

## บทที่ 4

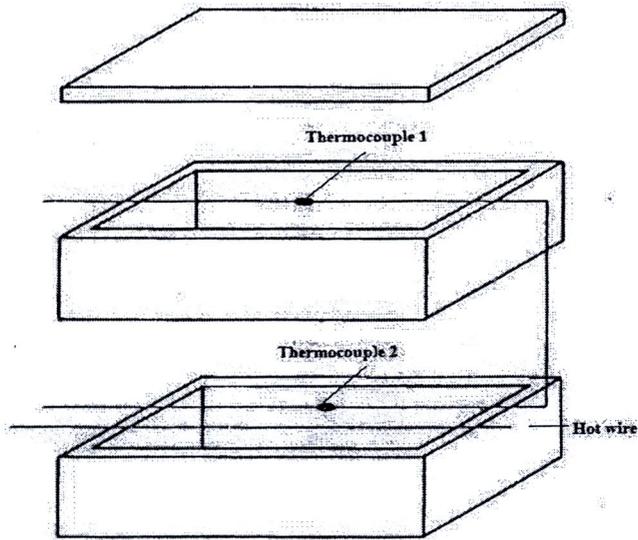
### ผลการทดสอบและวิเคราะห์

บทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลของชนิดและสัดส่วนการผสมผงโลหะในเนื้อตัวดูดซับ จากถ่านกัมมันต์ต่อค่าการนำความร้อน ปริมาณการดูดซับสารเมทานอล และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบดูดซับเนื้อหาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ผลของผงโลหะต่อค่าการนำความร้อน (2) ผลของสารเติมแต่งโลหะและคลื่นอุลตราโซนิคต่ออัตราการดูดซับและคายสารเมทานอลในสภาวะต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (3) สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ (COP) ดังนี้

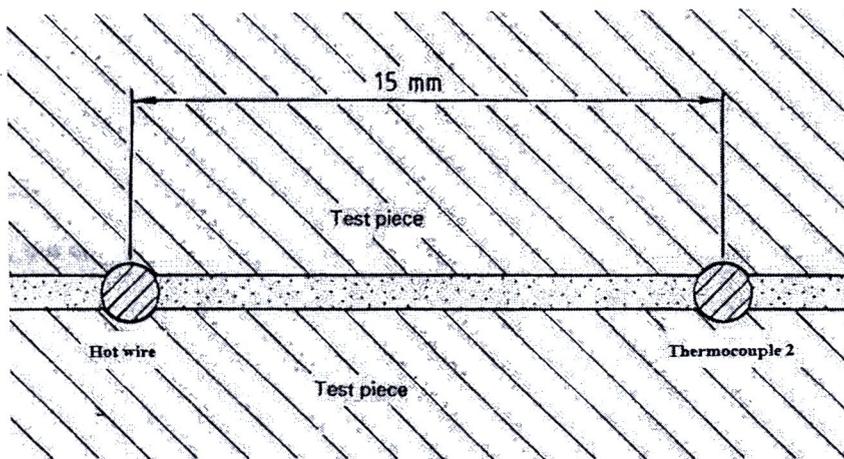
#### 4.1 ผลของผงโลหะต่อค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนคำนวณจากผลอุณหภูมิที่วัด โดยเทอร์โมคัปเปิล แสดงตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์และอุปกรณ์วัดดังรูปที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลาจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ตามมาตรฐาน ISO 8894-2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล ได้แก่

- (1) คำนวณผลต่างอุณหภูมิแบบกำลังหนึ่งและกำลังสองและหาค่าอัตราส่วนของค่าทั้งสอง
$$(\Delta\theta(2t))/(\Delta\theta(t))$$
- (2) ปรับค่ากับตารางมาตรฐานจาก ISO 8894-2 แบบขนาน (Parallel)
- (3) นำค่าที่ถูกปรับให้ถูกต้องแล้วไปคำนวณค่า  $\lambda$  พบว่าอยู่ในช่วง 1.5 – 2.4
- (4) คำนวณค่า  $-E(-r^2/4\alpha t)$  เพื่อหาค่าการนำความร้อน ( $\lambda$ )
- (5) รูปที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณสำหรับตัวอย่างแทนตัวดูดซับที่มีส่วนผสมสารเติมแต่งโลหะต่างชนิด (ทองแดง หรือ อลูมิเนียม) และหลากหลายสัดส่วน (2.5%, 7.5%, 12.5%, 17.5%, 22.5%) จากการทดสอบ 3 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ และถ่านกัมมันต์ที่ผสมเฉพาะ PVA



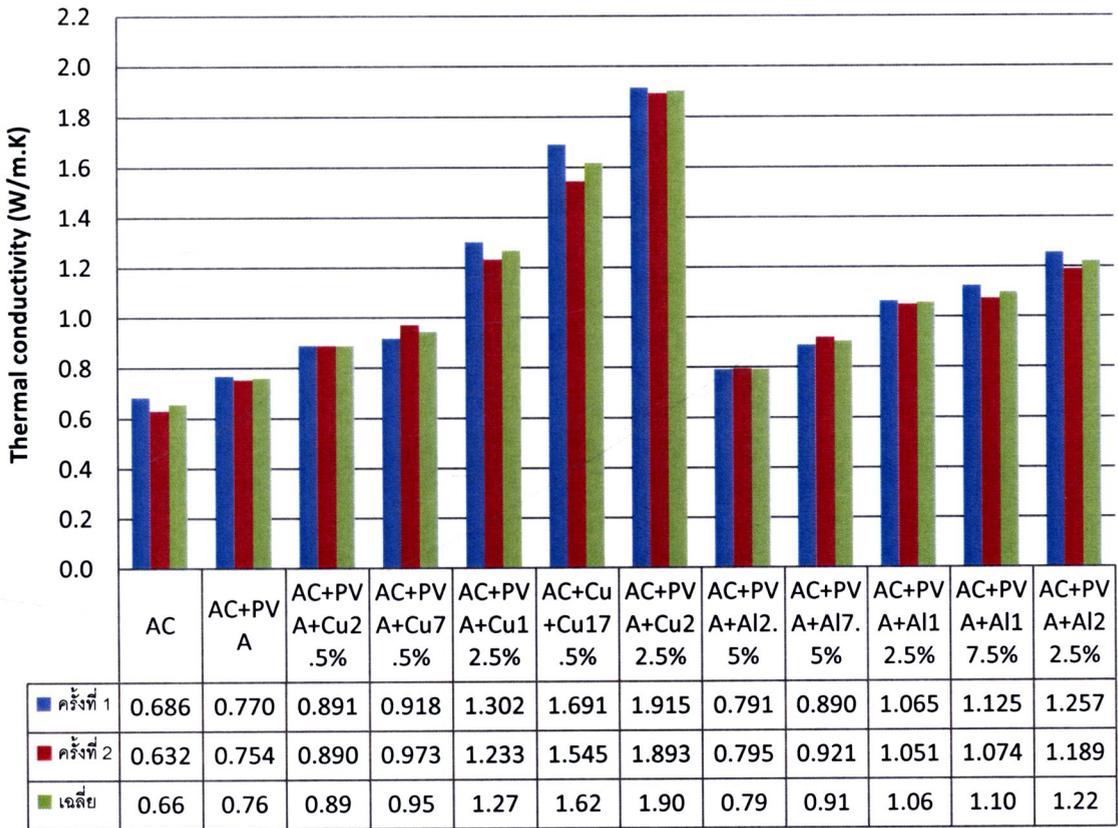
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลภายในตัวดูดซับ, (ข) ภาพตัดขวางภายในตัวดูดซับ

แสดงระยะห่างของลวดความร้อนและเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 4.2 ค่าการนำความร้อนของตัวดูดซับที่มีชนิดและสัดส่วนการผสมของผงโลหะต่างกัน

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์และคาร์บอน  
การเพิ่มขึ้นสัมพัทธ์ (% Relative difference)

% Mixed additives	Copper (Cu)	Aluminum (Al)	%Relative difference (Cu)	%Relative difference (Al)
AC	0.66	0.66	-	-
PVA	0.76	0.76	15.15	15.15
2.5%	0.89	0.79	34.85	19.70
7.5%	0.95	0.91	43.94	37.88
12.5%	1.27	1.06	92.42	60.61
17.5%	1.62	1.10	145.45	66.67
22.5%	1.90	1.22	187.88	84.85

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมผงทองแดงหรือผงอลูมิเนียม เห็นชัดเจนว่าตัวดูดซับที่ผสมผงทองแดงมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าที่ผสมผงอลูมิเนียม เนื่องจากค่าการนำความร้อนของอลูมิเนียมต่ำกว่า จึงช่วยเพิ่มการนำความร้อนของแท่นตัวดูดซับได้ดียิ่งกว่า โดยร้อยละการเพิ่มขึ้นสัมพัทธ์ของค่าการนำความร้อน ( $\Delta k$  หรือ % Relative difference) เมื่อเพิ่มสัดส่วนผสมขึ้นอีกหนึ่งระดับ ( $k_i - k_0$ ) กำหนดจากสมการที่ 4.1 และค่า  $\Delta k$  ของทองแดงสูงกว่าอย่างชัดเจนเช่นกัน (ดูตารางที่ 4.1 ประกอบ)

$$\Delta k = 100 \times \frac{k_i - k_0}{k_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $k_0$  คือ igrณีถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ไม่มีผงโลหะเลย

หากเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของตัวดูดซับ igrณีถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ (AC), ถ่านกัมมันต์ที่ผสม PVA อย่างเดียว (PVA), ถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับ PVA และผงทองแดงที่อัตราส่วนต่างกัน (Cu x.x%) หรือ ถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับ PVA และผงอลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างกัน (Al x.x%) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสมผงทองแดงหรืออลูมิเนียมที่มากขึ้นทำให้ค่าการนำความร้อนของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นตามลำดับ

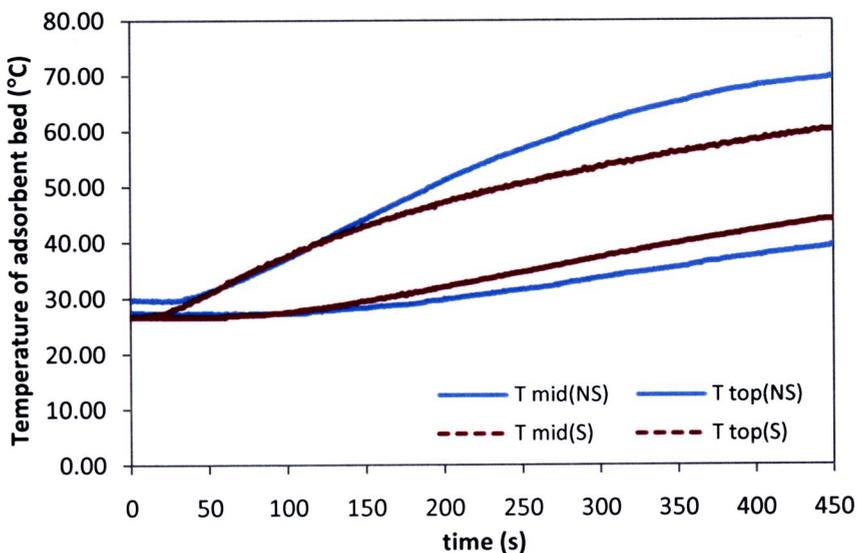
สรุปผลค่าการนำความร้อนได้ประเด็นสำคัญดังนี้

- 1) การนำความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งขึ้น เพราะสารเติมแต่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มค่าการนำความร้อนของแท่นตัวดูดซับ
- 2) igrณีใช้สัดส่วนสารเติมแต่งที่เท่ากัน พบว่าแท่นตัวดูดซับที่เติมผงทองแดงให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าการเติมผงอลูมิเนียม
- 3) การเติมตัวประสาน PVA 2.5% ลงในถ่านกัมมันต์ทำให้ค่าการนำความร้อนสูงขึ้น 15.2% แสดงว่า PVA ส่งผลเชิงบวกในแง่การเพิ่มค่าการนำความร้อน
- 4) การเติมผงอลูมิเนียมลงในแท่นตัวดูดซับ ค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.79-1.22 W/m.K และเพิ่มค่าการนำความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์สูงกว่า 19.70-84.85% และสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ PVA เป็นตัวประสานเพียงอย่างเดียว 3.95-60.53%

การเติมผงทองแดงลงในแท่นตัวดูดซับ ค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.89 -1.90 W/m.K และมีค่าการนำความร้อนสูงกว่ากรณีถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ 34.85-187.88% และสูงกว่ากรณีถ่านกัมมันต์ที่ใช้ PVA เป็นตัวประสานเพียงอย่างเดียว 17.10-150.00% ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุด-ต่ำสุดของสารดูดซับที่เติมผงทองแดงมีช่วงกว้างเป็น 1.01 W/m.K ในขณะที่ของสารดูดซับที่เติมผงอลูมิเนียมเท่ากับ 0.43 W/m.K

นอกจากผลทางบวกที่สารเติมแต่งโลหะที่มีค่าการนำความร้อนสูงช่วยให้ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ในทางกลับกันการที่มีโลหะในแท่นตัวดูดซับมากเกินไป อาจจะทำให้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ลดลง หรืออาจมีผลข้างเคียงจากการออกซิไดซ์โลหะด้วยหมู่ไฮดรอกไซด์ในเมทานอลได้ ซึ่งสิ่งนี้จะต้องได้รับการพิสูจน์ในการทดสอบอัตราการดูดและคายสารดูดซับ หรือการทำงานเป็นวัฏจักรดูดซับอย่างต่อเนื่องต่อไป

การเปรียบเทียบความแตกต่างอุณหภูมิในแท่นตัวดูดซับจะช่วยพิสูจน์ผลของค่าการนำความร้อนที่ดีขึ้น เมื่อผสมผงโลหะกับถ่านกัมมันต์ หากผลต่างอุณหภูมิมระหว่างสองตำแหน่งน้อยกว่าแสดงว่าการถ่ายโอนความร้อนที่รวดเร็วขึ้น ผลการวัดอุณหภูมิที่แนวแกนกลางของแท่นสารดูดซับ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 15 นาที และพบว่าผลต่างอุณหภูมิมระหว่างตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของเครื่องดูดซับกรณีผสมผงโลหะนั้นต่ำกว่าอย่างชัดเจน แสดงถึงอัตราการนำความร้อนในเนื้อสารที่สูงกว่า



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นสารทดสอบกรณีผสมผงโลหะ และไม่ผสมผงโลหะ

ผลการทดสอบจากหัวข้อนี้ทำให้ทราบถึงตัวดูดซับที่ผสมสารเติมแต่ง แล้วทำให้มีค่าการนำความร้อนที่ดีจึงสามารถระบายความร้อนได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามสารเติมแต่งดังกล่าวยังได้รับการทดสอบกับตัวดูดซับที่สภาพความดันสูญญากาศ (หรือความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ) ซึ่งเป็นสภาพการทำงานจริงของระบบดูดซับเพื่อการทำ ความเย็น ดังนำเสนอในหัวข้อต่อไป

#### 4.2 การดูดซับและคายสารดูดซับที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

การทดสอบระบบดูดซับที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ คือการทำให้ระบบทดสอบทำงานเป็นวัฏจักรในสภาพสูญญากาศ ที่ประกอบด้วย 4 กระบวนการย่อย ได้แก่ กระบวนการให้ความร้อน การคายสารดูดซับเมทานอล การระบายความร้อน และการดูดซับสารเมทานอลกลับเข้าไปในตัวดูดซับ โดยทดสอบการดูดและคายสารถูกดูดซับรอบ 3 วัฏจักร การออกแบบชุดทดสอบสรุปดังตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตามได้นำถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์มาทดสอบร่วมด้วย เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปได้หากปราศจากสาร PVA สรุปเงื่อนไขและสภาวะการทำงานของระบบดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ชุดทดสอบความสามารถในการดูดซับและคายการดูดซับ

แทนตัวดูดซับ	ร้อยละของสารเติมแต่ง
ถ่านกัมมันต์ผสมตัวประสาน PVA 2.5%	0
ถ่านกัมมันต์ผสมตัวประสาน PVA 2.5% และผงอลูมิเนียม	17.5 และ 22.5
ถ่านกัมมันต์ผสมตัวประสาน PVA 2.5% และผงทองแดง	17.5 และ 22.5

ตารางที่ 4.3 สภาวะการทดสอบกระบวนการดูดและคายสารดูดซับของตัวดูดซับภายในสูญญากาศ

เงื่อนไขการทดสอบ	ค่าที่ใช้
1. ระยะเวลาทดสอบต่อหนึ่งวัฏจักร	60 นาที
2. ช่วงการดูดซับ	
- ความดันการดูดซับ	0.06 bar
- อุณหภูมิเครื่องดูดซับ	20 °C
- อุณหภูมิเครื่องทำระเหย	30 °C
- ระยะเวลาที่ใช้	15 นาที
3. ช่วงการคายสารถูกดูดซับ	
- ความดันการคายสารดูดซับ	0.30 bar
- อุณหภูมิเครื่องดูดซับ	80 °C
- อุณหภูมิเครื่องทำระเหย	20 °C
- ระยะเวลาที่ใช้	45 นาที (ทำให้อุณหภูมิที่เครื่องดูดซับสูงถึง 80°C 15 นาที)

#### 4.2.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซับและคายสารถูกดูดซับ

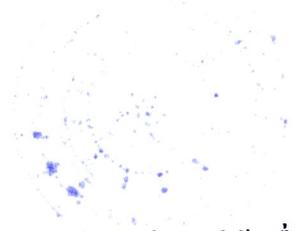
ตัวแปรต้นที่พิจารณาว่ามีอิทธิพลต่อต่อสามารถในการดูดซับและคายสารถูกดูดซับในสภาวะต่ำกว่าบรรยากาศ ได้แก่ 1) ชนิดและสัดส่วนของสารเดิมแต่ง 2) ตำแหน่งการใช้คลื่นอุลตราโซนิก โดยพิจารณา 2 เงื่อนไข คือ กรณีใช้และไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกประกอบในระบบ ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.4-4.8

1) ชนิดและสัดส่วนของสารเดิมแต่ง หมายถึง สารที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางการถ่ายเทความร้อนของแท่นตัวดูดซับ ทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ ผงโลหะทองแดง หรือ ผงโลหะอลูมิเนียม ที่สัดส่วน 17.5%-22.5% ค่อน้ำหนักโดยมวลของถ่านกัมมันต์

2) ตำแหน่งการใช้คลื่นอุลตราโซนิก หมายถึง การติดตั้งหัวกำเนิดอุลตราโซนิกที่ผนังด้านบนสุดของเครื่องดูดซับ และที่ด้านล่างสุดของเครื่องทำระเหย (ดังเงื่อนไขตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 สรุปผลกระทบของชนิดและสัดส่วนของสารเติมแต่ง และตำแหน่งการใช้ คลื่นอุลตราโซนิก

เงื่อนไขที่พิจารณา		กระบวนการดูดซับ	กระบวนการคายสารดูดซับ
ผลจากชนิดของสารเติมแต่ง (ผงทองแดง หรือ ผงอลูมิเนียม)	การเข้าสู่สถานะสมดุล	แท่นดูดซับ ที่มี ผงโลหะทองแดงเป็นสารเติมแต่งสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าแท่นดูดซับที่มีผงโลหะอลูมิเนียมเป็นสารเติมแต่ง เนื่องจากแท่นตัวดูดซับที่เติมผงโลหะทองแดงสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า	-
	ปริมาณของเมทานอลต่อน้ำหนักของแท่นตัวดูดซับ (ml/g)	การดูดซับของแท่นตัวดูดซับที่ผสมผงโลหะทองแดงสามารถดูดซับได้ดีกว่า เนื่องจากผงโลหะอลูมิเนียมมีความหนาแน่นที่น้อย ซึ่งมีปริมาณผงมากกว่าที่น้ำหนักเดียวกัน จึงทำให้เกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และไปขัดขวางการดูดซับเมทานอล	การคายการดูดซับ แท่นตัวดูดซับที่เติมผงอลูมิเนียมสามารถคายสารดูดซับออกมาได้น้อย เนื่องจากในขั้นตอนการดูดซับก่อนหน้านี้ แท่นตัวดูดซับที่เติมผงอลูมิเนียมสามารถดูดซับเมทานอลได้น้อยอยู่แล้ว จึงส่งผลให้เมทานอลที่คายออกมาในปริมาณน้อยเช่นกัน
ผลจากสัดส่วนของสารเติมแต่ง (17.5-22.5%)	การเข้าสู่สถานะสมดุล	แท่นดูดซับที่เติมสารเติมแต่งชนิดเดียวกัน จะเข้าสู่สภาวะสมดุลใกล้เคียงกัน	-

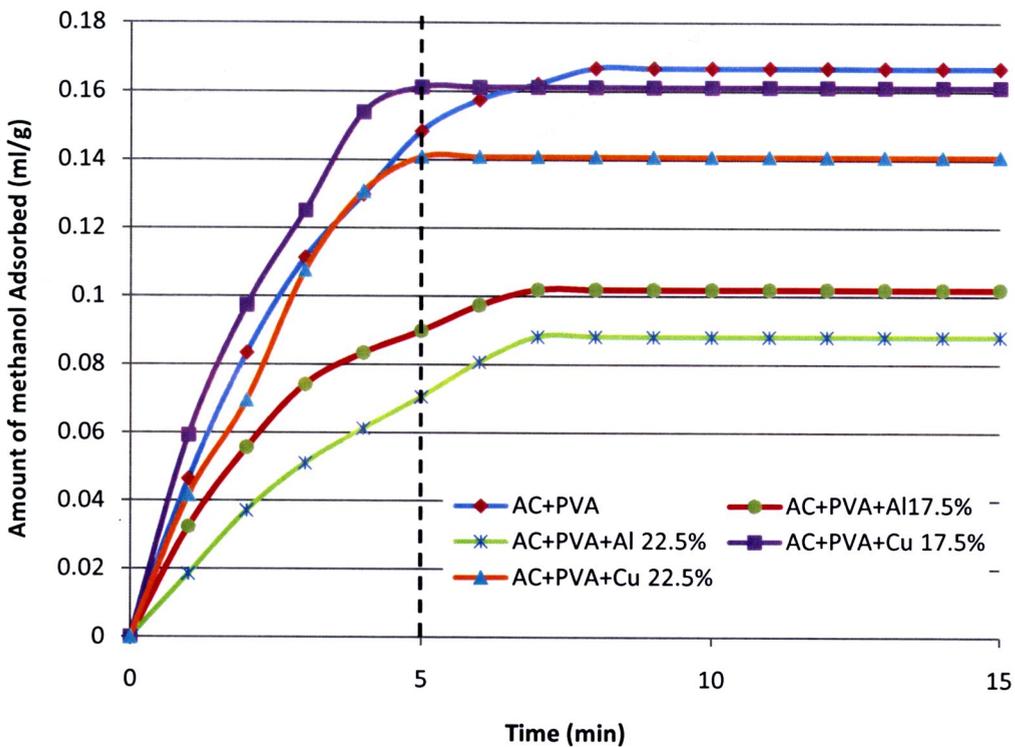


ตารางที่ 4.4 สรุปผลกระทบของชนิดและสัดส่วนของสารเติมแต่ง และตำแหน่งการใช้ คลื่นอุลตราโซนิก (ต่อ)

เงื่อนไขที่พิจารณา		กระบวนการดูดซับ	กระบวนการคายสารดูดซับ
ผลจากสัดส่วนของสารเติมแต่ง (17.5-22.5%)	ปริมาณของเมทานอลต่อน้ำหนักของแท่นตัวดูดซับ (ml/g)	การดูดซับเมทานอลของแท่นตัวดูดซับมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผงโลหะทองแดง หรืออลูมิเนียมเพิ่มขึ้น	-
ตำแหน่งการใช้คลื่นอุลตราโซนิก	ใช้เฉพาะที่เครื่องดูดซับ	ปริมาณการดูดซับเมทานอลลดลง 1.72-4.02% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก หรืออาจกล่าวได้ว่าการติดอุลตราโซนิกที่ตำแหน่งนี้ไม่ส่งผลต่อการดูดซับเมทานอลนั่นเอง	- คลื่นอุลตราโซนิกช่วยทำลายพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างสารเมทานอลและพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้สารเมทานอลถูกปลดปล่อยจากเครื่องดูดซับมากขึ้น จึงเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น - ปริมาณเมทานอลที่คายออกมาเพิ่มขึ้น 42.59-48.15%
	ใช้เฉพาะที่เครื่องทำระเหย	ปริมาณการดูดซับเมทานอลเพิ่มขึ้น 12.64-15.51% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก	-
	ใช้ทั้งที่ตำแหน่งเครื่องดูดซับและเครื่องทำระเหย	ปริมาณการดูดซับเมทานอลเพิ่มขึ้น 10.34-14.36% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก	-



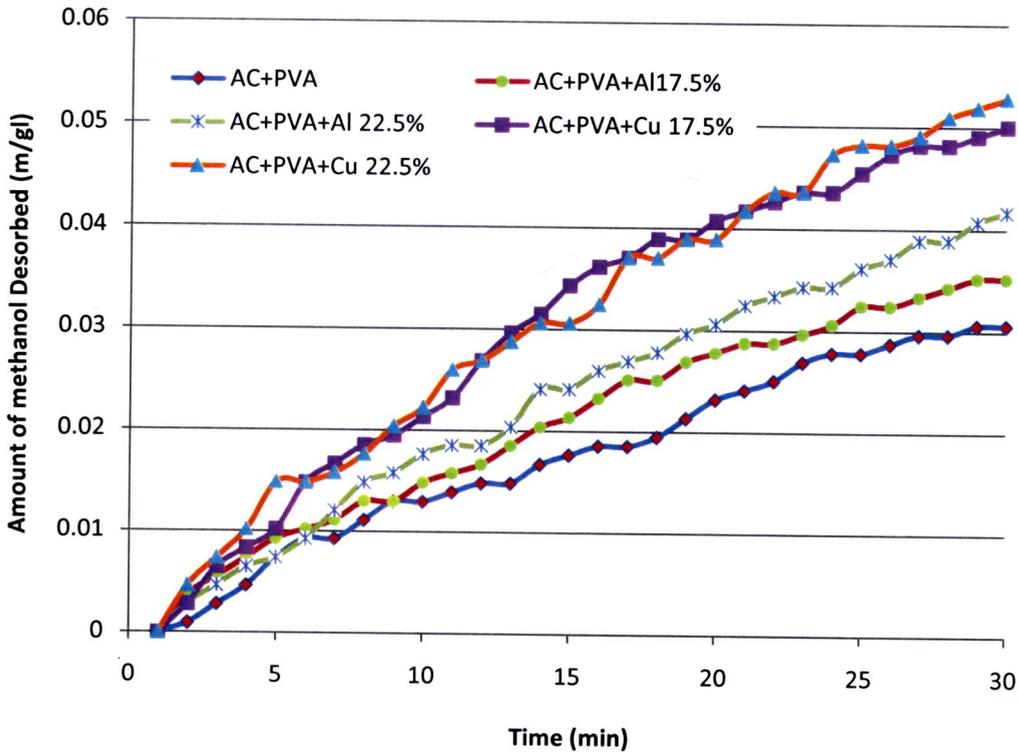
กราฟรูปที่ 4.4 – 4.6 แสดงให้เห็นถึงการแปรผันระหว่างความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (เมทานอล) ในตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ประจุในเครื่องดูดซับ ( $\text{ml.g}_{\text{AC}}^{-1}$ ) กับเวลา ตลอดจนวัฏจักรการดูดซับของแท่งตัวดูดซับที่ผสมสารเติมแต่งชนิดและสัดส่วนต่างๆ (ดังสรุปประเด็นสำคัญไว้ในตารางที่ 4.4 และสรุปค่าเฉลี่ยไว้ในตารางที่ 4.5)



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับเมทานอลกับเวลา ที่คาบเวลา (นาที) ของตัวดูดซับที่ผสมผงโลหะในสัดส่วนต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 4.4 แสดงผลของชนิดและสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าการดูดซับเมทานอลเทียบกับเวลา (ช่วงการดูดซับ 15 นาที) สังเกตเห็นว่าปริมาณของเมทานอลที่เข้าไปประจุในแท่งตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก หลังจากนั้นแท่งดูดซับเริ่มอิ่มตัวและหยุดการดูดซับไปในที่สุด (เข้าสู่สภาวะสมดุล) โดยแท่งดูดซับที่มีผงทองแดงเป็นสารเติมแต่งสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่า และยังสามารถดูดซับเมทานอลได้ดีกว่าเช่นกัน แต่เมื่อ

พิจารณาในแง่สัดส่วนกลับพบว่าแท่นตัวดูดซับที่เติมสารเติมแต่ง 22.5% สามารถดูดซับเมทานอลได้น้อยกว่าแท่นตัวดูดซับที่เติมสารเติมแต่ง 17.5% ในทุกชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการคายเมทานอลกับเวลาที่คาบเวลา (นาที) ของตัวดูดซับที่ผสมผงโลหะในสัดส่วนต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 4.5 แสดงผลของชนิดและสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อปริมาณการคายเมทานอลเทียบกับเวลา (ช่วงการคายสารดูดซับ 30 นาที) จะสังเกตเห็นว่าลักษณะการคายเมทานอลของแท่นสารดูดซับแต่ละแท่นสามารถคายเมทานอลออกมาได้เรื่อยๆตลอดช่วงการคายสารดูดซับ จึงอาจกล่าวได้ว่าชนิดและสัดส่วนของสารเติมแต่งไม่มีผลต่อระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงการคายสารดูดซับ แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการคายเมทานอล พบว่าแท่นสารดูดซับที่มีผงทองแดงเป็นสารเติมแต่งสามารถคายเมทานอลออกมาได้มากกว่าแท่นสารดูดซับที่มีผงอลูมิเนียมเป็นสารเติมแต่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับเมทานอลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.5 สรุปปริมาณการดูดซับและคายเมทานอลของตัวดูดซับที่ผสมผงโลหะสัดส่วนต่างๆ

ชนิด ของสารเติมแต่ง	ปริมาณการดูดซับ	ระยะเวลาเข้า	อัตราการดูดซับ	ปริมาณการคาย
	เมทานอล (ml.g-1)	สู่สมดุล (min)	เมทานอล (ml.g-1.min-1)	เมทานอล (ml.g-1)
AC+PVA	0.166909861	8	0.020863733	0.030600141
AC+PVA+Al 17.5%	0.10200047	7	0.014571496	0.035236526
AC+PVA+Al 22.5%	0.088091315	7	0.012584474	0.041727465
AC+PVA+Cu 17.5%	0.161346199	5	0.03226924	0.051000235
AC+PVA+Cu 22.5%	0.140946105	5	0.028189221	0.051927512

### สรุปประเด็นสำคัญๆ ดังนี้

- 1) เปรียบเทียบด้านการดูดซับ พบว่า ที่สัดส่วนการเติมสารเติมแต่งโลหะเท่ากัน แทนตัวดูดซับที่เติมผงทองแดงสามารถดูดซับเมทานอลได้สูงกว่าการเติมอลูมิเนียม 58.18 – 60% เช่นเดียวกันกรณีการคายเมทานอลจะสูงกว่า 26.66 – 42.10%
- 2) การดูดซับเมทานอลโดยเฉลี่ยของแทนตัวดูดซับที่เติมผงทองแดงมีแนวโน้มลดลง 17.34 – 19.84 ml เมื่อปริมาณผงทองแดงเพิ่มขึ้น หรือคิดเทียบกับมวลของถ่านกัมมันต์เป็น 0.141 – 0.161 ml/g ต่ำกว่าแทนตัวดูดซับที่เติมเฉพาะ PVA 0.006 – 0.026 ml/g หรือต่ำกว่า 3.33 – 15.56%
- 3) การคายสารดูดซับของแทนตัวดูดซับที่เติมผงโลหะทองแดงที่สัดส่วน 17.5 – 22.5% มีค่าใกล้เคียงกัน การเติมผงทองแดง 17.5% คายเมทานอลได้เฉลี่ย 6.16 ml หากเติมผงทองแดง 22.5% คายเมทานอลได้เฉลี่ย 6.50 ml
- 4) การดูดซับเมทานอลของแทนตัวดูดซับที่เติมผงอลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยได้ 10.83 – 12.54 ml หรือคิดเทียบกับมวลของถ่านกัมมันต์เป็น 0.088 – 0.102 ml/g ต่ำกว่าแทนตัวดูดซับที่เติมเฉพาะ PVA 0.065 – 0.079 ml/g หรือต่ำกว่า 38.88 – 47.22%
- 5) ปริมาณการคายสารถูกดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียม แทนตัวดูดซับ คายเมทานอล 4.33 ml และ 5.13 ml ที่ปริมาณผงอลูมิเนียมสัดส่วน 17.5% และ 22.5% ตามลำดับ

อภิปรายสาเหตุที่แทนตัวคุดซ์ที่เติมผงทองแดงมีความสามารถในการคุดซ์และคายสาร ถูกคุดซ์สูงกว่า กรณีเติมผงอลูมิเนียม และมีแนวโน้มการคุดซ์ลดลงเมื่อปริมาณผงโลหะเพิ่มขึ้น คือ

(ก) ความหนาแน่นของผงอลูมิเนียมน้อยกว่าผงทองแดงประมาณ 3 เท่า เมื่อให้ สัดส่วนโดยมวลของโลหะของทั้งสองชนิดนี้เท่ากันแล้ว ปริมาณของผงอลูมิเนียมจึงมีมากกว่า ผงทองแดงมาก เมื่อทำการผสมเข้ากับผงถ่านกัมมันต์ ผงอลูมิเนียมจึงเข้าไปขัดขวางกระบวนการ คุดซ์เมทานอล

(ข) ระหว่างกระบวนการคุดซ์นั้นแทนตัวคุดซ์ที่เติมผงโลหะทองแดงให้ค่า ก่อนข้างใกล้เคียงกับตัวคุดซ์ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เนื่องจากผงโลหะทองแดงมีปริมาณน้อยมาก และได้กระจายตัวไปตามรูพรุนหรือสามารถแทรกเข้าไปยังสาขาของรูพรุนแมโครและเมโสพอร์ หรือแทรกซึมไปได้อย่างทั่วถึง จึงไม่ไปขัดขวางการคุดซ์เมทานอลจากปากทางของรูพรุนแมโครพอร์

(ค) ค่าการนำความร้อนของผงทองแดงดีกว่าผงอลูมิเนียมเกือบเท่าตัว จึงทำให้แทนตัว คุดซ์ที่ผสมผงทองแดงสามารถคายเมทานอลได้มากกว่าแทนตัวคุดซ์ที่ผสมผงอลูมิเนียม และ ให้ผลเช่นเดียวกับเมื่อปริมาณผงโลหะในแทนตัวคุดซ์เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำคลื่นอุลตราโซนิกมาใช้ในกระบวนกระบวนการดูดซับที่เครื่องดูดซับ และ กระบวนการระเหยที่เครื่องทำระเหย ดังระบุชุดทดสอบในบทที่ 3 โดยใช้ตัวดูดซับที่มีชนิดและสัดส่วนโดยมวลของสารเติมแต่ง และสภาวะในการทดสอบดังตารางที่ 4.3

เหตุผลสำคัญที่ทดสอบผลการใช้คลื่นที่อุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้ง 2 ตัวนั้น เพื่อให้ทราบว่าคลื่นอุลตราโซนิกที่ให้กับอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง (คย. เครื่องทำระเหย) ในช่วงเวลาหนึ่งของวัฏจักรการดูดซับจะให้ผลคืออย่างไร หรืออาจจะมีผลกระทบกับสมรรถนะของอีกอุปกรณ์ (คย. เครื่องดูดซับ) ที่ต่อเชื่อมกันอยู่หรือไม่และอย่างไร ซึ่งเงื่อนไขในการใช้คลื่นอุลตราโซนิกดัง ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขในการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่เครื่องดูดซับและเครื่องทำระเหย

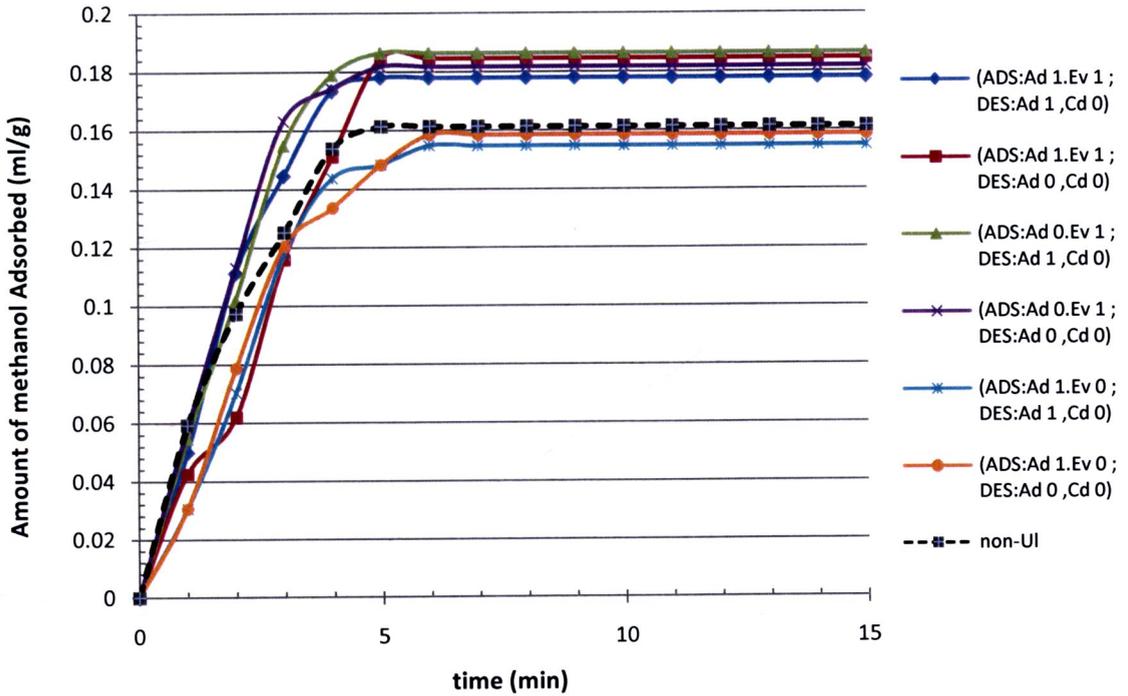
เงื่อนไขที่	1	2	3	4	5	6
<b>กระบวนการ</b>						
Adsorption						
- Adsorber	√	√	×	×	√	√
- Evaporator	√	√	√	√	×	×
Desorption						
- Adsorber	√	×	√	×	√	×
- Condenser	×	×	×	×	×	×

หมายเหตุ:

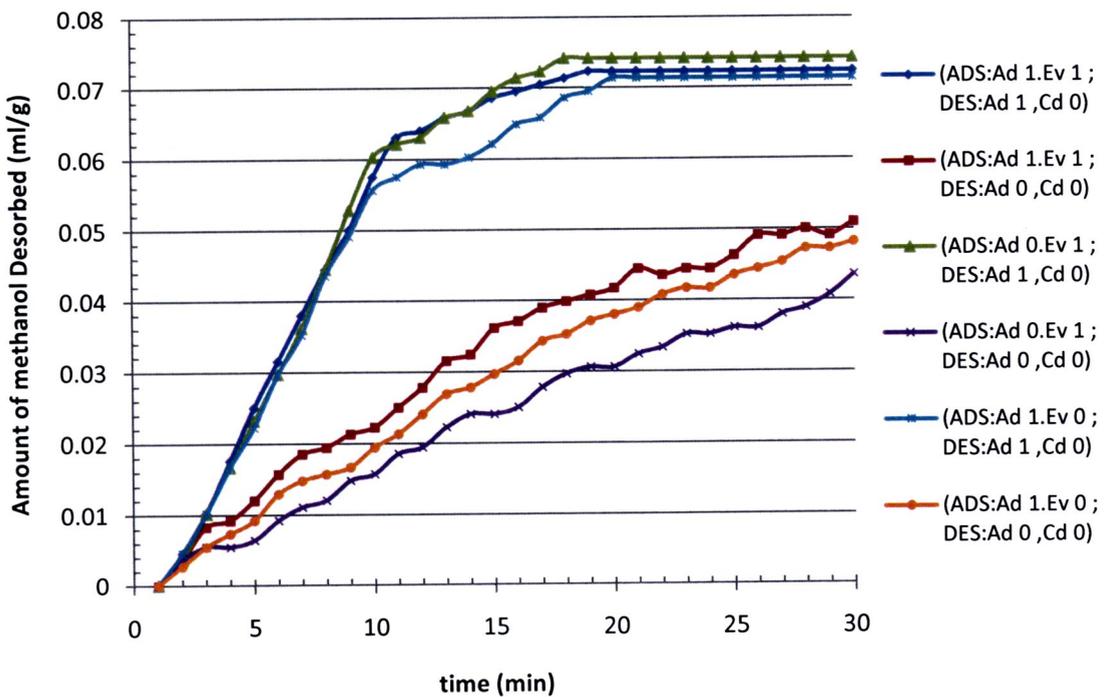
เครื่องหมายถูก “√” ในตาราง และ “1” ในกราฟด้านล่าง หมายถึงอุปกรณ์นั้นในขณะทำงานได้รับคลื่นอุลตราโซนิก

เครื่องหมายผิด “×” ในตาราง และ “0” ในกราฟด้านล่าง หมายถึง อุปกรณ์นั้นในขณะทำงานไม่ได้รับคลื่นอุลตราโซนิก

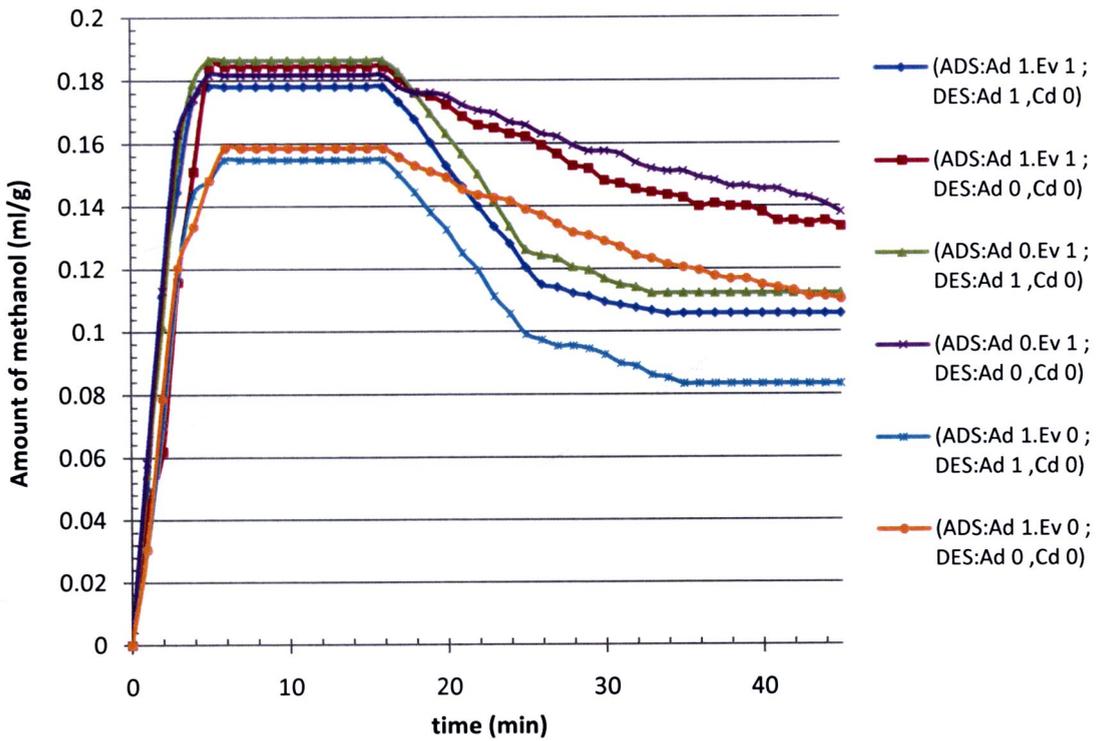
กราฟรูปที่ 4.6 – 4.8 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิคายสารดูดซับที่ 80 °C ต่อปริมาณการคายสารเมทานอล กรณีที่ใช้และไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกประกอบคย เมื่ออุณหภูมิน้ำถ่ายโอนความร้อนในช่วงกระบวนการคายสารดูดซับเป็น 80 °C และอุณหภูมิการควบแน่น 20 °C



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับเมทานอลกับเวลาที่คาบเวลา (นาที) กรณีให้คลื่นอุตราโซนิกที่เครื่องดูดซับและ/หรือเครื่องทำระเหย



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการคายเมทานอลกับเวลาที่คาบเวลา (นาที) กรณีให้หรือไม่ให้คลื่นอุตราโซนิกที่เครื่องดูดซับ



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการดูดและคายเมทานอลทั้งวัฏจักรเทียบกับเวลาที่คาบเวลา (นาที)

เมื่อ Ad 1, Ev 0 หมายถึง จ่ายคลื่นที่เครื่องดูดซับ แต่ไม่จ่ายคลื่นที่เครื่องทำระเหย  
 Ad 1, Ev 1 หมายถึง จ่ายคลื่นที่เครื่องดูดซับ และ เครื่องทำระเหย  
 Ad 0, Ev 1 หมายถึง ไม่จ่ายคลื่นที่เครื่องดูดซับ แต่ จ่ายคลื่นที่เครื่องทำระเหย

ตารางที่ 4.7 สรุปปริมาณการดูดและคายเมทานอลต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไขที่	ปริมาณดูด (ml/g) กรณีใช้คลื่น	ปริมาณคาย (ml/g) กรณีใช้คลื่น	ปริมาณดูด (ml/g) กรณีไม่ใช้คลื่น	ปริมาณคาย (ml/g) กรณีไม่ใช้คลื่น	% เปลี่ยนแปลงของช่วงดูด	% เปลี่ยนแปลงของช่วงคาย
1	0.1780	0.0723	0.1613	0.0501	10.3448	44.4444
2	0.1845	0.0510	0.1613	0.0501	14.3678	1.8519
3	0.1864	0.0742	0.1613	0.0501	15.5172	48.1481
4	0.1817	0.0436	0.1613	0.0501	12.6437	-12.9630
5	0.1549	0.0714	0.1613	0.0501	-4.0230	42.5926
6	0.1586	0.0482	0.1613	0.0501	-1.7241	-3.7037

## สรุปประเด็นที่ได้จากทดสอบ

### 1. กรณีใช้อุลตราโซนิกช่วงการดูดซับ

ตัวดูดซับที่มีผงทองแดง 17.5% โดยมีมวลเป็นสารเติมแต่ง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6 มีข้อสังเกตและสามารถอภิปรายได้ดังนี้

- 1) พิจารณาเปรียบเทียบกรณี Ad 1, Ev 1 และ Ad 0, Ev 1 กับกรณีไม่ใช้คลื่นฯ (Ad 0, Ev 0) พบว่าเงื่อนไขการใช้คลื่นทั้ง 2 เงื่อนไขนี้ ให้ผลในทางบวกโดยเพิ่มค่าปริมาณการดูดซับขึ้น 10.34-15.52% แต่เมื่อเปรียบเทียบกรณี Ad 1, Ev 0 กับกรณีไม่ใช้คลื่นฯ พบว่าปริมาณการดูดซับลดลง 1.72-4.02% เพราะไม่ได้ช่วยเร่งการระเหยที่เครื่องทำระเหย แต่กลับไปขัดขวางการดูดซับที่เครื่องดูดซับ ทำให้การเกาะของเมทานอลกับถ่านกัมมันต์ยากยิ่งขึ้น
- 2) อุปกรณ์ที่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกมีอิทธิพลต่อปริมาณการดูดซับ (ml) โดยเฉพาะเมื่อเครื่องทำระเหยถูกกระตุ้นโดยคลื่นอุลตราโซนิก ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 12.64-15.52% คลื่นช่วยก่อให้เกิดกระบวนการ Cavitation ซึ่งช่วยเสริมให้การเดือดเกิดได้เร็วขึ้นในเครื่องทำระเหย ในขณะที่การเคลื่อนที่คลื่นผ่านตัวกลางของแข็งที่ตัวดูดซับซึ่งแม้ว่าจะช้ากว่าจะช่วยกระตุ้นกระบวนการคายสารถูกดูดซับที่เครื่องดูดซับได้เช่นกัน พิจารณาการใช้คลื่นที่เครื่องทำระเหย การเดือดของเมทานอลจะเกิดได้ยากกว่าหากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ คลื่นอุลตราโซนิกจะช่วยให้เกิดความปั่นป่วนขึ้น ส่งผลให้เกิดการสั่นตัวในระนาบโมเลกุลของสารทำงาน เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดมีค่ามากขึ้น จึงมีส่วนช่วยให้สารทำงานมีการระเหยเพิ่มขึ้น (ธรรมบุญ , 2551)
- 4) พิจารณาการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่เครื่องดูดซับ อัตราการดูดซับกลับลดลงโดยเฉลี่ย 1.72-4.02% เนื่องจากในการยึดเกาะของไอเมทานอลกับพื้นผิวถ่านกัมมันต์ อาจยึดเกาะกันด้วยแรงดึงดูดไอออนิก เมื่อใช้คลื่นอุลตราโซนิกกับกระบวนการดูดซับที่เครื่องดูดซับ จึงไปขัดขวางระหว่างตัวดูดซับและเมทานอล ทำให้เมทานอลไม่สามารถยึดเกาะที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ อัตราการดูดซับจึงลดลงสอดคล้องกับงานของ O. Hamdaoui (2003)

## 2. กรณีใช้อุลตราโซนิกช่วงการคายสารดูดซับ

อัตราการคายสารเมทานอลที่เครื่องดูดซับถูกเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีใช้และไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก (ตำแหน่งที่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก คือ เครื่องดูดซับ) ใช้แทนดูดซับตัวอย่างที่มีผงทองแดง 17.5% โดยมวล ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7 มีข้อสังเกตและสามารถอภิปรายได้ดังนี้

- 1) พิจารณาเปรียบเทียบกรณีใช้และไม่ใช้คลื่นฯ พบว่า คลื่นอุลตราโซนิกช่วยให้เมทานอลถูกปลดปล่อยมากขึ้น โดยแทนดูดซับที่ไม่ได้รับคลื่นจะสามารถคายเมทานอลออกมาได้เพียง 0.05 ml/g แต่แทนดูดซับที่ได้รับคลื่นสามารถคายเมทานอลออกมาได้มากถึง 0.07 ml/g เนื่องจากคลื่นอุลตราโซนิกทำให้เกิดความร้อน เมื่อตัวดูดซับดูดกลืนคลื่นอุลตราโซนิกไว้ อุณหภูมิของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น อันตรกิริยาเพิ่มขึ้นและลดแรงยึดเกาะของเมทานอลบนผิวถ่านกัมมันต์จึงสามารถไล่ไอมเมทานอลที่ตัวดูดซับได้ดียิ่งขึ้น
- 2) พิจารณาเปรียบเทียบกรณีใช้และไม่ใช้คลื่นฯ พบว่า คลื่นอุลตราโซนิกช่วยให้เมทานอลเข้าสู่สถานะสมดุลเร็วขึ้น โดยแทนดูดซับที่ได้รับคลื่นใช้เวลาเพียง 18 นาที และยังช่วยให้แทนดูดซับคายเมทานอลออกมาได้สม่ำเสมออีกด้วย แต่ในทางกลับกันแทนดูดซับที่ไม่ได้รับคลื่นฯกลับยังไม่สามารถเข้าสู่สถานะสมดุลในช่วงเวลาทดสอบได้ เนื่องจากคลื่นอุลตราโซนิกทำให้เกิดโพรงอากาศจำนวนมากมาย (Cavitation) ในรูพรุนของตัวดูดซับ จากการเหนี่ยวนำให้เกิดความแปรปรวนของความดันในตัวดูดซับ โพรงอากาศจำนวนมากเหล่านี้จะพองตัวและหดตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อเข้าไปแทรกแทนที่เมทานอล (วารสารไทยโภชนาการ, 2553) ทำให้ไอมเมทานอลหลุดออกจากตัวดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

### ประมวลผลการทดสอบเพื่อคัดเลือกแทนตัวดูดซับที่มีสัดส่วนสารผสมที่เหมาะสม

จากผลการทดสอบข้างต้น ได้แก่ (1) การทดสอบสภาพการนำความร้อนของตัวดูดซับ (Thermal conductivity Composite adsorbent bed) (2) การทดสอบความสามารถในการดูดซับ และการคายการดูดซับในสภาพความดันต่ำกว่าบรรยากาศกรณีใช้และไม่ใช้คลื่นอุลตราโซ-

นิกประกอบ ผู้วิจัยได้คัดเลือกสารเติมแต่งและสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อนำแทนตัวดูดซับที่เดิม สารเติมแต่งที่เหมาะสม ไปใช้ในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำความเย็น

- (1) การทดสอบสภาพการนำความร้อน ของแทนตัวดูดซับ (Thermal conductivity Composite adsorbent bed) แทนตัวดูดซับที่เดิมผงทองแดงกลับมาได้เปรียบ แทนตัวดูดซับที่เดิมผงอลูมิเนียม โดยที่แทนตัวดูดซับที่เดิมผงทองแดงที่สัดส่วน 22.5% มีค่าการนำความร้อนสูงสุด รองลงมาคือที่สัดส่วน 17.5% แต่แทนตัวดูดซับที่เดิมผงอลูมิเนียมก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการเติมเพิ่มขึ้นเช่นกัน
- (2) การทดสอบความสามารถในการดูดซับและการคายการดูดซับในสภาพความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (กรณีไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิค) แทนตัวดูดซับที่เดิมผงทองแดง ได้เปรียบอีกเช่นเคย โดยที่แทนตัวดูดซับที่เดิมทองแดงที่สัดส่วน 17.5% สามารถดูดและคายไอเมทานอลได้สูงสุด
- (3) การทดสอบความสามารถในการดูดซับและการคายการดูดซับในสภาพความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (กรณีใช้คลื่นอุลตราโซนิค) จากทั้งหมด 6 เงื่อนไข เงื่อนไขที่สามารถดูดและคายไอเมทานอลได้ดีที่สุดคือเงื่อนไขที่ 3

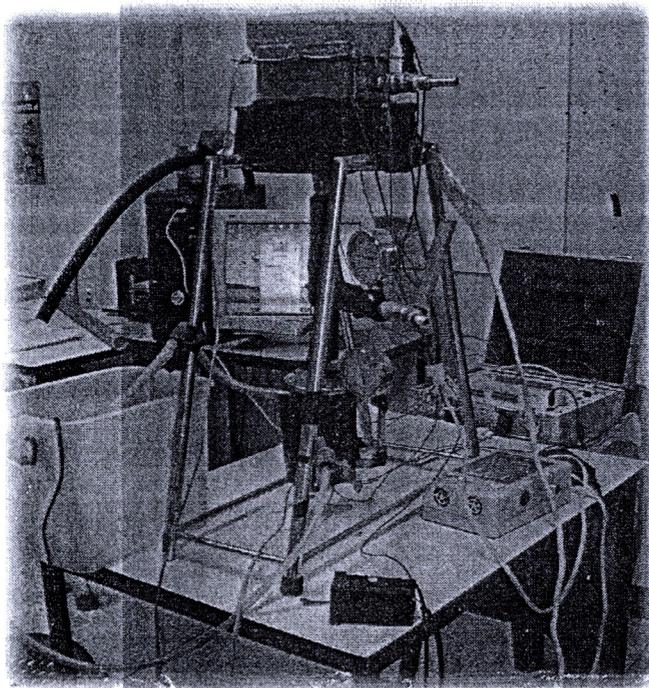
ประมวลผลการทดสอบ 3 รายการแล้ว พบว่า การผสมผงทองแดงสัดส่วน 17.5% มีความได้เปรียบด้านคุณสมบัติต่างๆ ยกเว้นในแง่ของการนำความร้อน แต่เมื่อพิจารณาวิเคราะห์แล้วพบว่า ในการทดสอบระบบทำความเย็นในระบบจริงนั้น ความดันภายในระบบค่อนข้างต่ำเนื่องจากต้องทำงานที่สภาวะความดันและอุณหภูมิเมทานอลที่ต่ำ เพื่อให้ทำความเย็นได้ แต่ขณะทดสอบค่าการนำความร้อน เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานต้องทำการวัดในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ ทำให้ช่องว่างในสารดูดซับถูกอากาศซึ่งเป็นฉนวนเข้าไปแทรกอยู่ ค่าการนำความร้อนของสภาวะที่ทดสอบจึงอาจเบี่ยงเบนจากสภาวะทำงานในทดสอบระบบจริงไม่ได้

อย่างไรก็ดี ค่าการนำความร้อนที่ได้แสดงให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนเมื่อเติมสารเติมแต่งจากโลหะทั้งสองชนิด

สรุปได้ว่า ผู้วิจัยเลือกใช้ แทนตัวดูดซับที่เติมผงทองแดง 17.5% ซึ่งเหมาะสมในเกือบทุกด้านและมีคุณสมบัติด้านต่างๆ โดดเด่นเมื่อเปรียบเทียบกับแทนตัวดูดซับที่องค์ประกอบอื่น มาใช้ในการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำความเย็น โดยใช้ร่วมกับคลื่นอุลตราโซนิกตามเงื่อนไขที่ 3

#### 4.3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานของระบบดูดซับ ภายใต้เงื่อนไขการทำงาน (การใช้หรือไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง) และสัดส่วนผสมสารเติมแต่งโลหะที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่ได้รับการคัดเลือกมา คือ แทนตัวดูดซับที่ผสมสารเติมแต่งและตัวประสาน ในสัดส่วนโดยมวล [ถ่านกัมมันต์:โลหะ:PVA] เป็น [1 : 0.225 : 0.025] จากเงื่อนไขการใช้คลื่นอุลตราโซนิกแบบที่ 3 ซึ่งให้ผลดีที่สุด คือ ใช้คลื่นที่เครื่องทำระเหยในช่วงการดูดซับและใช้คลื่นที่เครื่องดูดซับในช่วงคายสารเมทานอล [ADS (Ad 0 , Ev 1) ; DES (Ad 1 , Cd 0) จำนวน 20 วัฏจักรต่อเนื่องกัน

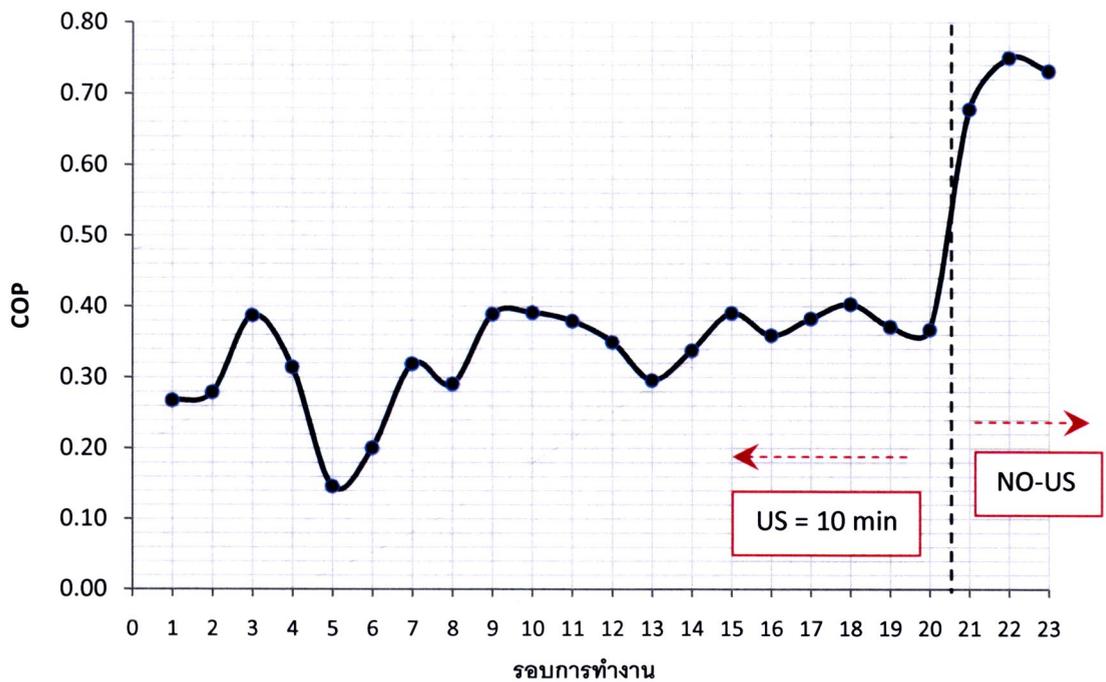


รูปที่ 4.9 การทดสอบสมรรถนะการทำความเย็น (COP)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (COP) หรือ อัตราส่วนของปริมาณการทำความเย็นที่ผลิตได้ต่อพลังงานทั้งหมดที่ให้กับระบบ สัดส่วนปริมาณความเย็นที่ได้จากเครื่องทำระเหย และ พลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบในช่วงการคายสารเมทานอล

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ในการคำนวณสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

ค่าคงที่	ค่า
ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ ( $\text{kg/m}^3$ )	490
ความหนาแน่นของเมทานอล ( $\text{g/ml}$ )	0.7918
ค่าความร้อนแฝงในการระเหยของเมทานอล ( $\text{kJ/kg}$ )	1,125
ค่าความจุความร้อนของเมทานอล ( $\text{J/kg K}$ )	2,490
ค่าความจุความร้อนของน้ำ ( $\text{J/kg K}$ )	4,180
ค่าความจุความร้อนของถ่านกัมมันต์ ( $\text{J/kg}$ )	700
ค่าคงที่ของก๊าซเมทานอล ( $\text{J/kg.K}$ )	8,314
น้ำหนักโมเลกุลของเมทานอล ( $\text{g/mol}$ )	32.04



รูปที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ

#### รูปที่ 4.10 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กรณีจ่ายคลื่น 10 นาที ค่า COP สูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.403 และ 0.146 ตามลำดับ ทั้งนี้สมรรถนะการทำความเย็นของระบบจะแปรผันตามพลังงานความร้อนที่ดึงได้ที่เครื่องทำระเหยในช่วงกระบวนการดูดซับ และแปรผกผันกับพลังงานความร้อนที่ให้แก่เครื่องดูดซับในช่วงการคายสาร
- 2) การที่ปริมาณเมทานอลที่ถูกดูดซับในรอบแรกๆ ไม่สามารถคายออกมาได้เท่าปริมาณเดิม อาจเป็นจากการที่เมทานอลเข้าไปดูดซับในรูพรุนแบบ Micropores บางส่วนและดูดซับอยู่บนพื้นผิวของรูพรุนถ่านกัมมันต์อย่างแน่นหนา จนไม่สามารถคายออกมาได้ในสภาวะการทดสอบ หรือ เกิดจากการที่อนุภาคถ่านกัมมันต์ขยับหรือเคลื่อนตัวมาปิดรูพรุนเหล่านี้ทำให้เมทานอลที่ถูกจับอยู่ไม่สามารถหนีออกมาได้ อย่างไรก็ตาม ในรอบหลังจากวัฏจักรที่ 15 คาดว่าเมทานอลที่สะสมอยู่มากๆ ใน Micropores อาจทะลักออกมาจนทำให้รูพรุน Micropores เปิดมากขึ้นได้ ประกอบกับการดูดซับในรูพรุนแบบ

Macropores ร่วมด้วยทำให้ค่า  $COP_c$  ในรอบหลังมีค่าแปรผันน้อยลงหรือค่อนข้างคงที่มากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นแนวโน้มที่ดี ตั้งแต่วัฏจักรที่ 18 เป็นต้นไป

- 3) ปัจจัยที่กระทบกับค่า COP หรือปริมาณการคายสาร คือ สภาพการสะสมเมทานอลจากระบบการทำงานก่อนหน้า ซึ่งแนวโน้มปริมาณการคายสารลดลงเรื่อยๆ แสดงว่ามีเมทานอลเข้าไปสะสมในรูพรุนและช่องว่างมากและสะสมกันไปเรื่อยๆ จนมาถึงจุดหนึ่งเมทานอลที่ค้างในรูพรุน สะสมมากจนมีความเข้มข้น ณ จุดนั้นหรือมีศักย์สูงพอให้เกิดการขับดันทั้ง โดยการแพร่และพามวลผ่านรูพรุนออกมา หรือถ่ายโอนมวลโดยการทั้งการแพร่และพาคลุ่มก้อน (Bulk) เมทานอลออกมา จนเอาชนะแรงวันเดอร์วาลส์ที่ยึดเหนี่ยวเมทานอลกับถ่านกัมมันต์ได้
- 4) เมื่อไม่มีการจ่ายคลื่นอุลตราโซนิคทำให้  $COP_c$  เพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัว คือ 0.678 - 0.750 เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการคายสารลดลง

#### 4.4 สรุปผลการทดสอบ

ชนิดสารเติมแต่งโลหะ (Al หรือ Cu) และสัดส่วนผสม (2.5% - 22.5%) มีผลต่อคุณสมบัติของแท่งตัวดูดซับจากถ่านกัมมันต์ การผสมผงทองแดงที่สัดส่วน 22.5% W/W ให้ค่าการนำความร้อนที่ดีที่สุด แท่งตัวดูดซับตัวอย่างได้รับการทดสอบ 3 รายการ ได้แก่ การหาค่าการนำความร้อน ค่าการดูดซับและค่าการคายสารเมทานอลในสภาพสุญญากาศ (กรณีใช้และกรณีไม่ใช่คลื่นอุลตราโซนิค) ผลปรากฏว่า ค่าการนำความร้อนเพิ่มตามสัดส่วนผสมสารเติมแต่งโลหะ โดยทองแดงให้ผลดีกว่า ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนการดูดซับและคายสารดูดซับเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงกับอัตราการดูดซับเห็นผลชัดเจนกว่า

การเปลี่ยนแปลงชนิดอุปกรณ์ที่ได้รับหรือไม่ได้รับคลื่นอุลตราโซนิคจาก 6 รูปแบบ แสดงว่า การใช้คลื่นที่เครื่องดูดซับช่วงการคายสารถูกดูดซับร่วมกับการใช้คลื่นที่เครื่องทำระเหยในช่วงการดูดซับสารเมทานอลจะให้ผลดีที่สุด ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะดีขึ้น และการทดสอบในเงื่อนไขที่ 20 รอบวัฏจักรให้ผลที่ดีขึ้นในวัฏจักรลำดับที่ 15 เป็นต้นไป