั่นคือ $SH = (1 + 1.86w_m)(t_2 - t_1)$

$$LH = (2501 + 1.86t_m)(w_2 - w_1)$$

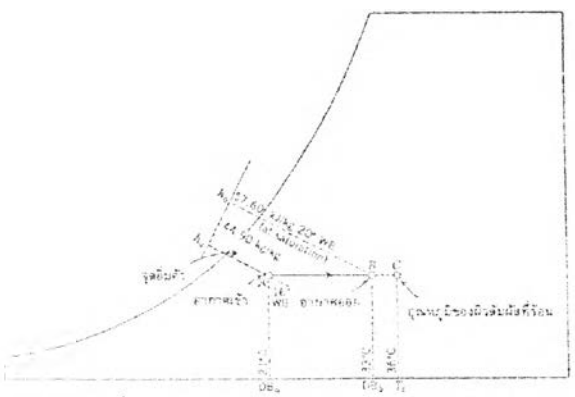
เพราะฉะนั้น $$SHR = \frac{(1 + 1.86w_m)(t_2 - t_1)}{(1 + 1.86w_m)(t_2 - t_1) + (2501 + 1.86t_m)(w_2 - w_1)}$$

$$SHR = 1 - (2501 + 1.86t_m)\Delta w / \Delta h$$

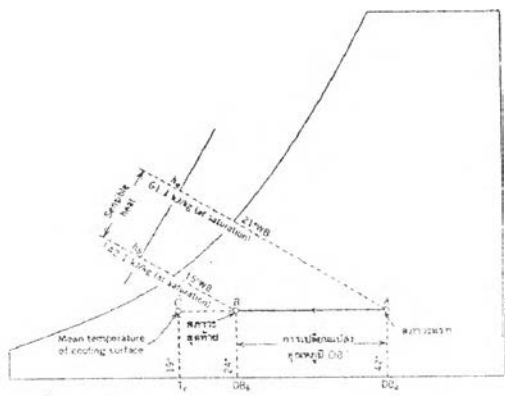
กระบวนการใดก็ตามที่มี SHR เท่ากัน เส้นแสดงกระบวนการที่ลากบนไซโครเมตริคชาร์ทต้องขนานกัน

14. การให้ความร้อนสัมผัส (Sensible Heating) และการให้ความเย็นสัมผัส (Sensible Cooling)

กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่ออากาศผ่านไปเหนือผิวสัมผัสที่ร้อน เช่น ไอน้ำ หรือท่อน้ำร้อน ลวดนำไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิ DB ของอากาศ ในการผ่านไปบนผิวสัมผัสที่ร้อน อากาศจะดูดความร้อน (สัมผัส) จากผิวสัมผัสที่ร้อนกว่า ดังนั้น อุณหภูมิ DB จึงสูงขึ้น เพราะว่าไม่มีความชื้นเข้าไป หรือออกมาจากอากาศระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ดังนั้นความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) อุณหภูมิ DP และความร้อนแฝงของอากาศไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2-2 กระบวนการความร้อนสัมผัส

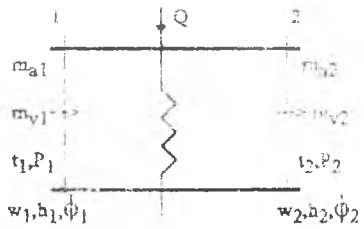


รูปที่ 2-3 กระบวนการให้ความเย็นสัมผัส

$$m_{a1} = m_{a2} = m_a \qquad w_1 = m_{v1} / m_{a1}$$
$$m_{v1} = m_{v2} = m_v \qquad w_2 = m_{v2} / m_{a2}$$
$$P_2 = P_1 \qquad w_1 = w_2 = w$$

$$Q = m_{a2}h_2 - m_{a1}h_1 + W$$
$$Q = m_a h_2 - m_a h_1 + 0$$
$$\frac{Q}{m_a} = h_2 - h_1 (kJ / kg_{da})$$

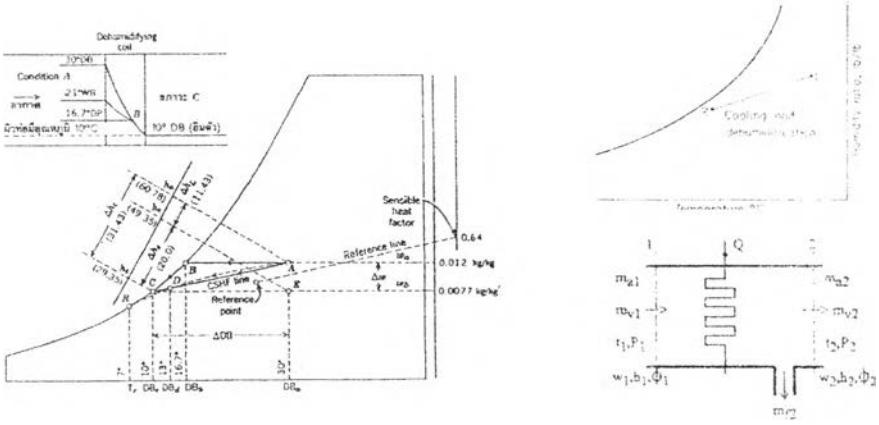
กระบวนการนี้อากาศจะผ่านท่อเย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ DB แต่สูงกว่าอุณหภูมิกระบวนการนี้เหมือนกับกระบวนการให้ความร้อนสัมผัสตรงที่ค่าความชื้นคงที่ เพราะฉะนั้นความชื้นจำเพาะ อุณหภูมิ DP และความร้อนแฝงของอากาศจะคงที่ตลอดกระบวนการ



รูปที่ 2-4 การให้ความร้อนสัมผัสผ่านท่อเย็น

15. การให้ความเย็น และการลดความชื้น (Cooling and Dehumidification)

เครื่องปรับอากาศจะทำให้อุณหภูมิ และอัตราส่วนความชื้นอากาศลดลง โดยผ่านท่อเย็น หรือน้ำเย็นที่ฉีดเป็นละอองฝอย อุณหภูมิของอากาศจะถูกทำให้ต่ำกว่าอุณหภูมิ DP ของอากาศในสภาวะแรก ทำให้ไอน้ำควบแน่นออกมา โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ความชื้นสัมพัทธ์ในสภาวะสุดท้ายจะสูงกว่าในสภาวะแรก



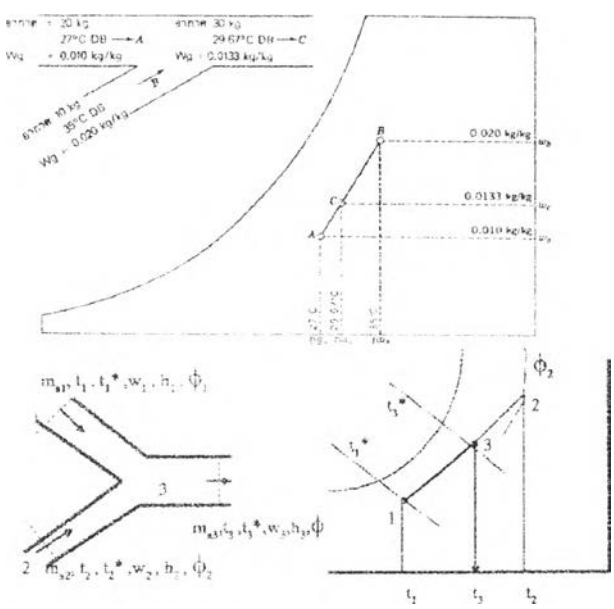
รูปที่ 2-5 กระบวนการให้ความเย็นและลดความชื้นให้กับอากาศ

$$m_{a1} = m_{a2} = m_a \qquad w_1 = m_{v1}/m_a$$
$$m_{v1} = m_{v2} + m_{f2} \qquad w_2 = m_{v2}/m_a$$
$$m_{f2} = m_{v1} - m_{v2} \qquad m_{f2}/m_a = w_1 - w_2$$

$$Q = (m_{a2}h_2 + m_{f2}h_{f2}) - m_{a1}h_1 + w$$
$$Q = (m_{a2}h_2 + m_{f2}h_{f2}) - m_{a1}h_1 + 0$$
$$\frac{Q}{m_a} = h_2 - h_1 + \frac{m_{f2}h_{f2}}{m_a}$$
$$\frac{Q}{m_a} = h_2 - h_1 + (w_1 - w_2)h_{f2}$$
$$\frac{Q}{m_a} = h_2 - h_1 - (w_2 - w_1)h_{f2}$$

16. การผสมกันของอากาศ 2 จำนวนโดยไม่มีการถ่ายเทความร้อน

เมื่ออากาศที่สภาวะ 1 รวมกับอากาศที่สภาวะ 2 ส่วนผสมของอากาศสามารถที่จะแสดงให้เห็นได้บนแผนภูมิไซโครเมตริค ดังนั้น จำนวนมวลของอากาศที่จุด 3 จะเท่ากับผลรวมของอากาศที่ 1 และ 2



รูปที่ 2-6 แสดงการรวมตัวกันของอากาศภายในท่อ

$$m_{a3} = m_{a1} + m_{a2}$$

และเพราะว่าการรวมกันของอากาศเป็นแบบ adiabatic (ไม่มีการสูญเสียความร้อน) และไม่มีการสูญเสียความชื้นด้วย

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์

$$Q = m_{a3}h_3 - (m_{a1}h_1 + m_{a2}h_2) - w$$

เนื่องจากไม่มีการถ่ายเทความร้อน และไม่มีงานหรือกำลัง

$$\therefore m_{a1}h_1 + m_{a2}h_2 = m_{a3}h_3$$

และกฎการคงอยู่ของมวล

$$m_{a1} + m_{a2} = m_{a3}$$
$$m_{a1}w_1 + m_{a2}w_2 = m_{a3}w_3$$

จะได้ว่า

$$\frac{(h_2 - h_3)}{(h_3 - h_1)} = \frac{(w_2 - w_3)}{(w_3 - w_1)} = \frac{m_{a1}}{m_{a2}}$$

และ

$$\frac{(w_2 - w_3)}{(w_2 - w_1)} = \frac{m_{a1}}{(m_{a1} + m_{a2})}$$

และ

$$\frac{(h_2 - h_3)}{(w_2 - w_3)} = \frac{(h_3 - h_1)}{(w_3 - w_1)}$$

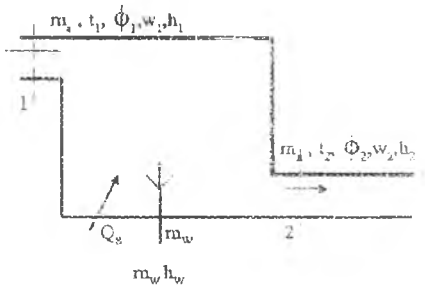
จะเห็นได้ว่า การผสมของอากาศสองจำนวน ภาวะของอากาศที่ผสมกันแล้วบนไซโครเมตริคชาร์ท จะต้องอยู่บนเส้นที่เชื่อมระหว่างจุดภาวะของอากาศทั้งสอง

อัตราส่วนของมวลของอากาศแห้งจำนวนที่หนึ่งต่อมวลของอากาศแห้งจำนวนที่สอง สามารถแทนได้ด้วยอัตราส่วนความยาวของเส้นตรงทั้งสอง หรือสัดส่วนมวลของอากาศแห้งจำนวนที่หนึ่งต่อมวลของอากาศแห้งจำนวนที่หนึ่งและสองรวมกัน

17. กระบวนการในห้องปรับอากาศ

ห้องปรับอากาศ คือ ห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้ต่ำกว่าภายนอก โดยทั่วไปสภาวะภายในห้องที่คนเรารู้สึกสบายที่สุดก็คือ อุณหภูมิประมาณ 24 $^{\circ}$C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %

อัตราส่วนความชื้นประมาณ 0.0093 kg_w/kg_{da}ในห้องปรับอากาศจะมีความร้อนเข้าสู่ห้อง 2 แบบ คือ ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) และความร้อนแฝง (Latent Heat) คือไอน้ำนั่นเอง เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ เราจะแยกเป็น 2 กลุ่มความร้อนดังรูป



รูปที่ 2-7 แสดงกระบวนการในห้องปรับอากาศ

Q_S เป็นความร้อนสัมผัสทั้งหมดที่เข้าสู่ห้องปรับอากาศ

Q_L เป็นความร้อนแฝงทั้งหมดที่เข้าสู่ห้องปรับอากาศ หรือคือไอน้ำจำนวนรวม m_w นั่นก็คือ $Q_L = m_w h_w$ kW

Q_T เป็นความร้อนรวมทั้งหมดที่เข้าสู่ห้องปรับอากาศ

$$Q_T = Q_S + Q_L$$

สภาวะที่ 1 คือ สภาวะของอากาศที่ออกมาจากเครื่องปรับอากาศจ่ายเข้าสู่ห้องที่จะปรับอากาศ

สภาวะที่ 2 คือ สภาวะของห้องปรับอากาศนั่นเอง ซึ่งจะต้องนำอากาศนี้ไปเข้าเครื่องปรับอากาศต่อไป

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้

$$Q_S = m_a h_2 - m_a h_1 - m_w h_w + W$$
$$Q_S + m_w h_w = m_a (h_2 - h_1)$$

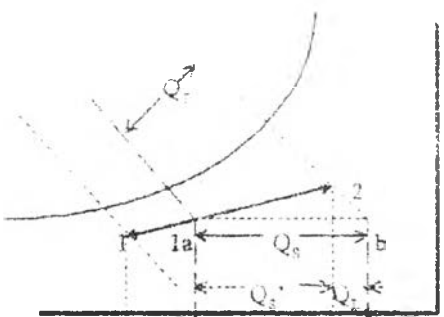
และกฎการคงอยู่ของมวล

$$m_a + m_a w_1 + m_w = m_a + m_a w_2$$
$$m_w = m_a (w_2 - w_1)$$
$$\frac{(h_2 - h_1)}{(w_2 - w_1) m_w} = \frac{(Q_S + m_w h_w)}{m_w}$$
$$\frac{\Delta h}{\Delta w} = \frac{(Q_s + Q_L)}{m_w}$$

$$SHR = \frac{Q_S}{Q_S + Q_L}$$

18. เครื่องปรับอากาศที่ไม่มีการนำลมหรืออากาศภายนอกเข้าที่เครื่อง

ขนาดทำความเย็นของเครื่องจะเท่ากับความร้อนสัมผัสทั้งหมดที่เข้าสู่ห้องปรับอากาศ รวมกับการเปลี่ยนแปลงหรือผลต่างของเอนธาลปีรวมทั้งหมดของไอน้ำที่เข้าสู่ห้อง และน้ำกลั่นที่ตัวเครื่อง



รูปที่ 2-8 กระบวนการในห้องปรับอากาศที่ไม่มีอากาศภายนอกเข้า

$$-Q_T = Q_S + m_a (w_2 - w_1) h_w$$
$$-Q_T = Q_S + 2546 m_a (w_2 - w_1)$$

กระบวนการจะเริ่มจาก 1 ไป 2 ในห้องปรับอากาศ และจาก 2 กลับมา 1 ใหม่ในเครื่องปรับอากาศหรือเครื่องเย็น

19. วัฏจักรของการทำความเย็นชนิดอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration Cycle)

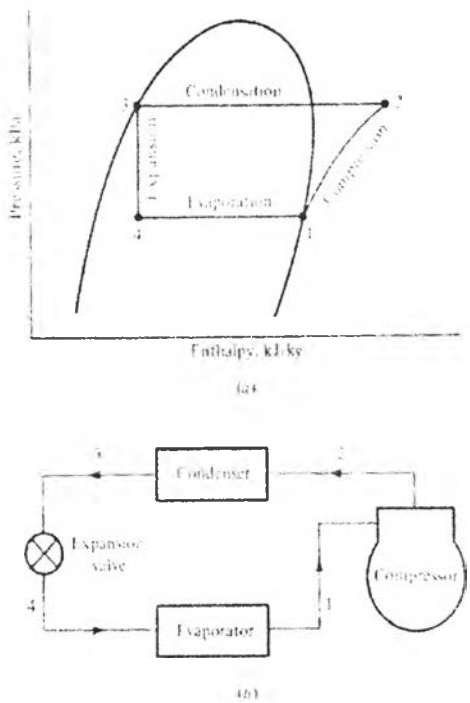
ขบวนการ 1-2 ไออิ่มตัวของสารทำความเย็นผ่านเข้าไปในเครื่องอัด และถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้นแบบไอเซนโทรปิก และอยู่ในสภาวะไอร้อนยวดยิ่ง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขบวนการ 2-3 ไอร้อนยวดยิ่งของสารทำความเย็นจะคายความร้อน อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิอิ่มตัว โดยความดันคงที่ จนกลายเป็นของเหลวอิ่มตัว

ขบวนการ 3-4 สารทำความเย็นที่เป็นของเหลวอิ่มตัวจะไหลผ่านเทรอทเทิ้ลวาล์ว เกิดการขยายตัว ความดันลดลง และไม่มีการถ่ายเทความร้อน สารความเย็นจะเป็นไอเปียก

ขบวนการ 4-1 สารทำความเย็นจะผ่านเข้าไปในอีแวปโพเรเตอร์ เพื่อดูดความร้อนออกไปและกลายเป็นไออิ่มตัวอีกครั้งหนึ่ง



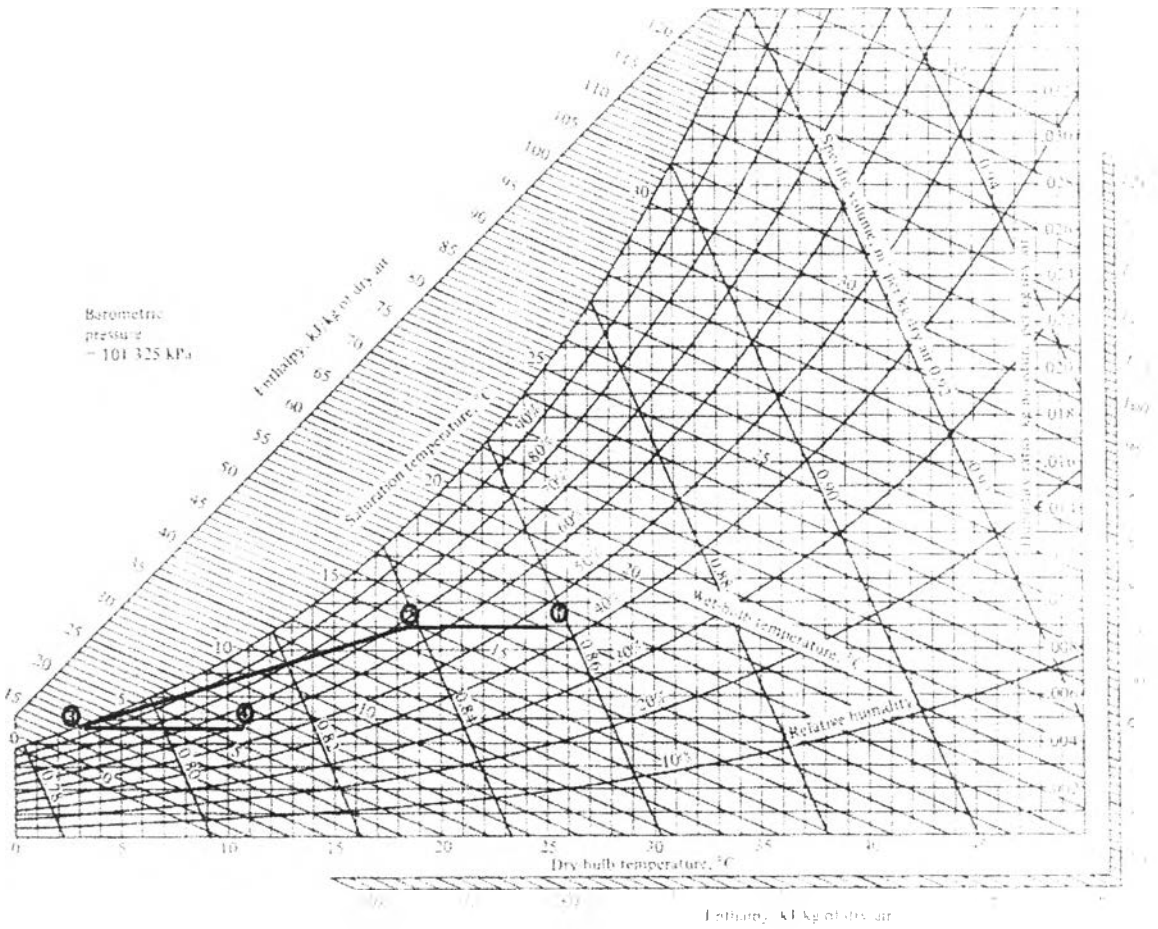
รูปที่ 2-9 วัฏจักรของการทำความเย็นชนิดอัดไอ

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) คือ ขนาดทำความเย็นต่อกำลังที่ใส่ในเครื่องอัดไอ

$$COP = \frac{Q_T}{W_C} = \frac{\dot{m}_r(h_1 - h_4)}{\dot{m}_r(h_2 - h_1)} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)}$$

$$COP = \frac{Q_T}{W_C} = \frac{\dot{m}_r(h_1 - h_4)}{\dot{m}_r(h_2 - h_1)} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)}$$

20. กระบวนการเมื่อใช้ฮีทไปป์



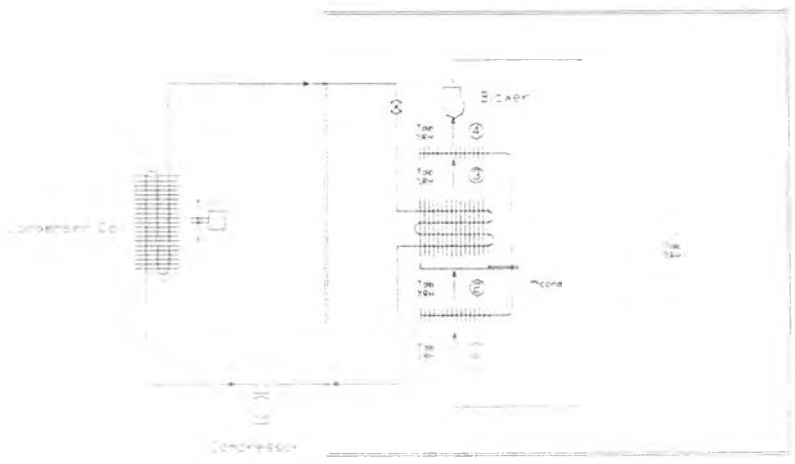
รูปที่ 2-10 แสดงกระบวนเมื่อใช้ฮีทไปป์

กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการ precool ให้แก่อากาศก่อนเข้าสู่คอยล์เย็นของเครื่องปรับอากาศ หรือการดูดความร้อนสัมผัสจากอากาศก่อนเข้าสู่คอยล์เย็น ทำให้อุณหภูมิอากาศลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำในอากาศไม่เปลี่ยนแปลง เกิดเฉพาะการถ่ายเทความร้อนสัมผัส ไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนแฝง

กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการทำความเย็น และลดความชื้นให้กับอากาศ โดยคอยล์เย็นของเครื่องปรับอากาศ

กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการ reheat ให้แก่อากาศ โดยอากาศที่ได้รับความร้อนจากคอยล์ส่วน precool จะถ่ายเทความร้อนสู่อากาศในคอยล์ส่วนนี้ คือการคืนความร้อนสัมผัสเข้าสู่ห้องปรับอากาศ ทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณไอน้ำในอากาศไม่เปลี่ยนแปลง เกิดเฉพาะการถ่ายเทความร้อนสัมผัส ไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนแฝงเช่นกัน

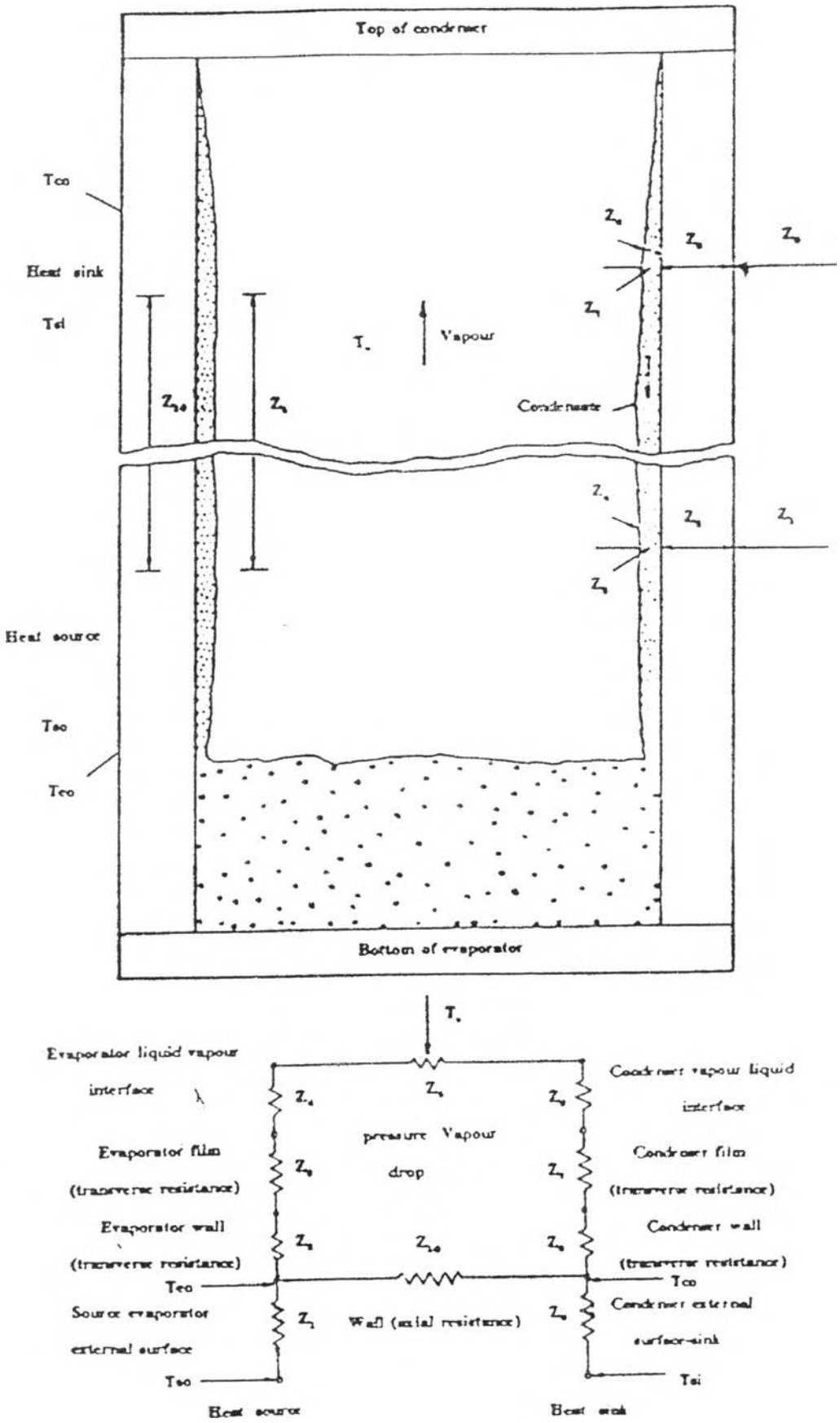
การใช้ฮีทไปป์ในระบบปรับอากาศเพื่อการประหยัดพลังงาน



รูปที่ 2-11 แสดงระบบปรับอากาศ ฮีทไปป์ และห้องปรับอากาศ

หลักการทำงานของฮีทไปป์แบบวนลูป คือเมื่อคอยล์ในส่วนของ precool ได้รับความร้อนจากลมที่ดูดเข้าเครื่องปรับอากาศ สารทำงาน (R-22)ในสถานะของเหลวที่บรรจุภายในจะร้อนขึ้นและเดือด (ดูดความร้อนสัมผัส) แล้วระเหยกลายเป็นไอลอยผ่านส่วนคงที่ของความร้อน (adiabatic) ขึ้นไปยังคอยล์ในส่วนของ reheat แล้วสารทำงาน (R-22) ในสถานะไอจะควบแน่นเป็นของเหลว (คายความร้อนสัมผัสไปยังลมที่จ่ายออกจากเครื่องปรับอากาศ) ไหลตกลงกลับสู่คอยล์ในส่วน precool อีก ซึ่งดำเนินงานเป็นวัฏจักรโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์แบบวนลูปนั้น สามารถหาได้ด้วยวิธีและขั้นตอนเดียวกันกับเทอร์โมไซฟอนแบบท่อตั้งตรง เพียงแต่รายละเอียดภายในตัวแปรต่าง ๆ จะมากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าสมมูลดังต่อไปนี้



รูป 2-12 แสดงวงจรไฟฟ้าสมมูลสำหรับหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน

$$Q_{theorical} = \frac{\Delta T}{Z_{total}}$$

เมื่อ $Q_{theorical}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในทางทฤษฎี (W)

Z_{total} = ค่าความต้านทานความร้อนรวมในวงจรไฟฟ้าสมมูล (K/W)

ΔT = ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างคอยล์ส่วน precool และคอยล์ส่วน reheat

$$\Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h$$

สำหรับฮีทไปป์แบบวนลูปนี้

$$T_{so} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$T_{si} = \frac{T_3 + T_4}{2}$$

ดังนั้น $$\Delta T = (\frac{T_1 + T_2}{2}) - (\frac{T_3 + T_4}{2}) - \Delta T_h$$

เมื่อ T_1 = อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าคอยล์ในส่วน precool

T_2 = อุณหภูมิของอากาศหลังผ่านคอยล์ในส่วน precool หรือก่อนเข้าคอยล์เย็น

T_3 = อุณหภูมิของอากาศหลังผ่านคอยล์เย็น หรือก่อนเข้าคอยล์ในส่วน reheat

T_4 = อุณหภูมิของอากาศหลังผ่านคอยล์ในส่วน reheat

ΔT_h = The mean temperature difference due to hydrostatic head

และจากรูปวงจรไฟฟ้าสมมูลได้

$$Z_{total} = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8} + \frac{1}{Z_{10}}} + Z_9$$

เมื่อ Z_1 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนที่ผิวภายนอกของ precool coil (K/W)

z_2 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนที่ผนังท่อของ precool coil (K/W)

z_3 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการเดือดของสารทำงานภายในท่อของ precool coil (K/W)

z_4 = ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอของสารทำงานภายในท่อของ precool coil (K/W)

z_5 = ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากความดันตกเนื่องจากการไหลของไอสารทำงานภายในท่อของ precool coil ไปยังท่อของ reheat coil (K/W)

z_6 = ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอของสารทำงานภายในท่อของ reheat coil (K/W)

z_7 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อของ reheat coil (K/W)

z_8 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนที่ผนังท่อของ reheat coil (K/W)

z_9 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนที่ผิวภายนอกของ reheat coil (K/W)

z_{10} = ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนที่ผนังท่อนในแนวตามยาวจาก precool coil ถึง reheat coil (K/W)

ในทางปฏิบัติถ้าค่า z_4 และ z_6 มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ และถ้าค่า z_5 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าของ z_3 และ z_7 ก็ตัดทิ้งได้ และถ้า $\frac{z_{10}}{z_2 + z_3 + z_5 + z_7 + z_8} > 20$ ค่า z_{10}

ก็สามารถตัดทิ้งได้เช่นกัน ดังนั้นจากวงจรไฟฟ้าสมมูลจะได้ค่าความต้านทานความร้อนทั้งหมด สามารถประมาณได้ดังนี้

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9$$

เมื่อ

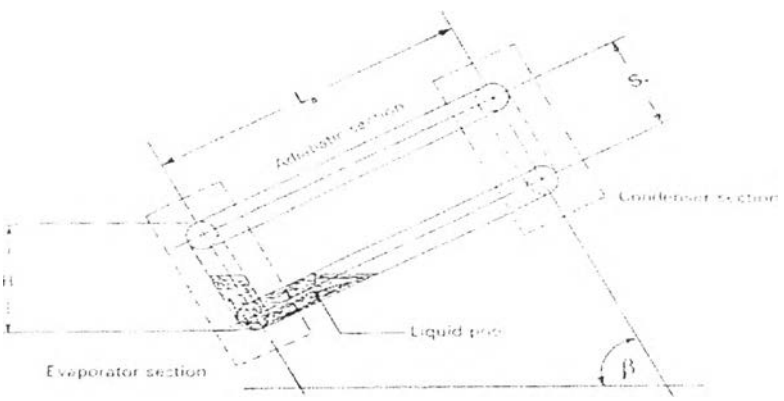
$$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} S_{eo}}$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} S_{co}}$$

$$Z_2 = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L_e}$$

$$Z_8 = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L_c}$$

สำหรับ Z_3 และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้ เมื่อ



รูปที่ 2-13 แสดงลักษณะฮีทไปป์แบบวนลูปด้านข้าง

$$T_v = T_{si} + \frac{(Z_7 + Z_8 + Z_9)}{Z_{total}} \Delta T$$

T_v = อุณหภูมิไอสารทำความเย็น

และเมื่อ P_v คือความดันไอที่อุณหภูมิ T_v และจากรูปจะได้

$$P_{p,1} = P_v + \rho_1 g F H$$

$$H = (S_T + D_i) \sin \beta$$

และเมื่อ T_{p1} คืออุณหภูมิที่ความดันใต้แอ่งของเหลว P_{p1} และ F คือระดับการเติมสารทำความเย็น

$$\frac{dT_s}{dH} = \frac{T_s g}{L} \left(\frac{\rho_i}{\rho_v} - 1\right)$$

เมื่อสมมติ $$T_s \approx \frac{T_{p,1} + T_v}{2}$$

$$T_{p,2} = T_v + \frac{dT_s}{dH} F \cdot H$$

$$T_p = \frac{T_{p,1} + T_{p,2}}{2}$$

$$\Delta T_h = \frac{T_p - T_v}{2} F$$

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นขณะอิ่มตัว,

T_p คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นบริเวณแอ่ง

T_v คือ อุณหภูมิของไอสารทำความเย็นบริเวณ adiabatic

และค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อของคอยล์ (สำหรับท่อของคอยล์ที่วางในแนวนอน)

$$Z_{3f} = \frac{0.335 Q^{1/3}}{D_i g^{1/3} L_e^{4/3} \Phi_2^{4/3}}$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}}$$

$$Z_3 = \frac{Z_{3f} Z_{3p}}{Z_{3f} + Z_{3p}}$$

$$Z_7 = \frac{0.335 Q^{1/3}}{D_i g^{1/3} L_c^{4/3} \Phi_2^{4/3}}$$

เมื่อ $Q = Q_{theorical}$

Z_{3f} = ค่าความต้านทานความร้อนภายในในส่วนของการระเหย

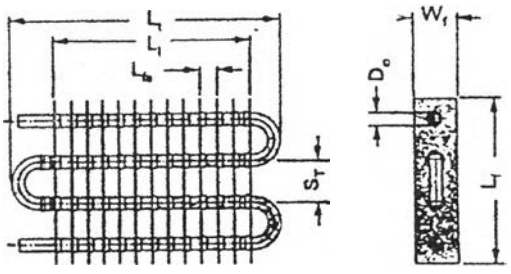
Z_{3p} = ค่าความต้านทานความร้อนในการเกิดการเดือนของสารทำความเย็น

Z_7 = ค่าความต้านทานความร้อนภายในในส่วนของการควบแน่น

$$\Phi_2 = \left[\frac{L \lambda_l^3 \rho_{l1}^2}{\mu_l} \right]$$

$$\Phi_3 = \frac{0.32 \rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} C_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.5} L^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23}$$

ซึ่งคอยล์แบบท่อกลม และครีบชนิดคลื่นต่อเนื่อง (Circular tube-continuous wavy fin) ที่ใช้เป็นเทอร์โมไซฟอนแบบคอยล์ลูปในการศึกษาวิจัยนี้ จะสมมติให้ว่ามีมิติต่าง ๆ เท่ากับคอยล์แบบท่อกลมและครีบชนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง (Circular tube-continuous plate fin) ดังแสดงในรูป เพราะมีรูปร่างใกล้เคียงกันและง่ายต่อการคำนวณ ซึ่งจะมีมิติต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2-14 แสดงลักษณะของคอยล์แบบท่อกลม และครีบชนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง

$$N_t = N_r N_c$$

$$N_f = \frac{L_i}{L_{fs}} + 1$$

$$A_f = 2N_f(W_f L_f - \frac{\pi D_o^2 N_t}{4}) + 2N_f L_f t_f$$

$$A_b = N_t(\pi D_o L_i - N_f t_f \pi D_o)$$

แ อแ แอ $A_t = A_f + A_b$

$$A_{ff} = (L_i L_f) - N_c D_o(L_i - N_t t_f) - (N_f L_f t_f)$$

$$A_{fr} = L_i L_f$$

$$D_h = \frac{4A_{ff}W_f}{A_t}$$

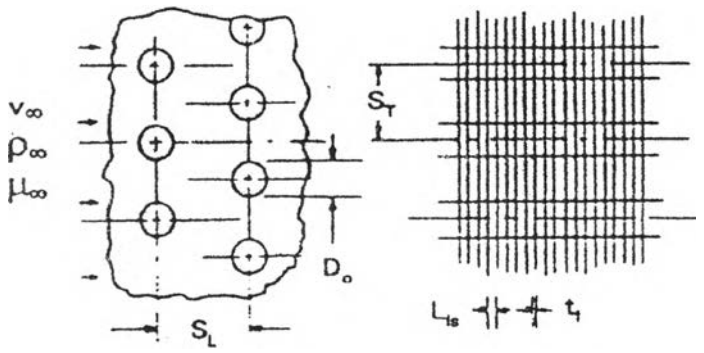
$$t_w = \frac{D_o - D_i}{2}$$

ซึ่งค่า S_{eo} ในสมการ และค่า S_{co} ในสมการ สามารถหาได้โดยใช้สมการ ซึ่งจะเป็นพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนด้านนอนกคอยล์แต่ละส่วน

สำหรับค่า h_{eo} ในสมการ และค่า h_{co} ในสมการ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลภายนอกคอยล์แต่ละส่วนนั้น สามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านครีบ (h_f) กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านท่อส่วนที่ไม่ได้ติดครีบ (h_b) ที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_{eo} = \frac{(\eta_f A_f h_f + A_b h_b)}{A_t}$$

ซึ่ง h_f สามารถประมาณได้จากการใช้สมการถ่ายเทความร้อนของชั้นขอบเขตที่ไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) ผ่านแผ่นราบ เพราะว่าของไหลที่ไหลใกล้ครีบจะเกิดการปั่นป่วนโดยจะเริ่มเกิดขึ้นที่ขอบของครีบ จึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นเป็นชั้นขอบเขตแบบชั้น ๆ (Laminar boundary layer) ได้ ซึ่งค่าประมาณของ h_f ในช่วงความยาวประสิทธิผลของครีบ L_{eff} สามารถหาได้โดยใช้สมการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่คือ



รูปที่ 2-15 แสดงการจัดเรียงของท่อแบบเหลื่อมกันในคอยล์แบบท่อกลม

และครีบชนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง

$$S_t = 0.036\left(\frac{L_{eff} V_a \rho_a}{\mu_a}\right)^{-0.2} (\mathrm{Pr})^{-2/3}$$

$$S_t = \frac{h_f}{C_{pa} V_a \rho_a}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{C_{pa}\mu_a}{k_a}$$

เมื่อ L_{eff} = ความยาวประสิทธิผลของครีบเท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างผิวท่อที่อยู่ติดกันในแนวตั้งฉากกับการไหล

ดังนั้น $$L_{eff} = \frac{S_T - D_o}{2}$$

ประสิทธิภาพของครีบหาโดย

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_{eff})}{mL_{eff}}$$

เมื่อ $$mL_{eff} = L_{eff}\sqrt{\frac{2h_f}{k_f t_f}}$$

และสำหรับ h_b สามารถหาประมาณหาได้จากสมการมาตรฐานสำหรับของไหลที่ไหลผ่านกลุ่มท่อ คือ

$$Nu = BC_z \, \mathrm{Re}^m \, \mathrm{Pr}^{1/3}$$

เมื่อ $$Nu = \frac{h_b D_o}{k\alpha}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{D_o G_{\max}}{\mu_\alpha}$$

$$G_{\max} = \rho_\alpha v_\alpha \frac{A_{fr}}{A_{ff}}$$

เมื่อ B และ m ขึ้นกับอัตราส่วนของ S_L/S_T ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้มีค่า B = 0.025 และ m = 1.35 ส่วน C_z สำหรับการจัดเรียงท่อแบบเหลื่อมกัน (Staggered alignment) แสดงในตารางที่ 2-1ดังนี้

N_r	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_z	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99	1.00

ตารางที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_t กับ C_z