

บทที่ 4

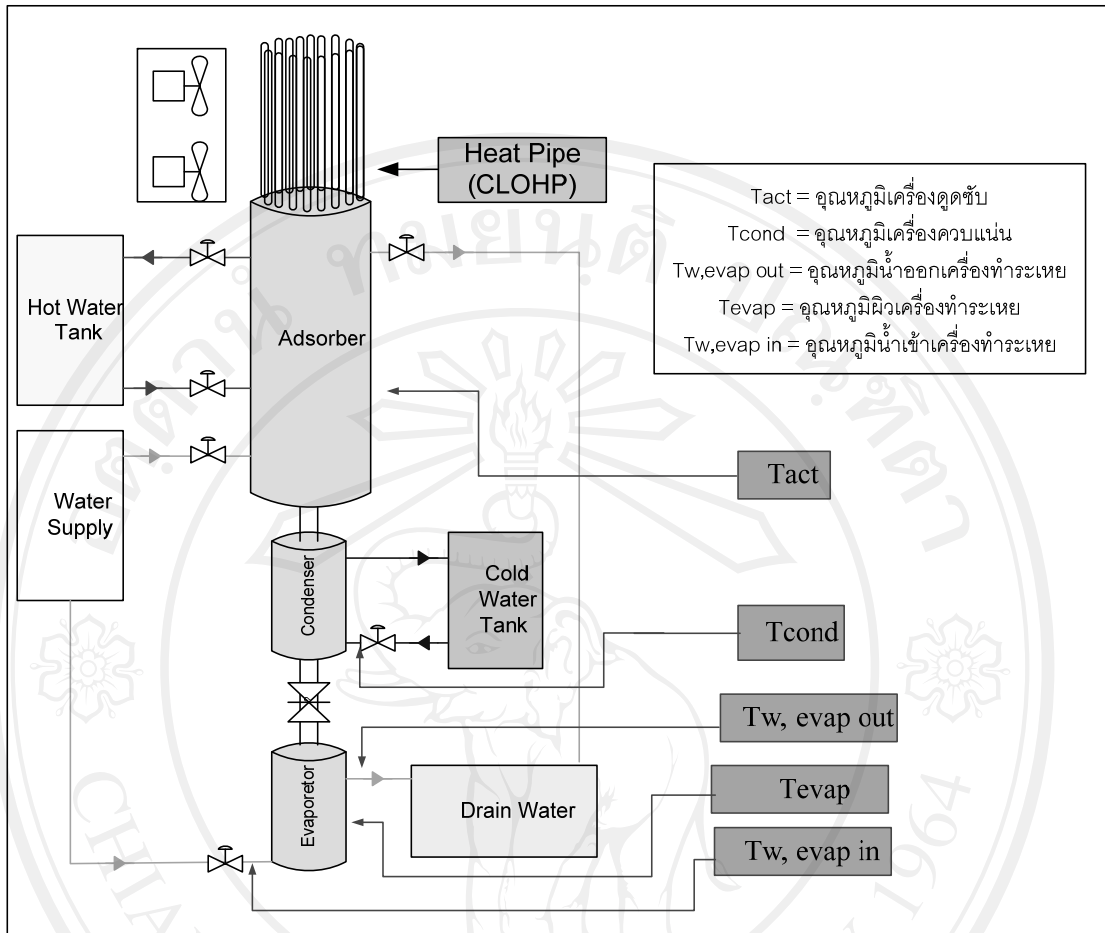
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์จากผลการทดสอบระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้ร่วมกับท่อความร้อน และใช้ถ่านกัมมันต์-เมทานอลเป็นคู่สารทำงาน ข้อมูลที่อภิปรายประกอบด้วย ผลเปรียบเทียบการใช้ท่อความร้อนกับระบบน้ำหล่อเย็นในการระบายความร้อนจากเครื่องดูดซับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อัตราความร้อนที่ถ่ายเท สมดุลพลังงานของเครื่องดูดซับ สมรรถนะของระบบ แบบจำลองจากการทดลอง (Empirical model) สำหรับทำนายสมรรถนะของระบบ และแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ

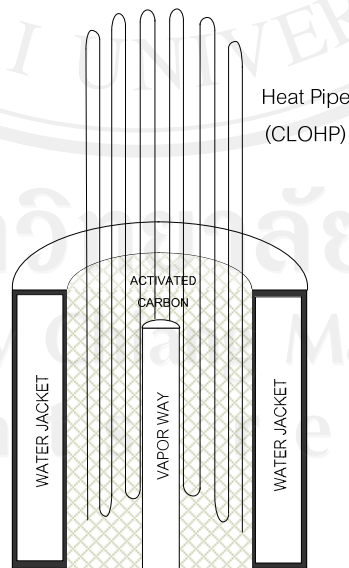
4.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้ร่วมกับท่อความร้อน

ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed Loop Oscillating Heat Pipe: CLOHP) ได้ถูกนำมาติดตั้งในเครื่องดูดซับ (Adsorber) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยในช่วงหลังการคายสารดูดซับระบบจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่ได้รับมาจากแหล่งความร้อนในช่วงการคายสารดูดซับออกไป โดยทั่วไปวิธีการระบายความร้อนจากเครื่องดูดซับทำได้โดยการใช้น้ำหล่อเย็นหมุนเวียนบริเวณส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน (Water jacket) ของเครื่องดูดซับ เป็นการระบายความร้อนทางเดียว ความร้อนที่สะสมภายในสารดูดซับของเครื่องดูดซับต้องถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุสารดูดซับ (Adsorbent material) หรือถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และส่วนอื่นที่ไม่ใช่สารดูดซับ (Non-adsorbent material) มายังผนังท่อทองแดง ก่อนจะถ่ายเทไปยังสารถ่ายโอนความร้อนที่ไหลเวียนใน Water jacket ต่อไป

กรรมวิธีการเพิ่มอัตราการระบายความร้อนแก่เครื่องดูดซับ คือการติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบแทรกเข้าไปภายในเบดของสารดูดซับ (Adsorbent bed) ทำให้พื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้นและใช้หลักการทำงานแบบท่อความร้อนช่วยดูดความร้อนเพื่อระบายออกไปอีกทางหนึ่ง



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการติดตั้งส่วนประกอบชุดทดสอบ



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบภายในเครื่องดูดซับ

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

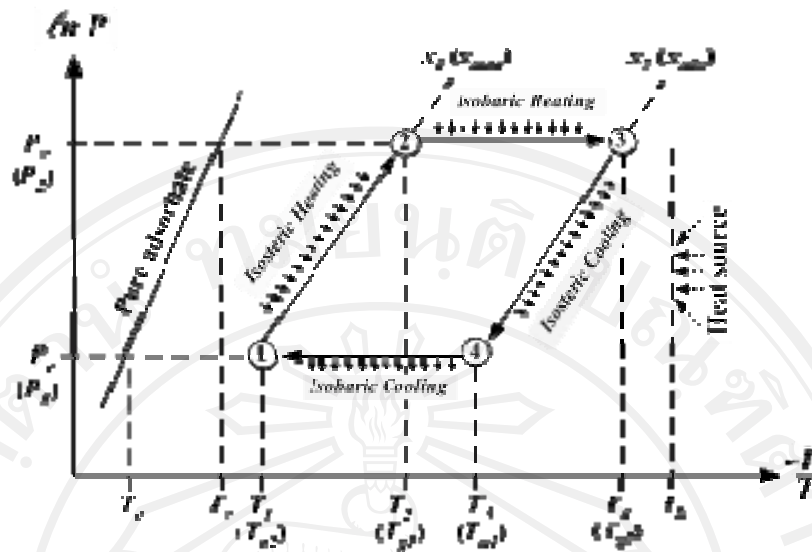
การวิเคราะห์ผลการทดสอบระบบดูดซับในงานวิจัยนี้ตามวัตถุประสงค์ของที่ 1 นำเสนอ โดยจัดแบ่งออกเป็น 7 ส่วน ตั้งแต่หัวข้อ 4.2.1 ถึง 4.2.7 ดังนี้

- (1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการรับและระบายความร้อนของวัฏจักรทำงานของระบบดูดซับ ที่แสดงโดยแผนภาพความดัน-อุณหภูมิ-ความเข้มข้นของสารทำความเย็นในสารดูดซับ (P-T-x diagram)
- (2) การทำงานของท่อความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการระบายความร้อนอื่น ได้แก่ การใช้น้ำหล่อเย็น
- (3) การแปรผันอุณหภูมิของเครื่องดูดซับตลอด 3 วัฏจักรติดต่อกัน
- (4) การเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องดูดซับที่สภาวะการทำงาน 6 วัฏจักรที่แตกต่างกัน
- (5) สมดุลพลังงานของเครื่องดูดซับ ในรูปส่วนความอัตราการถ่ายเทความร้อนของแต่ละองค์ประกอบ และส่วนแบ่งคิดเป็นร้อยละ
- (6) สมรรถนะของระบบในรูปสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ ได้แก่ SCP และ VCP เมื่อได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องดูดซับและอุณหภูมิเครื่องควบแน่น จากนั้นจึงประมวลผลค่าตัวแปรและสมรรถนะของระบบจากการทดลองทั้งหมด 27 ชุดการทดลอง โดยข้อมูลอุณหภูมิ อัตราการไหล ความดัน และปริมาตรเมทานอล ที่บันทึกได้จากการทดลอง ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และพลังงานภายในเครื่องดูดซับ
- (7) การเปรียบเทียบสมรรถนะระบบดูดซับจากงานวิจัยนี้กับระบบดูดซับในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องซึ่งพบในเอกสารอ้างอิง (Literature)

4.2.1 แผนภาพ ความดัน-อุณหภูมิ-ความเข้มข้น (P-T-x diagram) ของวัฏจักรดูดซับ

แผนภูมิสมดุลความดัน-อุณหภูมิ-อัตราส่วนการดูดซับของสารทำงาน (P-T-x) ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นช่วงที่ต้องการระบายความร้อนคือช่วง Isosteric Cooling และ Isobaric Cooling หรือช่วงหมายเลข 3-4, 4-1 ซึ่งช่วงก่อนกระบวนการดูดซับจำเป็นต้องระบายพลังงานความร้อนออกจากสารดูดซับก่อน เพื่อให้อุณหภูมิและความดันของเครื่องดูดซับลดลงจนอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อกระบวนการดูดซับ (ช่วง 3 – 4 ของรูปที่ 4.3)

การระบายความร้อนในช่วงการดูดซับ ทำเพื่อให้ปฏิกิริยาดูดซับซึ่งเป็นแบบคายความร้อนเกิดขึ้นได้ดี และเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium) ได้ช้าลง (ช่วง 4 – 1 ของรูปที่ 4.3) การระบายความร้อนด้วยอัตราที่สูงจะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในรอบวัฏจักรสั้นลง



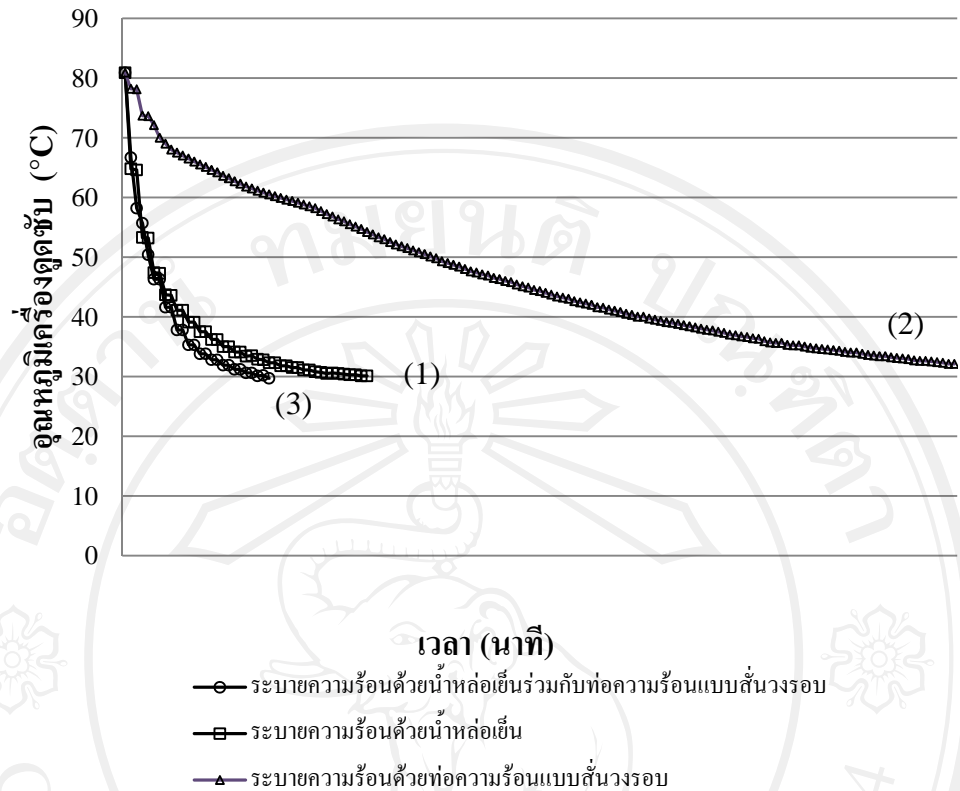
รูปที่ 4.3 แผนภาพความดัน-อุณหภูมิ-อัตราส่วนการดูดซับ (P-T-x) ถ่านกัมมันต์และเมทานอล

4.2.2. การทำงานของท่อความร้อน

การระบายความร้อนโดยน้ำหล่อเย็นหมุนเวียนผ่าน Water jacket ในช่วง Isosteric cooling และ Isobaric cooling ไม่เพียงพอที่จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาดูดซับเกิดขึ้นได้ดี จึงได้ทดสอบเปรียบเทียบการระบายความร้อน 3 รูปแบบ ได้แก่

- 1) การใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (CLOHP) เพียงอย่างเดียว ซึ่งท่อความร้อนมีสารทำงานเมทานอลเดิมอยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยปริมาตร
- 2) การใช้น้ำหล่อเย็น (Cooling water) ระบายความร้อนผ่าน Water jacket เพียงอย่างเดียว
- 3) การใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบระบายความร้อนจากภายใน ร่วมกับ การใช้น้ำหล่อเย็นระบายความร้อนผ่าน Water jacket

โดยแสดงผลในรูปการลดลงของอุณหภูมิเครื่องดูดซับตามเวลา เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิ ลดลงจาก 80°C เป็น 30°C ดังรูปที่ 4.4 ผลปรากฏว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิแตกต่างกัน สรุปได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 การระบายความร้อนในเครื่องดูดซับ (1) กรณีใช้น้ำหล่อเย็นอย่างเดียว (2) ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบอย่างเดียว (3) กรณีใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับน้ำหล่อเย็น

กรณีที่ (3) การใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับน้ำหล่อเย็น ทำให้อัตราการระบายความร้อนเร็วที่สุด โดย

- 1) การลดลงของอุณหภูมิในช่วง 10 นาทีแรก เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะอุณหภูมิในเครื่องดูดซับกับอุณหภูมิจนอากาศต่างกันมาก
- 2) จากนั้นอัตราการลดอุณหภูมิในเครื่องดูดซับจะลดลงเรื่อย ๆ โดยกระบวนการนี้ใช้เวลาทั้งหมดเพียง 26 นาที
- 3) เมื่อเปรียบเทียบกรณีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบร่วมกับน้ำหล่อเย็นกับการใช้น้ำหล่อเย็นเพียงอย่างเดียว (กรณี (1)) พบว่า สามารถลดเวลาในกระบวนการได้ถึงร้อยละ 42
- 4) กรณีใช้ร่วมกันสามารถลดเวลาในการระบายความร้อนให้สั้นลง เนื่องจาก
 - ก. ท่อความร้อนใช้การเดือดของสารทำงานภายในเพื่อพาความร้อนออกจากระบบไประบายสู่สิ่งแวดล้อมที่ส่วนควบแน่น โดยค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอน้ำมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าอัตราการนำและพาความร้อนของน้ำหล่อเย็น และ

- ข. การวางตำแหน่งของท่อความร้อนสามารถแทรกเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและลดระยะทางการส่งถ่ายความร้อนจากถ่านกัมมันต์สู่ผิวกระบอกที่สัมผัสกับ Water Jacket ทำให้การระบายความร้อนเกิดได้เร็วขึ้น

สรุปได้ว่า การระบายความร้อน โดยใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวางรอบร่วมกับน้ำหล่อเย็น สามารถลดอุณหภูมิและเวลาของช่วง Isosteric Cooling ได้รวดเร็วที่สุด ดังนั้นในการทดสอบต่อจากนี้ จะใช้การระบายความร้อนในลักษณะนี้ โดยจะเน้นการศึกษาผลของตัวแปรอื่นต่อไป

4.2.3 อุณหภูมิของเครื่องดูดซับ

การแปรผันของอุณหภูมิเครื่องดูดซับตลอดวัฏจักรทำงาน แสดงให้เห็นสมรรถนะของการให้และระบายความร้อน หรือผลการรับพลังงานจากแหล่งความร้อนและการระบายความร้อนสู่เป้าหมายที่ต้องการ โดยชุดทดสอบนี้ได้รับการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกได้สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชุดทดสอบ 3 ช่วงวัฏจักรการดูดซับที่ทำงานต่อเนื่องกัน ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน คืออุณหภูมิถ่านกัมมันต์ในเครื่องดูดซับสูงสุดคือ 90°C และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นคือ 15°C สำหรับวัฏจักรแรก (เวลาที่ 0-70 นาที) สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

- (1) ช่วงให้ความร้อน (Heating process) การให้ความร้อนแก่เครื่องดูดซับโดยน้ำถ่ายโอนความร้อนในช่วงอุณหภูมิ $93^{\circ}\text{C} - 96^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาประมาณ 10 ถึง 15 นาที จนเครื่องดูดซับมีอุณหภูมิเป็น 80°C สังเกตได้ว่าอุณหภูมิในเครื่องดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง
- (2) ช่วงให้ความร้อนและคายสารดูดซับ (Heating and Desorption process) เมื่ออุณหภูมิในเครื่องดูดซับสูงถึง 80°C ทำการเปิดวาล์วในระบบพร้อมกับป้อนน้ำเย็นเข้าสู่เครื่องควบแน่น ในขณะที่การให้ความร้อนแก่เครื่องดูดซับอย่างต่อเนื่องจนอุณหภูมิเครื่องดูดซับเป็น 90°C เวลาในกระบวนการนี้ประมาณ 15 นาที จากนั้นปิดวาล์วทันที พร้อมกับระบายน้ำออกจากเครื่องควบแน่น

กระบวนการนี้เมทานอลจะเกิดการหลุดออกจากถ่านกัมมันต์ในสถานะไอ และเคลื่อนลงสู่เครื่องควบแน่น เมื่อไอเมทานอลควบแน่นความร้อนจะถ่ายโอนสู่น้ำหล่อเย็น และคอนเดนเสทจะเก็บสะสมอยู่ในเครื่องทำระเหยต่อไป

เมื่อเปิดวาล์วระบายไอเมทานอลจากเครื่องดูดซับ เพื่อไหลไปยังเครื่องควบแน่น อุณหภูมิเครื่องดูดซับจะลดลงเล็กน้อย (ที่เวลา 15 นาที, 85 นาที และ 165 นาที) เนื่องจากไอเม

ทานอลที่สะสมอยู่ในเครื่องดูดซับถูกควบแน่นทันที จากการสูญเสียความร้อนของระบบในบางตำแหน่ง เมื่อทำการให้ความร้อนแก่ระบบต่อไปพบว่าความชื้นของกราฟจะชันน้อยกว่าช่วงให้ความร้อนก่อนเปิดวาล์ว เนื่องจากความร้อนถูกใช้ในการแยกพันธะระหว่างผิวถ่านกัมมันต์กับเมทานอลประกอบกับไอเมทานอลได้พาความร้อนออกไปยังส่วนเครื่องควบแน่นด้วยอีกทางหนึ่ง

- (3) ช่วงการระบายความร้อน (Cooling process) เป็นการดึงความร้อนออกจากเครื่องดูดซับ เพื่อให้ระบบเย็นลง และเตรียมเครื่องดูดซับให้พร้อมสำหรับช่วงการดูดซับต่อไป ซึ่งกระบวนการนี้จะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิในเครื่องดูดซับลดลงถึงอุณหภูมิประมาณ 40°C ในกระบวนการนี้สังเกตได้ว่า อุณหภูมิในเครื่องดูดซับลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลาประมาณ 10 นาที เนื่องมาจากการใช้น้ำหล่อเย็นร่วมกับท่อความร้อน ทำให้สามารถเริ่มกระบวนการต่อไปได้เร็วขึ้น
- (4) ช่วงการดูดซับ (Adsorption process) เป็นกระบวนการที่สารดูดซับได้ดูดไอซังเมทานอลที่มาจากเครื่องทำระเหย เริ่มต้นจากการเปิดวาล์วในระบบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการระบายความร้อน โดยน้ำที่ป้อนเข้าสู่เครื่องทำระเหยทำให้เมทานอลเดือดและกลายเป็นไอ ซึ่งเมื่อมีการเปิดวาล์วในระบบพบว่าอุณหภูมิในเครื่องดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลไอเมทานอลปริมาณมากเข้าไปเกาะที่ผิวของถ่านกัมมันต์และทำปฏิกิริยากันอย่างรวดเร็ว (กันทิมา เอี่ยมมาก, 2548) และคายความร้อนจากการดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเมทานอลออกมา

หากอัตราการระบายความร้อนไม่ทันอุณหภูมิสารดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณเมทานอลที่เข้าจับถ่านกัมมันต์ลดลง ในเวลาที่ผ่านไปอุณหภูมิถ่านกัมมันต์จึงลดลงอย่างช้าๆ จนปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล ใช้เวลาในกระบวนการนี้ ประมาณ 30 – 40 นาที ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องดึงความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาออกในอัตราที่เพียงพอกับอัตราความร้อนที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างคู่สารทำงาน เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าไม่หยุดชะงัก จากนั้นจึงปิดวาล์วในระบบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ โดยสังเกตจากอุณหภูมิภายในเครื่องดูดซับเข้าใกล้ 30°C

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของทั้ง 3 วัฏจักรที่ต่อเนื่องกันถูกนำมาคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในช่วงคายสารดูดซับ คือ 614 W, 635 W และ 643 W ตามลำดับ ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน และแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือในการเป็นตัวแทนข้อมูลที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ในลำดับต่อไป (Reliability)

4.2.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องดูดซับ

อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในและออกไปสู่ภายนอกของเครื่องดูดซับ ที่เปลี่ยนแปลงตลอดวัฏจักรแสดงให้เห็นผลสัมฤทธิ์ของการออกแบบเครื่องดูดซับว่าจะทำให้วัฏจักรดูดซับทำงานได้เร็วขึ้นหรือไม่อย่างไร ข้อมูลอัตราการไหล อุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิขาออกของน้ำถ่ายโอนความร้อนในแต่ละช่วงกระบวนการ สามารถนำมาวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับระบบที่ทำงาน 6 วัฏจักรต่อเนื่องกัน เงื่อนไขสำหรับแต่ละวัฏจักรกำหนดโดย (อุณหภูมิสูงสุดในเครื่องดูดซับ ($^{\circ}\text{C}$), อุณหภูมิเครื่องควบแน่น($^{\circ}\text{C}$)) ดังนี้ (70,5), (70,10), (80,5), (80,10), (90,5) และ(90,10) $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ โดยแบ่งได้เป็น 4 ช่วงการทำงานคือ

- (1) ช่วงการให้ความร้อน (Heating process)
- (2) ช่วงการให้ความร้อนและคายสารดูดซับ (Heating and desorption process)
- (3) ช่วงการระบายความร้อน (Cooling process) และ
- (4) ช่วงการระบายความร้อนและการดูดซับ (Cooling and adsorption process)

ความร้อนที่ให้กับระบบในช่วงที่ (1) และที่ (2) จะมีค่าเป็นบวก (+) ในขณะที่ความเย็นที่ระบายออกจากระบบในช่วงที่ (3) และ (4) จะมีค่าเป็นลบ (-) รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าในช่วง Heating process อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 5 นาทีแรกของวัฏจักรทำงานของระบบดูดซับ

ช่วง Heating process มีความแตกต่างกันอย่างมากของอุณหภูมิที่ร้อนกับเครื่องดูดซับ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมาก จากนั้นเมื่อกระบวนการเริ่มเข้าสู่ช่วง Heating and desorption process ได้มีการเปิดวาล์วในระบบทำให้อุณหภูมิของถ่านกัมมันต์ลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย

เมื่อเริ่มกระบวนการ Cooling Process ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างเครื่องดูดซับกับน้ำหล่อเย็นในตอนเริ่มต้นอย่างมากทำให้ได้กราฟแหลมที่มลง ช่วงนี้น้ำหล่อเย็นเพื่อการระบายความร้อนอุณหภูมิ 27°C ถูกส่งเข้าสู่เครื่องดูดซับ พร้อมกับการเริ่มทำงานของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ โดยช่วงที่มีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด คือช่วง 5 นาทีแรกที่น้ำถูกส่งเข้าเครื่องดูดซับ จากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเรื่อย ๆ จนอุณหภูมิเครื่องดูดซับลดลงเหลือ 40°C จึงเริ่มกระบวนการดูดซับ

ในกระบวนการระบายความร้อนและดูดซับ (Cooling and adsorption process) น้ำระบายความร้อนยังคงถูกส่งเข้าสู่ระบบ เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องดูดซับให้เหมาะสมกับการ

เกิดกระบวนการดูดซับอยู่เสมอ อัตราการถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้มีค่าน้อยมาก เนื่องจากมีเพียงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาดูดซับเท่านั้น ซึ่งมีค่าไม่สูงกว่าความร้อนแฝงของสารทำความเย็นนัก โดยค่าเฉลี่ย (ตลอด 6 วัฏจักร) ของอัตราการถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้ คือ 80 W

ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในระบบสามารถนำมาหาค่าสมรรถนะของระบบ (COP) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงสัดส่วนระหว่างพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (อัตราการทำความเย็นหรือการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของ Cooling and Adsorption process) ต่อปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้าไป (อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยรวมของ 2 ช่วงคือ Heating process และ Heating and Cooling process) ดังแสดงในสมการที่ 2.5 ของบทที่ 2

4.2.5 สมดุลพลังงานของเครื่องดูดซับ

สมดุลพลังงานของเครื่องดูดซับ เป็นการแสดงสัดส่วนของการกระจายความร้อนในช่วงการทำงาน 4 ช่วงของวัฏจักรการดูดซับ โดยช่วงการคายสารดูดซับ ความร้อนที่ได้รับจากน้ำร้อนหรือแหล่งความร้อนจะถูกถ่ายโอนไปยังองค์ประกอบต่างๆ และมีส่วนหนึ่งสูญเสียไป แต่ส่วนที่ต้องการได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพที่สุด คือ แท่นสารดูดซับ การทำสมดุลพลังงานจะทำให้ทราบได้ว่าถ่านกัมมันต์ได้รับความร้อนไปในสัดส่วนเท่าใดจากทั้งหมด ในทางกลับกันในช่วงการดูดซับสาร ความร้อนจะต้องถูกระบายออกจากแท่นสารดูดซับอย่างรวดเร็วและแพร่ออกไปยังน้ำหล่อเย็นใน Water jacket และ CLOHP โดยรวดเร็วและมีประสิทธิผลเช่นกัน

ผลการวิเคราะห์ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกจากองค์ประกอบต่าง ๆ ในเครื่องดูดซับแสดงในรูปสมดุลพลังงานของเครื่องดูดซับ ตลอดช่วงวัฏจักรทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ในการทดลองที่กำหนดอุณหภูมิเครื่องดูดซับ 80°C และอุณหภูมิเครื่องควบแน่นคือ 10°C สำหรับค่าอัตราความร้อน (J) กับร้อยละการกระจายพลังงานในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องดูดซับ

สมดุลพลังงานในระบบดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการคายสารดูดซับ และช่วงการดูดซับ

(1) **ช่วงการคายสารดูดซับ** ประกอบด้วย ช่วงการให้ความร้อน และ ช่วงการให้ความร้อนพร้อมกับการคายสารดูดซับ รูปที่ 4.5 (ก) แสดงถึงค่าอัตราความร้อน และ รูปที่ 4.5 (ข) แสดงถึงร้อยละค่าการถ่ายเทความร้อน สังเกตได้ว่า

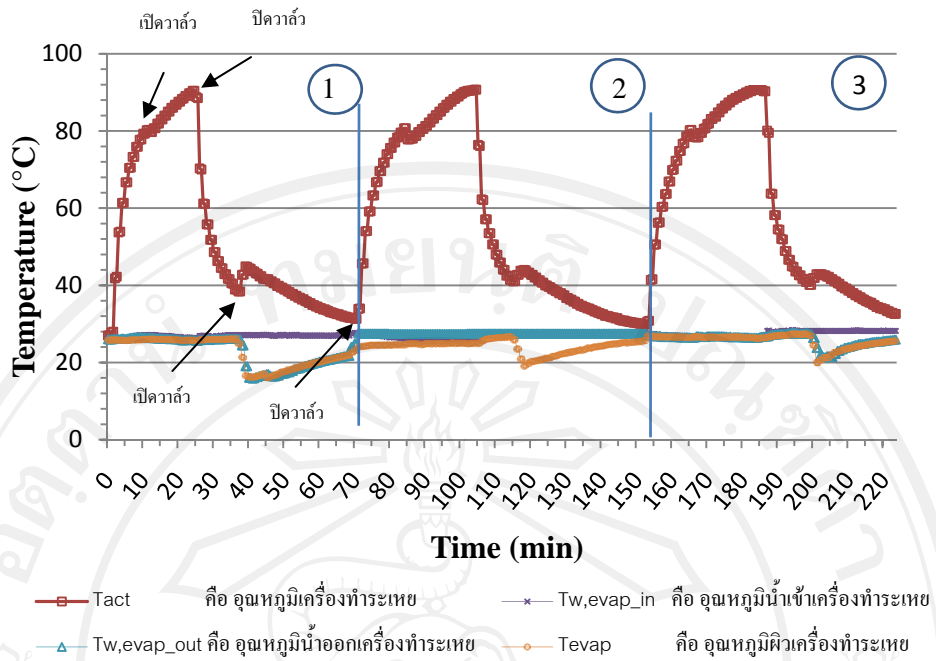
ก. ช่วงให้ความร้อนต้องการให้ความร้อนแก่ถ่านกัมมันต์เป็นหลัก แต่พลังงานความร้อนสะสมอยู่ในทองแดงมากที่สุด คือ 17.6 W คิดเป็นร้อยละ 35 ของพลังงานที่ให้ทั้งหมด ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ได้รับเพียง 9 W หรือร้อยละ 18

- ข. ความร้อนสูญเสียมีค่าถึง 14.6 W ในช่วงให้ความร้อน และ 24.9 W สำหรับช่วงให้ความร้อนและคายสารดูดซับ คิดเป็นร้อยละ 29 และ 25.6 ตามลำดับ โดยการสูญเสียความร้อนนี้เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องดูดซับไปยังอุปกรณ์ชิ้นอื่นในระบบที่ต่อเชื่อมกัน โดยไม่มีส่วนฉนวนกัน (Adiabatic section) เช่น ท่อทางเดินสารทำงานที่ต่อเชื่อมกับเครื่องดูดซับไปยังเครื่องควบแน่น รวมไปถึงโครงสร้างของชุดทดสอบที่ประกอบด้วยเหล็กและทองแดง
- ค. สามารถแก้ไขการสูญเสียความร้อนออกนอกระบบได้โดยการเพิ่มฉนวนรอบเครื่องดูดซับ เพื่อไม่ให้เครื่องดูดซับสัมผัสกับวัสดุแวดล้อม และสิ่งแวดล้อมโดยตรง และเพิ่ม Adiabatic section กันระหว่างเครื่องดูดซับและระบบท่อที่ต่อเชื่อมไปยังเครื่องควบแน่น
- ง. เครื่องดูดซับสามารถนำความร้อนไปใช้ในการคายสารดูดซับได้ถึง 39.7 W คิดเป็นร้อยละ 41 ของพลังงานความร้อนที่ให้แก่เครื่องดูดซับในช่วงให้ความร้อนและคายสารดูดซับ แสดงว่าปริมาณความร้อนที่จ่ายเพื่อการแตกพันธะเมทานอลออกจากถ่านกัมมันต์มากพอ
- จ. ช่วงการให้ความร้อนและคายสารดูดซับนี้ที่อุณหภูมิแบบสั้นวงจร (CLOHP) ยังไม่ทำงาน เนื่องจากได้ป้องกันการระเหยของสารทำงานเมทานอลในส่วนที่ระเหยของ CLOHP เอาไว้แล้ว โดยหุ้มฉนวนที่ส่วนควบแน่นของ CLOHP ไว้และด้วยขนาดที่เล็กของ CLOHP เมื่อเทียบกับแท่นสารดูดซับ ทำให้ความร้อนสะสมในส่วน CLOHP มีสัดส่วนน้อยมาก คือไม่ถึงร้อยละ 1 ของพลังงานที่ให้ทั้งหมด
- (2) ช่วงการดูดซับ ประกอบด้วย ช่วงระบายความร้อน และ ช่วงการระบายความร้อนพร้อมกับการดูดซับ ดังรูปที่ 4.5 (ค) แสดงถึงค่าอัตราความร้อน และ รูปที่ 4.5 (ง) แสดงถึงร้อยละค่าการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประเด็นได้ว่า
- ก. ช่วงระบายความร้อน ความร้อนสัมผัสในส่วนท่อทองแดงของถูกระบายออกไปมากที่สุด โดยมีค่าถึง 20 W คิดเป็นร้อยละ 37 ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ระบายออกไป 10.3 W คิดเป็นร้อยละ 19 ซึ่งในช่วงการระบายความร้อนต้องการสัดส่วนการระบายจากถ่านกัมมันต์ที่มากด้วยอัตราที่สูง หากเพิ่มการแพร่และการพาความร้อนออกจากถ่านกัมมันต์ได้ ในขณะที่เดียวกันก็ลดการสูญเสียความร้อนที่มีอยู่ถึง 13 W หรือร้อยละ 24.4 ได้ จะทำให้ลดอุณหภูมิได้เร็วยิ่งขึ้น
- ข. ช่วงการระบายความร้อนร่วมกับการดูดซับสาร เครื่องดูดซับมีความร้อนที่เกิดจากการดูดซับออกมาเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 60 เท่ากับ 39.7 W ซึ่งมีค่าสูง และต้องการ

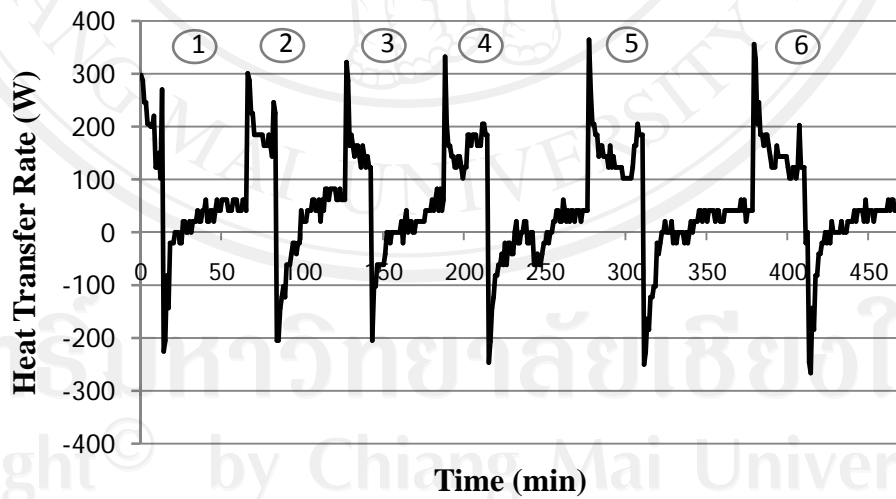
ระบายออกไปอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้กระบวนการดูดซับสิ้นสุดก่อนเวลาอันควร และขณะเดียวกันพบว่าความร้อนสูญเสียถึง 12.1 W หรือคิดเป็นร้อยละ 18 ของระบบ อย่างไรก็ตามความร้อนสามารถถ่ายโอนความร้อนออกจากเครื่องดูดซับได้ถึงร้อยละ 13 และร้อยละ 4 สำหรับทั้งสองช่วงตามลำดับจากการนำความร้อน นอกเหนือจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานที่ส่วนทำระเหย

รายการสัญลักษณ์สำหรับรูปที่ 4.7 มีดังนี้

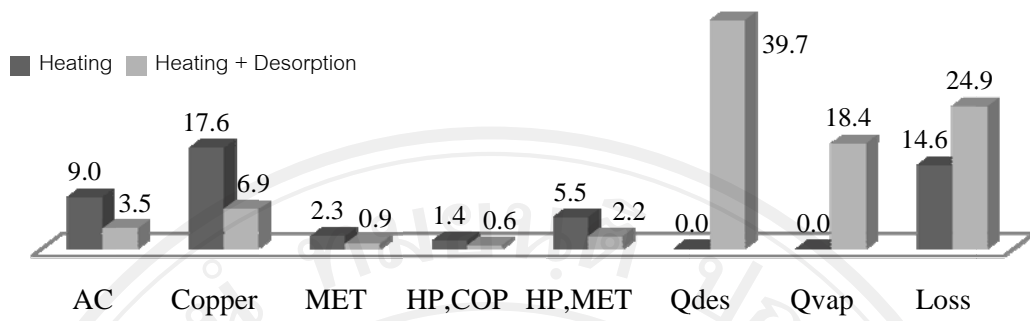
AC	คือ ความร้อนสัมผัสในถ่านกัมมันต์
Copper	คือ ความร้อนสัมผัสในเครื่องดูดซับและท่อน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนที่เป็นทองแดง
HP,MET	คือ ความร้อนสัมผัสในเมทานอลภายในท่อความร้อน
HP,COP	คือ ความร้อนสัมผัสในท่อความร้อนส่วนที่เป็นทองแดง
MET	คือ ความร้อนสัมผัสในเมทานอลที่อยู่ภายในเครื่องดูดซับ
Qdes	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในกระบวนการคายสารถูกดูดซับ
Qvap	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไอเมทานอลพาออกจากเครื่องดูดซับ
Qads	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากกระบวนการดูดซับ
Qconv	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไอเมทานอลพาเข้าสู่เครื่องดูดซับ
Loss	คือ ความร้อนส่วนที่ไม่สามารถประเมินสาเหตุได้ (Unaccountable) จึงพิจารณาเป็นความร้อนที่สูญเสียจากเครื่องดูดซับ



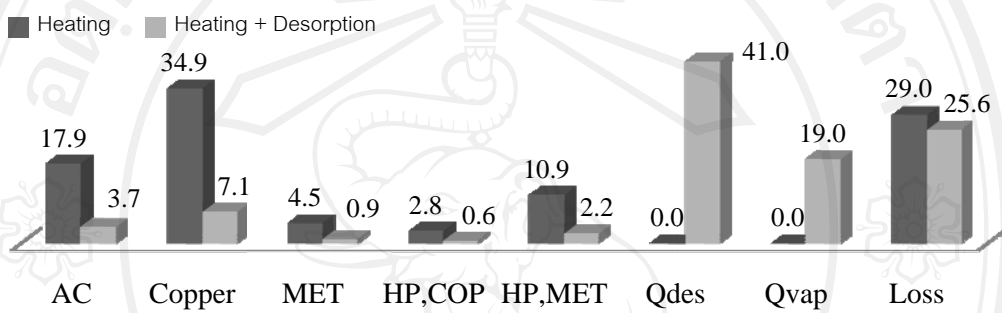
รูปที่ 4.5 การกระจายอุณหภูมิของชุดทดสอบตลอดช่วงการทดสอบ
 เมื่ออุณหภูมิเครื่องดูดซับสูงสุดคือ 90°C และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นคือ 15°C



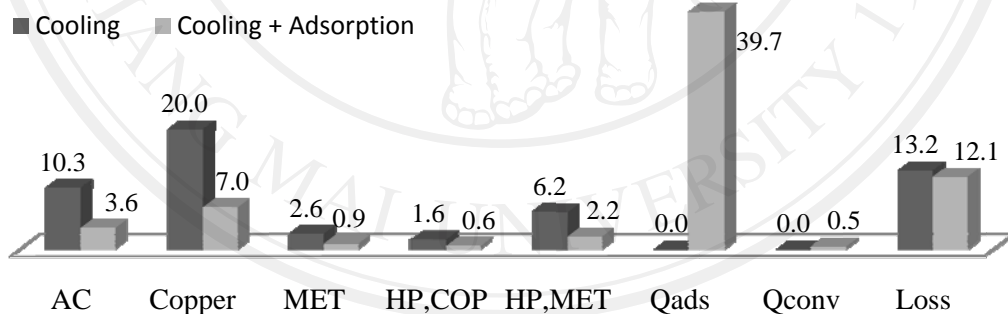
รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ 6 รอบวัฏจักร



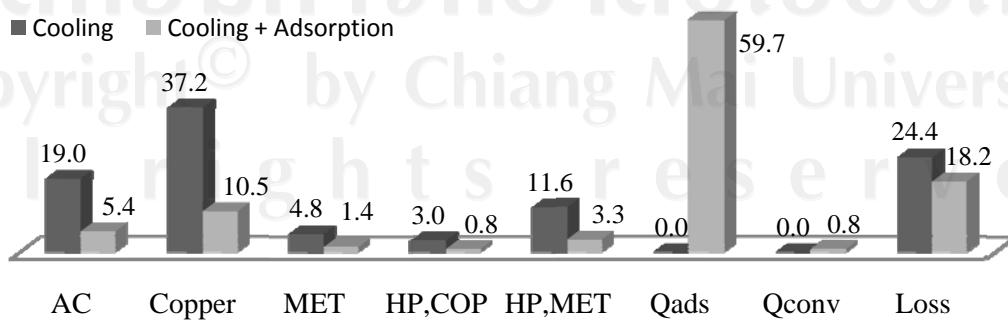
(ก) พลังงานในช่วงให้ความร้อนและช่วงคายสารดูดซับ (kJ)



(ข) ร้อยละพลังงานในช่วงให้ความร้อนและคายสารดูดซับ (%)



(ค) พลังงานในช่วงระบายความร้อนและช่วงดูดซับ (kJ)



(ง) ร้อยละพลังงานในช่วงระบายความร้อนและช่วงดูดซับ (%)

รูปที่ 4.7 สมดุลพลังงานของเครื่องดูดซับ ที่อุณหภูมิเครื่องดูดซับ 80 °C เครื่องทำระเหย 10 °C

จากการแสดงสมดุลพลังงานของเครื่องดูดซับตามรูปที่ 4.7 พบว่า ความร้อนสูญเสียเกิดขึ้นในทุกช่วงกระบวนการ และจำเป็นที่ต้องหาวิธีการลดค่าความร้อนสูญเสียนี้ให้มากที่สุดเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบสัดส่วนของความร้อนสัมผัสจากทั้ง 2 กระบวนการ พบว่า

- (1) ท่อทองแดงของเครื่องดูดซับมีส่วนของพลังงานความร้อนสะสมที่มากที่สุด อาจเกิดจากความหนาของชั้นทองแดงที่นำมาเป็นผนังเครื่องดูดซับมากเกินไปทำให้พื้นที่ส่วนที่เป็นทองแดงมากตามไปด้วย
- (2) ควรหาค่าความหนาของทองแดงที่เหมาะสม และลดปริมาตรขององค์ประกอบที่ไม่ใช่สารดูดซับ (Non-adsorbent material) ให้น้อยที่สุด เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนตรงไปยังสารดูดซับเป็นสำคัญ
- (3) ปรับปรุงคุณสมบัติและสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนและมวลของวัสดุองค์ประกอบระบบเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านความร้อนมายังและไปจากถ่านกัมมันต์ อาทิ ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity), ค่าสภาพการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity), สัมประสิทธิ์ความต้านทานของผิวสัมผัส (contact resistance), ความพรุนของวัสดุ (porosity), ความสามารถในการแทรกผ่าน (permeability), สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในและภายนอก (h_i, h_o), ความต้านทานต่อการนำความร้อน (thermal resistance)

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานสำหรับเครื่องดูดซับจากการทดลองที่มีเงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิเครื่องดูดซับสูงสุดคือ 70 °C, 80 °C และ 90 °C อุณหภูมิเครื่องทำระเหยคือ 5 °C, 10 °C และ 15 °C โดยทดสอบทั้งหมดตั้งเงื่อนไข คือ (70, 5), (70, 10), (70,15), (80,5), (80,10), (80,15), (90,5), (90,10) และ (90,15) ทำการทดลองละ 3 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 27 การทดลอง

สรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าน้อยที่สุด (MIN), ค่ามากที่สุด (MAX), ค่าเฉลี่ย (AVERAGE) และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูล (STANDARD DEVIATION, SD) ในหน่วยกิโลจูล (kJ) สำหรับ 4 ช่วงการทำงานของระบบ ซึ่งจะให้เห็นถึงภาพรวมของการกระจายพลังงานจากแหล่งความร้อนไปยังองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องดูดซับ ตลอดจนการกระจายความสามารถในการระบายความร้อนออกไปยังแหล่งรับความร้อนในช่วงการทำงานถัดมาของระบบดูดซับ

ตารางที่ 4.1 ตารางวิเคราะห์ผลการทำสมดุลพลังงานในเครื่องดูดซับ

PROCESS VARIABLE	Heating				Heating & Desorption			
	MIN (kJ)	MAX (kJ)	AVG (kJ)	SD kJ	MIN (kJ)	MAX (kJ)	AVG (kJ)	SD kJ
Q _H	52.84	307.23	169.24	90.89	39.94	428.28	162.23	114.58
AC	9.42	35.78	21.14	9.53	2.05	10.15	6.78	3.67
Copper	18.38	69.82	40.99	18.42	4.01	19.92	13.26	7.18
MET	2.36	8.98	5.29	2.38	0.51	3.17	1.84	1.09
HP,COP	1.49	5.65	3.33	1.50	0.32	2.49	1.27	0.85
HP,MET	5.73	21.76	12.82	5.77	1.25	7.76	4.45	2.64
Loss	15.47	165.24	85.68	53.36	0.00	296.02	92.68	88.03
Q _{des}	-	-	-	-	17.77	63.04	28.51	14.09
Q _{vap}	-	-	-	-	8.36	30.09	13.93	6.84
Q _{ads}	-	-	-	-	-	-	-	-
Q _{conv}	-	-	-	-	-	-	-	-
QC	-	-	-	-	-	-	-	-
Heatpipe	-	-	-	-	-	-	-	-
PROCESS VARIABLE	Cooling				Cooling & Adsorption			
	MIN (kJ)	MAX (kJ)	AVG (kJ)	SD kJ	MIN (kJ)	MAX (kJ)	AVG (kJ)	SD kJ
Q _H	-	-	-	-	-	-	-	-
AC	5.88	49.75	16.50	12.86	6.64	31.65	10.77	7.16
Copper	11.47	97.08	32.20	25.09	12.96	59.35	20.74	13.90
MET	1.47	12.48	4.14	3.23	1.67	7.63	2.67	1.78
HP,COP	0.93	7.85	2.60	2.03	1.05	4.80	1.68	1.11
HP,MET	3.57	30.26	10.04	7.82	4.04	18.50	6.46	4.32
Loss	38.32	168.85	70.98	42.76	1.57	34.96	15.59	38.37
Q _{des}	-	-	-	-	-	-	-	-
Q _{vap}	-	-	-	-	-	-	-	-
Q _{ads}	-	-	-	-	17.77	63.04	28.51	14.09
Q _{conv}	-	-	-	-	0.21	0.93	0.39	0.22
QC	41.78	296.00	88.65	81.15	24.00	133.36	55.08	33.10
Heatpipe	41.85	70.00	51.26	10.21	13.63	65.00	41.35	21.47

4.2.6 สมรรถนะระบบดูดซับ

การประเมินสมรรถนะของระบบดูดซับ นิยมคำนวณค่าดัชนี 3 ตัว ได้แก่ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบดูดซับ (COP) และค่าสมรรถนะการทำความเย็นจำเพาะ (SCP) และค่าปริมาตรต่อกำลังความเย็นที่ได้ (VCP) โดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรสำคัญ 2 ตัวที่มีผลต่อสมรรถนะ ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องดูดซับในช่วงให้ความร้อนเมื่อเริ่มเปิดวาล์วระบายไอเมทานอล และเกิดการคายสารดูดซับ (70, 80 และ 90 °C) และอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นโดยพิจารณาจากอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่จ่ายให้กับเครื่องควบแน่น (5, 10, 15 °C)

4.2.6.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลในการคายสารดูดซับของถ่านกัมมันต์คือ ความร้อนที่ให้แก่เครื่องดูดซับ ซึ่งอัตราการถ่ายโอน ระดับอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนที่น้อยเกินไปทำให้ถ่านกัมมันต์คายสารดูดซับได้น้อยและช้า ทำให้ ค่า COP และ SCP ไม่สูง ตลอดจนระบบอาจต้องมีมวลมากหรือน้ำหนักมากเกินจำเป็น ซึ่งการให้ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิในระดับที่ต่างจากเครื่องดูดซับถ่ายโอนเข้ามายังถ่านกัมมันต์โดยเฉพาะบริเวณที่เกิดการดูดซับได้อย่างรวดเร็วในอัตราที่สูงจะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องดูดซับในกระบวนการคายสารดูดซับ คือ 70, 80 และ 90°C โดยกำหนดค่าคงที่ ได้แก่ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น 10°C และน้ำถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องทำระเหย 27°C ผลการวิเคราะห์ค่า COP, SCP และ VCP แสดงในรูปที่ 4.8 – 4.10

จากรูปที่ 4.8 และ 4.10 แสดงผลการทดสอบระบบที่มีการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิเริ่มต้นคายสารดูดซับ พบว่า

(1) ค่า COP และ SCP แปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเครื่องดูดซับอภิปรายได้ดังนี้

- ก. การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนจากน้ำถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่เครื่องดูดซับ อันได้แก่ ถ่านกัมมันต์และเมทานอล ส่งผลให้เมทานอลแยกตัวออกจากถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น
- ข. ถ่านกัมมันต์จะมีอัตราส่วนเมทานอลลดลงจึงมีที่ว่างสำหรับให้ไอเมทานอลแทรกตัวเข้าไปเกาะในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ในช่วงกระบวนการดูดซับมากขึ้น

- ค. ดังนั้นในกระบวนการดูดซับของวัฏจักรต่อมาจะเกิดการระเหยของเมทานอลกลายเป็นไอไปเกาะกับถ่านกัมมันต์ในเครื่องดูดซับมากขึ้น ค่าความเย็นที่ทำให้จึงมากขึ้น ส่งผลให้ค่า COP และ SCP ของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย
- ง. ความร้อนที่ให้แก่ถ่านกัมมันต์ในเครื่องดูดซับที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีช่วงเวลาการจ่ายพลังงาน ซึ่งหมายถึงปริมาณที่มากกว่ากรณีให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้อุณหภูมิต่างระหว่างน้ำถ่ายโอนความร้อนและเครื่องดูดซับมากกว่า
- จ. การที่ระบบคายสารถูกดูดซับที่อุณหภูมิสูงขึ้น ให้ความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากค่า COP และ SCP ที่ระดับ 90°C แทบไม่แตกต่างจากค่าที่ระดับ 80°C
- ฉ. VCP แปรผกผันกับอุณหภูมิของเครื่องดูดซับ ซึ่งหมายความว่า หากต้องการระบบมีขนาดเล็กควรใช้แหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการคายสารดูดซับที่มีอุณหภูมิสูง
- ช. สรุปได้ว่า ระบบดูดซับ(ถ่านกัมมันต์-เมทานอล) ที่มีการระบายความร้อนโดย CLOHP ร่วมกับน้ำหล่อเย็นในช่วงคายสารดูดซับ ควรควบคุมอุณหภูมิเริ่มการคายสารดูดซับไม่ให้เกิน 80°C

(2) พิจารณาแนวโน้มของกราฟ

- ก. COP เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง $70 - 80^{\circ}\text{C}$ จากนั้นเพิ่มน้อยมากจาก $80 - 90^{\circ}\text{C}$ และค่า COP จากเส้นแนวโน้มบริเวณจุดยอดรูปโค้งที่แสดงในรูปที่ 4.8 ค่ามากที่สุดที่ระบบทำได้คือ 0.35 ที่อุณหภูมิเครื่องดูดซับ 80°C
- ข. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องดูดซับให้มากกว่า 80°C ทำให้ COP ของระบบมีแนวโน้มคงที่และลดลงในที่สุด เนื่องจากการทดลองที่อุณหภูมิถ่านกัมมันต์สูงต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่เครื่องดูดซับมากขึ้นด้วย
- ค. อุณหภูมิเครื่องดูดซับ 70°C ให้ค่า VCP $36.5 \text{ cm}^3/\text{W}$ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องดูดซับเป็น 90°C ค่า VCP ของระบบลดเหลือ $28 \text{ cm}^3/\text{W}$ ทำให้ค่า VCP ของระบบลดลงได้ถึงร้อยละ 24
- ง. การหาจุดเหมาะสมของระบบต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อด้อยของระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนสำหรับการได้สารทำงานในเครื่องดูดซับ ตลอดจนประเภทและความเหมาะสมของแหล่งความร้อนที่มีอยู่ด้วยเช่นกัน

4.2.6.2 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องควบแน่น

อุณหภูมิและความดันของเครื่องควบแน่นที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสถานะไอสารเมทานอลให้กลายเป็นของเหลว ควบคุมได้ด้วยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อน ไอสารเมทานอลที่คายออกจากถ่านกัมมันต์ภายหลังกระบวนการให้ความร้อนและคายสารดูดซับ จะเคลื่อนที่ออกจากเครื่องดูดซับผ่านเครื่องควบแน่นและเปลี่ยนสถานะตัวเองให้กลายเป็นของเหลว เพื่อเตรียมพร้อมในการเกิดกระบวนการดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์กับไอเมทานอลในวัฏจักรต่อไป ดังนั้นสภาวะการทำงานของเครื่องควบแน่นจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ

ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเย็นที่ป้อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น ที่ถูกแปรเปลี่ยนในช่วง 5, 10 และ 15°C โดยกำหนดค่าคงที่การทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิเครื่องดูดซับช่วงการคายสารดูดซับ 80°C และน้ำถ่ายโอนความร้อนที่เครื่องดูดซับ 27°C ผลการวิเคราะห์ค่า COP, SCP และ VCP แสดงในรูปที่ 4.11 – 4.13 อภิปรายได้ดังนี้

1) พิจารณาค่าต่าง ๆ ที่ปรากฏในกราฟ

ก. COP และ SCP สูงสุดคือ 0.35 และ 103 W/kg ตามลำดับ ค่า VCP ที่ดีที่สุดคือ 30 cm³/W ในกรณีอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น 5°C เนื่องจากไอของเมทานอลสามารถควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลไปยังกระบอกเก็บเมทานอลได้เร็ว ส่งผลให้พื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องควบแน่นสูญเสีย น้อยและความดันไอลดลงเร็ว และเวลาในการควบแน่นสั้นลง

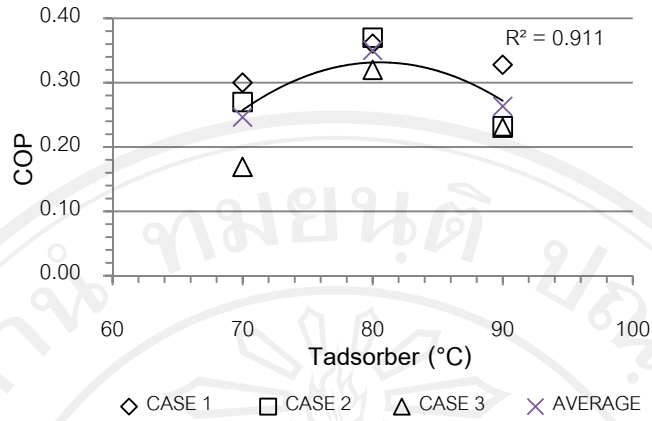
2) พิจารณาแนวโน้มของกราฟ

ก. จากรูป 4.11 ถึง 4.13 ก่อนข้างชัดเจนว่า COP และ SCP แปรผกผันตรงกับอุณหภูมิเครื่องควบแน่นมากกว่ากรณีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิกายสารของเครื่องดูดซับ ดังหัวข้อ 4.2.6.1

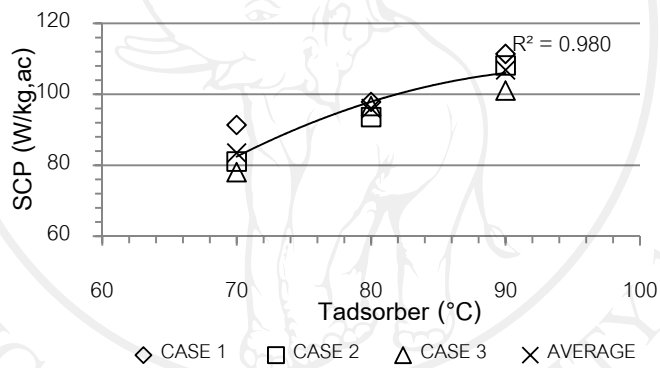
ข. ที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 5°C ให้ค่า VCP 30 cm³/W แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องควบแน่นเป็น 10°C และ 15°C ค่า VCP ของระบบเพิ่มขึ้นเป็น 31.5 และ 33.7 cm³/W ทำให้ค่า VCP ของระบบเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.9 และ 12.3 ตามลำดับ

ค. ผลการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง มีความแปรปรวนของค่าที่ได้ น้อยมาก (จุดในกราฟเกาะกลุ่มกัน) แสดงให้เห็นอิทธิพลของเครื่องควบแน่นนี้อย่างชัดเจน

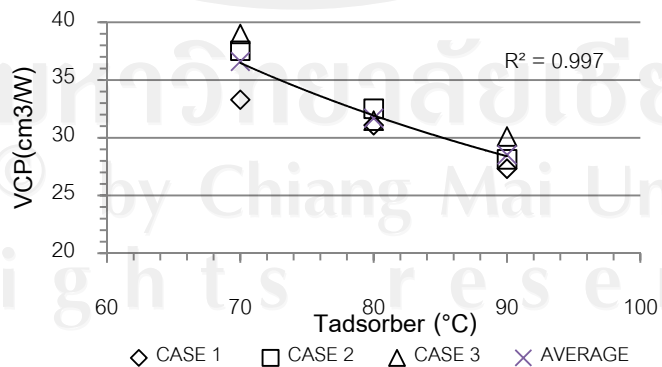
ง. ในทำนองเดียวกันพบการแปรผันตรงของ VCP กับอุณหภูมิเครื่องควบแน่น แสดงว่าอุณหภูมิกายสารของไอเมทานอลในช่วง 5 - 15°C นี้ มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมรรถนะระบบโดยรวม ซึ่งหมายความว่า หากต้องการระบบที่มีขนาดเล็ก อุณหภูมิเครื่องควบแน่นจำเป็นต้องควบคุมให้ต่ำ



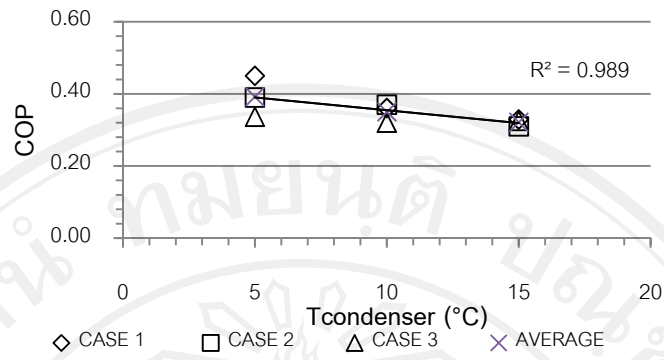
รูปที่ 4.8 COP ที่อุณหภูมิเครื่องดูดซับ 70, 80 และ 90°C



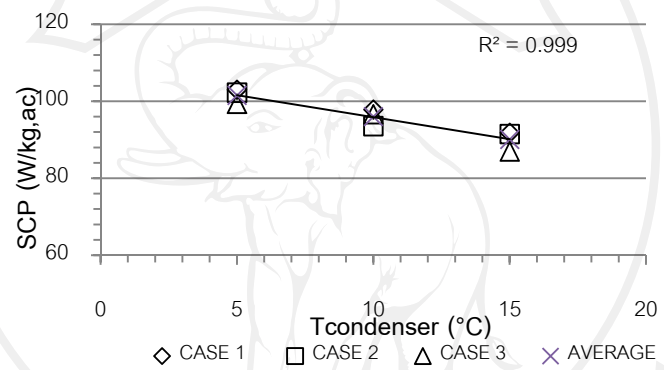
รูปที่ 4.9 SCP ที่อุณหภูมิเครื่องดูดซับ 70, 80 และ 90°C



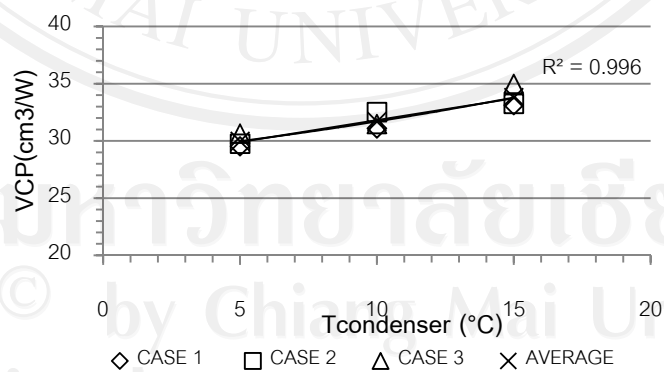
รูปที่ 4.10 VCP ที่อุณหภูมิเครื่องดูดซับ 70, 80 และ 90°C



รูปที่ 4.11 COP ที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 5, 10 และ 15°C



รูปที่ 4.12 SCP ที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 5, 10 และ 15°C



รูปที่ 4.13 VCP ที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 5, 10 และ 15°C

ลิขสิทธิ์ © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.2 ประมวลเงื่อนไขการทดสอบและสมรรถนะของระบบจากทุกการทดลอง

การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)					Q _{ads} (kJ)	Q _{evap} (kJ)	COP (-)	SCP W/kg _{ac}	VCP (cm ³ /W)x10 ⁵
	เริ่มต้น	เริ่มเปิดวาล์ว	เครื่องดูดซับ	เครื่องควบแน่น	เครื่องทำระเหย					
1	33.0	60	70	5	18.2	44.0	63.5	0.39	94.7	3.2
2	34.0	60	70	5	19.7	34.0	73.6	0.36	87.4	3.5
3	38.0	60	70	5	16.8	31.9	74.3	0.27	82.0	4.0
4	34.0	60	70	10	22.4	30.5	65.6	0.30	91.4	3.3
5	31.2	60	70	10	20.1	28.6	73.9	0.27	81.0	3.8
6	31.6	60	70	10	22.7	25.7	66.0	0.17	78.0	3.9
7	31.7	60	70	15	22.1	28.2	65.9	0.24	80.2	3.8
8	31.9	60	70	15	21.2	31.9	74.0	0.26	77.8	3.9
9	31.4	60	70	15	22.9	24.5	57.9	0.12	74.4	4.1
10	35.4	70	80	5	19.4	47.4	97.4	0.45	103.0	3.0
11	32.7	70	80	5	19.3	40.0	89.8	0.39	102.2	3.0
12	31.9	70	80	5	20.9	39.0	98.5	0.34	99.3	3.1
13	32.5	70	80	10	19.2	39.7	89.9	0.36	97.9	3.1
14	33.5	70	80	10	19.7	40.9	97.9	0.37	93.6	3.3
15	31.5	70	80	10	19.5	38.6	90.1	0.32	96.6	3.2
16	32.2	70	80	15	20.6	29.5	73.8	0.33	91.8	3.3
17	33.1	70	80	15	21.2	37.0	90.1	0.31	91.5	3.3
18	38.0	70	80	15	20.8	44.9	79.6	0.32	87.0	3.5
19	33.0	80	90	5	16.1	75.5	160.7	0.41	188.9	1.6
20	36.4	80	90	5	19.7	56.0	121.6	0.32	132.3	2.3
21	33.7	80	90	5	17.8	48.7	105.6	0.24	113.9	2.7
22	34.0	80	90	10	16.0	41.6	88.9	0.33	111.4	2.7
23	33.6	80	90	10	18.5	34.2	81.4	0.23	108.1	2.8
24	32.9	80	90	10	18.2	30.1	73.3	0.23	101.0	3.0
25	34.0	80	90	15	19.1	35.5	160.5	0.28	103.2	3.0
26	28.0	80	90	15	19.0	39.0	124.0	0.16	94.1	3.2
27	30.8	80	90	15	20.0	34.6	98.6	0.22	91.2	3.3
MIN	-	-	-	-	16.0	24.5	57.9	0.12	74.4	1.6
MAX	-	-	-	-	22.9	75.5	160.7	0.45	188.9	4.1

การประมวลผลทดสอบและผลวิเคราะห์ระบบทำความเย็นแบบดูดซับร่วมกับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบปลายปิด (CLOHP) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลจาก 27 การทดลอง ที่มีการกำหนดเงื่อนไขการทดลองแบ่งเป็น 2 กรณีหลัก (1) แปรผันอุณหภูมิสูงสุดในเครื่องดูดซับเป็น 70, 80 และ 90°C โดยกำหนดอุณหภูมิเปิดวาล์วให้ไอเมทานอลออกจากเครื่องดูดซับน้อยกว่าอุณหภูมิที่กำหนด 10°C และ (2) แปรผันอุณหภูมิเครื่องควบแน่นที่กำหนดโดยอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้า เป็น 5, 10, 15°C โดยทดสอบแบบพบบันทุกกรณี คือ 3x3 และทำซ้ำ 3 ครั้ง รวมเป็น 27 การทดลอง

จากตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเริ่มต้นการทดสอบระบบเฉลี่ยที่ 28°C เป็นอุณหภูมิที่วัดจากภายในเครื่องดูดซับ และเมื่อทำการให้ความร้อนแก่เครื่องดูดซับให้อุณหภูมิเครื่องดูดซับถึงตามที่กำหนดค่าการทดสอบนั้น จะต้องเริ่มเปิดวาล์วให้ไอเมทานอลออกจากเครื่องดูดซับก่อนหน้าที่จะถึงอุณหภูมิที่กำหนด 10°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

ไอเมทานอลที่คายออกมาจากถ่านกัมมันต์สามารถไหลลงไปยังเครื่องควบแน่นได้ จึงไม่สะสมในเครื่องดูดซับอย่างหนาแน่น ทำให้มีพื้นที่สำหรับไอเมทานอลที่ถูกคายออกมาภายหลังได้

หากเปิดวาล์วเร็วเกินไปจะทำให้ความร้อนสูญเสียออกนอกระบบ และต้องเพิ่มเวลาและปริมาณความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น

ในขณะที่เริ่มเปิดวาล์วเครื่องควบแน่นจะถูกป้อนน้ำเย็นเพื่อควบแน่นไอเมทานอลให้กลายเป็นของเหลว เมื่ออุณหภูมิเครื่องดูดซับถึงค่าที่กำหนด ระบบจะเข้าสู่กระบวนการดูดซับ โดยกระบวนการนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิเครื่องทำระเหย

ซึ่งอุณหภูมิเครื่องทำระเหยแสดงถึงเป้าหมายการลดอุณหภูมิ หรือระบบสามารถทำความเย็นได้ต่ำสุดเท่ากับ 16.1°C และกรณีสูงสุดคือ 22.9 °C

เมื่อพิจารณาความร้อนสัมผัสในการเกิดกระบวนการดูดซับ (Q_{ads}) อยู่ในช่วง 24.5 – 75.5 kJ โดยค่าเฉลี่ยคือ 38.2 kJ ซึ่งสำหรับระบบดูดซับที่มีค่า Q_{ads} ที่มากแสดงว่ากระบวนการดูดซับสารเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไอเมทานอลจากส่วนทำระเหยมาได้เรื่อยๆ ส่งผลให้เครื่องทำระเหยมีประสิทธิภาพการทำความเย็นดีที่สุด สังเกตได้จากการทดลองที่ 19 ค่า Q_{ads} มากที่สุดคือ 75.5 kJ อุณหภูมิเครื่องทำระเหยเป็น 16.1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ระบบทำได้

ค่า COP มากที่สุดของระบบคือ 0.45 จากการทดลองที่ 19 อุณหภูมิเครื่องดูดซับคือ 90°C อุณหภูมิเครื่องควบแน่นคือ 5°C

ค่า SCP ที่ได้อยู่ในช่วง 74.4-188.9 W/kg_{ac} ค่ามากที่สุดได้จากการทดลองที่ 19 เช่นกัน ในขณะที่เดียวกันการทดลองนี้ก็ให้ค่า VCP ที่ดีที่สุดด้วย คือ $1.61 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{W}$

4.2.7 เปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบอื่นจากเอกสารอ้างอิง

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทดสอบผลการนำความร้อนแบบสั่นวงรอบ(CLOHP) มาติดตั้งในเครื่องดูดซับ เพื่อให้ทราบสมรรถนะของระบบดูดซับเพื่อการทำมาความเย็น และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยชิ้นนี้กับงานวิจัยระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่พบจากเอกสารอ้างอิง สามารถเปรียบเทียบค่าได้ดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบทดสอบอื่น

ที่	Author	รูปแบบระบบ/คู่สาร	COP (-)	SCP (W/kg)	VCP (L/kW)
1	ยี่งลักษณ์, (2549)	ใช้ทำความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับการให้ความร้อนและระบายความร้อนแก่เครื่องดูดซับ / ถ่านกัมมันต์,เมทานอล	0.13 – 0.50	11 – 28	0.164 – 0.412
2	Wang et al. (2005)	ระบบดูดซับสำหรับทำน้ำแข็งในเรือหาปลา / ถ่านกัมมันต์ผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl ₂) ,แอม โมเนีย	0.38	-	-
3	Chen et al. (2006)	ประยุกต์ใช้ทำความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเข้ากับระบบดูดซับ ที่ใช้ในระบบผลิตน้ำแข็งสำหรับเรือหาปลา	-	521.3	-
4	Wang et al. (2007)	การนำความร้อนใช้กับระบบทำความเย็นแบบดูดซับในเรือหาปลา	0.38	-	-
5	พีระพงษ์ (2548)	ระบบทำความร้อนและความเย็นแบบดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ / ถ่านกัมมันต์, เมทานอล	0.012	-	-
6	El Fadar et al.(2009)	การศึกษาาระบบดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ / ถ่านกัมมันต์,แอม โมเนีย	0.18	-	-
7	Daou et al.(2008)	ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ / ซิลิกาเจล(ธรรมชาติ,ผสม),น้ำ	0.1 - 0.4	10 - 70	-
8	งานวิจัยนี้	ใช้ทำความร้อนแบบสั่นวงรอบช่วยในการระบายความร้อน / ถ่านกัมมันต์, เมทานอล	0.12 - 0.45	74.4 -188.9	16 - 46

จากการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 4.3 พบว่า ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ร่วมกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบในงานวิจัยนี้มีศักยภาพสูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เมื่อพิจารณาจากค่า COP, SCP และ VCP ที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และหากมีการพัฒนาการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น และขนาดเล็กกะทัดรัดลง คาดว่าน่าจะสามารถใช้งานได้ใช้งานเพื่อการทำความเย็นให้ที่อยู่อาศัยหรืออุตสาหกรรมต่อไป ซึ่งระบบทำความเย็นแบบดูดซับจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการประหยัดพลังงานและการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้งได้อย่างแน่นอน

4.3 แบบจำลองการทดลอง (Empirical Model)

ประสิทธิภาพของระบบดูดซับเพื่อการทำความเย็นบอกได้ในรูปของสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) เช่นเดียวกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ ในทางทฤษฎีค่า COP ของระบบดูดซับ เมื่อพิจารณาหลักการทางอุณหพลศาสตร์ตามกฎข้อที่หนึ่ง และกฎข้อที่สองของวัฏจักร ค่าสูงสุดของ COP ทางทฤษฎีเรียกว่า COP แบบคาร์โนต์ (COP_{Carnot}) สำหรับวัฏจักร Carnot ของ Adsorption cooling โดยค่า COP_{Carnot} จะเป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิ 4 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิแหล่งความร้อน (T_H) อุณหภูมิระบบดูดซับ (T_{ads}) อุณหภูมิเครื่องทำระเหย (T_{ev}) และอุณหภูมิเครื่องควบแน่น (T_{cond}) โดยสมการ COP_{Carnot} สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ (ยังลักษณะ, 2549) คือ

$$COP_{\text{Carnot}} = \left(\frac{1 - \frac{T_{\text{ads}}}{T_H}}{\frac{T_{\text{cond}}}{T_{\text{ev}}} - 1} \right) \quad (4.1)$$

โดย T_{ads} = อุณหภูมิเครื่องดูดซับ

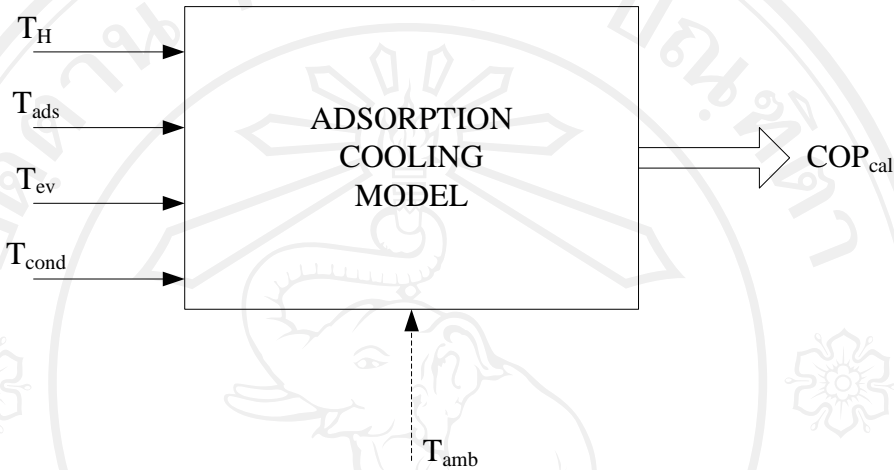
T_H = อุณหภูมิแหล่งความร้อน

T_{cond} = อุณหภูมิเครื่องควบแน่น

T_{ev} = อุณหภูมิเครื่องทำระเหย

จากสมการดังกล่าวพบว่า COP เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเครื่องดูดซับในช่วงการคายสารดูดซับ, อุณหภูมิแหล่งความร้อน, อุณหภูมิเครื่องควบแน่น และอุณหภูมิเครื่องทำระเหย ดังนั้นการสร้างแบบจำลองจากการทดลองสำหรับระบบดูดซับในงานวิจัยจึงเริ่มต้นจากรูปแบบสมการที่คล้ายคลึงกับสมการ (4.1) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่เหมาะสมกับระบบดูดซับร่วมกับท่อความร้อน โดยพิจารณาค่า Input 4 ตัวเป็นหลัก ได้แก่ T_H , T_{ads} , T_{ev} และ T_{ad} ซึ่งจะให้ค่า

Output เป็น COP แต่จากการพยายามในขั้นต้น พบว่าไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำได้ จึงได้เพิ่ม Input อีกตัว คือ T_{amb} ดังรูป 4.14 และได้ใช้ซอฟต์แวร์ MLeast 3 ในการทดลองและปรับแก้ความผิดพลาด (Trial&Error) จนได้แบบจำลองจากการทดลอง ดังสมการที่ 4.2

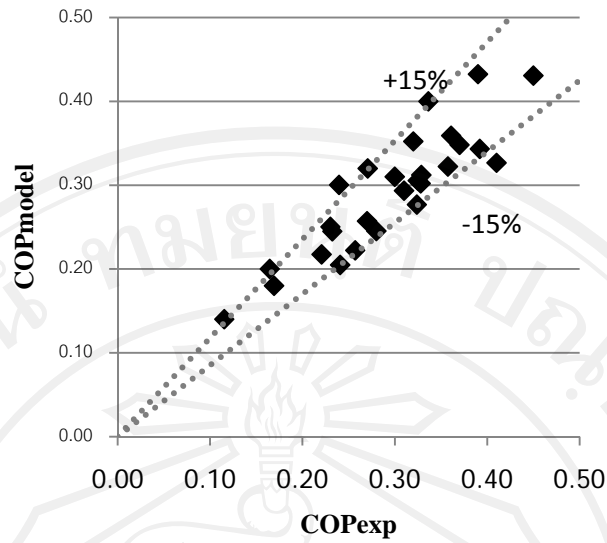


รูปที่ 4.14 ขั้นตอนการทำแบบจำลองจากการทดลอง

$$COP_{model} = 5.8276 \times 10^{-4} \left(\frac{\left(1 - \frac{T_{ad}}{T_H}\right)^{1.1635}}{\left|\frac{T_{cond}}{T_{ev}} - 1\right|^{0.6169}} \right) \left(\frac{T_{amb}}{T_{cond}}\right)^{25.694} \left(\frac{T_{ad}}{T_{amb}}\right)^{30.376} \quad (4.2)$$

เมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบระบบจริงมาแทนในสมการแบบจำลองการทดลองแล้วนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจากการทดลอง พบว่า แบบจำลองมีค่าคลาดเคลื่อน 15%, $R^2 = 0.833$, Root Mean Square Error (RMSE) = 0.0359, Mean Absolute Deviation (MAD) = 0.0304 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.4

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางการทดลอง

1- Tad/Th	(Tcon/TeV -1)	Tamb/con	Tad/Tamb	COPexp	COPmodel
0.2632	0.0453	1.0791	1.1433	0.3919	0.3433
0.2632	0.0502	1.0791	1.1433	0.3575	0.3222
0.2632	0.0407	1.0791	1.1433	0.2707	0.3200
0.2632	0.0420	1.0600	1.1433	0.3000	0.3100
0.2632	0.0344	1.0600	1.1433	0.2700	0.2572
0.2632	0.0429	1.0600	1.1433	0.1693	0.1800
0.2632	0.0240	1.0416	1.1433	0.2409	0.2047
0.2632	0.0211	1.0416	1.1433	0.2571	0.2222
0.2632	0.0267	1.0416	1.1433	0.1154	0.1400
0.1579	0.0492	1.0791	1.1766	0.4500	0.4308
0.1579	0.0489	1.0791	1.1766	0.3900	0.4325
0.1579	0.0479	1.0791	1.1766	0.3362	0.4000
0.1579	0.0315	1.0600	1.1766	0.3608	0.3591
0.1579	0.0331	1.0600	1.1766	0.3700	0.3480
0.1579	0.0325	1.0600	1.1766	0.3200	0.3523
0.1579	0.0191	1.0416	1.1766	0.3288	0.3121
0.1579	0.0211	1.0416	1.1766	0.3100	0.2934
0.1579	0.0197	1.0416	1.1766	0.3249	0.3055
0.0526	0.0384	1.0791	1.2099	0.4101	0.3267
0.0526	0.0502	1.0791	1.2099	0.3238	0.2768
0.0526	0.0440	1.0791	1.2099	0.2396	0.3003
0.0526	0.0208	1.0600	1.2099	0.3280	0.3021
0.0526	0.0291	1.0600	1.2099	0.2323	0.2449
0.0526	0.0281	1.0600	1.2099	0.2302	0.2503
0.0526	0.0140	1.0416	1.2099	0.2800	0.2453
0.0526	0.0137	1.0416	1.2099	0.1646	0.2000
0.0526	0.0171	1.0416	1.2099	0.2207	0.2174