



รายงานโครงการวิจัย

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนชีวมวลที่เหลือทิ้ง
(CO₂ adsorption on waste biomass)

โดย

นางสาวสุจิตรา เสนารายณ์ รหัสนิสิต 5832974723
นางสาวสุชาดา พ่อคำ รหัสนิสิต 5832975323

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. ญัฐยานัน พงศ์สถาบดี

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
โครงการการเรียนรู้การสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี 2561

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชื่อโครงการ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนชีวมวลที่เหลือทิ้ง

ชื่อนิติผู้ทำโครงการ นางสาวสุจิตรา เสนารายณ์ 5832974723

นางสาวสุชาดา พอค้า 5832975323

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ญัฐยานันท์ พงศ์สถาปดี

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเตรียมตัวดูดซับโดยใช้ไม้ไผ่ ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาถูกและสามารถหาได้ง่าย เพื่อศึกษาผลกระทบของความชื้น (ร้อยละ 0,3 และ 4 โดยมวล) และอุณหภูมิการดูดซับ (30 50 70 90 และ 110 องศาเซลเซียส) ต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ และผ่านการกระตุ้นทางเคมีเพื่อดัดแปลงหมู่ฟังก์ชันที่ผิวด้วยสารเตตระเอทิลีนเพนตะมีนเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ตัวดูดซับจะถูกวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Surface Area and Porosity Analyzer (BET), การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) บนตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN Element Analysis (CHN) จากผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สถานะที่ให้การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดคือความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ผลของอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยในช่วงแรกเพิ่มอุณหภูมิ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลของจลนพลศาสตร์ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการดูดซับมากกว่าอุณหพลศาสตร์ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 110 องศาเซลเซียส อุณหพลศาสตร์มีผลมากกว่าจลนพลศาสตร์ เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อปฏิกิริยาการดูดซับ เมื่อน้ำเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ สัดส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาของหมู่เอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1:1 จากสถานะปราศจากความชื้นที่มีสัดส่วนเท่ากับ 1:2 แต่เมื่อความชื้นสูงถึงร้อยละ 4 โดยปริมาตร ความสามารถในการดูดซับลดต่ำลงเนื่องจากโมเลกุลน้ำเข้าปกคลุมรูพรุน

คำสำคัญ: ชีวมวล, การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลงมือชื่อนิติ..... สุชาดา สุจิตรา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก.....

Title Carbon dioxide adsorption on waste-biomass
Department Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Student name Miss Sujitra Sanarai 5832974723
 Miss Suchada Poaka 5832975323
Advisor Prof. Dr. Nuttaya Pongstabodee

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,
 Academic Year 2018

ABSTRACT

This research was aimed to prepare adsorbent using bamboo as raw material and impregnated with 40%wt tetraethylene pentamene (TEPA). The objective of this work is to study the effect of humidity (0, 3 and 4 percent) and temperature (30 50 70 90 and 110 °C) on CO₂ adsorption capacity on the adsorbent. The adsorbent was characteristic analyzed by Surface Area and Porosity Analyzer (BET), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), CHN Element Analysis (CHN). The optimal condition is 3 percent humidity with 70 degree Celsius. The temperature affects the carbon dioxide adsorption reaction. The rising temperature at initial cause the increasing carbon dioxide adsorption. It because the dominance of kinetics instead of thermodynamics but if the temperature reach to be 110 degree Celsius, the carbon dioxide adsorption was increased because of the dominance of thermodynamics. Moreover, the moisture also affects the carbon dioxide adsorption reaction. The protonation of molecule of water to amine group cause the ratio of reaction carbon dioxide and amine group is 1:1 while the ratio of reaction carbon dioxide and amine group in dry condition is 1:2. It affect the higher adsorption capacities of 3 percent by volume. In case of increasing the moisture to 4 percent by volume the water molecule block the pore on the adsorbent the carbon dioxide adsorption decrease.

Keywords: Biomass, Carbon dioxide adsorption

Department of Chemical Technology Student's signature.....
 Major Chemical Engineering Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

- ขอขอบคุณ** ศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจเสมอ กลุ่มของข้าพเจ้ารู้สึกเป็นเกียรติอย่างมากที่มีโอกาสได้เป็นนิสิตในที่ปรึกษาของอาจารย์ พวกเราได้เรียนรู้ทักษะอื่นที่ประโยชน์นอกเหนือจากการทำวิจัย เช่น ทักษะการนำเสนอ บุคลิกภาพ และมุมมองแง่คิดในการใช้ชีวิต ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต
- ขอขอบคุณ** พี่บัณฑิตระดับปริญญาโท และปริญญาเอกที่คอยให้คำปรึกษาตั้งแต่เริ่มทำโครงการนี้ ในเรื่องของวิธีการดำเนินงานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย แนวความคิดในการวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมไปถึงแนะนำแนวทางในการนำเสนอผลงาน และให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ นอกเหนือจากงานวิจัย
- ขอขอบคุณ** เพื่อนๆ ในภาควิชาที่คอยเป็นที่ปรึกษา เข้าใจ และสนับสนุนการทำโครงการนี้ และให้คำแนะนำที่ดีอยู่เสมอ
- ขอขอบคุณ** ผู้ปกครองของสมาชิกทุกคนที่คอยสนับสนุน คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง
- ขอขอบคุณ** ภาควิชาเคมีเทคนิคที่หล่อหลอมพวกเราให้มีความรู้ ความสามารถ และความอดทนในการทำงาน ไม่ว่าจะป็นต่อตนเองหรือทำงานร่วมกับผู้อื่น รวมไปถึงการสนับสนุนในเรื่องของอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่ 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่.....	2
1.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ.....	2
1.4 สมมติฐาน.....	2
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
บทที่ 2	4
2.1 สภาวะโลกร้อน (Global warming).....	4
2.2 ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect).....	4
2.2.1 แก๊สเรือนกระจก.....	5
2.2.1.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	5
2.2.1.2 แก๊สมีเทน.....	6
2.2.1.3 แก๊สไนตรัสออกไซด์.....	6
2.2.1.4 แก๊สที่มีสารประกอบคลอโรฟลูออโรคาร์บอน.....	6
2.3 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ.....	7
2.3.1 ผลกระทบทางตรง.....	7
2.3.2 ผลกระทบทางอ้อม.....	8

2.4	ทฤษฎีการดูดซับ	9
2.4.1	การดูดซับทางกายภาพ.....	9
2.4.2	การดูดซับทางเคมี.....	9
2.5	กลไกการดูดซับ	10
2.6	ถ่านกัมมันต์	11
2.6.1	ชนิดของถ่านกัมมันต์	12
2.6.1.1	การแบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น	13
2.6.1.2	การแบ่งตามขนาดอนุภาค.....	13
2.6.2	การแบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์.....	13
2.6.3	การแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์.....	13
2.6.4	การแบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ.....	13
2.7	โครงสร้างและสมบัติพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์	14
2.8	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	15
2.8.1	การเตรียมวัตถุดิบ.....	15
2.8.2	การคาร์บอนไนซ์ (carbonization).....	15
2.8.3	ขั้นตอนการกระตุ้น (Activation process)	16
2.8.3.1	การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)	16
2.8.3.2	การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation).....	17
2.9	เอมีน	17
2.9.1	สมบัติทางกายภาพของเอมีน	18
2.9.2	เตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine; TEPA).....	18
2.9.3	ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีน	19
2.9.4	กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In absence of water)	19
	19
2.9.5	กรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In presence of water).....	20
2.10	เทคนิคอื่นๆในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	20
2.10.1	การดูดซึม (absorption).....	21
2.10.1.1	การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption).....	21

2.10.1.2	การดูดซึมทางเคมี (chemical absorption).....	21
2.10.2	เมมเบรน (Membrane).....	22
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3	25
วิธีดำเนินงานวิจัย	25
3.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	26
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	26
3.4	วิธีดำเนินการทดลอง.....	26
3.4.1	เตรียมกรดฟอสฟอริก.....	26
3.4.2	เตรียม KOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จำนวน 200 มิลลิลิตร.....	26
3.4.3	ขั้นตอนการทดลอง.....	27
3.5	การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ.....	27
3.5.1	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี..	27
3.5.2	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (Ultimate analysis).....	28
3.5.3	การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ได้ใช้วิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET).....	28
บทที่ 4	29
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	29
4.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะ.....	29
4.1.1	การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และรัศมีของตัวดูดซับด้วยเทคนิค การดูดซับและคายซับด้วยไนโตรเจน.....	29
4.1.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	31
4.1.3	การวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN Element Analysis (CHN).....	33
4.2	ผลของตัวแปรต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	34
4.2.1	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Operating temperature).....	34
4.2.2	ความชื้นที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Operating moisture).....	37

บทที่ 5	38
สรุปผลการทดลอง	38
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	42

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1	การเปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีและกายภาพ	Error! Bookmark not defined.
ตารางที่ 2. 2	ผลของ substituent group ที่มีต่อการดูดซับ	Error! Bookmark not defined.
ตารางที่ 4. 1.	ตารางแสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และรัศมีของตัวดูดซับก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอสฟอริก	29
ตารางที่ 4. 2	แถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ	32
ตารางที่ 4. 3	ตารางแสดงร้อยละของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ของตัวดูดซับไม้ไผ่ก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดฟอสฟอริก และการดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน	33

สารบัญภาพ

รูปที่ 2. 1	แสดงการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกของโลก.....	4
รูปที่ 2. 2	กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์.....	11
รูปที่ 2. 3	โครงสร้างผลึกแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัล	14
รูปที่ 2. 4	แสดงโครงสร้างเอมีนปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ตติยภูมิ	18
รูปที่ 2. 5	โครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตามีน	19
รูปที่ 2. 6	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะไม่มีความชื้น	19
รูปที่ 2. 7	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะมีความชื้นโดยสัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 1:1 เกิดขึ้นกับเอมีนชนิดตติยภูมิ (Tertiary amines).....	20
รูปที่ 3. 1	เครื่องทดสอบการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์	26
รูปที่ 4. 1	กราฟแสดงสเปกตรัมฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ของตัวดูดซับไม้ไผ่ก่อนและหลังดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล.....	31
รูปที่ 4. 2	โครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตามีน.....	33
รูปที่ 4. 3	กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 30, 50, 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส	34
รูปที่ 4. 4	กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 3 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30, 50, 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส	36
รูปที่ 4. 5	กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 3 และ 4 โดยปริมาตร	37
รูปที่ ก	กราฟ Break-through curve สภาวะความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส .	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันถือเป็นยุคอุตสาหกรรมที่ผู้คนหันมาใช้เครื่องจักรต่างๆ แทนการใช้แรงงานมนุษย์มากยิ่งขึ้น โดยส่วนมากในแต่ละโรงงานอุตสาหกรรมนั้น มีการใช้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมมากมาย ปัญหาหนึ่งที่สำคัญคือภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกปริมาณมากออกสู่บรรยากาศ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO₂) [1] เป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีความสำคัญมากที่สุด ถือเป็นร้อยละ 87 ของแก๊สเรือนกระจกทั้งหมด โดยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นถึง 1 – 3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลกระทบหลายอย่างตามมา เช่น น้ำแข็งขั้วโลกละลาย สภาพอากาศแปรปรวนไม่เป็นไปตามฤดูกาล และเกิดภัยพิบัติต่างๆ เป็นต้น ปัจจุบันผู้คนมีความตระหนักในความจำเป็นที่ต้องลดจำนวนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมากยิ่งขึ้น เทคโนโลยีดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture) ถูกออกแบบเพื่อนำมาใช้ในการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิด จากมนุษย์ เทคนิคมากมายถูกนำเสนอขึ้นเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น การดูดซึม การแยกด้วยเยื่อแผ่นเมมเบรน และการดูดซับ เป็นต้น แต่การดูดซึมมีข้อเสียคือ มีประสิทธิภาพในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ เกิดการกัดกร่อนเครื่องมือ และ มีการใช้พลังงานที่สูงในระหว่างการรีเจนเนอเรต ส่วนวิธีการแยกด้วยเยื่อแผ่นเมมเบรน มีข้อจำกัดในการใช้ทางอุตสาหกรรมเนื่องจากมีราคาสูง เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจาก มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า ใช้พลังงานน้อย และง่ายต่อการดำเนินงาน

การดูดซับ [2] บนพื้นผิวของแข็งหรือของเหลวเนื่องจากโมเลกุลของสารบริเวณพื้นผิวทั้งของแข็งและของเหลวมีลักษณะไม่สมดุล ตัวดูดซับ เรียกว่า adsorbent ตัวถูกดูดซับ เรียกว่า adsorbate ซึ่งการดูดซับจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน (กรณีการดูดซับแก๊ส) ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย พื้นผิว และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ชีวมวลที่เหลือทิ้งเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากการเพิ่มประโยชน์ให้กับสิ่งเหลือทิ้ง ไม่สิ้นเปลือง สามารถหาได้ง่าย และบุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม้ไผ่ที่ดัดแปรฟังก์ชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่

ตัวแปร	ช่วงที่ศึกษา	หน่วย
อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ	30 – 110	องศาเซลเซียส
ปริมาณความชื้น	0 – 40	ร้อยละโดยปริมาตร

1.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ ประกอบไปด้วย

- การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
- การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Surface Area and Porosity Analyzer (BET)
- การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) บนตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN Element Analysis (CHN)

1.4 สมมติฐาน

ไม้ไผ่ที่ตัดแปรฟังก์ชันด้วยสารเตตระเอทิลีนเพนตะมีนสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในสภาวะความดันบรรยากาศ

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ ชีวมวล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากชีวมวลที่เหลือทิ้ง
- 1.6.2 ได้ทราบสถานะที่เหมาะสมในการผลิตตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.7.1 ศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์รวมถึงการใช้ตัวดูดซับและเอมีนชนิดต่างๆ
- 1.7.2 จัดเตรียมและศึกษาวิธีการใช้อุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องในการวิจัย
- 1.7.3 เตรียมตัวดูดซับที่ตัดแปรฟังก์ชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน
- 1.7.4 ทำการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ
- 1.7.5 วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคต่างๆ
- 1.7.6 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง
- 1.7.7 เขียนรายงาน

1.8 ลำดับขั้นตอนการนำเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนองานวิจัยมีเนื้อหาต่างๆประกอบ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย สมมติฐาน คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัยและลำดับขั้นตอนการนำเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 ภาวะโลกร้อนจากการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทฤษฎีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง การเตรียมเตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปรฟังก์ชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนและการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวดูดซับภายใต้อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สภาวะโลกร้อน (Global warming) [3]

ภาวะโลกร้อนคือปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิอากาศทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งโดยปกติอุณหภูมิอากาศบนโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักรสลับไปมาระหว่างช่วงที่อบอุ่นไปเป็นช่วงที่หนาวเย็น การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกอย่างไรก็ตามวัฏจักรดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากอดีตซึ่งคาดว่า เป็นผล มาจากการกระทำของมนุษย์

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยทั่วโลกเกิดขึ้นตั้งแต่มนุษย์เริ่มปล่อยแก๊สเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทั่วโลกทำให้น้ำแข็งที่ขั้วโลกและธารน้ำแข็งเกิดการหลอมเหลวส่งผลให้ระดับน้ำทะเลทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สภาพอากาศเกิดความแปรปรวนและยากแก่การคาดการณ์ โดยบางพื้นที่ที่อากาศอุ่นขึ้นแต่บางพื้นที่ที่อากาศเย็นลง ตัวอย่างเช่นบริเวณพื้นที่ประเทศอังกฤษซึ่งระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นในขณะเดียวกันอุณหภูมิอากาศลดต่ำลงเนื่องจากการไหลของกระแสน้ำอุ่นกัลฟ์สตรีมที่อ่อนกำลังลง สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตบางชนิดอาจสูญพันธุ์ และบางประเทศอาจจมอยู่ใต้น้ำ

2.2 ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) [4]



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกของโลก

คือ ขบวนการที่รังสีความร้อนจากพื้นผิวโลกจะถูกดูดซับโดยก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ และแผ่รังสีออกไปอีกครั้งในทุกทิศทาง เนื่องจากการแผ่รังสีออกไปอีกครั้งถูกส่งกลับมายังพื้นผิวโลกและบรรยากาศด้านล่าง เป็นผลทำให้ระดับอุณหภูมิพื้นผิวโลกเฉลี่ยสูงขึ้นถ้าไม่มีแก๊สเหล่านี้

เมื่อแสงอาทิตย์ส่องถึงผิวโลก บางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้และทำให้ผิวพื้นโลกอุ่นขึ้น บางส่วนจะสะท้อนกลับ เนื่องจากผิวโลกเย็นกว่าผิวดวงอาทิตย์มากส่วนที่สะท้อนกลับจึงแผ่กระจายพลังงานที่มีช่วงคลื่นยาวกว่ารังสีจากดวงอาทิตย์ โดยมีช่วงยาวมากที่สุดที่แถบความถี่ในช่วงอินฟราเรดหรือที่ประมาณ $10\mu\text{m}$ แก๊สเรือนกระจกในบรรยากาศจะดูดกลืนช่วงคลื่นที่ยาวกว่าได้ดีกว่าแสงช่วงคลื่นสั้นของแสงอาทิตย์ การดูดกลืนพลัง

งานช่วงคลื่นยาวนี้เองที่ทำให้บรรยากาศร้อนขึ้น แก๊สเรือนกระจกก็ปล่อยรังสีคลื่นยาว (อีกครั้ง) ทั้งขึ้นสู่ห้วงอวกาศและปล่อยลงสู่พื้นผิวโลก กระบวนการนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์เรือนกระจก”

การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่ความถี่แสงที่ตามองเห็นผ่านชั้นบรรยากาศเป็นส่วนใหญ่และทำให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกสูงขึ้น แล้วจะมีการแผ่พลังงานนี้ออกมาในรูปรังสีความร้อนอินฟราเรดที่มีความถี่ต่ำกว่า การแผ่รังสีอินฟราเรดถูกก๊าซเรือนกระจกดูดซับไว้ และจะมีการแผ่พลังงานปริมาณมากกลับไปยังพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศที่ต่ำกว่า กลไกดังกล่าวตั้งชื่อตามปรากฏการณ์ที่การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ผ่านกระจกแล้วทำให้เรือนกระจกอุ่นขึ้น แต่วิธีการกักเก็บความร้อนนั้นแตกต่างกันไป โดยเรือนกระจกเป็นการลดการไหลของอากาศ แยกอากาศที่อุ่นข้างในเพื่อที่ความร้อนจะไม่สูญเสียไปโดยการพาความร้อน

โจเซฟ ฟูริเออร์ (Joseph Fourier) เป็นผู้ค้นพบปรากฏการณ์เรือนกระจกเมื่อ พ.ศ. 2367
 สวานเต อาร์เรเนียส (Svante Arrhenius) เป็นผู้ทดสอบหาปริมาณความร้อนเมื่อ พ.ศ. 2439

ปรากฏการณ์เรือนกระจกตามธรรมชาติของโลกทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถอาศัยอยู่ได้ ทว่ากิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และการทำลายป่า ได้เพิ่มปรากฏการณ์เรือนกระจกธรรมชาติ ทำให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อน

2.2.1 แก๊สเรือนกระจก [5]

ในชั้นบรรยากาศของโลกประกอบด้วยแก๊สต่าง ๆ หลายชนิดแต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงตามคุณสมบัติ ทางเคมีของแก๊สแต่ละชนิด ดังนั้นแก๊สที่มีมากเกินสมดุลของชั้นบรรยากาศจะสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ แก๊สบางชนิดสามารถสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศได้นานหลายร้อยปี บางชนิดสะสมอยู่ได้ในเวลาเพียงไม่กี่ปีก็สลายไป แก๊สเรือนกระจกที่กล่าวถึงนี้ก็เช่นกัน เนื่องจากมันมีปริมาณที่มากเกินสมดุลในชั้นบรรยากาศ มันจึงสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศและสะสมอยู่ได้เป็นเวลานานหลายปี เราอาจแบ่งแก๊สเรือนกระจกได้เป็นสองพวกตามอายุการสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ คือ พวกที่มีอายุการสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศไม่นานเนื่องจากแก๊สเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอน้ำ หรือแก๊สอื่น ๆ จึงทำให้มันมีอายุสะสมเฉลี่ยสั้น ส่วนอีกพวกหนึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกซึ่งมีอายุสะสมเฉลี่ยยาวนานหลายปี เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน แก๊สไนตรัสออกไซด์ และแก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอน เป็นต้น แก๊สเหล่านี้นับเป็นตัวการหลักของการเกิดภาวะเรือนกระจก เนื่องจากมันมีอายุสะสมเฉลี่ยยาวนาน และสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าแก๊สเรือนกระจกอื่น ๆ ทั้งยังส่งผลกระทบต่อพื้นผิวโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยทางอ้อมได้ด้วย แม้ว่าจะมีการรณรงค์เพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกกันอย่างกว้างขวาง แต่อัตราการเพิ่มปริมาณแก๊สเรือนกระจก ก็ยังมีมากขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากฝีมือมนุษย์ทั้งสิ้น ดังนั้นเราควรทราบถึงแหล่งที่มา และความสำคัญของแก๊สเรือนกระจกแต่ละชนิดโดยสังเขปดังนี้

2.2.1.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเกิดจากธรรมชาติ และเกิดจากฝีมือมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และการตัดไม้ทำลายป่าเพื่อใช้เป็นที่อยู่อาศัยหรือการเกษตรกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตัดไม้ทำลายป่านี้ นับว่าเป็นตัวการสำคัญที่สุด ในการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ทั้งนี้เนื่องจากต้นไม้และป่าไม่มีคุณสมบัติที่ดี คือ มันสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ก่อนที่จะลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้นเมื่อพื้นที่ป่าลดน้อยลง ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงขึ้นไปสะสม

อยู่ในชั้นบรรยากาศได้มากขึ้น จากผลการศึกษาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยหน่วยงาน IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ประมาณตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา รายงานว่ามีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการตัดไม้ทำลายป่า เพื่อใช้เป็นพื้นที่เมือง หรือการเกษตรมีประมาณ 1.6 Gtc (1.6 5 10⁹ ตันคาร์บอน) ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ และแหล่งอื่นที่เป็นผลมาจากฝีมือ มนุษย์กำลังมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลการศึกษาของ IPCC ยังระบุชี้ว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสม ในบรรยากาศของโลกมากที่สุด ในบรรดาแก๊สเรือนกระจกชนิดอื่น ๆ ทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นกว่าแก๊สชนิดอื่น ๆ ด้วย ซึ่งหมายถึงผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของผิวโลกและชั้นบรรยากาศจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นต่อไปอีก ล่าสุดนี้หน่วยงาน IPCC ได้รายงานปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นโดยฝีมือมนุษย์นี้ ทำให้พลังงานรังสีความร้อนสะสมบนผิวโลก และชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1.56 วัตต์ ต่อตารางเมตร ในปริมาณนี้ยังไม่คิดรวมผลกระทบที่เกิดขึ้นทางอ้อม ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.1.2 แก๊สมีเทน

แหล่งกำเนิดของแก๊สมีเทนมีอยู่มากมายทั้งในธรรมชาติ และที่เกิดจากฝีมือมนุษย์ เช่น จากแหล่งนาข้าว จากการย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิต จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติ โดยเฉพาะการเผาไหม้ที่เกิดจากธรรมชาติ และเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ สามารถทำให้เกิดแก๊สมีเทนในบรรยากาศสูงถึง 20% ของแก๊สมีเทนในชั้นบรรยากาศทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาของ IPCC ว่าพื้นที่การเกษตรประเภทนาข้าวในประเทศแถบเอเชีย และออสเตรเลีย มีการปลดปล่อยแก๊สมีเทนสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณที่มาก และมีปริมาณแตกต่างกันในแต่ละบริเวณขึ้นกับชนิดและคุณภาพของดินในแต่ละพื้นที่ แม้ว่าการปลดปล่อยแก๊สมีเทนสู่ชั้นบรรยากาศ จะมีมากกว่าปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่แก๊สมีเทนมีอายุสะสมเฉลี่ยประมาณ 11 ปี นับว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นสาเหตุให้ผลกระทบโดยตรง อันเนื่องมาจากภาวะเรือนกระจกโดยแก๊สมีเทนมีน้อยกว่าผลกระทบ อันเกิดจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ก็มีผลกระทบมากเป็นอันดับสองรองจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีรายงานว่าพลังงานเฉลี่ยรวม ที่เกิดจากผลกระทบโดยตรงของแก๊สมีเทนประมาณ 0.47 วัตต์ต่อตารางเมตร

2.2.1.3 แก๊สไนตรัสออกไซด์

แหล่งกำเนิดแก๊สไนตรัสออกไซด์คืออุตสาหกรรมที่ใช้กรดไนตริกในขบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมผลิตเส้นใยไนลอน อุตสาหกรรมเคมี หรืออุตสาหกรรมพลาสติกบางชนิด เป็นต้น แม้ว่าแก๊สไนตรัสออกไซด์ที่เกิดจากธรรมชาติจะมีอยู่มากในภาวะปกติก็ตาม แต่อัตราการเพิ่มปริมาณดังกล่าวก็จัดอยู่ในภาวะที่สมดุลในธรรมชาติ ส่วนแก๊สไนตรัสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากฝีมือมนุษย์นั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มพลังงานความร้อนสะสมบนพื้นผิวโลกประมาณ 0.14 วัตต์ต่อตารางเมตร นับตั้งแต่เริ่มมีอุตสาหกรรมเกิดขึ้นถึงปัจจุบัน

2.2.1.4 แก๊สที่มีสารประกอบคลอโรฟลูออโรคาร์บอน

แก๊สที่มีสารประกอบพวกคลอโรฟลูออโรคาร์บอนมีแหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และอุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวันต่าง ๆ แม้ว่าแก๊สประเภทนี้จะมีปริมาณลดลง 40% เมื่อเทียบกับสิบกว่าปีก่อนหน้านี้ ตามมาตรการควบคุมโดยสนธิสัญญามอนทรีออล (Montreal Protocol) แต่ปริมาณแก๊สคลอโรฟลูออโรคาร์บอนที่ยังมีสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศโดยฝีมือมนุษย์ ยังคงเป็นต้นเหตุที่ทำให้มีพลังงานความร้อนสะสม บน

พื้นผิวโลกประมาณ 0.28 วัตต์ต่อตารางเมตร และยิ่งไปกว่านั้นผลกระทบทางอ้อมของแก๊สชนิดนี้ ทำให้เกิดอันตรายต่อบรรยากาศ และสิ่งมีชีวิตบนพื้นโลกมากมาย กล่าวคือแก๊สประเภทนี้สามารถรวมตัวทางเคมีได้ดีกับโอโซน จึงทำให้อโอโซนในชั้นบรรยากาศลดน้อยลง หรือเกิดรูรั่วในชั้นโอโซนอันเป็นสาเหตุให้รังสีคลื่นสั้นที่เป็นอันตราย ต่อสิ่งมีชีวิตบนพื้นโลกส่องผ่านลงมายังพื้นโลกได้มากขึ้น ทั้งยังทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นผ่านมาตกรกระทบผิวโลกในสัดส่วนที่มากเกินไปจนภาวะสมดุล นับเป็นการทำให้ผิวโลกและบรรยากาศร้อนขึ้นโดยทางอ้อม

2.3 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ [6]

นับตั้งแต่เริ่มรู้จักเครื่องจักรไอน้ำและนำเอาเชื้อเพลิงฟอสซิลอันได้แก่ ถ่านหิน และน้ำมัน ขึ้นมาใช้ และนั่นคือจุดเริ่มต้นของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมากโดยน้ำมีมนุษย์ต้องเผชิญกับสภาพอากาศที่ร้อนมากขึ้นกว่าในอดีตที่ผ่านมา นับตั้งแต่ที่มนุษย์ชาติได้กำเนิดขึ้นมาบนดาวจนเป็นผลทำให้โลกของเราเป็นดาวเคราะห์โลก และนั่นก็หมายถึงว่าการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ไปมีผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น หรือที่เรียกกันว่า โลกร้อน (Global Warming) นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการประเมินผลกระทบที่จะเกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศ โดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่าถ้าหากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในชั้นบรรยากาศของโลกในปี ค.ศ. 2100 เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากระดับปัจจุบัน พบว่าอุณหภูมิผิวพื้นทั่วโลกสูงขึ้นประมาณ 1 ถึง 3.5 องศาเซลเซียส และ ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นประมาณ 15 ถึง 95 เซนติเมตร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ เศรษฐกิจและ สังคม รวมทั้งด้านอุทกวิทยา หรือการจัดการแหล่งน้ำ ตลอดจนโครงสร้าง พื้นฐานและสุขภาพของมนุษย์

จากการที่โลกได้รับพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของแก๊สเรือนกระจกนี้ ทำให้นักวิทยาศาสตร์ สนใจศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมโดยได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลง และประเมินผลกระทบรวมทั้งหาแนวทางการบรรเทาผลกระทบที่จะเกิดขึ้น โดยผลกระทบที่เกิดจากภาวะโลกร้อน (Global Warming) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ผลกระทบทางตรง และผลกระทบทางอ้อม

2.3.1 ผลกระทบทางตรง

- เกิดภาวะความแห้งแล้ง

เมื่อโลกร้อนขึ้นก็จะทำให้หลายส่วนของโลกเกิดภาวะแห้งแล้ง เกิดไฟป่าขึ้นรวมถึงมนุษย์บุกรุกทำลายป่าเพื่อแสวงหาที่ทำกินเพิ่มขึ้นทดแทนพื้นที่ที่แห้งแล้งหรือขาดความอุดมสมบูรณ์ ทำให้ป่าไม้ที่เคยเป็นแหล่งดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเพิ่มออกซิเจนให้กับโลกหรือเป็นปอดของโลกลดลงอย่างรวดเร็ว ไฟป่าที่เพิ่มขึ้นก็จะเผาผลาญป่าไม้ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นในชั้นบรรยากาศของโลก เป็นวงจรที่ไม่สิ้นสุด และยังทำให้พื้นดินบริเวณดังกล่าวแห้งแล้ง และอาจเปลี่ยนเป็นทะเลทรายได้อีกด้วย

- น้ำแข็งละลายมากขึ้น น้ำแข็งใหม่ลดลง

แต่เดิมฤดูร้อนของบริเวณขั้วโลกเหนือจะมีน้ำแข็งบางส่วนละลาย แต่ก็มีน้ำแข็งเหลืออยู่ในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้ฤดูหนาวที่มาถึงมีอุณหภูมิต่ำเพียงพอที่จะทำให้เกิดน้ำแข็งใหม่เพื่อทดแทนน้ำแข็งที่ละลายไปในฤดูร้อนหมุนเวียนเป็นวัฏจักรเช่นนี้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อโลกร้อนขึ้นจะทำให้ น้ำแข็งละลายในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ และมีน้ำแข็งเหลืออยู่ในฤดูหนาวน้อยลงก็จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในฤดูหนาวสูงขึ้น เกิดเป็นน้ำแข็งใหม่น้อยลง ทำให้เป็นไปได้ว่าในฤดูร้อนของปี ค.ศ. 2030 บริเวณขั้วโลกเหนือจะไม่มีน้ำแข็งเหลืออยู่เลย ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดน้ำแข็งในฤดูหนาวอย่างแน่นอน

- น้ำแข็งละลายมากขึ้นทำให้เกิดการสะท้อนแสงอาทิตย์น้อยลง

ปกติแล้วน้ำแข็งบนพื้นดินและในมหาสมุทรจะสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์กลับสู่อวกาศได้ถึง 90% แต่เมื่อโลกร้อนขึ้นน้ำแข็งก็จะละลายมากขึ้นและน้ำแข็งที่เหลืออยู่ก็จะสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้น้อยลง เมื่อเป็นเช่นนี้อุณหภูมิของโลกก็จะสูงขึ้นไปอีก เกิดเป็นวัฏจักรที่น้ำแข็งละลายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกักอยู่ในน้ำแข็ง เมื่อน้ำแข็งละลาย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บอยู่ก็จะกลับสู่ชั้นบรรยากาศ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้โลกร้อนขึ้นไปอีก

2.3.2 ผลกระทบทางอ้อม

- กระแสน้ำอุ่นในมหาสมุทรเปลี่ยนแปลง โลกยุคปัจจุบันเข้าสู่ยุคน้ำแข็งใหม่

เมื่อน้ำแข็งในบริเวณมหาสมุทรอาร์กติกและเกาะกรีนแลนด์ละลายมากขึ้นเนื่องจากภาวะโลกร้อน จะทำให้ความเค็มของน้ำทะเลลดลง ความเข้มข้นของน้ำทะเลมีการเปลี่ยนแปลง น้ำทะเลเบาขึ้นลอยนิ่งอยู่ที่ผิว น้ำ ทำให้วัฏจักรของกระแสน้ำอุ่นแอตแลนติกที่ให้ความอบอุ่นกับซีกโลกเหนืออาจจะหยุดไหลได้ และถ้าเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นจริง ซีกโลกเหนือก็จะกลับสู่ยุคน้ำแข็ง

- เกิดความหายนะของระบบนิเวศวิทยา

ผลกระทบกับระบบนิเวศวิทยาที่เห็นได้ชัดแห่งหนึ่งของโลกเกิดขึ้นบริเวณขั้วโลกเหนือ เมื่อหมีขั้วโลกซึ่งต้องเดินหากินอยู่บนแผ่นน้ำแข็ง เมื่อน้ำแข็งละลาย เขตหากินของหมีขั้วโลกแคบลง มีผลกระทบกับความอยู่รอดของหมีขั้วโลกจนมีความเสี่ยงที่จะสูญพันธุ์ได้ สัตว์อื่นๆที่เคยอยู่ในบริเวณที่มีอากาศหนาวเย็น เมื่อโลกร้อนขึ้น สัตว์เหล่านั้นก็จะพยายามปรับตัว บางชนิดก็อพยพย้ายถิ่นไปยังบริเวณที่ยังมีอากาศหนาวเย็น สัตว์เหล่านั้นมีโอกาที่จะสูญพันธุ์ได้ จากการที่ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมากในมหาสมุทรนั้นก็จะมีผลกระทบต่อสมดุลง่ายๆในน้ำทะเล สิ่งหนึ่งที่พบก็คือ สัตว์ที่มีเปลือก (shell) ห่อหุ้มร่างกายอาจจะสร้าง shell ได้ยากขึ้น ปะการัง มอลลัสก์ หรือ แพลงก์ตอน บางจำพวก ดึงคาร์บอนไดออกไซด์จากน้ำทะเลมาสร้าง shell ในรูปของ แคลเซียมคาร์บอเนต ถ้าปริมาณ CO₂ ในน้ำทะเลเพิ่มขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง นั่นก็คือ สัตว์เหล่านั้นจะขาดวัตถุดิบในการสร้าง shell ของมัน ยิ่งปริมาณ CO₂ ในน้ำทะเลเพิ่มขึ้น อัตราการโตของโครงของแพลงก์ตอนก็จะยิ่งลดลง ซึ่งเป็นผลของ CO₂ ต่อการสะสมแคลเซียมใน shell ของมัน อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์นี้ ไม่ได้เกิดเท่ากันทั่วมหาสมุทร แต่เป็นเกิดเป็นหย่อมๆ เนื่องจาก CO₂ ละลายในน้ำทะเลได้จากการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ผิวของน้ำทะเล และจากการที่มหาสมุทรมีอัตราการผสมตัวกันค่อนข้างช้า ทำให้ CO₂ ส่วนใหญ่ที่พบอยู่ในบริเวณผิวๆของมหาสมุทร หรือในทะเลตื้นๆ คือส่วนบนประมาณ 10% ของมหาสมุทร สิ่งมีชีวิตที่มีเปลือกในน้ำตื้นจึงอาจประสบปัญหาหนักที่สุด

นอกจากนี้ยังเกิดการระบาดของโรคต่างๆในหลายส่วนของโลก เช่น ในพื้นที่ที่เป็นเขตร้อน มีรายงานทางการแพทย์ว่ามีการระบาดของไข้เลือดออกซึ่งเป็นโรคในเขตร้อนในเขตเทือกเขาแอนดิส ประเทศชิลี โรคที่เคยควบคุมได้ ในเขตร้อนก็เกิดการระบาดขึ้นอีก เป็นต้น โดยที่เมื่อโลกร้อนขึ้นพาหะของโรค หรือแบคทีเรียหรือเชื้อไวรัสซึ่งต้นเหตุของโรคร้ายสามารถเจริญเติบโตและแพร่กระจายได้โดยง่าย

- เกิดฝนตกหนัก น้ำท่วม

เมื่อโลกร้อนขึ้น อัตราการระเหยของน้ำบนดินและในมหาสมุทรเพิ่มขึ้น ใอน้ำในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งใอน้ำนี้เองก็มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับแก๊สเรือนกระจก ก็ยังทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเพิ่มขึ้นอีก ทั้งหมดนี้มีผลต่อความกดอากาศของโลก ทำให้ในบางพื้นที่ที่แห้งแล้งก็เกิดฝนตก บางพื้นที่ที่เคยฝนตกก็เกิดภาวะแห้งแล้ง แม่น้ำ ลาน้ำแข็งขุด เปลี่ยนทิศทางไหล เกิดฤดูกาลที่ผิดปกติไปทั่วโลก อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลกที่สูงขึ้นและ ความกดอากาศที่เปลี่ยนแปลง ก่อให้เกิดพายุเฮอริเคน ความเร็วสูง ขนาด F-5 ที่ถล่มเมืองนิวยอร์ก

สิ้นของสหรัฐอเมริกา จากหลักฐานทางอุตุนิยมวิทยาพบว่าจำนวนของพายุทอร์นาโด พายุเฮอริเคน และพายุไต้ฝุ่นที่เกิดขึ้นในรอบปี ค.ศ. 2004 – 2005 เพิ่มจำนวนขึ้นเป็น 3 เท่าของคริสต์ศตวรรษที่ 20 เนื่องจากผลกระทบของสภาวะโลกร้อน

2.4 ทฤษฎีการดูดซับ [7]

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับ เกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ อาทิ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลงการดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นวัฏภาคคายความร้อนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดซ้อนกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

2.4.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรงแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 2. 1 การเปรียบเทียบการดูดซับทางเคมีและกายภาพ

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้ว ยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้ามและการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับพฤติกรรมของการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและเคมี

2.5 กลไกการดูดซับ

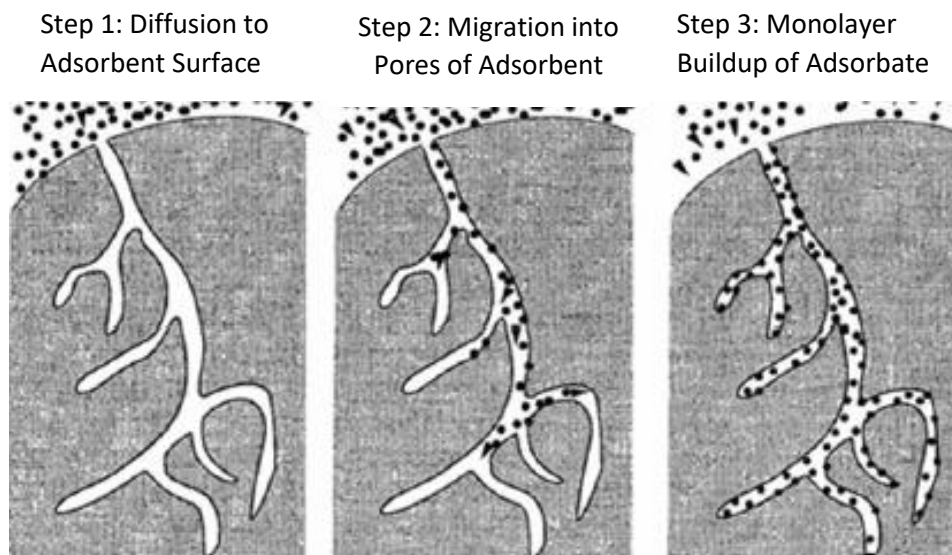
ในกระบวนการดูดซับโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้นตอนของการดูดซับ และขั้นตอนการคืนสภาพของตัวดูดซับหรือที่เรียกว่า การคายซับ (desorption) ในขั้นตอนการดูดซับนี้ สารละลายจะถูกส่งผ่านไปบนตัวดูดซับอย่างต่อเนื่องกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการทำงานของตัวดูดซับจึงได้มีการคืนสภาพให้กับตัวดูดซับนั้น ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดันของระบบ ขั้นตอนของการดูดซับบนถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ โดยแสดงกลไกการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ได้ดังรูปที่ 2.8

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับให้เข้ามาติดกับผิวนอกของตัวดูดซับ โดยสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะเคลื่อนที่ตามธรรมชาติเข้าหาตัวดูดซับหรือเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ซึ่งการแพร่กระจายจะทำให้สารที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่าและมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า แต่สำหรับสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนนั้น สารจะเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ตามทิศทางการไหลของของไหล การแพร่กระจายในระดับโมเลกุลจะเกิดขึ้นน้อยมาก โดยที่ขนาดและน้ำหนักของสารถูกดูดซับจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตะกอน และติดค้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกตะกอนในทิศทางที่กำลังเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้น ขนาดและการกระจายขนาด (size distribution) จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการเคลื่อนย้ายของสารถูกดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน Pre-diffusion เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์จะมีฟิล์มของของไหลห่อหุ้มอยู่คล้ายเยื่อต่างๆ โดยรอบ เมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้ามายังถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึง

จะสามารถเข้าไปในผิวถ่านกัมมันต์ได้จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์นี้มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ภายในโพรงที่เรียกว่า รูพรุน โดยภายในรูพรุนนี้จะมีช่องเป็นโพรงลัดเลี้ยวไปมา

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการเกาะติด โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องเกาะติดบนผิวภายในของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป ซึ่งเป็นขั้นตอนที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวภายในรูพรุนอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2. 2 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์

2.6 ถ่านกัมมันต์ [8]

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการถ่านกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอ็กซ์เรย์ คิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสี เอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์ เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือ แกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง อันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์ เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนอล (hexagonal) ทำให้ ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับ สารได้มากกว่าถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้รูพรุนหรือโครงสร้างภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม (angstrom: A) ถึง 20,000 อังสตรอม ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูง และ มีความสามารถในการ ดูดซับ (adsorption capacity) สูงด้วยเช่นกัน การวัดพื้นที่ผิวของถ่าน

กัมมันต์กระทำได้โดยการหา ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดไว้วิธีวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์อาจกระทำได้โดยการ วิเคราะห์ ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดย ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area)

ลักษณะของสารดูดซับ อุณหภูมิ และเวลาในการสัมผัส

อิทธิพลโครงสร้างของโมเลกุลของสารอินทรีย์ และปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ มีดังนี้

- ความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามความสามารถของการดูดซับของถ่านกัมมันต์
- Substituent group มีผลต่อการดูดซับดังตาราง 2.2

ตารางที่ 2. 2 ผลของ substituent group ที่มีต่อการดูดซับ

Substituent group	Effects
Hydroxyl	ความสามารถในการถูกดูดซับลดลง
Amino	คล้ายกับพวก Hydroxyl คือจำนวน amino acids ยิ่งมากยิ่งถูกดูดซับน้อย
Carbonyl	เปลี่ยนแปลงไปตามโครงสร้างของโมเลกุลเช่น glyoxylic acids ถูกดูดซับได้มากกว่า acetic acid แต่เมื่อเป็น fatty acid ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ผลการถูกดูดซับกลับแตกต่างไป
Double bond	การเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับ carbonyl
Halogen	การถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงไปไม่แน่นอน
Sulfonic	โดยปกติความสามารถในการถูกดูดซับลดลง
Nitro	ส่วนมากความสามารถในการถูกดูดซับเพิ่มขึ้น
Aromatic Rings	ความสามารถในการถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

- สารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นแขนง สามารถถูกดูดซับได้ดีกว่าพวกที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงการเพิ่มขึ้นของความยาวของ chain ทำให้ความสามารถในการละลายลดลง
- ตัวถูกละลายที่แตกตัวเป็นไอออนได้มากจะถูกดูดซับได้น้อยกว่าพวกที่แตกตัวได้น้อยโดยทั่วไป โมเลกุลที่ไม่แตกตัวจะถูกดูดซับได้ดี
- ความสามารถในการ hydrolysis แล้วเกิดเป็นกรดหรือเบสที่ถูกดูดซับได้
- ถ้ารูพรุนของถ่านไม่มีอะไรอุดตัน สารที่มีโมเลกุลใหญ่จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลเล็กซึ่งเป็นธรรมชาติทางเคมีอย่างหนึ่ง ส่วนกรณีที่ตัวถูกละลายเกิดพันธะเคมีกับถ่านกัมมันต์ การคาย (desorption) จะเกิดได้ยาก
- โมเลกุลของตัวที่ถูกละลายที่มี polarity ต่ำถูกดูดซับได้ดีกว่าพวกที่มี polarity สูง

2.6.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์ [9]

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งโดยอาศัยหลักต่างๆ มากมายขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

2.6.1.1 การแบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่
- ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ดูดซับแก๊สและไอระเหย

2.6.1.2 การแบ่งตามขนาดอนุภาค

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon) มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัดเป็นเส้นกลมๆแล้วตัดออกเป็นท่อนเท่าๆกัน หรืออาจทำเป็นเกล็ดที่ได้จากการย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย
- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon) มีลักษณะเป็นผงซึ่งได้จากการบดถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้งานเกี่ยวกับการดูดซับในสถานะของเหลว

2.6.2 การแบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (แบ่งตามเกณฑ์ของ International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)

- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สและไอระเหย
- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี
- ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กและมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

2.6.3 การแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้เพื่อดูดซับในสาร ละลาย เช่น การฟอกสีของน้ำตาลดิบให้เป็นสีขาวบริสุทธิ์ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น
- ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดสารพิษ หรือไอระเหย

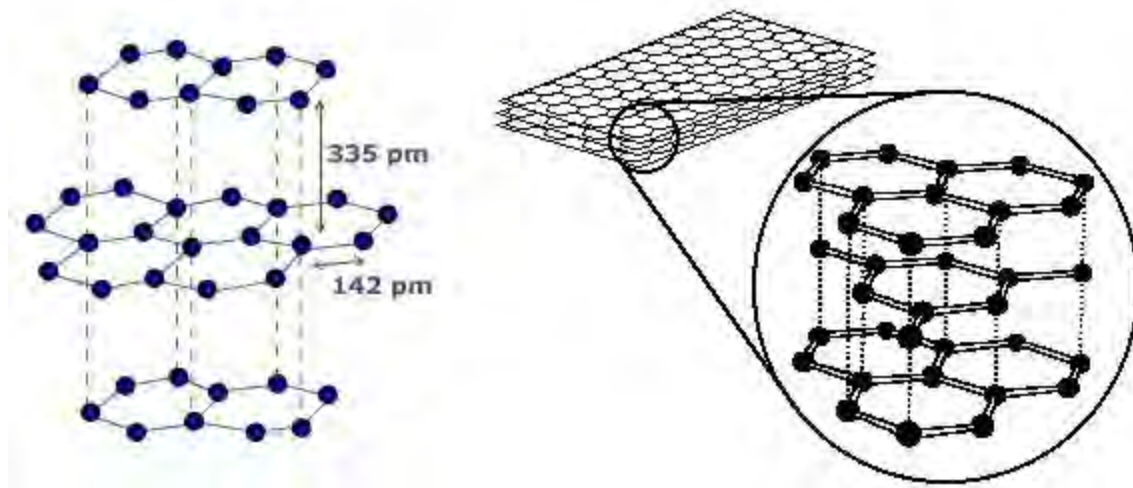
2.6.4 การแบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- สำหรับดูดซับแก๊ส (gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

- สำหรับดูดซับสี (color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวพอกสีส่วนมากเป็นถ่านที่ได้จากการเผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านตากหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล
- สำหรับดูดซับโลหะ (metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยก ทอง เงิน แพลทินัม และแร่

2.7 โครงสร้างและสมบัติพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ [10]

ผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) ส่งผลให้สามารถดูดซับสารได้มากกว่า เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ (X-ray diffraction) เห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายกับแกรไฟต์ แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ โดยที่โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัลประกอบไปด้วยชั้นอะตอมคาร์บอนที่ยึดโยงกันเป็นระนาบในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) ที่เรียกว่าชั้นแกรฟีน (grapheme layer) ซึ่งแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบในลักษณะสมมาตรกัน โดยยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.421 อังสตรอม และชั้นแกรฟีนแต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม โดยมีแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น ซึ่งจัดเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [11]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัล

จากการที่โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบน้อยกว่า โดยการจัดเรียงตัวของผลึกเป็นไปในทิศทางที่ไม่แน่นอน มีการยึดโยงและซ้อนเหลื่อมกันอย่างไม่เป็นระเบียบและมีโครงสร้างของผลึกไม่สมบูรณ์ ทำให้การสลับตาแหน่งในทิศทางขนานกับแผ่นเกิดขึ้นง่ายและมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในโครงสร้างจำนวนมาก ส่งผลให้มีช่องว่างรูพรุนเกิดขึ้น

นอกจากนี้ จากการที่โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะคล้ายแกรไฟต์โดยประกอบไปด้วยชั้นอะตอมคาร์บอนที่ยึดโยงกันเป็นระนาบในชั้นแกรไฟน์แล้ว ในระหว่างชั้นของแผ่นแกรไฟน์ยังได้มีการเกาะติดของอะตอมต่างชนิดกันหลายชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เช่นเดียวกับสาร อนินทรีย์ต่างๆ จากพวกโลหะออกไซด์และอนุภาคโลหะ อะตอมเหล่านี้พบได้ในรูปของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวทางเคมีของถ่านกัมมันต์ เช่น คาร์บอกซิล ฟีนอล คาร์บอนิล อีเทอร์ ไพโรน และโครมีน

2.8 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ [12]

กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบไปด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น

2.8.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบใดๆก็ได้ [13] ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ด้วย เช่น ไม้ ชี้เลื่อย กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด หรือวัตถุดิบที่ถ่าน เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านบิทูมินัส เป็นต้น ในการผลิตเพื่อการค้า สมบัติบางประการของวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ มีดังนี้ คือ

- มีค่าคาร์บอนคงตัวสูง (fixed carbon)
- มีปริมาณความชื้น (moisture) ต่ำ
- มีสารที่ระเหยได้ (volatile matter)
- มีปริมาณขี้เถ้า (ash) ต่ำ
- ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง

การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมแก่การผลิตนั้น นอกจากพิจารณาสมบัติบางประการของวัตถุดิบแล้ว ยังต้องคำนึงราคาต้นทุน และกระบวนการผลิตตลอดถึงวัตถุประสงค์การนำถ่าน กัมมันต์ไปใช้งานด้วย สำหรับการเตรียมวัตถุดิบ อาจนำวัตถุดิบมาร่อนคัดขนาดหรืออบเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการเผาหรือการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ซึ่งบางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ยากแก่การบดวัตถุดิบโดยตรง ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปเผาให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์ (carbonization) ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

2.8.2 การคาร์บอนไนซ์ (carbonization) [14]

การคาร์บอนไนซ์เป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (pyrolysis) ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศในอุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำเรียกว่า ชาร์ (char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ (tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์จัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิต ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากในการคาร์บอนไนซ์จะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน รวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของ

วัตถุดิบในรูปของแก๊สและน้ำมันหาร์ จากนั้นจะได้ถ่านชาร์ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยถ่านชาร์ที่ได้จากการบอไนซ์ควรมีลักษณะดังนี้

- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)

2.8.3 ขั้นตอนการกระตุ้น (Activation process)

การกระตุ้นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์ในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด ซึ่งเป็นขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพการดูดซับให้กับถ่านกัมมันต์ จะมีทั้งกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์โดยตรง และกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านชาร์ จากนั้นจึงเปลี่ยนถ่านชาร์ไปเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี ดังนี้

2.8.3.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นขั้นตอนการทำให้ถ่านชาร์เกิดการพัฒนารูพรุนได้มากขึ้น โดยการออกซิไดซ์ด้วยแก๊ส เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือไอน้ำ (H₂O) เป็นต้น โดยใช้อุณหภูมิกระตุ้นค่อนข้างสูงในช่วง 800-1,100 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ ซึ่งในระหว่างการกระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ระหว่างแก๊สออกซิไดซ์กับสารระเหยที่ตกค้างอยู่ในถ่านชาร์และอะตอมคาร์บอน ทำให้มีการพัฒนารูพรุนเกิดขึ้น ในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ไอน้ำ ที่ใช้ต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated steam) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายตัวไป โดยเมื่อไอน้ำสัมผัสกับถ่านชาร์จะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันขึ้นระหว่างไอน้ำและอะตอมคาร์บอน ตามสมการปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า Syngas ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H₂) โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นบางส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำควบคู่ไปด้วย ดังสมการ (2.6.2) ทำให้มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในระบบ ส่วนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สมการปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่นี้หลุดออกไป จะทำให้โครงสร้างภายในของถ่านชาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป แต่รูพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ และจากการที่ไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนพร้อมทั้งดูดความร้อนจากผิวคาร์บอนนี้ ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูดความร้อน (endothermic reaction) ข้อดี

ของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้คือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้ไม่มีสารเคมีตกค้างเหมือนการกระตุ้นทางเคมีจึงสามารถนำไปใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องล้างสารเคมีที่ตกค้างออก

2.8.3.2 การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation)

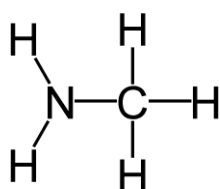
เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการผสมสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นเข้ากับวัตถุดิบ จากนั้นนำวัตถุดิบที่ได้ไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกันในช่วงประมาณ 400-700 องศาเซลเซียส ขึ้นกับสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น โดยสารเคมีที่นิยมใช้กันมากมักมีคุณสมบัติดูดน้ำได้ (dehydrating agent) เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2), ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S), โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (KSCN), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นต้น ในการทำให้เกิดรูพรุนนั้นทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบร่วมกับสารเคมี โดยสารเคมีนี้มีบทบาทในการทำลายโครงสร้างเดิมของวัตถุดิบ เมื่อนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน จะเกิดการสลายตัวของสารองค์ประกอบอินทรีย์บางชนิดบนผิวของวัตถุดิบ ทำให้โครงสร้างเกิดการเชื่อมไขว้กันเกิดเป็นโครงข่ายรูพรุน ในการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะยังคงมีสารองค์ประกอบบางชนิดที่ไม่สามารถสลายตัวออกไปได้ ส่งผลให้ได้เนื้อถ่านเพิ่มขึ้น และเกิดทาร์หรือน้ำมันดินได้น้อยลง และจากการที่สารเคมีที่ใช้แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านเกิดการหดตัวได้น้อย และเมื่อนำมาล้างสารเคมีออกจะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งในการกระตุ้นด้วยวิธีนี้อาจมีปัญหาในเรื่องของสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ได้

2.9 เอมีน [15]

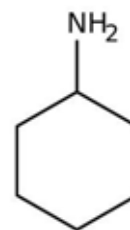
เอมีนเป็นอนุพันธ์ของแอมโมเนียที่มีหมู่อัลคิลหรือหมู่อาริลหนึ่งหมู่หรือมากกว่าแทนที่อะตอมไฮโดรเจน หรือเกิดพันธะกับอะตอมไนโตรเจนมีสมบัติเป็นทั้งเบสและนิวคลีโอไฟล์เพราะไนโตรเจนอะตอมมีอิเล็กตรอนคู่อิสระ หมู่ฟังก์ชันของเอมีนคือ หมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$)

สามารถแบ่งสารประกอบเอมีนตามจำนวนหมู่อัลคิลหรือหมู่อาริลที่เกิดพันธะกับอะตอมไนโตรเจน ถ้าสารประกอบเอมีนมีจำนวนหมู่อัลคิลหรือหมู่อาริล 1 หมู่เกิดพันธะกับอะตอมไนโตรเจนเรียกว่า เอมีนปฐมภูมิ ถ้ามีหมู่อัลคิลหรืออาริล 2 หมู่เรียกว่า เอมีนทุติยภูมิ และถ้ามีหมู่อัลคิลหรืออาริล 3 หมู่เรียกว่า เอมีนตติยภูมิ ดังตัวอย่าง

เอมีนปฐมภูมิ (primary amine, 1)

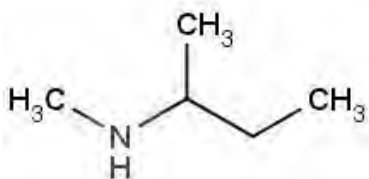


Methylamine

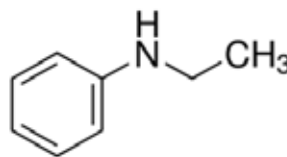


cyclohexylamine

เอมีนทุติยภูมิ (secondary amine, 2)

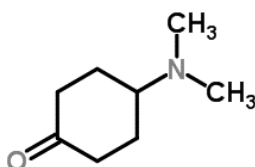


N - methyl - 2 - butanamine

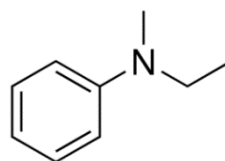


N - ethylaniline

เอมีนตติยภูมิ (tertiary amine, 3)



3 - (dimethylamino) cyclohexanone



N, N - ethylmethylaniline

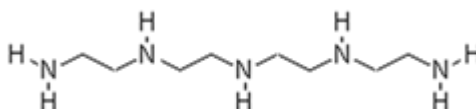
รูปที่ 2. 4 แสดงโครงสร้างเอมีนปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ตติยภูมิ

2.9.1 สมบัติทางกายภาพของเอมีน

เอมีนเป็นโมเลกุลมีขั้ว มีค่าโมเมนต์ขั้วคู่ค่อนข้างสูงเพราะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนอะตอมไนโตรเจน เอมีนสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ แต่พันธะ N---H-N นั้นจะอ่อนกว่า O---H-O เพราะไนโตรเจนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีน้อยกว่าออกซิเจน ดังนั้นเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิสามารถ เกิดพันธะ N-H หรือพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ ส่วนเอมีนตติยภูมิไม่สามารถเกิดได้เพราะไม่มีอะตอมไฮโดรเจนที่เกาะอยู่กับอะตอมไนโตรเจนเหลืออยู่เลย แต่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารที่มีพันธะ O-H หรือ N-H อยู่ในโมเลกุล เช่นโมเลกุลของน้ำ เอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิมีจุดเดือดต่ำกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ แต่สูงกว่าจุดเดือดของอีเทอร์ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน ส่วนเอมีนชนิดตติยภูมิไม่มีพันธะไฮโดรเจนจึงมีจุดเดือดต่ำกว่าจุดเดือดของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน

2.9.2 เตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine; TEPA) [16]

เตตระเอทิลีนเพนตามีนหรือเรียกโดยย่อว่า TEPA มีสูตรโมเลกุลคือ $C_8H_{23}N_5$ มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีมวลโมเลกุล 189.31 กรัมต่อโมล เตตระเอทิลีนเพนตามีนเป็นสารประกอบเอมีนที่มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนทั้งชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิ



รูปที่ 2. 5 โครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตามีน

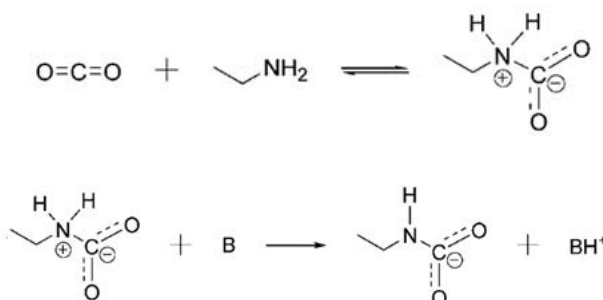
เตตระเอทิลีนเพนตามีน มีจุดเดือด 340.3 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวที่ -30 องศาเซลเซียสจึงมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 0.998 กรัมต่อมิลลิลิตรที่ 25 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นของไอเท่ากับ 6.53 (ของอากาศเท่ากับ 1.0) สามารถละลายได้ในน้ำ แต่สามารถละลายได้ดีกว่าในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvents) เช่น เอทานอล (Ethanol) หรือน้ำมัน เป็นต้น เตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) มีจุดวาบไฟที่ 163 องศาเซลเซียส และสามารถถูกติดไฟได้เองที่อุณหภูมิ 321.11 องศาเซลเซียส

2.9.3 ปฏิกริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีน [17]

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากเบสลิวอิสได้ เอมีนจัดว่าเป็นเบสลิวอิส (Lewis base) เพราะที่หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ประกอบด้วยไนโตรเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทั้งสองจึงสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา และกรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา

2.9.4 กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In absence of water)

เอมีน 1 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุลโดยให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ และกลายเป็น สวิทเทอร์ไอออน (Zwitterion) จากนั้นเอมีนอีก 1 โมเลกุลทำการดึงโปรตอนจากสวิทเทอร์ไอออนเกิดเป็นเกลือของแอมโมเนียมและคาร์บาเมต (Carbamate) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะไม่มีความชื้น

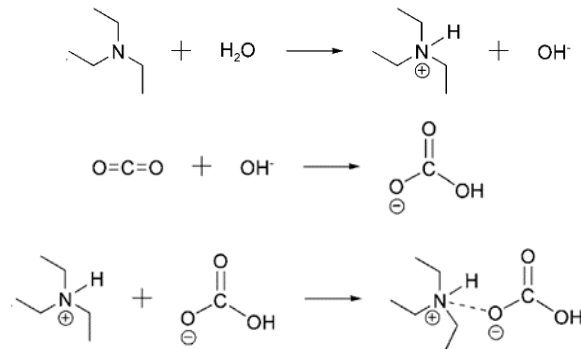
ซึ่ง B หมายถึง เอมีนชนิดปฐมภูมิ (Primary) หรือทุติยภูมิ (Secondary)

สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกริยานี้คือ 2:1 เกิดขึ้นกับเอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ (Primary/Secondary amines)

2.9.5 กรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In presence of water)

สำหรับเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amines) มักจะเกิดปฏิกิริยาประเภทนี้ กล่าวคือไนโตรเจนบนเอมีนให้อิเล็กตรอนกับน้ำ 1 โมเลกุล ได้ควอเทอร์นารีแคทไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน จากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล กลายเป็นไบคาร์บอเนตแอนไอออน

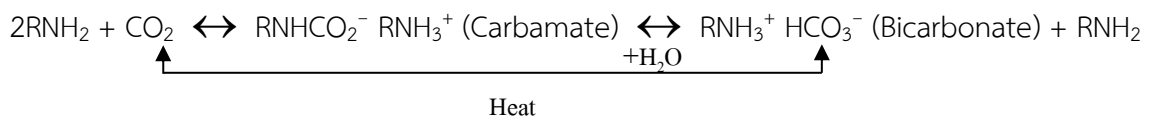
จากนั้นควอเทอร์นารีแคทไอออนและไบคาร์บอเนตแอนไอออนจะจับกันด้วยแรงระหว่างไอออน ดังสมการ



รูปที่ 2. 7 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะที่มีความชื้นโดยสัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 1:1 เกิดขึ้นกับเอมีนชนิดตติยภูมิ (Tertiary amines)

นอกจากนี้ เอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิสามารถเกิดปฏิกิริยานี้ได้เช่นกัน โดยมีพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าการเกิดเป็นคาร์บาเมท สำหรับเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิจะเกิดเป็นคาร์บาเมทก่อนแล้วจึงเกิดต่อเป็นไบคาร์บอเนต

ดังสมการ



โดยที่สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 1:1

2.10 เทคนิคอื่นๆในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [18]

การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้เงินลงทุนประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด รวมทั้งการขนส่งและการฝังเก็บ ดังนั้น การลดต้นทุนในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้โรงงานต่างๆสามารถติดตั้งหน่วยแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้จริง ซึ่งเทคโนโลยีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวในบทความนี้ประกอบไปด้วย เทคนิคการดูดซึม (absorption) เทคนิคการดูดซับ (adsorption) และเทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน (membrane) ซึ่งการเลือกเทคโนโลยีการแยกเหล่านี้ให้เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของแก๊สผสมที่ปล่อยออกมา เช่นในเทคโนโลยีการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้จะมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 40 ที่ความดันประมาณ 20 บาร์ ในกรณีนี้ใช้เทคนิคการดูดซึมแบบกายภาพ (physical

absorption) ก็เพียงพอแล้วที่จะสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้ เมื่อดูดซึมมาได้แล้วก็ทำการลดความดันทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมา ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานในการรีเจนเนอเรตสารดูดซึม

2.10.1 การดูดซึม (absorption)

ในเทคนิคนี้จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption) และการดูดซึมทางเคมี (chemical absorption)

2.10.1.1 การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption)

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมทางกายภาพในตัวทำละลายโดยใช้กฎของเฮนรี (Henry's Law) ซึ่งทำให้การดูดซึมทางกายภาพนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูงโดยตัวดูดซึมสามารถรีเจนเนอเรตได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน การที่อันตรปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์และตัวดูดซึมต่ำ ส่งผลทำให้การรีเจนเนอเรตไม่ใช้พลังงานที่สูงมาก ตัวดูดซึมที่ใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เช่น เมทานอล โดเมทิลอีเทอร์ พอลิเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนคาร์บอเนต เป็นต้น

2.10.1.2 การดูดซึมทางเคมี (chemical absorption)

ในกรณีที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่ในแก๊สผสมในระดับต่ำจำเป็นต้องใช้ตัวดูดซึมที่มีแรงทางเคมี เพื่อให้เกิดการเลือกดูดซับเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สกรด ตัวดูดซึมทางเคมีที่ใช้จึงมีคุณสมบัติเป็นเบส โดยตัวดูดซึมทางเคมีที่จะทำการรีเจนเนอเรตได้เช่นเดียวกับตัวดูดซึมทางกายภาพ คือให้ความร้อนแต่จะใช้พลังงานสูงกว่าเพื่อเป็นการทำลายพันธะทางเคมี ซึ่งตัวดูดซึมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้แก่ สารละลายที่มีอนุพันธ์ของหมู่เอมีน และสารละลายแอมโมเนีย

การดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน เช่น โมโนเอทานอลามีน มีการใช้มายาวนานกว่า 60 ปีในโรงงานอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ ปฏิกริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และโมโนเอทานอลามีนแสดงดังสมการที่ 2 การดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน เช่น โมโนเอทานอลามีน มีการใช้มายาวนานกว่า 60 ปีในโรงงานอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ

โมโนเอทานอลามีนจะดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสม จากนั้นสารละลายจะผ่านไปยังหน่วยรีเจนเนอเรตโดยสารละลายจะไหลสวนทางกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 100–200 องศาเซลเซียส ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกถ่ายโอนมายังสายของไอน้ำจากนั้นทำการลดอุณหภูมิของสายไอน้ำลงทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำกลายเป็นของเหลว แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะถูกแยกออกมาได้ อย่างไรก็ตามการใช้โมโนเอทานอลามีนมีข้อเสียคือ (1) ประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ (กรัมของ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของโมโนเอทานอลามีนต่ำ) (2) อัตราการกัดกร่อนเครื่องมือที่สูงเนื่องจากความเป็นเบส (3) การสลายตัวของโมโนเอทานอลามีนโดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และออกซิเจน ดังนั้นก่อนที่จะทำการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำเป็นต้องกำจัดแก๊สเหล่านั้นเสียก่อน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง (4) การใช้พลังงานที่สูงในระหว่างการรีเจนเนอเรต

2.10.2 เมมเบรน (Membrane)

วิธีใหม่อีกวิธีหนึ่งในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือการใช้การเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน ซึ่งเมมเบรนสามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมจากการกักเก็บหลังการเผาไหม้ การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สธรรมชาติ และการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการกักเก็บก่อนการเผาไหม้

การแยกโดยเมมเบรนใช้กลไกหลายอย่างได้แก่ การละลาย/การแพร่ การดูดซับ/การแพร่ การเลือกผ่าน/การถ่ายโอนด้วยไอออน โดยใช้วัสดุได้หลากหลาย เช่น ออร์แกนิก (พอลิเมอร์) อินออร์แกนิก (คาร์บอน ซีโอโลท์ เซรามิก หรือโลหะ) ซึ่งเป็นได้ทั้งวัสดุที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุน การศึกษาการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไนโตรเจนพบว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านได้ดีและมีค่าการเลือกผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจนที่สูง

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญญา มณีจักร และคณะ [19] ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง โดยถ่านคาร์บอนไนซ์สามารถเตรียมได้จากการเผาลูกหูกวางที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขณะที่ถ่านกัมมันต์เตรียมได้โดยการกระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์ด้วยกรดซัลฟูริก ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวของการดูดซับในถ่านสังเคราะห์ทั้งสองชนิดด้วยเครื่องบลูเนอรเอลเม็ทเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกันคือ พื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านคาร์บอนไนซ์มีขนาดเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรดต่าง อัตราเร็วรอบ และเวลาในการปั่นกววน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ นอกจากนี้ได้ศึกษากลไกการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิชของการดูดซับของสารละลายไอโอดีน จากกลไกการดูดซับไอโอดีน พบว่าค่า R^2 ของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางสอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มฟรุนดิช ซึ่งแสดงกลไกการดูดซับไอโอดีนเป็นแบบหลายชั้น ส่วนถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์การค้ำจะมีค่า R^2 สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ แสดงว่ากลไกการดูดซับไอโอดีนเป็นแบบชั้นเดียว

ธีรดิษฐ์ โปธิตันติมงคล [20] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเพื่อใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงประมาณ 600 – 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.20 – 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 80 – 90 ซึ่งได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว ขุยมะพร้าว เปลือกปาล์ม ไม้เนื้อแข็ง ขั้นตอนในการเตรียมถ่านกัมมันต์มี 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้น ในขั้นตอนการกระตุ้นมี 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี เมื่อเปรียบเทียบการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี พบว่า การกระตุ้นทางเคมีมีการศึกษาและนำไปใช้งานมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้นในการกระตุ้น แต่ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง สารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผลิตได้มีการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นการกำจัดสารมลพิษในน้ำที่ใช้งาน

อย่างแพร่หลาย และพบว่าถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถกำจัดสารมลพิษต่างๆ ได้แก่ โลหะหนัก สีย้อม สารกลุ่มฟีนอล สารฆ่าแมลง และศัตรูพืชในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Yen-Hua Chen และคณะ [21] ได้ศึกษาการดัดแปรเอมีนบนเคลโอลิไนท์เพื่อส่งเสริมการดูดซับ CO₂ โดยมีจุดประสงค์เพื่อเตรียมตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและราคาถูกสำหรับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับบนตัวเคลโอลิไนท์ (Kaolinite) ที่ดัดแปรด้วยเอมีนโดยใช้วิธีการตรึงแบบเปียก (Wet impregnation) การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis) แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเคลโอลิไนท์ (3.3 มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถเพิ่มขึ้นด้วยการดัดแปรเอมีนเมื่อเพิ่มปริมาณเอมีนบนตัวดูดซับเคลโอลิไนท์จะยิ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าเคลโอลิไนท์ที่ดัดแปรด้วย 4MEA+1EDA ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักจะแสดงความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด (149.0 มิลลิกรัมต่อกรัม) จากผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปคโตร-สโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) ทำให้ทราบว่า การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนเคลโอลิไนท์ที่ถูกดัดแปรด้วยเอมีนเกิดขึ้นผ่านการดูดซับทางเคมี นอกจากนี้ยังกล่าวได้อีกว่าเคลโอลิไนท์มีราคาที่ไม่แพงและหาได้ทั่วไปคือดูดซับของแข็งที่มีศักยภาพและยังเป็นตัวดูดซับที่ดีสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำการการดัดแปรเอมีน

Javier และคณะ [22] ในงานวิจัยนี้ผลิตถ่านกัมมันต์จากฟางข้าวบาร์เลย์ ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ในการทดลองใช้สภาวะที่แตกต่างกันเพื่อหาสภาวะที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด และให้ รูพรุนมากที่สุด โดยตัวแปรที่ศึกษา อุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุดในช่วงคาร์บอนไนซ์เซชัน (carbonization) ในขณะที่ขั้นการกระตุ้น ตัวแปรที่ส่งผลคือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในขั้นการกระตุ้นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์คือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเวลาที่ให้ความร้อน 1 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิวจำเพาะ 789 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครพอร์ 0.3268 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ในส่วนการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และเวลาที่ให้ความร้อน 1 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิวจำเพาะ 552 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครพอร์ 0.2304 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

Sepideh และคณะ [23] ศึกษาผลของวิธีกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์นี้เตรียมจากถ่านชีวภาพที่มาจากกากการแยกสลายด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วของไม้เนื้อขาว ซึ่งการกระตุ้นทำโดย 3 วิธีที่แตกต่างกัน คือ การกระตุ้นด้วยไอน้ำ การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พฤติกรรมในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของถ่านกัมมันต์ได้ทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่งที่ความดันบรรยากาศ ในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยโมล ในแก๊สฮีเลียม เพื่ออธิบายผลของพื้นที่ผิว รูพรุน และเคมีพื้นผิวที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ การวิเคราะห์ลักษณะรูพรุนขนาดเมโซ และรูพรุนขนาดไมโครทำได้โดยใช้แก๊สไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 77 และ 273 เคลวินตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาตรรูพรุนขนาดไมโคร 0.62 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และพื้นที่ผิว 1400 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดถึง 1.8 โมลต่อกิโลกรัม เนื่องจากมีรูพรุน

ขนาดไมโครพอร์ และมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เมทานอล (Methanol)
- 2) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (Tetraethylenepentamine, TEPA)
- 3) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid)
- 4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide)
- 5) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide Gas)
- 6) แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen Gas)
- 7) น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- | | |
|------------------------------|-------|
| 1) ปีกเกอร์ ขนาด 25 ml | 2 ใบ |
| 2) ปีกเกอร์ ขนาด 200 ml | 1 ใบ |
| 3) ปีกเกอร์ ขนาด 1000 ml | 1 ใบ |
| 4) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 200 ml | 1 ขวด |
| 5) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 ml | 1 ขวด |
| 6) แท่งคนสาร | 1 อัน |
| 7) ช้อนตักสาร | 1 อัน |
| 8) กระจกตวง ขนาด 50 ml | 1 ใบ |
| 9) ขามระเหย | 1 ใบ |
| 10) กรวย | 1 ใบ |
| 11) ครกบด หยาบ | 1 ใบ |
| 12) ครกบดละเอียด | 1 ใบ |
| 13) ขวดสีชา | 6 ขวด |
| 14) กรวยกรองบุชเนอร์ | 1 อัน |
| 15) ขวดบุชเนอร์ | 1 ขวด |
| 16) ป้อน | 1 อัน |
| 17) กระจกกรอง | |
| 18) กระจกลิตมัส | |

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- เครื่องทดสอบการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- เครื่อง Perkin-Elmer ใช้วิธี FT-IR ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน
- เครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN628

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 เตรียมกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 2 กรัม กรด : 1 กรัม คาร์บอน จำนวน 250 มิลลิลิตร

1. ชั่งกรดฟอสฟอริก 85%โดยน้ำหนัก จำนวน 78.33 กรัม
2. นำกรดฟอสฟอริกเทลงในขวดวัดปริมาตรที่มีน้ำอยู่แล้ว
3. ปรับปริมาตร จนได้สารละลายปริมาตร 250 มิลลิลิตร

3.4.2 เตรียม KOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จำนวน 200 มิลลิลิตร

1. ชั่ง KOH 1.12 กรัม
2. ละลาย KOH ในบีกเกอร์
3. นำไปปรับปริมาตรโดยการเติมน้ำปราศจากประจุลงในขวดวัดปริมาตร 200 มิลลิลิตร

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. บดถ่านไม้ไฟโดยใช้ครกบดหยาบและครกบดละเอียด
2. กรองแยกด้วยตะแกรงร่อน (sieve)
3. อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง
4. กระตุ้นทางกายด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยดำเนินการในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นดำเนินการภายใต้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
5. กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกโดยการผสมกรดกับคาร์บอนในอัตราส่วน 15 มิลลิตรกรด ต่อ 6 กรัมคาร์บอน
6. นำไปเข้าอ่างสั่นคลื่นความถี่สูง (Sonicator bath)
7. อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง
8. กระตุ้นทางกายด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) โดยดำเนินการในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง
9. ทำให้คาร์บอนเป็นกลางโดยการล้างคาร์บอนด้วย KOH 1 โมลาร์และน้ำปราศจากประจุ โดยใช้กระบวนการกรองโดยใช้สุญญากาศ (Vacuum filtration)
10. อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง
11. นำ เมทานอล ใส่ลงในผงคาร์บอนให้ทั่ว
12. ทำการฝังตัว (Impregnation) ด้วย TEPA ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนสารตัวอย่าง 1 กรัม ต่อ TEPA 0.6 กรัม
13. อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง
14. นำตัวดูดซับมาทดสอบด้วยทดสอบการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์
 - 14.1 ทำให้ร้อนก่อน (Preheat) ภายใต้บรรยากาศฮีเลียม ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 40 นาที
 - 14.2 ทำให้เย็นลง (Cool down) ภายใต้บรรยากาศฮีเลียม จนถึงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง (30 50 70 90 110 องศาเซลเซียส)
 - 14.3 เมื่อถึงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง เปลี่ยนเป็นบรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์
 - 14.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) ตรวจจับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก

3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

3.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานซโฟร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

นำตัวดูดซับปริมาณ 0.05 กรัม มาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จากนั้นทำการอัด ขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดเล็ก แล้วนำไปใส่ใน sample holder จากนั้นบรรจุเข้าเครื่องฟูเรียร์ทรานซโฟร์ม อินฟราเรดสเปก

โทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ (Ultimate analysis)

ซึ่งตัวดูดซับปริมาณ 0.002 กรัม บรรจุลงในฟอยล์สำหรับบรรจุสารแล้วทำการพับให้มิดชิด จากนั้นนำฟอยล์ที่บรรจุตัวดูดซับบรรจุลงในเครื่อง CHNS analyzer จากนั้นทำการวิเคราะห์โดย ทำซ้ำตัวละ 2 ครั้ง

3.5.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ได้ใช้วิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET)

ด้วยเครื่องวิเคราะห์หี้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 โดยปริมาตรของรูพรุนได้มาจากการวัดปริมาตรสารที่ถูกดูดซับหลังจากการควบแน่นในหลอดคาปิลลารี ภายใต้ความดันสัมพัทธ์ Surface Area and Porosity Analyzer (BET),

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะ

4.1.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และรัศมีของตัวดูดซับด้วยเทคนิค การดูดซับและคายซับด้วยไนโตรเจน

ตารางที่ 4. 1. ตารางแสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และรัศมีของตัวดูดซับก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอสฟอริก

BET analysis	BET surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Average pore hydraulic radius (Å)
BB	51.5186	0.029354	4.6938
BB700	254.2680	0.148465	4.9852
BB700,H ₃ PO ₄ (1:2)	7.2454	0.006272	7.9756

โดยที่ BB คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ไม่ทำการกระตุ้น

BB700 คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ทำการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

BB700,H₃PO₄(1:2) คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ในอัตราส่วน 1 กรัมตัวดูดซับไม้ไผ่ต่อ 2 กรัมกรดฟอสฟอริก

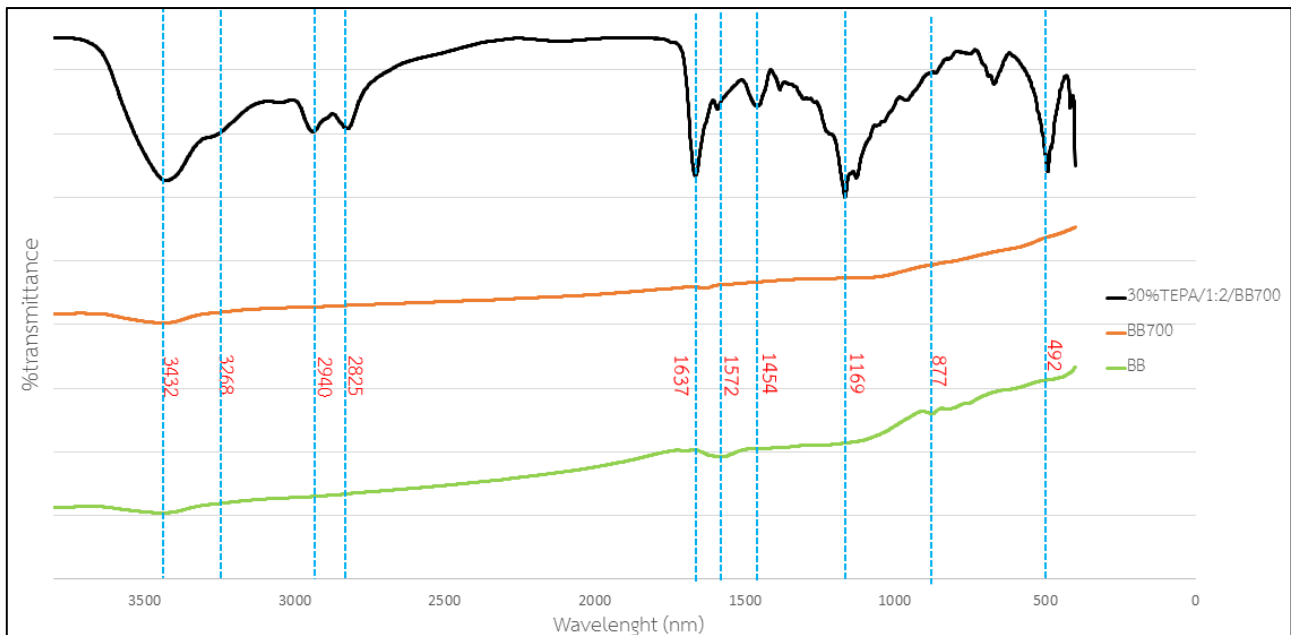
จากการพิจารณาคุณสมบัติความพรุนของตัวดูดซับสังเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับก่อนทำการกระตุ้น และตัวดูดซับหลังทำการกระตุ้นทางกายภาพด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ การกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และรัศมีรูพรุน พบว่า หลังทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 51.5186 เป็น 254.2680 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 5 เท่าเนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนของตัวดูดซับดังสมการ



จากสมการการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอน จะเกิดโครงสร้างรูพรุนขนาดไมโครพอร์เพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีศึกษากระตุ้นทางกายภาพด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสให้รูพรุนขนาดไมโครพอร์มากที่สุด แต่หากเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 700 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ทำให้โครงสร้างรูพรุนขนาดไมโครพอร์ถูกทำลาย[22] สภาวะในการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 700 องศาเซลเซียสจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ หากพิจารณาปริมาตรรูพรุนก่อนการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และหลังกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาตรเท่ากับ 0.029354 และ 0.148465 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนก่อนการกระตุ้นน้อยกว่าหลังการกระตุ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ช่วยเพิ่มโครงสร้างรูพรุนขนาดไมโครพอร์

เมื่อตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสแล้ว จากนั้นนำไปกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ในอัตราส่วน 1 กรัมต่อตัวดูดซับไม่ไฟต์ต่อ 2 กรัมกรดฟอสฟอริก จากตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเหลือ 7.2454 ตารางเมตรต่อกรัม จากตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นเพียงคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 254.2680 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่เหลือเพียง 0.006272 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องมาจากกรดฟอสฟอริกมีผลทำให้รูพรุนเกิดการขยายตัว ซึ่งให้ขนาดรูพรุนขนาดเมโซพอร์ซึ่งเหมาะสมต่อการดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน โดยกรดฟอสฟอริกจะเป็นเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาละลายตัวของพันธะและยังเป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาควบแน่น(Dehydration) [25] กำจัด C และ H ซึ่งสอดคล้องกับผล การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) บนตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN Element Analysis (CHN)

4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy



รูปที่ 4. 1 กราฟแสดงสเปกตรัมฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ของตัวดูดซับไม้ไผ่ ก่อนและหลังดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล

- โดยที่ BB คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ยังไม่ได้ทำการกระตุ้น
- BB700 คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่หลังจากกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
- 1:2/40%TEPA คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่หลังจากกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดฟอสฟอริก ในอัตรา 1 กรัมตัวดูดซับ ต่อ 2 กรัมกรดฟอสฟอริก และดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล

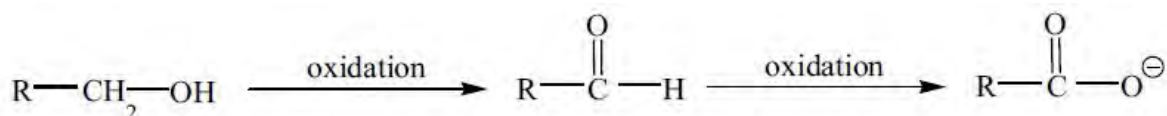
การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับไม้ไผ่โดยใช้วิธีสเปกตรัมฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) แสดงผลดังรูปที่ 4.1 สามารถอธิบายได้จากแถบการสั่นในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 แถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ

Functional Group	Characteristic Absorptions (cm ⁻¹)
O-H	3200 - 3500
N-H	3100 - 3500
-CH ₂ -	2800 - 2980
C=O	1750 - 1540
P=OOH	900 - 1300
C-O	1000 - 1300
C-P	500 - 600

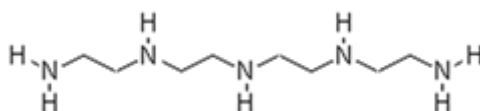
จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาตัวดูดซับไม่ไผ่ที่ยังไม่ได้ทำการกระตุ้นตำแหน่งพีคที่ 1572 cm⁻¹ ซึ่งอยู่ในช่วง 1750 - 1540 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C=O หรือ COO⁻ และตำแหน่งที่ 1058 cm⁻¹ เป็นการสั่นของหมู่เอสเทอร์ C-O ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของออกซิเจน มีความเข้มข้นมากกว่าตัวดูดซับไม่ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ปริมาณสารระเหยถูกกำจัดออกไปมาก ทำให้ตัวดูดซับมีความเข้มข้นของแถบดังกล่าวน้อย โดยที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่สลายไปยังมีส่วนเป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่ นอกจากนี้ที่ความยาวคลื่นที่ 3432 cm⁻¹ เป็นแถบแสดงการสั่นของ O-H ซึ่งจริงๆ แล้วไม่ควรที่จะพบแถบการสั่นที่บริเวณนี้ อาจจะเป็นเพราะในตัวดูดซับยังมีความชื้นหลงเหลืออยู่

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับไม่ไผ่หลังจากกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอสฟอริก และตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล พบว่าการสั่นตำแหน่งพีคที่ 1637 cm⁻¹ อยู่ในช่วง 1750 - 1540 cm⁻¹ เป็นการสั่นของหมู่ C=O หรือ COO⁻ ซึ่งมีความเข้มข้นกว่าตัวดูดซับทั้ง 2 แบบที่กล่าวไปข้างต้น เนื่องจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเปลี่ยนหมู่ -OH ไปเป็นหมู่ C=O หรือ COO⁻ ตามสมการ



ซึ่งสัมพันธ์กับผลจากเทคนิค CHN Element Analysis (CHN) ดังตารางที่ 4.3 พบว่าสัดส่วนของออกซิเจนสูงขึ้นจาก 12.735 เป็น 30.960 เมื่อทำการกระตุ้นตัวดูดซับด้วยกรดฟอสฟอริก นอกจากนี้แถบของการสั่นในช่วง 600-500 cm⁻¹ เป็นการสั่นของหมู่ C-X โดย X เป็นไปได้ว่าจะเป็นฟอสฟอรัส เนื่องจากการกระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารกระตุ้นกับโครงสร้างของถ่านกัมมันต์เป็นการแทรกตัวของสารกระตุ้นในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ทำให้โครงสร้างถ่านกัมมันต์มีรูพรุนเพิ่มขึ้น

พิจารณาแหล่งพีคที่ 3268 cm⁻¹ อยู่ในช่วง 3100 - 3500 cm⁻¹ สัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดหดสมมาตรของพันธะ N-H (NH และ NH₂) ซึ่งเป็นผลมาจากการตัดแปรตัวดูดซับด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ซึ่งประกอบด้วยเอมีนปฐมภูมิ และเอมีนทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4. 2 โครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน

นอกจากนั้น ตัวดูดซับที่ดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ยังพบว่ามี การสั่นแบบยืดหดไม่สมมาตรของ C-H (CH₂) และ N-CH₂ ตำแหน่งที่ 2943 และ 2825 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับผล CHN Element Analysis (CHN) ในตารางที่ 4.3

4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) บนตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN Element Analysis (CHN)

ตารางที่ 4. 3 ตารางแสดงร้อยละของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ของตัวดูดซับไม้ไผ่ ก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดฟอสฟอริก และการดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน

Sample	C	H	N	O
BB	80.200	2.430	0.935	16.025
BB700	84.775	1.390	0.915	12.735
40%TEPA/H ₃ PO ₄ (1:2)/BB700	57.380	3.015	8.170	30.96

โดยที่ BB คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่ก่อนการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และฟอสฟอริก และก่อนดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน

BB700 คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่หลังจากการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ

700 องศาเซลเซียส

40%TEPA/H₃PO₄(1:2)/BB700 คือ ตัวดูดซับไม้ไผ่หลังจากการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดฟอสฟอริกในอัตรา 1 กรัมตัวดูดซับ ต่อ 2 กรัมกรดฟอสฟอริก และดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล

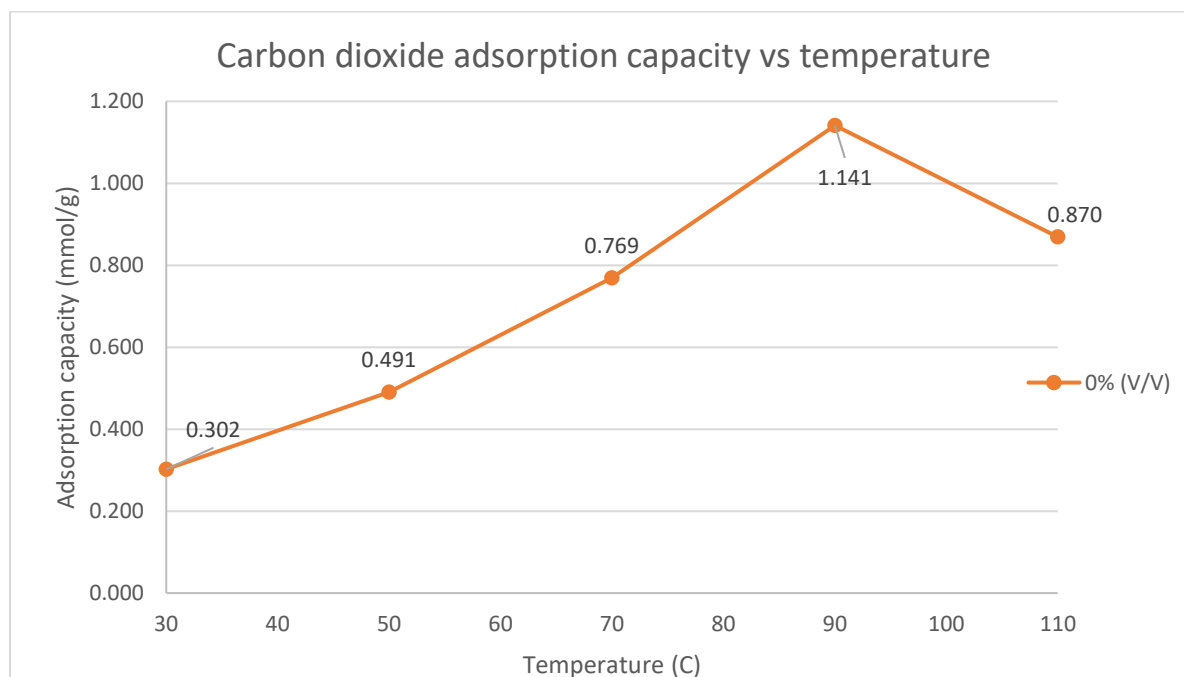
จากการวิเคราะห์ร้อยละของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนบนตัวดูดซับไม้ไผ่ก่อน และหลังการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าหลังการกระตุ้นสัดส่วนของ ไฮโดรเจนไนโตรเจน ออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 2.430 0.935 16.025 เหลือเพียงร้อยละ 1.390 0.915 และ 12.735 ตามลำดับ เนื่องจากการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

(gasification) ระหว่างแก๊สออกซิไดซ์กับสารระเหยที่ตกค้างอยู่ในถ่านชาร์ ทำให้มีการพัฒนาารุพจนเกิดขึ้น [8] สารอินทรีย์หรือปริมาณสารระเหย เช่น น้ำ เซลลูโลส เอสเทอร์ แอลดีไฮด์ และคีโตน ที่เป็นองค์ประกอบเกิดการสลายพันธะและมีปริมาณน้อยลง ทำให้สัดส่วนของคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 80.200 เป็นร้อยละ 84.775

เมื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับไม้ไผ่หลังจากกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (BB700) กับตัวดูดซับไม้ไผ่หลังจากกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดฟอสฟอริกในอัตรา 1 กรัมตัวดูดซับ ต่อ 2 กรัมกรดฟอสฟอริก และตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล(40%TEPA/H₃PO₄(1:2)/BB700) พบว่า สัดส่วนของออกซิเจนใน 40%TEPA/H₃PO₄(1:2)/BB700 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.735 เป็น 30.960 เนื่องจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเปลี่ยนหมู่ -OH ไปเป็นหมู่ C=O ในขณะที่เมื่อทำการตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน สัดส่วนไฮโดรเจน ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.015 และร้อยละ 8.170 ตามลำดับ จากก่อนการตัดแปรด้วย เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 1.390 และร้อยละ 0.915 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของร้อยละธาตุดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงตัวดูดซับได้ถูกตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ซึ่งประกอบด้วยเอมีนปฐมภูมิ และเอมีนทุติยภูมิ

4.2 ผลของตัวแปรต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Operating temperature)

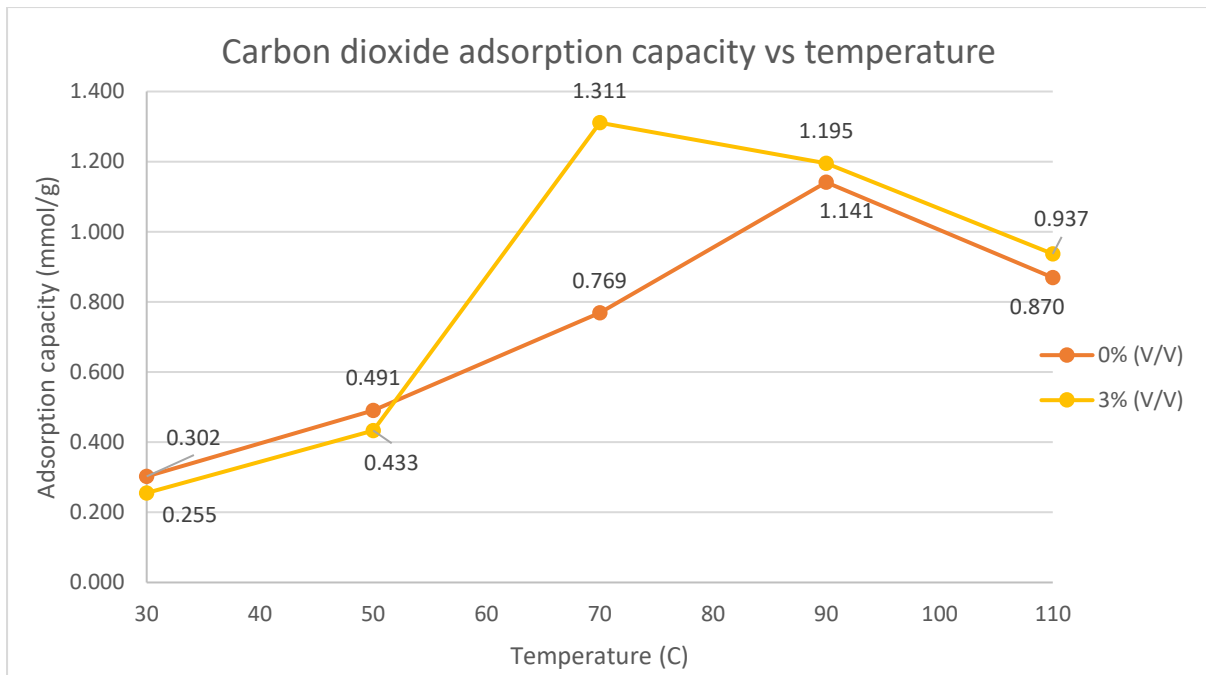


รูปที่ 4. 3 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 30, 50, 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส

ในการทำงานวิจัยนี้ใช้ตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก จากนั้นทำการตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนซึ่งเป็นเอมีนที่มีทั้งโครงสร้างปฐมภูมิ และทุติยภูมิซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหนียวนำไปเกิดพันธะกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย [27] โดยทำการ

ทดลองที่อุณหภูมิ 30, 50, 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส เพื่อดูผลของอุณหภูมิต่อตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับจลนศาสตร์ด้านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

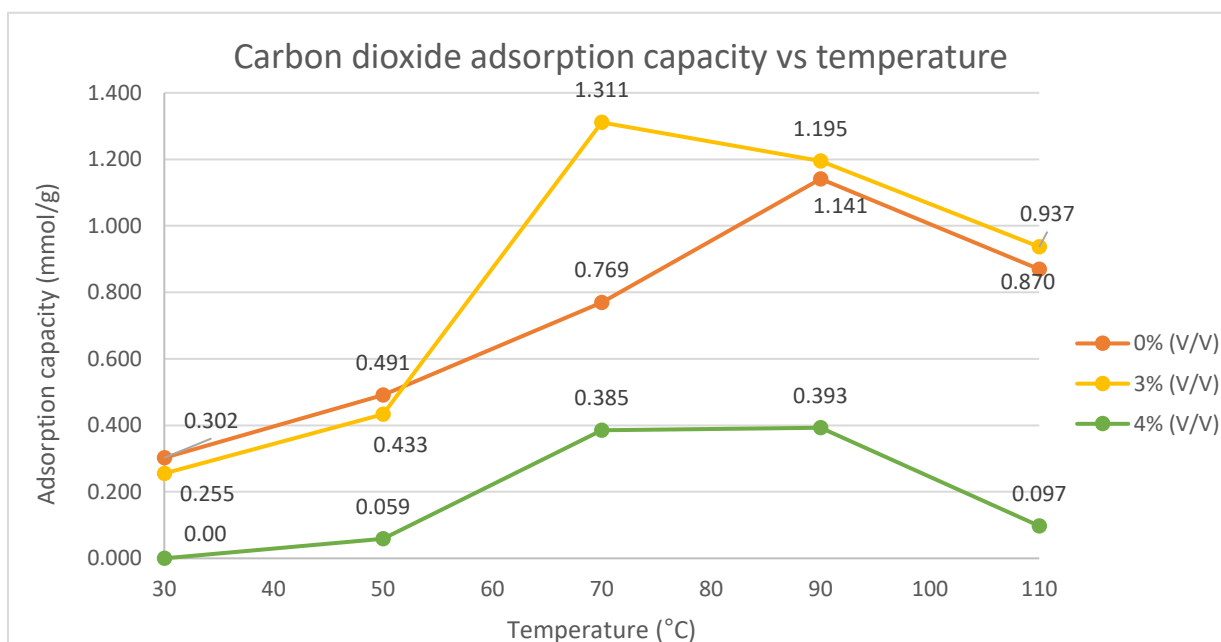
จากผลการทดลองเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยปริมาตรพบว่าในช่วงแรกเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส โดยสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 0.302 มิลลิโมลต่อกรัม, 0.491 มิลลิโมลต่อกรัม, 0.769 มิลลิโมลต่อกรัม และ 1.141 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 110 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงถึง 0.937 มิลลิโมลต่อกรัม ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ว่ากระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีปัจจัยด้านจลนพลศาสตร์ (Kinetics) และอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) โดยกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ฉะนั้นอุณหภูมิต่ำจะสามารถทำให้เกิดการดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น (ในช่วง 30-90 องศาเซลเซียส) ช่วยในการเข้าทำปฏิกิริยาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการดูดซับ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาการดูดซับจะถูกควบคุมด้วยจลนพลศาสตร์มากกว่าอุณหพลศาสตร์ ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิต่ำ อัตราการดูดซับต่ำเนื่องมาจากปัจจัยทางจลนพลศาสตร์ที่จำกัด เป็นเหตุให้อัตราการแพร่คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง เตตระเอทิลีนเพนตะมีน และคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลงด้วย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เพิ่มขึ้นจนถึง 90 องศาเซลเซียสความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.302 เป็น 1.141 มิลลิโมลต่อกรัมตามลำดับ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 3.8 เท่า แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมามีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ ช่วยให้เตตระเอทิลีนเพนตะมีนยืดหยุ่นได้ดีและกระจายได้อย่างทั่วถึง รวมถึงการแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีขึ้น [28] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 110 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ปัจจัยด้านอุณหพลศาสตร์มีผลต่อปฏิกิริยาการดูดซับมากกว่าปัจจัยทางด้านจลนพลศาสตร์ ตำแหน่งว่องไว (active site) ภายในโครงสร้างตัวดูดซับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว รุพรุ่นถูกเติมเต็มจะทำให้มีความต้านทานการแพร่สูง [23] ดังนั้นอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยปริมาตร คือ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4. 4 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ตัดแปรด้วย เติตระเอทีลีนเพนตะมีนความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล ที่ความชื้นร้อยละ 0 และ 3 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30, 50, 70, 90 และ 110 องศาเซลเซียส

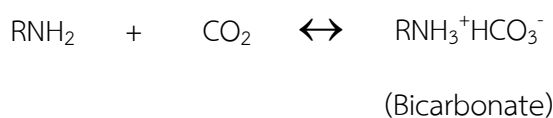
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 ที่ความชื้นร้อยละ 0 และร้อยละ 3 โดยปริมาตร ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของกระบวนการดูดซับความชื้นร้อยละ 0 โดยปริมาตร การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของกระบวนการดูดซับความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเนื่องจากน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาระหว่าง เติตระเอทีลีนเพนตะมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้พลังงานก่อกัมมันต์ในปฏิกิริยาการดูดซับลดลง อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงด้วย

4.2.2 ความชื้นที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Operating moisture)

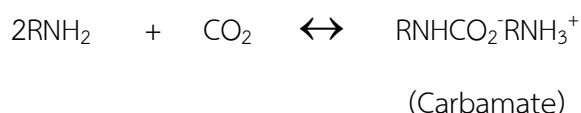


รูปที่ 4. 5 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ตัดแปรด้วย เติตระเอทีลีนเพนตะมีนความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล ที่ความชื้นร้อยละ 0, 3 และ 4 โดยปริมาตร

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 ที่ความชื้นร้อยละ 0, 3 และ 4 โดยปริมาตร พบว่าเมื่อเพิ่มความชื้นเป็นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มความชื้นเป็นร้อยละ 4 โดยปริมาตร ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยก่อนหน้า คือ เมื่อเพิ่มความชื้น น้ำจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีน แสดงได้ดังสมการ



สารละลายเอมีนที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายที่มีน้ำเป็นตัวที่ผันกลับได้ (Reversible formation) ของดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการก่อตัวที่ผันกลับได้ (Reversible formation) ของแอมโมเนียมคาร์บาเมต (Ammonium carbamate) แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate) [26] จากสมการที่แสดงให้เห็นสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนเท่ากับ 1:1 ในขณะที่ความชื้นร้อยละ 0 โดยปริมาตร หรือไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา แสดงได้ดังสมการ



สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเอมีนเท่ากับ 1:2 เมื่อมีน้ำเข้าทำปฏิกิริยาด้วยความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จึงสูงกว่า หากเพิ่มความชื้นเป็นร้อยละ 4 โดยปริมาตร พิจารณาจากรูปที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปปกคลุมรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้ปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ไม่ดี

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน (TEPA) ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 110 องศาเซลเซียส และความชื้นร้อยละ 0, 3 และ 4 โดยปริมาตร พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับไม้ไผ่ที่ดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยช่วงแรกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของจลนพลศาสตร์ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับมากกว่าผลของอุณหพลศาสตร์ แต่ในช่วงหลังเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 110 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เหตุเพราะปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยด้านอุณหพลศาสตร์มีผลมากกว่าผลของจลนพลศาสตร์ นอกจากนี้ความชื้นมีผลต่อปฏิกิริยาการดูดซับ เนื่องจากน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์มีผลให้อัตราส่วนการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1:1 ในขณะที่หากไม่มีน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์อัตราส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาเท่ากับ 2:1 เมื่อให้ความชื้นที่ร้อยละ 3 โดยปริมาตร ความสามารถในการดูดซับจึงสูงกว่าในกรณีความชื้นร้อยละ 0 โดยปริมาตรหรือไม่มีน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยา ในขณะที่หากเพิ่มความชื้นเป็นร้อยละ 4 โดยปริมาตร ความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปปกคลุมรูพรุนของตัวดูดซับทำให้ปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นไม่ได้

การวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับไม้ไผ่ในงานวิจัยใช้วิธีการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Surface Area and Porosity Analyzer (BET), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ เทคนิคCHN Element Analysis (CHN) เป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ ก่อนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน รูพรุนยังไม่ขยายกว้างและยังมีสารระเหยตกค้างอยู่ เมื่อทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกรูพรุนขยายใหญ่ขึ้น สัดส่วนคาร์บอน (C) สูงขึ้น และเมื่อทำการดัดแปลงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีน สัดส่วน ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) เพิ่มขึ้น และปรากฏฟังก์ชันเอมีน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวดูดซับไม้ไผ่ในงานวิจัยกับประสิทธิภาพตัวดูดซับในท้องตลาด
- การเตรียมตัวดูดซับในแต่ละครั้งควรเตรียมในครั้งเดียว นำไปใช้กับทุกสภาวะการทดลอง เพื่อความไม่คลาดเคลื่อนของผลการทดลอง
- ศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารอ้างอิง

- [1] จุฑารัตน์ ฉัตรวิริยาวงศ์, นพ.วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์. 2554. “Carbon dioxide.” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/CC_Glossary_2011 (3 เมษายน 2562)
- [2] PradThaNa P. 2551. “กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://pradthana.wordpress.com/tag/การดูดซับ/> (3 เมษายน 2562)
- [3] National Astronomical Research Institute of Thailand. 2660. “ภาวะโลกร้อน.” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://nso.narit.or.th/index.php/2017-11-25-10-50-19/2017-12-07-06-19-35/2017-12-12-02-14-35> (3 เมษายน 2562)
- [4] กรมอุตุนิยมวิทยา. “ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect).” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=20> (10 เมษายน 2562)
- [5] มหาวิทยาลัยรามคำแหง. “คาร์บอนไดออกไซด์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ.” [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://e-book.ram.edu/e-book/g/GE410/chapter11.pdf> (10 เมษายน 2662)
- [6] Cook, J., Carbon Dioxide's invisibility is what causes global warming. 2013; [Online]. Available from: <http://www.skepticalscience.com/Carbon-dioxide-invisibility-causes-global-warming.html> (11 April 2019)
- [7] นิพัทธ์ เกตุประเสริฐ, การศึกษาการดูดซับแก๊สในซิลิกาพอร์นโดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาเคมี เทคโนโลยีสุรนารี (2558) 8-12
- [8] เจ็๋อจันท์น เกตศา. ผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิศวกรรมศาสตร์สาขาเคมี เทคโนโลยีสุรนารี (2556) 8-13
- [9] ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก, ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ : ตลาดยังมีความต้องการสูง. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (2558) 946-949
- [10] Annual Book of ASTM Standards. Standard Test Methods for Total Ash Content of Activated Carbon D2866-94.15(01): 707-708.
- [11] ยุวรัตน์ เงินเย็น, ขนิษฐา คำวัลย์ศักดิ์, ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลของประเทศไทย. การทบทวนวรรณกรรม วิศวกรรม วิศวกรรม
- [12] ปรีนทร เต็มถาวรศิลป์. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จากไผ่ตง และไผ่หมาจู้. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2551) 3-10.
- [13] Charinpanitkul, T., Nishihara, H., Mukai, S. R., Siyasukh, A., Tanthapanichakoon, W., Tamon, H., Tonanon, N., Wareenin, Y., 3D Interconnected macroporous carbon monoliths prepared by ultrasonic irradiation. Carbon. 43 (2005) 2808-2811

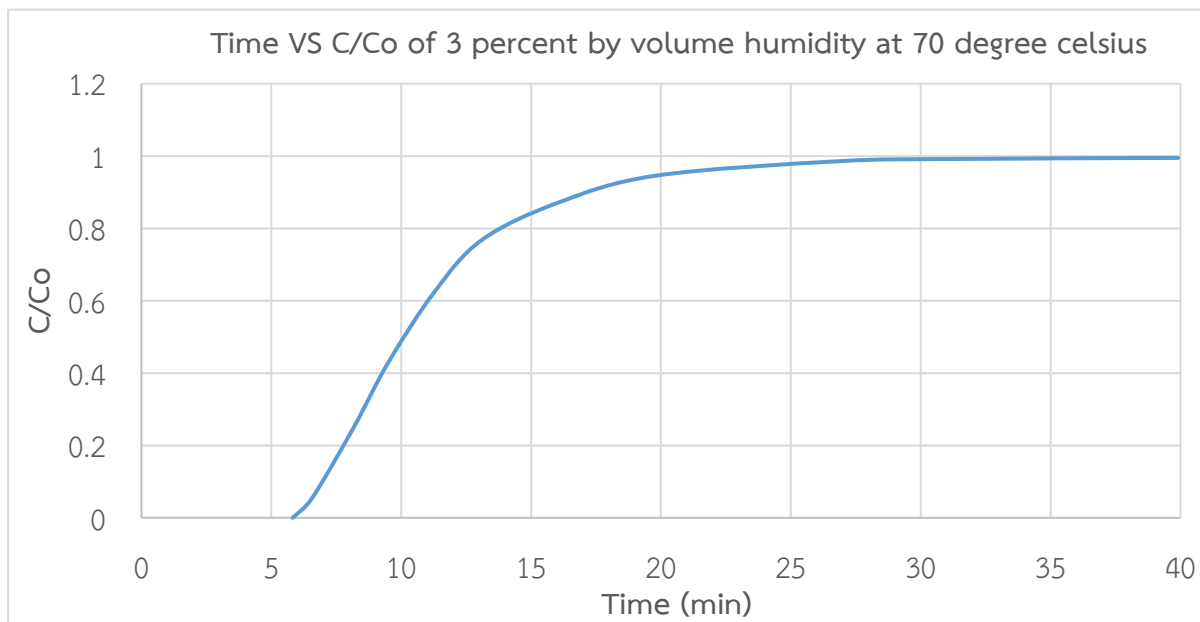
- [14] Shen Y., Yoshikawa K., Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis e a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 21 (2013) 371-392.
- [15] อรุณฉาย สายอ้าย, Amines. เอกสารประกอบการสอนภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2557) 16-23
- [16] Chen, L., Guo, Q., Wang, X., Development of hybrid amine-functionalized MCM-41 sorbents for CO₂ capture. *Chemical Engineering Journal.* 260 (2015) 573–581
- [17] Chen, H., Liu, Z., Teng, Y., Yang, Y., Zhang, K., CO₂ adsorption performance of different amine-based siliceous MCM-41 materials. *Journal of Energy Chemistry.* 24 (2015) 322–330
- [18] Olajire, A. A., CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe application – A review, *Energy.* 35 (2010) 2610-2628
- [19] ปัญญา มณีจักร์, การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง. วารสารวิชาการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. (2012) 1-6
- [20] อีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล, ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. (2560) 196-209
- [21] Chen, Y. H., Lu, D. L., Amine modification on kaolinites to enhance CO₂ adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science.* 436 (2014) 47–51
- [22] Javier P., Ana G., Inmaculada Arauzo, Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam, *Biomass and Bioenergy.* 115 (2018) 64-73.
- [23] Sepideh S., Ramin A., Ajay K. D., Jafar S., Breakthrough CO₂ adsorption in bio-based activated carbons. *Environ. Sci. Technol.* 34 (2015) 68-76
- [24] Aroon k., Punyanich I., Patcharin W., Chantaraporn P., Diethanolamine impregnated palm shell activated carbon for CO₂ adsorption at elevated temperatures. *Journal of Environmental Management* 4 (2016) 73–81
- [25] Marit J., Frank D., Activated carbons from yellow poplar an white oak by H₃PO₄ activation, *Carbon.* 36 (1998) 1085-1097
- [26] ญัฐยาน์พงศ์สถาปดี และคณะ, การเลือกดักจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมกระแสไฮโดรเจน เข้มข้นบนตัวดูดซับของแข็งชนิดดินที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน. วารสารวิชาการภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2559) 1-73

- [27] Dong Hyun J., Hyunchul J., Dong Kun S., Chang Hun L., Sung Hyun K., Effect of amine structure on CO₂ adsorption over tetraethylenepntamine impregnated poly methyl methacrylate supports. *Seperation and Purification Technology*. 125 (2014) 187-193
- [28] Runa D., Rajender G., Arunkumar S., Carbon dioxide capture under post combustion conditions using amine-functionalized SBA-15: Kinetics and multicyclic performance. *Separation Science and Technology*. 40 (2018) 520-575

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยสามารถคำนวณได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างเส้นโค้ง หรือที่เรียกว่า Breakthrough Curve กับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า



รูปที่ ก กราฟ Break-through curve สภาวะความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สภาวะที่ใช้ในการคำนวณ

ความเข้มข้น CO₂ ในแก๊สผสม ร้อยละ 30 โดยมวล

อัตราการไหลแก๊สผสม 11.5 มิลลิตรต่อนาที

1. คำนวณอัตราส่วนความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (C) ต่อความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (C₀)

$$\frac{\text{ความเข้มข้นของ CO}_2 \text{ (ร้อยละโดยปริมาตร)}}{\text{ร้อยละความเข้มข้นของ CO}_2 \text{ ในแก๊สผสม (ร้อยละโดยปริมาตร)}} = \frac{1.69}{30} = 0.056$$

2. คำนวณร้อยละโดยปริมาตรของความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละจุดของเวลา โดยในตัวอย่างการคำนวณแสดงตัวอย่างที่เวลา 2 นาที

$$\frac{\text{ความเข้มข้นของCO}_2\text{ขาออก} \times \text{ร้อยละความเข้มข้นของ CO}_2\text{ในแก๊สผสม}}{\text{ความเข้มข้นสูงสุดของCO}_2\text{ขาออก}}$$

$$= \frac{8956 \times 30}{159267}$$

= ร้อยละ 1.69 โดยปริมาตร

3. คำนวณอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละจุดของเวลา โดยในตัวอย่างการคำนวณแสดงตัวอย่างที่เวลา 2 นาที

$$\text{ร้อยละโดยปริมาตรของความเข้มข้นของ CO}_2 \times \frac{1}{100} \times \text{อัตราการไหล (มิลลิตรต่อนาที)}$$

$$= 1.69 \times \frac{1}{100} \times 11.5$$

= 0.19 มิลลิตรต่อนาที

4. คำนวณอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละจุดของเวลาที่ถูกลดค่า

อัตราการไหลของ CO₂ ขาเข้า - อัตราการไหลของ CO₂ ขาออก ณ เวลา 2 นาที

$$= \left[\frac{\text{ร้อยละความเข้มข้นของ CO}_2\text{ในแก๊สผสม}}{100} \times \text{อัตราการไหลแก๊สผสมขาเข้า} \right] - \text{อัตราการไหลของ CO}_2\text{ขาออก}$$

$$= \left[\frac{30}{100} \times 11.5 \right] - 0.19$$

= 3.26 มิลลิตรต่อนาที

5. นำค่าอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้แต่ละจุดของเวลา ทำการอินทิเกรตโดยใช้โปรแกรม Origin version 8 โดยค่าที่คำนวณได้จะเป็นปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์

ปริมาตรคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกลดค่าที่สภาวะความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 26.59 มิลลิตร

6. ปริมาตร CO₂ ที่ถูกลดค่า - ปริมาตร CO₂ (blank)

$$= 26.59 - 22.83$$

= 3.76 มิลลิตร

7. จากสูตร $PV = nRT$

โดยที่ P คือ ความดันที่ใช้ในการดูดซับ (atm)

V คือ ปริมาตรของแก๊ส (ml)

n คือ จำนวนโมลของแก๊สต่อกรัมตัวดูดซับ (mmol/g)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส หรือ 0.082 atm/K·mol

T คือ อุณหภูมิ (K)

M คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (g)

$$n = \frac{P \times V}{R \times T \times M} = \frac{1 \times 3.76}{0.082 \times 298 \times 0.4} = 0.38 \text{ mmol/g}$$

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่สภาวะความชื้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.38 mmol/g