

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยซึ่งอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย

โดยทั่วไปปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้งจะนิยาม ในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมด นั่นคือใช้มวลของวัสดุชื้นเป็นมาตรฐานของการคำนวณหาค่าความชื้น ซึ่งเป็นการหาความชื้นมาตรฐานเปียก (w_w) แต่ในกระบวนการอบแห้ง มวลของวัสดุชื้นจะเปลี่ยนค่าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (w_d) ดังนี้

แบบมาตรฐานเปียก

$$w_w = \frac{m_w}{m_w + m_d} \quad (1)$$

แบบมาตรฐานแห้ง

$$w_d = \frac{m_w}{m_d} \quad (2)$$

โดยที่ w_w คือความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

w_d คือความชื้นมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

m_w คือมวลของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ (kg_{water})

m_d คือมวลของวัสดุแห้ง (kg_{dry})

ความชื้นทั้งสองแบบนี้มักจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งความชื้นในรูปมาตรฐานเปียกจะมีค่าไม่เกินร้อยละเปอร์เซ็นต์เสมอ นิยมใช้กันทั่วไปในทางเกษตรและในวงการค้า [สมชาติ โสภณเรณฤทธิ์, 2535; Khantha and Terdtoon, 1998] แต่ความชื้นแบบมาตรฐานแห้งอาจจะมีค่าเกินร้อยละได้ นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นทั้งสองแบบ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$w_d = \frac{w_w}{1 - w_w} \quad (3)$$

$$w_w = \frac{w_d}{1 + w_d} \quad (4)$$

การลดปริมาณความชื้นออกจากวัสดุจนเหลือค่าที่ต้องการทำได้โดยการกำจัดน้ำออกจากวัสดุนั้น ปริมาณหนึ่ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$m_f = \frac{m_i(1 - w_{w,i})}{(1 - w_{w,f})} \quad (5)$$

โดยที่ m_i คือมวลของวัสดุเริ่มต้น (kg)

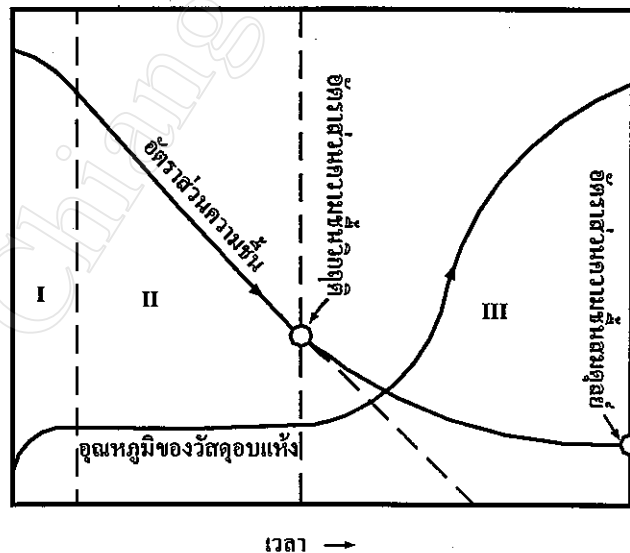
m_f คือมวลของวัสดุสุดท้าย (kg)

$w_{w,i}$ คือความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น (เศษส่วน)

$w_{w,f}$ คือความชื้นมาตรฐานเปียกสุดท้าย (เศษส่วน)

ก. เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุที่เปียกชื้นมาก ๆ ภายใต้งैอนใจของอัตราการอบแห้งคงที่ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีวางวัสดุเปียกชื้นในกระแสดลมที่มีปริมาณมาก ๆ มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่ เมื่อทำการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุแห้งกับเวลาจะได้เส้นกราฟอัตราการอบแห้ง ในรูป 2.1



รูป 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา

ที่มา : วิวัฒน์ ดัชนีพะพานิชกุล (2529)

ในกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

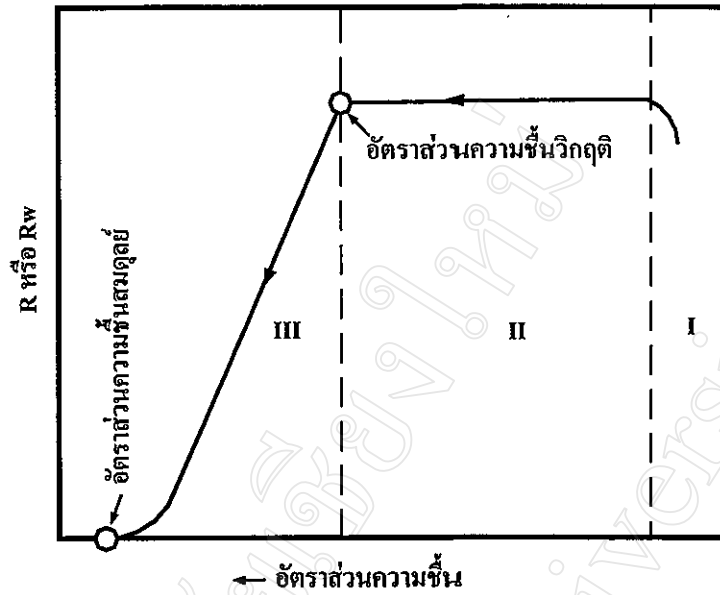
- I : ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
- II : ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งคงที่
- III : ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งลดลง

เริ่มต้นความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้านำวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (t_{wb}) ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วง I ในช่วง II อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณ t_{wb} และอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (w_p) ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วงนี้ ดังนั้น อัตราการระเหยจะมีค่าคงที่ ในช่วง III ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความร้อน ในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น ซึ่งอัตราการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงเพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดลงแล้วความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย การอบแห้งจะสิ้นสุดเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (w_s) ค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง II และ III มีชื่อเรียกว่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤต (w_c) ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยใด ๆ และอัตราส่วนความชื้นสมดุล มีชื่อว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระ (F)

เงื่อนไขของการอบแห้ง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไขภายนอกวัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้งและเงื่อนไขภายในวัสดุเอง เงื่อนไขภายนอกจะเกี่ยวข้องกับวิธีถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุและวิธีการกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายในได้แก่ องค์ประกอบและรูปร่าง อัตราส่วนความชื้น และอัตราส่วนความชื้นสมดุลของวัสดุอบแห้ง เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความร้อนของการอบแห้ง เช่น R (kg water/hr.m², drying area), R_w (kg water/hr.kg, dry solid) เป็นต้น ถ้าให้ W เป็นมวล (kg) ของวัสดุแห้ง และ A เป็นพื้นที่ (m²) ของการอบแห้ง ซึ่งจะได้

$$R = R_w (W/A) \quad (6)$$

เส้นกราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง และ อัตราส่วนความชื้น เรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยกับเวลาในรูปที่ 2.1 คือ R_w นั่นเอง ถ้าเขียนกราฟของ R_w (หรือ R) กับ อัตราส่วนความชื้น จะได้ดังรูป 2.2



รูป 2.2 แสดงเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง
ที่มา : วิวัฒน์ คัดทะพานิชกุล (2529)

ข. คุณสมบัติของอากาศชื้น

เรามักจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุ โดยการผ่านอากาศไปยังวัสดุที่ต้องการทำให้แห้ง อากาศนี้จะเป็นอากาศชื้นเพราะประกอบด้วย อากาศแห้งและไอน้ำ ปริมาณโดยมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศที่ใช้ในการอบแห้งโดยทั่ว ๆ ไปจะมีค่าน้อยกว่า 10% ของมวลทั้งหมด แต่โมเลกุลของไอน้ำเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อกระบวนการอบแห้ง เพราะฉะนั้นจึงต้องทำความเข้าใจกับคุณสมบัติของอากาศชื้นก่อนเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับทำความเข้าใจกับกระบวนการอบแห้งต่อไป ซึ่งคุณสมบัติของอากาศชื้นและความหมายมีดังต่อไปนี้ [สุรพล พฤษพานิช, 2529; Chadderton, 1993] .

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) คืออัตราส่วนของความดันไอน้ำที่แท้จริง (P_v) ต่อความดันไอน้ำของอากาศอิ่มตัว (P_s) ที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งเดียวกัน

$$\%RH = 100 \frac{P_v}{P_s} \quad (7)$$

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($t_{db}, ^\circ C$) คืออุณหภูมิอากาศชื้นที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดา และอุณหภูมิกระเปาะเปียก ($t_{wb}, ^\circ C$) คืออุณหภูมิอากาศชื้นที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งกระเปาะหุ้มด้วยผ้าเปียกและกระเปาะที่มีผ้าเปียกหุ้มอยู่นี้ปะทะกับลมหรืออากาศชื้นรอบ ๆ อย่างรวดเร็ว

ซึ่งในกรณีที่เรารู้หาอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกเราสามารถหาความชื้นสัมพัทธ์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{คือ } \log(P_s) = 30.59051 - 8.2 \log(T) + 2.4804 \times 10^{-3} T - \frac{3142.31}{T} \quad (8)$$

$$T = t + 273.15 \quad (9)$$

โดยที่ $\log(P_s)$ มีหน่วยเป็น kPa. และ T มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

เมื่อแทนค่า t_{db}, t_{wb} ลงในสมการ (8) และ (9) จะได้ค่า $P_{s,db}, P_{s,wb}$ ตามลำดับ และดังนั้นสมการ (7) จะได้

$$\%RH = 100 \frac{P_v}{P_{s,db}} \quad (10)$$

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ($t_{dp}, ^{\circ}\text{C}$) คือ อุณหภูมิซึ่งการกลั่นตัวของไอน้ำแฝงเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออากาศชื้นถูกทำให้เย็นตัวลง โดย

$$t_{dp} = 14.62 \ln \left(\frac{P_v \cdot 10^3}{600.245} \right) \quad (11)$$

ปริมาณน้ำแฝงหรือความชื้นจำเพาะหรือ w (Moisture content or Specific humidity) ในหน่วย $\text{kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dryair}}$ คือ มวลของไอน้ำแฝงที่มีอยู่ในอากาศชื้นต่อหน่วยมวลของอากาศแห้ง โดย

$$\omega = \frac{0.62197 P_v}{101.325 - P_v} \quad (12)$$

ความดันบรรยากาศหรือ P_a (Atmospheric pressure) เป็นค่ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ 101.325 kPa. ความดันสัมบูรณ์ของอากาศแห้งหรือ P_{abs} (Absolute pressure) หรือ ความดันย่อยของอากาศแห้ง (Partial pressure) ในหน่วย kPa. ได้ถูกนิยามไว้ว่า

$$P_{abs} = P_a - P_v = 101.325 - P_v \quad (13)$$

ความหนาแน่น (ρ , $\text{kg}_{\text{dryair}} / \text{m}^3$) คือ มวลของอากาศแห้งต่อหน่วยปริมาตรของอากาศชื้น ปริมาณจำเพาะ (v , $\text{m}^3 / \text{kg}_{\text{dryair}}$) คือ ส่วนกลับของความหนาแน่นของอากาศแห้งหรือเท่ากับปริมาตรของอากาศชื้นต่อหน่วยมวลของอากาศแห้ง

$$\text{จาก } PV = mRT$$

$$P = \rho RT \text{ โดย } P \text{ ในที่นี้คือ } P_{abs}$$

$$\text{ดังนั้น } \rho = \frac{P_{abs}}{RT} = \frac{(101.325 - P_v)}{0.2871 \times T} \quad (14)$$

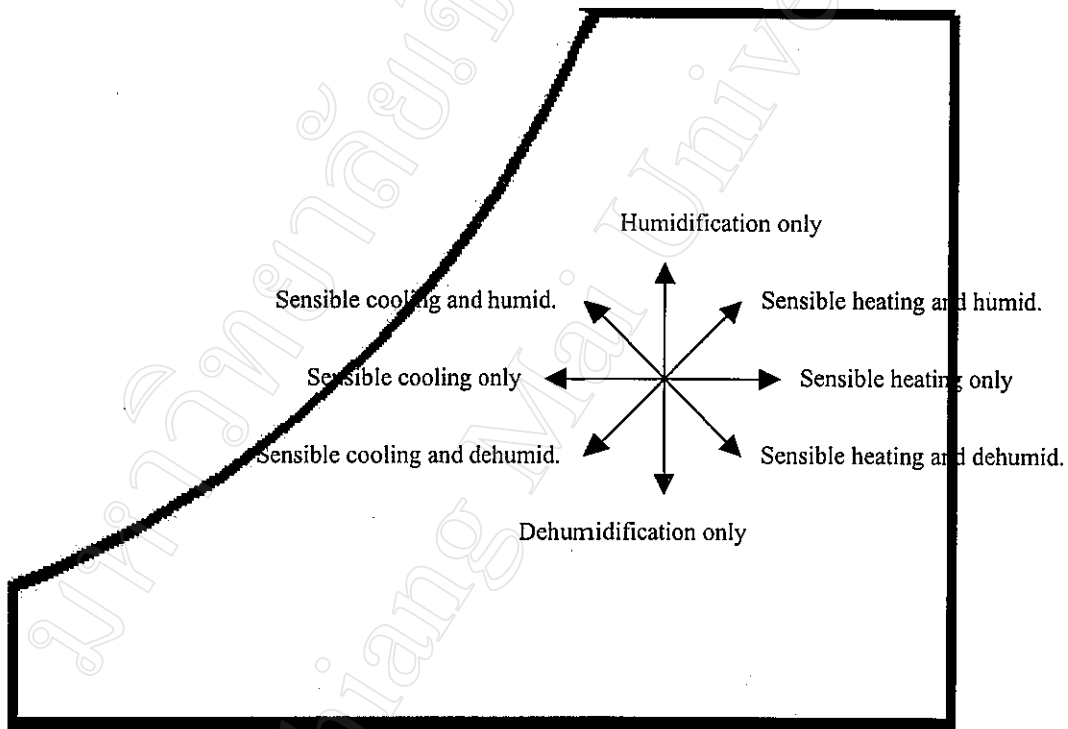
เมื่อ $R =$ ค่าคงที่ก๊าซจำเพาะ $= 0.2871 \text{ kJ/kg-K}$

$$T = t_{db} + 273.15 \text{ K}$$

เอนทาลปีจำเพาะหรือ h (Specific enthalpy, $\text{kJ/kg}_{\text{dryair}}$) คือคุณสมบัติทางความร้อนซึ่งบอกให้ทราบถึงปริมาณความร้อนในอากาศชื้นต่อหน่วยมวลของอากาศแห้งโดย

$$h = 1.0048 t_{db} + w(2500.8 + 1.863 t_{db}) \quad (15)$$

โดยทั่วไปคุณสมบัติของอากาศในทางวิศวกรรมจะอธิบายโดยใช้แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart) เพราะเข้าใจง่าย สามารถแสดงขั้นตอนและกระบวนการทำงานได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูป 2.3 ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ ของอากาศชื้นบนแผนภูมิไซโครเมตริกมีดังต่อไปนี้คือ [บุญพงษ์ กิจวัฒนาชัย, 2541]



รูป 2.3 แสดงลักษณะกระบวนการของอากาศชื้นบนแผนภูมิไซโครเมตริก
ที่มา : บุญพงษ์ กิจวัฒนาชัย (2541)

กระบวนการทำร้อนและเย็น (Sensible heat change) เป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความร้อนสัมผัสอย่างเดียว ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีอยู่สองลักษณะคือ กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิ (Sensible heating only) และลดอุณหภูมิ (Sensible cooling only) ซึ่งกระบวนการทั้งสองนี้จะทำให้อุณหภูมิกระเปาะแห้งสูงขึ้นหรือลดลง แล้วความชื้นสัมพัทธ์ก็จะลดลงหรือเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำแฝงในอากาศยังคงเท่าเดิม เช่น การใช้เครื่องทำความร้อนเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ

กระบวนการเพิ่มความชื้นและลดความชื้น (Latent heat change) เป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความร้อนแฝงอย่างเดียว ซึ่งมีอยู่สองลักษณะคือ กระบวนการเพิ่มความชื้น (Humidification) และลดความชื้น (Dehumidification)

กระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ในขณะเดียวกัน (Combination sensible and latent heat change) ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีอยู่สี่ลักษณะด้วยกันคือ

I. กระบวนการเพิ่มความร้อนสัมผัส (อุณหภูมิ) และเพิ่มความชื้น (Sensible heating and humidification) เช่น การเผาอากาศให้ร้อนขึ้นด้วยเชื้อเพลิงต่าง ๆ ซึ่งจะมีน้ำเกิดขึ้นด้วยในระหว่างการเผาไหม้

II. กระบวนการเพิ่มความร้อนสัมผัส (อุณหภูมิ) และลดความชื้น (Sensible heating and dehumidification)

III. กระบวนการลดความร้อนสัมผัส (อุณหภูมิ) และเพิ่มความชื้น (Sensible cooling and humidification) เช่น กระบวนการอบแห้ง ขณะที่อากาศไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดความชื้นจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศและผลิตภัณฑ์ โดยที่อากาศจะมีอุณหภูมิลดลงแต่ปริมาณน้ำแฝงจะเพิ่มขึ้น กระบวนการดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี ของอากาศขึ้นน้อย จนเรามักจะกำหนดให้เอนทัลปี ของอากาศขึ้นไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง

IV. กระบวนการลดความร้อนสัมผัส (อุณหภูมิ) และลดความชื้น (Sensible cooling and dehumidification) เช่น หลักการของส่วนทำระเหยเครื่องปรับอากาศ โดยการทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลง (ทั้งอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก)กว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างแล้วไอน้ำในอากาศก็จะควบแน่นกลั่นตัวเป็นหยดน้ำแล้วแยกตัวออกจากอากาศ ดังนั้นปริมาณน้ำแฝงในอากาศจะลดลงแต่ความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้น

2.2 ป้อนความร้อน

ความร้อนจะถ่ายเทจากแหล่งอุณหภูมิสูง ไปสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนนี้จะเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ แต่ไม่สามารถที่จะเกิดกระบวนการย้อนกลับได้ด้วยตัวเอง สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งอุณหภูมิสูงสามารถเกิดขึ้นได้ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่าเครื่องทำความเย็น

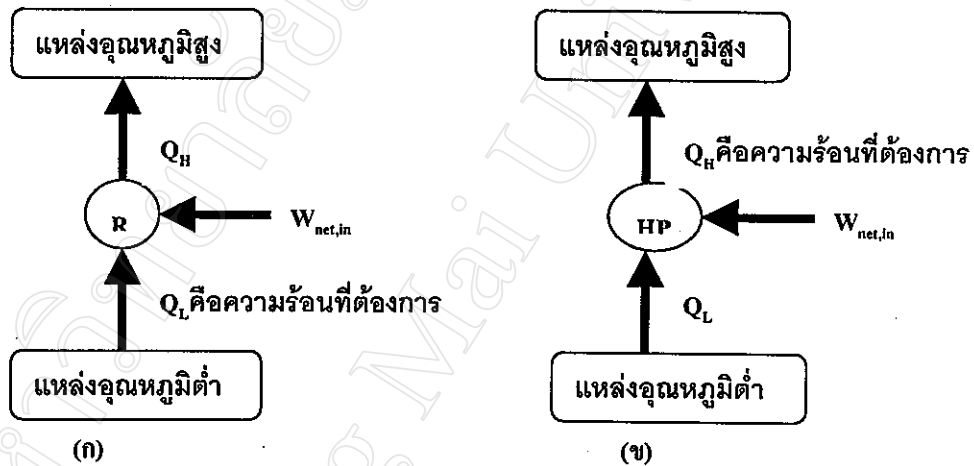
เครื่องทำความเย็นเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นวัฏจักร สารทำงานที่ใช้ในวัฏจักรเครื่องทำความเย็นจะเรียกว่าสารทำความเย็น เครื่องทำความเย็นจะแสดงรูปแบบการทำงานดังรูป 2.4 (ก) ซึ่ง Q_L คือ ปริมาณความร้อนที่นำออกมาจากบริเวณปรับอากาศที่อุณหภูมิต่ำ (T_L) Q_H คือปริมาณความร้อนที่จะต้องทิ้งให้กับบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (T_H) และ $W_{net,in}$ คือ งานที่จะต้องใส่ให้กับเครื่องทำความเย็น

ป้อนความร้อนคืออุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ถ่ายเทความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งอุณหภูมิสูง ทั้งเครื่องทำความเย็นและป้อนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่เหมือนกัน แตกต่างกันที่วัตถุประสงค์เท่านั้น วัตถุประสงค์ของเครื่องทำความเย็นคือ การถ่ายเทความร้อนออกจากสถานที่ปรับอากาศเพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิของบริเวณนั้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำ และถ่ายเทความร้อนนี้ทิ้งให้กับแหล่งอุณหภูมิสูง ส่วนของป้อนความร้อนคือต้องการใช้ความร้อนทิ้งที่แหล่งอุณหภูมิสูงนี้ ดังรูป 2.4 (ข)

ตัวแปรที่แสดงคุณลักษณะของอุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะหรือ COP. (Coefficient of Performance) มีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{HP}} &= \text{ปริมาณหรืออัตราความร้อนที่ต้องการ} / \text{ปริมาณหรืออัตราของงานที่ให้กับอุปกรณ์} \\ &= \frac{Q_H}{W_{\text{net, in}}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{R}} &= \text{ปริมาณหรืออัตราความร้อนที่ต้องการ ใช้} / \text{ปริมาณหรืออัตราของงานที่ให้กับอุปกรณ์} \\ &= \frac{Q_L}{W_{\text{net, in}}} \end{aligned} \quad (17)$$



รูป 2.4 แสดงหลักการการทำงานของเครื่องทำความเย็นและปั๊มความร้อน

ค่า COP_{R} มีค่าเกินหนึ่งได้ ซึ่งตรงกันข้ามกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั่ว ๆ ไปที่มีค่าไม่เกินหนึ่ง จากหลักการอนุรักษ์พลังงานสำหรับวัฏจักรการทำความเย็น และปั๊มความร้อนแบบอัดไอ ได้ว่า

$$W_{\text{net, in}} = Q_H - Q_L \quad (18)$$

ค่า COP จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (19)$$

$$\text{COP}_{\text{R}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad (20)$$

และจากสมการ (18) กับสมการ (19) จะสามารถเขียน COP_{HP} ได้ใหม่เป็น

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net, in}} = \frac{Q_L + W_{net, in}}{W_{net, in}} = COP_R + 1 \quad (21)$$

จากสมการ (21) ค่า COP_{HP} จะมีค่าเกินหนึ่งเสมอเนื่องจาก COP_R ต้องมีค่าเป็นจำนวนบวกเสมอ

การทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

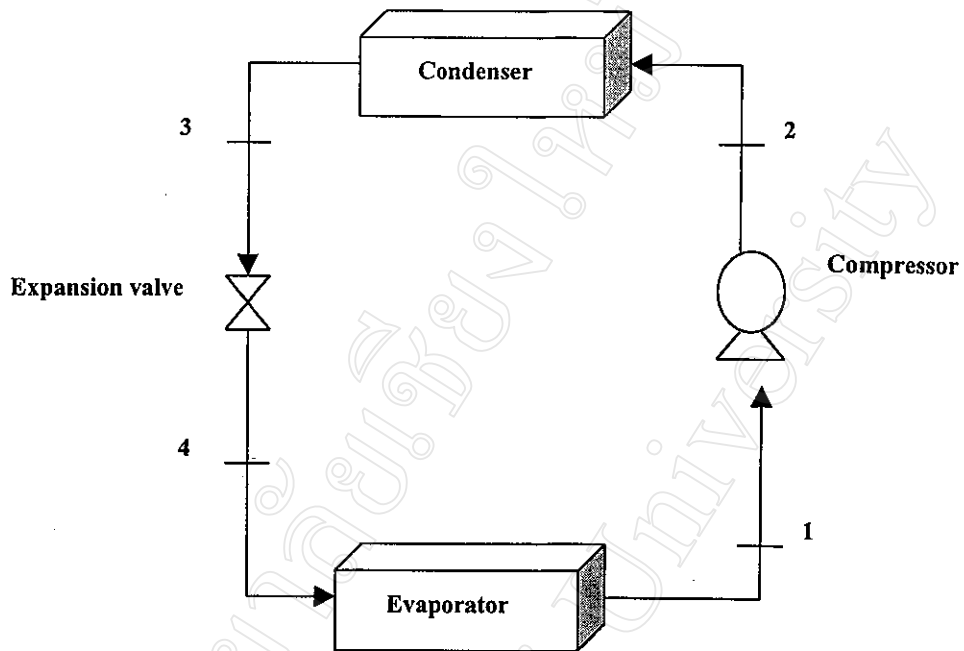
อุปกรณ์หลักประกอบด้วยส่วนทำระเหย (Evaporator) ส่วนควบแน่น (Condenser) เครื่องอัดไอ (Compressor) และวาล์วขยายตัว (Expansion valve) โดยอาศัยการทำงานของวัฏจักรของสารทำความเย็นซึ่งเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น ฟรอน แอมโมเนีย ฯลฯ ดังรายละเอียดในรูป 2.5 และ 2.6

ที่จุด 1 ไอของสารทำความเย็นจากส่วนทำระเหยจะถูกอัดตัวในเครื่องอัดไอ ด้วยกระบวนการอัดไอแบบเอนโทรปีคงที่ (Isentropic compression) ทำให้ไอของสารทำความเย็นมีความดันสูงขึ้นและเอนโทรปีคงที่ไปจนถึงจุด 2

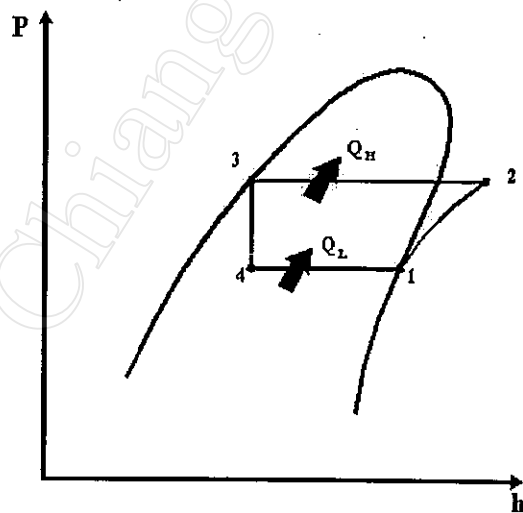
ที่จุด 2 ไอของสารทำความเย็นจากเครื่องอัดไอ ถูกทำให้ควบแน่นที่ส่วนควบแน่น โดยถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ที่ความดัน และอุณหภูมิคงที่ จนกระทั่งไอของสารทำความเย็นกลายเป็นของเหลวที่จุด 3

ที่จุด 3 สารทำความเย็นจะผ่านกระบวนการลดความดัน โดยไหลผ่านวาล์วแบบขยายตัว (Expansion valve) ทำให้สารทำความเย็นมีความดันและอุณหภูมิต่ำลง กระบวนการที่เกิดขึ้นที่วาล์วนี้เรียกว่า กระบวนการทรอททลิง (Throttling Process)

ที่จุด 4 สารทำความเย็นจากวาล์วขยายตัวซึ่งเป็นของไหลอุณหภูมิต่ำไหลผ่านเข้าไปในส่วนทำระเหยและรับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมจนกระทั่งกลายเป็นไอที่จุด 1 โดยที่ไอของสารทำความเย็นจะไหลไปที่เครื่องอัด ไออีกเป็นการครบวัฏจักร



รูป 2.5 แสดงหลักการการทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ



รูป 2.6 แสดงหลักการการทำงานของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

ที่มา : Cengel and Boles (1994)

2.3 หลักการและทฤษฎีการใช้เทอร์โมไซฟอนในเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

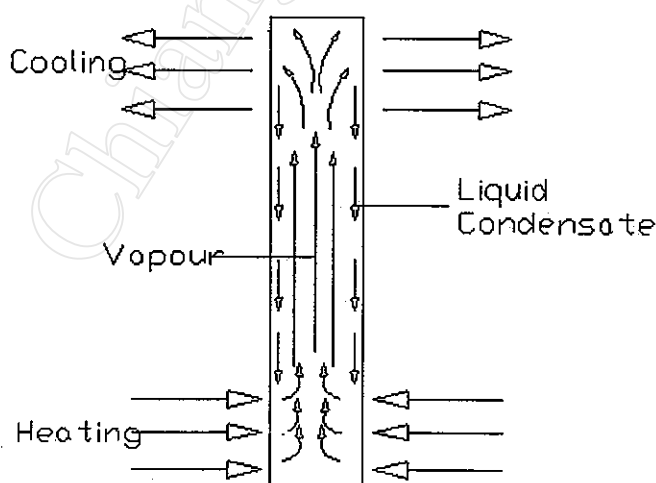
2.3.1 หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอนเป็นท่อความร้อนชนิดหนึ่ง และเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีการทำงานโดยอาศัยหลักการเดือด และการกลั่นตัวของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีค่าการนำความร้อนสูงมาก เพราะค่าความร้อนแฝงของการระเหยของสารทำงานมีค่าสูงมาก ซึ่งจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ปริมาณมากจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง แม้ว่าจะมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านเพียงเล็กน้อย [ประดิษฐ์ เทอดทูล, 2536]

ลักษณะของเทอร์โมไซฟอนสามารถอธิบายได้ดังรูป 2.7 คือ มีสารทำงานบรรจุอยู่ในภาชนะปิดซึ่งเป็นสุญญากาศและส่วนทำงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนระเหย ส่วนคงที่ของความร้อน และส่วนควบแน่น

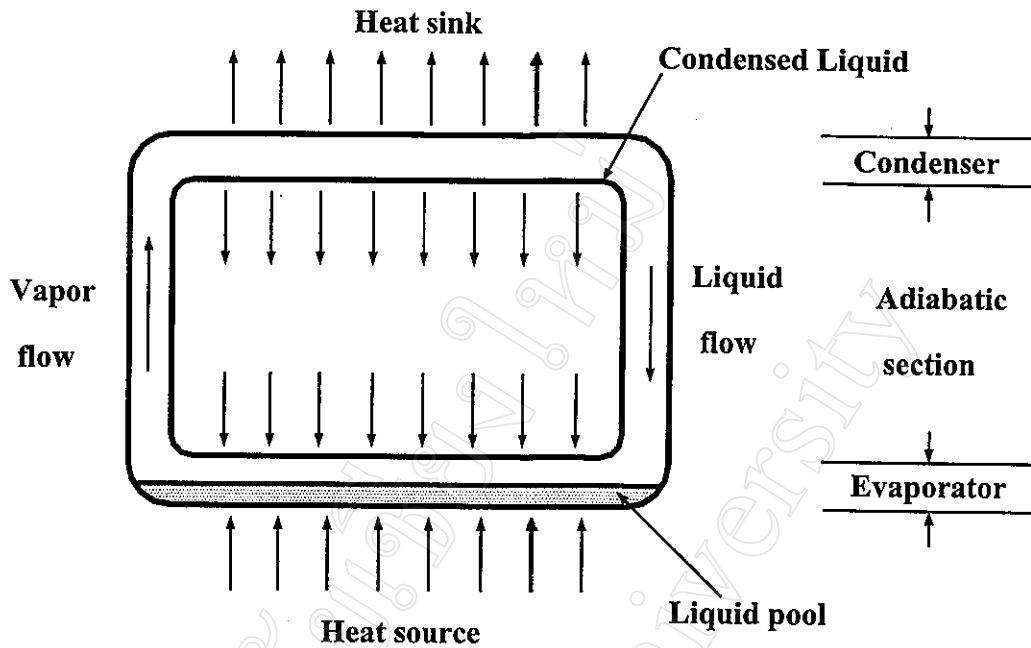
หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน คือ เมื่อส่วนระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน สารทำงานในสถานะของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในจะร้อนขึ้นและเดือดระเหยกลายเป็นไอลอยผ่านส่วนคงที่ของความร้อนขึ้นไปยังส่วนควบแน่นที่จะคายความร้อนออกสู่แหล่งรับความร้อน สารทำงานในสถานะไอจะควบแน่นเป็นของเหลวแล้วไหลลงกลับสู่ส่วนระเหยตามเดิมเพื่อรับความร้อนอีก โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก

สำหรับเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ (Loop thermosyphon) เป็นการพัฒนาสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนอีกรูปแบบหนึ่ง โดยมีการไหลของของไหลหรือสารทำงานในสถานะของเหลวและสถานะไอจะไม่ไหลสวนทางกันทำให้ช่วยลดปัญหาการเกิดการหลุดติดของหยด ของเหลว ไปปนกับไอที่กำลังลอยขึ้น (Entrainment) และเพิ่มความคล่องตัวในการวางตำแหน่งของส่วนระเหยและส่วนควบแน่น [Terdtoon et al., 1996]



รูป 2.7 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อตั้งตรงในแนวตั้ง

ที่มา : Engineering Science Data Unit (1981)



รูป 2.8 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ
ที่มา : Faghri (1995)

ลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบสามารถอธิบายได้ในรูป 2.8 ในหนึ่งวงรอบประกอบด้วย ส่วนระเหย และส่วนควบแน่น ต่อกันด้วยท่อส่งไอระเหยและท่อส่งของเหลวควบแน่นกลับ โดยจะวางส่วน ระเหยและส่วนควบแน่นให้อยู่ในระดับแนวอน โดยส่วนระเหยจะอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น ซึ่งจะทำให้การ ไหลของสารทำงานเป็นไปในทิศทางเดียว เรียกว่า เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบชนิดทางเดียว (Unidirectional loop thermosyphon) คือสามารถถ่ายเทความร้อนได้เพียงทางเดียวจากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่น และจะหยุด การถ่ายเทความร้อนลงทันทีถ้าอุณหภูมิของส่วนควบแน่นสูงกว่าส่วนระเหย

สำหรับหลักการการทำงานของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้ มีหลักการการทำงานเหมือนกับเทอร์โมไซ ฟอนแบบท่อตั้งตรง จะแตกต่างกันที่จะไม่มีการไหลสวนทางกันระหว่างไอกับของเหลวของสารทำงาน แต่ก็ อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเช่นเดียวกัน

และลักษณะเด่นของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้ [สาโรช ไหวเคลื่อน, 2540] ได้แก่

1. มีอัตราการถ่ายเทความร้อน ต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยของท่อความร้อน สูงกว่าอัตราการนำ ความร้อนของแท่งโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน
2. ไม่จำเป็นต้องใช้แรงภายนอกกระทำต่อตัวมันเองในการทำงาน
3. อุณหภูมิใช้งานมีช่วงกว้าง สามารถทำงานได้แม้ผลต่าง ระหว่างแหล่งจ่ายความร้อน กับแหล่ง รับความร้อนมีค่าน้อย และใช้งานได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ถ้าเลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับช่วง อุณหภูมิใช้งาน
4. ปัญหาการบำรุงรักษามีน้อยและไม่มีเสียงดังเพราะไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว
5. ไม่มีปัญหาการปนเปื้อนกัน (Contaminant) ระหว่างของไหลที่ต้องการจะแลกเปลี่ยนความร้อน

6. มีโครงสร้างอย่างง่าย ๆ น้ำหนักเบาและรูปร่างกระทัดรัด
 7. สามารถแยกส่วนระเหยหรือส่วนรับความร้อน กับส่วนควบแน่นหรือส่วนคายความร้อนให้ออกห่างจากกันได้ จึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และยังทำให้สะดวกต่อการติดตั้งด้วย
 8. การตอบสนองเชิงความร้อนเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในรูปของความร้อนแฝง การตอบสนองเชิงความร้อนจึงรวดเร็วและสามารถรับการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายความร้อนได้ดี
- จากลักษณะและคุณสมบัติที่เด่นของเทอร์โมไซฟอนแบบคอยล์รูปนี้จึงได้นำมาใช้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการประหยัดพลังงานในระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนนี้
- อัตราถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ สามารถหาได้ด้วยวิธีและขั้นตอนเดียวกับเทอร์โมไซฟอนแบบท่อตั้งตรง เพียงแต่จะมีรายละเอียดในตัวแปรต่าง ๆ มากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าสมมูลดังต่อไปนี้ [Engineering Science Data Unit Item No. 81038, 1981]

$$Q_{\text{theoretical}} = \frac{\Delta T}{Z_{\text{total}}} \quad (22)$$

เมื่อ $Q_{\text{theoretical}}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในทางทฤษฎี (W)

Z_{total} = ค่าความต้านทานความร้อนรวมในวงจรไฟฟ้าสมมูล ($^{\circ}\text{K/W}$)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อน

$\Delta T = T_{\text{so}} - T_{\text{st}} - \Delta T_h$

ความต้านทานทางความร้อนรวมถูกแทนในรูปของเครือข่ายทางอุณหคณิตของค่าความต้านทานทางความร้อนรวม Z_1 ถึง Z_{10} ดังรูป 2.9 โดยที่

$$Z_{\text{total}} = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8} + \frac{1}{Z_9}} + Z_{10} \quad (23)$$

เมื่อ Z_1 และ Z_9 คือ ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อน ระหว่างแหล่งความร้อนกับผิวนอกของส่วนทำระเหย และระหว่างแหล่งระบายความร้อนกับผิวนอกของส่วนควบแน่น

$$Z_1 = 1 / (h_{\text{co}} S_{\text{co}}) \quad (24)$$

$$Z_9 = 1 / (h_{\text{co}} S_{\text{co}}) \quad (25)$$

Z_2 และ Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อน ของผนังท่อในส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น

$$Z_2 = \ln(D_o / D_i) / (2\pi l_o k) \quad (26)$$

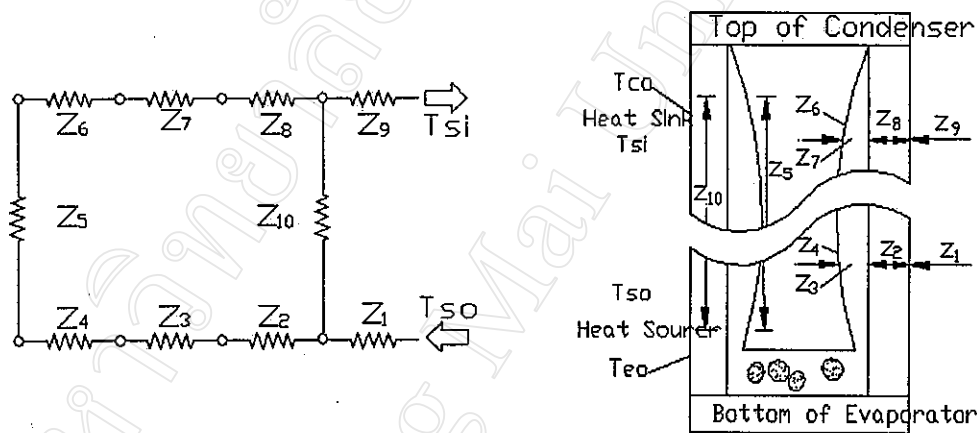
$$Z_8 = \ln(D_o / D_i) / (2\pi l_c k) \quad (27)$$

Z_3 และ Z_7 คือ ค่าความต้านทานภายในของการเดือดและการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อ ประกอบด้วยคุณสมบัติของสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อ

Z_4 และ Z_6 คือ ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้น เนื่องจากไอของสารทำงานมีสถานะเป็นสถานะผสมใน ส่วนที่ระเหยและส่วนควบแน่น ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานอื่นๆ

Z_5 คือ ผลของค่าความต้านทานความร้อนอันเนื่องมาจากความดันไอลดลง จากส่วนที่ระเหยไปยัง ส่วนควบแน่น มีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานลดลงตามไปด้วย อัตราการควบแน่นจึงลดลง แต่มีค่าน้อย

Z_{10} คือ ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อน ที่ผนังท่อในแนวตามยาวจากคอยล์ส่วน ระเหยถึงคอยล์ส่วนควบแน่น



ความต้านทานทางความร้อน

ตำแหน่งของความต้านทานทางความร้อน

รูป 2.9 แสดงค่าความต้านทานทางความร้อน และตำแหน่งของความต้านทานทางความร้อน

ที่มา : Engineering Science Data Unit Item No. 81038 (1981)

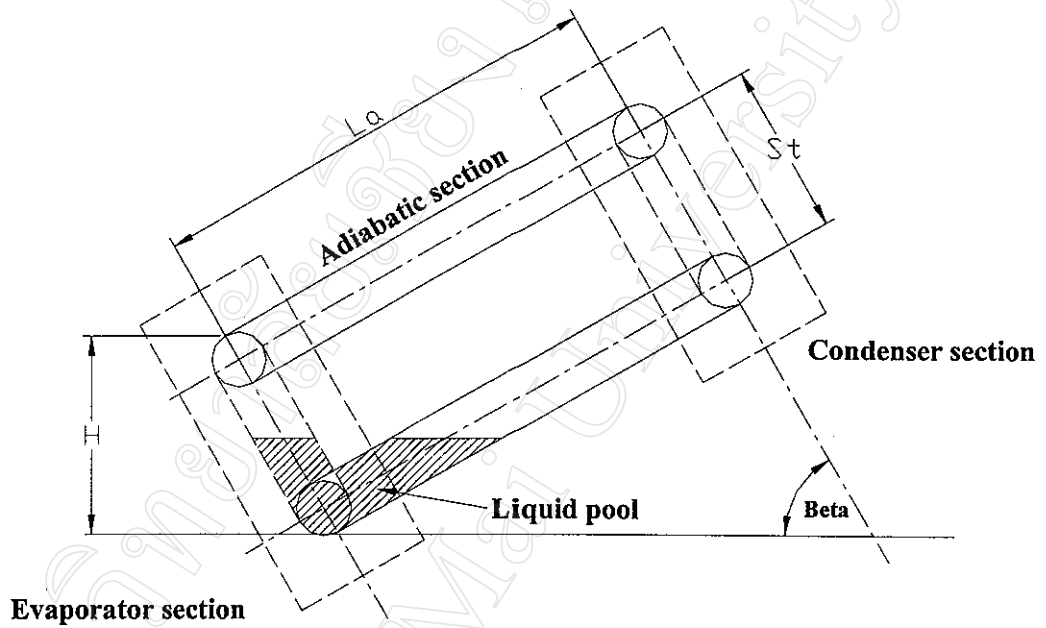
ในทางปฏิบัติถ้าค่า Z_4 , Z_6 มีค่าน้อยมากจะตัดทิ้ง และถ้าค่า Z_5 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าของ Z_3 , Z_7 ก็ตัดทิ้ง และถ้า $[Z_{10} / (Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)] > 20$ แล้ว ค่า Z_{10} ก็จะตัดทิ้งได้ ดังนั้นจากวงจรไฟฟ้าสมมูลในรูป 2.9 ก็จะได้ว่า

$$Z_{\text{total}} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (28)$$

สำหรับ Z_3 และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้ เมื่อ

$$T_v = T_{si} + \frac{(Z_7 + Z_8 + Z_9)}{Z_{total}} \Delta T \quad (29)$$

และเมื่อ P_v คือความดันไอที่อุณหภูมิ T_v และจากรูป 2.10 จะได้



รูป 2.10 แสดงลักษณะเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบในค้ำข้าง

$$P_{p,1} = P_v + \rho_l \cdot g \cdot F \cdot H \quad \text{เมื่อ } F \text{ คือ Filling ratio} \quad (30)$$

$$H = S \sin \beta + D_l \quad \text{เมื่อ } H \text{ คือความสูงของแ่งของเหลว ดังแสดงในรูป 2.10} \quad (31)$$

และเมื่อ $T_{p,1}$ คืออุณหภูมิที่ความดันได้แ่งของเหลว $P_{p,1}$

$$\frac{dT_s}{dH} = \frac{T_s \cdot g}{L} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right) \quad \text{เมื่อสมมติให้ } T_s \approx \frac{T_{p,1} + T_v}{2} \quad (32)$$

$$T_{p,2} = T_v + \frac{dT_s}{dH} F \cdot H \quad (33)$$

$$T_p = \frac{T_{p,1} + T_{p,2}}{2} \quad (34)$$

$$\Delta T_h = \frac{T_p - T_v}{2} F \quad (35)$$

ดังนั้นค่า ΔT ในสมการที่ (22) ก็จะเป็น

$$Q_{\text{theoretical}} = \frac{\Delta T}{Z_{\text{total}}} \quad , \quad \Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h \quad (36)$$

และค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อของคอยล์ (สำหรับท่อของคอยล์ที่วางในแนวนอน) คือ

$$Z_{3f} = \frac{0.335 Q^{1/3}}{D_i g^{1/3} L_e^{4/3} \Phi_2^{4/3}} \quad (37)$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}} \quad (38)$$

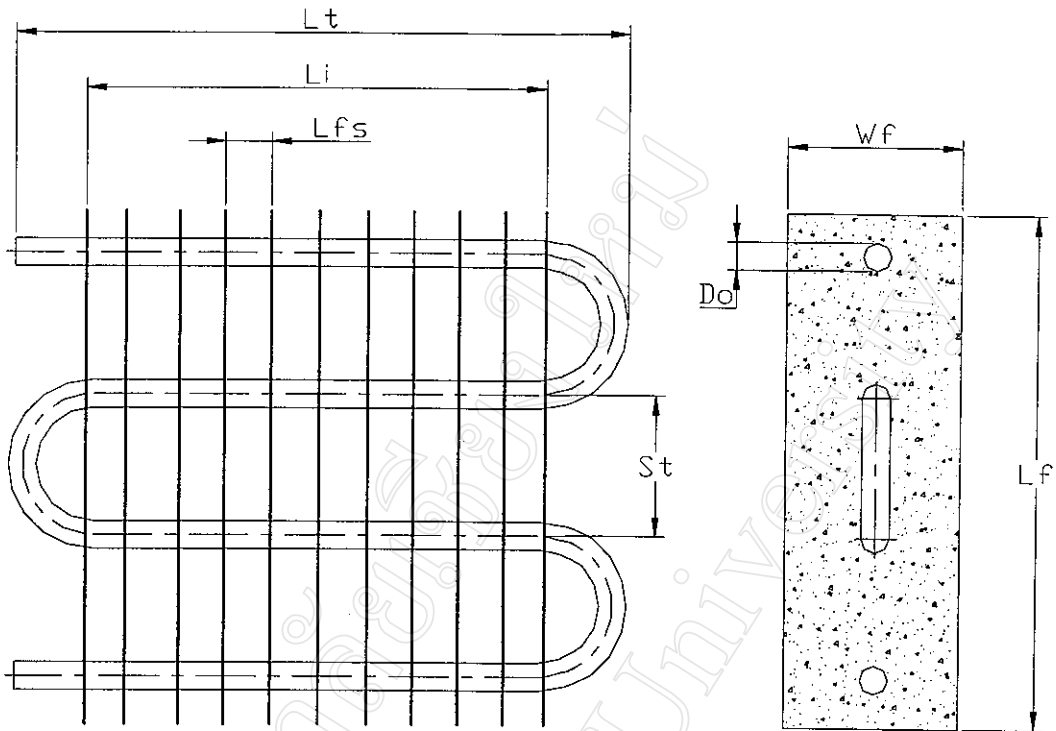
$$Z_3 = \frac{Z_{3f} Z_{3p}}{Z_{3f} + Z_{3p}} \quad (39)$$

$$Z_7 = \frac{0.335 Q^{1/3}}{D_i g^{1/3} L_e^{4/3} \Phi_2^{4/3}} \quad (40)$$

เมื่อ $Q = Q_{\text{theoretical}}$

และ
$$\Phi_2 = \left[\frac{L \lambda_1^3 \rho_1^2}{\mu_1} \right]^{1/4} \quad (41)$$

$$\Phi_3 = \frac{0.32 \rho_1^{0.65} k_1^{0.3} C_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu_1^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (42)$$



รูป 2.11 แสดงลักษณะของคอยล์แบบท่อกลมและครีบริขชนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง

ซึ่งคอยล์แบบท่อกลมและครีบริขชนิดคลื่นต่อเนื่อง (Circular tube-continuous wavy fin) ที่ใช้เป็นเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะสมมติว่ามีมิติต่าง ๆ เท่ากับคอยล์แบบท่อกลมและครีบริขชนิดแผ่นเรียบต่อเนื่อง (Circular tube-continuous plate fin) ดังแสดงในรูป 2.11 เพราะมีรูปร่างใกล้เคียงกันและง่ายต่อคำนวณ ซึ่งจะมีมิติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ [สารโรช ไทวเคล็อน, 2540]

$$N_t = N_r * N_c \quad (43)$$

$$N_f = \frac{L_i}{L_{fs}} + 1 \quad (44)$$

$$A_f = 2N_f(W_f L_f - \frac{\pi D_o^2 N_t}{4}) + 2N_f L_f t_f \quad (45)$$

$$A_b = N_t(\pi D_o L_i - N_r * t_f * \pi D_o) \quad (46)$$

$$A_t = A_f + A_b \quad (47)$$

$$A_{\pi} = (L_i * L_f) - N_c * D_o(L_i - N_t * t_f) - (N_r * L_r * t_r) \quad (48)$$

$$A_r = L_i * L_f \quad (49)$$

$$D_h = \frac{4A_{ff} \times W_f}{A_t} \quad (50)$$

$$T_w = (D_o - D_i)/2 \quad (51)$$

ซึ่งค่า S_{∞} ในสมการ (24) และค่า S_{∞} ในสมการ (25) สามารถได้โดยใช้สมการ (47) ซึ่งจะเป็นพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนด้านนอกคอยล์แต่ละส่วน

สำหรับค่า h_{∞} ในสมการ (24) และค่า h_{∞} ในสมการ (25) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลภายนอกคอยล์แต่ละส่วนนั้น สามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านครีป (h_p) กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล ที่ไหลผ่านท่อส่วนที่ไม่ได้ติดครีป (h_b) ที่มีความสัมพันธ์ดังนี้ [สาโรช ไหวเคลื่อน, 2540]

$$h_{\infty} \text{ or } h_{\infty} = \frac{\eta_f A_f h_f + A_b h_b}{A_t} \quad (52)$$

ซึ่ง h_f สามารถประมาณได้จากการใช้สมการถ่ายเทความร้อน ของชั้นขอบเขตที่ไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) ผ่านแผ่นราบ เพราะว่าของไหลที่ไหลใกล้ครีปจะเกิดการปั่นป่วนโดยจะเริ่มเกิดขึ้นที่ขอบของครีป จึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดเป็นชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ (Laminar boundary layer) ได้ ซึ่งค่าประมาณของ h_f ในช่วงความยาวประสิทธิผลของครีป L_{eff} สามารถหาได้โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่คือ

$$St = 0.036 \left(\frac{L_{eff} v_{\infty} \rho_{\infty}}{\mu_{\infty}} \right)^{-0.2} (Pr)^{-2/3} \quad (53)$$

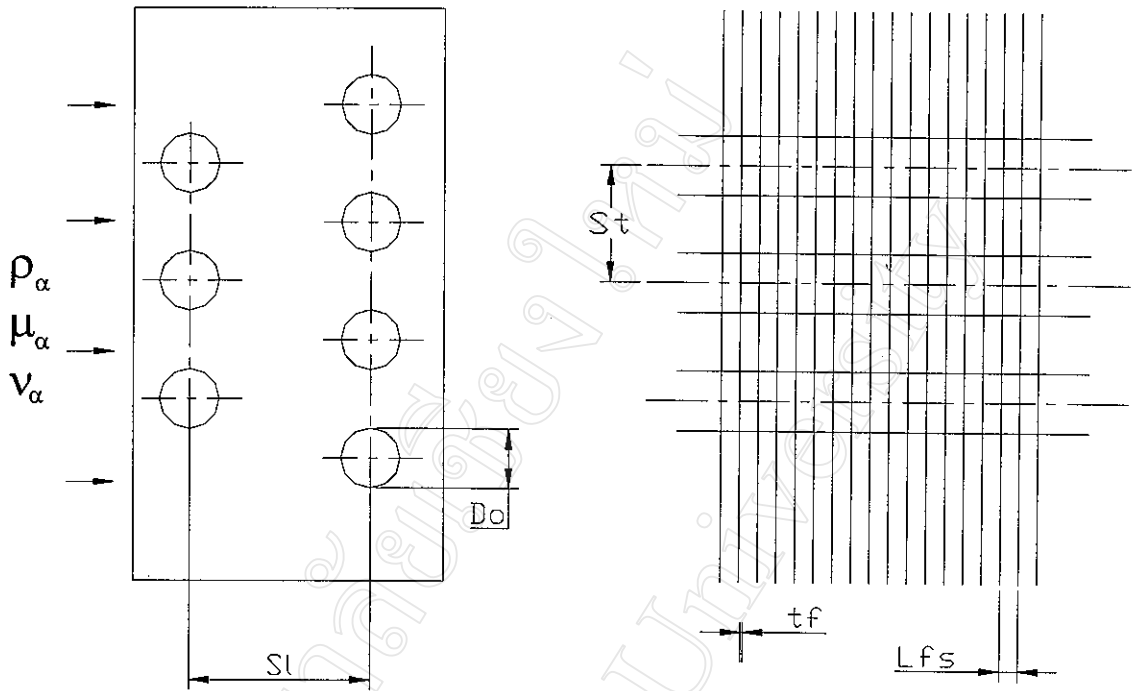
เมื่อ
$$St = \frac{h_f}{C_{p\infty} v_{\infty} \rho_{\infty}} \quad (54)$$

$$Pr = \frac{C_{p\infty} \mu_{\infty}}{k_{\infty}} \quad (55)$$

และ L_{eff} = ความยาวประสิทธิผลของครีปเท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างผิวท่อที่อยู่ติดกัน ในแนวตั้งฉากกับการไหล [สาโรช ไหวเคลื่อน, 2540]

ดังนั้น

$$L_{eff} = \frac{S_T - D_o}{2} \quad (56)$$



รูป 2.12 แสดงการจัดเรียงของท่อแบบเหลื่อมกันในคอยล์แบบท่อกลมและครีบน้ำมันแผ่นเรียบต่อเนื่อง

ประสิทธิภาพของครีบน้ำมันโดย

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_{\text{eff}})}{mL_{\text{eff}}} \quad (57)$$

เมื่อ

$$mL_{\text{eff}} = L_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2h_f}{k_f t_f}} \quad (58)$$

และสำหรับ h_b สามารถประมาณหาได้จากสมการมาตรฐานสำหรับของไหลที่ไหลผ่านกลุ่มท่อ คือ

$$Nu = B * C_z * Re^m * Pr^{1/3} \quad (59)$$

เมื่อ

$$Nu = \frac{h_b D_o}{k_\infty} \quad (60)$$

$$Re = \frac{D_o G_{\text{max}}}{\mu_\infty} \quad (61)$$

$$G_{\max} = \rho_{\infty} v_{\infty} \frac{A_{fr}}{A_{ff}} \quad (62)$$

เมื่อ B และ m ขึ้นกับอัตราส่วนของ S_L/S_T ซึ่งในที่นี้กำหนดให้มีค่า $B = 0.025$ และ $m = 1.35$ ส่วน C_z เป็นค่าตัวคูณซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงท่อ และจำนวนแถว ซึ่งค่า C_z สำหรับการจัดเรียงท่อแบบเหลื่อมกัน (Staggered alignment) แสดงในตาราง 2.1 ดังนี้

ตาราง 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_r กับ C_z

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

2.3.2 การประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนในเครื่องอบแห้งชนิดบีบความร้อน

จากลักษณะและคุณสมบัติที่เด่นของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบนี้จึงได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับการประหยัดพลังงานในระบบอบแห้งชนิดบีบความร้อน โดยจะใช้เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบติดตั้งในลักษณะประกบเข้ากับส่วนทำระเหยของระบบบีบความร้อน ดังแสดงในรูป 2.13 โดยให้ส่วนระเหยอยู่ด้านล่างสุดเพื่อดูดซับความร้อนจากอากาศก่อนเข้าส่วนทำระเหย ความร้อนจากอากาศจะถูกถ่ายเทให้กับสารทำงานในส่วนระเหยแล้วสารทำงานก็จะเดือดแล้วระเหยถ่ายเทความร้อนผ่านท่อส่งไอระเหยขึ้นไปยังส่วนควบแน่น แล้วคายความร้อนให้แก่อากาศอีกครั้งก่อนเข้าไปรับความร้อนที่ส่วนควบแน่น แล้วสารทำงานก็จะควบแน่นเป็นของเหลวไหลผ่านท่อส่งของเหลวควบแน่นกลับลงสู่ส่วนระเหยตามเดิม

ซึ่งสามารถอธิบายคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศและขั้นตอนการทำงานของเครื่องใช้เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบในระบบอบแห้งชนิดบีบความร้อน โดยใช้แผนภูมิไซโครเมตริกแบบคร่าว ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ได้ดังนี้

โดยช่วง 1 – 2 คือช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิระเปาะแห้งของอากาศ แต่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลง โดยที่ปริมาณน้ำแฝงในอากาศยังคงที่ เนื่องจากภาวะความร้อนของพัดลมหมุนเวียน (โดยปกติจะมีค่าน้อยมาก)

ช่วง 2 – 3 คือช่วงที่ส่วนควบแน่นของบีบความร้อนมีการเพิ่มอุณหภูมิระเปาะแห้งให้แก่อากาศทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงโดยที่ปริมาณน้ำแฝงในอากาศยังคงที่

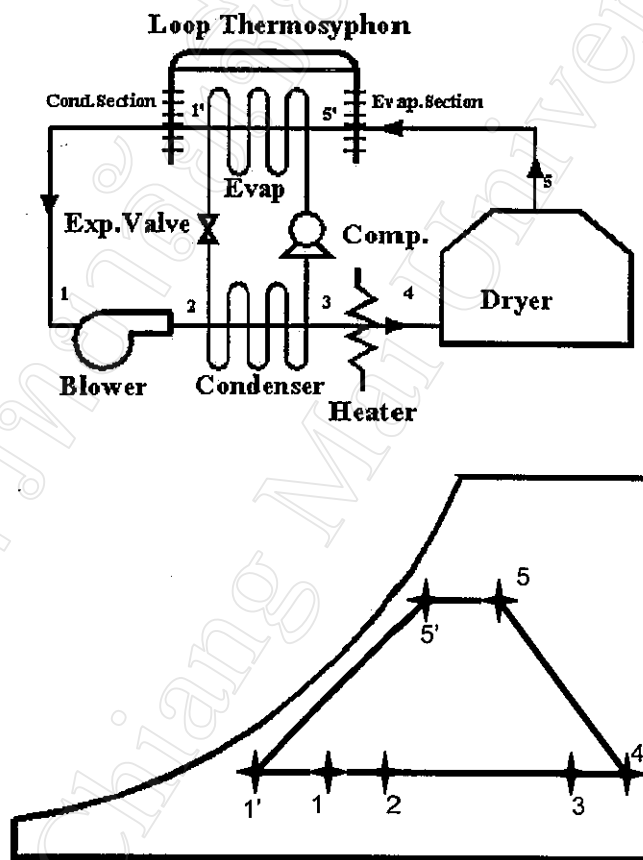
ช่วง 3 – 4 คือ ช่วงที่เครื่องทำความร้อนมีการเพิ่มอุณหภูมิระเปาะแห้งให้แก่อากาศ ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงโดยที่ปริมาณน้ำแฝงในอากาศยังคงที่ ทำให้อากาศสามารถรับปริมาณน้ำแฝงในอุือบได้อีก

ช่วง 4 – 5 คือ ช่วงที่อากาศไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดความชื้น ก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศและผลิตภัณฑ์ ทำให้อากาศจะมีอุณหภูมิลดลงแต่ปริมาณน้ำแฝงจะเพิ่มขึ้น

ช่วง 5 - 5' คือ ช่วงที่มีการลดอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศโดยคอยล์ส่วนระเหยของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ แต่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณน้ำแฝงในอากาศยังคงที่

ช่วง 5' - 1' คือ ช่วงที่ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนมีการลดอุณหภูมิ (ทั้งอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก) และไอน้ำแฝงในอากาศมีการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำออกไป ทำให้ปริมาณน้ำแฝงในอากาศลดลง แต่ความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้น

ช่วง 1' - 1 คือ ช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศโดยคอยล์ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ลดลง โดยที่ปริมาณน้ำแฝงในอากาศยังคงที่



รูป 2.13 แสดงการใช้งานเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบในระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

2.3.3 ค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน

ค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของระบบอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน มีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณความร้อนจากส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อน (Q_{cond} , kW)

$$Q_{cond} = \dot{m} (h_{la} - h_{ca}) \quad (63)$$

เมื่อ

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\text{kg}_{dry\ air}/\text{s}$)

h_{la} = ค่าเอนทาลปีจำเพาะของอากาศหลังออกจากส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อน ($\text{kJ}/\text{kg}_{dry\ air}$)

h_{ca} = ค่าเอนทาลปีจำเพาะของอากาศก่อนเข้าส่วนควบแน่นของปั๊มความร้อน ($\text{kJ}/\text{kg}_{dry\ air}$)

2. ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP)

$$COP_{hp} = \frac{Q_{cond}, \text{kW.}}{P_{compressor}, \text{kW}_{elec.}} \quad (64)$$

3. ค่าอัตราการกลั่นตัวของน้ำที่ส่วนทำระเหยจำเพาะหรือ SMCR (Specific Moisture Condense Rate) มีหน่วยเป็น $\text{kg}_{water}/\text{kW-h}$

$$SMCR = \frac{m_{CD}}{P_{compressor} \times h} \quad (65)$$

เมื่อ

m_{CD} = ปริมาณน้ำกลั่นตัวเชิงมวลของน้ำกลั่นตัวที่ส่วนทำระเหย (kg_{water})

$P_{compressor}$ = กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บปริมาณน้ำ ของ Comp. ในระบบปั๊มความร้อน ($\text{kW}_{elec.}$)

h = ช่วงเวลาที่ทำการเก็บปริมาณน้ำ (hour)

4. ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะหรือ SMER (Specific Moisture Extraction Rate) ซึ่งมีหน่วยเหมือนกับ SMCR คือ $\text{kg}_{water}/\text{kW-h}$

$$SMER = \frac{\dot{m} \times (\omega_{la} - \omega_{ca}) \times 3600}{P_{compressor}} \quad (66)$$

เมื่อ

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ($\text{kg}_{dry\ air}/\text{s}$)

ω_{la} = ค่าความชื้นจำเพาะของอากาศหลังออกเครื่องอบแห้ง ($\text{kg}_{water}/\text{kg}_{dry\ air}$)

ω_{ea} = ค่าความชื้นจำเพาะของอากาศก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$)

$P_{\text{compressor}}$ = ค่ากำลังไฟฟ้าของ Compressor ในระบบปั๊มความร้อน ($\text{kW}_{\text{elec.}}$)

5. ค่าประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งหรือ DE (Drying Efficiency)

$$DE = \frac{\omega_{la} - \omega_{ea}}{\omega_{sat} - \omega_{ea}} \quad (67)$$

เมื่อ

ω_{la} = ค่าความชื้นจำเพาะของอากาศหลังออกเครื่องอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$)

ω_{ea} = ค่าความชื้นจำเพาะของอากาศก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$)

ω_{sat} = ค่าความชื้นจำเพาะของอากาศหลังออกเครื่องอบแห้ง ที่ 100%RH ($\text{kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$)

6. สมรรถนะต่าง ๆ ของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

6.1 ค่าความร้อนที่อากาศถ่ายเทให้กับสารทำงานที่คอยล์ส่วนระเหยของเทอร์โมไซฟอน ทำให้อากาศเย็นลงก่อนผ่านส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน หรือ Q_{precool} มีหน่วยเป็น kW

$$Q_{\text{precool}} = m c_p \Delta T_{\text{precool}} \quad (68)$$

6.2 ค่าความร้อนที่สารทำงานถ่ายเทออกให้กับอากาศที่คอยล์ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอน ทำให้อากาศร้อนขึ้นอีกครั้งหลังจากผ่านส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อนมาหรือ Q_{reheat} มีหน่วยเป็น kW

$$Q_{\text{reheat}} = m c_p \Delta T_{\text{reheat}} \quad (69)$$

6.3 ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ที่ใช้ในการศึกษานี้ หาได้ดังต่อไปนี้

การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลสองชนิดไม่ปนกันสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$Q_{\text{cold}} = m_c C_{pc} (T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}}) \quad (70)$$

$$Q_{\text{hot}} = m_h C_{ph} (T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out}}) \quad (71)$$

เมื่อรวมสมการ 70 , 71 และจัดให้อยู่ในรูปของ Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD) จะได้

$$Q = \frac{UA[(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})]}{\ln \left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}} \right)} \quad (72)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Q_{max}) ระหว่างของไหล 2 ชนิดที่มีการไหลสวนทางกันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเกิดขึ้น ณ จุดที่ อุณหภูมิขาออกของของไหลเย็น เท่ากับอุณหภูมิขาเข้าของของไหลร้อน ($T_{c,out} = T_{h,in}$) ดังสมการ

$$Q_{max} = (mC_p)_{min} \Delta T_{max} \quad (73)$$

เมื่อ $(mC_p)_{min}$ คือค่า mC_p ที่น้อยที่สุดระหว่างของไหลทั้งสอง

และ $\Delta T_{max} = T_{h,in} - T_{c,in}$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Eff) คือ

$$Eff = Q/Q_{max} \quad (74)$$

$$Eff = \frac{UA}{(mC_p)_{min}} \frac{\Delta T_m}{\Delta T_{max}} \quad (75)$$

$$Eff = \frac{(mC_p)_h (T_{h,in} - T_{h,out})}{(mC_p)_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (76)$$

$$\text{หรือ } Eff = \frac{(mC_p)_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{(mC_p)_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (77)$$

และในการศึกษานี้ $(mC_p)_h$ เท่ากับ $(mC_p)_c$ ดังนั้น

$$Eff = \frac{(T_{h,in} - T_{h,out})}{(T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (78)$$

$$\text{หรือ Eff.} = \frac{(T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}})}{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})} \quad (79)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Eff และ NTU (Number of Transfer Unit) จะมีประโยชน์มากในการคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ NTU คือตัวแปรไร้มิติที่ใช้กันทั่วไปในการวิเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งกำหนดดังต่อไปนี้

$$\text{NTU} = \frac{UA}{(mC_p)_{\text{min}}} \quad (80)$$

และ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง UA และ Z คือ

$$Z = \frac{1}{UA} \quad (81)$$