

การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ดัดแปรด้วยเอมีนจากไม้ไผ่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CO₂ CAPTURE ON AMINE-MODIFIED ACTIVATED CARBON FROM BAMBOO



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ดัดแปรด้วยเอมีนจากไม้ไผ่
โดย	นายภาณุพงศ์ ประเสริฐสุข
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศิริพงษ์ โรจน์ลือชัย)	

ภาพungs ประเสริฐสุข : การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์ดัดแปรด้วยเอมีนจากไม้ไผ่. (CO₂ CAPTURE ON AMINE-MODIFIED ACTIVATED CARBON FROM BAMBOO) อ.ที่ปรึกษา
หลัก : ศ. ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ไผ่ และตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นและดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมไมด์ ตัวแปรที่ศึกษา มีดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก ชนิดของเอมีน ปริมาณเอมีนที่ใช้ และความชื้นในก๊าซขาเข้า ช่วงอุณหภูมิในการดูดซับตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับจะถูกวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคดูดซับ/คายซับไนโตรเจนพบว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียสจะทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมีค่าสูงขึ้นโดยจะมีค่าเท่ากับ 432.92 ตารางเมตรต่อกรัม 0.23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกสูงขึ้นจะทำให้มีปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมากขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบขั้นสูงพบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักกรดฟอสฟอริก ทำให้มีปริมาณธาตุออกซิเจนสูง เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี พบว่าเมื่อกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงทำให้ตัวดูดซับเกิดการสลายตัว ส่วนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะพบหมู่ฟอสเฟสหลงเหลือที่พื้นผิวตัวดูดซับ จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่สัดส่วนสูงทำให้ระนาบ (001) (110) และ (002) เกิดจุดบกพร่อง จากผลการทดลอง พบว่าตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจะให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.97 มิลลิโมลต่อกรัม เมื่อนำมากระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกแล้วดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนพบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเป็น 1.14 มิลลิโมลต่อกรัม เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้าและมีค่าเป็น 1.31 มิลลิโมลต่อกรัม เมื่อมีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า ในส่วนของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับพบว่า ความสามารถในการดูดซับลดลงประมาณร้อยละ 1.82 ในรอบที่ 10 ของวัฏจักรการดูดซับ ในส่วนของการศึกษาจลพลศาสตร์พบว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมสามารถอธิบายกลไกการเกิดการดูดซับได้เหมาะสมที่สุด จากสมการของอาร์เรเนียสพบว่าเมื่อดัดแปรด้วยเอมีนทำให้มีค่าพลังงานกระตุ้นลดลงเนื่องจากหมู่เอมีนมีความว่องไวต่อคาร์บอนไดออกไซด์

สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5972042423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD:

Panupong Prasertsuk : CO₂ CAPTURE ON AMINE-MODIFIED ACTIVATED CARBON FROM BAMBOO. Advisor: Prof. Nattaya Pongstabodee, Ph.D.

In this research, the objective was to study CO₂ adsorption performance on amine modified bamboo activated carbon under the influence of activation temperature, weight ratio of adsorbent to H₃PO₄, amine-type, amine content and moisture level. The adsorbents were characterized by N₂ sorption-desorption analysis, elemental analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction. From the characterization, higher activation temperature in CO₂ atmosphere improved the specific surface area and total pore volume. The highest specific surface area and total pore volume was around 432.9 m²/g and 0.23 cm³/g respectively when activating at 800 °C. From FTIR results, it showed that the phosphate group remained on the surface of adsorbent at the highest acid ratio. From XRD diffraction, (001) Plane was defected by CO₂ activation. (001) (110) and (002) plane was defected at the highest acid ratio. In CO₂ adsorption measurement, the highest adsorption capacity was 0.97 mmol/g after CO₂ activation at 700 °C. Adsorbent with Tetraethylenepentamine (TEPA) impregnation expressed higher adsorption capacity than the one with polyethyleneimine impregnation. The capacity about 1.14 mmol/g at 90 °C was achieved when impregnation 40%wt. TEPA. A present of moisture 3%vol increase CO₂ adsorption capacity to 1.31 mmol/g. The CO₂ adsorption capacity was dropped by 1.82% after 10 cycle adsorption-desorption. The kinetic study explains that pseudo first order kinetic model can describe the mechanism of CO₂ adsorption. From the Arrhenius equation, activation energy in humid condition shows lower than dry condition.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ดูแลผู้วิจัยไม่ว่าจะเป็นเรื่องงานวิจัยหรือทัศนคติในการใช้ชีวิตร่วมกับผู้อื่นและคอยให้กำลังใจให้คำแนะนำช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนกระทั่งงานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอกราบของพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิจัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. ศิริพงษ์ โรจน์ลือชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณทุนสมทบผู้ช่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา (ทุนวิทยา ๑๐๑) และทุนอุดหนุนการศึกษาเฉพาะค่าเล่าเรียนประเภท 60/40 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้การสนับสนุนเรื่องเงินทุนในงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อวัตถุประสงค์ถ่านไม้ไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณณัฐวิรัช ธัชประสิทธิ์ชัย คุณยุทธพันธ์ พงศ์บุญชู คุณภูวเดช พรอรุณธรรม และคุณวิศรุต ม่วงรักษ์ ที่คอยช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ เทคนิคต่างๆ คอยอำนวยความสะดวกรวมถึงความรู้ตลอดในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเคมีเทคนิคที่คอยให้ความช่วยเหลือเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ เป็นกำลังใจและให้ทุนทรัพย์ตลอดการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ดี

ภาณุพงศ์ ประเสริฐสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก.....	4
2.1.1 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีอายุไข่มาก.....	4
2.1.2 ทิศทางการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก.....	6
2.2 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก.....	9
2.2.1 ระบบนิเวศ.....	9
2.2.2 อาหาร.....	10
2.2.3 ชายฝั่ง.....	10
2.2.4 อุตสาหกรรม การตั้งถิ่นฐาน และสังคม.....	10

2.2.5 สุขภาพ	10
2.3 กระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรม	11
2.3.1 การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึม	11
2.3.2 การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ	11
2.3.2.1 การดูดซับแบบใช้การผันผวนความดัน (pressure swing adsorption).....	11
2.3.2.2 การดูดซับแบบใช้การผันผวนอุณหภูมิ (temperature swing adsorption)	12
2.3.2.3 การดูดซับแบบใช้การผันผวนไฟฟ้า (electrical swing adsorption)	12
2.3.3 การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแช่แข็ง (cryogenic process).....	12
2.3.4 การแยกก๊าซโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (membrane technology).....	13
2.3.4.1 การแยกก๊าซโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (gas separation membrane).....	13
2.3.4.2 การแยกโดยการซึมผ่านของก๊าซผ่านเยื่อเลือกผ่าน	14
2.4 ทฤษฎีการดูดซับ	14
2.4.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ	14
2.4.2 ประเภทของการดูดซับ	15
2.4.2.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	15
2.4.2.2 การดูดซับทางเคมี	15
2.5 การผลิตถ่านกัมมันต์	16
2.5.1 ถ่านกัมมันต์ที่มาจาก การกระตุ้นทางกายภาพ.....	16
2.5.2 ถ่านกัมมันต์ที่มาจาก การกระตุ้นทางเคมี.....	17
2.6 ไม้ไฟในประเทศไทย	18
2.7 ไม้กับบทบาทในการเป็นพืชเศรษฐกิจ (economic plants).....	20
2.8 ตัวดูดซับเอมีนแบบของแข็ง (solid amine adsorbent).....	21
2.8.1 ตัวดูดซับเคลือบฝังด้วยเอมีน (amine impregnated adsorbent).....	22
2.8.2 ตัวดูดซับเอมีนแบบกราฟ (amine grafted adsorption)	22

2.9 แบบจำลองจลพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic model of adsorption)	23
2.9.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order kinetic model)	23
2.9.3 แบบจำลองปฏิกิริยาของอาฟรามิ (Avrami fractional order kinetic model).....	25
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	30
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.3 วิธีการเตรียมตัวดูดซับ.....	31
3.3.1 วิธีการเตรียมถ่านไม้ไฟ.....	31
3.3.2 วิธีการกระตุ้นถ่านไม้ไฟด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	31
3.3.3 วิธีการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก.....	32
3.3.4 วิธีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีน	33
3.4 ขั้นตอนการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	33
3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ	35
3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความพรุนของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการดูดซับ/คาย ซับแก๊สไนโตรเจน.....	35
3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)	35
3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (ultimate analysis)	35
3.5.4 การวิเคราะห์ลักษณะและความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray Diffraction).....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคต่างๆ	36

4.1.1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนบนตัวดูดซับด้วยเทคนิค การดูดซับ/คายซับไนโตรเจน.....	36
4.1.2. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบขั้นสูง.....	40
4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี	43
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะและความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	46
4.2. ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	47
4.2.1. อุณหภูมิการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	47
4.2.2. อัตราส่วนน้ำหนักร่างดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก	49
4.2.3. ชนิดของเอมีน.....	51
4.2.4. ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนทามีน.....	54
4.2.5. ปริมาณพอลิเอทิลีนอิมิน.....	56
4.2.6. ความชื้นในก๊าซขาเข้า.....	58
4.3. การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ 1:2TEPA40	61
4.4 การเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40.....	62
4.5 การศึกษาจลพลศาสตร์ของตัวดูดซับ	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	83

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ปี 1970 ถึง 2004 [10]	5
รูปที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ในปี 2004 ในหน่วยเทียบเท่าคาร์บอน [10].....	5
รูปที่ 2.3 แสดงสัดส่วนของก๊าซเรือนกระจกที่มาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ในปี 2004 ในหน่วยเทียบเท่าคาร์บอน [10]	6
รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและไนตรัสออกไซด์ตั้งแต่ 10,000 ปีที่ผ่านมา (ภาพขนาดใหญ่) ตั้งแต่ช่วงปี 1750 (ภาพขนาดเล็ก) โดยวัดจากก้อนน้ำแข็ง (สัญลักษณ์ที่ต่างกัน คืองานวิจัยที่ต่างกัน ส่วนเส้นสีแดงคือตรวจวัดจากบรรยากาศ [10].....	8
รูปที่ 2.5 แสดงผลงานการแผ่รังสีทั่วโลกในปี 2005 เปรียบเทียบกับปี 1750 [10]	9
รูปที่ 2.6 หลักการของการแยกก๊าซโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน [11].....	13
รูปที่ 2.7 หลักการของการแยกก๊าซโดยซึมผ่านของก๊าซ [11].....	14
รูปที่ 2.8 กลไกการดูดซับ [13].....	16
รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนปฐมภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ [9].....	23
รูปที่ 3.1 เตาเผาสำหรับกระตุ้นถ่านกัมมันต์	32
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	33
รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดรูพรุนของคาร์บอนโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [33].....	37
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ	43
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และ กรดฟอสฟอริกที่สัดส่วนโดยมวลต่างๆ แล้วทำการดัดแปรพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมิน ..	45
รูปที่ 4.4 รูปแบบรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และ กรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนต่างๆ.....	47

รูปที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ไม่ผ่านและผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (BB BB600 BB700 และ BB800) เมื่ออุณหภูมิการดูดซับอยู่ในช่วง 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส 48

รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ 1:0.5TEPA30 ตัวดูดซับ 1:1TEPA30 และตัวดูดซับ 1:2TEPA30 ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส 50

รูปที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 1 (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1:1) แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วย เตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ 1:1TEPA30 และ 1:1PEI30..... 52

รูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1:2) แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วย เตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ 1:2TEPA30 และ 1:2PEI30 ตามลำดับ 53

รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางเคมีของ ก.เตตระเอทิลีนเพนทามีนและ ข.พอลิเอทิลีนอิมิน 54

รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจากนั้นกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 แล้วนำไปดัดแปรพื้นผิวด้วย เตตระเอทิลีนเพนทามีนร้อยละ 20 ถึง 40 โดยมวล แทนด้วยสัญลักษณ์ 1:2TEPA20 1:2TEPA30 และ 1:2TEPA40 ตามลำดับ 55

รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจากนั้นกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 1 แล้วนำไปดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 20 ถึง 40 โดยมวล แทนสัญลักษณ์ 1:1PEI20 1:1PEI30 และ 1:1PEI40 ตามลำดับ 57

รูปที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสใน ภาวะที่ไม่มี ความชื้นและมีความชื้นใน ก๊าซขาเข้า เมื่ออุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส 59

รูปที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วย เติตระเอทิลีนเพนทามีนที่ร้อยละ 40 โดยมวล ในภาวะที่ไม่มี ความชื้นและมีความชื้นในก๊าซขาเข้า เมื่ออุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส 60

รูปที่ 4.14 ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40 62

รูปที่ 4.15 การเลือกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อก๊าซขาเข้าประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่ออุณหภูมิการดูดซับที่ 90 องศาเซลเซียส ... 63

รูปที่ 4.16 อาร์เรเนียนพลอตของตัวดูดซับ BB700 ตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า (BB700 และ 1:2TEPA40(dry)) และตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อมีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า (1:2TEPA40(wet)) 69

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 พื้นที่ปลูกไม้ไผ่ตงระหว่างปี 2536–2540 ในจังหวัดปราจีนบุรีและจังหวัดใกล้เคียง [26]	20
ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ.....	36
ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบขั้นสูง.....	41
ตารางที่ 4.3 แบบจำลองจลพลศาสตร์ของตัวดูดซับ BB700 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า.....	65
ตารางที่ 4.4 แบบจำลองจลพลศาสตร์ของตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า.....	66
ตารางที่ 4.5 แบบจำลองจลพลศาสตร์ของตัวดูดซับ 1:2TEPA40 มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้าร้อยละ 3 โดยปริมาตร.....	67
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ.....	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นจำนวนมากโดยสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมของมนุษย์และธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ ก๊าซที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFCs) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) โดยก๊าซเหล่านี้มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถดูดกลืนและคายรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดได้ดีมาก เมื่อพื้นผิวโลกคายรังสีอินฟราเรดขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศก๊าซเหล่านี้จะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเอาไว้ หลังจากนั้นก๊าซเหล่านี้ก็จะคายความร้อนสะสมอยู่บริเวณพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีอายุสะสมเฉลี่ยค่อนข้างสูงกว่าก๊าซตัวอื่นๆ จึงมีผลกระทบต่อปรากฏการณ์โลกร้อนค่อนข้างมาก เพื่อที่จะลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกปัจจุบันได้มีการจัดทำข้อตกลงปารีส (Paris agreement) ในงานประชุมสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศครั้งที่ 21 ที่ประเทศฝรั่งเศส [1] โดยเนื้อหาบางส่วน of ข้อตกลงปารีสคือ 1) ควบคุมการเพิ่มของอุณหภูมิโลกต่อปีไม่เกิน 2 องศาเซลเซียสที่ คาดไว้ประมาณ 1.5 องศาเซลเซียส 2) ควบคุมการใช้พลังงานจากถ่านหิน น้ำมันและก๊าซ 3) แทนที่การใช้เชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

ในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนากระบวนการแยกก๊าซหรือกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนปลดปล่อยสู่บรรยากาศ นอกเหนือจากการดูดซับด้วยสารละลายเอมีน เนื่องจากเอมีนสามารถกักตร้อนขึ้นส่วนที่เป็นโลหะและพลังงานในการฟื้นฟูสภาพค่อนข้างสูง [2] การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้มีเทคนิคที่หลากหลายเช่น การแยกก๊าซด้วยการดูดซับ (adsorption process) การแยกด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน (membrane process) และ การแยกด้วยการแช่แข็ง (cryogenic process) แต่ในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้การแยกก๊าซด้วยการดูดซับมากกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่าย ต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานในกระบวนการต่ำ อีกทั้งยังไม่มีกระบวนการที่ง่ายเหมือนกระบวนการแยกด้วยการใช้เยื่อเลือกผ่าน [3] คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิห้องบนตัวดูดซับจำพวกที่มีรูพรุนแบบไมโคร (microporous solids) เช่น ซีโอไลต์ (zeolite) หรือถ่านกัมมันต์ (activated carbon) แต่ถ่านกัมมันต์มีค่าปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างสูงที่ความดันบรรยากาศ ไม่ว่องไวต่อความชื้นและยังมีความแข็งแรงต่อการดูดซับปานกลางซึ่งง่ายแก่การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จึงมีแนวคิดผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ใน

ประเทศไทยเนื่องจากในประเทศไทยมีการประยุกต์ใช้งานไฟในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร การก่อสร้างหรือเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ จึงมีของเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นพืชที่ปลูกง่าย โตเร็วและมีต้นทุนผลิตต่ำ [4, 5] ในการผลิตถ่านกัมมันต์ รุพุนของถ่านกัมมันต์เกิดจากการระเหยของสารที่ระเหยง่าย (volatile matter) ด้วยความร้อน [6] การกระตุ้นวัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นด้วยสารเคมี การกระตุ้นทางกายภาพทำได้โดยใช้ก๊าซออกซิโดซ์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ หรืออากาศ ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส แต่ในทางตรงข้ามการกระตุ้นด้วยสารเคมีจะใช้ปฏิกิริยาเคมี อาทิเช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid, H_3PO_4) หรือ ซิงค์คลอไรด์ (zinc chloride, $ZnCl_2$) เพื่อก่อให้เกิดรูพุนเช่นเดียวกัน ในส่วนของการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้น การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีราคาถูกเนื่องจากใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 500 องศาเซลเซียสก็สามารถทำให้คาร์บอนเกิดโครงสร้างรูพุนขนาดกลางได้ [7] มากไปกว่านั้น การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้โดยการดัดแปรด้วยเอมีนบนตัวดูดซับ [8] การดัดแปรด้วยเอมีนช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีการคัดเลือก (selectivity) ต่อโมเลกุลที่มีขั้วเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากเอมีนจะมีตำแหน่งการดูดซับจำเพาะ (adsorption site) ที่แข็งแรงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) โดยกลไกของการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแสดงดังรูปที่ 1.1 [9] โดยชนิดของเอมีนที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมคือ โมโนเอธาโนลามีน (MEA) และไดเอธาโนลามีน (DEA) ถึงแม้ว่าเอมีนสองชนิดนี้จะมีปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงแต่ยังมีข้อด้อยคือ มีความดันไอสูง มีจุดเดือดต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานเป็นตัวดัดแปรตัวดูดซับที่ได้จากคาร์บอน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เตตระเอทิลีนเพนทามีน (TEPA) และพอลิเอทิลีนอิมิน (PEI) โดยเอมีนสองชนิดนี้มีความดันไอลำบากจึงสามารถเกาะอยู่ที่พื้นผิวของคาร์บอนได้

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศและการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์โดยการดัดแปรด้วยเอมีน

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่
2. ศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศบนถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่

1.3 สมมุติฐาน

ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศได้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับทำการวิจัย
3. ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์และการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยเอมีน ดังนี้
 - อุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส
 - อัตราส่วนโดยมวลของคาร์บอนต่อกรดฟอสฟอริก 1:0.5 1:1 และ 1:2
 - ชนิดของเอมีน เตตระเอทิลีนเพนทามีนและพอลิเอทิลีนอิมิน
4. ศึกษาผลของตัวแปรต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ด้วยเครื่อง gas chromatograph ได้แก่
 - ปริมาณเอมีน 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 - อุณหภูมิการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส
 - ร้อยละความชื้นในก๊าซขาเข้า 0 3 และ 4 โดยปริมาตร
5. ศึกษาภาวะการทดลองโดยมีความชื้นที่อุณหภูมิห้อง
6. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ
7. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับที่เตรียม
 - วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวตัวอย่างด้วยเทคนิคการดูดซับ/คายซับก๊าซไนโตรเจน
 - วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy
 - วิเคราะห์หาปริมาณธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHNS elemental analysis
 - วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD diffraction

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก กระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ ทฤษฎีการดูดซับ ศักยภาพของถ่านกัมมันต์สำหรับหน่วยการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การผลิตถ่านกัมมันต์ ไม้ไผ่ในประเทศไทย ไม้กับบทบาทในการเป็นพืชเศรษฐกิจ และการปรับปรุงพื้นผิวดูดซับด้วยเอมีน

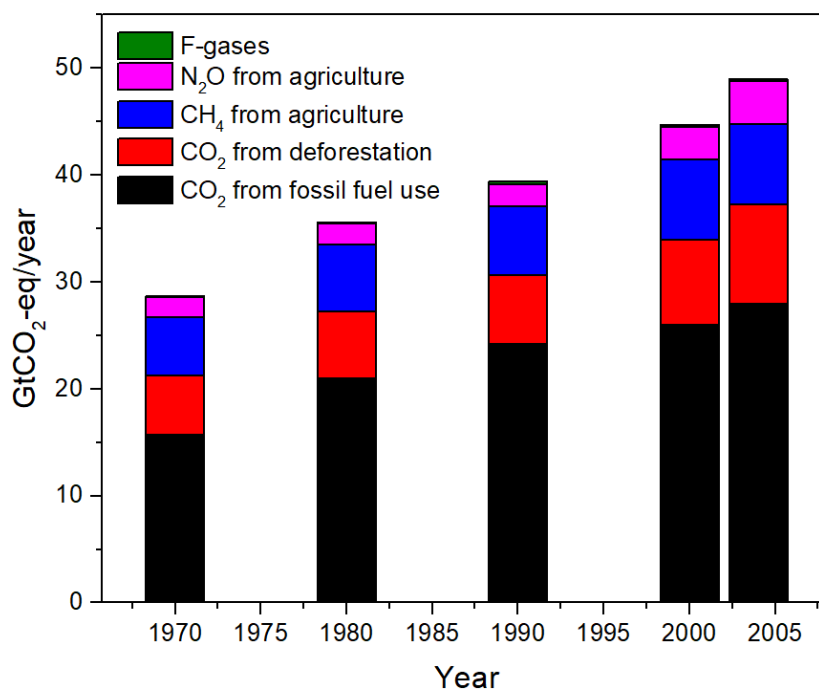
2.1 สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก

2.1.1 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีอายุไข่มาก

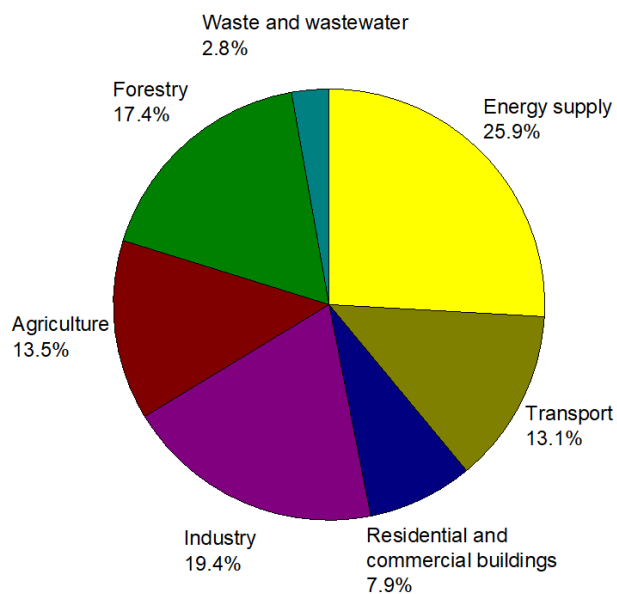
การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์มีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก ตั้งแต่ก่อนยุคอุตสาหกรรมโดยเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 70 ช่วงปี 1970 ถึง 2004 แสดงในรูปที่ 2.1

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีเพิ่มขึ้นอย่างมากระหว่างปี 1970 ถึง 2004 ถึงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ (21 ถึง 38 กิกะตัน) ดังรูปที่ 2.2 แสดงการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 77 ในปี 2004 โดยอัตราการเพิ่มขึ้นในช่วงสิบปีที่ผ่านมา (1995-2004) (0.92 กิกะตันต่อปี) มากกว่าหลายปีที่ผ่านมา (1970-1994) (0.43 กิกะตันต่อปี)

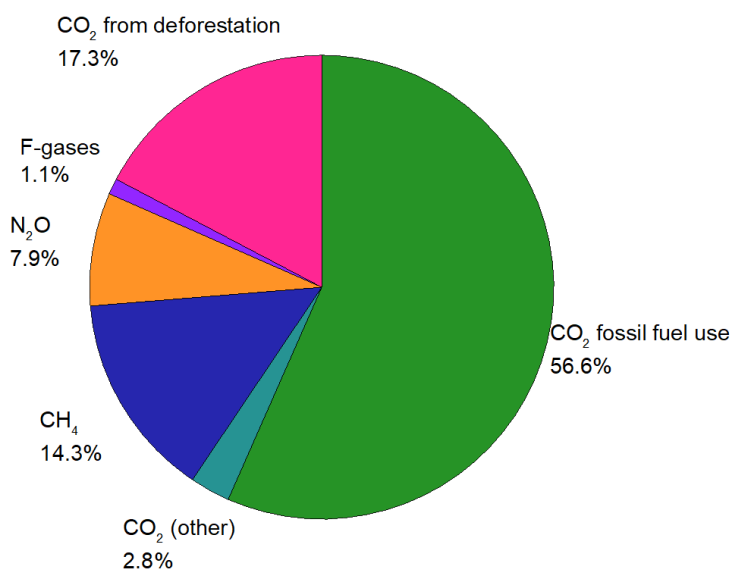
การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกระหว่างปี 1994 ถึง 2004 มาจากพลังงาน การขนส่ง และอุตสาหกรรม ขณะที่การเป็นอยู่อาศัย อาคารธุรกิจ ป่าไม้ (รวมถึงการเกิดไฟป่า) และการเกษตร มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยแสดงดังรูปที่ 2.3 [10]



รูปที่ 2.1 แสดงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ปี 1970 ถึง 2004 [10]



รูปที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ในปี 2004 ในหน่วยเทียบเท่าคาร์บอน [10]



รูปที่ 2.3 แสดงสัดส่วนของก๊าซเรือนกระจกที่มาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ในปี 2004 ในหน่วยเทียบเท่าคาร์บอน [10]

2.1.2 ทิศทางการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก

การเปลี่ยนแปลงในด้านความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ ละอองในอากาศ พื้นผิวโลก การแผ่รังสีของแสงอาทิตย์ปรับเปลี่ยนสมดุลพลังงานของโลกคือ ทิศทางการเปลี่ยนแปลง โดยสิ่งที่กล่าวมานี้ส่งผลเกิดการดูดซับ การกระเจงของแสงและการแผ่รังสีภายในบรรยากาศและพื้นผิวโลก ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งข้อดีและข้อเสียต่อการเปลี่ยนแปลงในด้านพลังงานของโลกเนื่องมาจากตัวแปรเหล่านั้นแสดงออกมาในรูปของพลังงานการแผ่รังสี (radiative forcing)

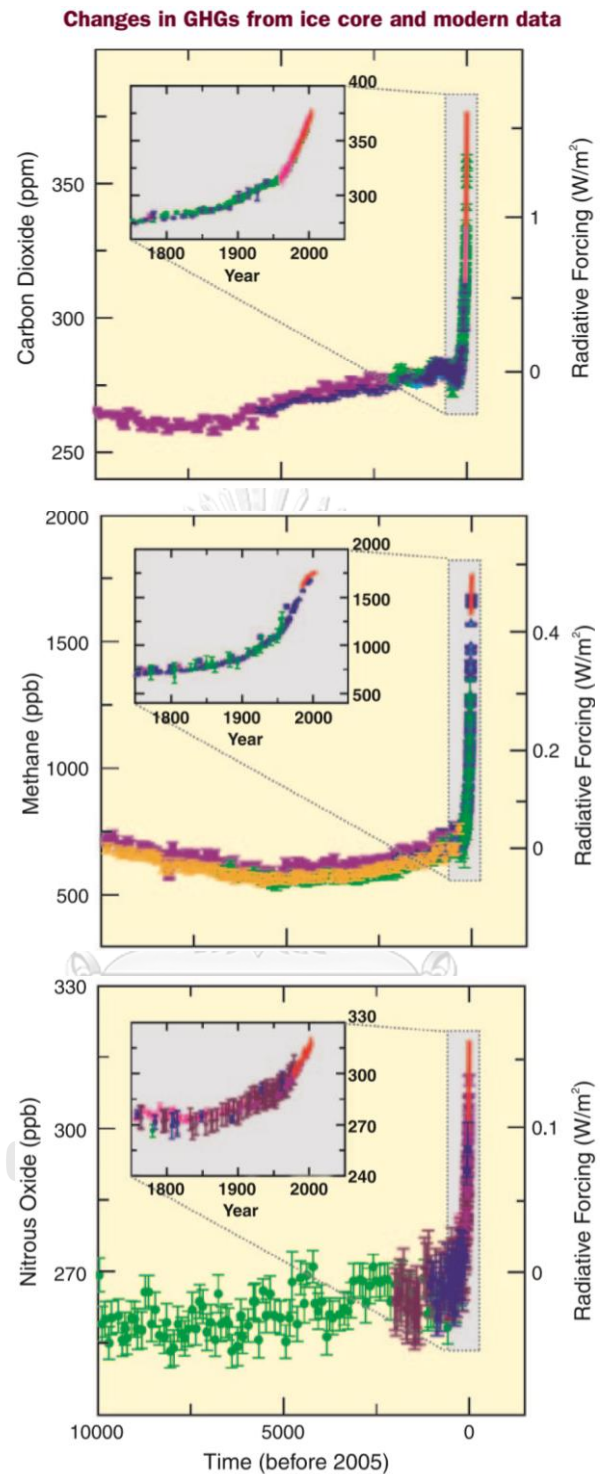
การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกใช้เวลายาวนานที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์และฮาโลคาร์บอน (กลุ่มของก๊าซที่ผสมด้วยธาตุฟลูออรีน คลอรีนและโบรมีน) ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยมีค่าสูงกว่ากระบวนการกำจัด

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและไนตรัสออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ตั้งแต่ปี 1750 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโลกโดยตรงมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นมีเทนในบรรยากาศมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการปศุสัตว์และเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่วนความเข้มข้นไนตรัสออกไซด์ในบรรยากาศจะมาจากการปศุสัตว์เป็นส่วนใหญ่ การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มขึ้นจากยุคก่อนอุตสาหกรรมจนในปี 2005 จาก 280 ส่วนในล้านส่วนเป็น 379 ส่วนในล้านส่วน การเติบโตของ

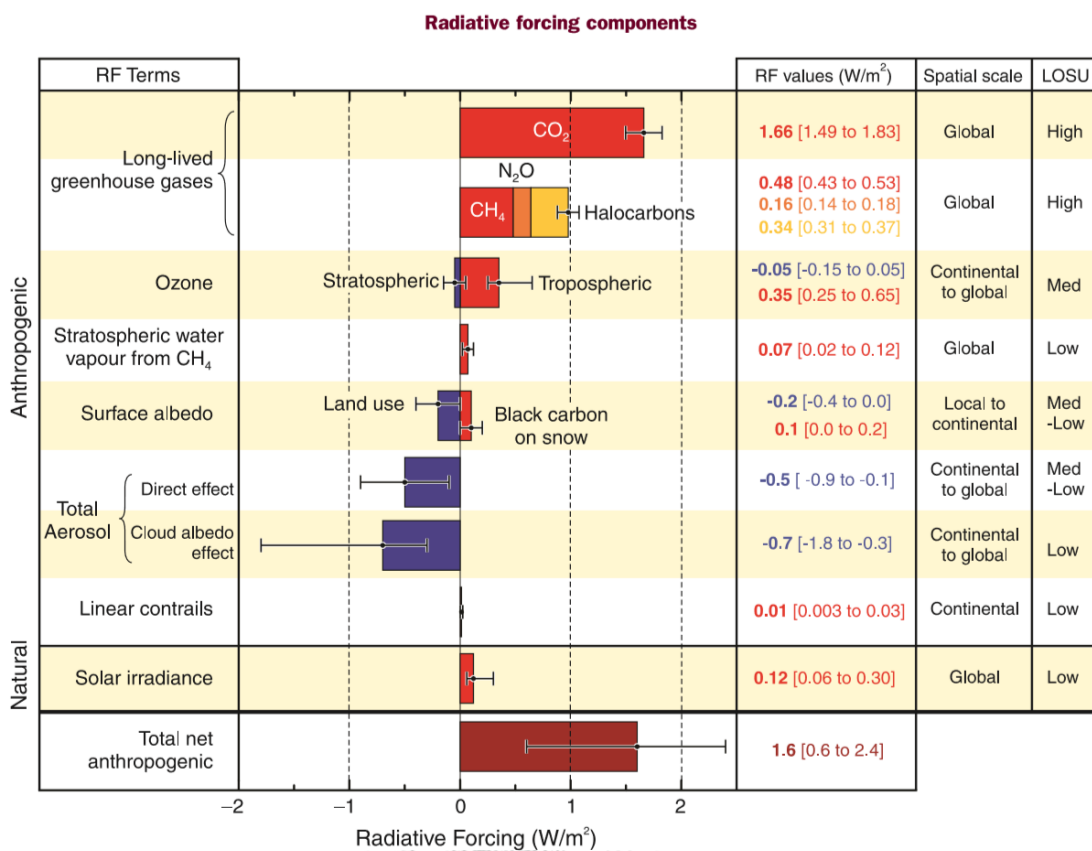
ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเพิ่มขึ้นสูงที่สุดในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (ปี 1995-2005 อัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.9 ส่วนในล้านส่วน) การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนในบรรยากาศในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มขึ้นจากยุคก่อนอุตสาหกรรมจนในช่วงปี 1990 จาก 715 ส่วนในพันล้านส่วนเป็น 1732 ส่วนในพันล้านส่วน แต่ในปี 2005 มีเพียง 1774 ส่วนในพันล้านส่วน อัตราการเพิ่มขึ้นเริ่มไม่สูงตั้งแต่ในช่วงปี 1990 การปลดปล่อยก๊าซมีเทน (ทั้งในกิจกรรมของมนุษย์และธรรมชาติ) มีแนวโน้มที่จะคงที่ ในช่วงเวลาปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของก๊าซไนตรัสออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มขึ้นจากยุคก่อนอุตสาหกรรมจาก 270 ส่วนในพันล้านส่วนเป็น 319 ส่วนในพันล้านส่วนในปี 2005 จะเห็นได้ว่า ตัวแปรหลักของการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกคือกิจกรรมของมนุษย์ตั้งแต่ปี 1750 โดยมีตัวแปร พลังงานการแผ่รังสี (radiative forcing) เพิ่มขึ้นถึง +1.6 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [10]

พลังงานการแผ่รังสีทั่วโลกที่เพิ่มขึ้นจากก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์) มีค่ารวมกันถึง +2.3 วัตต์ต่อตารางเมตรและอัตราการเพิ่มขึ้นระหว่างยุคอุตสาหกรรมนี้สูงขึ้นเป็นประวัติการณ์ในช่วง 10,000 ปีที่ผ่านมา (รูปที่ 2.4 และ 2.5) อีกทั้งพลังงานการแผ่รังสีเป็นผลมาจากคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 จากปี 1995 ถึงปี 2005

กิจกรรมของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง (ซัลเฟต ออร์แกนิกคาร์บอน ผงถ่าน ไนเตรสและฝุ่น) อนุภาคเหล่านี้จะก่อให้เกิดภาวะโลกเย็นขึ้น โดยมีค่าพลังงานการแผ่รังสีโดยรวมที่ -0.5 วัตต์ต่อตารางเมตร (-0.9 ถึง -0.1 วัตต์ต่อตารางเมตร) และมีค่า indirect cloud albedo forcing อยู่ที่ -0.7 วัตต์ต่อตารางเมตร (-1.8 ถึง -0.3 วัตต์ต่อตารางเมตร)



รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและไนตรัสออกไซด์ตั้งแต่ 10,000 ปีที่ผ่านมา (ภาพขนาดใหญ่) ตั้งแต่ช่วงปี 1750 (ภาพขนาดเล็ก) โดยวัดจากก้อนน้ำแข็ง (สัญลักษณ์ที่ต่างกันคืองานวิจัยที่ต่างกัน ส่วนเส้นสีแดงคือตรวจวัดจากบรรยากาศ [10])



รูปที่ 2.5 แสดงพลังงานการแผ่รังสีทั่วโลกในปี 2005 เปรียบเทียบกับปี 1750 [10]

2.2 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแนวโน้มที่จะเกิดผลกระทบในด้านต่างๆที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลกในระบบต่างๆ ในศตวรรษที่ 21

2.2.1 ระบบนิเวศ

- การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศเหล่านี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการเกิดภัยพิบัติต่างๆ เช่น น้ำท่วม แห้งแล้ง ไฟป่าและความเป็นกรดในทะเล

- พันธุ์สัตว์และพืชต่างๆ มากกว่าร้อยละ 20 มีความเสี่ยงเพิ่มขึ้นที่จะเกิดการสูญพันธุ์เมื่ออุณหภูมิโลกสูงขึ้น 1.5 ถึง 2.5 องศาเซลเซียส

- การที่อุณหภูมิโลกสูงขึ้น 1.5 ถึง 2.5 องศาเซลเซียสและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่สูงขึ้น สิ่งเหล่านี้จะมีแนวโน้มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ของระบบนิเวศ สายพันธุ์ ในท้องถิ่นต่างๆ ส่งผลเสียต่อความหลากหลายทางชีวภาพ และผลผลิตทางระบบนิเวศ เช่น น้ำ อาหาร

2.2.2 อาหาร

- ผลผลิตทางเกษตรมีแนวโน้มจะสูงขึ้นเล็กน้อยในพื้นที่ที่อยู่บริเวณเส้นละติจูดกลางถึงสูงๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และลดลงในบางพื้นที่
- สำหรับพื้นที่อยู่บริเวณเส้นละติจูดต่ำๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่เป็นเขตร้อนและแห้งแล้ง ผลผลิตทางเกษตรมีแนวโน้มจะลดลงถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดการอดอยาก
- แนวโน้มการผลิตอาหารทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิโลกเฉลี่ยสูงขึ้น 1 ถึง 3 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงเกินช่วงนี้จะทำให้มีแนวโน้มการผลิตอาหารลดลง

2.2.3 ชายฝั่ง

- ชายฝั่งทะเลมีความเสี่ยงเพิ่มขึ้นรวมถึงการถูกกัดเซาะชายฝั่งทะเลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้น
- ในปี 2080 จะมีผู้คนหลายล้านคนจะประสบปัญหาน้ำท่วมทุกปีเพิ่มขึ้นจากปัจจุบันเนื่องจากระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ตัวเลขที่กล่าวมาขึ้นเพิ่มสูงขึ้นหากเป็นพื้นที่ที่ประชากรหนาแน่นและพื้นที่ราบลุ่มในเอเชียและแอฟริกา

2.2.4 อุตสาหกรรม การตั้งถิ่นฐาน และสังคม

- อุตสาหกรรม บ้านเรือน จะมีความเสี่ยงสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล หรือใกล้แม่น้ำ
- การสื่อสารที่ไม่ดีก็ก่อให้เกิดความเสี่ยงเช่นเดียวกันโดยเฉพาะพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดภัยพิบัติสูง

2.2.5 สุขภาพ

- การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศนี้มีผลกระทบต่อสุขภาพของประชากรหลายล้านคน เช่น การขาดสารอาหารเพิ่มขึ้น การตาย โรคภัยและการบาดเจ็บเนื่องจากภัยพิบัติเพิ่มขึ้น โรคท้องร่วงที่เพิ่มขึ้น เพิ่มความเสี่ยงที่จะเกิดโรคหัวใจและทางเดินหายใจเนื่องจากมีความเข้มข้นของโอโซนที่ระดับพื้นโลกสูงขึ้นในบริเวณชุมชนและการแพร่กระจายของเชื้อโรคต่างๆ
- การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศมีข้อดีบางประการเช่น การลดอัตราการตายของพื้นที่หนาวเหน็บ ลดการแพร่กระจายและการติดต่อของโรคมลาเรียในแอฟริกา [10]

2.3 กระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีกระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซที่ถูกปลดปล่อยจากเผาไหม้ในอุตสาหกรรมที่นำไปใช้จริง อาทิเช่น การดูดซึมทางกายภาพ การดูดซึมทางเคมี การดูดซับ การแยกด้วยการแช่แข็ง และการใช้เยื่อเลือกผ่าน

2.3.1 การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึม

กระบวนการดูดซึมทั้งทางกายภาพและทางเคมีเป็นกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ และโรงไฟฟ้าถ่านหิน รวมไปถึงการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมเคมี โดยในกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และตัวทำละลายเคมี (chemical solvent) ตัวอย่างเช่น สารละลายของโมโน ไดและไตรเอมีน ไดไอโซโพรพานอล เอมีน เป็นต้น โดยวิธีนี้เครื่องดูดซึม (absorber) และเครื่องฟื้นฟูสภาพ (regenerator) ต้องทำงานร่วมกัน ก๊าซผสม (flue gas) ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกปลดจากด้านล่างของเครื่องดูดซึม (absorber) ส่วนตัวดูดซึม (absorbent) จะถูกปล่อยจากด้านบนของเครื่องดูดซึม ซึ่งทำให้เกิดการไหลแบบสวนทาง (counter current) ระหว่างก๊าซผสมกับตัวดูดซึม และเกิดปฏิกิริยาการดูดซึม จากนั้นตัวดูดซึมที่ผ่านกระบวนการนี้จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องฟื้นฟูสภาพ (regenerator) เพื่อทำให้เกิดการคายซับแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่หลุดออกมานั้นจะถูกส่งที่หน่วยกักเก็บก๊าซต่อไป มีหลายงานวิจัยกล่าวว่าการดูดซึมทางเคมีมีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าสำหรับก๊าซผสมที่มีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ

2.3.2 การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการกำจัดสารที่มีองค์ประกอบ 1 ชนิด หรือมากกว่านั้นบนพื้นผิวของแข็ง กระบวนการดูดซับนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงอันตรกิริยาระหว่างก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์) กับพื้นผิวของตัวดูดซับ (เช่น molecular sieve หรือ ถ่านกัมมันต์) และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน แรงอันตรกิริยาที่พื้นผิว ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ จึงจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้น

ในกระบวนการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับจะถูกบรรจุในคอลัมน์แล้วผ่านด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่อเกิดสมดุลของการดูดซับ จะเข้าสู่กระบวนการคายซับเพื่อดึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ออกมา ส่วนตัวดูดซับผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.3.2.1 การดูดซับแบบใช้การผันผวนความดัน (pressure swing adsorption)

ในระบบการดูดซับแบบใช้ความดันนี้ ก๊าซผสมจะถูกผ่านในเบดที่มีการปรับเปลี่ยนความดันที่อุณหภูมิต่ำจนกระทั่งเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่สมดุล เมื่อเข้าสู่สมดุลแล้วเบดจะถูกฟื้นฟูสภาพโดยการหยุดการผ่านของก๊าซผสม ลดความดัน ก๊าซที่ถูกดูดซับอยู่จะแยกออกมาโดยการผ่านก๊าซที่มีค่าการดูดซับน้อย เบดที่ผ่านการฟื้นฟูครั้งเดียวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง

2.3.2.2 การดูดซับแบบใช้การผันผวนอุณหภูมิ (temperature swing adsorption)

อีกทางเลือกหนึ่งของการดูดซับแบบใช้ความดันคือ การดูดซับแบบควบคุมอุณหภูมิ โดยการผ่านก๊าซผสมผ่านตัวดูดซับเช่นเดียวกัน แล้วเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็จะเกิดการคายซับของก๊าซที่ถูกดูดซับ การติดตั้งหน่วยให้ความร้อนเพิ่มเติมในระบบนี้จะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

2.3.2.3 การดูดซับแบบใช้การผันผวนไฟฟ้า (electrical swing adsorption)

ในระบบการดูดซับแบบใช้ไฟฟ้านี้ เริ่มโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าความดันต่ำผ่านตัวดูดซับ ในระบบนี้มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ และเชื่อว่ามีประสิทธิภาพดีกว่า

2.3.3 การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแช่แข็ง (cryogenic process)

การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแช่แข็งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมที่มีความเข้มข้นสูง (สูงกว่าร้อยละ 50) โดยปกติจะไม่ใช้วิธีนี้สำหรับก๊าซผสมที่ปล่อยจากกระบวนการเผาไหม้จากถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากต้องใช้ความเย็นซึ่งไม่เหมาะสมต่อโรงงานเหล่านี้

ในกระบวนการนี้มีการใช้การบีบอัดและการหล่อเย็นของก๊าซผสมหลายๆ ขั้นตอนเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมเกิดการเปลี่ยนเฟส (phase) รวมถึงองค์ประกอบอื่นๆ ในก๊าซผสมอีกด้วย เนื่องจากในภาวะการดำเนินการ คาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นในรูปของแข็งหรือของเหลว ไอน้ำที่ผสมอยู่ในก๊าซผสมจะก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของแข็งเจือปนและน้ำแข็ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาอุดตัน (plugging problem) ข้อดีหลักๆ ของการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์วิธีนี้คือ ไม่ต้องการตัวดูดซับแบบเคมีและสามารถดำเนินการได้ในภาวะความดันบรรยากาศ มากไปกว่านั้นระบบนี้สามารถผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้โดยตรง ซึ่งเป็นที่ต้องการในระบบขนส่ง เช่น การขนส่งทางเรือ การขนส่งทางท่อ

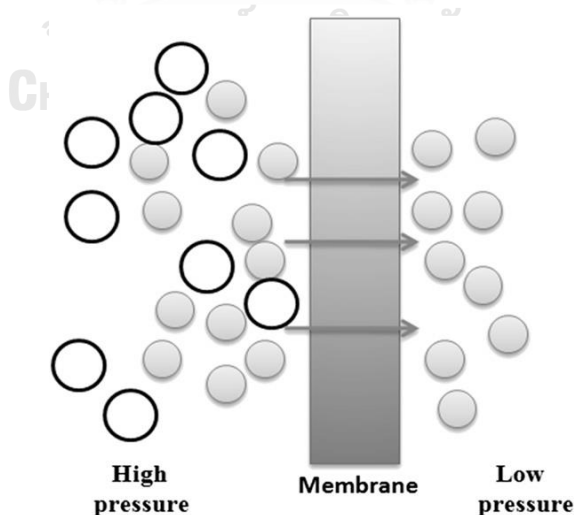
ข้อเสียหลักของกระบวนการนี้คือ ในกระบวนการต้องมีน้ำหรือความชื้นน้อยที่สุดเพื่อจะป้องกันเกิดการอุดตันของน้ำแข็งซึ่งจะส่งผลให้เกิดความดันสูงขึ้นระหว่างการดำเนินการ ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการกำจัดความชื้นออกจากก๊าซผสมก่อน มากไปกว่านั้นการเพิ่มขึ้นของชั้นของแข็งจากคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ในระหว่างการดำเนินการทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง การประยุกต์ใช้หลักของกระบวนการนี้ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ เช่น กระบวนการจับยึดก่อนการเผาไหม้เชื้อเพลิง (pre combustion capture processes) และกระบวนการเผาไหม้ในออกซิเจน (oxyfuel combustion)

2.3.4 การแยกก๊าซโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (membrane technology)

ในกระบวนการนี้จะใช้หลักการของการคัดเลือกของเยื่อเลือกผ่าน (selective membrane) เพื่อคัดแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ในก๊าซผสม ซึ่งมาจากกระบวนการหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิง (post-combustion system) จาก ก๊าซธรรมชาติ (natural gas processing) และ คาร์บอนไดออกไซด์จากไฮโดรเจน (pre-combustion system) หรือออกซิเจนจากไนโตรเจน (oxyfuel combustion system) เยื่อเลือกผ่านนั้นจะมีลักษณะตัวกั้นเลือกผ่านแบบกึ่งซึม (semi-permeable barrier) ซึ่งสามารถคัดแยกสารโดยมีหลายกลไก (สารละลาย/การแพร่ การดูดซับ/การแพร่และโมเลกุลาร์ ซีฟ/การเปลี่ยนถ่านไอออน) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุหลายๆประเภทเป็นจำพวก สารอินทรีย์ (พวกพอลิเมอร์) หรือ สารอนินทรีย์ (คาร์บอน ซีโอไลต์ เซรามิก หรือพวกโลหะ) ซึ่งจะเป็นพวกที่มีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุน การจับยึดคาร์บอนโดยใช้เยื่อเลือกผ่านส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็นสองวิธีหลักๆ คือ

2.3.4.1 การแยกก๊าซโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (gas separation membrane)

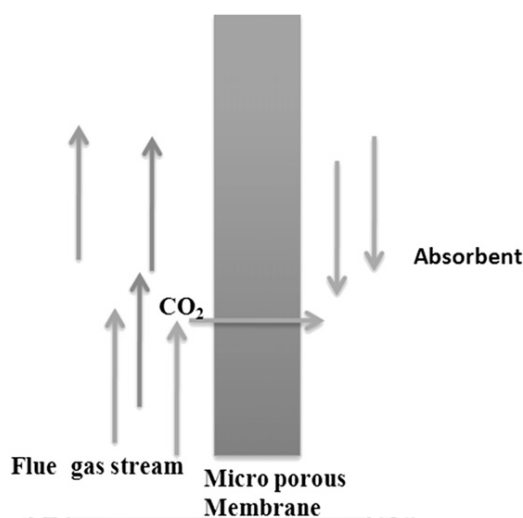
รูปที่ 2.6 แสดงหลักการเบื้องต้นของการแยกก๊าซโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน กระบวนการจะเกิดขึ้นโดยการคัดแยกสารผสมผ่านรูพรุนของเยื่อ ซึ่งสารที่แพร่เยื่อได้เร็วกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ก็จะถูกแยกออกจากสารผสม ตัวแปรสำคัญของการแยกก๊าซคือ การคัดเลือก (selectivity) และความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) ขั้นตอนการแยกนั้นสามารถทำได้โดยการผ่านก๊าซผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดันผ่านเยื่อเลือกผ่านหลายๆชั้นซ้อนกันแบบขนาน คาร์บอนไดออกไซด์จะซึมผ่านเยื่อเลือกผ่านและถูกลดความดันอีกฝั่งหนึ่งของกระบวนการแยก [11]



รูปที่ 2.6 หลักการของการแยกก๊าซโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน [11]

2.3.4.2 การแยกโดยการซึมผ่านของก๊าซผ่านเยื่อเลือกผ่าน

การแยกก๊าซโดยการซึมผ่านจะประกอบไปด้วย เยื่อเลือกผ่านที่มีรูพรุนแบบไมโครซึ่งจะเป็นส่วนที่สัมผัสกับก๊าซหรือของเหลวที่แสดงในรูป 2.7 จากรูปที่ 2.7 คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกจากก๊าซผสมโดยการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านและหลังจากนั้นจะถูกคืนสภาพโดยการดูดซึมด้วยของเหลว กระบวนการนี้จะมีอัตราการกำจัดสูงกว่าการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านเนื่องจากมีแรงผลักดัน (driving force) ค่อนข้างสูง การเกิดของการไหลที่ไม่สามารถควบคุมได้ส่งผลให้เกิดการ entrainment, flooding, channeling, foaming ขึ้น ส่วนอุปกรณ์ของวิธีนี้ต้องมีความกระชับมากกว่าวิธีอื่นๆ



รูปที่ 2.7 หลักการของการแยกก๊าซโดยซึมผ่านของก๊าซ [11]

2.4 ทฤษฎีการดูดซับ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า(interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 ภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า สารถูกดูดซับ(adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ(adsorbent)

2.4.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการที่พวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (liquid) ก๊าซ (gas) และ ของแข็ง (solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-

ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (liquid – solid interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก (ดังแสดงในรูปที่ 2.8) การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อย เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี driving force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.4.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

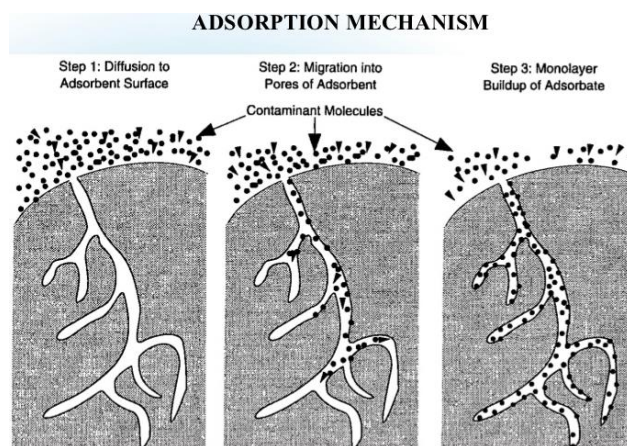
2.4.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London dispersion force) และ แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อยคือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.4.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิมคือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมลหมายความว่ากำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

(monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง อาทิเช่น ความแข็งแรงของพันธะ [12]



รูปที่ 2.8 กลไกการดูดซับ [13]

2.5 การผลิตถ่านกัมมันต์

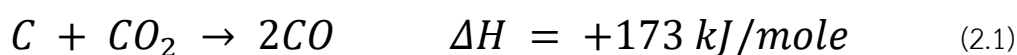
ถ่านกัมมันต์เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายสำหรับการเป็นตัวจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิง (post-combustion conditions) ในภาวะความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิปานกลาง ในการผลิตถ่านกัมมันต์ การระเหยสารระเหย (volatiles matter) จะช่วยทำให้เกิดการสร้างรูพรุนต่างๆ ระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่การผลิตถ่านกัมมันต์เหล่านี้จะใช้วัสดุที่ราคาไม่แพง นอกจากนั้น วัสดุที่นำมาผลิตต้องสามารถถูกกระตุ้นได้ง่ายและต้องมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำเพื่อที่จะคงสภาพลักษณะทางเคมีฟิสิกส์ (physicochemical characteristics) อย่างไรก็ตาม การเลือกวัสดุสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมนั้นสำคัญมาก เนื่องจากองค์ประกอบทางโครงสร้างของวัสดุ เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ จะมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของถ่านกัมมันต์ ในปี 2013 Rashidi et al. [14] ได้แสดงว่าประเภทของวัสดุที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ มากไปกว่านั้นต้นกำเนิดของวัสดุเหล่านี้มีอิทธิพลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ นอกเหนือจากธรรมชาติของวัสดุ ภาวะการกระตุ้นสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ก็เป็นขั้นตอนที่สำคัญเช่นกัน โดยมีสองประเภทของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ก็คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี

2.5.1 ถ่านกัมมันต์ที่มาจากกระตุ้นทางกายภาพ

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลักๆ ขั้นแรกเป็นการเผาไหม้ในที่อับอากาศ (pyrolysis) เช่น ไนโตรเจน เพื่อกำจัดพวกสารระเหยกับสารเจือปนอื่นๆ ในการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization process) มักจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800

องศาเซลเซียส เพื่อเกิดการกำจัดสารระเหยอย่างสมบูรณ์ ในขั้นตอนนี้จะคงอุณหภูมินั้นๆ ไว้ช่วงเวลาหนึ่งแล้วจึงลดอุณหภูมิลง แล้วตามด้วยขั้นตอนต่อมาคือการกระตุ้นโดยการก๊าซออกซิไดซ์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศหรือไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ปฏิกริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 [15, 16]



การเลือกใช้คาร์บอนไดออกไซด์จะก่อให้เกิดรูพรุนแบบไมโครขนาดแคบ ซึ่งเหมาะแก่การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่การใช้ไอน้ำจะก่อให้เกิดรูพรุนแบบเมโส โครงสร้างของรูพรุนต่างๆ ขึ้นอยู่กับความว่องไวของไอน้ำ และขั้นตอนการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำนั้นจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าและใช้เวลาต่ำกว่าการกระตุ้นคาร์บอนไดออกไซด์ [17, 18] นอกจากนี้ไอน้ำมีความว่องไวสูงเนื่องจากมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งโมเลกุลเล็กๆเหล่านี้สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนไมโครขนาดเล็ก (ความกว้างน้อยกว่า 2 นาโนเมตร) จึงทำให้รูพรุนขนาดไมโครมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดเป็นรูพรุนขนาดมีโซ (ความกว้างมากกว่า 2 นาโนเมตร แต่น้อยกว่า 50 นาโนเมตร) และมาโคร (ความกว้างมากกว่า 50 นาโนเมตร) [19] ดังนั้นสำหรับการดูดซับก๊าซ การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหมาะสมกว่าเพราะมีแนวโน้มจะทำถ่านกัมมันต์เกิดรูพรุนแบบไมโครที่สามารถดูดซับก๊าซโมเลกุลเล็กได้ดี มากกว่านั้นการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มีต้นทุนต่ำและง่ายเพราะไม่ต้องใช้ตัวกำเนิดไอน้ำ (steam generator) และปั๊ม (metering pump) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในการใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

2.5.2 ถ่านกัมมันต์ที่มาจากกระตุ้นทางเคมี

ในทางตรงข้ามจากการกระตุ้นทางกายภาพ ในการกระตุ้นทางเคมีจะทำการเคลือบฝัง (impregnation) ของวัสดุตั้งต้นด้วยสารเคมีที่ดูดน้ำ (dehydrating agent) ในขั้นการเผา (carbonization) และการกระตุ้น (activation) สารเคมีที่ดูดน้ำมักจะเป็นกลุ่มแอลคาไลน์ กรด และเกลือ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl) กรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) และอื่นๆ ในการศึกษาการกระตุ้นทางเคมีสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ใช้พลังงานต่ำกว่า เพราะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในกระบวนการสั้น แต่สามารถให้ผลผลิตสูง มากกว่านั้นการกระตุ้นทางเคมีสามารถทำได้ในระบบขั้นตอนเดียว

(single stage) ซึ่งจะเป็นขั้นตอนการเผา (carbonization) และการกระตุ้น (activation) ดำเนินไปพร้อมๆกันด้วยสารเคมีกระตุ้น สารเคมีเหล่านี้จะไปก่อให้เกิดรูพรุน [20-22] ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตด้วยการกระตุ้นด้วยเคมีต้องผ่านกระบวนการล้างเพื่อกำจัดสารเคมีตกค้างและสารเจือปนที่ปนเปื้อนในโครงสร้างคาร์บอน ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะส่งผลให้เกิดมลพิษและเป็นสาเหตุการกีดกร่อนของสารเคมีตกค้างอีกทั้งการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการล้าง [23] นอกเหนือจากนั้นการใช้เวลาล้างนานๆคาดว่าสามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้สมบูรณ์

การกระตุ้นทางเคมีสามารถทำได้โดยวิธีผสมด้วยของแข็ง (solid-solid physical mixing) การเคลือบฝังแบบเปียก (wet impregnation) หรือการแช่ (soaking) ในการผสมด้วยของแข็งเริ่มต้นจะผสมผงสารกระตุ้น (solid activator) กับวัตถุดิบหรือเถ้าที่สัดส่วนต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง ขณะที่การเคลือบฝังแบบเปียกเป็นการผสมระหว่างสารละลายของตัวกระตุ้นกับวัตถุดิบหรือเถ้าที่สัดส่วนต่างๆ ณ อุณหภูมินั้นๆ จากนั้นทำการปั่นจนแล้วทำการให้ความร้อนจนแห้งในภาวะก๊าซเฉื่อย [24, 25] อุณหภูมิที่อบแห้งประมาณ 110 องศาเซลเซียส Lillo-Ródenas et al. [25] ได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการอบแห้งของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการเคลือบฝังแบบเปียก (wet impregnation) จาก 0 ชั่วโมงถึง 31 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าการใช้เวลาในการอบแห้งมากขึ้นจะทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณรูพรุนลดลง เนื่องจากการเกิดของแอลคาไลน์คาร์บอนเนตอาจจะขัดขวางการทำงานของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นตัวกระตุ้น อย่างไรก็ตามการศึกษาอิทธิพลของการใช้เวลาอบแห้งยังมีการศึกษาไม่มากนัก

2.6 ไม้ไผ่ในประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการกระจายพันธุ์ไม้ไผ่แห่งหนึ่งของโลก มีการพบไม้ไผ่ 15 สกุล 82 ชนิด ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าทรัพยากรไม้ไผ่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีพของคนไทยในชนบทมาเป็นเวลาช้านาน ปัจจุบันไม้ไผ่ เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจชุมชนและเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งมีมูลค่าการค้าของ ผลิตภัณฑ์ไม้ไผ่ในรูปหน่อไม้สด และหน่อไม้แปรรูปภายในประเทศประมาณปีละ 1,400 ล้านบาท และยังส่งออกไป ต่างประเทศประมาณปีละไม่ต่ำกว่า 1,000 ล้านบาท ขณะเดียวกันได้เพิ่มมูลค่าของไม้ไผ่ โดยใช้เป็นวัตถุดิบใน อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ไม้อัด ปาร์เก้ เฟอร์นิเจอร์ เยื่อกระดาษ งานหัตถกรรม เครื่องจักสาน เป็นต้น

ไม้ไผ่จึงจัดได้ว่าเป็นพืชป่าที่มีศักยภาพเป็นแหล่งไม้ทดแทนได้ แต่ยังไม่ได้รับการวิจัยและพัฒนาเท่าที่ ควร ไม้ไผ่มีข้อได้เปรียบไม้โตเร็วอื่นๆ หลายประการเช่น อายุ 3 ปี ตัดมาใช้ประโยชน์ได้ในขณะที่ไม้โตเร็วชนิด อื่นๆ ต้องการเวลา 5 ถึง 10 ปี ปลุกและขยายพันธุ์ได้ง่าย ต้องการพื้นที่ปลูกน้อยปลูกได้ทั่วประเทศ ให้ผลพลอยได้ หลายอย่าง หน่อ ใบ เหง้า แขนง เมล็ด เป็นอาหารและยา กอ

ช่วยยึดดิน ป้องกันลมและให้ดินชุ่มชื้น เนื้อไม้มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ทั้งยังฝังให้แห้งได้ง่าย ประโยชน์ของไม้ไผ่มีมากกว่าไม้ไผ่ถูกจัดเป็นไม้เอนกประสงค์ อย่างไรก็ตามไม้ไผ่ก็มีข้อเสียที่มีลักษณะเป็นลำกลม กลวงใน มีข้อ และไม่ทนต่อการทำลายของแมลง เห็ด รา ซึ่งเป็นเหตุให้การใช้ประโยชน์ไม้ไผ่ในอดีตเป็นไปอย่างด้อยประสิทธิภาพ และมีมูลค่าเพิ่มน้อย

เมื่อไผ่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ปัจจุบันไม้ไผ่จึงมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศมากขึ้น ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและการส่งออก กล่าวคือด้านอุตสาหกรรมนำไม้ไผ่มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าชนิดต่างๆ ได้มากมายหลายชนิด เช่น กระดาษ ไหมเทียม และไม้ไผ่อัด สำหรับไม้ไผ่อัดนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ตลาดมีความต้องการสูง และขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไม้ไผ่เมื่อแห้งแล้วมีการยืดหดตัวน้อยมาก จึงนิยมนำมาใช้ทำไม้แบบในการก่อสร้าง และสามารถใช้ได้มากครั้ง หรือนำมาใช้ เป็นวัสดุตกแต่งอาคารบ้านเรือน เนื่องจากไม้ไผ่มีลวดลายสวยงามแตกต่างจากไม้ชนิดอื่นๆ ในแต่ละปีผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากไม้ไผ่สามารถเพิ่มมูลค่าจากการส่งออกได้เป็น อย่างดี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย การส่งออกผลิตภัณฑ์ จากไผ่นั้นมีลักษณะแตกต่างกันไป เช่น ไม้ไผ่ที่ยังไม่แปรรูป (ส่งออกเป็นลำไผ่) และแปรรูปแล้ว (ไม้อัดไผ่ เครื่อง จักสาน และหน่อไม้อัดปิ้ง) เป็นต้น

จากความหลากหลายของไม้ไผ่ที่มีมากมายและแพร่กระจายอยู่ทั่วไปในป่า มีสมบัติเฉพาะตัวที่มีความโดดเด่น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ตามความต้องการที่หลากหลาย เป็นที่นิยมหรือต้องการของตลาดในปัจจุบัน ไผ่เป็นไม้โตเร็ว หรือปลูกทดแทนไม้โตเร็วอื่น ๆ ได้ง่าย ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นถึงว่า “ไม้ไผ่เป็นพืชเศรษฐกิจจากป่าที่มีความสำคัญของคนไทย” ซึ่งช่วยส่งเสริมความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจและสังคมให้ชุมชนฐานราก เป็นการสืบทอดและต่อยอดภูมิปัญญาท้องถิ่น ตลอดจนทั้งเป็นการส่งเสริมให้มีการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์จากไผ่อย่างยั่งยืนต่อไป [26]

ในอดีตไม้ไผ่ที่นิยมปลูกเป็นพืชเศรษฐกิจคือ ไผ่ตง ไผ่รวก ไผ่สีสุก และไผ่เลี้ยง โดยนิยมปลูกไม้ตงมากที่สุดไม้ตงมีทั้งสิ้น 5 พันธุ์ (ตงเขียว ตงดำ ตงหม้อ ตงหนู และตงลาย) แต่ที่นิยมปลูกอย่างกว้างขวางเพียงสองพันธุ์คือ ตงเขียว และ ตงดำ ส่วนใหญ่ปลูกที่จังหวัดปราจีนบุรีและจังหวัดใกล้เคียง โดยมีพื้นที่ปลูกระหว่าง ปี 2536–2540 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พื้นที่ปลูกไม้ไผ่ตงระหว่างปี 2536–2540 ในจังหวัดปราจีนบุรีและจังหวัดใกล้เคียง [26]

ชนิดไม้	ปี (ไร่)				
	2536	2537	2538	2539	2540
ไผ่ตงเขียว	391,499	430,767	253,080	232,615	194,998
ไผ่ตงดำ	134,537	173,973	133,184	60,292	58,064
ไผ่อื่นๆ	5,887	7,285	4,795	4,626	4,433
รวมพื้นที่ปลูก	531,929	612,025	391,059	297,533	257,495

จากเหตุการณ์เมื่อเดือนพฤศจิกายน 2537 ไผ่ตงเขียวทั่วประเทศได้ออกดอกและยืนต้นตายในเวลา 1-2 ปี (ตายชุก) เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันพบไม้ไผ่ตงและไม้ไผ่ชนิดอื่น ๆ ไม่ถึง 200,000 ไร่ และไม้ไผ่ที่นิยมปลูกในเมืองไทย ได้แก่ ไผ่ตง ไผ่เลี้ยง ไผ่หวาน ไผ่ซาง ไผ่รวก ไผ่หมาจู ไผ่กิมซุง และไผ่เป่าชะ

2.7 ไม้กับบทบาทในการเป็นพืชเศรษฐกิจ (economic plants)

ไม้ไผ่ เป็นพืชป่าที่มีกระจายอยู่ในป่าเขตร้อนอย่างมากมายหลากหลายชนิด ในพื้นที่ป่าธรรมชาติเองก็ยังมีพบกระจายอยู่ทั่วไป โดยเฉพาะในป่าเบญจพรรณและดงดิบ มนุษย์ได้มีการนำแหล่งพันธุกรรมไม้ไผ่จากป่ามาพัฒนาสายพันธุ์ให้มีความเหมาะสมกับความต้องการในรูปแบบต่างๆ จึงจัดได้ว่าไม้ไผ่เป็นทรัพยากรจากป่าที่มนุษย์มีการนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐาน ไม่ว่าจะเป็นลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างทางกายวิภาค องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ คุณค่าทางอาหารและโภชนาการของหน่อไม้ และคุณสมบัติของถ่านไม้ไผ่ ทำให้เราทราบได้ว่าไม้ไผ่จัดเป็นพืชที่มีศักยภาพมากมาย จัดเป็นไม้โตเร็วมาก 3 ปี สามารถใช้ประโยชน์ได้ ปลูกขยายพันธุ์ได้ง่าย เนื้อไม้มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ผึ่งให้แห้งได้ง่าย ไม้ไผ่ถูกจัดเป็นไม้เอนกประสงค์เพราะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ในเชิงเศรษฐกิจไม้ไผ่และหน่อไม้หรือหน่อไม้สามารถสร้างงานในการปลูก การเก็บเกี่ยว การผลิต และการขนส่ง เป็นสินค้าส่งออกทำรายได้ให้กับประเทศ

จากการศึกษาภาพรวมมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์หลัก 8 ชนิด จากไม้ไผ่ เรียงตามลำดับมูลค่าการส่งออก ได้แก่ 1) หน่อไม้ปรุงแต่ง 2) หน่อไม้สด 3) ไม้ไผ่ 4) ไม้อัดทำด้วยไม้ไผ่ 5) เครื่องจักสานไม้ไผ่ 6) ผลิตภัณฑ์จักสาน (เช่น เสื้อ สิ่งปูลาด ฉาก) ทำด้วยไม้ไผ่ 7) หน่อไม้แห้ง และ 8) ถ่านไม้ไผ่ ส่วนที่เหลือเป็นมูลค่าโดยรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีไม้ไผ่ผสมกับวัสดุอื่น เช่น หวายหรือไม้อื่น เป็นต้น ที่ออกสู่ตลาดโลก ในปี พ.ศ. 2550 มีมูลค่าโดยรวมทั้งสิ้น 676.90 ล้านบาท จะเห็นได้ว่ามูลค่าการส่งออกจากไม้ไผ่ของประเทศไทยสามารถนำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยได้ จาก

ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นทำให้ยืนยันได้ว่าไม่มีความเหมาะสมและมีบทบาทสำคัญในการเป็นพืชเศรษฐกิจได้หลากหลายประการ [26]

2.8 ตัวดูดซับเอมีนแบบของแข็ง (solid amine adsorbent)

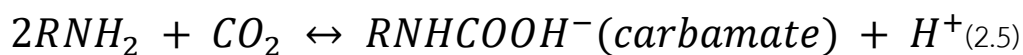
ตัวดูดซับเอมีนแบบของแข็งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการดูดซับนั้นจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดนั้นคือโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์กับตำแหน่งว่างไว (active site) ที่เป็นเบส ด้วยเหตุนี้ตัวดูดซับฐานเอมีนจึงถูกศึกษาอย่างแพร่หลาย เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาการเพิ่มปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการคัดเลือกของวัสดุของแข็งที่ปรับปรุงผิวด้วยเอมีนโดยศึกษาสารอินทรีย์ที่เป็นเบส (เอมีน) และสารอนินทรีย์ที่เป็นเบส (โลหะหมู่ 1 หรือ 2) ได้รับความสนใจอย่างมาก ส่วนใหญ่มักใช้ primary amine และ secondary amine เพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาเป็น carbamate สมการที่ 3

การเคลือบฝังด้วยเอมีนมีข้อดีหลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่น ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบกายภาพอย่างเช่น ซิลิกาฟูรแบบเมโส มีความว่างไวต่อความชื้น อย่างไรก็ตามถ้าหากทำการเคลือบฝังด้วยเอมีนทำให้ตัวดูดซับมีความทนทานต่อความชื้นมากขึ้น เนื่องจากแรงอันตรกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความชื้น ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์โดย primary amine และ secondary amine ดำเนินไปได้โดยการเกิด คาร์บาไมต์ไอออน ดังสมการที่แสดง 2.3 และ 2.4 [27]



ปฏิกิริยาโดยรวมดังสมการที่ 2.5



ถ้าหากมีความชื้น จะเกิดปฏิกิริยาเพิ่มเติมดังสมการที่ 2.6



จากสมการด้านบนจะเห็นว่าภายใต้ภาวะที่มีความชื้นจะเกิดไบคาร์บอนเนต สำหรับตัวดูดซับเอมีนของแข็งนั้นมีแรงอันตรกิริยาสองประเภทซึ่งเกิดระหว่างเอมีนกับตัวรองรับ (support)

ในกลุ่มแรกคือแรงอันตรกิริยาอ่อนและกลุ่มต่อมาคือการศึกษาพันธะโควาเลนต์ เช่น surface-grafting of aminosilanes

วัสดุของแข็งที่ปรับปรุงผิวด้วยเอมีนมีข้อดีคือการใช้พลังงานต่ำในการฟื้นฟูเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายเอมีน อย่างไรก็ตามข้อเสียหลักๆ คือปริมาณการดูดซับต่ำและมีต้นทุนสูง ปกติการฝังเอมีนลงบนซิลิกาที่มีสองวิธีหลัก คือ การเคลือบฝังแบบกายภาพ และการทำให้เกิดโควาเลนต์ระหว่างเอมีนกับสารอินทรีย์ การเกิดพันธะเคมีนั้นจะทำให้มีอัตราในการดูดซับสูงและมีความเสถียรสูงระหว่างการดูดซับกับคายซับ

2.8.1 ตัวดูดซับเคลือบฝังด้วยเอมีน (amine impregnated adsorbent)

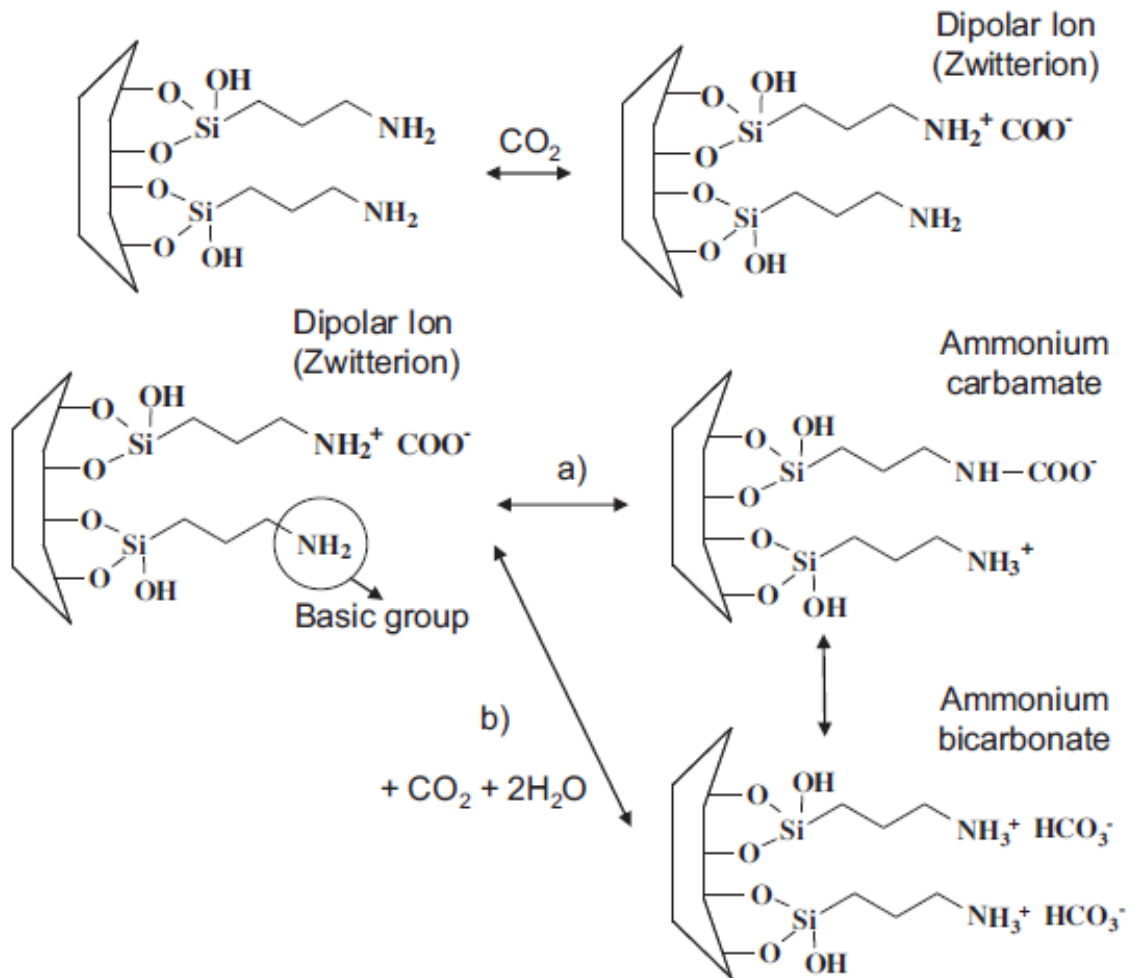
ในการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีนบนตัวดูดซับมีสองวิธีหลัก ซึ่งหนึ่งในนั้นคือการเคลือบฝังแบบเปียกเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับ ในวิธีนี้เอมีนจะถูกผสมกับตัวรองรับโดยการใส่ตัวทำละลาย ตัวทำละลายที่เป็นส่วนเกินจะถูกกำจัดออกโดยการระเหย

ข้อดีของการเคลือบฝังแบบเปียกคือเป็นวิธีที่ง่าย มีปริมาณเอมีนสูงและลดการกีดกันโดยทั่วไปแล้วจะใช้พอลิเอทิลีนอิมิน อย่างไรก็ตามยังมีเอมีนอีกหลายๆตัวตั้งแต่เอมีนโมเลกุลเล็กจนถึงเอมีนโมเลกุลใหญ่ๆ ในหมู่ของพวกเอมีนต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีนอิมิน (PEI) เมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) ไตรเอทานอลามีน (TEA) ไดเอทานอลามีน (DEA) และโมโนเอทานอลามีน (MEA) มักจะใช้ตัวรองรับ MCM-41 อย่างไรก็ตาม การใช้เอมีนแบบตติยภูมิ (tertiary amines) เช่น MDEA TEA จะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงแล้วเกิดเป็นคาร์บาไมด์ได้ ในทางตรงข้าม MCM41-MEA และ MCM41-DEA มีปริมาณการดูดซับประมาณ 40 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับที่อุณหภูมิบรรยากาศ [28]

2.8.2 ตัวดูดซับเอมีนแบบกราฟ (amine grafted adsorption)

ในวิธีการสังเคราะห์ตัวดูดซับแบบวิธีกราฟนี้ จะทำให้เอมีนทำพันธะโควาเลนต์กับพื้นผิวซิลิกา เกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกากับอะมิโนซิลาน ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยกลไกการทำปฏิกิริยาของหมู่เอมีนที่กราฟลงบนพื้นผิวตัวดูดซับซิลิกากับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในรูปที่ 2.7 ในวิธีนี้ปริมาณเอมีนที่เติมลงไปในตัวรองรับจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของหมู่ซิลานอล ในขั้นตอนการกราฟข้อดีคือเอมีนจะมีพันธะที่แข็งแรง เอมีนจะไม่หลุดออกง่ายเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำลายพันธะ

ถึงแม้ว่าวัสดุที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีนจะทำให้ตัวดูดซับมีปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงแต่จะทำให้ความเสถียรทางความร้อนของตัวดูดซับต่ำลง การสังเคราะห์วิธีนี้จะช่วยแก้ปัญหาได้ โดยปกติแล้วมีวิธีการสังเคราะห์ 2 วิธี คือ การสังเคราะห์โดยตรง และการปรับปรุงพื้นผิวหลังการสังเคราะห์ [28]



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนปฐมภูมิกับคาร์บอนไดออกไซด์ [9]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.9 แบบจำลองจลพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic model of adsorption)

จลพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้น โดยจะเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับเวลา ซึ่งเป็นการศึกษากลไกการดูดซับโดยมีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาแบบจำลองจลพลศาสตร์ 3 แบบจำลองได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมและแบบจำลองปฏิกิริยาของอาฟรามี โดยจะเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function

2.9.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order kinetic model)

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมถูกอธิบายในปี 1898 โดย Lagergren สมการนี้นิยมใช้กันสำหรับตัวดูดซับของแข็งในเฟสของเหลว โดยสมการเริ่มต้นดังนี้ [29]

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.7)$$

เมื่อ q_t = ความเข้มข้นของสารที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e = ความเข้มข้นของสารที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)

t = เวลา (นาที่⁻¹)

จากสมการที่ 2.7 ทำการอินทิเกรตแล้วกำหนดขอบเขตที่เวลาเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ถึงที่เวลาใดๆและความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ถึงที่เวลาใดๆ

$$\ln \frac{q_e - q_t}{q_e} = k_1 t \quad (2.8)$$

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2.9)$$

2.9.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order kinetic model)

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ถูกอธิบายในปี ค.ศ. 1995 โดย Ho ซึ่งได้อธิบายถึงอัตราของปฏิกิริยาการดูดซับอันดับสองโดยตั้งสมมติฐานว่ากระบวนการเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และขึ้นกำหนดอัตราคือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยปฏิกิริยาอันดับสองเทียมขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับและปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ ณ ภาวะสมดุล ซึ่งกฎอัตราสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.10 [30]

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 10 ทำการอินทิเกรตแล้วกำหนดขอบเขตที่เวลาเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ถึงที่เวลาใดๆและความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ถึงที่เวลาใดๆ ได้ดังสมการ 2.11

$$\ln \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 จัดรูปใหม่แล้วจะได้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.12)$$

- เมื่อ q_e = ความเข้มข้นของสารในภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ความเข้มข้นของสารที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_2 = ค่าคงที่ของอัตราเร็วอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท)

2.9.3 แบบจำลองปฏิกิริยาของอาฟรามิ (Avrami fractional order kinetic model)

แบบจำลองของอาฟรามิถูกพัฒนามาจากแบบจำลองอาฟรามิที่จำลองการเปลี่ยนแปลงเฟสและการเติบโตของผลึกของวัสดุต่างๆ แบบจำลองนี้ถูกประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีน โดยสมการเริ่มต้นแสดงดังสมการที่ 2.13 [31]

$$\frac{dq_t}{dt} = k_A^{n_A} t^{n_A-1} (q_e - q_t) \quad (2.13)$$

- เมื่อ q_e = ความเข้มข้นของสารในภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ความเข้มข้นของสารที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_A = ค่าคงที่ของอาฟรามิ (นาท⁻¹)
 n_A = ค่า exponent ของอาฟรามิ
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท)

จากสมการที่ 13 ทำการอินทิเกรตแล้วกำหนดขอบเขตที่เวลาเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ถึงที่เวลาใดๆ และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ถึงที่เวลาใดๆ ได้ดังสมการ 2.14

$$q_t = q_e (1 - e^{-(k_A t)^{n_A}}) \quad (2.14)$$

ตัวแปร n_A คือตัวเลขที่บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของกลไกการดูดซับระหว่างเกิดการดูดซับเมื่อ n_A เท่ากับ 1 หมายถึงเกิดการดูดซับแบบ Homogenous n_A เท่ากับ 2 หมายถึงเกิดการเติบโตของตำแหน่งดูดซับในทิศทางเดียวและ n_A เท่ากับ 3 หมายถึงเกิดการเติบโตของตำแหน่งดูดซับสองทิศทาง

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fiuza และคณะ [3] ทำการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก yellow mombin ซึ่งเป็นวัตถุดิบธรรมชาติสำหรับเป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยสารเคมีและกระตุ้นทางกายภาพ สารเคมีที่ใช้กระตุ้นได้แก่กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนการกระตุ้นทางกายภาพจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนจากการวิเคราะห์พื้นผิวตัวอย่างพบว่าการกระตุ้นด้วยกรดไนตริก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไนโตรเจนแสดงไอโซเทิร์มประเภทที่ 1 ซึ่งหมายถึงวัสดุที่มีรูพรุนขนาดไมโคร ในทางตรงข้ามการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกแสดงไอโซเทิร์มประเภทที่ 4 หมายถึงวัสดุที่มีรูพรุนขนาดมีโซ จากการศึกษาปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณ basic site ที่สูงกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีอื่นๆ ส่วนการกระตุ้นทางกายภาพพบว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะให้ค่า basic site ที่สูงกว่ากระตุ้นด้วยไนโตรเจน ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไนโตรเจน ปริมาณการดูดซับมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ basic site และโครงสร้างรูพรุนขนาดไมโครที่สม่ำเสมอ (homogenous micropore) จากนั้นทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่ารอบที่ 2 จะมีปริมาณการดูดซับลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องมาจากการเกิด carbonate ที่พื้นผิวของตัวดูดซับหรือมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวตัวดูดซับ

Kongnoo และคณะ [32] โดยงานวิจัยศึกษาผลของการดัดแปรด้วยไดเอทานอลามีน (diethanolamine, DEA) และโมนเอทานอลามีน (monoethanolamine, MEA) ลงบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกะลาปาล์มที่มีต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ จากการวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วย DEA และ MEA พบว่ามีค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดไมโครลดลงถึงร้อยละ 11 และ 52 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ดัดแปรด้วยเอมีน

ซึ่งการลดลงของพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดไมโครมาจากการที่โมเลกุลของเอมีนทั้งสองเข้าไปในรูพรุน ก่อให้เกิดการลดลงของพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดไมโครจะเห็นได้ชัดเมื่อตัดแปรด้วย MEA เมื่อเปรียบเทียบ ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการตัดแปรด้วยเอมีนทั้งสองชนิดพบว่าค่าปริมาณ การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการตัดแปรด้วย DEA มีค่าสูงกว่าซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับ ค่าพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดไมโคร จากนั้นทำการศึกษาผลของอุณหภูมิการดูดซับพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ ตัดแปรด้วยเอมีนมีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 40 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับทางกายภาพ ในทางตรงข้าม เมื่อตัดแปรถ่านกัมมันต์ด้วยเอมีนทั้งสองชนิดพบว่าปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับทางเคมี จากนั้นทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับพบว่าการใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสมีเวลา การคายซับเร็วที่สุดสำหรับถ่านกัมมันต์ที่ปรี้งปรุงด้วย DEA ส่วน ถ่านกัมมันต์ที่ตัดแปรด้วย MEA ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเนื่องจาก MEA เกิดการเสื่อมสภาพทำให้เมื่อนำ กลับไปใช้ใหม่จะทำให้ปริมาณการดูดซับมีค่าลดลง และเมื่อฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิระหว่าง 140 ถึง 160 องศาเซลเซียสจะใช้เวลาการฟื้นฟูนานกว่า 60 นาที เนื่องจากโมเลกุลของ MEA มีการขัดขวาง การถ่ายเทมวล (mass transfer resistance) มากกว่า DEA

Liu และคณะ [33] ทำการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จาก hemp hurd และ retted hemp hurd โดยจะเปรียบเทียบการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์กับการกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงกว่า 1,100 ตารางเมตรต่อกรัมและมีค่าปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.583 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมซึ่งที่สูงกว่า การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งพิจารณาปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า การกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์มีปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าการกระตุ้น ทางกายภาพด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติทางพื้นผิวที่กล่าวมาข้างต้น จากการศึกษากการดูดซับคายซับด้วยไนโตรเจน แสดงไอโซเทอมของตัวดูดซับพบว่า ตัวดูดซับที่กระตุ้น ด้วยซิงค์คลอไรด์แสดงไอโซเทอมแบบที่ 1 ซึ่งเป็นไอโซเทอมที่แสดงถึงรูพรุนแบบไมโคร ส่วนการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์นั้นแสดงไอโซเทอมทั้งแบบที่ 1 และ 4 แสดงให้เห็นถึง ลักษณะรูพรุนที่มีรูพรุนแบบไมโครและเมโส ไอโซเทอมเกิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ซึ่งเป็น เอกลักษณะของรูพรุนขนาดเมโสซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนขนาด ไมโครและเมโส

Martín และคณะ [34] ทำการศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยซิลิกาทางการค้าที่มีราคาถูก (commercial low cost silica) โดยดัดแปรพื้นผิวด้วยไดเอทิลีนไตรเอมีน (Diethylenetriamine, DETA) จากการศึกษาจลศาสตร์ของตัวดูดซับพบว่าเมื่ออัตราการเกิดการดูดซับค่อนข้างเร็วในช่วงแรก จากนั้นจะเริ่มดูดซับอย่างช้าๆเช่นในตัวอย่างที่ดัดแปรด้วย DETA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมีการดูดซับในช่วงแรกประมาณ 47 วินาทีที่มีความจุถึงร้อยละ 70 กระบวนการดูดซับที่รวดเร็วในช่วงแรก pseudo first order kinetic model สามารถอธิบายได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เวลากการดูดซับที่นาน pseudo second order kinetic model สามารถอธิบายได้ดีกว่าแสดงว่ากระบวนการดูดซับมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเมื่อใช้เวลากการดูดซับเป็นเวลานาน จากนั้นทำการวิเคราะห์จลศาสตร์ด้วย intraparticle diffusion model โดยพิจารณาค่า R_i จะเป็นค่าที่แบ่งช่วงของการเกิดการดูดซับพบว่าตัวอย่างซิลิกาดั้งเดิม (original silica gel, FS) และ 10%DETA-FS มีความแข็งแรงในการดูดซับในช่วงแรกค่อนข้างแข็งแรง (Zone3) ส่วนตัวอย่างที่เพิ่มปริมาณ DETA ร้อยละ 20 30 และ 40 น้ำหนัก เมื่อดัดแปรด้วย DETA ปริมาณน้อยจะมีการดูดซับที่แข็งแรงในช่วงแรก หากเพิ่มปริมาณ DETA ปริมาณการดูดซับก็เพิ่มขึ้นในช่วงแรกแสดงว่า DETA ไปปกคลุมผนังของรูพรุนไม่เกิดการอุดรูพรุน แต่ในกรณีนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ DETA มีความแข็งแรงของดูดซับในช่วงแรกน้อยลงเนื่องจาก DETA ไปอุดรูพรุน อย่างไรก็ตามกลไกการดูดซับของตัวอย่าง FS และ 10%DETA-FS ถูกควบคุมโดยการดูดซับอย่างรวดเร็วที่พื้นผิวนอกเนื่องจากมี แรงดึงดูดที่สูงกว่าของโมเลกุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีนได้ดีกว่าและมีรูพรุนเปิดสามารถให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ผ่านได้เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการดูดซับพบว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจะทำให้ปริมาณการดูดซับลดลงซึ่งจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ตัวอย่าง FS และ 10%DETA-FS การใช้อุณหภูมิการดูดซับสูงจะทำให้ปริมาณการดูดซับน้อยลงเนื่องจากธรรมชาติของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนระหว่างเอมีนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยทำให้การแพร่ของก๊าซไปยังรูพรุนต่างๆได้ดีขึ้นเนื่องจากความหนืดของ DETA จะลดลงที่อุณหภูมิสูง นั่นเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าปริมาณการดูดซับก๊าซลดลงอย่างช้าๆเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสำหรับตัวอย่างที่มีการดัดแปรด้วย DETA ปริมาณมาก

Rezma และคณะ [35] ทำการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่ทำจากก้านใบปาล์มโดยทำการผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการกระตุ้นด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่วิเคราะห์ทั้งหมดแสดงไอโซเทอมประเภทที่ 1 ตาม IUPAC เป็นรูพรุนแบบไมโคร เมื่อทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 750 และ 850 องศาเซลเซียสจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 353 และ 546 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.15 และ 0.24 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 950 องศาเซลเซียสจะมีค่า

พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเหลือ 214 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวมเหลือ 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนภายใต้บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซออกซิไดซ์ ตัวอย่างที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดไมโครที่สูงที่สุดประมาณ 546 ตารางเมตรต่อกรัม และเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy พบว่าค่า $I_D/(I_D+I_G)$ ของการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับร้อยละ 49.4 เมื่อเปรียบเทียบกับกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ค่า $I_D/(I_D+I_G)$ ลดลงประมาณร้อยละ 2 นั้นหมายความว่า การกระตุ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ทำให้ตัวดูดซับมีความเป็นผลึกน้อยลงและจะชอบที่จะฟอร์มเป็น amorphous sp^3 มากกว่า



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวดูดซับ ขั้นตอนการทดลอง และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ เช่น ปีกเกอร์ แท่งแก้วคนสาร กระจกบดวง หลอดหยด เป็นต้น
- 3.1.2 เครื่องชั่งละเอียด
- 3.1.3 เครื่องปั๊มสุญญากาศรุ่น DOA-P504-BN ยี่ห้อ GAST
- 3.1.4 เครื่องสั่นสะเทือนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากบริษัท tech & time system
- 3.1.5 ตู้อบ
- 3.1.6 ครกบดสาร
- 3.1.7 ตะแกรงกรองสารขนาดอนุภาค 80 mesh
- 3.1.8 กรวยบุชเนอร์ (buchner funnel)
- 3.1.9 กระจดาชกรองเบอร์ 90
- 3.1.10 เตาเผาสำหรับการกระตุ้นถ่านกัมมันต์
- 3.1.11 เครื่องทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
- 3.1.12 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014
- 3.1.13 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (surface area and porosity analyzer) ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020
- 3.1.14 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (CHNS analyzer) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น EA 2400 Series II.
- 3.1.15 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1 ถ่านไม้ไฟจากศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2 เตตระเอทิลีนเพนทามีน (tetraethylenepentamine) จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.2.3 พอลิเอทิลีนอิมีน (polyethyleneimine) จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.2.4 เมทานอล (methanol) จากบริษัท ACI Labscan

3.2.5 กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) จากบริษัท J.T.Baker

3.2.6 คาร์บอนไดออกไซด์ในฮีเลียมร้อยละ 30 โดยปริมาตร จากบริษัท Praxair

3.2.7 คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ร้อยละ 100 โดยปริมาตร จากบริษัท Praxair

3.2.8 ไนโตรเจน จากบริษัท Praxair

3.2.9 ฮีเลียมที่ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999 โดยปริมาตรจากบริษัท Bangkok industrial gas

3.2.10 น้ำปราศจากไอออน

3.3 วิธีการเตรียมตัวดูดซับ

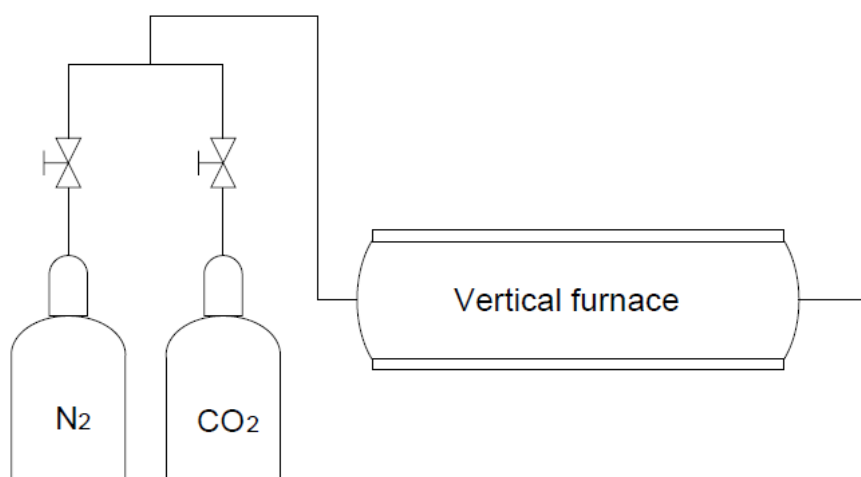
3.3.1 วิธีการเตรียมถ่านไม้ไผ่

นำถ่านไม้ไผ่ที่ได้รับจากศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มาบดด้วยโกร่งบดสารจากนั้นนำผงถ่านที่ได้มากรองด้วยตะแกรงกรองสารที่ขนาดต่ำกว่า 80 เมช นำสารที่ผ่านตะแกรงมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบสารเป็นเวลา 1 คืน ถ่านไม้ไผ่เตรียมด้วยวิธีนี้จะเรียกว่า BB

3.3.2 วิธีการกระตุ้นถ่านไม้ไผ่ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

นำผงถ่านไม้ไผ่ปริมาณ 6 กรัม ใส่ในภาชนะที่ทำจากควอตซ์แล้วบรรจุในเครื่องปฏิบัติการควอตซ์ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาทีเพื่อกำจัดความชื้นที่หลงเหลืออยู่บนตัวดูดซับ จากนั้นสลับให้เป็นบรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 700 หรือ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และจะเรียกว่า BB600 BB700 และ BB800 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 เตาเผาสำหรับกระตุ้นถ่านกัมมันต์

3.3.3 วิธีการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ปริมาณ 6 กรัม แخذในกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1:0.5 1:1 และ 1:2 ใช้ปริมาตรกรดเท่ากับ 45 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปทำให้สารกระจายตัวด้วยเครื่องสั่นสะเทือนด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำสารที่ได้ไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำสารที่อบไปบรรจุในภาตสแตนเลสสตีล (stainless steel) แล้วนำภาตสแตนเลสสตีลบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 นิ้ว ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำสารที่ได้มาล้างด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อสะเทินกรดส่วนเกินแล้วตามด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อปรับค่า pH จนเป็นกลาง จากนั้นนำสารที่ได้ไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ตัวดูดซับที่เตรียมได้ จะถูกเรียกว่า 1:0.5BB700 1:1BB700 และ 1:2BB700 ตามลำดับ

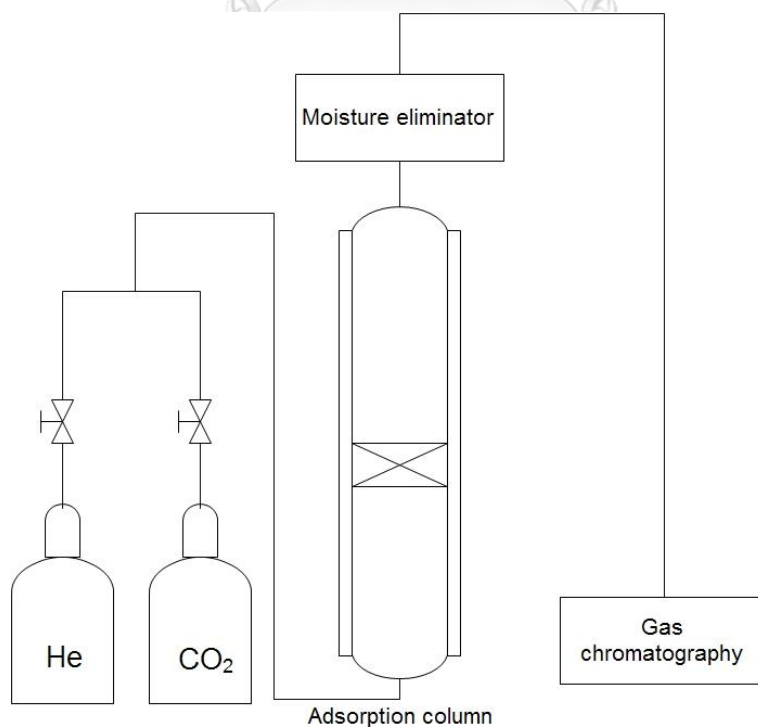
3.3.4 วิธีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีน

นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอสฟอริกผสมกับเมทานอลปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆหยดเอมีน (เตตระเอทิลีนเพนทามีน;TEPA หรือ โพลีเอทิลีนอิมิน;PEI) ผสมกันที่สัดส่วนร้อยละ 20 30 และ 40 โดยมวล แล้วทำการกวนสารโดยใช้แท่งแก้วจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารที่ผสมแล้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมงเพื่อทำการระเหยเมทานอลออก ตัวดูดซับที่เตรียมได้จะใช้สัญลักษณ์ (น้ำหนักตัวดูดซับ:น้ำหนักกรดฟอสฟอริก) ชนิดเอมีนร้อยละโดยมวลของเอมีนที่โหลดบนตัวดูดซับ ตัวอย่างเช่น 1:0.5TEPA30 หมายความว่า ตัวดูดซับ BB700 ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1:0.5 และโหลดเตตระเอทิลีนเพนทามีนร้อยละ 30 โดยมวล

3.4 ขั้นตอนการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

3.4.1 นำ Quartz wool บรรจุในคอลัมน์สำหรับบรรจุตัวดูดซับเพื่อรองตัวดูดซับ

3.4.2 ชั่งตัวดูดซับปริมาณ 0.4 กรัม จากนั้นบรรจุลงในคอลัมน์สำหรับบรรจุตัวดูดซับแล้วนำ Quartz wool บรรจุลงไปอีกครั้งหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวดูดซับลอยหลุดออกจากคอลัมน์



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

3.4.3 นำคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับใส่ในเครื่องทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.2

3.4.4 เปิดวาล์วให้ก๊าซฮีเลียมผ่านในระบบที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาทีแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 40 นาที เพื่อทำการ Pre-treatment

3.4.5 ทำการลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิการทดลองจากนั้นทำการสลับเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในฮีเลียม ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีเพื่อทำการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.4.6 จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับ

3.4.5 ทำซ้ำอีกครั้งแต่ใช้ผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่ไม่ได้บรรจุตัวดูดซับเพื่อหาค่า blank

3.4.6 นำพื้นที่ใต้กราฟที่คำนวณจาก blank มาลบกับพื้นที่ที่คำนวณได้จากตัวดูดซับจากนั้นจะได้ปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับจริงแล้วนำมาแปลงเป็นค่ามิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับโดยใช้สมการก๊าซอุดมคติ สมการที่ 3.1

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (3.1)$$

3.4.7 ทำการศึกษาตัวแปรที่ต้องการศึกษาในขณะที่กำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นๆ คงที่และดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 3.4.1 ถึง 3.4.6

โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาและมีอิทธิพลต่อความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้

- อุณหภูมิการดูดซับ (30 องศาเซลเซียส ถึง 110 องศาเซลเซียส)
- อุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ (600 700 และ 800 องศาเซลเซียส)
- สัดส่วนโดยมวลของการใช้ถ่านกัมมันต์ต่อกรดฟอสฟอริก (1:2 1:1 และ 1:0.5)
- ชนิดของเอมีน (เตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมิน)
- ปริมาณเอมีนเป็นสัดส่วนโดยมวล (20 30 และ 40)
- ความชื้นในก๊าซขาเข้า (ร้อยละ 0 3 และ 4 โดยปริมาตร)

3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ

3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความพรุนของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการดูดซับ/คายซับ แก๊สไนโตรเจน

นำตัวดูดซับปริมาณ 0.07 กรัม มาทำการ degas ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียสเพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยเครื่องพื้นที่ผิวและความพรุนของตัวดูดซับ ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020

3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

นำตัวดูดซับปริมาณ 0.05 กรัม มาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดเล็ก แล้วนำไปใส่ใน sample holder จากนั้นบรรจุเข้าเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (ultimate analysis)

ชั่งตัวดูดซับปริมาณ 0.002 กรัม บรรจุลงในฟอยล์สำหรับบรรจุสารแล้วทำการพับให้มิดชิด จากนั้นนำฟอยล์ที่บรรจุตัวดูดซับบรรจุลงในเครื่อง CHNS analyzer จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยทำซ้ำตัวละ 2 ครั้ง

3.5.4 การวิเคราะห์ลักษณะและความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray Diffractometer)

นำตัวดูดซับปริมาณ 0.1 กรัม วางบนสตัปสำหรับใส่ตัวอย่างแล้วเกลี่ยด้วยแผ่นสำหรับเกลี่ยตัวอย่างให้เรียบ จากนั้นบรรจุลงในเครื่อง X-ray Diffractometer โดยจะทดสอบในช่วง 2 theta 5-80 องศา ด้วยรังสีจาก $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.15406$ นาโนเมตร) Bruker รุ่น D8 advance

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับที่ได้จากไม้ ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ การเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ และจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4.1. การวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคต่างๆ

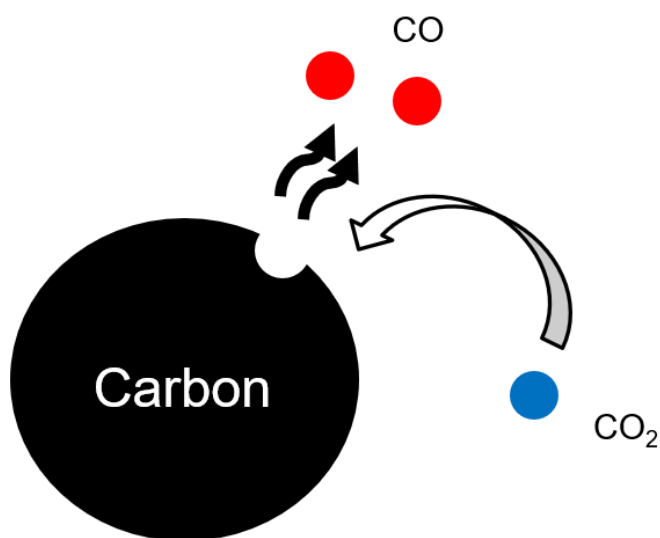
4.1.1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/คายซับไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนบนตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (BB) ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (BB600 BB700 และ BB800) ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอสฟอริกที่สัดส่วนน้ำหนักต่างๆ (1:0.5BB700 1:1BB700 และ 1:2BB700) แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว จำเพาะ (ตาราง เมตรต่อ กรัม)	ปริมาตร รูพรุนรวม (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อ กรัม)	ปริมาตร รูพรุนขนาด ไมโคร (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อ กรัม)	ปริมาตรรูพรุน ขนาดมีโซและ มาโคร(ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อกรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง รูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)
BB	51.52	0.0294	0.0265	0.0029	4.70
BB600	165.34	0.0892	0.0860	0.0032	4.63
BB700	254.27	0.1485	0.1275	0.0210	4.99
BB800	432.92	0.2297	0.2201	0.0096	4.05
1:0.5BB700	4.11	0.0032	0.0016	0.0016	6.42
1:1BB700	6.77	0.0082	0.0063	0.0019	14.60
1:2BB700	7.25	0.0063	0.0033	0.0030	7.98

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนบนตัวดูดซับต่างๆ พบว่าเมื่อทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อได้ตัวดูดซับ BB600 BB700 และ BB800 ตามลำดับ จะส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะบนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ BB800 มีค่ามากกว่า BB700 และ BB600 ตามลำดับ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 51.52 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อไม่ทำการกระตุ้น เป็น 165.34 254.27 และ 432.92 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาตรรูพรุนรวมก็มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยพบว่า ปริมาตรรูพรุนรวมมีค่าสูงขึ้นจาก 0.0294 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมสำหรับตัวดูดซับ BB เป็น 0.0892 0.1485 และ 0.2297 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม สำหรับ BB600 BB700 และ BB800 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำการออกซิไดซ์คาร์บอนบนผิวของตัวดูดซับ [35] เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และในสมการที่ 4.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดรูพรุนของคาร์บอนโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [33]



เนื่องจากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 600

องศาเซลเซียสเป็น 700 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะยิ่งผลักดันปฏิกิริยาไปข้างหน้า กล่าวคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะออกซิไดซ์คาร์บอนบนพื้นผิวตัวดูดซับเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นให้สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคาร์บอนถูกออกซิไดซ์ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมมีค่ามากขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาตรรูพรุนขนาดไมโคร และปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโคร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.0265 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม สำหรับตัวดูดซับ BB เป็น 0.0860 0.1275 และ 0.2201 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม สำหรับตัวดูดซับ BB600 BB700 และ BB800 ตามลำดับ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครมีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวม เมื่อพิจารณาปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครพบว่าตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการกระตุ้นจะมีปริมาตรรูพรุนขนาดมีโซและมาโครน้อยกว่าตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จาก 600 องศาเซลเซียส เป็น 700 องศาเซลเซียส ปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครเพิ่มขึ้นจาก 0.0032 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมเป็น 0.0210 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 800 องศาเซลเซียสจะพบว่า ปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมีค่าลดลงเป็น 0.0096 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากยิ่งเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ยิ่งผลักดันให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ฉะนั้นยังทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมาก และเมื่อคาร์บอนบนพื้นผิวตัวดูดซับที่อยู่บริเวณรูพรุนขนาดเล็กถูกออกซิไดซ์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้เกิดรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นให้สูงขึ้น คาร์บอนบนตัวดูดซับโดยเฉพาะคาร์บอนที่อยู่บริเวณมุมของแผ่นระนาบคาร์บอน บริเวณขอบของระนาบที่เป็นจุดบกพร่อง (defect position) และ บริเวณที่ไม่ต่อเนื่อง (dislocations or discontinuities) สามารถเกิดการสลายตัวได้ง่ายในภาวะอุณหภูมิสูง ดังนั้นคาร์บอนที่บริเวณดังกล่าวเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิการกระตุ้นเกินกว่า 700 องศาเซลเซียส และอาจส่งผลให้เกิดการสลายตัวของคาร์บอนบริเวณดังกล่าว ดังนั้นปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครจึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นจาก 700 องศาเซลเซียสเป็น 800 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุผลทั้งหมดนี้จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.1 เช่นกัน

เมื่อทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ แล้ว ก่อนจะปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีน ต้องทำการขยายรูพรุนของตัวดูดซับจากไฟก่อน เนื่องจากเอมีนมีโอกาสจะเกิดการปิดกั้นรูพรุนขนาดไมโครจึงต้องทำการขยายรูพรุนด้วยกรดฟอสฟอริกซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของสัดส่วนน้ำหนักตัวดูดซับกับน้ำหนักกรดฟอสฟอริกในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ

ตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์แล้วทำกระตุ้นด้วยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วน 1 ต่อ 0.5 (1:0.5BB700) พบว่าจะพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโคร และปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ได้กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (BB700) โดยพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าลดลงจาก 254.27 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 4.11 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวมลดลงจาก 0.1485 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.0032 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครลดลงจาก 0.1275 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 0.0016 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครจาก 0.0210 ลูกบาศก์เซนติเมตรเป็น 0.0016 ลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากกรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยากับคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ แสดงดังสมการที่ 4.2 และ 4.3



ในช่วงอุณหภูมิ 400-700 องศาเซลเซียส กรดฟอสฟอริก $H_n+2P_nO_{3n+1}$ จะเกิดการดีไฮเดรต (dehydrate) แล้วเปลี่ยนรูปเป็น P_4O_{10} ซึ่งจะเกิดเป็นผลึกแบบพหุสัณฐาน (crystalline polymorphs) ซึ่งผลึกเหล่านี้จะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส P_4O_{10} จะเป็นตัวออกซิไดซ์กับคาร์บอนแล้วเกิดเป็นรูพรุน ทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นจาก 4.99 อังสตรอม สำหรับ BB700 เป็น 6.42 อังสตรอม สำหรับ 1:0.5BB700 เมื่อตัวดูดซับมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ขึ้นจึงทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวมและปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาการเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักของตัวดูดซับต่อน้ำหนักของกรดฟอสฟอริกจาก 1 ต่อ 0.5 เป็น 1 ต่อ 1 พบว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 4.11 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 6.77 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวมจาก 0.0032 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.0082 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครเพิ่มขึ้นจาก 0.0016 ลูกบาศก์เซนติเมตรเป็น 0.0063 ลูกบาศก์เซนติเมตร และรูพรุนขนาดเมโสและมาโครเพิ่มขึ้นจาก 0.0016 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.0019 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากมีปริมาณกรดฟอสฟอริกมากขึ้นจึงสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่พื้นผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาการเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับกับน้ำหนักกรดฟอสฟอริกที่ 1 ต่อ 2 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครเพิ่มขึ้นจาก 6.77 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 7.25 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0019 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.0030 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากมีปริมาณกรดฟอสฟอริกสามารถทำปฏิกิริยา

ออกซิเดชันกับคาร์บอนที่ผิวได้มากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาปริมาตรรูพรุนรวม ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโคร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยพบว่ามีค่าลดลงโดยปริมาตรรูพรุนรวมลดลงจาก 0.0082 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.0063 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครลดลงจาก 0.0063 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.0033 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยลดลงจาก 14.60 อังสตรอม เป็น 7.98 อังสตรอม เนื่องมาจากการมีกรดฟอสฟอริกมากเกินไปจะทำให้กรดฟอสฟอริกเหล่านี้ฟอร์มตัวเป็นพอลิฟอสเฟตขนาดใหญ่ เกิดการปิดกั้นที่ปากรูพรุนหรือพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งหมู่ฟอสเฟตขนาดใหญ่ไม่สามารถล้างออกได้ง่าย [22, 36] ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าตัวดูดซับ 1:2BB700 จะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เล็กกว่า 1:1BB700 ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิค FTIR จะเห็นว่าตัวดูดซับ 1:2TEPA30 มีหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตหลงเหลือที่พื้นผิวมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

4.1.2. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนของตัวดูดซับ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบขั้นสูง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนของตัวดูดซับที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น (BB) ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (BB600 BB700 และ BB800) ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกและตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนร้อยละ 30 โดยมวล (1:0.5TEPA30 1:1TEPA30 และ 1:2TEPA30) ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1 ต่อ 1 และตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยมวล (1:1PEI20 1:1PEI30 และ 1:1PEI40) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบขั้นสูง

ตัวดูดซับ	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
BB	80.20	2.43	0.94	16.03
BB600	77.31	1.82	0.65	19.95
BB700	84.78	1.39	0.92	12.74
BB800	79.77	1.04	0.73	18.35
1:0.5TEPA30	70.51	3.07	7.66	18.31
1:1TEPA30	68.49	3.19	7.93	19.92
1:2TEPA30	57.38	3.02	8.17	30.96
1:1PEI20	74.10	2.69	6.10	16.73
1:1PEI30	63.65	3.72	8.87	23.19
1:1PEI40	66.26	4.51	11.40	17.14

จากตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนพบว่าเมื่อทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (BB600) จะทำให้มีปริมาณธาตุคาร์บอนลดลงจากร้อยละ 80.20 เป็น 77.31 โดยมวลและไฮโดรเจนลดลงร้อยละ 2.43 เป็น 1.82 โดยมวล เนื่องจากเกิดการระเหยของสารที่ระเหยง่าย (volatile matter) ซึ่งก่อให้เกิดรูพรุนตามสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับคายซับด้วยไนโตรเจนจะเห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่วนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (BB700) จะทำให้มีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 77.31 เป็น 84.78 โดยมวล แต่จะมีปริมาณธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง โดยปริมาณธาตุไฮโดรเจนลดลงจากร้อยละ 1.82 เป็น 1.39 โดยมวล ปริมาณธาตุออกซิเจนลดลงจาก 19.95 เป็น 12.74 โดยมวล ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจะเกิดการแตกออกของพันธะคาร์บอนกับไฮโดรเจนและคาร์บอนกับออกซิเจนบางส่วน ซึ่งก่อให้เกิดรูพรุนมากขึ้น จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 800 องศาเซลเซียส (BB800) ตัวดูดซับมีปริมาณธาตุออกซิเจนสูงขึ้นจากโดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.74 เป็น 18.35 โดยมวล แต่จะมีปริมาณธาตุคาร์บอนลดลงจากร้อยละ 84.78 เป็น 79.77 โดยมวล เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่คาร์บอนบนพื้นผิวตัวดูดซับกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียปริมาณธาตุคาร์บอน ดังสมการที่ 4.1 โดยในการกระตุ้นด้วยตัวออกซิไดซ์ในเฟสก๊าซนั้น การกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบกลุ่มที่เป็นกรดแก่ (เช่น คาร์บอกซิลิก) แต่หากกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบกลุ่มที่เป็นกลุ่มกรดอ่อนจำนวนมาก (เช่น กลุ่มฟีนอลิก)

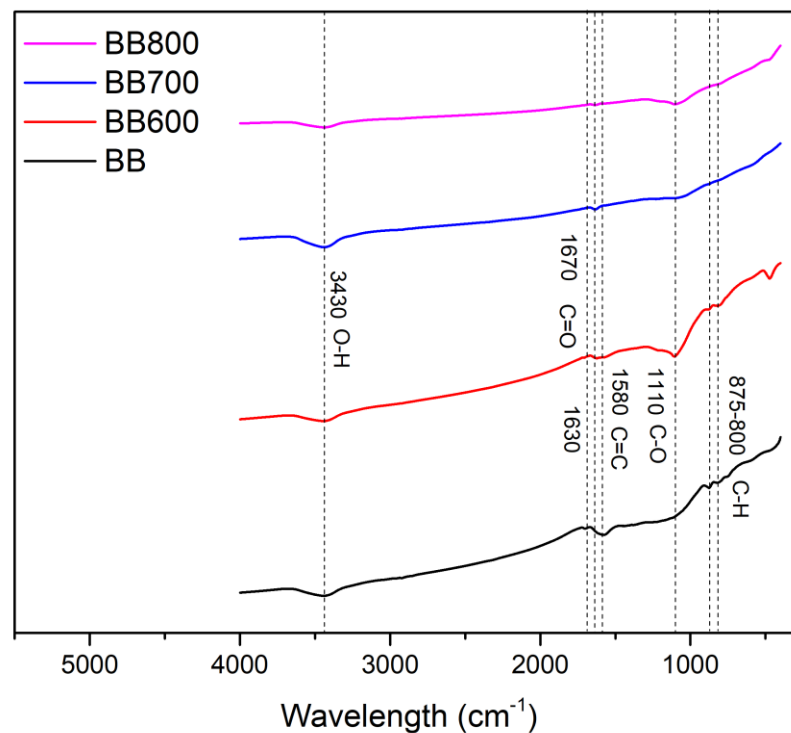
[37] มากไปกว่านั้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจะเกิดการสลายตัวของสารประกอบไนโตรเจน จึงทำให้มีปริมาณธาตุของไนโตรเจนลดลงจากร้อยละ 0.92 เป็น 0.73 โดยมวล [38]

ในส่วนของการศึกษาการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะเลือกตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (BB700) ต่อจากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วทำการตัดแปรพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักของตัวดูดซับต่อน้ำหนักของกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณธาตุคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจนจากร้อยละ 70.51 68.49 และ 57.38 โดยมวลสำหรับตัวดูดซับ 1:0.5TEPA30 1:1TEPA30 และ 1:2TEPA30 ตามลำดับ เนื่องจากกรดฟอสฟอริกสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณธาตุคาร์บอน ส่วนเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกโดยมีค่า 18.31 19.92 และ 30.96 สำหรับตัวดูดซับ 1:0.5TEPA30 1:1TEPA30 และ 1:2TEPA30 ตามลำดับเนื่องจากเมื่อเกิดการออกซิเดชันที่มากขึ้นส่งผลให้มีหมู่ออกซิเจนเกาะที่พื้นผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์การดูดซับคายซับของไนโตรเจนจะเห็นว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าลดลงคาดว่าเป็นหมู่ฟอสเฟตหรือพอลิฟอสเฟตเหล่านี้ปิดกั้นรูพรุน จะเห็นว่าการกระตุ้นในเฟสก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์) กับเฟสของเหลว (กรดฟอสฟอริก) การกระตุ้นในเฟสก๊าซจะใช้อุณหภูมิสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนในเฟสของเหลวจะใช้อุณหภูมิต่ำในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำกว่า [37] เมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักของตัวดูดซับต่อน้ำหนักของกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณธาตุไนโตรเจนสูงขึ้นตามลำดับ โดยจะมีค่าร้อยละ 7.66 7.93 และ 8.17 โดยมวล สำหรับตัวดูดซับ 1:0.5TEPA30 1:1TEPA30 และ 1:2TEPA30 ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับ/คายซับด้วยไนโตรเจน เนื่องจากเตตระเอทิลีนเพนทามีนสามารถเติมลงในรูพรุนขนาดเมโสและมาโครได้ กล่าวคือ การมีปริมาณรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมาก เปรียบเสมือนมีพื้นที่ให้เตตระเอทิลีนเพนทามีนเกาะบนตัวดูดซับได้มากขึ้น ในส่วนของการเพิ่มร้อยละการตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 20 30 และ 40 พบว่ามีปริมาณธาตุไนโตรเจนสูงขึ้น โดยมีค่าปริมาณไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 6.10 8.87 และ 11.40 โดยมวลตามลำดับ เนื่องจากในโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนอิมินมีไนโตรเจนอยู่ในโครงสร้างเมื่อเพิ่มปริมาณการตัดแปรจึงทำให้ตัวดูดซับมีปริมาณธาตุไนโตรเจนสูงขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณคาร์บอนของตัวดูดซับ 1:1PEI30 และ 1:1PEI40 จะมีปริมาณธาตุคาร์บอนร้อยละ 63.65 และ 66.26 โดยมวลตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณธาตุคาร์บอนสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ

การตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนอิมิน เนื่องจากในโครงสร้างของพอลิเอทิลีนอิมินก็มีปริมาณธาตุคาร์บอนสูงเช่นเดียวกัน

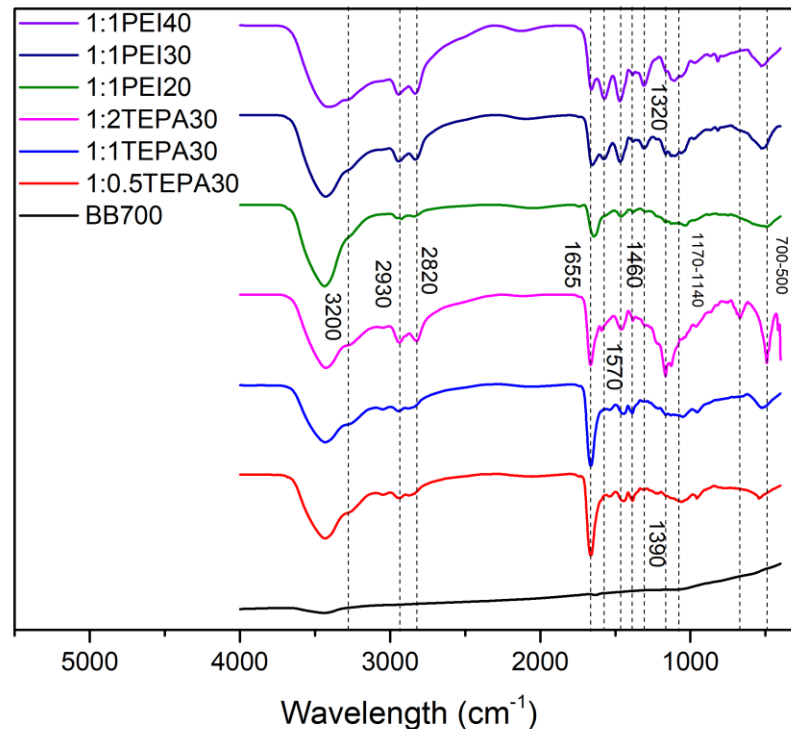
4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของตัวดูดซับ BB BB600 BB700 และ BB800 พบพีกที่ปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 3430 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่ความคลื่น 1670 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O stretching) ที่ความยาวคลื่น 1630-1580 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะ C=C ที่ความยาวคลื่น 1110 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ C-O และที่ความยาวคลื่น 875-800 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงพันธะ C-H



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ BB กับตัวดูดซับ BB600 พบว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ความเข้มของพีคที่แสดงหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นจาก 1670 ถึง 800 เซนติเมตร⁻¹ มีความเข้มลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะเกิดการสลายตัวของสารระเหยที่อยู่บนตัวดูดซับซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบขั้นสูงแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลงซึ่งเป็นผลสอดคล้องทำให้มีปริมาณรุกรุนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารระเหยเหล่านี้ จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับ BB600 กับตัวดูดซับ BB700 พบว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทำให้มีความเข้มของพีคที่ความยาวคลื่น 1110 เซนติเมตร⁻¹ มีความเข้มลดลง (แสดงถึงพันธะ C-O) และที่ความยาวคลื่น 875-800 เซนติเมตร⁻¹ มีความเข้มลดลง (แสดงถึงพันธะ C-H) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเกิดการสลายตัวของพันธะ C-O และ C-H [38] สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบขั้นสูงซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีร้อยละไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงร้อยละ 6 และ 0.4 โดยมวลตามลำดับ จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับ BB700 กับตัวดูดซับ BB800 จะเห็นว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะทำให้ความเข้มของพีคที่ความยาวคลื่น 1110 เซนติเมตร⁻¹ (แสดงถึงพันธะ C-O ในกรดแอลกอฮอล์ ฟีนอล อีเทอร์หรือเอสเทอร์ [39]) มีความเข้มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับพื้นผิวของตัวดูดซับ [38] สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบขั้นสูงจะเห็นว่ามีร้อยละของออกซิเจนสูงขึ้น



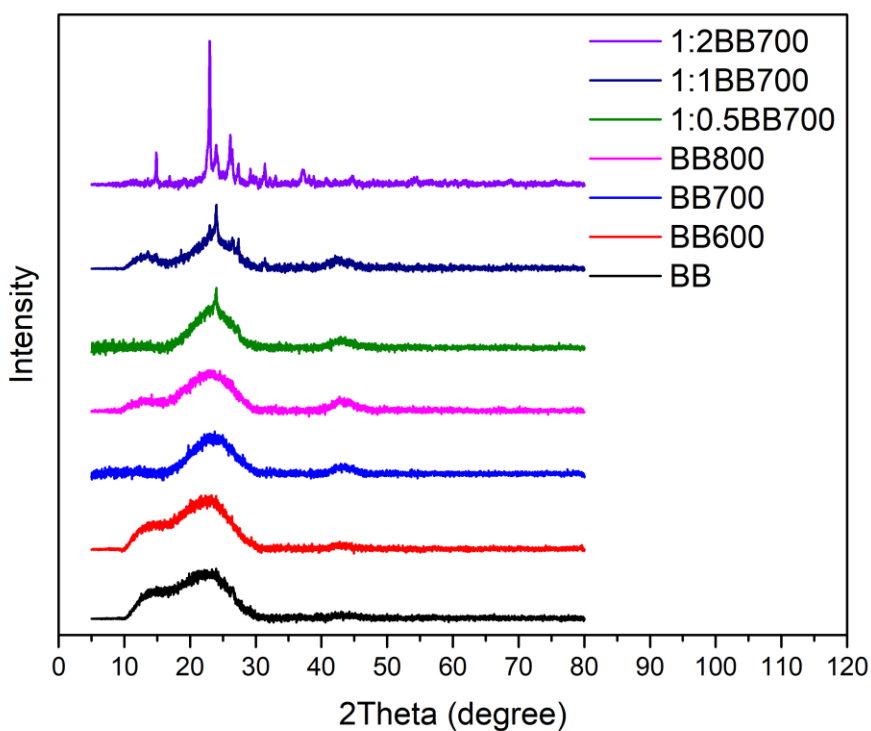
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอสฟอริกที่สัดส่วนโดยมวลต่างๆ แล้วทำการตัดแปรรูปผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมิน

จากรูป 4.3 แสดงสเปกตรัมของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วทำการตัดแปรรูปผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมิน โดยพบว่ามีพีคที่เกิดขึ้นของตัวดูดซับทั้งหมดดังนี้ ที่ความยาวคลื่น 3400 เซนติเมตร⁻¹แสดงถึงการสั่นแบบยืดหมู่ไฮดรอกซิล (O-H group) ของหมู่คาร์บอนิล ฟีนอล แอลกอฮอล์และน้ำที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับ ที่ความยาวคลื่น 3200 เซนติเมตร⁻¹แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ N-H ของหมู่ R-N-H (secondary amine) [40] ที่ความยาวคลื่น 2930 เซนติเมตร⁻¹และ 2820 เซนติเมตร⁻¹แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ -CH₂ ที่ความยาวคลื่น 1655 เซนติเมตร⁻¹แสดงถึงหมู่การสั่นแบบยืดพันธะ C=C ที่ความยาวคลื่น 1570 เซนติเมตร⁻¹แสดงถึงการงอแบบสมมาตรของหมู่ -NH₂ ที่ความยาวคลื่น 1460 เซนติเมตร⁻¹แสดงถึงการงอแบบไม่สมมาตรของ -NH₂ [41] และ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1170 เซนติเมตร⁻¹แสดงถึงการสั่นของพันธะไฮโดรเจนของหมู่ P=O ในโครงสร้างฟอสเฟตหรือพอลิฟอสเฟตและการสั่นของพันธะ O-C ในโครงสร้าง P-O-C และ P=OOH

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของตัวดูดซับ BB700 กับตัวดูดซับ 1:0.5TEPA30 จะเห็นว่ามีความเข้มข้นของพีคสูงขึ้นไปกว่าความยาวคลื่น 3200 2930 2820 และ 1655 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากการตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนทำให้มีความเข้มข้นของพีคเหล่านี้สูงขึ้น เมื่อพิจารณาตัวดูดซับ 1:0.5TEPA30 1:1TEPA30 และ 1:2TEPA30 พบว่ามีความเข้มข้นของพีคในช่วงความยาวคลื่น ประมาณ 1170 เซนติเมตร⁻¹ สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั่นหมายถึงที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีหมู่ฟังก์ชัน ฟอสเฟตหรือโพลิฟอสเฟตมากขึ้น [39, 42] สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบชั้นสูงซึ่งมี ร้อยละออกซิเจนสูงขึ้นไปอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบตัวดูดซับ 1:1TEPA30 และ 1:1PEI30 จะเห็นว่า ตัวดูดซับ 1:1PEI30 จะมีความเข้มข้นของพีคช่วง 1570 และ 1460 เซนติเมตร⁻¹ สูงกว่าตัวดูดซับ 1:1TEPA30 ซึ่งแสดงถึงหมู่ -NH₂ คาดว่าเนื่องจากในโครงสร้างทางเคมีของโพลิเอทิลีนอิมินมี primary amine จำนวนมากกว่าเตตระเอทิลีนเพนทามีน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ 1:1PEI20 1:1PEI30 และ 1:1PEI40 จะเห็นว่าที่ความยาวคลื่น 3200 2930 2820 1570 และ 1480 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากมีโพลิเอทิลีนอิมินเกาะอยู่บนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะและความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าตัวดูดซับ BB เกิดการเลี้ยวเบนที่ 2theta ที่ประมาณ 15° 22.5° และ 43° เป็นระนาบ (110) (002) และ(100) ตามลำดับ [43, 44] ซึ่งระนาบเหล่านี้เป็นระนาบของ Cellulose I โดยที่ 2theta = 22.5° เป็นโครงสร้าง polysaccharide ที่มีอยู่ในผนังเซลล์ซึ่งเป็น semi crystalline biopolymer ในธรรมชาติ [45] เมื่อทำการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ BB แต่เมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียสหรือตัวดูดซับ BB700 และ BB800 จะเห็นว่าที่ 2Theta เท่ากับ 15° ซึ่งแสดงถึงระนาบ (110) มีความเข้มข้นของพีคลดลง เนื่องจากการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้ระนาบ (110) เกิดจุดบกพร่อง (defect) จากนั้นเมื่อนำตัวดูดซับ BB700 มาทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จะพบว่ามีความเข้มข้นของพีคบางส่วนสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาการเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกเป็น 1 ต่อ 1 หรือ 1 ต่อ 2 จะพบว่าความเข้มข้นของพีคที่ 2Theta เท่ากับ 15° 22.5° และ 43° มีความเข้มข้นลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดฟอสฟอริกกับคาร์บอนที่พื้นผิวตัวดูดซับก่อให้เกิดการทำลายระนาบ (110) (002) และ (100) อีกทั้งมีความเข้มข้นของพีคเกิดขึ้นที่ 2Theta เท่ากับ 21° และ 31° คาดว่าเป็นผลึกของฟอสเฟตและฟอสเฟตไฮเดรตที่เกิดขึ้นในกระบวนการ [46, 47] ซึ่งจะเห็นได้ชัดในตัวอย่าง 1:2BB700

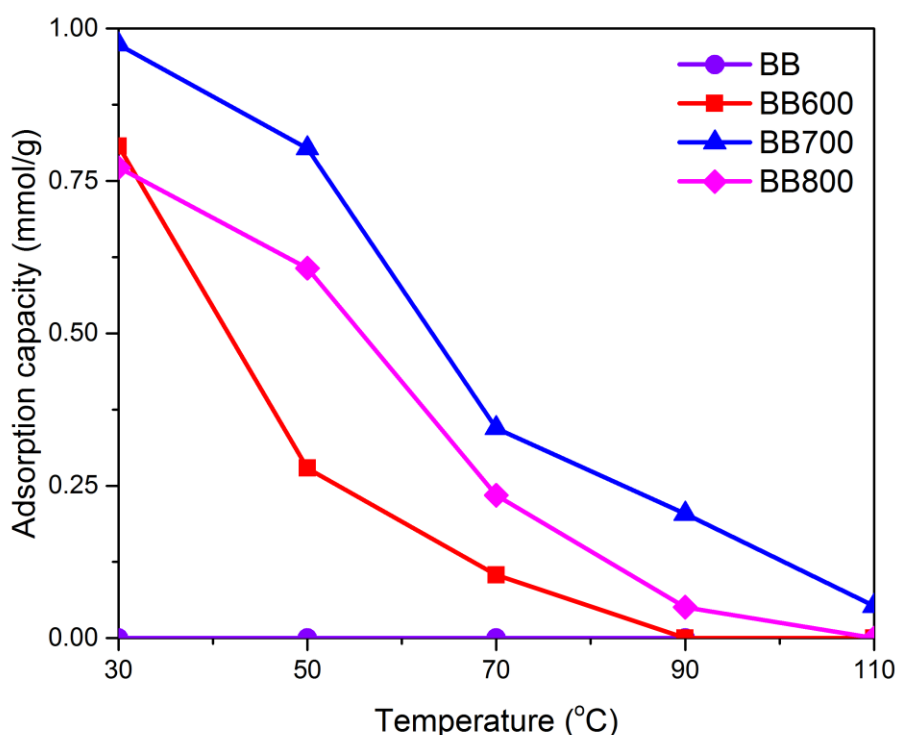


รูปที่ 4.4 รูปแบบรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับที่ผ่านกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนต่างๆ

4.2. ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.1. อุณหภูมิการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาผลของอุณหภูมิการกระตุ้นคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสก๊าซเข้าเท่ากับร้อยละ 30 โดยปริมาตรในฮีเลียม อัตราการป้อนก๊าซเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



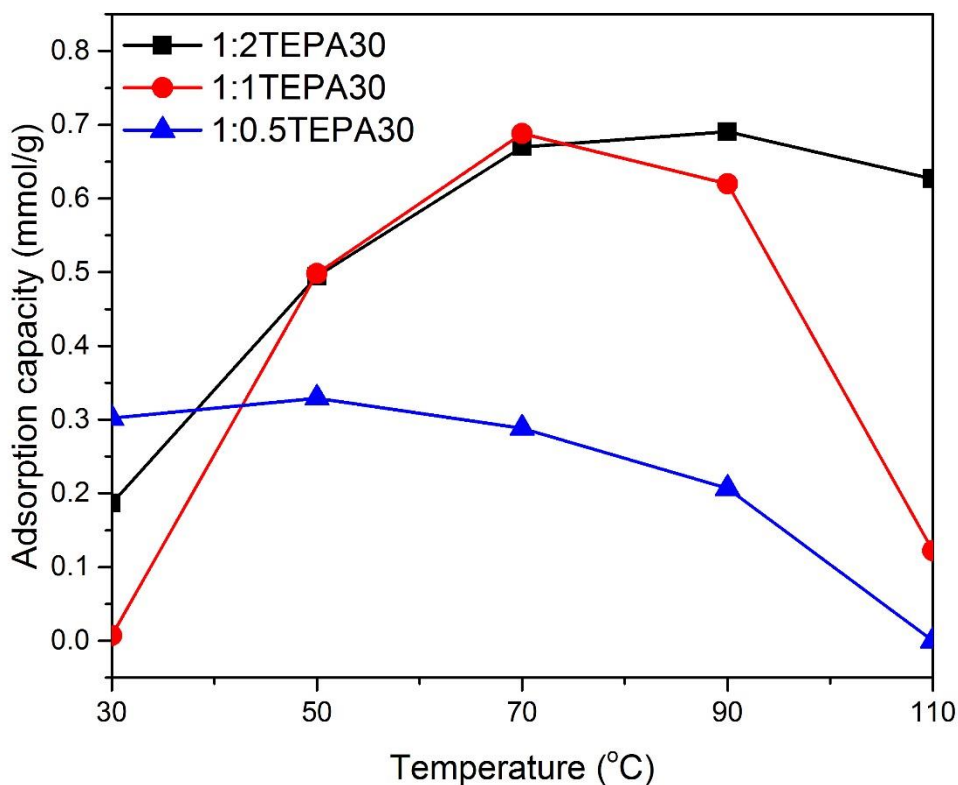
รูปที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ไม่ผ่านและผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (BB BB600 BB700 และ BB800) เมื่ออุณหภูมิการดูดซับอยู่ในช่วง 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส

จากการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับต่างๆ มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ จาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 110 องศาเซลเซียส จากพฤติกรรมการดูดซับนี้ทำให้ทราบว่า กระบวนการดูดซับบนตัวดูดซับเหล่านี้เป็นแบบคายพลังงาน จากการสังเกตความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ BB พบว่าตัวดูดซับ BB ไม่ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ คือ BB700 BB600 และ BB800 และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ณ อุณหภูมิการดูดซับที่ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.99 0.80 และ 0.77 มิลลิโมลต่อกรัม เนื่องจากตัวดูดซับ BB700 มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับ BB600 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า แต่เมื่อทำการกระตุ้นตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 800

องศาเซลเซียส (BB800) จะทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลงแต่สูงกว่าค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ BB600 ในเกือบทุกช่วงอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าตัวดูดซับ BB800 จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุดแต่เนื่องจากขณะที่ทำการกระตุ้นตัวดูดซับ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนเกิดขึ้น เช่น ฟีนอลิก [37] ดังแสดงในผล FTIR ที่กล่าวมาแล้ว อีกทั้งในช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 800 องศาเซลเซียส) จะเกิดการสลายตัวของสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบสอ่อนซึ่งส่งผลพื้นผิวของตัวดูดซับมีความเป็นกรดสูงกว่า BB700 ซึ่งแสดงดังในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า ปริมาณธาตุออกซิเจนสูงขึ้นและมีปริมาณธาตุไนโตรเจนลดลง จากผลการทดลองนี้จึงกล่าวได้ว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (textural properties) และพื้นผิวทางเคมี (surface chemistry) [48] ตัวดูดซับ BB700 ซึ่งให้ค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดจึงถูกเลือกเพื่อทำการศึกษาในขั้นตอนอื่นต่อไป

4.2.2. อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก

การศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยเลือกใช้ตัวดูดซับ BB700 เนื่องจากมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าและมีปริมาณรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมากกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนแล้วนำไปตัดแปรพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนที่ร้อยละ 30 โดยมวล ในการทดสอบการดูดซับนั้นจะใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรในฮีเลียม อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที โดยอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการศึกษาคือ 1:0.5 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6



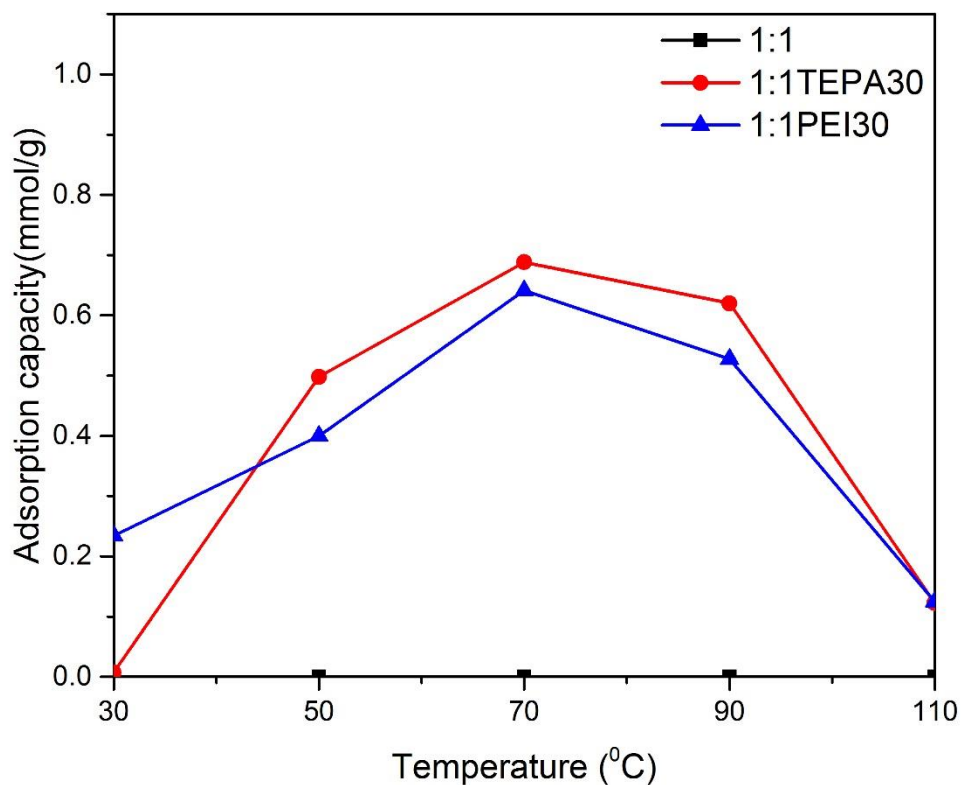
รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ 1:0.5TEPA30 ตัวดูดซับ 1:1TEPA30 และตัวดูดซับ 1:2TEPA30 ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส

เมื่อนำตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์แล้วนำไปตัดแปรพื้นผิวด้วยเอมีน พบว่า ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับส่วนใหญ่จะมีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งเอมีนจะไม่สามารถถูกเติมลงไป ในรูพรุนได้ จึงไม่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ฉะนั้นต้องทำการขยายขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ด้วยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จากรูปที่ 4.6 แสดงความสามารถในการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:0.5TEPA30 ตัวดูดซับ 1:1TEPA30 และตัวดูดซับ 1:2TEPA30 ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส พบว่าตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกแสดงพฤติกรรมดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่างจากตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 30 องศาเซลเซียส สู่ 110 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกทุกตัวจะมีความสามารถ ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงจุดสูงสุดแล้วก็ตกลง ตัวดูดซับที่ให้ค่าความสามารถใน

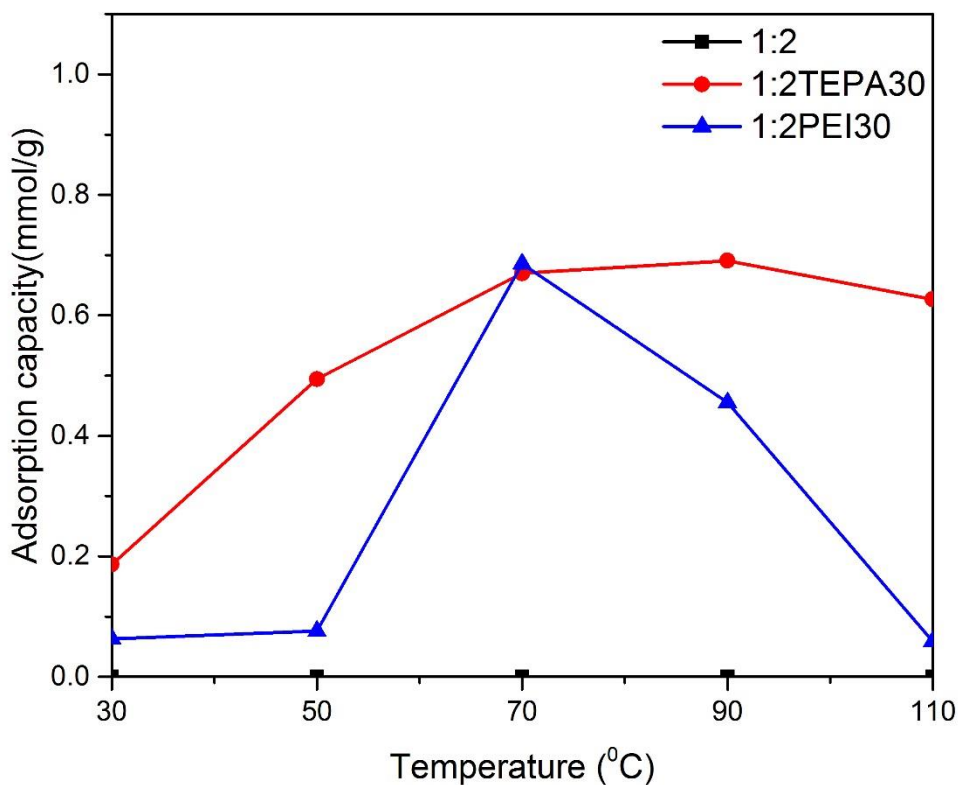
การดูดซับสูงสุดคือ ตัวดูดซับ 1:2TEPA30 มีค่าการดูดซับสูงสุดประมาณ 0.70 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะทำให้ตัวดูดซับมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น จึงทำให้เอมีนสามารถเกาะในรูพรุนของตัวดูดซับได้ดีขึ้น จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกนั้นจะทำให้ตัวดูดซับมีรูพรุนเฉลี่ยสูงขึ้น อีกทั้งมีปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมากถึง 0.0030 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 50 ของปริมาตรรูพรุนรวม แต่เมื่อทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วน 1:0.5 (1:0.5TEPA30) พบว่า ปริมาณการดูดซับมีค่าต่ำกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยต่ำกว่าการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนอื่นๆ จึงทำให้เอมีนส่วนใหญ่เกาะอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกซึ่งจะเกิดการดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ

4.2.3. ชนิดของเอมีน

การศึกษาผลของชนิดเอมีนต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยเลือกใช้เอมีนสองชนิดคือ เตตระเอทิลีนเพนทามีนและพอลิเอทิลีนอิมิน เนื่องจากเอมีนสองชนิดนี้มีโมเลกุลขนาดใหญ่จึงมีจุดเดือดสูงกว่าเอมีนตัวที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น โมโนเอทานอลามีน ส่วนของตัวดูดซับจะเลือกตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 1 และตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 จากนั้นทำการดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 30 โดยมวล ส่วนในภาวะที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับนั้นจะใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรในฮีเลียม อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงผลดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



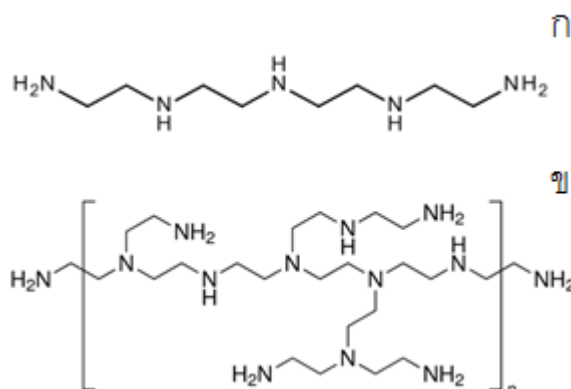
รูปที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 1 (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1:1) แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ 1:1TEPA30 และ 1:1PEI30



รูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1:2) แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ 1:2TEPA30 และ 1:2PEI30 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าตัวดูดซับ 1:1 และตัวดูดซับ 1:2 ไม่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกช่วงอุณหภูมิ เมื่อนำตัวดูดซับไปดัดแปรพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนหรือพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 30 โดยมวล พบว่าตัวดูดซับที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนจะให้ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าการดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนอิมิน ทั้งช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนอิมินดังรูปที่ 4.9 มีความกะทัดรัดมากกว่าจึงทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปจับกับบริเวณวงวอว (active site) ได้ยากหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีความต้านทานการแพร่สูงกว่า (Diffusion resistance) อีกทั้งเตตระเอทิลีนเพนทามีนมีความหนืดน้อยกว่าพอลิเอทิลีนอิมิน

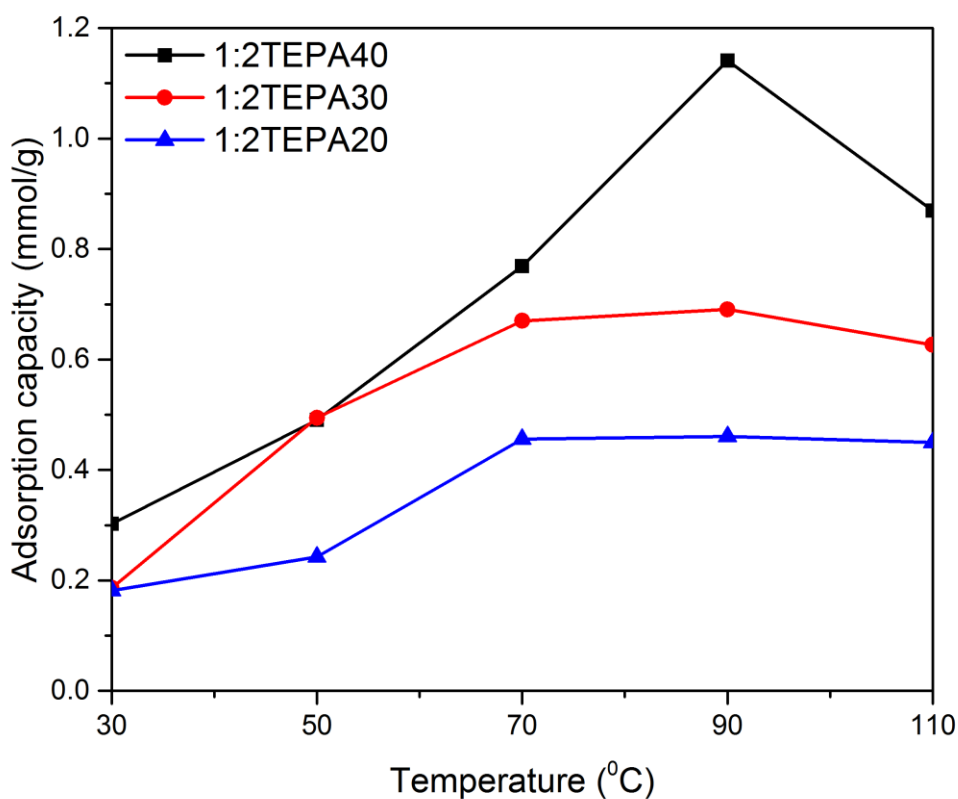
จึงทำให้มีการกระจายตัวของเอมีนได้ดีกว่าและทำให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนอิมินที่มีความหนืดค่อนข้างสูง [49]



รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางเคมีของ ก.เตตระเอทิลีนเพนทามีนและ ข.พอลิเอทิลีนอิมิน

4.2.4. ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนทามีน

การศึกษาผลของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนทามีนต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราน้ำหนักรีดตัวดูดซับต่ออัตราน้ำหนักรีดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 แล้วนำไปตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนโดยช่วงที่ศึกษาคือ ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยมวล ภาวะที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับนั้นจะใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรในฮีเลียม อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงผลดังรูปที่ 4.10



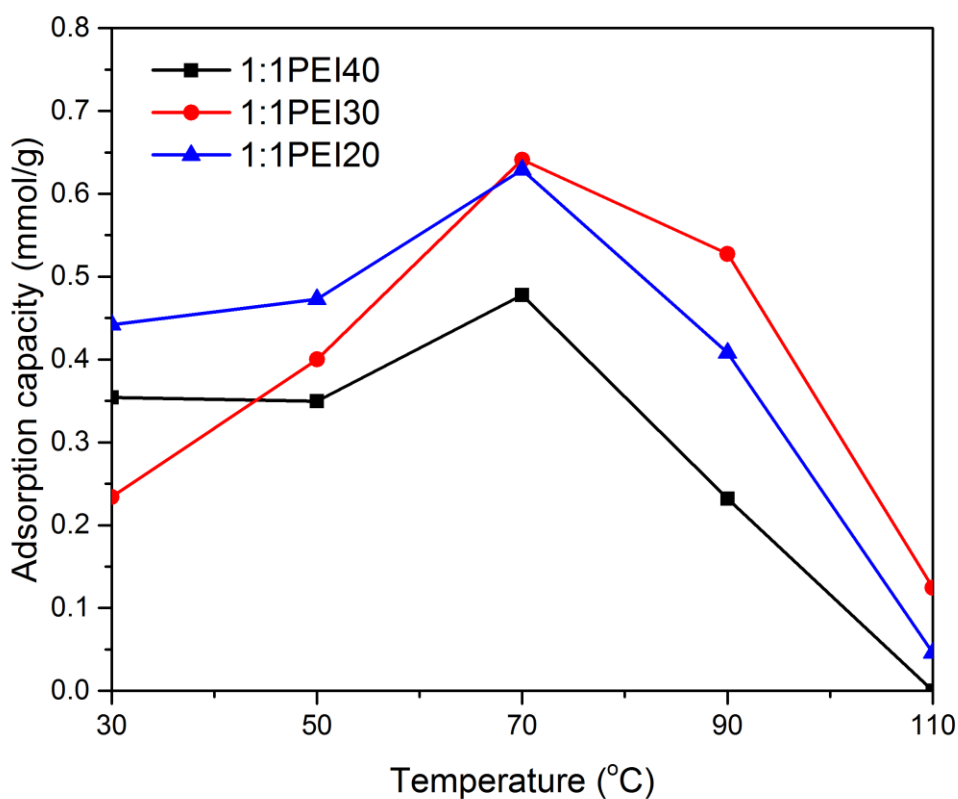
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจากนั้นกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 แล้วนำไปดัดแปรพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนร้อยละ 20 ถึง 40 โดยมวล แทนด้วยสัญลักษณ์ 1:2TEPA20 1:2TEPA30 และ 1:2TEPA40 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจากนั้นกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 แล้วนำไปดัดแปรพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนที่ร้อยละโดยมวลต่างๆ พบว่าการเพิ่มปริมาณร้อยละเตตระเอทิลีนเพนทามีน 20 ถึง 40 โดยมวล ทำให้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นจาก 0.46 เป็น 1.14 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิการดูดซับ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับเนื่องจากการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนทามีนมากขึ้นทำให้มีบริเวณว่าง (active site) มากขึ้นจึงทำให้โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับเอมีนได้มากขึ้นและพบว่าที่อุณหภูมิการดูดซับที่ 90 องศาเซลเซียสจะให้ค่าการดูดซับสูงที่สุดแต่

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับถึง 110 องศาเซลเซียสจะทำให้ความสามารถในการดูดซับต่ำลงจาก 1.14 เป็น 0.90 มิลลิโมลต่อกรัม การเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจะมีอิทธิพลต่อการดูดซับดังนี้ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับที่เป็นแบบกายภาพและเคมีมีค่าลดลงเนื่องจากธรรมชาติของการดูดซับเป็นแบบคายพลังงาน แต่ในทางตรงข้ามจลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ การเคลื่อนไหวโมเลกุลเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะผลักดันปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นและทำให้การแพร่ของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับจะเกิดขึ้นได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ [9]

4.2.5. ปริมาณพอลิเอทิลีนอิมิน

การศึกษาผลของปริมาณพอลิเอทิลีนเพนทาไมด์ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อกรด 1 ต่อ 1 แล้วนำไปตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนอิมินโดยช่วงที่ศึกษาคือร้อยละ 20 ถึง 40 โดยมวล ภาวะที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับนั้นจะใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรในฮีเลียม อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงผลดังรูปที่ 4.11



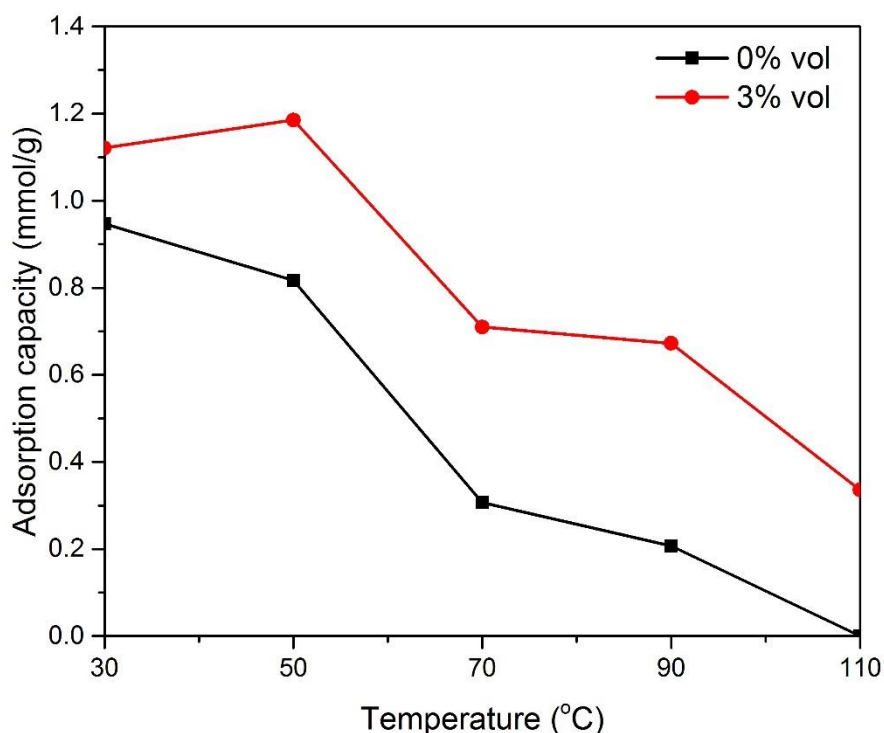
รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจากนั้นกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 1 แล้วนำไปดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 20 ถึง 40 โดยมวล แพนสัญลักษณ์ 1:1PEI20 1:1PEI30 และ 1:1PEI40 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจากนั้นกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 1 แล้วนำไปดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 20 ถึง 40 โดยมวลพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับในช่วง 30-70 องศาเซลเซียสจะทำให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเพราะว่าสายโซ่ของพอลิเอทิลีนอิมินมีความคล่องตัวได้ง่ายกว่า (more flexible) จึงทำให้บริเวณเร่ง (active site) กระจายและเปิดออก ทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าถึงบริเวณเร่งได้ดีกว่า [50] ในส่วนของศึกษาการเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนอิมิน การดัดแปรพื้นผิวด้วยพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 20 โดยมวล (1:1PEI20) มีปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาเซลเซียสเนื่องจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนอิมินมีความเกะกะ (steric hindrance)

ค่อนข้างสูง การเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนอิมินจึงไม่ได้ช่วยให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นแต่กลับทำให้เกิดความเกาะของสายโซ่มากกว่า แต่ในทางตรงข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 70 องศาเซลเซียสพบว่าการเติมพอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 30 โดยมวล (1:1PEI30) ให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการเติม พอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 20 โดยมวล (1:1PEI20) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียสทำให้คาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการแพร่สูงขึ้นจึงสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับตำแหน่งว่องไว (active site) ได้ดีกว่า ส่วนตัวดูดซับที่ทำการเติมพอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 40 โดยมวล (1:1PEI40) พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเนื่องจากการกระจายตัวของพอลิเอทิลีนอิมินไม่สม่ำเสมอในรูพรุนและปกคลุมอยู่ที่พื้นผิวนอกจึงมีความต้านทานการแพร่ (diffusion resistance) สูงขึ้น [51]

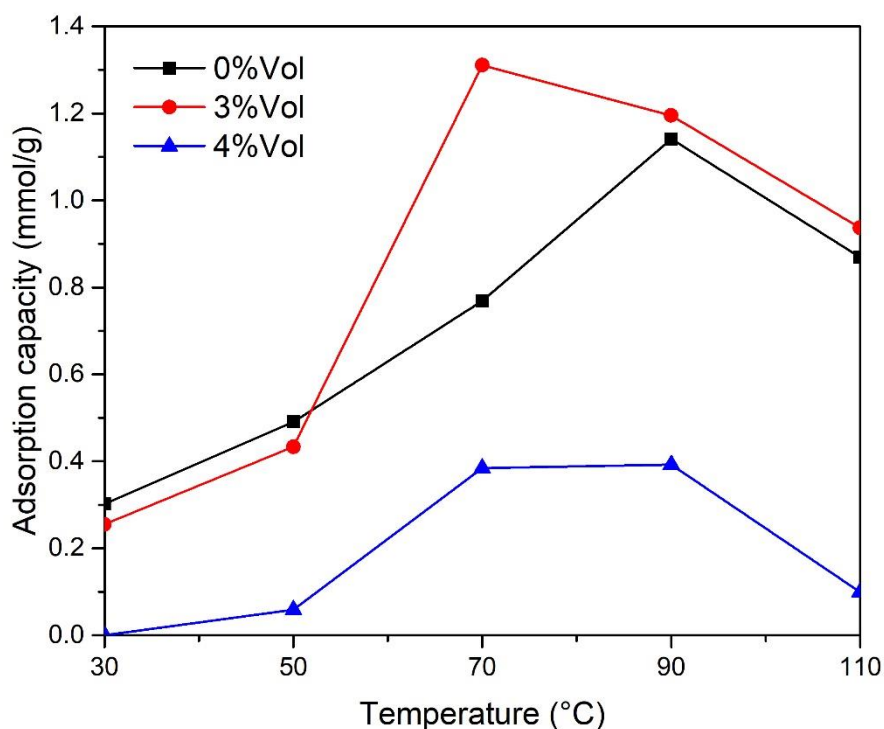
4.2.6. ความชื้นในก๊าซขาเข้า

การศึกษาผลของความชื้นในระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากในระบบการเผาไหม้ในอุตสาหกรรม มีความชื้นอยู่ในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมกับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโดยจะเลือกตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (BB700) และ ตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1 ต่อ 2 แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนร้อยละ 40 โดยมวล (1:2TEPA40) ภาวะที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับนั้นจะใช้ตัวดูดซับ 0.4 กรัม ใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรในฮีเลียม มีความชื้นร้อยละ 0.3 และ 4 โดยปริมาตร อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงผลดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสใน ภาวะที่ไม่มี ความชื้นและมีความชื้นใน ก๊าซขาเข้า เมื่ออุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส

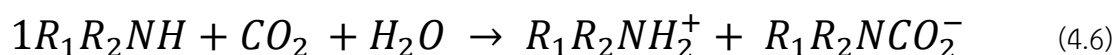
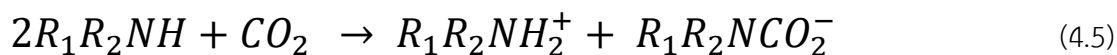
รูปที่ 4.12 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ BB700 และ มีความชื้นในก๊าซขาเข้า พบว่าการมีความชื้นทำให้การปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นใน ทุกช่วงอุณหภูมิโดยเพิ่มขึ้นสูงสุดเกือบ 4 เท่าที่อุณหภูมิการดูดซับ 90 องศาเซลเซียส เนื่องจาก หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของตัวดูดซับ BB700 เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน ดังแสดงในผลวิเคราะห์ หมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี โดยปกติแล้วการเกิด แรงอันตรกิริยาอ่อนๆ ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวดูดซับนั้นจะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของ ตัวดูดซับ กรณีที่การดูดซับเกิดผ่านพันธะของ C-H กับ O ของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะมี แรงอันตรกิริยาน้อยกว่าการเกิดการดูดซับผ่านพันธะของ O-H กับ O ของคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) มีค่าไม่เท่ากัน โดยปกติแล้วค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ของอะตอม O มีค่าสูงกว่าอะตอมของ C ซึ่งในกรณีที่มีความชื้นในระบบนั้น พื้นผิวของตัวดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนอยู่จึงทำให้น้ำสามารถทำพันธะไฮโดรเจนได้ที่พื้นผิว ของตัวดูดซับ ทำให้มีบริเวณที่คาร์บอนไดออกไซด์สามารถถูกดูดซับได้มากขึ้น [52]



รูปที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนที่ร้อยละ 40 โดยมวล ในภาวะที่ไม่มีควมชื้นและมีความชื้นในก๊าซขาเข้า เมื่ออุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการศึกษาผลของความชื้นขาเข้าของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริก 1 ต่อ 2 แล้วนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนทามีนร้อยละ 40 โดยมวล (1:2TEPA40) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อมีความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตรในก๊าซขาเข้า ทำให้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิการดูดซับที่ 70-110 องศาเซลเซียส ความชื้นจะไปสนับสนุนให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นไบคาร์บอเนต คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บาเมตไอออน [51] โดยปกติกลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีน้ำจะเข้าปฏิกิริยาหมู่เอมีน 1 กลุ่มจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล ซึ่งแสดงในสมการที่ 4.5 ซึ่งต่างจากภาวะที่ไม่มีควมชื้นหมู่เอมีน 2 หมู่จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุลแสดงดังในสมการที่ 4.6 [9, 53] เมื่อความชื้นใน

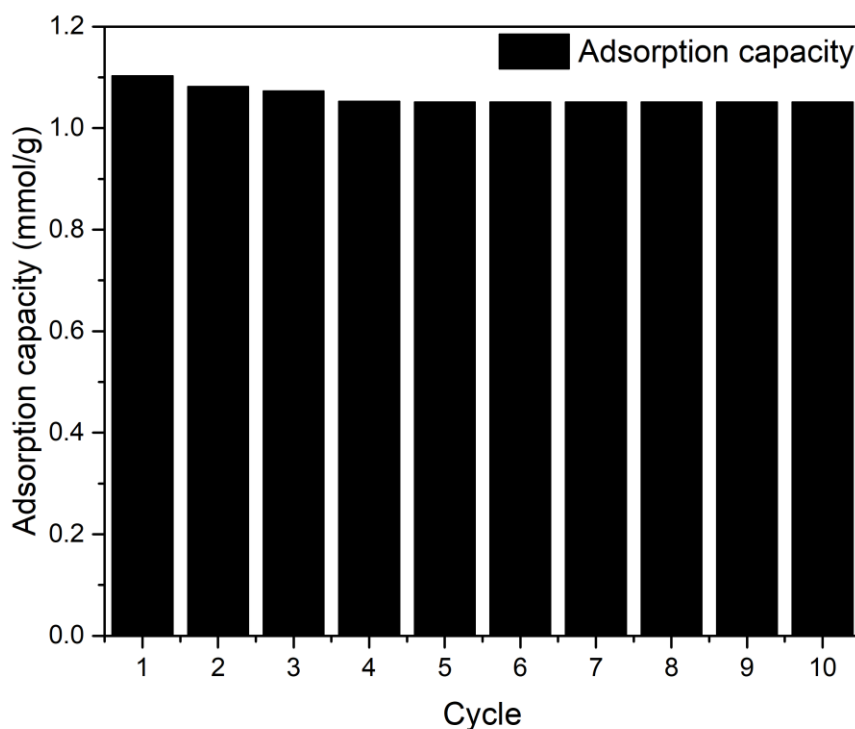
ระบบมากเกินไปจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำไปขัดขวางบริเวณเร่ง (blocking) คาร์บอนไดออกไซด์จึงแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณเร่งได้ยากขึ้นจึงแสดงให้เห็นเมื่อเราควบคุมความชื้นในระบบร้อยละ 4 โดยปริมาตร



เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการดูดซับสูงสุดพบว่า จากการทดลองในสภาวะที่ไม่มี ความชื้นอุณหภูมิ การดูดซับสูงสุดคือ 90 องศาเซลเซียสแต่ในสภาวะที่มีความชื้น อุณหภูมิการดูดซับสูงสุดคือ 70 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอุณหภูมิลดลงเมื่อมีความชื้นในระบบเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา การดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับหมู่เอมีนในกรณีที่มีความชื้นจะใช้พลังงานกระตุ้นในการ เกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าในสภาวะที่มีความชื้น [54]

4.3. การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ 1:2TEPA40

สำหรับการศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ 1:2TEPA40 ในการทดลองจะใช้ตัวดูดซับ 0.4 กรัม ภาวะที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับนั้นจะใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 90 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตรในฮีเลียม อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนภาวะที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะใช้ฮีเลียมที่อัตราการไหลเท่ากับ 30 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14

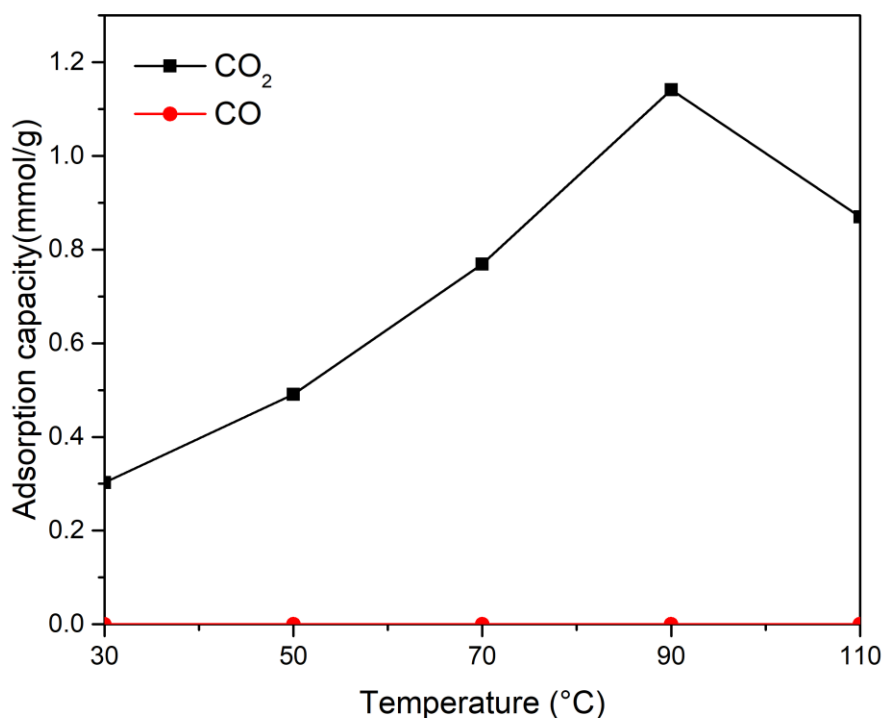


รูปที่ 4.14 ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40

จากรูปที่ 4.14 พบว่าหลังจากการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในรอบที่ 10 จะเห็นว่ามีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงประมาณร้อยละ 1.82 จาก 1.10 มิลลิโมลต่อกรัมเหลือ 1.08 มิลลิโมลต่อกรัม จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับนี้สามารถดูดซับได้หลายวัฏจักรการดูดซับโดยที่ความสามารถในการดูดซับยังคงเดิมจึงทำให้มีโอกาสสามารถนำไปใช้งานต่อไป

4.4 การเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40

การศึกษาสมบัติการเลือกดูดซับในภาวะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตรและคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 1 โดยปริมาตรในบรรยากาศของฮีเลียม อัตราการไหลเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้อุณหภูมิการดูดซับ 90 องศาเซลเซียส บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40 จำนวน 0.6 กรัม แสดงผลดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การเลือกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อก๊าซเข้าประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์กับคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่ออุณหภูมิการดูดซับที่ 90 องศาเซลเซียส

เนื่องจากก๊าซที่ผ่านจากกระบวนการเผาไหม้ด้วยฟอสซิลหรือแก๊สธรรมชาติ (post combustion gas) นั้นจะมีองค์ประกอบของแก๊สผสมหลายชนิดซึ่งส่วนหนึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แล้วเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์จำนวนหนึ่ง (ประมาณ 5-300 ppm) [5] จากการศึกษาการเลือกดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าคาร์บอนมอนอกไซด์จะไม่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เนื่องจากโดยปกติแล้วโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเป็นออกไซด์ที่เป็นกลาง (neutral oxides) ส่วนโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเป็นออกไซด์ที่เป็นกรด (acid oxides) คาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบสอ่อนได้ เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คงเดิมที่ 1.10 มิลลิโมลต่อกรัม

4.5 การศึกษาจลพลศาสตร์ของตัวดูดซับ

การศึกษาแบบจำลองของการดูดซับเพื่อศึกษากลไกการเข้าทำกับปฏิกิริยาของตัวดูดซับกับตำแหน่งว่างไว้ได้ ในงานวิจัยนี้ทำการเลือกสมการจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) ซึ่งแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมนั้นอธิบายการเข้าทำปฏิกิริยาของตัวดูดซับกับตำแหน่งว่างไว้แบบ 1 ต่อ 1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมนั้นอธิบายถึงการเข้าทำปฏิกิริยาของตัวดูดซับกับบริเวณเร่งแบบ 1 ต่อ 2 ทั้งสองแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สด้วย จากนั้นนำค่าคงที่ของปฏิกิริยามาศึกษาด้วยสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น



ตารางที่ 4.3 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของตัวดูดซับ BB700 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า

แบบจำลอง จลนพลศาสตร์	พารามิเตอร์	อุณหภูมิในการดูดซับ(องศาเซลเซียส)				
		30	50	70	90	110
แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่งเทียม (Pseudo first order)	$q_e(\text{exp})$ มิลลิ โมลต่อกรัม	0.97448	0.80594	0.34437	0.20657	0.05336
	$q_e(\text{cal})$ มิลลิ โมลต่อกรัม	1.07638	0.85417	0.37349	0.22264	0.06135
	k_1	0.11502	0.13287	0.14191	0.16291	0.18981
	R^2	0.99198	0.99448	0.99646	0.99718	0.99558
	MPSD	0.044	0.034	0.015	0.014	0.009
แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ สองเทียม (Pseudo second order)	$q_e(\text{exp})$ มิลลิ โมลต่อกรัม	0.97448	0.80594	0.34437	0.20657	0.05336
	$q_e(\text{cal})$ มิลลิ โมลต่อกรัม	1.48472	1.12421	0.50646	0.31207	0.08741
	k_2	0.06382	0.10706	0.17657	0.29218	1.69357
	R^2	0.98325	0.98358	0.98921	0.99166	0.99154
	MPSD	0.059	0.051	0.026	0.020	0.010

ตารางที่ 4.4 แบบจำลองจลพลศาสตร์ของตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า

แบบจำลอง จลพลศาสตร์	พารามิเตอร์	อุณหภูมิในการดูดซับ(องศาเซลเซียส)				
		30	50	70	90	110
แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่งเทียม (Pseudo first order)	$q_e(\text{exp})$ มิลลิ โมลต่อกรัม $q_e(\text{cal})$ มิลลิโมล ต่อกรัม k_1 R^2 MPSD	0.29168 0.31089 0.09708 0.99717 0.013	0.47911 0.50372 0.10708 0.99915 0.016	0.76925 0.82789 0.10921 0.99056 0.042	1.12286 1.17395 0.11719 0.99403 0.041	0.85585 0.89733 0.12224 0.99036 0.044
แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ สองเทียม (Pseudo second order)	$q_e(\text{exp})$ มิลลิ โมลต่อกรัม $q_e(\text{cal})$ มิลลิโมล ต่อกรัม k_2 R^2 MPSD	0.29168 0.41052 0.21363 0.9898 0.024	0.47911 0.66074 0.14893 0.9947 0.025	0.76925 1.10635 0.08641 0.97843 0.062	1.12286 1.51421 0.07315 0.98076 0.068	0.85585 1.15547 0.10014 0.9742 0.068

ตารางที่ 4.5 แบบจำลองจลพลศาสตร์ของตัวดูดซับ 1:2TEPA40 มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้าร้อยละ 3 โดยปริมาตร

แบบจำลอง จลพลศาสตร์	พารามิเตอร์	อุณหภูมิในการดูดซับ(องศาเซลเซียส)				
		30	50	70	90	110
แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่งเทียม (Pseudo first order)	$q_e(\text{exp})$ มิลลิ โมลต่อกรัม $q_e(\text{cal})$ มิลลิ โมลต่อกรัม k_1 R^2 MPSD	0.24958 0.25774 0.13837 0.99329 0.019	0.42705 0.44434 0.12681 0.99201 0.028	1.29021 1.34582 0.12609 0.99427 0.042	1.17631 1.22328 0.12023 0.99314 0.046	0.92196 0.95327 0.11941 0.99675 0.030
แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ สองเทียม (Pseudo second order)	$q_e(\text{exp})$ มิลลิ โมลต่อกรัม $q_e(\text{cal})$ มิลลิ โมลต่อกรัม k_2 R^2 MPSD	0.24958 0.32232 0.43587 0.9753 0.033	0.42705 0.5668 0.21675 0.97589 0.043	1.29021 1.72085 0.0707 0.98011 0.068	1.17631 1.55768 0.08005 0.97767 0.074	0.92196 1.22813 0.09239 0.98656 0.051

จากข้อมูลการทดลองที่สามารถเข้ากับแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารตั้งต้นคาร์บอนไดออกไซด์มีมากกว่าบริเวณดูดซับ จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลศาสตร์ของปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ BB700 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซเข้า พบว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมสามารถใช้ทำนายปฏิกิริยาการดูดซับบนบริเวณว่างไวของตัวดูดซับ BB700 ได้เหมาะสมกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า อีกทั้งยังมีค่า MPSD น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาค่า k_1 ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบพบว่า k_1 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1150 เป็น 0.1889 วินาที⁻¹ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 30 ถึง 110 องศาเซลเซียสเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับโดยรวมเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง โดยปกติแล้วกลไกการเกิดการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการของโมเลกุลทั้งสองโดยการชนกันต้องชนกัน ถูกทิศทาง มีพลังงานมากพอ และความถี่ในการชน [55] การเพิ่มอุณหภูมิเปรียบเหมือนการเพิ่มพลังงานในระบบทำให้โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์มีโอกาสที่จะไปชนแล้วเกิดการดูดซับได้เร็วขึ้น

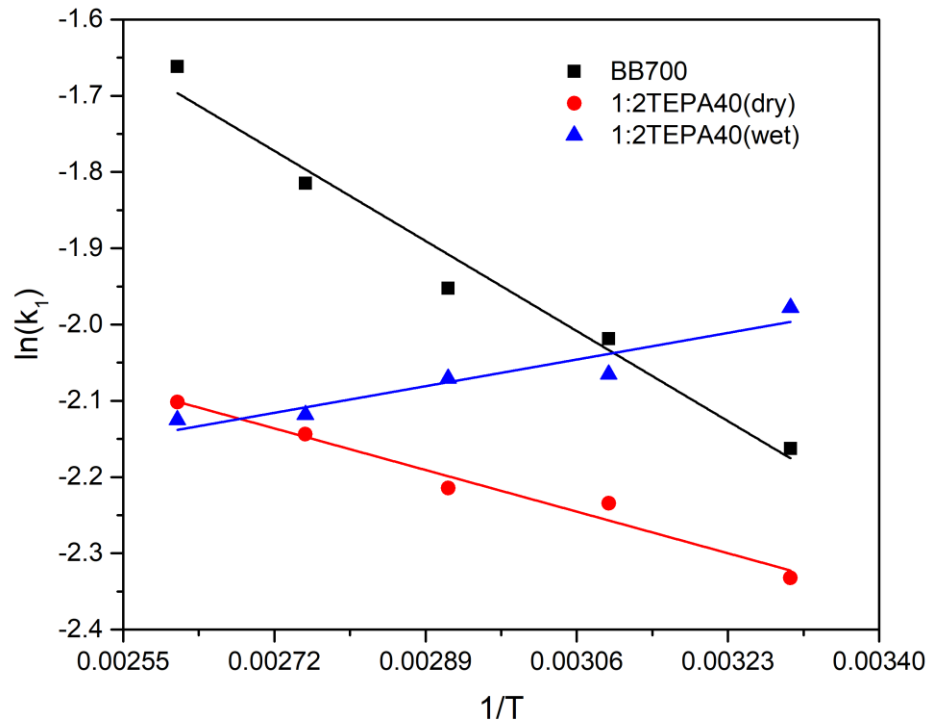
จากผลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซเข้า ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมทำนายการดูดซับได้เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 1 อีกทั้งมี MPSD น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาค่า k_1 ของปฏิกิริยาจะเห็นว่าค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิการดูดซับจาก 0.0971 ถึง 0.1222 วินาที⁻¹ จะเห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับจะทำให้โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์มีพลังงานสูงขึ้นและมีความถี่ในการชนสูงขึ้น โดยตามทฤษฎีการชนทำให้มีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยากับเอมีนได้เร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วของการดูดซับเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ

การศึกษาผลศาสตร์ของตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อมีความชื้นในกระแสก๊าซเข้า ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าการแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมสามารถอธิบายกลไกการดูดซับได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 1 อีกทั้งมี MPSD น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ เมื่อพิจารณาค่า k_1 มีค่าเท่ากับ 0.1338 0.1268 0.1261 0.1202 และ 0.1194 วินาที⁻¹ ที่อุณหภูมิ 30 50 70 90 และ 110 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าอัตราเร็วการดูดซับมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ คาดว่าเป็นผลมาจากโมเลกุลของน้ำซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับโมเลกุลของน้ำจึงมีการเคลื่อนไหวเร็วกว่า และสามารถเข้าถึงบริเวณว่างไวบนตัวดูดซับได้มากกว่าโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ มีโอกาสที่จะไปขัดขวางการเกิดการดูดซับจึงทำให้อัตราเร็วการดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าลง

เมื่อศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นโดยใช้สมการของอาร์เรเนียส และใช้อัตราเร็วที่ได้จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายกลไกการดูดซับได้ดีที่สุดในขั้นตอนการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นสามารถทำได้โดยการพลอตกราฟระหว่างค่า $\ln k_1$ กับ

1/T จากนั้นหาความชันของกราฟที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 4.7 และแสดงผลในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ

$$\ln k_a = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.16 อาร์เรเนียนพลอตของตัวดูดซับ BB700 ตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสดำซาเข้า (BB700 และ 1:2TEPA40(dry)) และตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อมีความชื้นในกระแสดำซาเข้า (1:2TEPA40(wet))

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ

ตัวอย่าง	ความชื้นในระบบ		E_a (กิโลจูลต่อโมล)	R^2
	(ร้อยละโดยปริมาตร)	A (นาที่ ⁻¹)		
BB700	0	1.12	5.78	0.9735
1:2TEPA40	0	0.28	2.61	0.9726
1:2TEPA40	3	0.05	-1.71	0.9035

จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการดูดซับบนตัวดูดซับที่ BB700 เมื่อไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า มีค่าเท่ากับ 5.78 กิโลจูลต่อโมล ตัวดูดซับ 1:2TEPA40 ในภาวะที่ไม่มีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า มีค่าเท่ากับ 2.61 กิโลจูลต่อโมล จะเห็นว่าพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ BB700 มีค่ามากกว่าตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เนื่องจากพันธะทางเคมีของการดูดซับของตัวดูดซับ BB700 เป็นแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals forces) เป็นพันธะแบบอ่อนๆ จึงต้องใช้พลังงานเพื่อบังคับให้คาร์บอนไดออกไซด์ไปเสถียรที่บริเวณว่างไว้แล้วจึงเกิดการดูดซับ อีกทั้งลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นรูพรุนแบบไมโครส่วนใหญ่จึงมีแรงต้านการแพร่ (diffusion resistance) สูงกว่าอีกด้วย ส่วนกรณีของตัวดูดซับ 1:2TEPA40 มีหมู่เอมีนเป็นตำแหน่งว่างไว้นั้นจึงต้องการพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับน้อยกว่า เพราะว่าหมู่อะมีนนั้นมีความว่างไว้กับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี การมีค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่านั้นแสดงถึงแรงแอตทราคชันของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่แข็งแรงมากกว่า [56] เมื่อพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ 1:2TEPA40 ในภาวะที่มีความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตรพบว่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ -1.71 กิโลจูลต่อโมล การที่มีค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าติดลบ แสดงว่าก่อนเกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการดูดซับจะต้องผ่านการเกิด intermediate ก่อนและการเกิด intermediate นั้นต้องการพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าการเกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [57]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่กระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก แล้วตัดแปรด้วยเอมีน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้น ชนิดของเอมีนที่ใช้ในการตัดแปรพื้นผิว ปริมาณเอมีนที่ใช้การตัดแปรพื้นผิว ความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับและการเลือกดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์

จากการศึกษาตัวแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวตัวดูดซับ (textural properties) และพื้นผิวทางเคมี (surface chemistry) จากการศึกษาอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการกระตุ้น พบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำหนักคาร์บอนต่อน้ำหนักกรดฟอสฟอริกสูงขึ้นทำให้มีปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมากขึ้น เมื่อมีปริมาตรรูพรุนขนาดเมโสและมาโครมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ให้เอมีนที่โมเลกุลขนาดใหญ่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนและเกาะติดผิวมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น จากการศึกษาชนิดของเอมีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้พบว่า เตตระเอทิลีนเพนทามีนมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงกว่าพอลิเอทิลีนอิมิน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของเตตระเอทิลีนเพนทามีนมีความกะกนน้อยกว่าพอลิเอทิลีนอิมินจึงมีแรงต้านการแพร่ต่ำกว่า (diffusion resistance) ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณว่องไวบนตัวดูดซับได้ง่ายกว่า อีกทั้งพอลิเอทิลีนอิมินมีความหนืดสูงกว่าเตตระเอทิลีนเพนทามีนจึงทำให้มีการกระจายตัวไม่ดี จากการศึกษาปริมาณพอลิเอทิลีนอิมินที่ใช้ในการตัดแปรพื้นผิวตัวดูดซับพบว่าการใช้ปริมาณพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 20 โดยมวลจะมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีความกะกนน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส การตัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนอิมินที่ร้อยละ 30 โดยมวลจะให้ความสามารถในการดูดซับสูงกว่าเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงมีการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์สูง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการตัดแปรด้วย

พอลิเอทิลีนอิมินร้อยละ 40 โดยมวลจะมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลงทุกช่วงอุณหภูมิ เนื่องจากการใช้ปริมาณพอลิเอทิลีนอิมินที่มากเกินไปจึงเกิดการขัดขวางของบริเวณว่าง จากการศึกษาค่าผลของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนทามีนที่ใช้ในการดัดแปรพื้นผิวของตัวดูดซับพบว่า การเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนทามีนร้อยละ 40 โดยมวลจะมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเนื่องจากการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนทามีนเปรียบเหมือนการเพิ่มบริเวณว่างให้คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับได้มากขึ้น จากการศึกษาความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้า สำหรับตัวดูดซับ BB700 พบว่าการมีความชื้นในระบบทำให้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นโดยสูงขึ้นประมาณ 4 เท่าที่อุณหภูมิการดูดซับ 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่พื้นผิวบนตัวดูดซับมีออกซิเจนเป็นหมู่ฟังก์ชันจึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับได้มากขึ้น สำหรับตัวดูดซับ 1:2TEPA40พบว่าเมื่อมีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้าร้อยละ 3 โดยปริมาตรทำให้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเนื่องจากโดยปกติกลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีน้ำจะเข้าปฏิกิริยาหมู่เอมีน 1 กลุ่มจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล ซึ่งต่างจากสภาวะที่ไม่มีน้ำจะเข้าปฏิกิริยาหมู่เอมีน 2 หมู่จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล แต่เมื่อมีความชื้นในกระแสก๊าซขาเข้ามากเกินไปโมเลกุลของน้ำจะไปขัดขวางการดูดซับทำให้มีความสามารถในการดูดซับลดลง จากการศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับพบว่ามีความสามารถการดูดซับลดลงประมาณร้อยละ 1.82 ในรอบที่ 10 จาก 1.10 มิลลิโมลต่อกรัมเหลือ 1.00 มิลลิโมลต่อกรัม ในส่วนของการศึกษาการเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า ตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วยเอมีนไม่ดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์เนื่องจาก โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นออกไซด์ที่เป็นกลางจึงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนที่มีความเป็นเบส

ในการศึกษาจลพลศาสตร์ทำการศึกษาดูดซับ พบว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมทำนายการดูดซับได้เหมาะสมที่สุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจะทำให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นเนื่องจากจะเพิ่มโอกาสให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยากับหมู่เอมีนได้มากขึ้น

พลังงานกระตุ้นสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ BB700 มีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 5.78 กิโลจูลต่อโมลและมีค่าเท่ากับ 2.61 กิโลจูลต่อโมล สำหรับตัวดูดซับ 1:2TEPA40 ไม่มีความชื้นกระแสก๊าซขาเข้า จะเห็นว่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าลดลงเมื่อมีหมู่ฟังก์ชันเอมีนบนพื้นผิวตัวดูดซับ และมีค่า -1.71 กิโลจูลต่อโมล สำหรับตัวดูดซับ 1:2TEPA40 เมื่อมีความชื้นกระแสก๊าซขาเข้า แสดงว่าเมื่อมีน้ำในกระแสก๊าซขาเข้าเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่างจากกรณีที่ไม่มีน้ำในกระแสก๊าซขาเข้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการตัวแปรเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อได้ลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมแก่การดูดซับ และอุณหภูมิศาสตร์ของการดูดซับเพื่อศึกษากลไกการเกิดการดูดซับ



บรรณานุกรม

1. Ojeda M, Mazaj M, Garcia S, Xuan J, Maroto-Valer MM, Logar NZ. Novel Amine-impregnated Mesostructured Silica Materials for CO₂ Capture. Energy Procedia. 2017;114:2252-8.
2. Koytsoumpa EI, Bergins C, Kakaras E. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. The Journal of Supercritical Fluids. 2018;132:3-16.
3. Fiuza RA, Jr., Medeiros de Jesus Neto R, Correia LB, Carvalho Andrade HM. Preparation of granular activated carbons from yellow mombin fruit stones for CO₂ adsorption. J Environ Manage. 2015;161:198-205.
4. ไร่เศรษฐกิจ. [Internet]. 2017 [cited 21 มกราคม 2018]. Available from: https://kasettumkin.com/agriculture-news/article_4655.
5. Rashidi NA, Yusup S. An overview of activated carbons utilization for the post-combustion carbon dioxide capture. Journal of CO₂ Utilization. 2016;13:1-16.
6. Jung S-H, Kim J-S. Production of biochars by intermediate pyrolysis and activated carbons from oak by three activation methods using CO₂. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2014;107:116-22.
7. Duan X, Srinivasakannan C, Wang X, Wang F, Liu X. Synthesis of activated carbon fibers from cotton by microwave induced H₃PO₄ activation. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2017;70:374-81.
8. Bezerra DP, Oliveira RS, Vieira RS, Cavalcante CL, Azevedo DCS. Adsorption of CO₂ on nitrogen-enriched activated carbon and zeolite 13X. Adsorption. 2011;17(1):235-46.
9. Sanz-Pérez ES, Olivares-Marín M, Arencibia A, Sanz R, Calleja G, Maroto-Valer MM. CO₂ adsorption performance of amino-functionalized SBA-15 under post-combustion conditions. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013;17:366-75.
10. Bernstein Lea. Climate change 2007 synthesis report. Sweden: the Intergovernmental Panel on Climate Change; 2008.
11. Mondal MK, Balsora HK, Varshney P. Progress and trends in CO₂

capture/separation technologies: A review. *Energy*. 2012;46(1):431-41.

12. กระบวนการดูดซับ. [Internet]. 2008 [cited 21 มกราคม 2018]. Available from:

<https://pradthana.wordpress.com/tag/กระบวนการดูดซับ/>.

13. กระบวนการดูดซับ [Internet]. 2012 [cited 21 มกราคม 2018]. Available from:

<https://www.slideshare.net/VivekKumar36/adsorption-regenerationvivek-kumarneeri>.

14. Rashidi NA, Yusup S, Hameed BH. Kinetic studies on carbon dioxide capture using lignocellulosic based activated carbon. *Energy*. 2013;61:440-6.

15. Plaza MG, González AS, Pis JJ, Rubiera F, Pevida C. Production of microporous biochars by single-step oxidation: Effect of activation conditions on CO₂ capture. *Applied Energy*. 2014;114:551-62.

16. González JF, Román S, González-García CM, Nabais JMV, Ortiz AL. Porosity Development in Activated Carbons Prepared from Walnut Shells by Carbon Dioxide or Steam Activation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009;48(16):7474-81.

17. San Miguel G, Fowler GD, Sollars CJ. A study of the characteristics of activated carbons produced by steam and carbon dioxide activation of waste tyre rubber. *Carbon*. 2003;41(5):1009-16.

18. González JF, Encinar JM, González-García CM, Sabio E, Ramiro A, Canito JL, et al. Preparation of activated carbons from used tyres by gasification with steam and carbon dioxide. *Applied Surface Science*. 2006;252(17):5999-6004.

19. Wigmans T. Industrial aspects of production and use of activated carbons. *Carbon*. 1989;27(1):13-22.

20. Kilic M, Apaydin-Varol E, Putun AE. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: equilibrium, kinetics and thermodynamics. *J Hazard Mater*. 2011;189(1-2):397-403.

21. Vargas AM, Cazetta AL, Garcia CA, Moraes JC, Nogami EM, Lenzi E, et al. Preparation and characterization of activated carbon from a new raw lignocellulosic material: flamboyant (*Delonix regia*) pods. *J Environ Manage*. 2011;92(1):178-84.

22. Al Bahri M, Calvo L, Gilarranz MA, Rodriguez JJ. Activated carbon from grape seeds upon chemical activation with phosphoric acid: Application to the adsorption of diuron from water. *Chemical Engineering Journal*. 2012;203:348-56.

23. Lozano-Castelló D, Calo JM, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano A. Carbon

activation with KOH as explored by temperature programmed techniques, and the effects of hydrogen. *Carbon*. 2007;45(13):2529-36.

24. Arenillas de la Puente A, Gómez Calvo E, Menéndez Díaz JÁ. Designing Nanostructured Carbon Xerogels. InTech; 2011.

25. Lillo-Ródenas MA, Lozano-Castelló D, Cazorla-Amorós D, Linares-Solano A. Preparation of activated carbons from Spanish anthracite. *Carbon*. 2001;39(5):751-9.

26. ศูนย์ฝึกอบรมวนศาสตร์ชุมชนแห่งภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก, (ศูนย์วนศาสตร์ชุมชนเพื่อคนกับป่า). ไม้กับวิถีชีวิตคนไทย : องค์กรความรู้ และรูปแบบการจัดการของท้องถิ่น2014.

27. Sayari A, Belmabkhout Y. Stabilization of amine-containing CO₂ adsorbents: dramatic effect of water vapor. *J Am Chem Soc*. 2010;132(18):6312-4.

28. Ünveren EE, Monkul BÖ, Sariođlan Ş, Karademir N, Alper E. Solid amine sorbents for CO₂ capture by chemical adsorption: A review. *Petroleum*. 2017;3(1):37-50.

29. Ho Y-S. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *Scientometrics*. 2004;59:171-7.

30. Ho YS, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*. 1999;34(5):451-65.

31. Liu Q, Shi J, Zheng S, Tao M, He Y, Shi Y. Kinetics Studies of CO₂ Adsorption/Desorption on Amine-Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014;53(29):11677-83.

32. Kongnoo A, Intharapat P, Worathanakul P, Phalakornkule C. Diethanolamine impregnated palm shell activated carbon for CO₂ adsorption at elevated temperatures. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016;4(1):73-81.

33. Liu S, Ge L, Gao S, Zhuang L, Zhu Z, Wang H. Activated carbon derived from bio-waste hemp hurd and retted hemp hurd for CO₂ adsorption. *Composites Communications*. 2017;5:27-30.

34. Martín CF, Sweatman MB, Brandani S, Fan X. Wet impregnation of a commercial low cost silica using DETA for a fast post-combustion CO₂ capture process. *Applied Energy*. 2016;183:1705-21.

35. Rezma S, Birot M, Hafiane A, Deleuze H. Physically activated microporous carbon from a new biomass source: Date palm petioles. *Comptes Rendus Chimie*.

2017;20(9-10):881-7.

36. Li Y, Zhang X, Yang R, Li G, Hu C. The role of H₃PO₄ in the preparation of activated carbon from NaOH-treated rice husk residue. RSC Advances. 2015;5(41):32626-36.
37. Shafeeyan MS, Daud WMAW, Houshmand A, Shamiri A. A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2010;89(2):143-51.
38. Tiwari D, Goel C, Bhunia H, Bajpai PK. Melamine-formaldehyde derived porous carbons for adsorption of CO₂ capture. J Environ Manage. 2017;197:415-27.
39. Xu J, Chen L, Qu H, Jiao Y, Xie J, Xing G. Preparation and characterization of activated carbon from reedy grass leaves by chemical activation with H₃PO₄. Applied Surface Science. 2014;320:674-80.
40. Zhang G, Zhao P, Xu Y. Development of amine-functionalized hierarchically porous silica for CO₂ capture. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2017;54:59-68.
41. Ouyang J, Zheng C, Gu W, Zhang Y, Yang H, Suib SL. Textural properties determined CO₂ capture of tetraethylenepentamine loaded SiO₂ nanowires from α -sepiolite. Chemical Engineering Journal. 2018;337:342-50.
42. Yorgun S, Yildiz D. Preparation and characterization of activated carbons from Paulownia wood by chemical activation with H₃PO₄. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2015;53:122-31.
43. Vanitjinda G, Nimchua T, Sukyai P. Effect of xylanase-assisted pretreatment on the properties of cellulose and regenerated cellulose films from sugarcane bagasse. Int J Biol Macromol. 2019;122:503-16.
44. Huber L, Ruch P, Hauert R, Matam SK, Saucke G, Yoon S, et al. Water sorption behavior of physically and chemically activated monolithic nitrogen doped carbon for adsorption cooling. RSC Advances. 2016;6(84):80729-38.
45. Mayyas M, Sahajwalla V. Carbon nano-sponge with enhanced electrochemical properties: A new understanding of carbon activation. Chemical Engineering Journal. 2019;358:980-91.

46. Le Coz F, Arurault L, Fontorbes S, Vilar V, Datas L, Winterton P. Chemical composition and structural changes of porous templates obtained by anodising aluminium in phosphoric acid electrolyte. *Surface and Interface Analysis*. 2010;42(4):227-33.
47. Eisazadeh A, Kassim K, Nur H. Physicochemical characteristics of phosphoric acid stabilized bentonite. *2010*. 1-10 p.
48. Goel C, Bhunia H, Bajpai PK. Resorcinol–formaldehyde based nanostructured carbons for CO₂ adsorption: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *RSC Advances*. 2015;5(113):93563-78.
49. Vilarrasa-García E, Cecilia JA, Azevedo DCS, Cavalcante CL, Rodríguez-Castellón E. Evaluation of porous clay heterostructures modified with amine species as adsorbent for the CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2017;249:25-33.
50. Ahmed S, Ramli A, Yusup S. Development of polyethylenimine-functionalized mesoporous Si-MCM-41 for CO₂ adsorption. *Fuel Processing Technology*. 2017;167:622-30.
51. Dey R, Gupta R, Samanta A. Carbon dioxide capture under postcombustion conditions using amine-functionalized SBA-15: Kinetics and multicyclic performance. *Separation Science and Technology*. 2018;53(16):2683-94.
52. Xing W, Liu C, Zhou Z, Zhou J, Wang G, Zhuo S, et al. Oxygen-containing functional group-facilitated CO₂ capture by carbide-derived carbons. *Nanoscale Res Lett*. 2014;9(1):189.
53. Lee JJ, Yoo CJ, Chen CH, Hayes SE, Sievers C, Jones CW. Silica-Supported Sterically Hindered Amines for CO₂ Capture. *Langmuir*. 2018;34(41):12279-92.
54. Li K, Kress JD, Mebane DS. The Mechanism of CO₂ Adsorption under Dry and Humid Conditions in Mesoporous Silica-Supported Amine Sorbents. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016;120(41):23683-91.
55. Collision Theory [Internet]. 2019 [cited May 5, 2019]. Available from: https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/UCD_Chem_002C/UCD_Chem_2C%3A_Larsen/Text/Unit_4%3A_Chemical_Kinetics/4.07%3A_Collision_Theory.
56. Shafeeyan MS, Daud WMAW, Shamiri A, Aghamohammadi N. Modeling of Carbon

Dioxide Adsorption onto Ammonia-Modified Activated Carbon: Kinetic Analysis and Breakthrough Behavior. *Energy & Fuels*. 2015;29(10):6565-77.

57. Monazam ER, Shadle LJ, Miller DC, Pennline HW, Fauth DJ, Hoffman JS, et al. Equilibrium and kinetics analysis of carbon dioxide capture using immobilized amine on a mesoporous silica. *AIChE Journal*. 2013;59(3):923-35.



ภาคผนวก ก.
การคำนวณการเตรียมตัวดูดซับ

การคำนวณความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ใช้

ตัวอย่าง 1:2TEPA40

ใช้สัดส่วนคาร์บอนต่อกรดเท่า 1 ต่อ 2 ถ้าใช้คาร์บอน 2 กรัม ต้องใช้กรด 4 กรัม ต่อสารละลาย 15 มิลลิลิตร

กรดฟอสฟอริก 85 กรัม

ในสารละลาย 100 กรัม

ถ้าใช้กรดฟอสฟอริก 4 กรัม

ต้องใช้สารละลาย $4 \times 100 / 85 = 4.7058$ กรัม

ใช้กรดเท่ากับ $4.7058/98 = 0.048019$ โมล

ถ้าต้องการเตรียมกรด 200 มิลลิลิตร

ในสารละลาย 15 มิลลิลิตร

มีกรด 0.048019 โมล

ในสารละลาย 200 มิลลิลิตร

ใช้กรด $200 \times 0.048019 / 15 = 0.64025$ โมล

ฉะนั้นต้องใส่กรดเท่ากับ $0.64025 \times 98 = 62.7451$ กรัมในสารละลาย 200 มิลลิลิตร

การคำนวณการดัดแปรด้วยเอมีน

ตัวอย่าง 1:2TEPA40

ถ้าต้องการเตรียมตัวดูดซับ 6 กรัม

ตัวดูดซับ 60 กรัม

ใช้เอมีน 40 กรัม

ตัวดูดซับ 6 กรัม

ต้องใช้เอมีน $6 \times 40 / 60 = 4$ กรัม

จะได้ตัวดูดซับที่ดัดแปรเอมีนประมาณ 10 กรัม

ภาคผนวก ข.

การคำนวณปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

คำนวณหาค่า Blank

นำข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี จะถ้าข้อมูลความเข้มข้นต่อเวลา คำนวณหาอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ

$$F_{CO_2}(t) = \frac{\text{intensity}(t)}{\text{intensity}(\max)} \times \frac{\%conc}{100} \times F_0$$

เมื่อ $F_{CO_2}(t)$ = อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ(มิลลิลิตรต่อนาที)

F_0 = อัตราการไหลก๊าซผสมเริ่มต้น (มิลลิลิตรต่อนาที)

$\text{intensity}(t)$ = ค่าความเข้มของพีคที่เวลาใดๆ

$\text{intensity}(\max)$ = ค่าความเข้มของพีคสูงสุด

$\%conc$ = เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

เช่น จากข้อมูลดิบที่ได้ที่เวลาเท่ากับ 3 นาที มีความเข้มเท่ากับ 12000 และมีความเข้มสุดท้ายเท่ากับ 120000 ใช้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

$$F_{CO_2}(t) = \frac{12000}{120000} \times \frac{30}{100} \times 10 = 0.3 \quad \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$$

คำนวณหาอัตราไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ

$$\text{ads } F_{CO_2}(t) = \left(\frac{\%conc}{100} \times F_{CO_2} \right) - F_{CO_2}(t)$$

$$\text{ads } F_{CO_2}(t) = \left(\frac{30}{100} \times 10 \right) - 0.3 = 2.7 \quad \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$$

ทำการพลอตกราฟระหว่าง $\text{ads } F_{CO_2}(t)$ กับเวลาใดๆ

ทำการอินทิเกรตกราฟระหว่าง $ads F_{CO_2}(t)$ กับเวลาใดๆจะได้พื้นที่เท่ากับ 23.95 มิลลิลิตร
 จากนั้นทำการคำนวณอีกครั้งสำหรับกรณีที่มีตัวดูดซับทำการอินทิเกรตกราฟระหว่าง
 $ads F_{CO_2}(t)$ กับเวลาใดๆจะได้พื้นที่เท่ากับ 34.90 มิลลิลิตร

จะได้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับเท่ากับ $34.90 - 23.95 = 10.95$ มิลลิลิตร
 จากนั้นทำการแปลงหน่วยให้เป็นโมล

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \times 10.95 \text{ ml}}{298 \text{ K} \times 0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}}} = 0.44 \text{ mmol}$$

ในการทดลองใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.4 กรัม

จะได้ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $0.44 \text{ มิลลิโมล} / 0.4 \text{ กรัม} = 1.1 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม}$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายภานุพงศ์ ประเสริฐสุข
วัน เดือน ปี เกิด	29 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดสุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	217 ถนนราษฎร์บำรุง ตำบลท่าข้าม อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84130
ผลงานตีพิมพ์	CO ₂ CAPTURE ON AMINE FUNCTIONALIZED BAMBOO-BASED ACTIVATED CARBON ในงานประชุมวิชาการ The 8th International TICHe Conference (ITICHe 2018)

