บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่นำเสนอไว้ในบทนี้ ได้แก่ หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ คุณสมบัติของเมทานอล หลักการและทฤษฎีท่อความร้อนแบบสั่น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

2.1.1 หลักการทำงานเบื้องต้น

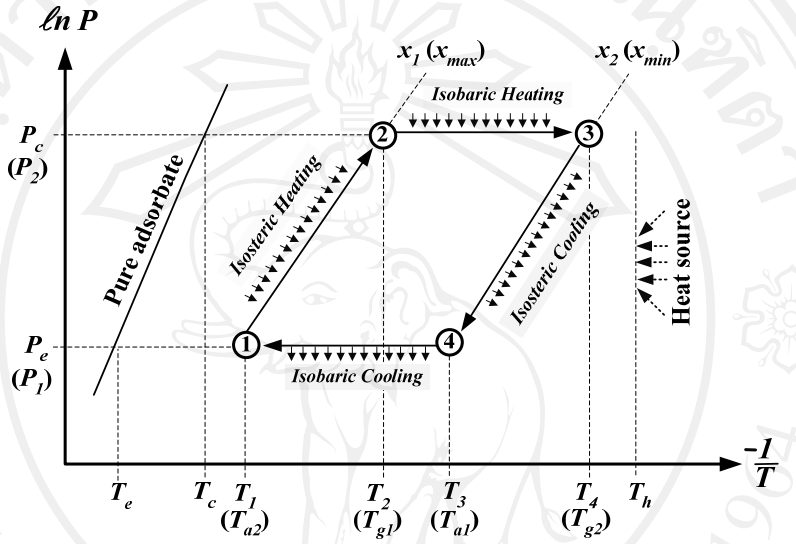
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับมีหลักการทำงานคล้ายกับระบบทำความเย็นแบบดูดซึม แต่ทั้งสองระบบจะใช้คู่สารทำงานที่แตกต่างกันกล่าวคือ ระบบทำความเย็นแบบดูดซึมใช้สารดูดซึมและสารทำความเย็น (สารถูกดูดซึม) เป็นที่มีสถานะในสมดุลระหว่างของเหลวและก๊าซเป็นคู่สารทำงาน ในขณะที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับจะใช้คู่สารทำงานที่มีสถานะของแข็ง (สารดูดซับ) และสารทำความเย็น (สารถูกดูดซับ) เป็นสารที่มีสถานะสมดุลของเหลวและไอ การทำงานเบื้องต้นของระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถแสดงดังรูปที่ 1.1

จากรูปการทำงานของระบบเริ่มขึ้นเมื่อเครื่องดูดซับ (Adsorber) ที่ภายในบรรจุคู่สารดูดซับได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ทำให้สารทำความเย็นที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวสารดูดซับเกิดการระเหยออกจากเครื่องดูดซับมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารถ่ายโอนความร้อนและควบแน่นภายในเครื่องควบแน่น ไหลผ่านวาล์วไปเก็บในเครื่องทำระเหย ดังรูปที่ 1.1 (a) เรียกกระบวนการนี้ว่า การคายสารดูดซับ (Desorption Process) จากนั้นจะระบายความร้อนออกจากเครื่องดูดซับทำให้อุณหภูมิของเครื่องดูดซับลดต่ำลงเช่นเดียวกับความดันของระบบ สารทำความเย็นภายในเครื่องทำระเหยจะเกิดการระเหยตัวกลับมาดูดซับบนผิวของสารดูดซับภายในเครื่องดูดซับอีกครั้ง ดังรูปที่ 1.1 (b) กระบวนการนี้เรียกว่า การดูดซับ (Adsorption Process) ซึ่งการระเหยของสารทำความเย็นภายในเครื่องทำระเหยเกิดจากการดึงความร้อนภายในส่วนทำความเย็นเพื่อใช้เป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เป็นผลให้อุณหภูมิภายในส่วนทำความเย็นลดต่ำลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.2 อุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ของการดูดซับ

ปรากฏการณ์การดูดซับกี่ยวข้องกับตัวแปรหลัก 3 ตัว คือ ความดัน (P, kPa) อุณหภูมิ (T, K) และความเข้มข้นสารดูดซับ (x, $kg_{refrigerant}/kg_{adsorbent}$) เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log หรือ ln ของความดัน (ln P) กับ 1/T ที่ W คงที่ จะได้แผนภาพแสดงสมดุล P-T-x เพื่อใช้ในการออกแบบระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลความดัน-อุณหภูมิ-อัตราส่วนการดูดซับของสารทำงาน (P-T-x) ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ (ยิ่งลักษณ์, 2549)

ขั้นตอนการทำงานของระบบดูดซับ แบ่งเป็น 2 ช่วง (phase) ซึ่งมีรายะเอียดดังต่อไปนี้

<u>ช่วงที่ 1 (Heating / Desorption / Condensation)</u>

ขั้นตอน 1→2 ให้ความร้อนแก่คู่สารทำงานภายในเครื่องดูดซับ จากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ T_h ทำให้ความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากความดันและอุณหภูมิระเหย (P_e, T_1) เป็นความดันและอุณหภูมิควบแน่น (P_c, T_2) โดยสารถูกดูดซับ มีความเข้มข้นคงที่เท่ากับ x_1 และไม่เปลี่ยนสถานะ การให้ความร้อนชั้นสารดูดซับในขั้นตอนนี้ เรียกว่า isosteric heating

ขั้นตอน 2→3 ให้ความร้อนกับชั้นสารดูดซับต่อไป จนอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จาก T_2 จนถึง T_3 โดยรักษาความดันให้คงที่ที่ P_c สารถูกดูดซับจะเริ่มระเหยออกจากผิวสารดูดซับ กระบวนการนี้เรียกว่า การคายสาร (Desorption process) ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะลดลงจาก x_1 เป็น x_2 การให้ความร้อนในขั้นตอนนี้เรียกว่า isobaric heating โดยไอสารถูกดูดซับจะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไหลผ่านเครื่องควบแน่นและควบแน่นเป็นของเหลวไหลลงกระบอกเก็บสาร เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

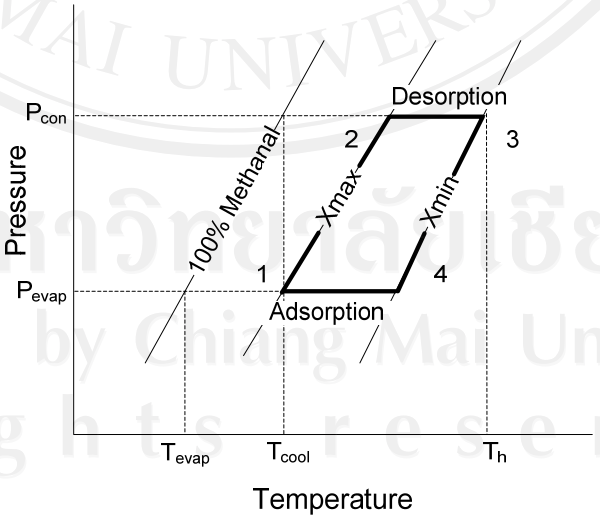
ช่วงที่ 2 (Cooling / Evaporation / Adsorption)

ขั้นตอน 3→4 ระบายความร้อนออกจากเครื่องดูดซับเพื่อลดอุณหภูมิของของชั้นสารดูดซับและ ความดันของระบบจาก (P_c, T_3) เท่ากับ (P_e, T_4) โดยความเข้มข้นของ สารถูกดูดซับคงที่เท่ากับ x_2 ขั้นตอนนี้เรียกว่า isosteric cooling

ขั้นตอน 4→1 เปิดวาล์วที่เครื่องทำระเหยให้สารถูกดูดซับจากกระบอกเก็บสารไหลเข้าแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายใน เกิดการระเหยเป็นไอไหลเข้าเครื่องดูดซับและถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับกระบวนการนี้เรียกว่า การดูดซับ (Adsorption process) ในช่วงนี้จะระบายความร้อนออกจากชั้นสารดูดซับอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงจาก T_4 เป็น T_1 ที่ความดันคงที่ P_e ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้เรียกว่า isobaric cooling ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก x_2 เป็น x_1 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับ (ความดันภายในระบบของมีค่าเท่ากัน) จึงถือเป็นการสิ้นสุดวัฏจักรการทำงานของระบบ

2.1.3 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

จากแผนภาพการทำงานของวัฏจักรระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 อัตราการถ่านเทความร้อนในแต่ละกระบวนการ สามารถคำนวณได้จาก



รูปที่ 2.2 กราฟ P-T-x แสดงการทำงานของระบบใน 1 วัฏจักร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขั้นตอนที่ 1: ความร้อนที่ใช้ระหว่างกระบวนการ 1-2

$$Q_{1-2} = \left(c_{p,ac} + c_{p,met} x_{\max}\right)\left(T_2 - T_1\right) \tag{2.1}$$

ขั้นตอนที่ 2: ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ 2-3 ซึ่งประกอบด้วย

ก.)ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิสารดูดซับจาก T_2-T_3

ข.)ความร้อนสำหรับสารถูกดูดซับโดยคำนวณจากมวลเฉลี่ย

$$Q_{2-3} = \left[c_{p,ac} + c_{p,met}\frac{\left(x_{\max} + x_{\min}\right)}{2}\right]\left(T_3 - T_2\right) + \left(x_{\max} - x_{\min}\right)H_{des} \tag{2.2}$$

$$H_{des} = RT_1T_2\left(\frac{\ln P_2 - \ln P_1}{T_2 - T_1}\right) \tag{2.3}$$

ขั้นตอนที่ 3: กระบวนการทำความเย็นช่วง 4-1 คำนวณจากอุณหภูมิเครื่องทำระเหยและอุณหภูมิเริ่มต้น

$$Q_c = \left(x_{\max} - x_{\min}\right)\left[L - c_{p,met}\left(T_1 - T_{evap}\right)\right] \tag{2.4}$$

สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) คำนวณได้จาก

$$COP = \frac{Q_{useful}}{Q_{sensible} + Q_{desensible}} = \frac{Q_c}{Q_{1-2} + Q_{2-3}} \tag{2.5}$$

เมื่อ $x_{\max}$ คือ ความเข้มข้นสูงสุดในเครื่องดูดซับ (kg_{met}/kg_{ac})

$x_{\min}$ คือ ความเข้มข้นน้อยสุดในเครื่องดูดซับ (kg_{met}/kg_{ac})

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 kJ/kgK)

L คือ ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

SCP (Specific cooling power) คือ อัตราการทำความเย็นจำเพาะ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเย็นที่ทำได้ต่อปริมาณมวลสารดูดซับ (W/kg)

$$SCP = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{m_{adsorbent}} \tag{2.6}$$

เมื่อ $m_{adsorbent}$ คือ มวลสารดูดซับ (kg)

VCP (Volumetric cooling power) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรเครื่องดูดซับต่อความเย็นที่ทำได้ (m^3/W)

$$VCP = \frac{V_{adsorber}}{\dot{Q}_{cooling}} \tag{2.7}$$

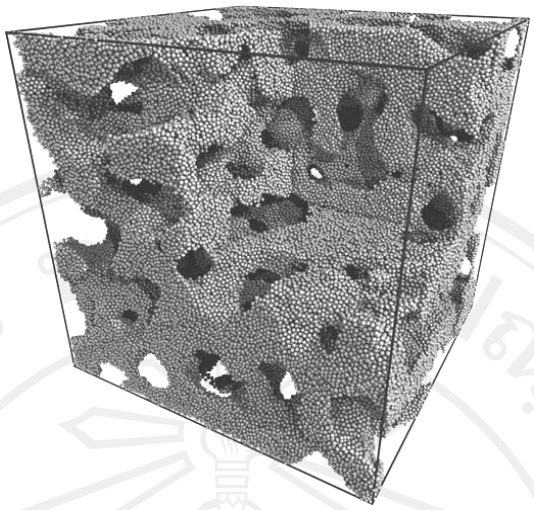
เมื่อ $V_{adsorber}$ คือ ปริมาตรของเครื่องดูดซับ (m^3)

2.2 คุณสมบัติของคู่สารในระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

2.2.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (แสดงดังรูปที่ 2.3) เป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูง เพราะมีรูพรุนขนาด 18 °A ถึง 10,000 °A เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนเหล่านี้ ยังมีอิเลคตรอนที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้อย่างดี การเตรียมถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้ 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่ใช้ อาจจะเป็นสารอินทรีย์เคมีหรือถ่านก็ได้ อินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ได้แก่ สารเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ, กะลามะพร้าว, ขี้เลื่อย, ถ่านหิน เช่น ลิกไนท์, พีท และวัตถุดิบจากสัตว์ เช่น เลือด กระดูก เป็นต้น ส่วนถ่านที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจะเป็นถ่านสังเคราะห์ ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากการเผาอินทรีย์วัตถุ ถ่านธรรมชาติ เช่น กราไฟต์ แอนทราไซต์ อาจนำมาใช้เป็นวัตถุดิบก็ได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของถ่านกัมมันต์
(Modeling the Structure of Nanoporous Materials, 2000)

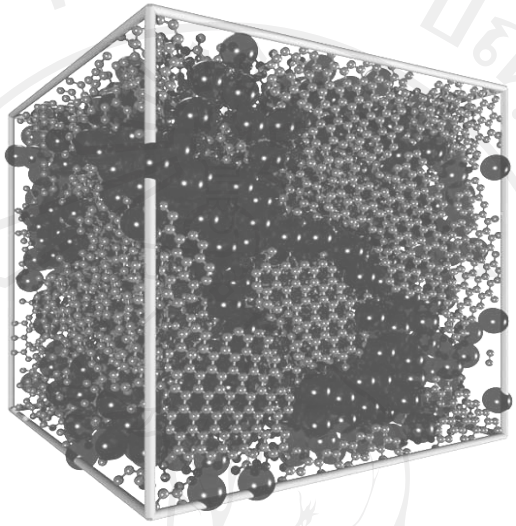
2.2.2 คุณสมบัติของเมทานอล

Methanol หรือ Methyl Alcohol สูตรโครงสร้างแบบย่อ CH_3OH เป็นของเหลวใส ไม่มีสี นิยมนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบในการผลิต formaldehyde และ acetic acid เป็นต้น มีโครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ยังพบ เป็นส่วนประกอบใน gasoline, สีทาบ้าน และแอลกอฮอล์แข็ง เพื่อใช้อุ่นอาหาร ซึ่งต้องมี Methanol ไม่เกิน 1% โดยปริมาณ

รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเมทานอล (Janaki, 2006)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โมเลกุลเมทานอลที่อยู่ในสถานะก๊าซ จะเข้าไปแทรกตัวจับอยู่ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ หรือเรียกอีกอย่างว่าการดูดซับไอเมทานอลของถ่านกัมมันต์ มีการจัดเรียงดังแสดงในรูปที่ 2.5 โครงสร้างขนาดใหญ่คือไอของเมทานอลและโครงสร้างสีอ่อน (โครงถักขนาดเล็กกว่า) คือถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.5 ลักษณะการดูดซับไอเมทานอลของถ่านกัมมันต์
(Modeling the Structure of Nanoporous Materials, 2000)

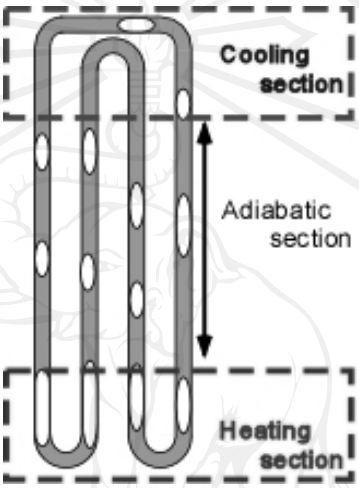
2.3 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อนแบบสั่น

2.3.1 หลักการทำงานเบื้องต้น

ท่อความร้อนแบบสั่นเป็นท่อความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งที่เกิดความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อน เช่นเดียวกับท่อความร้อนทั่ว ๆ ไป แต่ลักษณะและหลักการทำงานจะแตกต่างกัน โดยท่อความร้อนชนิดสั่นมีลักษณะเป็นท่อแคปปิลลารี (ท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กๆ) ที่นำมาดัดให้โค้งกลับไปกลับมา ภายในเป็นสุญญากาศ มีลักษณะเป็นระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย (L_e) ส่วนฉนวน (L_a) และส่วนควบแน่น (L_c) ภายในท่อจะมีสารทำงานอยู่ 2 แบบ คือ ส่วนที่เรียกว่าก้อนของเหลว (Liquid Slug) และส่วนที่เรียกว่าฟองไอ (Vapor Bubble) เมื่อให้ความร้อนในส่วนทำระเหยจะทำให้สารทำงานซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลวอิ่มตัว เกิดการเดือดเป็นฟองและรวมตัวกันเป็นฟองไอ โดยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และลอยผ่านส่วนกันความร้อนไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ฟองไอจะเกิดการควบแน่นและยุบตัวไปในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อ จำนวนโค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย โดยคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนมีค่าสูง แต่ต้องไม่เกินค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต ความยาวส่วนทำระเหยของท่อมีค่าต่ำ จำนวนโค้งเลี้ยวที่มากจะทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถทำงานในมุมการทำงานที่ 0 องศา หรือมุมการทำงานที่ติดลบ (ส่วนทำระเหยอยู่ด้านบน) ได้ (ประภัสสร, 2546)



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
(Heat Transport Mechanism model in Oscillating Heat Pipes with wick, 2007)

2.3.2 ประเภทของท่อความร้อนแบบสั่น

ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบด้วยกันคือ

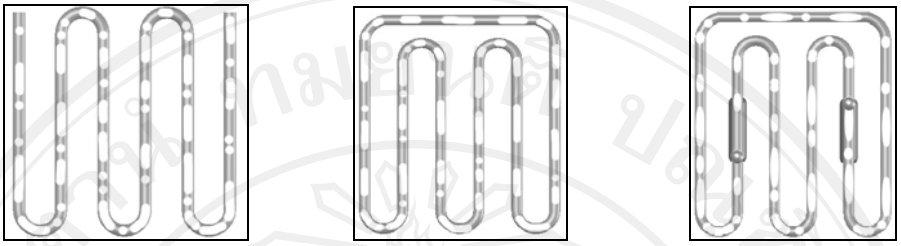
(1) ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-end loop heat pipe, CEOHP) ทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบแคปปิลลารี่ที่ทำปลายปิดทั้งสองข้าง โดยไม่มีเช็ควาล์วและไม่ใช่วงรอบ ดังรูปที่ 2.7(ก)

(2) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed loop heat pipe, CLOHP) ทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบแคปปิลลารี่ยาวที่ถูกขดและเชื่อมติดกันให้เป็นวงรอบ โดยไม่มีเช็ควาล์ว การถ่ายเทความร้อนจะปรากฏในรูปของการสั่นสะเทือน ที่เกิดมาจากคลื่นความดันที่สั่นไปมาอย่างรุนแรง ดังรูปที่ 2.7 (ข)

(3) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีวาล์วกันกลับ (Closed loop heat pipe with Check Valve) ทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบแคปปิลลารี่ยาวที่ถูกขด และเชื่อมติดกันให้เป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

วงรอบ ในวงรอบของท่อความร้อนนั้นจะมีเช็ควาล์วคอยบังคับทิศทางการไหลของสารทำงาน ซึ่งทำหน้าที่พาความร้อนไหลเวียนอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.7 (ค)



ก. Closed-end loop heat pipe ข. Closed loop heat pipe ค. Closed loop heat pipe with Check valve

รูปที่ 2.7 ประเภทของท่อความร้อนแบบสั่น (ท่อความร้อนชนิดสั่น, 2548)

2.3.3 การเลือกใช้สารทำงาน

ในการเลือกใช้สารทำงานสำหรับบรรจุเข้าไปในท่อความร้อน จะแบ่งตามช่วงอุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ โดยสารทำงานที่เหมาะสมตามช่วงอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าอุณหภูมิทำงานของน้ำใน Heat Pipe ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ (Wikipedia, 2008)

สารทำงาน	อุณหภูมิการทำงาน (องศาเซลเซียส)
แอมโมเนีย	-60 – 100
เมทานอล	10 – 130
เอทานอล	0 – 130
น้ำ	30 - 200

จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งกล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่ามีการนำท่อความร้อนมาใช้กับระบบดูดซับบ้าง ในขณะที่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีการใช้งานเพื่อประโยชน์ด้านอื่น ยังไม่พบว่ามีการนำมาใช้เพื่อการระบายความร้อนในระบบดูดซับ จึงเป็นที่มาของปัญหาวิจัยสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ที่มุ่งเน้นศึกษาผลการนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบปลายปิดมาช่วยในช่วงการระบายความร้อนของการดูดซับ และประเมินสมรรถนะของระบบเมื่อทำงานในสภาวะเงื่อนไขหลากหลายต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved