

สมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของเส้นใยเซลลูโลสจากชานอ้อยตัดแปรด้วยเอมีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CO₂ ADSORPTION PERFORMANCE OF AMINE-MODIFIED CELLULOSE FIBERS FROM
BAGASSE



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

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของเส้นใยเซลลูโลส จากชานอ้อยตัดแปรด้วยเอมีน
โดย	น.ส.ปวีณนุช ไตรเมศ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)	

ปวีณ์นุช ไตรเมศ : สมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของเส้นใยเซลลูโลสจากชานอ้อย
ดัดแปรด้วยเอมีน. (CO₂ ADSORPTION PERFORMANCE OF AMINE-MODIFIED
CELLULOSE FIBERS FROM BAGASSE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีนและศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดังกล่าว การเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยจะใช้กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF) สารเชื่อมขวางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเตตระเอธิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) กราฟด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) และเคลือบฝังด้วยเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน (PEHA) ที่ปริมาณต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ฟลูอริเมตริคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เทคนิคการดูดซับด้วยไนโตรเจน เทคนิคการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิจำลอง และวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การดัดแปรตัวดูดซับด้วยสารเชื่อมขวางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเตตระเอธิลออร์โธซิลิเกตในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ หมู่ไฮดรอกซิล และการยึดจับของเอมีนบนผิวดูดซับ อีกทั้งความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น เมื่อทำการเคลือบฝังด้วยเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนในปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้การกราฟตัวดูดซับด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น และการเพิ่มความชื้นในกระแสแก๊สเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 2.17 และ 2.14 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะไม่มีและมีความชื้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ในกระแสแก๊ส ตามลำดับ นอกจากนี้ตัวดูดซับแสดงเสถียรภาพที่ดีตลอดการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ 7 รอบ

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270144123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Cellulose, Carbon dioxide adsorption, Pentaethylenehexamine

Paweenut Traimate : CO₂ ADSORPTION PERFORMANCE OF AMINE-MODIFIED
CELLULOSE FIBERS FROM BAGASSE . Advisor: Prof. Dr. NATTAYA PONGSTABODEE

The aim of this research was to prepare bagasse pulp adsorbents with major component of cellulose and modification of amine. This also investigated the CO₂ adsorption capacity of those adsorbents. Bagasse pulp were prepared by the soda pulping process, followed by hydrogen peroxide bleaching process (BCF). Crosslinking agents used were polyvinyl alcohol (PVA) and tetraethyl orthosilicate (TEOS). To modify the adsorbents with amine substance, 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES) and pentaethylenehexamine (PEHA) at various amounts loading were mentioned. Characterization of the adsorbents was analyzed by chemical composition, fourier-transform infrared spectroscopy, nitrogen adsorption, thermogravimetric analysis and morphological analysis using scanning electron microscopy. The experimental results showed that the specific surface area was increased after bleaching of cellulose fiber with hydrogen peroxide. To improve the CO₂ adsorption capacity, a modification with an appropriate amount of polyvinyl alcohol and tetraethyl orthosilicate crosslinking agent were suggested. When adding a level of water vapor in the inlet gaseous stream to 1% by volume, the CO₂ adsorption capacity was increased. Among the adsorbents, it was found that 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF adsorbent provided the maximum CO₂ adsorption capacity of 2.17 and 2.14 mmol/g at 110°C under dry condition and humidity of 1% by volume in the gaseous stream, respectively. Furthermore, the adsorbent still exhibited its high performance after 7 cycles of adsorption-desorption.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง ด้วยความเอาใจใส่ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านประจำภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ตลอดจนการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มงานวิจัย ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้การดำเนินงานวิจัยผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้อง นิสิตปริญญาโท ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านเสมอมา และเป็นกำลังสำคัญสำหรับผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่บุคลากรทางการศึกษาและผู้สนใจทั่วไป หากมีข้อผิดพลาดประการใดทางผู้วิจัยขออ้อมรับความผิดนี้ไว้ และยินดีรับฟังคำแนะนำจากทุกท่าน

ปวีณ์นุช ไตรเมศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับชานอ้อย.....	4
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย	5
2.1.1.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	5
2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	6
2.1.1.3 ลิกนิน (Lignin)	7
2.2 การปรับสภาพชีวมวล (Pretreatment).....	7
2.2.1 การปรับสภาพทางกายภาพ (Physical pretreatment).....	8
2.2.2 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment).....	9

2.2.2.1 การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkaline pretreatment).....	9
2.2.3 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment).....	11
2.3 การฟอกสีเส้นใยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	11
2.4 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO ₂).....	12
2.5 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	13
2.5.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้.....	14
2.5.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง.....	15
2.5.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้.....	15
2.6 เทคโนโลยีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์.....	16
2.6.1 การแยกผ่านเมมเบรน (Membrane separation).....	16
2.6.2 การกลั่นที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic distillation).....	16
2.6.3 การดูดซึม (Absorption).....	17
2.6.3.1 การดูดซึมทางกายภาพ (Physical Absorption).....	17
2.6.3.2 การดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption).....	18
2.6.4 การดูดซับ (Adsorption).....	18
2.6.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption).....	18
2.6.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption).....	19
2.6.4.3 ตัวดูดซับของแข็ง (Solid adsorbents).....	19
2.7 การดัดแปรด้วยเอมีน.....	21
2.7.1 การเคลือบฝัง (Impregnation).....	21
2.7.2 การกราฟ (Grafting).....	21
2.8 เพนตะเอทิลีนเฮกซามีน (Pentaethylenehexamine, PEHA).....	21
2.9 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES).....	22
2.10 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA).....	23

2.11 การเชื่อมขวาง (Crosslinking).....	24
2.11.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking).....	24
2.11.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking)	24
2.12 เตตระเอซิลอออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate, TEOS).....	25
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	29
3.1 สารเคมี.....	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	29
3.3 วิธีการเตรียม	30
3.3.1 การเตรียมเยื่อชานอ้อย	30
3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเพนตะเอ ทิลีนเฮกซะมีน.....	31
3.3.3 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยเตตระเอซิลอออร์โธซิลิเกตและเพนตะเอ ทิลีนเฮกซะมีน.....	31
3.3.4 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เตตระเอซิลอออร์โธซิ ลิเกตและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน	32
3.3.5 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เตตระเอซิลอออร์โธซิ ลิเกต 3-อะมีโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน	32
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ	34
3.4.1 เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition).....	34
3.4.2 เทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)	34
3.4.3 เทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen physisorption)	35
3.4.4 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)	35
3.4.5 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน (Thermogravimetric Analysis).....	36

3.5 การทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	37
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	38
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อชานอ้อย	38
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ	39
4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน	50
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ.....	55
4.5 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis	57
4.6 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	59
4.6.1 การพอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	59
4.6.2 ชนิดสารเชื่อมขวาง.....	61
4.6.3 ปริมาณเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตในสารเชื่อมขวางผสม	63
4.6.4 ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน.....	64
4.6.5 สัดส่วนของ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนต่อเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต	65
4.6.6 ความชื้นในกระแสวิ่ง.....	67
4.6.7 เสถียรภาพ	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดลอง	87
ภาคผนวก ข. ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อเรียกตัวดูดซับต่าง ๆ และสัญลักษณ์.....	33
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (BCF before pretreatment) และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF)	38
ตารางที่ 4.2 สมบัติจำเพาะทางกายภาพของตัวดูดซับ.....	50



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ประเทศผู้ผลิตอ้อยสูงสุด 10 อันดับแรก	4
รูปที่ 2.2 สถานการณ์การปลูกอ้อยในประเทศไทย 10 ปีย้อนหลัง.....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	7
รูปที่ 2.6 กระบวนการในการปรับสภาพเส้นใย.....	8
รูปที่ 2.7 กระบวนการในการปรับสภาพทางกายภาพ.....	8
รูปที่ 2.8 สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพทางเคมี.....	9
รูปที่ 2.9 สารเชิงซ้อนลิกนินคาร์โบไฮเดรตที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์	10
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างลิกนินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์	10
รูปที่ 2.11 เมทอกซิลที่แตกออกจากโครงสร้างของลิกนิน	10
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์	12
รูปที่ 2.13 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	13
รูปที่ 2.14 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้	14
รูปที่ 2.15 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง.....	15
รูปที่ 2.16 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้.....	16
รูปที่ 2.17 กระบวนการดูดซับทางกายภาพ.....	19
รูปที่ 2.18 โครงสร้างทางเคมีของเพนตะเอทิลีนเฮกซามีน	22
รูปที่ 2.19 ก) ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรไลซิส ข) ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ค) ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของ APTES.....	23
รูปที่ 2.20 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตท	23

รูปที่ 2.21 การเชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี.....	25
รูปที่ 2.22 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต.....	25
รูปที่ 3.1 เครื่องฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet iS5.....	34
รูปที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP 2020.....	35
รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-IT500HR.....	36
รูปที่ 3.4 เครื่อง Thermal Analyzer TG/TGA PerkinElmer รุ่น PYRIS DIAMOND.....	36
รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 AT.....	37
รูปที่ 4.1 ฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกตรัมของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (BCF before pretreatment) และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF)	40
รูปที่ 4.2 ฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF	42
รูปที่ 4.3 ฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF.....	43
รูปที่ 4.4 ฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF	44
รูปที่ 4.5 ฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF	46
รูปที่ 4.6 ฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกตรัมของ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 40PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF	47
รูปที่ 4.7 ฟลูอริเมตริกอินฟราเรดสเปกตรัมของ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF.....	49
รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ BCF before pretreatment, BCF, 30PEHA/1PVA_BCF, 30PEHA/20TEOS_BCF และ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF.....	52
รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF	53

รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ 50PEHA/30TEOS/1PVA _BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA _BCF..... 54

รูปที่ 4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ 60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF 55

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาที่กำลังขยาย ก) 300 เท่า ข) 5,000 เท่า และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่กำลังขยาย ค) 300 เท่า ง) 5,000 เท่า..... 56

รูปที่ 4.13 การสลายตัวทางความร้อนของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF) 57

รูปที่ 4.14 การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF 59

รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยก่อน (BCF before pretreatment) และหลังการฟอก (BCF)..... 61

รูปที่ 4.16 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ใช้สารเชื่อมขวางต่างชนิดกัน (30PEHA/1PVA_BCF, 30PEHA/20TEOS_BCF และ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF)..... 63

รูปที่ 4.17 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ปริมาณเตตระเอธิลออร์โธซิลิเกตต่าง ๆ สำหรับตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF และ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF..... 64

รูปที่ 4.18 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน... 65

รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) และเตตระเอธิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) ที่สัดส่วนต่าง ๆ สำหรับตัวดูดซับ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF 67

รูปที่ 4.20 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 0-2 โดยปริมาตร 68

รูปที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร 69

รูปที่ 4.22 เสถียรภาพของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่ไม่มีความชื้นในกระแสแก๊ส..... 70

รูปที่ 4.23 เสถียรภาพของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร [105]..... 71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ภาวะโลกร้อน (Global warming) เป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและควรตระหนักเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิพื้นผิวโลกสูงขึ้น รวมทั้งปัญหาเกี่ยวกับระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นด้วย ปัญหาเหล่านี้ขยายวงกว้าง สาเหตุหลักของปัญหาเหล่านี้มาจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) แก๊สฟลูออรีเนต (Fluorinated gases) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีการปลดปล่อยสู่บรรยากาศในปริมาณมากที่สุดและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แหล่งการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศที่เป็นแหล่งใหญ่ที่สุดมาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง [1] ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีการใช้เทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage; CCS) เพื่อบรรเทาปัญหาดังกล่าว การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้ผ่านกระบวนการดูดซึม (Absorption) การดูดซับ (Adsorption) การแยกผ่านเมมเบรน (Membrane separation) และการกลั่นที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic distillation) [2]

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีการใช้พลังงานในการฟื้นฟูที่ต่ำ มีความสามารถในการดักจับและการเลือกดักจับที่สูง ต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งกลไกการดูดซับอาศัยการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เป็นของแข็งผ่านปฏิกิริยาทางกายภาพหรือเคมี [3] วัสดุดูดซับที่นิยมมาใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ Metal-organic frameworks (MOFs) ซีโอไลต์ (Zeolites) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซิลิกา (Silica) และพอลิเมอร์ชีวภาพ (เช่น เซลลูโลส ลิกนิน พอลิแซ็กคาไรด์ ฯลฯ) ในบรรดาวัสดุดูดซับของแข็งเหล่านี้ เซลลูโลสเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถหาได้ตามธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษ ย่อยสลายทางชีวภาพ ราคาไม่แพง [4] รวมทั้งมีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวจำนวนมาก ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการปรับสภาพทางเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากนี้ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ผลพลอยได้นอกจากการผลิตทางการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย แกลบ และข้าวโพด แต่วัสดุเหล่านี้จะถูกทิ้งหรือเผาทิ้งโดยไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้นนั้นนับว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงมี

ความสนใจที่จะนำชานอ้อยมาใช้สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งอย่างหนึ่งที่พบได้เป็นจำนวนมากในโรงงานน้ำตาลหรือแอลกอฮอล์และเป็นแหล่งพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก แต่อย่างไรก็ตามเซลลูโลสมีข้อเสียในแง่ของความสามารถในการดูดซับที่ต่ำ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีปรับปรุงการทำงานของตัวดูดซับเซลลูโลส ซึ่งการใช้เอมีนในตัวดูดซับนั้นช่วยให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนเยื่อชานอ้อยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีน
- 1.2.2 ศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนเยื่อชานอ้อยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีน โดยใช้เพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน
- 1.3.2 ศึกษาภาวะที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography)
- 1.3.3 ศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับที่เตรียมได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมองค์ความรู้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 วางแผนการทดลอง เตรียมอุปกรณ์และสารเคมี
- 1.4.3 สังเคราะห์ตัวดูดซับเซลลูโลสจากชานอ้อยดัดแปรด้วยเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน
- 1.4.4 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) ได้แก่
 - 1.4.4.1 การพอกเส้นใย
 - 1.4.4.2 ชนิดของสารเชื่อมขวาง ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต และสารเชื่อมขวางผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต
 - 1.4.4.3 ปริมาณเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต
 - 1.4.4.4 ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนร้อยละ 0 ถึง 60 โดยน้ำหนัก

- 1.4.4.5 สัดส่วนของ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนต่อเตตระเอธิลอร์โธซิลิกเกต
- 1.4.4.6 อุณหภูมิการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส
- 1.4.4.7 ภาวะที่ไม่มี ความชื้นในกระแสแก๊สขาเข้าและมีความชื้นในกระแสแก๊สขาเข้า
- 1.4.4.8 เสถียรภาพของตัวดูดซับ
- 1.4.5 ศักยภาพเฉพาะของตัวดูดซับที่เตรียมได้
 - 1.4.5.1 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
 - 1.4.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectrometer)
 - 1.4.5.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยไนโตรเจน (Nitrogen physisorption)
 - 1.4.5.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)
 - 1.4.5.5 วิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน (Thermogravimetric analysis)
- 1.4.6 รวบรวม วิเคราะห์ข้อมูล ประมวลผลจากการทดลอง สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

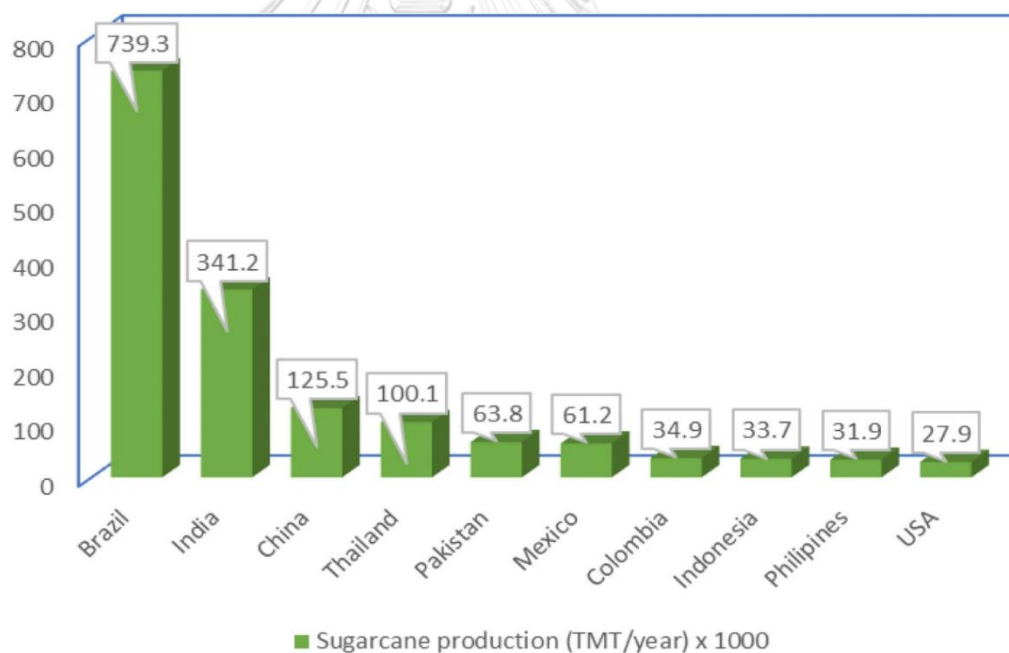
- 1.5.1 สามารถนำขาน้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าได้
- 1.5.2 ได้ตัวดูดซับที่ทำมาจากเยื่อขาน้อยและดัดแปรด้วยเอมีนที่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับชานอ้อย

ชานอ้อยคือเศษเหลือของลำต้นอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกจากท่อนอ้อยแล้ว มีลักษณะเป็นเส้นใยขุย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากโรงงานผลิตน้ำตาล โดยคำว่าชานอ้อยมาจากภาษาฝรั่งเศสที่หมายถึงขยะหรือของเสีย ชานอ้อยถูกใช้ครั้งแรกเพื่ออธิบายเศษซากจากการกดอัดมะกอก ถั่วปาล์ม และองุ่น หลังจากนั้นชานอ้อยหมายถึงเศษวัสดุจากพืชแปรรูปอื่น ๆ แต่ในปัจจุบันคำว่าชานอ้อยจำกัดเฉพาะอ้อยเท่านั้น [5] การผลิตอ้อยทั่วโลกในแต่ละปีอยู่ที่ประมาณ 1.6 พันล้านตัน และทำให้เกิดชานอ้อยได้ประมาณ 279 ล้านเมตริกตัน ในปัจจุบันบราซิลเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดประมาณ 739,300 ตันต่อปี รองลงมาคืออินเดีย จีน ไทย ปากีสถาน เม็กซิโก โคลอมเบีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และสหรัฐอเมริกา แสดงดังรูปที่ 2.1 [6]



รูปที่ 2.1 ประเทศผู้ผลิตอ้อยสูงสุด 10 อันดับแรก [6]

จากการรายงานสถานการณ์การปลูกอ้อยในประเทศไทยปีการผลิต 2563/64 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายพบว่าประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อย จำนวน 10,862,610 ไร่ แสดงดังรูปที่ 2.2 และมีปริมาณอ้อยสำหรับส่งโรงงานผลิตน้ำตาล จำนวน 66,946,219 ตัน [7] โดยปริมาณชานอ้อยที่เกิดหลังการหีบอ้อยคิดเป็นร้อยละโดยประมาณเฉลี่ยที่ 29 ของปริมาณอ้อยที่เข้า

หีบ [8] ซึ่งชานอ้อยเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นเชื้อเพลิง ใอน้ำ เอทานอล เยื่อกระดาษ วัสดุก่อสร้าง อาหารสัตว์ ปุ๋ยหมัก เป็นต้น



รูปที่ 2.2 สถานการณ์การปลูกอ้อยในประเทศไทย 10 ปีย้อนหลัง

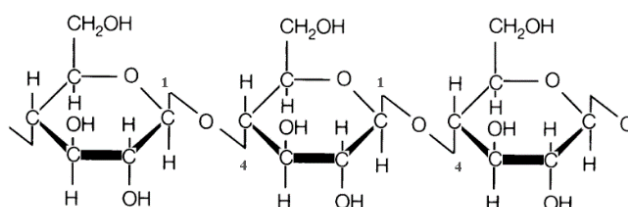
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด จัดเป็นสารประกอบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) กล่าวคือมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งองค์ประกอบทั้งสามมีปริมาณแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของพืช สายพันธุ์และภาวะในการเจริญเติบโตของพืชนั้น ๆ โดยชานอ้อยเป็นกากใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส (32–45%) เฮมิเซลลูโลส (20–32%) ลิกนิน (17–32%) เถ้า (1.0–9.0%) และสารสกัดบางชนิด [9]

2.1.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสนับว่าเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ โดยทั่วไปจะถูกสังเคราะห์โดยพืช แต่ก็มีแบคทีเรียบางชนิดผลิตได้ เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ในพืชที่ให้ความแข็งแรง เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่มีสายโซ่ยาวและเป็นเส้นตรงที่มีระดับโพลิเมอร์ไรเซชันสูง (<10,000) และน้ำหนักโมเลกุลมาก (<500,000) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส ($C_6H_{12}O_5$)_n จำนวนมากมาเรียงต่อกันเป็นสายยาว ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายที่เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่

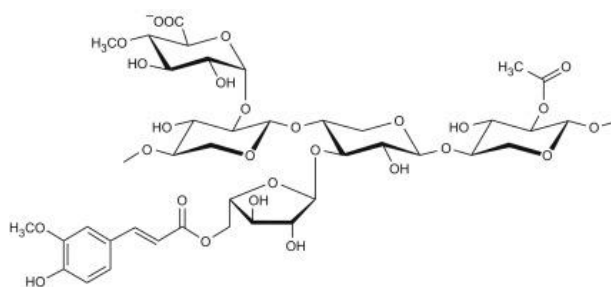
ตำแหน่งปีต้า-1,4 (β -1,4-glycosidic bond) ในแต่ละหน่วยซ้ำของโมเลกุลเซลลูโลสจะมีหมู่เมธิลอล (-CH₂OH) และไฮดรอกซิล (-OH) เป็นหมู่ฟังก์ชัน (รูปที่ 2.3) ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้เป็นไฮโดรฟิลิก ที่ไม่ละลายในน้ำและในตัวทำละลายทั่วไป เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างโซ่เซลลูโลส [10]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [10]

2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

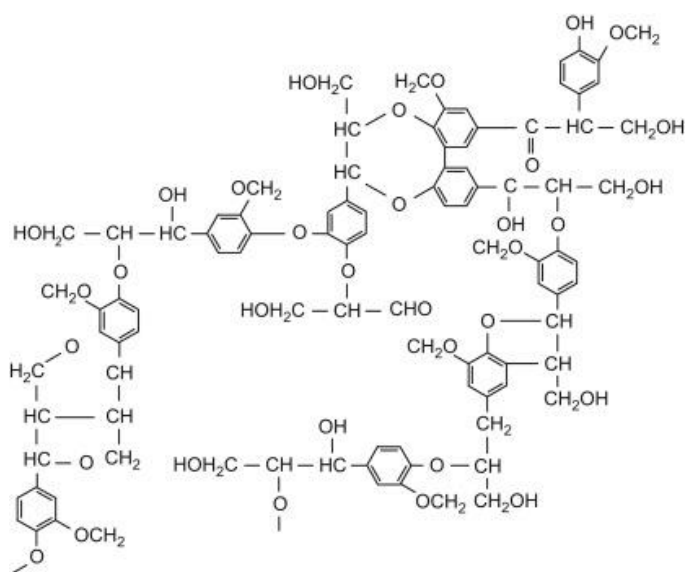
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สำคัญเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ในพืชเช่นเดียวกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharides) ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างซับซ้อน (รูปที่ 2.4) ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) ไซโลส (Xylose) กาแลกโตส (Galactose) แมนโนส (Mannose) อะราบินโนส (Arabinose) ฟรุคโตส (fructose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) และกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) โดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ (C₆H₁₂O₅)_{2n} เฮมิเซลลูโลสมีโมเลกุลที่เล็กกว่าเซลลูโลสมาก ประกอบด้วยหน่วยน้ำตาล 200 หน่วย มีโครงสร้างแบบสุ่มและอสัณฐานที่มีความแข็งแรงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เฮมิเซลลูโลสยังมีส่วนในการช่วยเสริมความแข็งแรงและความยืดหยุ่นให้กับผนังเซลล์พืชเนื่องจากเป็นสารประเภทไฮโดรฟิลิกและมีความสามารถในการอุ้มน้ำ ซึ่งช่วยในการกักเก็บน้ำในผนังเซลล์พืช [11]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [11]

2.1.1.3 ลิกนิน (Lignin)

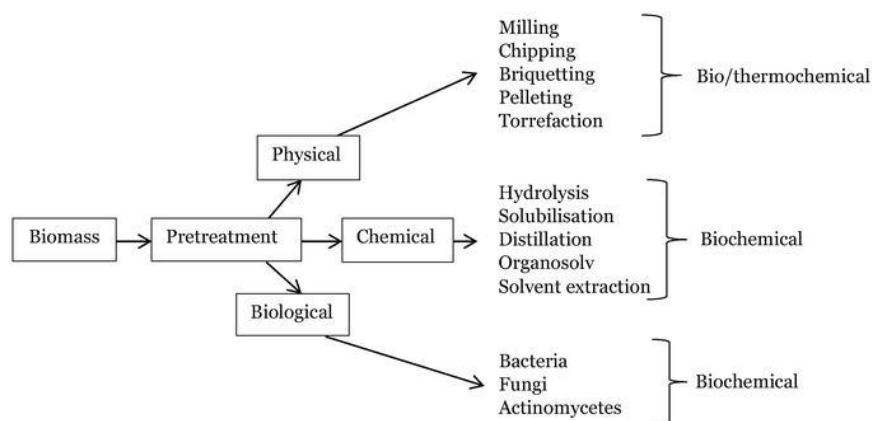
ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ในพืชเช่นเดียวกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินมีโครงสร้างทางเคมีที่หลากหลาย ซึ่งประกอบด้วยอะโรมาติกจำนวนมากในโครงสร้าง (รูปที่ 2.5) หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของลิกนิน ได้แก่ คาร์บอนิล, ฟีนอลไฮดรอกซิล, วงแหวนอะโรมาติกและเมทอกซิล โดยลิกนินมีสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่มีการยืดหยุ่น แต่มีความแข็งแรงทนทานสูง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [11]

2.2 การปรับสภาพชีวมวล (Pretreatment)

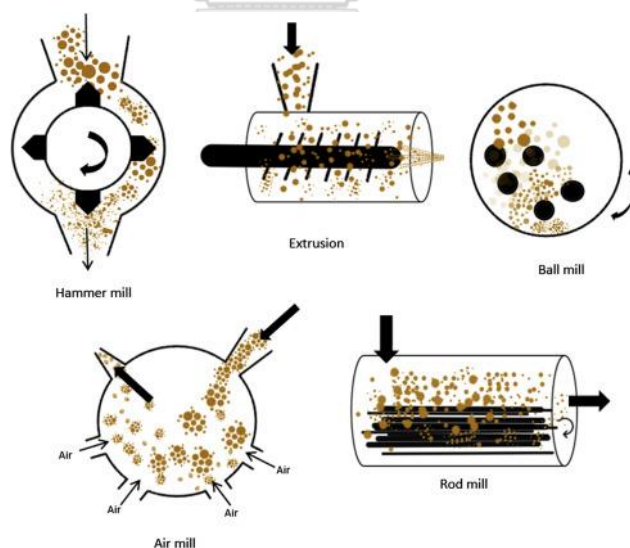
การปรับสภาพชีวมวลเป็นกระบวนการที่จำเป็นสำหรับชีวมวล เนื่องจากผิวของเส้นใยมีสารเคลือบจำพวกเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเพกทินห่อหุ้มอยู่ จึงจำเป็นต้องแยกเส้นใยก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งเป็นการปรับปรุงเส้นใยให้มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้สำหรับปรับสภาพประกอบด้วย 3 วิธี ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ (รูปที่ 2.6) [12]



รูปที่ 2.6 กระบวนการในการปรับสภาพเส้นใย [12]

2.2.1 การปรับสภาพทางกายภาพ (Physical pretreatment)

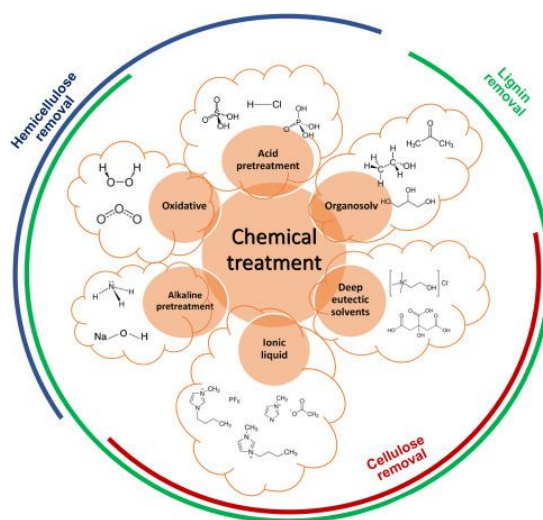
การปรับสภาพทางกายภาพของชีวมวลเป็นการทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงโดยใช้แรงเชิงกล เช่น การบด การตัด การทุบ การโม่ เป็นต้น (รูปที่ 2.7) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของเส้นใยในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความเป็นผลึกของเซลลูโลสและระดับความเป็นพอลิเมอร์ลดลง วิธีการที่นิยมในการปรับสภาพทางกายภาพคือการบดด้วยลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลดีและมีต้นทุนต่ำ [12]



รูปที่ 2.7 กระบวนการในการปรับสภาพทางกายภาพ [13]

2.2.2 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment)

การปรับสภาพสารเคมีของชีวมวลเป็นการใช้สารเคมีเพื่อย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยหลายกระบวนการขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพและกลไกต่าง ๆ ของการสลายตัวของชีวมวลที่เกิดขึ้น โดยสารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ กรด ต่าง ตัวทำละลายอินทรีย์ของเหลวไอออนิก และตัวออกซิไดซ์ แสดงดังรูปที่ 2.8 [13]

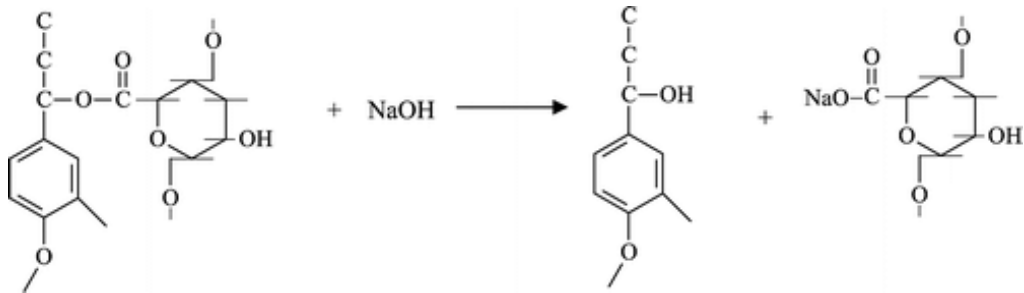


รูปที่ 2.8 สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพทางเคมี [13]

2.2.2.1 การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkaline pretreatment)

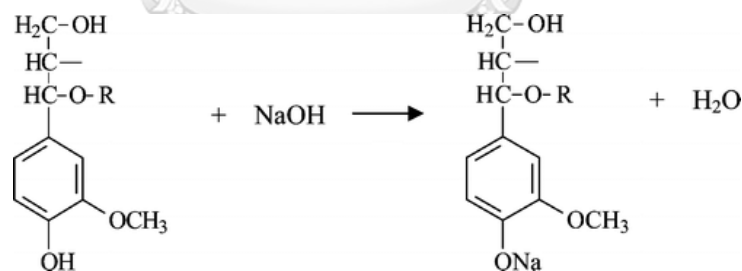
การปรับสภาพด้วยด่างจะมีประสิทธิภาพสูงสำหรับสารชีวมวลที่มีปริมาณที่ต่ำ เช่น สารตกค้างทางการเกษตร สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับการปรับสภาพด้วยด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ไฮดราซีน (Hydrazine) และแอมโมเนีย แอนไฮไดรส์ (Anhydrous ammonia) จะทำให้ชีวมวลเกิดการบวมตัว ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและลดความเป็นผลึกของเซลลูโลสและระดับความเป็นพอลิเมอร์ [14] การปรับสภาพด้วยด่างมักใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีรายงานด้วยว่าชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.5% ทำให้มีองค์ประกอบของเซลลูโลสสูงสุด (81%) และกำจัดลิกนินได้ (68.5%) [15] ลิกนินไม่เพียงแต่สะสมในพอลิแซ็กคาไรด์ของผนังเซลล์แต่เกี่ยวข้องกับคาร์โบไฮเดรต (เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) โดยเกิดพันธะเคมีบางชนิด เช่น พันธะแอลฟา-อีเทอร์ (α -ether bonds) พันธะฟีนิลไกลโคซิดิก (Phenyl glycosidic linkages) พันธะอะซีตัล (Acetal linkages) และพันธะเอสเทอร์ (Ester bonds) การปรับสภาพด้วยด่างสามารถปลดปล่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนโดยการไฮโดรไลซ์พันธะเอส

เทอร์ระหว่างลิกนินและเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลส โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการปรับสภาพ แสดงดังรูปที่ 2.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำลายการเชื่อมโยงพันธะเอสเทอร์ระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต ทำให้เซลลูโลสหลุดออกจากการห่อหุ้มของลิกนิน [16]

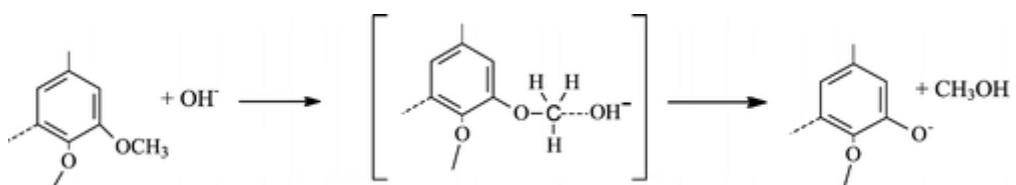


รูปที่ 2.9 สารเชิงซ้อนลิกนินคาร์โบไฮเดรตที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ [16]

โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับฟีนอลไฮดรอกซิลของลิกนิน (รูปที่ 2.10) และสามารถเกิดปฏิกิริยานิวคลีโอฟิลิกระหว่างเมทอกซิลกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 2.11) ส่งผลให้ปริมาณเมทอกซิลของลิกนินลดลง โซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่เพียงแต่ทำลายการเชื่อมโยงระหว่างหน่วยเท่านั้น แต่ยังเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของลิกนินอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างลิกนินจะส่งผลต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ [16]

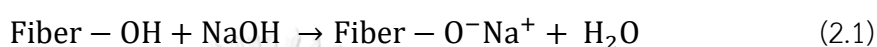


รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างลิกนินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ [16]



รูปที่ 2.11 เมทอกซิลที่แตกออกจากโครงสร้างของลิกนิน [16]

นอกจากนี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังสามารถเข้าไปกำจัดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างตาข่าย แสดงดังสมการที่ 2.1 ซึ่งจะทำให้เกิดการบวมตัวที่สูงขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างเซลล์มากขึ้น และเกิดช่องว่างที่ถูกเติมไปด้วยน้ำ โดยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลล์จะถูกแปลงเป็นหมู่ -ONa- ซึ่งทำให้เกิดการขยายขนาดของโมเลกุล จากนั้นการล้างด้วยน้ำในภายหลังจะกำจัดไอออน Na และเปลี่ยนเซลล์ให้เป็นโครงสร้างผลึกใหม่ โดยสารละลายอัลคาไลน์ไม่เพียงแต่ส่งผลต่อองค์ประกอบเซลล์ภายในเส้นใยพืชแต่ยังส่งผลต่อองค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลล์ด้วย (เฮมิเซลล์ ลิกนิน และเพกติน) [17]



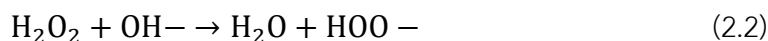
2.2.3 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

การปรับสภาพทางชีวภาพของชีวมวลส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการใช้เชื้อราที่สามารถย่อยสลายสลายลิกนิน เฮมิเซลล์และพอลิฟีนอลได้ วิธีการปรับสภาพนี้มีข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการอื่น ๆ เช่น เครื่องมือที่ใช้ง่ายต่อการดำเนินการ เหมาะสำหรับชีวมวลที่มีความชื้นทั้งต่ำและสูง ต้องการพลังงานต่ำ และไม่สร้างสารที่เป็นพิษ อย่างไรก็ตามการปรับสภาพทางชีวภาพไม่ค่อยเป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการทำงานช้าเกินไป ใช้เวลาประมาณ 10-14 วัน ต้องใช้ความระมัดระวังในการควบคุมภาวะการเจริญเติบโตของเชื้อราและใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการดำเนินการ ประเภทของเชื้อราที่ใช้กันทั่วไปในการปรับสภาพทางชีวภาพ ได้แก่ brown-rot fungi white-rot fungi soft-rot fungi actinomycetes และ bacteria ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการปรับสภาพทางชีวภาพของชีวมวล [14]

2.3 การฟอกสีเส้นใยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

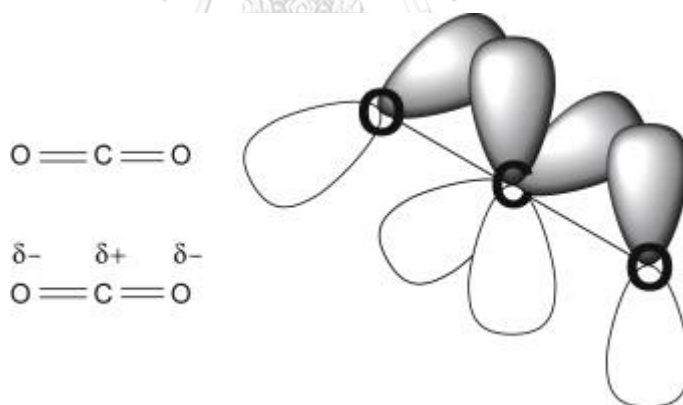
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H_2O_2) เป็นสารฟอกขาวและทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ได้ในเวลาเดียวกัน สามารถทำให้เส้นใยสว่างขึ้น โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดการสลายตัวเป็นไอออนเปอร์ไฮดรอกซิล (HOO^-) ภายใต้ภาวะที่เป็นด่าง แสดงดังสมการที่ 2.2 ซึ่งไอออนเหล่านี้มีหน้าที่ในการลดสีของเส้นใยโดยการจับกับหมู่โครโมโฟริกที่ดูดซับแสงของลิกนินและเซลล์ลูส (หมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอนิลที่ถูกคอนจูเกต และควิโนน) รวมทั้งเกิดออกซิเดชันกับสารประกอบอะลิฟาติกโมเลกุลต่ำของลิกนิน [18] หลังจากการฟอกขาวจึงทำให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาลเปลี่ยนเป็นสีเหลือง [19] นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจทำปฏิกิริยากับโครงสร้างเบนโซควิโนนของลิกนินหรือทำ

ปฏิกิริยากับพันธะคู่ของคาร์บอนิลและคาร์บอน-คาร์บอนของลิกนินเพื่อเกิดออกซิเดชันต่อไป ซึ่งนำไปสู่การกำจัดลิกนิน [20]



2.4 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂)

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอมและออกซิเจน 2 อะตอมรวมกัน ความสมมาตรของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแบบเส้นตรงและมีความสมมาตรศูนย์กลาง ความยาวของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจนในคาร์บอนไดออกไซด์คือ 116.3 พิโคเมตร ประกอบด้วยพันธะซิกมา (σ -bond) และพันธะไพ (π -bond) ซึ่งพันธะไพทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะมีประจุบวก (+0.592) และอะตอมของออกซิเจนมีประจุลบ (-0.296) เนื่องจากมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของออกซิเจนสูงกว่าคาร์บอน [21] โครงสร้างของคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.12 คุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์คือเป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ สามารถละลายได้ในน้ำ เอทานอลและอะซิโตน มีจุดหลอมเหลว -55.6 องศาเซลเซียส จุดเดือด -78.5 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 1.977 กรัมต่อมิลลิลิตร [22]



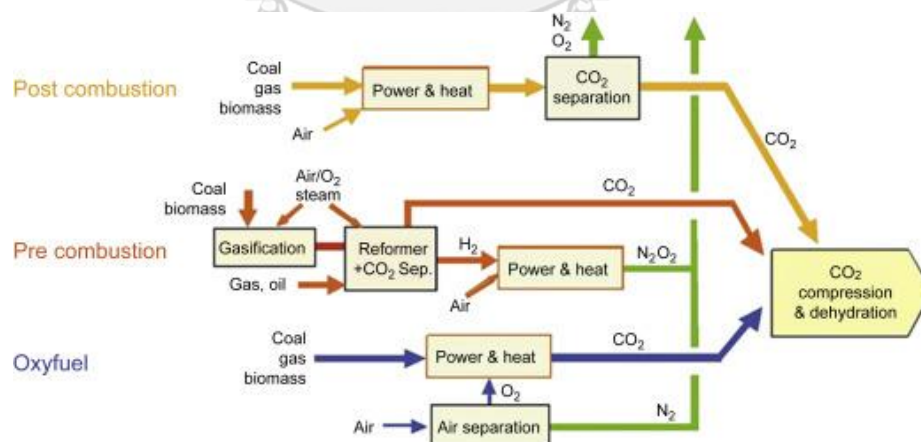
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ [21]

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศของโลก จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชทุกชนิด นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่มากในชั้นบรรยากาศของโลก (ประมาณ 393 ppm หรือส่วนในล้านส่วน) และมีบทบาทสำคัญในการควบคุมสภาพภูมิอากาศโลก ช่วยดักจับความร้อนในชั้นบรรยากาศ ทำให้มีความร้อนไหลออกสู่อวกาศน้อยลง สิ่งนี้ทำให้ชีวิตบนโลกเจริญเติบโตได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยขับเคลื่อนวัฏจักรคาร์บอนซึ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตบนโลก

คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศสามารถสกัดได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น การปล่อยแก๊สออกจากภูเขาไฟ การเผาไหม้ของอินทรีย์วัตถุ และกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตแอโรบิกที่มีชีวิต โดยแหล่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์สร้างขึ้นสามารถหาได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อการผลิตพลังงานและการขนส่ง คาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อผลิตกรดคาร์บอนิก ทำปฏิกิริยากับต่างเพื่อให้คาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนตเป็นผลิตภัณฑ์ และสามารถผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยการหมักและการหายใจระดับเซลล์ [22] แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิโลกโดยเฉลี่ยสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศของโลกในด้านอื่น ๆ

2.5 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

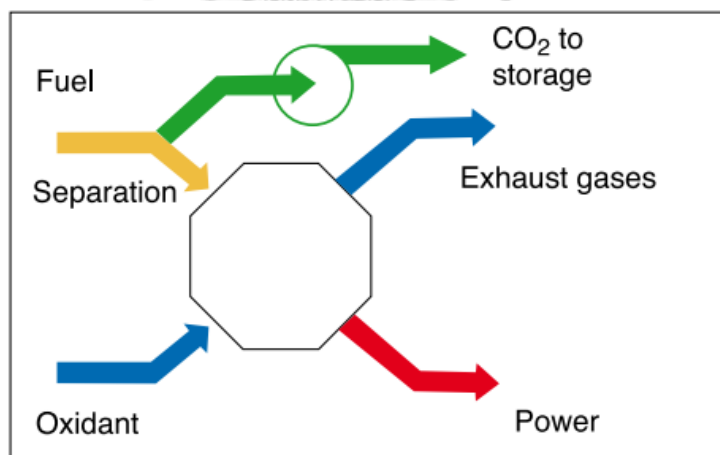
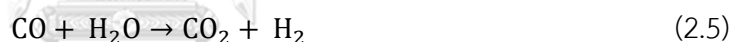
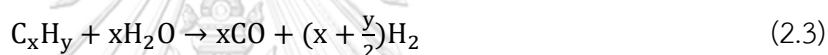
การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศเป็นปัญหาหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิโลกสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม สังคมและเศรษฐกิจโดยรวม เทคโนโลยีในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญและมีประสิทธิภาพสำหรับการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และลดผลกระทบที่เกิดจากการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ซึ่งการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้ 3 วิธี ได้แก่ การดักจับก่อนการเผาไหม้ หลังการเผาไหม้และการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง (รูปที่ 2.13) [23]



รูปที่ 2.13 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [24]

2.5.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้

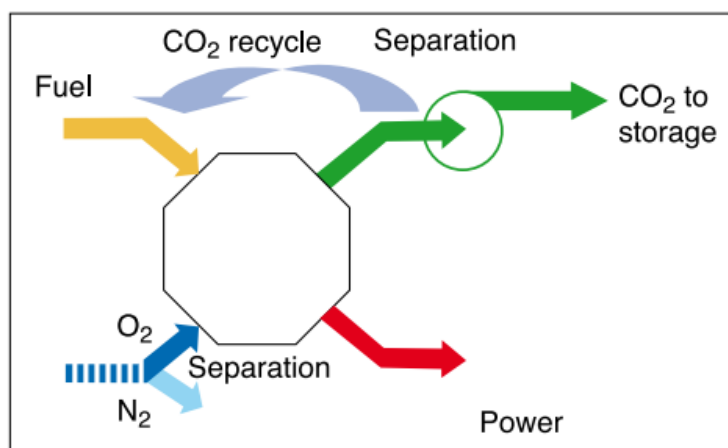
การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (รูปที่ 2.14) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแปลงเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส ให้กลายเป็นส่วนผสมของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้กระบวนการทำให้เป็นแก๊ส (Gasification) หรือกระบวนการรีฟอร์มมิง (Reforming) ในขั้นแรกเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจน อากาศหรือน้ำเพื่อให้กลายเป็นแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) หรือแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel gas) ที่ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำผ่านปฏิกิริยา water gas shift เพื่อให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่มากขึ้น แสดงดังสมการที่ 2.3-2.5 [25] จากนั้นแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปเพื่อกักเก็บผ่านกระบวนการดูดซับทางกายภาพหรือเคมี ส่วนไฮโดรเจนที่ผลิตโดยกระบวนการเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้หลากหลาย เช่น เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า หม้อต้ม เต้าเผา และเซลล์เชื้อเพลิง [23]



รูปที่ 2.14 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ [26]

2.5.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง

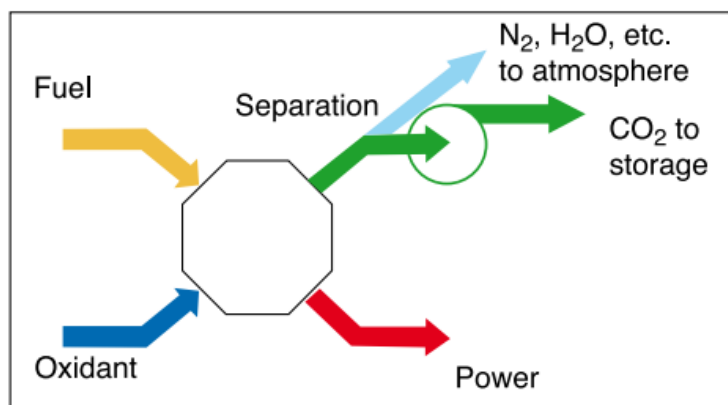
การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง (รูปที่ 2.15) เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่ใช้ออกซิเจนแทนอากาศเกือบทั้งหมด โดยจะทำการแยกออกซิเจนออกจากอากาศก่อนที่จะผ่านการเผาไหม้ ซึ่งเป็นการลดปริมาณไนโตรเจนในแก๊สไอเสีย อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดแก๊สไอเสียที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้หลักจากแยกออกจากรวมมีความเข้มข้นสูง (80–98%) ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่ใช้ [23]



รูปที่ 2.15 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูง [26]

2.5.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (รูปที่ 2.16) เป็นกระบวนการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สไอเสียหลังการเผาไหม้ โดยปกติแล้วปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มีค่อนข้างต่ำ เช่น สำหรับถ่านหิน 7-14% และสำหรับแก๊สเพลิง 4% ทำให้พลังงานและค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับหน่วยดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสูง (>95.5%) ที่จำเป็นสำหรับการขนส่งและจัดเก็บค่อนข้างสูง [23]



รูปที่ 2.16 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [26]

2.6 เทคโนโลยีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกระบวนการที่ใช้แยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระแสแก๊สไอเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการขนส่งต่อไป เทคโนโลยีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมใช้ เช่น การแยกผ่านเมมเบรน การกลั่นที่อุณหภูมิต่ำ การดูดซึมและการดูดซับ [23]

2.6.1 การแยกผ่านเมมเบรน (Membrane separation)

กระบวนการแยกผ่านเมมเบรนเป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนเพื่อแยกส่วนประกอบในสารละลายโดยการคัดแยกสารที่ไม่ต้องการและปล่อยให้สารอื่น ๆ ผ่านเมมเบรน ซึ่งสามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี นอกจากนี้ยังสามารถจัดประเภทได้ตามแรงขับ ชนิดและโครงสร้างของเมมเบรนหรือความสามารถในการกำจัดและกลไก [27] ในปัจจุบันกระบวนการแยกเมมเบรนมักใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมโดยอาศัยแรงดันเมมเบรนเป็นหลัก เช่น reverse osmosis, ultrafiltration, nanofiltration และ microfiltration ข้อดีของกระบวนการนี้คือประสิทธิภาพการระเหยสูง ใช้พลังงานต่ำ ใช้งานง่าย และไม่มีมลพิษ [28]

2.6.2 การกลั่นที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic distillation)

การกลั่นด้วยอุณหภูมิต่ำเป็นกระบวนการแยกแก๊สโดยใช้การกลั่นที่อุณหภูมิต่ำมากและความดันสูง เพื่อแยกส่วนประกอบของส่วนผสมของแก๊ส สำหรับการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สไอเสีย คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิกะเหิด (-100 ถึง -135 องศาเซลเซียส) จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่แข็งตัวแล้วจะถูกแยกออกจากแก๊สเบาอื่น ๆ และบีบอัดที่ความดันสูงคือ 100 ถึง 200 ของความดันบรรยากาศ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถกู้คืนได้สูงถึง 90–95% ของแก๊สไอเสีย เนื่องจากการกลั่นดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำมากและความดันสูง จึงเป็น

กระบวนการที่ใช้พลังงานสูงซึ่งคาดว่าจะอยู่ที่ 600–660 ยูนิตต่อตันของคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บในรูปของเหลว [23]

2.6.3 การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมคือการถ่ายโอนสารจากเฟสของแก๊สไปยังเฟสของเหลว โดยสารที่จะถูกดูดซึมจะถูกละลายในของเหลวผ่านกระบวนการทางกายภาพ ซึ่งอาจตามมาด้วยปฏิกิริยาเคมี กระบวนการดูดซึมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซึมทางกายภาพและการดูดซึมทางเคมี

2.6.3.1 การดูดซึมทางกายภาพ (Physical Absorption)

การดูดซึมทางกายภาพขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของแก๊สบนเฟสของเหลว ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของเฮนรีจากสมการที่ 2.6 ดังต่อไปนี้

$$P_i = H_i X_i \quad (2.6)$$

ซึ่ง P_i คือ ความดันบางส่วนของส่วนประกอบ i
 H_i คือ ค่าคงที่กฎของเฮนรีขององค์ประกอบ i
 X_i คือ เศษส่วนโมลของ i ในเฟสของเหลว

ความสามารถในการละลายของส่วนประกอบ i ในเฟสแก๊ส จะเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความดันบางส่วนของส่วนประกอบ i ในเฟสแก๊ส โดยค่าคงที่กฎของเฮนรีขึ้นกับอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

การดูดซึมทางกายภาพสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้เมทานอลบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย โดยความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในเมทานอล (ที่ 263 เคลวินและความดันคาร์บอนไดออกไซด์ = 1 บาร์) คือ 10 ลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรของเมทานอล ในขณะที่ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำในภาวะเดียวกันเพียง 2.5 ลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อลิตรของน้ำ [29] การดูดซึมทางกายภาพส่วนใหญ่จะใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูงเพื่อให้มีความสามารถในการละลายที่สูง ดังนั้นการฟื้นฟูตัวดูดซึมสำหรับการดูดซึมทางกายภาพ ทำได้โดยการลดความดันลง เนื่องจากจะทำให้ความดันบางส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงและทำให้ความสามารถในการละลายลดลง ข้อดีของการดูดซับทางกายภาพ

ภาพ คือความเป็นพิษและความกัดกร่อนต่ำ ใช้พลังงานน้อย ส่วนข้อเสียคือมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำ การคัดเลือกที่ต่ำและจำกัดอุณหภูมิในการดำเนินการ [30]

2.6.3.2 การดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption)

การดูดซึมทางเคมีคือการถ่ายโอนสารจากเฟสของแก๊สไปยังเฟสของเหลว เหมือนกับการดูดซึมทางกายภาพ เพียงแต่องค์ประกอบในเฟสของเหลวจะทำปฏิกิริยากับสารดูดซึม เพื่อสร้างสารเชิงซ้อนกึ่งเสถียร โดยสารที่นิยมใช้สำหรับการดูดซึมทางเคมี คืออัลคาโนลามีน (Alkanolamine) เช่น Monoethanolamine Diethanolamine และ Methyl-diethanolamine โดยกลุ่มไฮดรอกซิลของอัลคาโนลามีนจะส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของอัลคาโนลามีน และจะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่หมู่อะมิโน การดูดซึมทางเคมีสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้ Monoethanolamine (MEA) เนื่องจาก MEA มีความสามารถในการดูดซึมที่สูง 1 โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซึมต่อ 1 โมลของ MEA) เมื่อเปรียบเทียบกับอัลคาโนลามีนตัวอื่น ๆ [29]

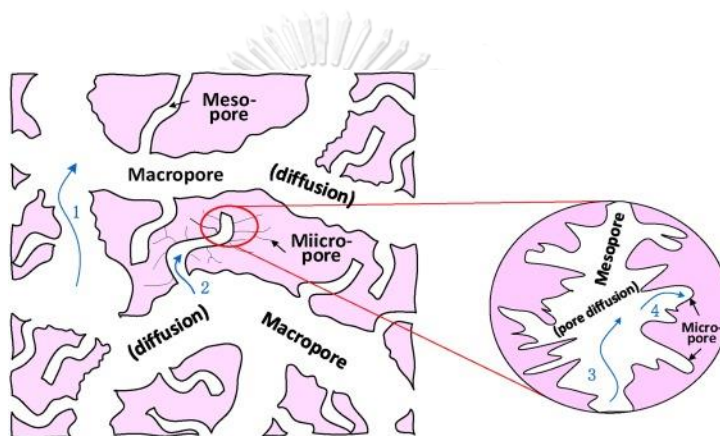
2.6.4 การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการโดยรวมของการดูดซับ (Adsorption) ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ ตัวถูกละลายจะแพร่กระจายจากของไหลบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังพื้นผิวด้านนอก จากนั้นตัวถูกละลายจะกระจายภายในรูพรุนไปยังพื้นผิวของรูพรุน ซึ่งตัวถูกละลายจะถูกดูดซับลงบนพื้นผิว เนื่องจากการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวเท่านั้น การเพิ่มความพรุนสามารถเพิ่มพื้นที่ว่างสำหรับการดูดซับที่จะเกิดขึ้นได้ ซึ่งกลไกของการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ กลไกการแพร่กระจาย กล่าวคือโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ถูกขนส่งไปยัง active sites ในรูพรุนของตัวดูดซับ และกลไกการดูดซับ กล่าวคือโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับบนพื้นผิวผ่านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Physical adsorption) หรือปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (Chemical Adsorption) [31] ตัวดูดซับของแข็งที่นิยมใช้สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ตะแกรงโมเลกุล ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ ซิลิกา อะลูมินา [23]

2.6.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกจับและตัวดูดซับที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่อ่อนแอ ไม่มีพันธะเคมีเกี่ยวข้องและความร้อนการดูดซับต่ำ โดยมีความร้อนของการดูดซับน้อยกว่า 15-20 กิโลจูล/โมล และเกิดที่อุณหภูมิต่ำ เช่น -200 ถึง -25 องศาเซลเซียส ทำให้ตัวดูดซับที่เป็นของแข็งสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ง่ายและคงโครงสร้างเดิมไว้

กระบวนการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.17 ในขั้นตอนแรกเป็นการดูดซับบนพื้นผิวภายนอก โดยการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นจากเฟสของแก๊สไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับผ่านการพาความร้อน การกระจายตามแนวแกน และการแพร่กระจายของอนุภาค ซึ่งอัตราการดูดซับจะถูกกำหนดโดยพื้นที่ผิวจำเพาะ ขั้นที่สองเป็นขั้นตอนการแพร่กระจายภายใน โดยเฟสของแก๊สจะเข้าสู่พื้นผิวภายในผ่านการแพร่กระจายของรูพรุน โดยโครงสร้างและปริมาตรของรูพรุนเป็นปัจจัยสำคัญของขั้นตอนนี้ และในขั้นตอนสุดท้ายอัตราส่วนของปริมาตร micropore mesopore และ macropore เป็นปัจจัยสำคัญ โดยอัตราการดูดซับทางกายภาพทั้งหมดถูกควบคุมโดยความเข้มข้นของแก๊ส [32]



รูปที่ 2.17 กระบวนการดูดซับทางกายภาพ [32]

2.6.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง active sites ของพื้นผิวของตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ โดยการแชร์อิเล็กตรอนระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เพื่อสร้างพันธะโควาเลนต์หรือไอออนิก ดังนั้นการดูดซับทางเคมีไม่สามารถย้อนกลับได้อย่างสมบูรณ์และต้องใช้พลังงานสูงในการสร้างใหม่ โดยการดูดซับทางเคมีจะเกิดที่อุณหภูมิอุณหภูมิต่ำกว่า 25-400 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนของการดูดซับ 50-300 กิโลจูล/โมล [33]

2.6.4.3 ตัวดูดซับของแข็ง (Solid adsorbents)

ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของกราฟไฟท์ ถ่านกัมมันต์ถูกเตรียมโดยการสลายตัวทางความร้อนของอินทรีย์วัตถุหรือถ่านหินตามด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือ คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1100 องศาเซลเซียส พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ ส่วนใหญ่มักใช้ในการดูดซับไฮโดรคาร์บอนและใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

ถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก โดยทั่วไปมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุน 4 ถึง 9 อังสตรอม [29]

ซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นผลึกอะลูมิโนซิลิเกตที่มีรูพรุนประกอบด้วยการรวมกันของ SiO_4 และ AlO_4 tetrahedra ซึ่งเชื่อมต่อกันเพื่อสร้างรูปร่างที่หลากหลายได้จำนวนมากผ่านอะตอมออกซิเจน เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติของตาข่ายคริสตัลแบบเปิดที่มีรูพรุนระดับโมเลกุล ซึ่งขนาดของช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารที่สามารถดูดซับได้ นอกจากนี้โครงสร้างยังมีโลหะประจุบวกที่สมดุลกับประจุลบส่วนเกินของระบบ [29] ซึ่งซีโอไลต์จัดเป็นโมเลกุลาร์ซีฟชนิดหนึ่งที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่สูง สามารถใช้เป็นตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียที่สำคัญของซีโอไลต์คือผลกระทบของไอน้ำต่อความสามารถในการดูดซับและความเสถียรภาพ และเมื่อมีคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นกรดจะทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างซีโอไลต์และนำไปสู่การพังทลายของโครงข่าย นอกจากนี้สิ่งเจือปนอื่น ๆ ในกระแสแก๊สมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานเช่นกัน รวมทั้งมีต้นทุนวัสดุที่สูง [34]

เมโซพอร์สซิลิกา

เมโซพอร์สซิลิกาเป็นรูปแบบหนึ่งของซิลิกา โดยอนุภาคนาโนชนิดเมโซพอร์สที่พบได้บ่อยที่สุดคือ MCM-41 และเมโซพอร์สซิลิกา SBA-15 วัสดุเมโซพอร์สที่ใช้สำหรับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำมาดัดแปรด้วยสารประเภทเอมีน เช่น Methyl diethanolamine, Monoethanolamine และ Diethanolamine เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ [34]

อะลูมินากัมมันต์

อะลูมินากัมมันต์คือวัสดุรูพรุนในรูปแบบของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมจากแร่บอกไซต์ที่ถูกไฮดรอกซิเลตไปบางส่วน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) โดยการคายน้ำและการเกิดผลึกซ้ำที่อุณหภูมิสูง [29] ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกขับออกไปเหลือไว้แต่โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของอะลูมินากัมมันต์ [35] ข้อดีของอะลูมินา ได้แก่ ต้นทุนการดูดซับต่ำ ความต้องการไอน้ำต่ำ ความเสถียรทางกลที่ดี และความเสถียรทางความร้อนสูง แต่มีความสามารถในการดูดซับต่ำ ดังนั้นโดยทั่วไปจะใช้อะลูมินาเป็นวัสดุรองรับสำหรับโลหะออกไซด์หรือคาร์บอนเนต [30]

2.7 การตัดแปรด้วยเอมีน

2.7.1 การเคลือบฝัง (Impregnation)

การเคลือบฝังคือกระบวนการที่ใช้เอมีนโพลดลงบนตัวรองรับที่มีรูพรุน โดยละลายเอมีนลงในตัวทำละลาย ซึ่งโดยปกติจะใช้น้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอลหรือเอทานอล หลังจากนั้นจะทำการกวนเพื่อให้เอมีนละลาย สารละลายเอมีนจะถูกนำไปเติมลงบนตัวรองรับ และทำการกวนที่อุณหภูมิห้องในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อช่วยให้โมเลกุลของเอมีนกระจายตัวเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับ สารละลายถูกกรองและทำให้แห้งเพื่อนำตัวทำละลายออกและตัวดูดซับที่โพลดเอมีนจะถูกทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โมเลกุลของเอมีนถูกยึดติดบนพื้นผิวและภายในรูพรุนของตัวรองรับทำให้เกิดไซต์การดูดซับสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การโพลดเอมีนบนตัวรองรับขึ้นอยู่กับปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจึงขึ้นอยู่กับตัวรองรับที่มีปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ เนื่องจากไม่มีพันธะเคมีระหว่างเอมีนและตัวรองรับ ตัวดูดซับที่ได้จึงมีความเสถียรภาพทางความร้อนใกล้เคียงกับเอมีนที่ใช้ [36]

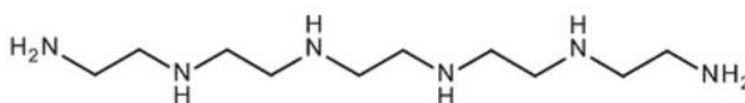
2.7.2 การกราฟ (Grafting)

การกราฟเอมีนหรือสารกลุ่มอะมิโนไฮเลบนตัวรองรับจะเกิดพันธะเคมีระหว่างเอมีนและหมู่แอคทีฟบนตัวรองรับ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล เป็นต้น โดยการกราฟจะประกอบด้วยขั้นตอนในการสร้างโมเลกุลเอมีนที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกจากตัวดูดซับโดยใช้ตัวทำละลาย ดังนั้นจำนวนกลุ่มแอคทีฟบนพื้นผิวของตัวดูดซับจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดการโพลดเอมีนและประสิทธิภาพในการดูดซับ [36]

2.8 เพนตะเอทิลีนเฮกซามีน (Pentaethylenehexamine, PEHA)

เพนตะเอทิลีนเฮกซามีน (Pentaethylenehexamine, PEHA) เป็นของเหลวหนืดสีเหลืองมีจุดเดือด 380 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว -35 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ 175 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความดันไอน้อยกว่า 1 มิลลิบาร์ ที่ 20 องศาเซลเซียส สามารถละลายได้ในเอทานอล อะซิโตน อีเธอร์ โทลูอีน เบนซีน และน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในสารละลายในเฮปแทน และไม่ละลายในเฮกเซน โดยเพนตะเอทิลีนเฮกซามีนสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศและเกิดการไฮเดรตได้เมื่อมีการสร้างเจลหรืออาจแข็งตัวภายใต้ภาวะบรรยากาศ ทำปฏิกิริยารุนแรงกับอัลดีไฮด์ กรด คลอรีนไฮโดรคาร์บอนและตัวออกซิไดซ์ กัดกร่อนทองแดงและโลหะผสมทองแดง นอกจากนี้สามารถเกิดการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ สำหรับการใช้งานเพนตะเอทิลีนเฮกซามีนจะถูก

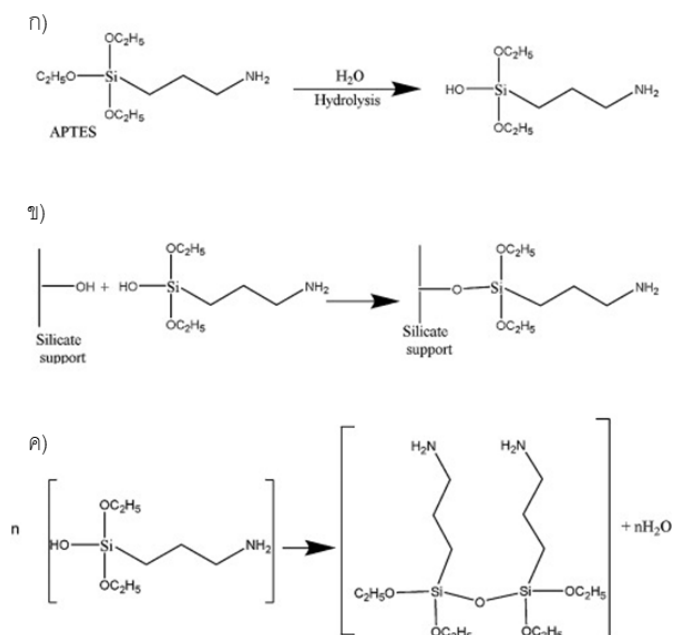
นำมาใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารฆ่าเชื้อรา สารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย สารกันบูดไม้ สารคีเลต สารลดแรงตึงผิว สารช่วยในกระบวนการแปรรูปแร่ และพอลิเมอร์ และยังสามารถเป็นตัวกลางสำหรับการสังเคราะห์สีย้อมได้หลายหลาย เช่น สารเคลือบ สารหล่อเย็น น้ำมันหล่อลื่น สารป้องกันการแข็งตัว พลาสติก อุตสาหกรรมการก่อสร้างและยา [37] นอกจากนี้เพนตะเอทิลีนเฮกซามีนซึ่งประกอบด้วยหมู่เอมีนปฐมภูมิสองหมู่และหมู่เอมีนทุติยภูมิสี่หมู่ในโครงสร้าง (รูปที่ 2.18) จึงมีการนำมาใช้เป็นตัวตัดแปรเพื่อสังเคราะห์สารดูดซับที่เป็นของแข็งสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีปริมาณหมู่เอมีนต่อหน่วยมวลสูง ความคงตัวทางความร้อนสูง และความเป็นพิษต่ำ [38]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างทางเคมีของเพนตะเอทิลีนเฮกซามีน [38]

2.9 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES)

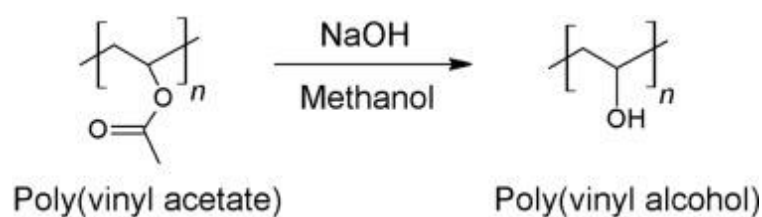
3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) เป็นอะมิโนไซเลนที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อกับอะตอมออกซิเจนที่มีอยู่ในซิลิกา อลูมินา เซอร์โคเนีย ไทเทเนียมไดออกไซด์และอื่น ๆ [39] นอกจากนี้สามารถเกิดการกราฟที่เรียกว่ากระบวนการซิลานาเซชันได้ โดยปฏิกิริยาจะเกิดระหว่างเมทริกซ์อินทรีย์และอัลคอกซีไซเลน ซึ่งหมู่อัลคอกซีทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของของแข็ง โดยกระบวนการซิลานาเซชันเริ่มด้วยการไฮโดรไลซ์ของอัลคอกซีไซเลน จากนั้นจะเกิดการควบแน่นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวและอัลคอกซีไซเลนเพื่อสร้างโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (รูปที่ 2.19) การเชื่อมขวางอาจเกิดขึ้นผ่านพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไฮโดรเจน [40]



รูปที่ 2.19 ก) ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรไลซิส ข) ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ค) ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของ APTES [40]

2.10 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพอลิเมอร์สีเขียว [41] ซึ่งการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถทำได้หลากหลายทาง โดยวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือพอลิเมอร์ไรเซชันจากอนุโมลอิสระของไวนิลอะซิเตท (VAc) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ตัวกลางที่เรียกว่าพอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) ตามด้วยไฮโดรไลซิสของหมู่อะซิเตทที่มีความเป็นเบสแก่ในเมทิลแอลกอฮอล์ (รูปที่ 2.20) ไฮโดรไลซิสนี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนบางส่วนหรือทั้งหมดของหมู่เอสเตอร์ของ VAc โดยหมู่ไฮดรอกซิลภายใต้ภาวะที่ต่าง [42]



รูปที่ 2.20 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตท [42]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์แสดงความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่น ๆ และสามารถผสมกับวัสดุธรรมชาติต่าง ๆ ได้ง่าย ไม่เป็นพิษ เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีความเป็นฉนวนสูงและมีความโปร่งใสสูง นอกจากนี้ PVA ได้รับความสนใจมากมายในการใช้งานที่หลากหลายเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงที่ยืดหยุ่น อีกทั้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเยี่ยมและคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊สสูง ซึ่งถูกนำมาใช้ในงานวิจัยหลายสาขา ได้แก่ เมมเบรน ชีวการแพทย์ การนำส่งยา อุปกรณ์ชีวการแพทย์เทียมและพอลิเมอร์คอมโพสิต [41] นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลบนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถดัดแปรทางเคมีได้ เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถแทรกในพอลิเมอร์หรือหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน และด้วยความสามารถในการละลายน้ำได้ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงมักถูกนำมาใช้เพื่อผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีเซลลูโลส [42]

2.11 การเชื่อมขวาง (Crosslinking)

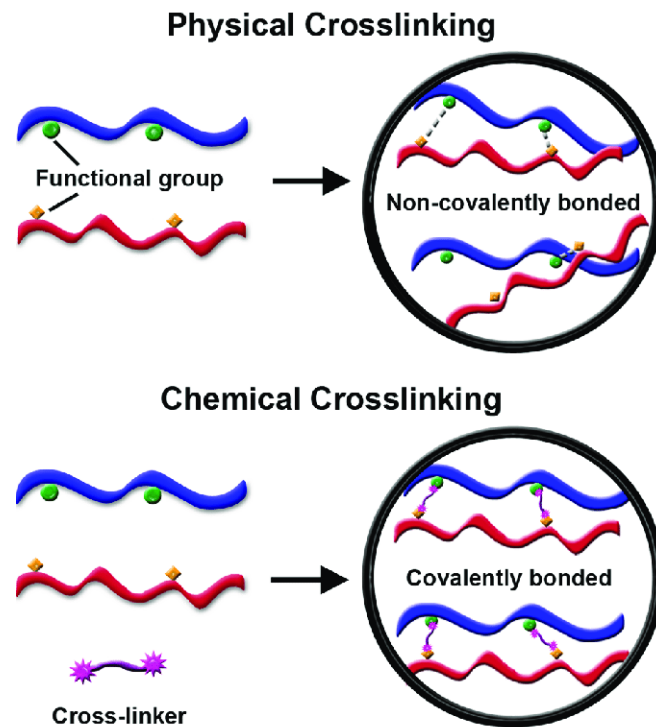
การเชื่อมขวางทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยจะช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง ความทนทานต่อสารเคมี และสมบัติสำคัญอื่น ๆ โดยการเชื่อมขวางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือการเชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.21

2.11.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking)

การเชื่อมขวางทางกายภาพคือการเกิดพันธะระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านปฏิกิริยาที่อ่อนแอ ส่วนใหญ่แล้วปฏิกิริยาเหล่านี้มักจะเป็นพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปการเชื่อมขวางทางกายภาพนั้นไม่เสถียรทั้งทางกลและทางความร้อน ซึ่งการเชื่อมขวางทางกายภาพสามารถเกิดการย้อนกลับได้และสามารถคืนรูปได้โดยใช้ความร้อน [43]

2.11.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking)

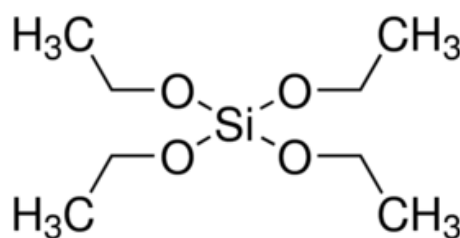
การเชื่อมขวางทางเคมีคือการเกิดพันธะระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านพันธะเคมีโควาเลนต์ ซึ่งการเชื่อมขวางทางเคมีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีที่มีการได้รับความร้อน ความดัน การเปลี่ยนแปลงของค่า pH หรือการฉายรังสี โดยการเชื่อมขวางทางเคมีจะมีความทนทานสูง เนื่องจากเกิดพันธะเคมีที่แข็งแรง [43]



รูปที่ 2.21 การเชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี [44]

2.12 เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate, TEOS)

เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตเป็นสารประกอบ alkoxysilanes ที่มีพันธะ Si-OR มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ (รูปที่ 2.22) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ที่สำคัญและได้รับความนิยมเนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ มีลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสี อุตสาหกรรมเคมีหลายแห่งนิยมใช้เป็นวัตถุดิบหรือตัวกลางสำหรับสารประกอบเพื่อเพิ่มมูลค่า เช่น สารเคลือบทนสารเคมี สารเคลือบทนความร้อนและกาว นอกจากนี้ยังใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารยึดเกาะ ซีเมนต์ทนไฟ เซรามิกส์ สีต้านการกัดกร่อน สารเคลือบที่ทนต่อการขีดข่วนและแว่นตา [45] นอกจากนี้ TEOS นิยมเอามาใช้เป็นสารเชื่อมขวาง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเข้ากันได้ของสารประกอบ [46] อีกทั้งข้อดีของ TEOS คือมีความหนืดต่ำ ทำให้สามารถเข้าไปในรูพรุนของสารตั้งต้นได้ง่าย [47]



รูปที่ 2.22 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต [48]

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ [49] ศึกษาไม้รูปพรุนที่ดัดแปรด้วยพอลิเอทิลีนอิมิน (Polyethyleneimine, PEI) สำหรับการดูดซับแบบเลือก CO₂/N₂ โดยใช้กระบวนการที่สำคัญสองกระบวนการเพื่อให้ได้โครงสร้างแบบมีโซพอร์รัส (Mesoporous) สำหรับการดูดซับทางกายภาพและโพลดกลุ่มเอมีนสำหรับการดูดซับทางเคมี พบว่าหลักจากการกำจัดลิแกนด์ด้วยโซเดียมคลอไรต์ (NaClO₂) ไม่มีโครงสร้างแบบมีโซพอร์รัสและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง สีของไม้จะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีขาว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครโมฟอร์ที่บ่งบอกถึงลิแกนด์ได้ถูกกำจัดออก นอกจากนี้พบว่าปริมาตรมีโซพอร์รัสรวม และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยยังเพิ่มขึ้นหลังจากการกำจัดลิแกนด์ โดยสัดส่วนที่มากที่สุดของช่วงขนาดรูพรุนคือ 2-20 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (3.30 อังสตรอม) ช่วยเพิ่มการดูดซับทางกายภาพโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ หลังจากโพลด PEI เพื่อปรับปรุงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการคัดเลือกโดยการดูดซับทางเคมี พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างไม้ไม่เสียหาย ยังคงรักษาโครงสร้างรังผึ้งและพบว่าปริมาตรมีโซพอร์รัสรวมและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยลดลงตามปริมาณ PEI ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเมื่อโพลด PEI ในปริมาณที่มากขึ้น

Wang และ Okubayashi [50] ศึกษาตัวดูดซับเซลลูโลสแอโรเจลเชื่อมขวางด้วยพอลิเอทิลีนอิมิน (Polyethyleneimine-crosslinked cellulose aerogel, PCC) สำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล, ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาเชื่อมขวาง โดยการเติมกลูตาโรลดีไฮด์ (Glutaraldehyde, GA) เป็นสารเชื่อมขวาง เพื่อลดการลดลงของพื้นที่ผิวจำเพาะหลังจากการเติม polyethyleneimine (PEI) และเพื่อปรับปรุงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าหลังจากเติมสารเชื่อมขวาง GA ตัวดูดซับเซลลูโลสมีความเสถียรมากขึ้น มีการหดตัวน้อยลง พื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนี้ปริมาณไนโตรเจนของ PCC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 9.7% เป็น 17.4% เมื่อความเข้มข้นของ GA เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณ GA ที่สูงขึ้นส่งเสริมการเชื่อมขวางของ PEI และเซลลูโลส ซึ่งปริมาณไนโตรเจนที่สูงขึ้นจะเป็นประโยชน์ต่อการดูดซับทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้หลังจากเติมสารเชื่อมขวาง GA พบว่า PCC aerogels แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ GA เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นพบว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเนื่องจากพันธะโควาเลนต์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และกลุ่มเอมีนอ่อนตัวลงที่อุณหภูมิสูง

Sepahvand และคณะ [51] ศึกษาการปรับปรุงเส้นใยเซลลูโลสโดยใช้พทาไลไมด์ (Phthalimide) เพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการเติม พทาไลไมด์ช่วยให้พื้นที่ผิวจำเพาะและความหนาแน่นสูงขึ้น ในขณะที่ขนาดรูพรุน ความเป็นรูพรุนและปริมาตรรูพรุนลดลง เมื่อเติมพทาไลไมด์มากขึ้น ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของหมู่อะมิโนบนผิวเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) สูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลน้ำที่มีขั้วและโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่มีขั้วสามารถละลายได้ง่ายในน้ำ และเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความดันสูงขึ้น เพราะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความดันช่วยกระตุ้นพลังงานจลน์ของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

Liu และคณะ [52] ศึกษาผลของความยาวสายโซ่เอมีนต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MCM-41 ซึ่งเอมีนที่ใช้คือเอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) ไดเอทิลีนไตรเอมีน (Diethylenetriamine, DETA) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (Tetraethylenepentamine, TEPA) และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน (Pentaethylenehexamine, PEHA) พบว่าเอมีนที่มีความยาวสายโซ่ที่ยาวกว่ามีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวและอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุดที่สูงกว่าเอมีนที่มีความยาวสายโซ่สั้นกว่า แสดงให้เห็นว่าเอมีนที่มีความยาวสายโซ่ที่ยาวกว่ามีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า นอกจากนี้เอมีนที่มีความยาวสายโซ่ที่ยาวกว่า จะสามารถโหลดเอมีนบน MCM-41 ได้ในปริมาณสูงกว่า ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วยเอมีนที่มีความยาวสายโซ่ที่ยาวกว่าแสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงกว่า โดยลำดับความสามารถในการดูดซับดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นดังนี้ PEHA สูงกว่า TEPA, DETA และ EDA ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเอมีนที่มีความยาวสายโซ่ที่สั้นกว่าแสดงอัตราการดูดซับและคายซับที่สูงกว่า เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่เร็วของเอมีนปฐมภูมิและความต้านทานการแพร่ที่น้อยกว่า

Luo และคณะ [53] ศึกษาตัวดูดซับจากซานอ้อย (SB) ที่ดัดแปรด้วยเอมีนสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเตรียมโดยการนำอะคริลาไมด์ (Acrylamide, AM) มากราฟต์ลงบนซานอ้อย จากนั้นดัดแปรด้วยเอมีนชนิดต่าง ๆ ที่มีความยาวสายโซ่แตกต่างกัน ดังนี้ เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) ไดเอทิลีนไตรเอมีน (Diethylenetriamine, DETA) ไตรเอทิลีนเตตระมีน

(Triethylenetetramine, TETA) และเตตระเอทิลีนเพนตะมีน (Tetraethylenepentamine, TEPA) พบว่าซันอ้อยที่ดัดแปรด้วยไตรเอทิลีนเตตระมีนมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด เนื่องจากความยาวสายโซ่ที่ยาวขึ้น ทำให้มีปริมาณหมู่อะมิโนและแอลคิลอะมิโนที่มากขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างเอมีนปฐมภูมิต่อเอมีนทุติยภูมิลดลง รวมทั้งความเป็นเบสของเอมีนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความเสถียรของตัวดูดซับลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณอะคริลาไมด์ ทำให้โอกาสการเกิดการกราฟต์บนซันอ้อยเพิ่มขึ้น นำไปสู่หมู่เอไมด์ที่มากขึ้น ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับเอมีนได้มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยตัวดูดซับ SB-AM-TETA แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 5.01 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถรักษาความเสถียรและความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากการใช้งานไป 10 รอบ นอกจากนี้การมีอยู่ของน้ำจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากช่วยกระตุ้นการดูดซับทางเคมีของหมู่แอลคิลอะมิโนกับคาร์บอนไดออกไซด์

Xing Jiang และคณะ [54] ศึกษาตัวดูดซับเซลลูโลสแอโรเจล (cellulose aerogel, CA) ที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจลประกอบกับการอบแห้งวิกฤตยิ่งยวด โดยทำการกราฟต์กับ 3-aminopropyltriethoxy silane (APTES) พบว่าหลังจากกราฟต์ด้วย APTES พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น เนื่องจากช่องว่างขนาดใหญ่บางส่วน of เซลลูโลสแอโรเจลถูกปิด ทำให้เกิดรูพรุนขนาดนาโนที่มีขนาดเล็กลงในช่องว่างขนาดใหญ่ ซึ่งรูพรุนที่เล็กกว่ามีส่วนทำให้เกิดพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าช่องว่างขนาดใหญ่ โดยตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 1.20 มิลลิโมลต่อกรัม เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 1% ในภาวะแห้ง นอกจากนี้หลังจากการใช้งานตัวดูดซับไป 20 รอบ ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจาก APTES สามารถยึดจับกับเซลลูโลสแอโรเจลด้วยพันธะเคมี ส่งผลให้ตัวดูดซับมีความเสถียรภาพที่ดี

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 ชานอ้อย (Sugarcane bagasse)

3.1.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (Hydrogen Peroxide; จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemistry)

3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 (Sodium hydroxide; Grade AR จากบริษัท Quality Reagent Chemical)

3.1.4 น้ำกำจัดไอออน (De-ionized water)

3.1.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA, ระดับการไฮโดรไลซิสมากกว่า 98% จากบริษัท BDH Medical Supply)

3.1.6 เตตระเอซิลอร์โธซิลิเกตความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 (Tetraethyl Orthosilicate; TEOS, Grade GC จากบริษัท Sigma-Aldrich chemistry)

3.1.7 เพนตะเอทิลีนเฮกซะมินความบริสุทธิ์สูงร้อยละ 80-90 (Pentaethylenehexamine; PEHA, Technical Grade จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemistry)

3.1.8 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 (3-Aminopropyl triethoxysilane; APTES, Technical Grade จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemistry)

3.1.9 เอทานอลความบริสุทธิ์สูงร้อยละ 99.9 (Ethanol; Grade AR จากบริษัท Quality Reagent Chemical)

3.1.10 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฮีเลียม ร้อยละ 30 โดยปริมาตร (30 %v/v Carbon dioxide in helium (CO₂/He); จากบริษัท Praxair)

3.1.11 แก๊สฮีเลียมความบริสุทธิ์สูง ร้อยละ 99.999 โดยปริมาตร (Ultra-high purity helium; He; จากบริษัท Bangkok Industrial Gas)

3.1.12 ไยควอตซ์ (Quartz wool; จากบริษัท Grace)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 กระดาษชั่งสาร (Weighing paper, Whiteman)

3.2.2 ขวดแก้วใส่สาร (Glass bottle)

- 3.2.3 คีมคีบ (Forceps)
- 3.2.4 ช้อนตักสาร (Spatula)
- 3.2.5 ถังน้ำแข็ง (Ice bucket)
- 3.2.6 ถุงพลาสติกซีปล็อก (Plastic zip lock bag)
- 3.2.7 ปีกเกอร์ (Beaker)
- 3.2.8 กระบอกลอย (Cylinder)
- 3.2.9 แท่งแก้วคน (Stirring rod)
- 3.2.10 หลอดหยด (Dropper)
- 3.2.11 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
- 3.2.12 แผ่นเปลวอะลูมิเนียม (Aluminium foil)
- 3.2.13 ไมโครปิเปต (Micropipette) ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Labpipette
- 3.2.14 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น ME 204 ผลิตโดยบริษัท METTLER TOLEDO
- 3.2.15 เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller, MFC) รุ่น AFC 26 ผลิตโดยบริษัท AALBORG INSTRUMENTS & CONTROLS, Inc.
- 3.2.16 เครื่องวัดอัตราการไหล (flow meter) รุ่น ADM 1000 ผลิตโดยบริษัท Agilent Technologies
- 3.2.17 หลอดทดลอง (Column) เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
- 3.2.18 ตู้แห้งแบบใช้ความเย็น (Freeze dryer)
- 3.2.19 ตู้อบความร้อน (Oven)
- 3.2.20 ตู้แช่แข็ง (Freezer)

3.3 วิธีการเตรียม

3.3.1 การเตรียมเยื่อชานอ้อย

นำชานอ้อยมาทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำและนำไปฟุ้งแดดให้แห้ง จากนั้นนำชานอ้อยมาตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาด 1-2 เซนติเมตร แล้วนำไปผ่านกระบวนการผลิตเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนมี pH เป็นกลาง จะได้เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ BCF before pretreatment จากนั้นนำเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาไปผ่าน

กระบวนการฟอกโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนมี pH เป็นกลาง จะได้เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สัญลักษณ์ที่ใช้แทน คือ BCF

3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน

นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 0.014 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนโดยเครื่องกวนแม่เหล็ก โดยใช้ความเร็วในการกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายหมดและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็น แล้วนำเยื่อชานอ้อย 1.386 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงไปในการละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมไว้ พร้อมใช้แท่งแก้วคนและคนให้สารละลายกระจายทั่วเยื่อชานอ้อย จากนั้นนำไปแช่ในตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -19 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบแห้งแบบใช้ความเย็น (freeze dryer) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวรองรับที่ได้มาฉีกให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วทำการหยดเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน 0.6 กรัม และเอทานอล 3 มิลลิลิตร ลงไป ใช้แท่งแก้วคนและบดให้สารละลายเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนกระจายทั่วตัวรองรับ แล้วนำไปอบแห้งโดยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวดูดซับที่สังเคราะห์ คือ 30PEHA/1PVA_BCF

3.3.3 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยตัดแปรด้วยเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน

นำเยื่อชานอ้อย 1.12 กรัม (น้ำหนักแห้ง) มาฉีกให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วทำการหยดเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต 0.28 กรัม ลงบนเยื่อชานอ้อย พร้อมใช้แท่งแก้วคนและคนให้สารละลายกระจายทั่วเยื่อชานอ้อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปแช่ในตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -19 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบแห้งแบบใช้ความเย็น (freeze dryer) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวรองรับที่ได้มาฉีกให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วทำการหยดเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน 0.6 กรัม และเอทานอล 3 มิลลิลิตร ลงไป ใช้แท่งแก้วคนและบดให้สารละลายเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนกระจายทั่วตัวรองรับ แล้วนำไปอบแห้งโดยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยตัดแปรด้วยเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความ

เข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวดูดซับที่สังเคราะห์ คือ 30PEHA/20TEOS_BCF

3.3.4 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อขานอ้อยตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เติตระเอธิลอร์โธซิลิเกตและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน

นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 0.014 กรัม มาละลายด้วยน้ำปริมาตร 3 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนโดยเครื่องกวนแม่เหล็ก โดยใช้ความเร็วในการกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายหมดและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็น แล้วนำเยื่อขานอ้อย 1.106 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงไปในการละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมไว้ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และทำการหยดเติตระเอธิลอร์โธซิลิเกต 0.28 กรัม ลงไป พร้อมใช้แท่งแก้วคนและคนให้สารละลายกระจายทั่วตัวรองรับเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปแช่ในตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -19 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบแห้งแบบใช้ความเย็น (freeze dryer) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวรองรับที่ได้มาฉีกให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วทำการหยดเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน 0.6 กรัม และเอทานอล 3 มิลลิลิตร ลงไป ใช้แท่งแก้วคนและบดให้สารละลายเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนกระจายทั่วตัวรองรับ แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับเยื่อขานอ้อยตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เติตระเอธิลอร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวดูดซับที่สังเคราะห์ คือ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF

3.3.5 การเตรียมตัวดูดซับเยื่อขานอ้อยตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เติตระเอธิลอร์โธซิลิเกต 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน

นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 0.014 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนโดยเครื่องกวนแม่เหล็ก โดยใช้ความเร็วในการกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายหมดและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็น แล้วนำเยื่อขานอ้อย 0.966 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงไปในการละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมไว้ปริมาตร 3 มิลลิลิตร พร้อมใช้แท่งแก้วคนและคนให้สารละลายกระจายทั่วเยื่อขานอ้อย ในขณะเดียวกันนำ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนมาละลายด้วยเอทานอลพร้อมปั่นกวนโดยเครื่องกวนแม่เหล็ก จากนั้นนำสารละลาย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน 0.14 กรัม ใส่ลงไปผสมกับตัวรองรับที่เตรียมไว้และทำการหยดเติตระเอธิลอร์โธซิลิเกต 0.28 กรัม ลงไป พร้อมใช้แท่งแก้วคนและ

คนให้สารละลายกระจายทั่วตัวรองรับเป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบความร้อนอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้วนำตัวรองรับที่ได้ไปแช่ในตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -19 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบแห้งแบบใช้ความเย็น (freeze dryer) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวรองรับที่ได้มาฉีกให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วทำการหยดเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน 0.6 กรัม และเอทานอล 3 มิลลิลิตร ลงไป ใช้แห้งแก้วคน และบดให้สารละลายเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนกระจายทั่วตัวรองรับ แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เติตระเอซิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวดูดซับที่สังเคราะห์ คือ 30PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF

การเรียกชื่อตัวดูดซับต่าง ๆ และสัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวดูดซับนั้น ๆ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อเรียกตัวดูดซับต่าง ๆ และสัญลักษณ์

ตัวดูดซับ	สัญลักษณ์
ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน	xPEHA/aPVA_BCF
ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยเติตระเอซิลออร์โธซิลิเกตและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน	xPEHA/bTEOS_BCF
ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เติตระเอซิลออร์โธซิลิเกตและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน	xPEHA/bTEOS/aPVA_BCF
ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เติตระเอซิลออร์โธซิลิเกต 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนและเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน	xPEHA/cAPTES/bTEOS/aPVA_BCF

หมายเหตุ ให้ a b c และ x แทนระดับความเข้มข้นร้อยละโดยน้ำหนักของ PVA TEOS APTES และ PEHA ตามลำดับ

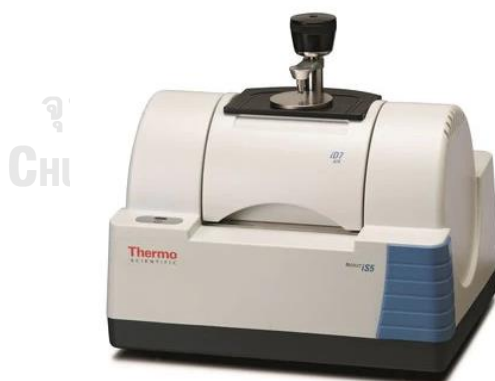
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

3.4.1 เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรกของเยื่อชานอ้อย ทำได้โดยการนำเยื่อชานอ้อยไปอบแห้งโดยใช้ความเย็น (freeze dryer) และทำการลดขนาดให้อยู่ในช่วง 40-50 เมช จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสตามวิธีมาตรฐาน TAPPI T 203 ปริมาณลิกนินตามวิธีมาตรฐาน TAPPI T 222 และปริมาณสารแทรกต่าง ๆ ตามวิธีมาตรฐาน TAPPI T 264

3.4.2 เทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

การทดสอบด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet iS5 แสดงดังรูปที่ 3.1 เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ เนื่องจากการนำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ความเย็น (freeze dryer) วางลงบนแท่น และหมุนหัวเพชรให้แนบสนิทกับตัวอย่าง โดยจะทำการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 500-4000 เซนติเมตร⁻¹ และรายงานผลในรูปแบบของกราฟที่พล็อตระหว่างร้อยละการส่องผ่านแสงกับความถี่



รูปที่ 3.1 เครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet iS5 [55]

3.4.3 เทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen physisorption)

การทดสอบด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (surface area and porosity analyzer) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 แสดงดังในรูป 3.2 เริ่มจากการนำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ความเย็น (freeze dryer) มาชั่งให้ได้ น้ำหนักประมาณ 0.06 กรัม จากนั้นนำไปบรรจุใส่หลอด ในขั้นตอนแรกจะทำการไล่ความชื้นและสิ่งเจือปนบนตัวดูดซับด้วยแก๊สฮีเลียม โดยการให้ความร้อน 105 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะสุญญากาศ เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยใช้อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ซึ่งจะรายงานผลในรูปแบบของไอโซเทอรัมที่พล็อตระหว่างความดันสัมพันธ์กับปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับและคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ส่วน ปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคำนวณจากสมการ Barret-Joyner-Halenda (BJH pore size distribution)



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 [56]

3.4.4 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

การทดสอบด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-IT500HR แสดงดังในรูปที่ 3.3 เพื่อศึกษาผิวของตัวดูดซับ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่าง ภายใต้ภาวะสุญญากาศ และจะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพผิวของตัวอย่าง ซึ่งใช้ความต่างศักย์เร่ง 10 kV



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-IT500HR [57]

3.4.5 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน (Thermogravimetric Analysis)

การทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน โดยใช้เครื่อง Thermal Analyzer TG/TGA PerkinElmer รุ่น PYRIS DIAMOND แสดงดังในรูป 3.4 เพื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับ เริ่มจากการนำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้ความเย็น (freeze dryer) มาชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม และนำตัวอย่างใส่ Platinum pan จากนั้นนำไปวางใน furnace ของเครื่อง โดยจะทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 40-800 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้อุณหภูมิคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้แก๊สไนโตรเจน อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงผลในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและอุณหภูมิ



รูปที่ 3.4 เครื่อง Thermal Analyzer TG/TGA PerkinElmer รุ่น PYRIS DIAMOND [58]

3.5 การทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่ไม่มี ความเข้มข้นในกระแส แก๊สของตัวดูดซับ เริ่มจากชั่งตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 0.2 กรัมบรรจุลงในคอลัมน์ที่รองด้วยใย ควอตซ์ จากนั้นประกอบคอลัมน์เข้ากับเตาปฏิกรณ์ โดยตัวอย่างจะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียส ในกระแสแก๊สฮีเลียม อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัด ความชื้นและสิ่งเจือปนบนผิวตัวดูดซับ หลังจากครบกำหนดเวลาแล้วตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นตัวลงสู่ อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นทำการสลับแก๊สขา เข้าโดยการปิดสายแก๊สฮีเลียมและทำการเปิดสายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่คูลในแก๊สฮีเลียม ที่ระดับ ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อทดสอบความสามารถใน การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่คูลในแก๊สฮีเลียมจะผ่านเข้าคอลัมน์ที่มี ตัวดูดซับและผ่านคอนเดนเซอร์เพื่อดักจับไอน้ำก่อนเข้าคอลัมน์ชนิด ShinCarbonST ของเครื่อง ออนไลน์แก๊สโครมาโทกราฟี (online gas chromatography) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 AT แสดงดังในรูป 3.5 ซึ่งแสดงผลในรูปแบบของกราฟที่พล็อตระหว่างค่าสัญญาณกับเวลา โดยสามารถ คำนวณหาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากพื้นที่ใต้กราฟ สำหรับการศึกษาศา มารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีความเข้มข้นในกระแสแก๊สดำเนินการ เหมือนกับภาวะที่ไม่มี ความเข้มข้นในกระแสแก๊ส แต่จะทำการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่คูลในแก๊ส ฮีเลียม ผ่านเครื่องระเหยน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของน้ำที่ต้องการ ก่อนที่จะ ปล่อยเข้าสู่ระบบการดูดซับ โดยที่ระดับความเข้มข้นของน้ำร้อยละ 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยปริมาตร จะทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 0, 7, 13 และ 17.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 AT [59]

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีน เอมีนที่ใช้ในงานนี้ คือ เพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน (Pentaethylenehexamine; PEHA) นอกจากนี้ยังมีสารอื่น ๆ ที่ใช้ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate; TEOS) และ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl triethoxysilane; APTES) จึงทำการศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังศึกษาผลของอุณหภูมิการดูดซับ ระดับความชื้นในกระแสแก๊สขาเข้า เสถียรภาพการดูดซับในภาวะที่ไม่มี ความชื้นและมีความชื้น

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อชานอ้อย

งานวิจัยนี้ได้นำชานอ้อยมาผลิตเป็นเยื่อชานอ้อยโดยผ่านกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (NaOH) ซึ่งในที่นี้เรียกว่า BCF before pretreatment และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งในที่นี้เรียกว่า BCF เพื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสและลดปริมาณลิกนินและสารอื่น ๆ ของเยื่อชานอ้อย โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (BCF before pretreatment) และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF)

Chemical composition	BCF before pretreatment (%)	BCF (%)
Cellulose	53.54	70.26
Hemicellulose	9.04	13.94
Lignin	4.21	3.80
Others	33.21	12.00

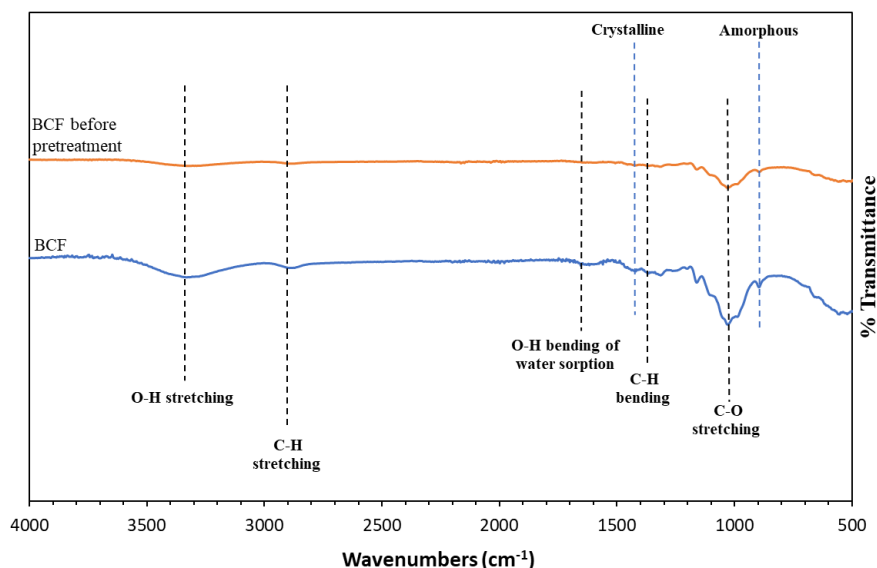
จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อชานอ้อย ในตารางที่ 4.1 พบว่า เยื่อชานอ้อย จากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา หรือ BCF before pretreatment ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารอื่น ๆ ร้อยละ 53.54, 9.04, 4.21 และ 33.21 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อนำเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดามาผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ BCF พบว่า เยื่อชานอ้อยประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารอื่น ๆ ร้อยละ 70.26, 13.94, 3.80 และ 12.00 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เยื่อชานอ้อยหลังผ่านการฟอกแล้วมีปริมาณลิกนินลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้โครงสร้างของลิกนินแตกลงและละลายน้ำได้ดีขึ้น [20] อีกทั้งยังทำให้เยื่อชานอ้อยจากเดิมที่มีสีน้ำตาลเข้มเปลี่ยนเป็นสีขาวเหลืองและสว่างขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดการสลายตัวเป็นไอออนเปอร์ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถจับกับหมู่โครโมโฟริกที่ดูดซับแสงของลิกนินเป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและสามารถละลายน้ำได้ดี [60] นอกจากนี้หลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเห็นได้ว่าสารอื่น ๆ ซึ่งแสดงถึงสารแทรกต่าง ๆ เช่น เพกทิน ลดลง เนื่องจากสามารถถูกละลายออกมาได้ด้วยน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณเซลลูโลสที่สูงขึ้นและสีของเยื่อชานอ้อยที่ได้มีลักษณะสีขาวเหลือง

4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา หรือ BCF before pretreatment และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือ BCF ด้วยเทคนิคฟลูออริเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงดังรูปที่ 4.1

จากสเปกตรัมเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา หรือ BCF before pretreatment ดังรูปที่ 4.1 พบการปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ พีคที่ 3000-3600 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ O-H stretching [61, 62] พีคที่ 2800-2900 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-H stretching [62, 63] พีคที่ 1640 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำที่ถูกดูดซับบนเซลลูโลส [63, 64] พีคที่ 1419 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ H-C-H stretching [16] พีคที่ 1361 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-H bending [65] พีคที่ 1030 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-O stretching [66] และพีคที่ 898 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของ C-O-C stretching ที่ β -(1 \rightarrow 4)-glycosidic linkages [16, 67, 68] ซึ่งหมู่ฟังก์ชันข้างต้นนี้

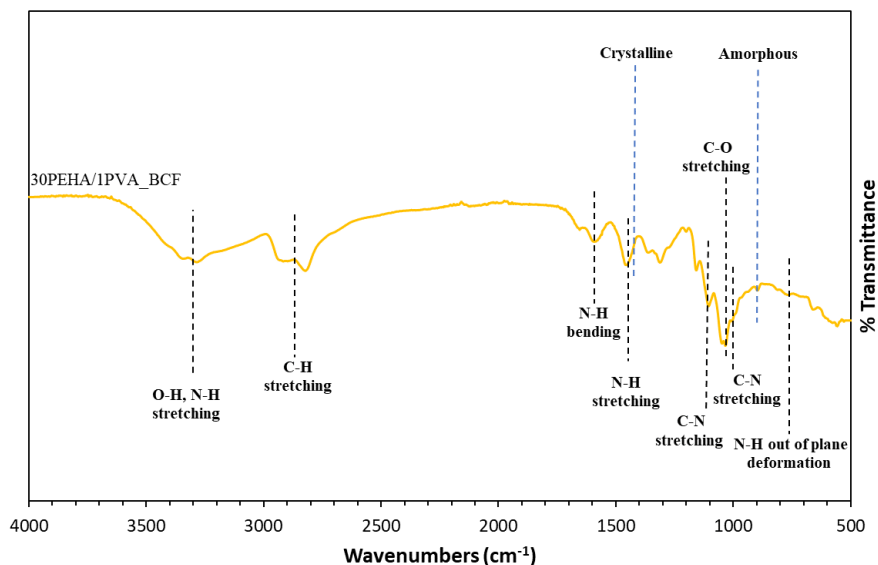
แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของเซลลูโลสที่เกิดจากสายโซ่ของกลูโคสที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ [69] ส่วนสเปกตรัมเอ็กซเรย์จากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ BCF ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า หลังการฟอกเยื่อแล้ว พิกที่ได้ออกไปข้างต้นทั้งหมดก็ยังปรากฏในสเปกตรัมแต่มีความสูงของพีคมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินบางส่วนถูกกำจัดออกไปในกระบวนการฟอกเยื่อ ส่งผลให้ปริมาณเซลลูโลสของเส้นใยมีสัดส่วนที่มากขึ้น (ดังแสดงในตาราง 4.1) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาพิกที่ 1420 และ 897 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) และส่วนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ของเซลลูโลสตามลำดับ [63, 68, 70] พบว่า เส้นใยเซลลูโลสของเยื่อจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา หรือ BCF before pretreatment มีลักษณะเส้นใยเซลลูโลสที่เรียงตัวเป็นระเบียบร่วมกับเส้นใยเซลลูโลสบางส่วนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เท่ากับ 0.43 ส่วนลักษณะเส้นใยเซลลูโลสของเยื่อจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ BCF มีลักษณะเส้นใยเซลลูโลสที่เรียงตัวเป็นระเบียบและเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบเช่นกัน โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เท่ากับ 0.47 จากทั้งหมดนี้ จึงกล่าวได้ว่า การกำจัดลิกนินโดยกระบวนการฟอกเยื่อส่งเสริมการเรียงตัวเป็นระเบียบของเส้นใยเซลลูโลส [71, 72]



รูปที่ 4.1 พลุเรียร์ทรานส์ฟอรั่มอินฟราเรดสเปกตรัมของเยื่อจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (BCF before pretreatment) และเยื่อจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF)

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/1PVA_BCF) ด้วยเทคนิคฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงดังรูปที่ 4.2

ผลการศึกษา พบว่า สเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF ปรากฏพีคของเซลลูโลสเป็นหลัก คือ พีคที่ 3000-3600 เซนติเมตร⁻¹ พีคที่ 2800-2900 เซนติเมตร⁻¹ และพีคที่ 1030 เซนติเมตร⁻¹ โดยแสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H stretching [61, 62] การสั่นของพันธะ C-H stretching [62, 63] และการสั่นของพันธะ C-O stretching [66] ตามลำดับ และปรากฏพีคของการมีอยู่ของ PEHA คือพีคที่ 3300-3200 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H stretching พีคที่ 1600 และ 1455 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H bending และ stretching ของ primary amine และพีคที่ 1125 และ 1011 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-N stretching [73] แสดงให้เห็นว่าสามารถโหลด PEHA ได้สำเร็จ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ความสูงของพีคที่ 3000-3600 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ O-H stretching เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีนของ PEHA และหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสหรือ PVA [74, 75] เมื่อพิจารณาความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสและความไม่เป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสก่อนและหลังการตัดแปร พบว่า พีคที่ 1420 เซนติเมตร⁻¹ และ 897 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) และส่วนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ของเซลลูโลส ตามลำดับ [63, 68, 70] มีสัดส่วนความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เพิ่มจาก 0.47 ก่อนการตัดแปร เป็น 0.56 เมื่อผ่านการตัดแปร แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรด้วย PVA และ PEHA ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส

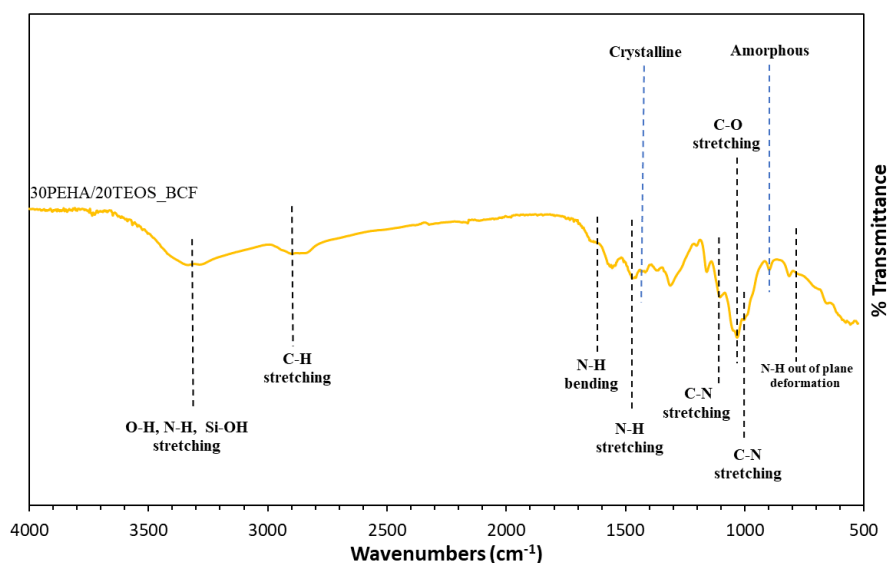


รูปที่ 4.2 ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF

จากสเปกตรัมของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วตัดแปรด้วยเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/20TEOS_BCF) แสดงดังรูปที่ 4.3

ผลการศึกษา พบว่า สเปกตรัมของ 30PEHA/20TEOS_BCF ปรากฏพีคของเซลลูโลสเป็นหลัก คือพีคที่ 3000-3600 เซนติเมตร⁻¹ พีคที่ 2800-2900 เซนติเมตร⁻¹ และพีคที่ 1030 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H stretching [61, 62] การสั่นของพันธะ C-H stretching [62, 63] และการสั่นของพันธะ C-O stretching [66] ตามลำดับ นอกจากนี้ปรากฏพีคขึ้นใหม่ที่ 1105 และ 1055 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ Si-O-C และ Si-O-Si ตามลำดับ [76] ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าเซลลูโลสเกิดการเชื่อมขวางกันด้วย TEOS ผ่านหมู่ silanol [77] และปรากฏพีคของการมีอยู่ของ PEHA คือพีคที่ 1600 และ 1455 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H bending และ stretching ของ primary amine และพีคที่ 1125 และ 1011 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-N stretching [73] แสดงให้เห็นว่าสามารถโหลด PEHA ได้สำเร็จ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ความสูงของพีคที่ 3000-3600 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ O-H stretching เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีนของ PEHA และหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส [74] เมื่อพิจารณาความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสและความไม่เป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใย

เซลลูโลสก่อนและหลังการดัดแปร พบว่า พีคที่ 1420 cm^{-1} และ 897 cm^{-1} ซึ่งแสดง ส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) และส่วนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ของเซลลูโลส ตามลำดับ [63, 68, 70] มีสัดส่วนความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เพิ่มจาก 0.47 ก่อนการดัดแปร เป็น 1.07 เมื่อผ่านการดัดแปร แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรด้วย TEOS และ PEHA ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส

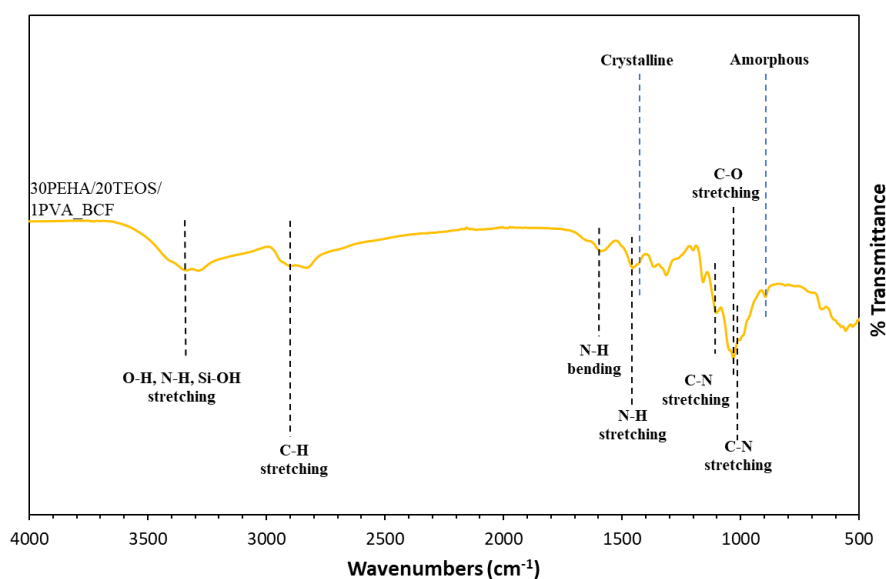


รูปที่ 4.3 ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF

จากสเปกตรัมของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เติตระเอธิลลอรีโธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF) แสดงดังรูปที่ 4.4

ผลการศึกษา พบว่า สเปกตรัมของ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF ปรากฏพีคของเซลลูโลสเป็นหลัก คือ พีคที่ $3000-3600 \text{ cm}^{-1}$ พีคที่ $2800-2900 \text{ cm}^{-1}$ และพีคที่ 1030 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H stretching [61, 62] การสั่นของพันธะ C-H stretching [62, 63] และการสั่นของพันธะ C-O stretching [66] ตามลำดับ นอกจากนี้ปรากฏพีคขึ้นใหม่ที่ 1105 และ 1055 cm^{-1} จากการสั่นของพันธะ Si-O-C และ Si-O-Si ตามลำดับ [76]

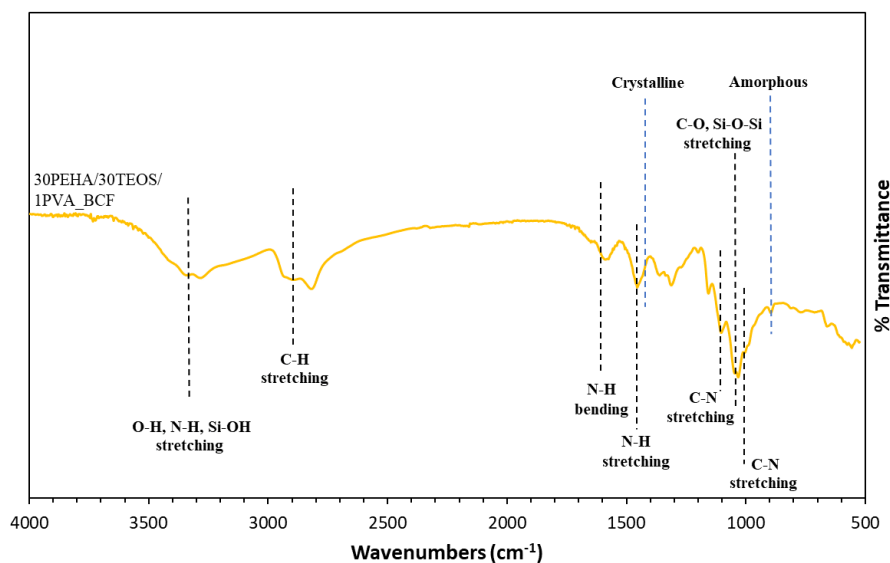
ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าเซลลูโลสเกิดการเชื่อมขวางกันด้วย TEOS ผ่านหมู่ silanol [77] และปรากฏพีคของการมีอยู่ของ PEHA คือ พีคที่ 1600 และ 1455 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H bending และ stretching ของ primary amine และพีคที่ 1125 และ 1011 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-N stretching [73] แสดงให้เห็นว่าสามารถโพลด PEHA ได้สำเร็จ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ความสูงของพีคที่ 3000-3600 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ O-H stretching เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีนของ PEHA และหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสหรือ PVA [74, 75] เมื่อพิจารณาความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสและความไม่เป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสก่อนและหลังการดัดแปร พบว่า พีคที่ 1420 เซนติเมตร⁻¹ และ 897 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) และส่วนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ของเซลลูโลส ตามลำดับ [63, 68, 70] มีสัดส่วนความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เพิ่มจาก 0.47 ก่อนการดัดแปร เป็น 0.54 เมื่อผ่านการดัดแปร



รูปที่ 4.4 ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF

จากสเปกตรัมเอ็กซานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เติตระเอธิลอร์โธซิเลทที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF) แสดงดังรูปที่ 4.5

ผลการศึกษาสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF พบว่า พีคที่ 3300 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ Si-OH และพีคที่ 1105 และ 1055 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ Si-O-C และ Si-O-Si ตามลำดับ มีความสูงของพีคเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับพีคที่ความถี่เดียวกันในสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF เนื่องจากเซลลูโลสเกิดการเชื่อมขวางกันด้วย TEOS ผ่านหมู่ silanol ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังปรากฏพีคของการมีอยู่ของ PEHA พีคที่ 1600 และ 1455 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H bending และ stretching ของ primary amine และพีคที่ 1125 และ 1011 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-N stretching มีความสูงของพีคเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PEHA ยึดจับและกระจายตัวบนผิวตัวดูดซับได้มาก และเมื่อพิจารณาความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสและความไม่เป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส พบว่า พีคที่ 1420 เซนติเมตร⁻¹ และ 897 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) และส่วนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ของเซลลูโลส ตามลำดับ [63, 68, 70] มีสัดส่วนความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เมื่อทำการโหลดเติตระเอธิลอร์โธซิเลทที่ระดับความเข้มข้นมากขึ้นจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก TEOS บางส่วนเข้าไปคั่นระหว่างสายโซ่เซลลูโลส ทำให้เซลลูโลสเกิดการเรียงตัวใกล้ชิดกันมากขึ้น ทำให้ความเป็นระเบียบของเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เท่ากับ 0.59 สำหรับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF ด้วยเหตุนี้ จึงกล่าวได้ว่า การโหลดเติตระเอธิลอร์โธซิเลทที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนัก ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส

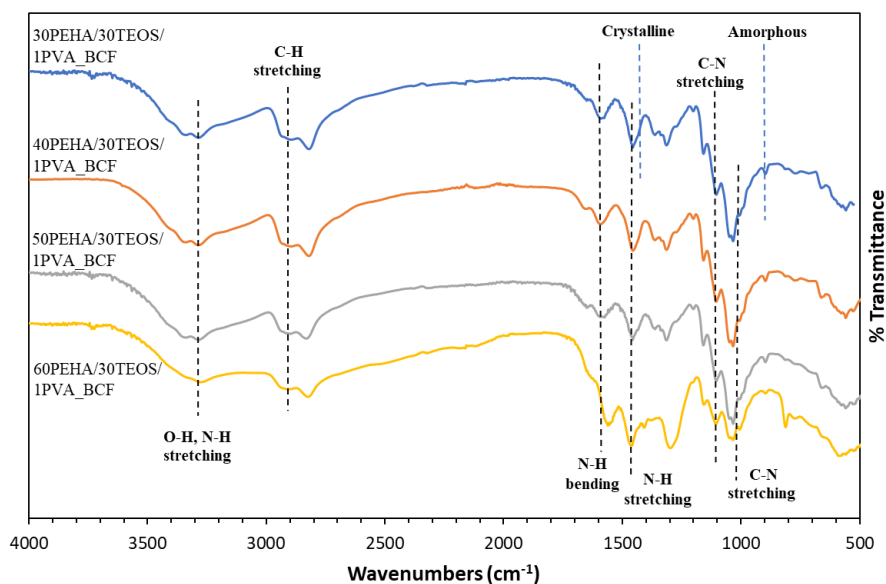


รูปที่ 4.5 ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF

จากสเปกตรัมเชื้อขานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วตัดแปรรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เติตระเอซิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนัก (30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 40PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF) แสดงดังรูปที่ 4.6

ผลการศึกษาสเปกตรัมตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 40PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF พบว่า เมื่อทำการโหลดเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเติตระเอซิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สังเกตเห็น พีคที่ 3200 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H stretching พีคที่ 1600 และ 1455 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H bending และ stretching ของ primary amine พีคที่ 1125 และ 1011 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-N stretching มีความสูงของพีคเพิ่มขึ้น เนื่องจากการโหลด PEHA ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ PEHA บางส่วนเกิดการเคลือบฝังอยู่บนผิวได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสและความไม่เป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส พบว่า พีคที่ 1420 เซนติเมตร⁻¹ และ 897 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) และส่วนที่เรียง

ตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ของเซลลูโลส ตามลำดับ [63, 68, 70] มีสัดส่วนความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เมื่อทำการโหลด PEHA ที่ระดับความเข้มข้นมากขึ้นจากร้อยละ 30 40 50 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการโหลด PEHA ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ PEHA แทรกสอดระหว่างสายโซ่เซลลูโลสมากขึ้น ทำให้ความเป็นระเบียบของเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เท่ากับ 0.59 สำหรับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF 0.61 สำหรับ 40PEHA/30TEOS/1PVA_BCF 0.63 สำหรับ 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 1.47 สำหรับ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF ด้วยเหตุนี้ จึงกล่าวได้ว่า การโหลด PEHA ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนัก ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส

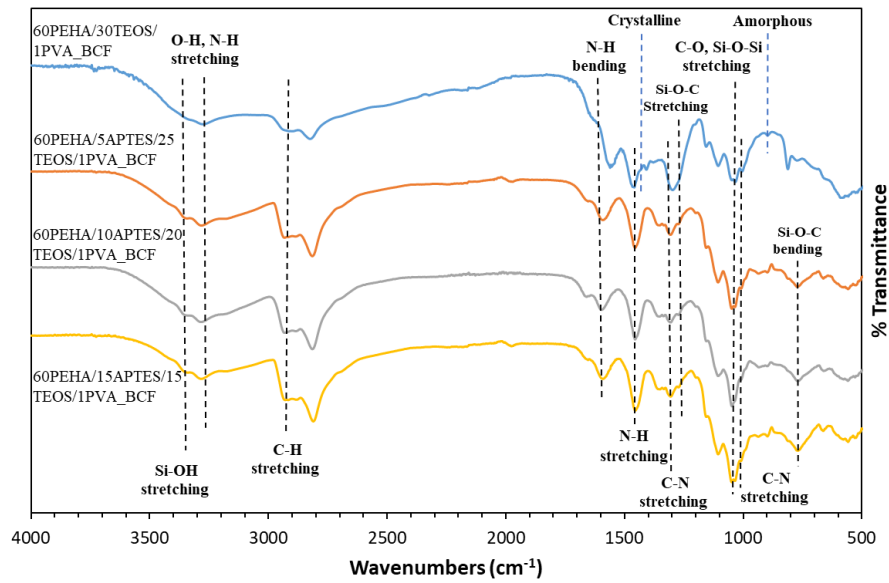


รูปที่ 4.6 ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอรั่มอินฟราเรดสเปกตรัมของ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 40PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF

จากสเปกตรัมเชื้อขาน้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วตัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) และเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) ที่สัดส่วน 5 ต่อ 25, 10 ต่อ 20, และ 15 ต่อ 15 โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินที่ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก

(60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/5APTES/ 25TEOS/1PVA _BCF, 60PEHA/10APTES/ 20TEOS/1PVA _BCF และ 60PEHA/15APTES/15TEOS/ 1PVA _BCF) แสดงดังรูปที่ 4.7

ผลการศึกษาสเปกตรัมของตัวดูดซับ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/5APTES/ 25TEOS/ 1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA _BCF และ 60PEHA/15APTES/ 15TEOS/1PVA _BCF เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ APTES:TEOS จาก 0 ต่อ 30, 5 ต่อ 25, 10 ต่อ 20 เป็น 15 ต่อ 15 โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า พีคที่ 3000-3600 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ O-H stretching มีความสูงของพีคลดลง เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ APTES:TEOS เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลบนเซลลูโลสทำปฏิกิริยากับหมู่ silanol ของ APTES นอกจากนี้พีคที่ 1600 และ 1455 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ N-H bending และ stretching ของ primary amine และพีคที่ 1302 1125 และ 1011 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ C-N stretching [30] มีความสูงของพีคเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ APTES:TEOS เนื่องจากมีปริมาณ APTES สูงขึ้น พีคที่แสดงถึงการมีอยู่ของหมู่เอมีนจึงมีความสูงมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบพีคปรากฏขึ้นใหม่ที่ 1255 และ 780 เซนติเมตร⁻¹ จากการสั่นของพันธะ Si-O-C stretching [78] และ Si-O-C bending [79] ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า APTES สามารถกราฟลงบนผิวของเซลลูโลสได้สำเร็จ และเมื่อพิจารณาความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสและความไม่เป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส พบว่า พีคที่ 1420 เซนติเมตร⁻¹ และ 897 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) และส่วนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ของเซลลูโลส ตามลำดับ [63, 68, 70] มีสัดส่วนความเป็นระเบียบในการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสลดลง เมื่อมีการเติม APTES แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสัดส่วนของ APTES:TEOS เป็น 5 ต่อ 25, 10 ต่อ 20 และ 15 ต่อ 15 โดยสัดส่วนการเรียงตัวเป็นระเบียบต่อการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เท่ากับ 1.47 สำหรับ ตัวดูดซับ 60 PEHA/30 TEOS/1PVA_BCF และ 0.65 สำหรับ ตัวดูดซับ 60 PEHA/5 APTES/25 TEOS/1PVA _BCF, 60 PEHA/10 APTES/20 TEOS/1PVA _BCF และ 60PEHA/ 15APTES/15TEOS/1PVA _BCF ด้วยเหตุนี้ จึงกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดยน้ำหนักของ APTES:TEOS เป็น 5 ต่อ 25, 10 ต่อ 20 และ 15 ต่อ 15 โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส



รูปที่ 4.7 ฟลูอเรียรทรานส์ฟอรั่มอินฟราเรดสเปกตรัมของ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF

4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติจำเพาะทางกายภาพของตัวดูดซับ

Samples	BET surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (Å)
BCF before pretreatment	0.21	-	-
BCF	1.67	-	-
30PEHA/1PVA_BCF	3.14	-	-
30PEHA/20TEOS_BCF	6.47	0.0206	127.29
30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF	5.99	0.0033	21.98
30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF	3.51	0.0013	18.23
50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF	4.55	0.0192	168.51
60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF	6.23	0.0124	79.53
60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF	3.83	0.0151	157.48
60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF	16.48	0.0058	14.05
60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF	3.39	0.0169	198.78

ผลการศึกษา พบว่า เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (BCF before pretreatment) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.21 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยไม่สามารถวัดค่าได้ ส่วนเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1.67 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยไม่สามารถวัดค่าได้ จากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา พบว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถเข้าไปกำจัดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างตาข่าย ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างเซลล์สูงมากขึ้น และเมื่อทำการฟอกเยื่อดังกล่าวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งสามารถสลายตัวเป็นไอออนเปอร์ไฮดรอกซิล (HOO-) ภายใต้ภาวะที่เป็นด่าง จึงจับกับหมู่โครโมโฟริกของลิกนิน จึงทำให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาลเปลี่ยนเป็นสีเหลือง [19]

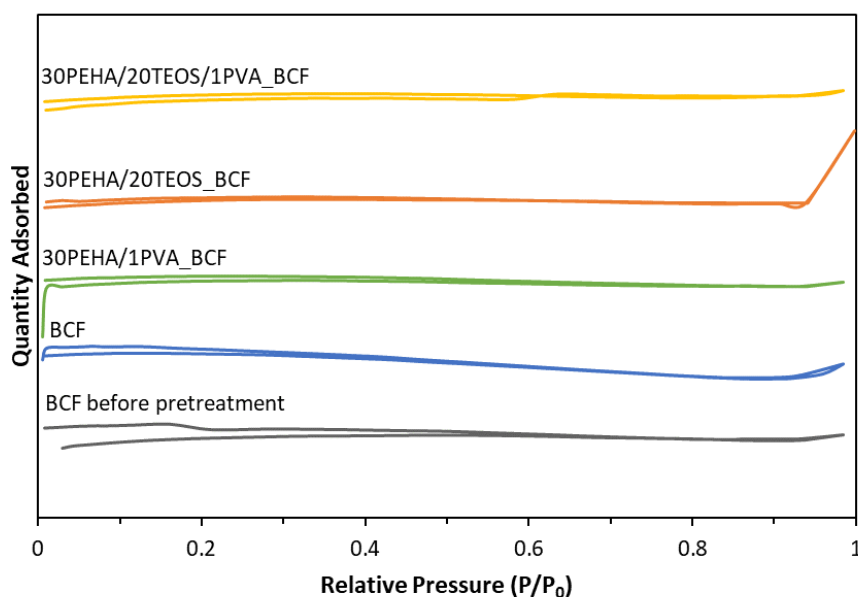
นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจทำปฏิกิริยากับโครงสร้างเบนโซควิโนนของลิกนินหรือทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของคาร์บอนิลและคาร์บอน-คาร์บอนของลิกนินเพื่อเกิดออกซิเดชันต่อไป ซึ่งนำไปสู่การกำจัดลิกนิน และสารแทรกบางส่วนถูกกำจัดออกไป [17, 20, 49] เป็นผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นหลังการฟอกขาว จากไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของ BCF (รูปที่ 4.8) มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมี hysteresis loop แบบ H3 เกิดขึ้นเล็กน้อยที่ความดันสัมพัทธ์สูง แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเซลลูโลสมีรูพรุนแบบแผ่นขนาน (Slit-like pore) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น [80]

เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/1PVA_BCF) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3.14 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจากไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF (รูปที่ 4.8) มีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่เกิด hysteresis loop ทั้งนี้เนื่องจาก PEHA เข้าไปในรูพรุนหรือแทรกสอดเข้าไปในช่องว่างระหว่างสายโซ่เซลลูโลสที่มีการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย และไม่สามารถวัดค่าปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับได้

เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วดัดแปรด้วยเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/20TEOS_BCF) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย 6.47 ตารางเมตรต่อกรัม 0.0206 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 127.29 อังสตรอม ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากหมู่เอมีนของ PEHA สามารถสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยเซลลูโลส ดังนั้นโอกาสที่ PEHA กระจายตัวและยึดจับกับผิวเยื่อชานอ้อยดัดแปรจึงสูงกว่าโอกาสที่ PEHA เข้าไปช่องว่างหรือรูพรุน ในขณะที่เซลลูโลสเกิดการเชื่อมขวางกันด้วย TEOS ผ่านหมู่ silanol ซึ่งจากไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF (รูปที่ 4.8) ที่ความดันสัมพัทธ์สูงจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้น [81]

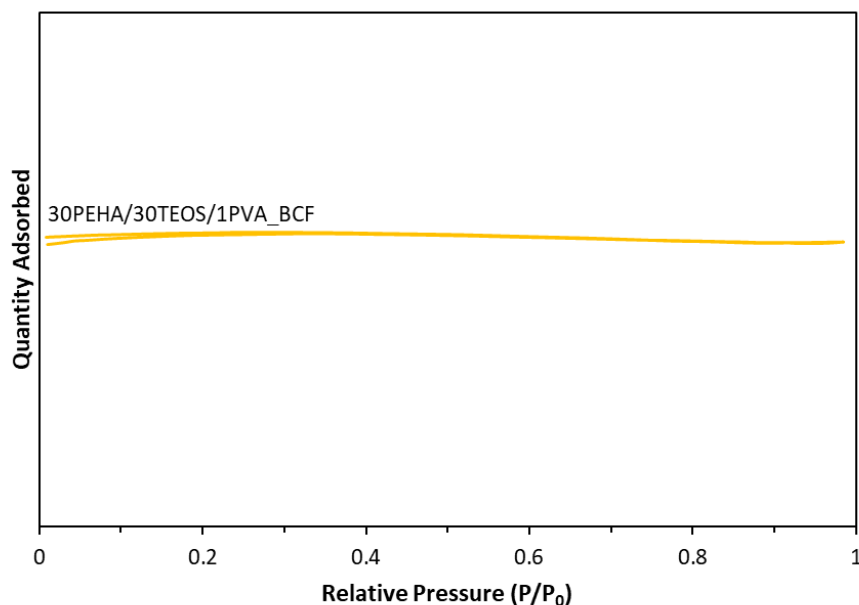
เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วดัดแปรด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับ

ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย 5.99 ตารางเมตรต่อกรัม 0.0033 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 21.98 อังสตรอม ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากหมู่เอมีนของ PEHA สร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่มากและกระจายทั่วบนเส้นใยเซลลูโลสและ PVA ดังนั้นหมู่เอมีนจึงกระจายตัวและยึดจับบนผิวเยื่อชานอ้อยตัดแปรได้มาก ซึ่งจากไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF (รูปที่ 4.8) มี hysteresis loop เกิดขึ้นเล็กน้อยที่ความดันสัมพัทธ์สูง



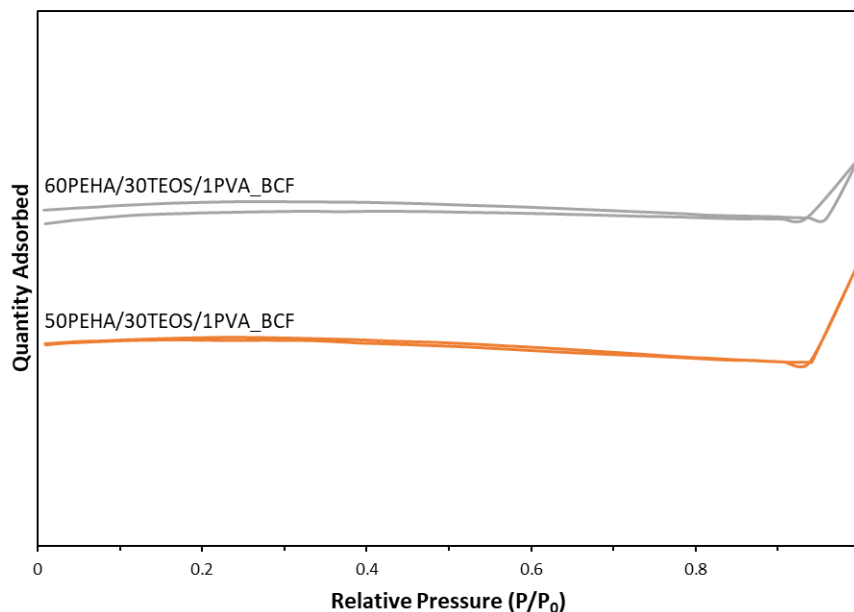
รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ BCF before pretreatment, BCF, 30PEHA/1PVA_BCF, 30PEHA/20TEOS_BCF และ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF

เมื่อเพิ่มปริมาณของเตตระเอธิลอร์โธซิเลตโดยการเพิ่มระดับความเข้มข้นจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระดับความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนคงที่ที่ร้อยละ 1 และ 30 โดยน้ำหนัก จนได้ตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเป็น 3.51 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนลดลงเป็น 0.0013 ลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยลดลงเป็น 18.23 อังสตรอม โดยไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF (รูปที่ 4.9) มี hysteresis loop ลดลงเนื่องจาก PEHA บางส่วนเข้าไปสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลภายในรูพรุนเปิด ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยรูพรุนลดลง



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ
30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF

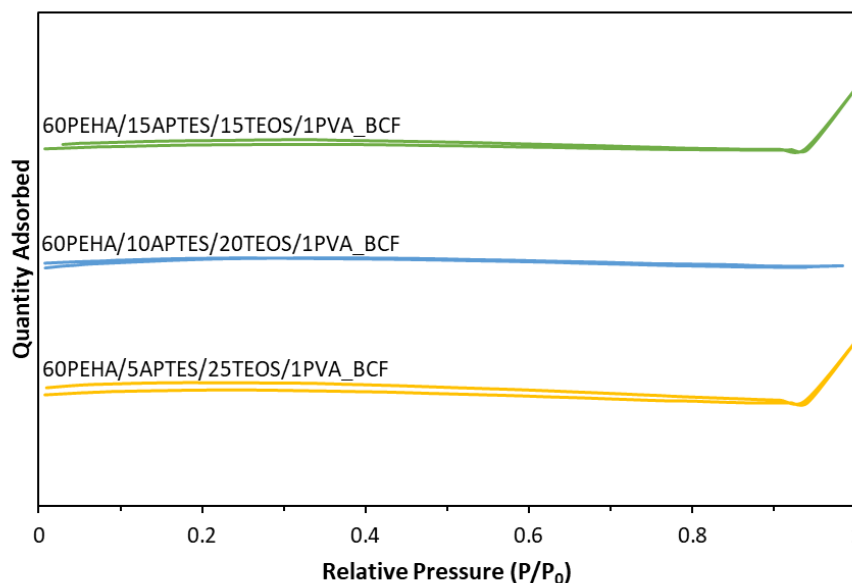
เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินเป็นร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวดูดซับ 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 4.55 และ 6.23 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนมีค่าเท่ากับ 0.0192 และ 0.0124 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 168.51 และ 79.53 อังสตรอม ตามลำดับ จากไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF (รูปที่ 4.10) ที่ความดันสัมพัทธ์สูงจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับ เนื่องจากตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้น [81] ส่วนไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF (รูปที่ 4.10) มีลักษณะเป็นเส้นตรงและเกิด hysteresis loop เล็กน้อยที่ความดันสัมพัทธ์สูง



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ

50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF

สำหรับตัวดูดซับ 60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ APTES:TEOS จาก 0 ต่อ 30, 5 ต่อ 25, 10 ต่อ 20 เป็น 15 ต่อ 15 โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย โดยจะเห็นได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF และตัวดูดซับ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF ทั้งสอง (รูปที่ 4.11) ที่ความดันสัมพัทธ์สูงจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับ เนื่องจากมีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้น [81] สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF (รูปที่ 4.11) เป็นแบบ Type I บ่งบอกถึงวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) [82] ซึ่งจากตัวดูดซับทั้งสามจะเห็นได้ว่าตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 16.48 ตารางเมตรต่อกรัม



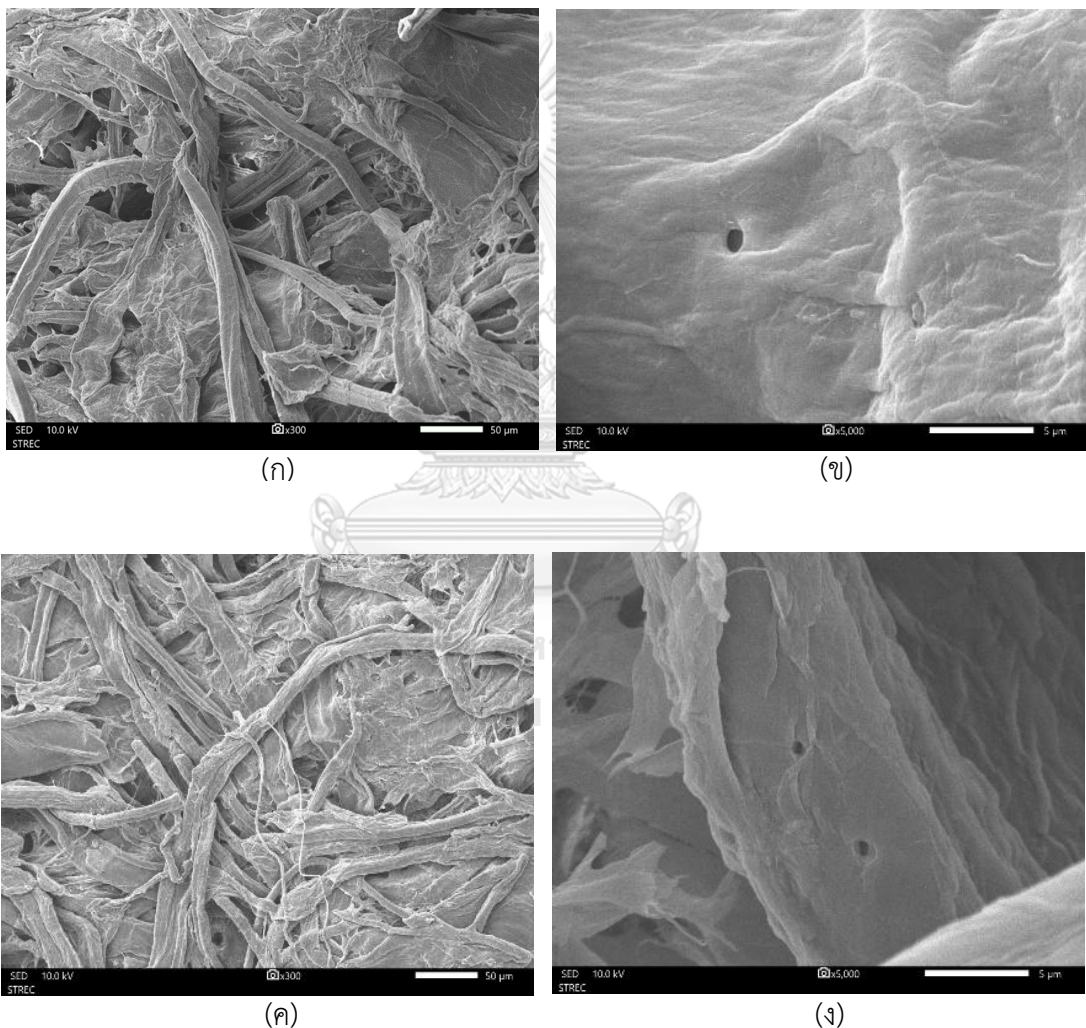
รูปที่ 4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ
60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF และ
60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF

4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา ที่กำลังขยาย 300 เท่า และ 5,000 เท่า และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่กำลังขยาย 300 เท่า และ 5,000 เท่า ซึ่งถ่ายด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.17

จากรูปที่ 4.12ก พบว่า เยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดามีลักษณะเส้นใยที่มีขนาดต่าง ๆ อยู่ร่วมกัน บางเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นยาวแต่แคบ และบางเส้นใยมีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งเกิดจากการนำชานอ้อยไปผ่านการตีเยื่อ จนได้เส้นใยเซลลูโลสขนาดต่าง ๆ กัน ที่มีการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ และเมื่อทำให้แห้งจึงมีช่องว่างระหว่างเส้นใยเล็กน้อย นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าภาพลักษณะผิวของเยื่อชานอ้อยนี้เมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12ข มีลักษณะขรุขระ และมีรูพรุนหรือพิต (Pit) บนผิว [49] ซึ่งเกิดจากการนำชานอ้อยไปผ่านการตีเยื่อ ส่วนลักษณะสัณฐานวิทยาของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะเช่นเดียวกับสัณฐานวิทยาของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา แสดงดังรูปที่ 4.12ค แต่มีช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากลิกนินและสาร

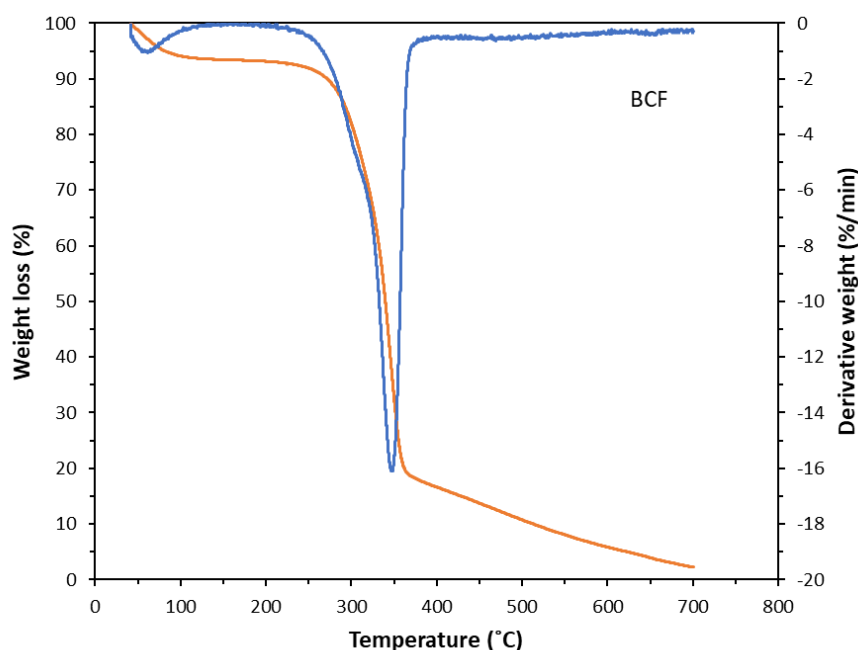
แทรกบางส่วนถูกกำจัดออกไปจากเส้นใยในขณะที่กำลังดำเนินการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [15, 49, 63] จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลสมากขึ้น และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางที่ 4.2) ที่แสดงให้เห็นว่าเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (1.67 ตารางเมตรต่อกรัม) ที่มากกว่าเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าผิวของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะขรุขระ มีรูพรุนหรือพิทเกิดมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.12ง



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาที่กำลังขยาย ก) 300 เท่า ข) 5,000 เท่า และเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่กำลังขยาย ค) 300 เท่า ง) 5,000 เท่า

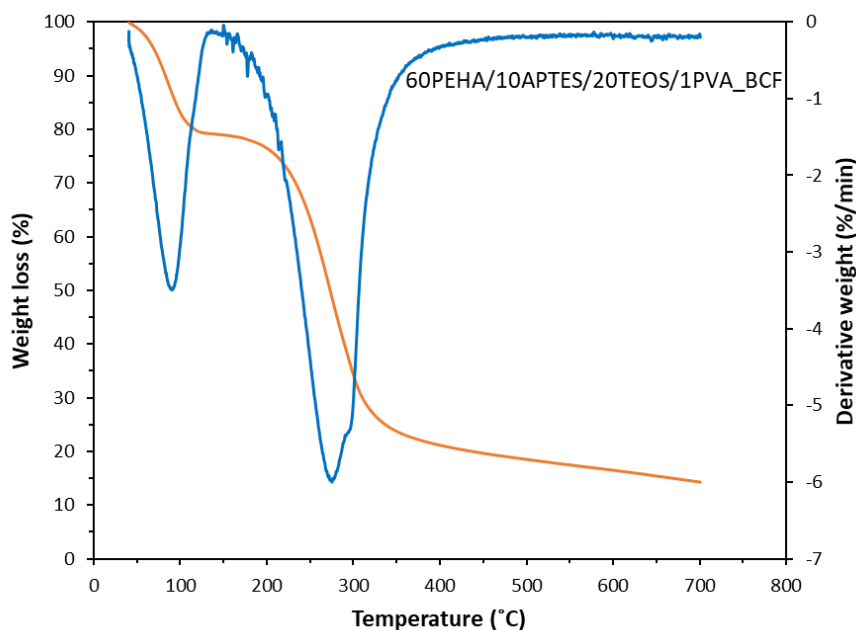
4.5 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟ TGA และ DTG แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า เยื่อชานอ้อยเกิดการสลายตัวทางความร้อน ดังนี้ ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนประมาณ 50-110 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของน้ำที่ถูกดูดซับบนเยื่อชานอ้อย [83] ซึ่งสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก จากนั้นจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 77 โดยน้ำหนักระหว่างอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส โดยเกิดการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง คือช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนประมาณ 200-270 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส [84] และช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนประมาณ 270-400 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของเซลลูโลส [85] เฮมิเซลลูโลส [84] รวมทั้งลิกนินและไขที่หลงเหลืออยู่ในเยื่อชานอ้อยหลังจากการปรับสภาพ [86] จากนั้นจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวเพิ่มเติมของวัสดุอื่น ๆ ที่มีอยู่ในเยื่อชานอ้อย [84] โดยจาก DTG จะเห็นจะได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 346 องศาเซลเซียส ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักในเยื่อชานอ้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.13 การสลายตัวทางความร้อนของเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (BCF)

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟ TGA และ DTG แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่า ตัวดูดซับเกิดการสลายตัวทางความร้อน ดังนี้ ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนประมาณ 50-110 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของน้ำที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ ซึ่งสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักเป็นช่วงกว้างคือประมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนประมาณ 140-290 องศาเซลเซียส และ 290-400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการสลายตัวของ APTES บางส่วนที่ไม่ได้ถูกกราฟบนตัวดูดซับ ในช่วงอุณหภูมิ 140-250 องศาเซลเซียส [87, 88] อีกทั้งยังเกิดการสลายตัวของ PEAH ในช่วงอุณหภูมิ 150-330 องศาเซลเซียส [74, 89] ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวเสร็จสมบูรณ์ของ PEHA คือ 330 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตัวดูดซับเกิดการสลายตัวได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงกว่า 330 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่าง PEHA และตัวดูดซับซึ่งสามารถจับ PEHA บางส่วนได้ [74] อีกทั้งในช่วงอุณหภูมินี้ยังเกิดการสลายตัวของ PVA ซึ่งจะเกิดการสลายตัวสองช่วง คือที่อุณหภูมิ 200-330 องศาเซลเซียส เป็นการกำจัดสายโซ่ด้านข้างหรือหมู่ไฮดรอกซิลบน PVA และที่อุณหภูมิ 390-450 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของสายโซ่หลักของ PVA [90, 91] ซึ่งเกิดซ้อนทับกับช่วงการสลายตัวของสารอื่นและมีปริมาณน้อยในตัวดูดซับ ทำให้แยกค่อนข้างยาก นอกจากนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 380 องศาเซลเซียส ยังเกี่ยวข้องกับการกำจัดหมู่อะมิโนของ APTES [83] และเกิดการสลายตัวของ APTES ที่ถูกกราฟบนผิวของตัวดูดซับอีกด้วย [92] โดยเกิดการแตกพันธะ C-Si ของ APTES ที่ถูกกราฟบนตัวดูดซับที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส [83] โดย DTG แสดงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุดสองช่วงคือที่อุณหภูมิ 90 และ 275 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับจะมีน้ำหนักของสารตกค้างที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเยื่อชานอ้อย ทั้งนี้เนื่องเกิดปฏิสัมพันธ์ต่อกันระหว่างเส้นใยเซลลูโลส PVA TEOS และ APTES ทำให้ตัวดูดซับเกิดการสลายตัวได้ยากขึ้นในระหว่างกระบวนการทางความร้อน รวมทั้งการมีอยู่ของ SiO₂ ใน TEOS ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสลายตัว จึงส่งผลให้น้ำหนักของสารตกค้างของตัวดูดซับสูงขึ้น [93, 94] โดยจากผลวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับที่ได้กล่าวมานั้นแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 30-110 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 การสลายตัวทางความร้อนของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF

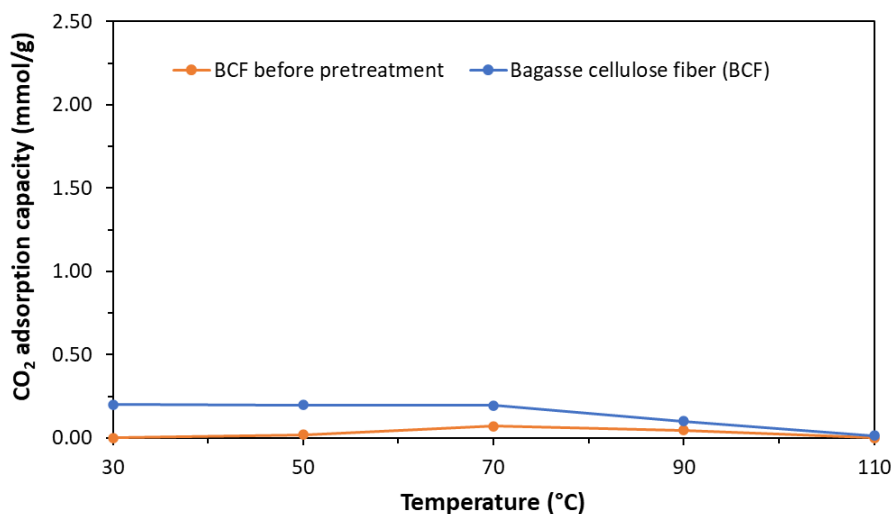
4.6 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ เริ่มจากการกำจัดความชื้นและสิ่งเจือปนบนผิวของตัวดูดซับในกระแสการไหลของฮีเลียม ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ และสลับแก๊สเข้าเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูลในฮีเลียม ณ ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในภาวะไม่มีความชื้นในกระแสแก๊สเข้า ช่วงอุณหภูมิการดูดซับเริ่มตั้งแต่ 30 จนถึง 110 องศาเซลเซียส ผลความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตัวดูดซับ มีรายละเอียดดังนี้

4.6.1 การพอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4.15 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา ซึ่งในที่นี้เรียกว่า BCF before pretreatment และตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการพอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งในที่นี้เรียกว่า BCF

จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับ BCF before pretreatment มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำมากตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกิน 0.07 มิลลิโมลต่อกรัม ส่วนตัวดูดซับ BCF มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 0.2 มิลลิโมลต่อกรัม เมื่ออุณหภูมิการดูดซับอยู่ในช่วง 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90 และ 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ BCF มีค่าลดลงสู่ 0.1 มิลลิโมลต่อกรัม และ 0.01 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ BCF before pretreatment และตัวดูดซับ BCF จะเห็นว่า ตัวดูดซับ BCF before pretreatment มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าตัวดูดซับ BCF ที่เป็นเช่นนี้เพราะตัวดูดซับ BCF มีพื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการดูดซับมากกว่า [71] ดังแสดงในส่วนของกราฟวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน (ตารางที่ 4.2) ซึ่งเป็นผลมาจากช่องว่างหรือรูพรุนที่เกิดจากลิกนินที่ถูกกำจัดออกไป อย่างไรก็ตามตัวดูดซับทั้งสองมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับทั้งสองเป็นการดูดซับเชิงกายภาพแบบคายความร้อน โดยการดูดซับเชิงกายภาพอาศัยสมบัติตามธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลส เช่น ความเป็นรูพรุนขนาดเล็กของเส้นใยเซลลูโลสสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางที่ 4.2) และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 4.12ค) รวมถึงแรงวาล์วเดอวาล์วระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของเซลลูโลสกับคาร์บอนไดออกไซด์ [95] จากค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ BCF ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ BCF before pretreatment ดังนั้นจึงเลือกตัวดูดซับ BCF ไปศึกษาต่อในส่วนถัดไป



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยก่อน (BCF before pretreatment) และหลังการฟอก (BCF)

4.6.2 ชนิดสารเชื่อมขวาง

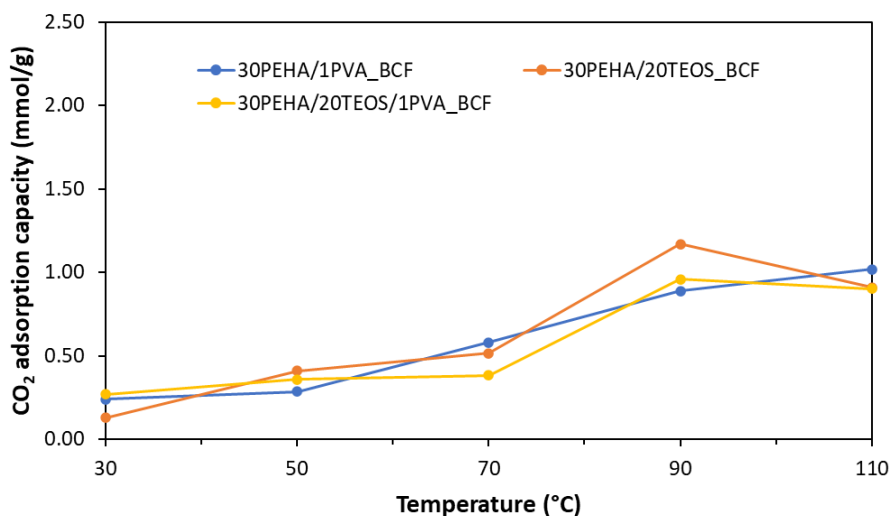
สารเชื่อมขวางที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต และสารเชื่อมขวางผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต โดยความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตัวดูดซับ BCF ดัดแปรด้วยการเคลือบฝังด้วยเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 4.16 แสดงชนิดสารเชื่อมขวางต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF ตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF และตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/ 1PVA_BCF จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF ซึ่งมีการใช้สารเชื่อมขวางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งการเติมสารเชื่อมขวางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ช่วยเพิ่มจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนผิวของตัวดูดซับ (ดังแสดงในผลวิเคราะห์ FTIR รูปที่ 4.4) โดยหมู่ไฮดรอกซิลช่วยให้ PEHA กระจายตัวและยึดจับบนผิวตัวดูดซับได้ดีขึ้น ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถสร้างพันธะกับหมู่เอมีนได้มากขึ้น [96] อีกทั้งหมู่ไฮดรอกซิลช่วยดึงคาร์บอนไดออกไซด์โมเลกุลจากกระแสแก๊สแล้วสร้างพันธะกับหมู่เอมีนบนผิวของตัวดูดซับ [95] จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF มี

ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 1.02 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

สำหรับตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF ซึ่งมีการใช้เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเท่ากับ 1.17 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 110 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงสู่ 0.91 มิลลิโมลต่อกรัม เนื่องจากการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับเชิงเคมีของ PEHA เมื่อให้พลังงานจากภายนอกจนสามารถเอาชนะพลังงานก่อกัมมันต์ได้แล้ว พลังงานส่วนเกินจะทำให้เกิดการสลายพันธะระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเกิดการคายซับของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิสูง [97] ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF มีค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยที่สูงกว่า ซึ่งช่วยส่งเสริมการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในรูพรุนและเข้าถึงตำแหน่งว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Active sites) หรือหมู่เอมีนของ PEHA ได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระดับอุณหภูมิที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเลื่อนสู่ระดับอุณหภูมิต่ำกว่า

ตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF ซึ่งมีการใช้สารเชื่อมขวางผสมระหว่างเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF แสดงแนวโน้มลักษณะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดียวกับตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเท่ากับ 0.96 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 110 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงสู่ 0.90 มิลลิโมลต่อกรัม โดยตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF มีค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS_BCF แต่มากกว่าตัวดูดซับ 30PEHA/1PVA_BCF ตามลำดับ ซึ่งก็เป็นไปตามแนวโน้มการเรียงลำดับพื้นที่ผิวจำเพาะจากมากไปน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันระหว่างเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

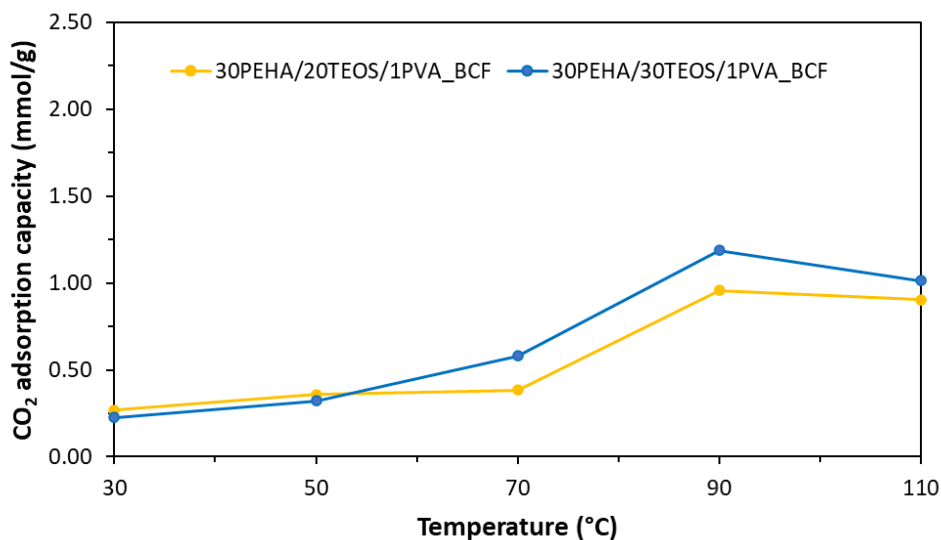


รูปที่ 4.16 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ใช้สารเชื่อมขวางต่างชนิดกัน (30PEHA/1PVA_BCF, 30PEHA/20TEOS_BCF และ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF)

4.6.3 ปริมาณเตตระเอซิลออร์โซิลิเกตในสารเชื่อมขวางผสม

ผลของการเพิ่มปริมาณเตตระเอซิลออร์โซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในสารเชื่อมขวางผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับเตตระเอซิลออร์โซิลิเกต เมื่อระดับความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์คงที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF และตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.17

ผลการศึกษาเมื่อเพิ่มปริมาณเตตระเอซิลออร์โซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF เท่ากับ 0.96 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF เท่ากับ 1.19 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า เนื่องจาก PEHA สามารถสร้างพันธะและยึดจับบนผิวตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF ได้มาก ซึ่งจะเห็นได้จากผลวิเคราะห์ FTIR (รูปที่ 4.5) ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถสร้างพันธะกับหมู่เอมีนของ PEHA บนผิวตัวดูดซับได้มาก จากความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ปริมาณเตตระเอซิลออร์โซิลิเกตระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณเตตระเอซิลออร์โซิลิเกตระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สำหรับการศึกษาในลำดับถัดไป



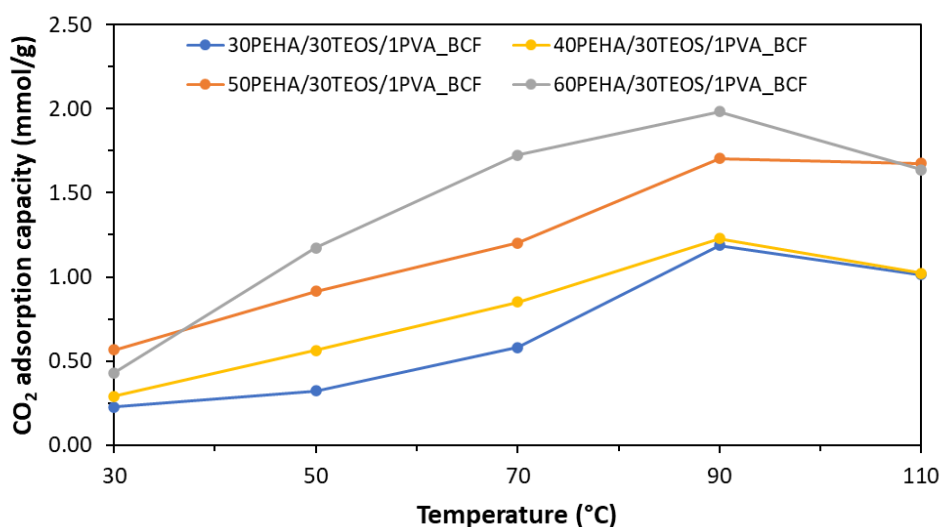
รูปที่ 4.17 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ปริมาณเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตต่าง ๆ สำหรับตัวดูดซับ 30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF และ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF

4.6.4 ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน

ผลของการเคลือบฝังเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เมื่อระดับความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกตคงที่ที่ร้อยละ 1 และ 30 โดยน้ำหนัก ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.18

ผลการศึกษาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30-60 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับมีแนวโน้มที่เหมือนกัน กล่าวคือ ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับถึง 110 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง โดยตัวดูดซับ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF ที่มีการดัดแปรด้วยเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก แสดงค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1.98 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องมาจากเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนในปริมาณที่มากขึ้น ช่วยเพิ่มตำแหน่งว่างในการทำปฏิกิริยา (Active sites) หรือหมู่เอมีนบนตัวดูดซับ ทำให้สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น [2, 49, 98] ซึ่งจะเห็นได้จากผลวิเคราะห์ FTIR (รูปที่ 4.6) ที่แสดงพีคของการมีอยู่ของเอมีนมี

ความสูงของพีคเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้ตัวดูดซับ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF ยังแสดงพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด (ตารางที่ 4.2) เมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่มีการดัดแปรด้วยเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินในปริมาณอื่น ๆ จากความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก สำหรับการศึกษาในลำดับถัดไป



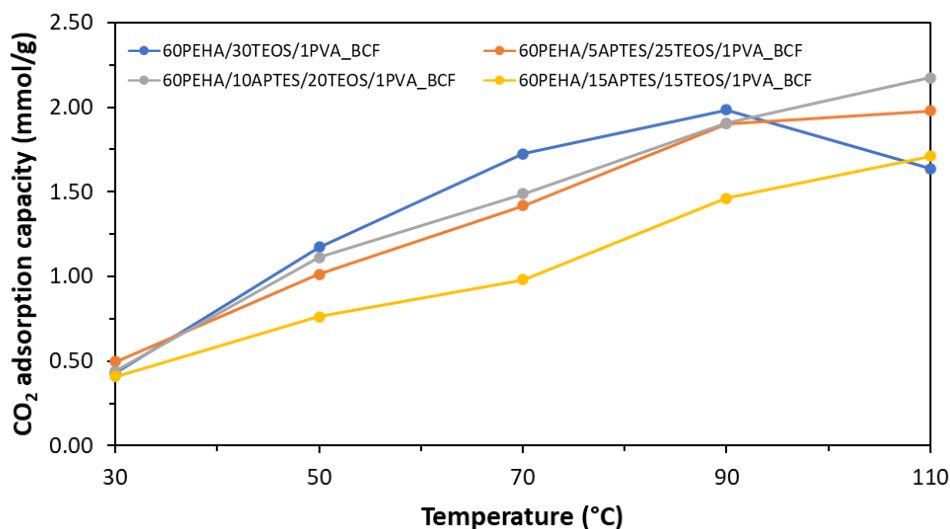
รูปที่ 4.18 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินต่าง ๆ สำหรับตัวดูดซับ 30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 40PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 50PEHA/30TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF

4.6.5 สัดส่วนของ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนต่อเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต

ผลของการดัดแปรด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) และเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (TEOS) ที่สัดส่วน 5 ต่อ 25, 10 ต่อ 20, และ 15 ต่อ 15 โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เมื่อระดับความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินคงที่ที่ร้อยละ 1 และ 60 โดยน้ำหนัก ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.19

ผลการศึกษา พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) ต่อเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (TEOS) เป็น 0:30 5:25 10:20 และ 15:15 ส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ อุณหภูมิสูง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ที่

อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับทุกตัวที่ดัดแปรด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) ร่วมกับเตตระเอธิลอร์โรซิลิเกต (TEOS) ให้ผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วยเตตระเอธิลอร์โรซิลิเกตอย่างเดียว เนื่องจากการกราฟด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนสร้างพันธะที่แข็งแรงขึ้นสำหรับยึดจับบนผิวตัวดูดซับ ซึ่งหมู่เอมีนของ APTES สามารถยึดจับกับผิวของตัวดูดซับได้มากกว่าการเคลือบฝัง PEHA เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น [99, 100] อีกทั้ง 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนเป็นอะมิโนไซเลนประกอบด้วยเอมีน 1 หมู่ ในโครงสร้าง ซึ่งเป็นตำแหน่งว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Active sites) สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการกราฟด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์ให้สูงขึ้นได้ โดยตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 2.17 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อีกทั้งตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงสุด (ตารางที่ 4.2) เมื่อเทียบกับตัวดูดซับอื่น ๆ จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับการมีอยู่และปริมาณของหมู่เอมีนบนตัวดูดซับเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงสมบัติเชิงกายภาพของตัวดูดซับเช่นกัน โดยจะเห็นได้จากตัวดูดซับ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF ซึ่งมีปริมาณ APTES สูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวดูดซับอื่น ๆ แต่แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า (ตารางที่ 4.2) จากความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อดัดแปรด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) และเตตระเอธิลอร์โรซิลิเกต (TEOS) ที่สัดส่วน 10 ต่อ 20 โดยที่ระดับความเข้มข้นรวมคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF สำหรับการศึกษาในลำดับถัดไป



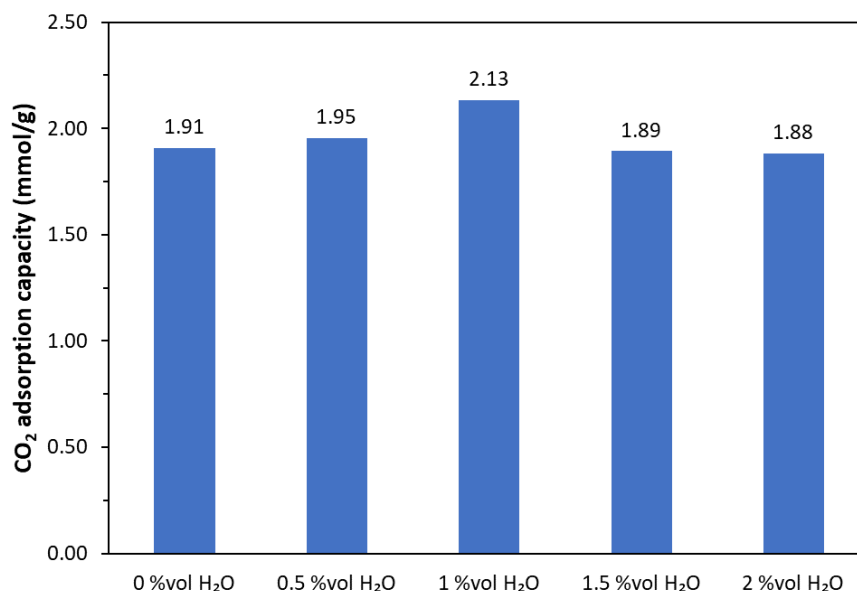
รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) และเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) ที่สัดส่วนต่าง ๆ สำหรับตัวดูดซับ 60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/5APTES/25TEOS/1PVA_BCF, 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF และ 60PEHA/15APTES/15TEOS/1PVA_BCF

4.6.6 ความชื้นในกระแสแก๊ส

ผลของความชื้นในกระแสแก๊สที่ร้อยละ 0-2 โดยปริมาตรต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมเข้าร้อยละ 30 โดยปริมาตร ดุลในฮีเลียม แสดงดังรูปที่ 4.20

ผลการศึกษา พบว่า เมื่อเพิ่มระดับความชื้นในกระแสแก๊สจาก 0 ถึงร้อยละ 0.5 และ 1 โดยปริมาตร ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีค่าเพิ่มจาก 1.91 มิลลิโมลต่อกรัม สู่ 1.95 มิลลิโมลต่อกรัม และ 2.13 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากในภาวะไม่มีความชื้นในกระแสแก๊สจะใช้เอมีน 2 โมล สำหรับจับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล แต่ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สจะใช้เอมีนเพียง 1 โมล สำหรับจับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล [101, 102] ดังนั้นในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สสูงขึ้น ทำให้ตัวดูดซับมีหมู่เอมีนปริมาณที่มากขึ้นเพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ [95] ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มระดับความชื้นในกระแสแก๊สเป็นร้อยละ 1.5 และ 2 โดยปริมาตร ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีค่าลดลงสู่ 1.89 มิลลิโมลต่อกรัม และ 1.88 มิลลิโมลต่อ

กรัม ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากเกินไป ทำให้น้ำเกิดการควบแน่นในรูพรุนและเคลือบบนผิวของตัวดูดซับ ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าไปในรูพรุนเพื่อจับกับหมู่เอมีนยากขึ้น [25, 101]



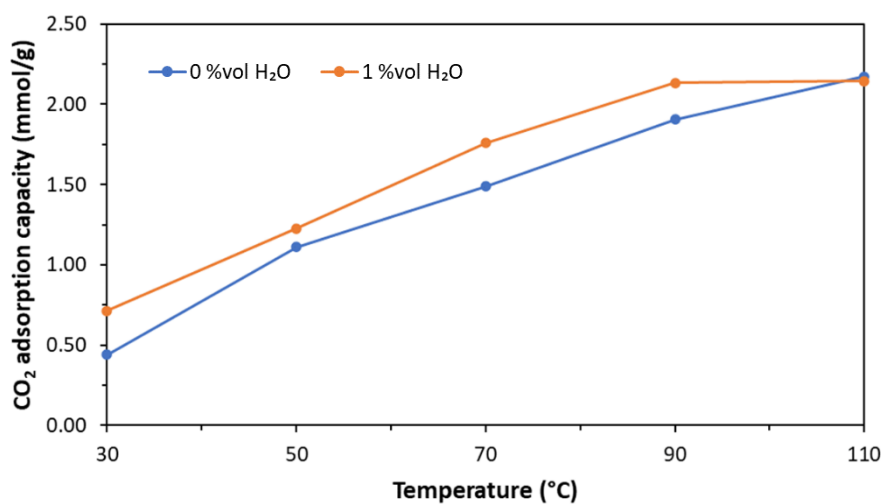
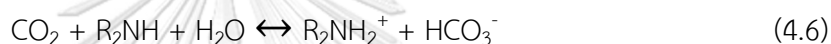
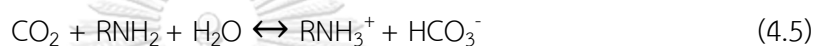
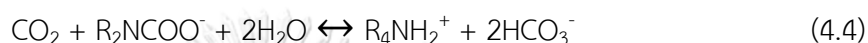
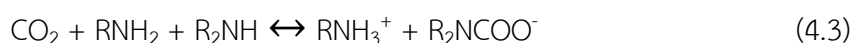
รูปที่ 4.20 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ

60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 0-2 โดยปริมาตร

เมื่อทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ในภาวะที่มีน้ำในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30-110 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.21

ผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สแสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าภาวะที่ไม่มีน้ำในกระแสแก๊สในช่วง 30-90 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากในภาวะที่ไม่มีมีความชื้นในกระแสแก๊สจะใช้หมู่เอมีน 2 โมล ในการจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมต (Carbamate) แสดงดังสมการที่ 4.1-4.3 แต่ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สจะใช้หมู่เอมีน 1 โมล ในการจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) แสดงดังสมการที่ 4.4-4.6 อีกทั้งคาร์บาเมตสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเพื่อสร้างไบคาร์บอเนต แสดงดังสมการที่ 4.4 [103, 104] ส่งผลให้

ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊ส โดยในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร ตัวดูดซับให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 2.14 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

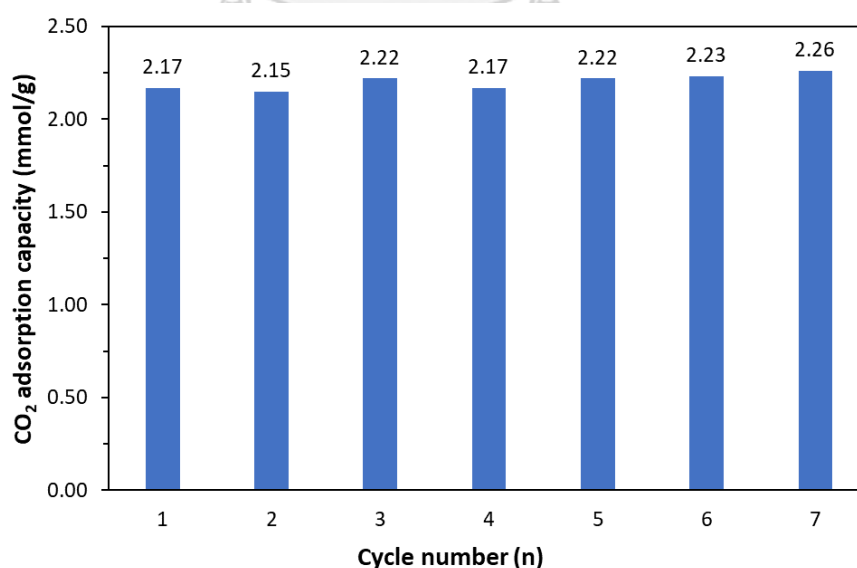


รูปที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร

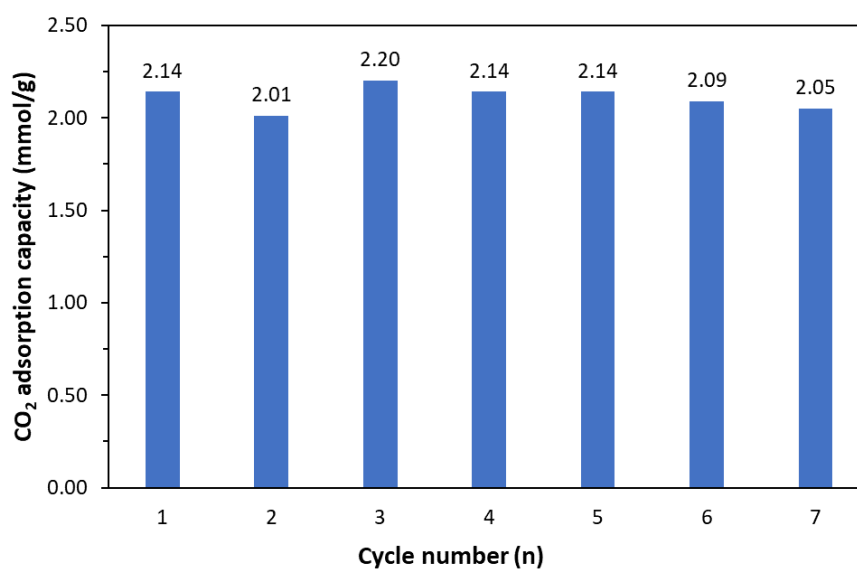
4.6.7 เสถียรภาพ

จากการศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 7 รอบ โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 30 โดยปริมาตร คูณในฮีเลียม ในภาวะที่ไม่มีความชื้นในกระแสแก๊ส แสดงดังรูปที่ 4.22 และในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.23

ผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่ไม่มีความชื้นในกระแสแก๊สของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ไม่พบการลดลงของความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งที่ผ่านการใช้งานไป 7 รอบการดูดซับ โดยช่วงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระหว่าง 2.17 ถึง 2.26 มิลลิโมลต่อกรัม ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร ของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีการลดลงของค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 4.2 หลังจากการใช้งานไป 7 รอบ โดยช่วงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระหว่าง 2.14 ถึง 2.05 มิลลิโมลต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF มีเสถียรภาพทั้งในภาวะที่ไม่มีความชื้นและมีความชื้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ในกระแสแก๊ส



รูปที่ 4.22 เสถียรภาพของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่ไม่มีความชื้นในกระแสแก๊ส



รูปที่ 4.23 เสถียรภาพของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF สำหรับการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 1 โดยปริมาตร [105]



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนเยื่อชานอ้อยที่มีเส้นใยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีน ได้แก่ การฟอกเยื่อชานอ้อยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ชนิดสารเชื่อมขวาง ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต และสารเชื่อมขวางผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต, ปริมาณเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตในสารเชื่อมขวางผสม, ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน, สัดส่วนของ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนต่อเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต, ความชื้นในกระแสแก๊ส, เสถียรภาพของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิการดูดซับ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาการฟอกเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของเยื่อชานอ้อยหลังการฟอกสูงขึ้น เนื่องจากลิกนินและสารอื่น ๆ ในเยื่อชานอ้อยถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

ผลการศึกษาชนิดสารเชื่อมขวาง ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต และสารเชื่อมขวางผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต พบว่า หลังการดัดแปรเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/1PVA_BCF) ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 1.02 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ช่วยเพิ่มจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลบนตัวดูดซับ ช่วยให้เพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนกระจายตัวและยึดจับบนผิวตัวดูดซับได้มาก อีกทั้งหมู่ไฮดรอกซิลช่วยดึงคาร์บอนไดออกไซด์จากกระแสแก๊ส หลังการดัดแปรเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/20TEOS_BCF) ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 1.17 มิลลิโมล

ต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จากการที่เตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตเข้าไปเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่เซลลูโลสผ่านหมู่ไฮดรอกซิล ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์สร้างพันธะกับเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินได้มาก หลังการตัดแปรรือชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/20TEOS/1PVA_BCF) แสดงสมบัติเชิงกายภาพและค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างตัวดูดซับที่ตัดแปรรือชานอ้อยด้วยสารเชื่อมขวางทั้งสองเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง เนื่องมาจากการทำงานร่วมกันระหว่างเตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ผลการศึกษาปริมาณเตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตโดยการเพิ่มระดับความเข้มข้นจากร้อยละ 20 เป็น 30 โดยน้ำหนัก ในสารเชื่อมขวางผสม พบว่า ตัวดูดซับที่ตัดแปรรือชานอ้อยด้วยเตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เนื่องจากปริมาณเตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตที่สูงขึ้น ช่วยส่งเสริมการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่เซลลูโลส ส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถสร้างพันธะกับเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินบนผิวตัวดูดซับได้มาก โดยตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตัดแปรรือชานอ้อยด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30PEHA/30TEOS/1PVA_BCF) แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 1.19 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินโดยการเพิ่มระดับความเข้มข้นร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่า การตัดแปรรือชานอ้อยด้วยปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินที่สูงขึ้น ช่วยให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณหมู่เอมีนสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น โดยตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยจากกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาและผ่านกระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตัดแปรรือชานอ้อยด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เตตระเอธิลลออร์โธซิลิเกตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (60PEHA/30TEOS/1PVA_BCF) แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 1.98 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาสัดส่วนของ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลนต่อเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต เป็น 0:30 5:25 10:20 และ 15:15 ที่ระดับความเข้มข้นรวมคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วย 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) และเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (TEOS) ที่สัดส่วน 10 ต่อ 20 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และ เพนตะเอทิลีนเฮกซะมีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF) แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 2.17 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากแสดงพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด

ผลการศึกษาความชื้นในกระแสแก๊สร้อยละ 0 ถึง 2 โดยปริมาตรของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF พบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เมื่อมีความชื้นในกระแสแก๊สสูงขึ้น เนื่องจากสัดส่วนการทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะไม่มีความชื้นจากเดิม 2:1 ลดลงเป็น 1:1 ในภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊ส และหากมีความชื้นที่มากเกินไป ทำให้น้ำเกิดการควบแน่นในรูพรุนและเคลือบบนผิวของตัวดูดซับ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง โดยตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ในภาวะที่มีความชื้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ในกระแสแก๊ส แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 2.14 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาเสถียรภาพการดูดซับของตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF พบว่า ตัวดูดซับมีเสถียรภาพทั้งในภาวะที่ไม่มีความชื้นและมีความชื้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ในกระแสแก๊ส ตลอดการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ 7 รอบ อีกทั้งจากผลวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน พบว่า ตัวดูดซับมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

เมื่อสังเคราะห์ตัวดูดซับเยื่อชานอ้อยที่มีเส้นใยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและดัดแปรด้วยเอมีน ควรเก็บไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด ห่างจากความชื้นและความร้อน เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและการปนเปื้อน ซึ่งอาจนำไปสู่สมรรถนะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงได้

การศึกษาระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม รวมทั้งศึกษาการเลือกคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สอื่น ๆ เพิ่มเติม จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมจริง เนื่องจากในอุตสาหกรรมจริงมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันและมีองค์ประกอบของแก๊สอื่น ๆ ร่วมด้วย



บรรณานุกรม

1. Miao, Y., et al., CO₂ capture performance and characterization of cellulose aerogels synthesized from old corrugated containers. *Carbohydr Polym*, 2020. 227: p. 115380.
2. Wang, X., L. Chen, and Q. Guo, Development of hybrid amine-functionalized MCM-41 sorbents for CO₂ capture. *Chemical Engineering Journal*, 2015. 260: p. 573-581.
3. Varghese, A.M. and G.N. Karanikolos, CO₂ capture adsorbents functionalized by amine – bearing polymers: A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020. 96.
4. Shao, X., et al., Preparation and Characterization of Porous Microcrystalline Cellulose from Corncob. *Industrial Crops and Products*, 2020. 151.
5. Rook, B. *The Sugar Series : Sugarcane Bagasse 2020*; Available from: <https://www.czarnikow.com/blog/the-sugar-series-sugarcane-bagasse>.
6. Ajala, E.O., et al., Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. *Bioresources and Bioprocessing*, 2021. 8(1).
7. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. รายงานสถานการณ์การปลูกอ้อยปีการผลิต 2563/64 Available from: <http://www.ocsb.go.th/th/home/index.php>.
8. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. การผลิตไฟฟ้าและไอน้ำของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย Available from: <http://www.ocsb.go.th/th/home/index.php>.
9. Alokika, et al., Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *Int J Biol Macromol*, 2021. 169: p. 564-582.
10. Hokkanen, S., A. Bhatnagar, and M. Sillanpaa, A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity. *Water Res*, 2016. 91: p. 156-73.
11. Machmudah, S., et al., Hydrolysis of Biopolymers in Near-Critical and Subcritical Water, in *Water Extraction of Bioactive Compounds*. 2017. p. 69-107.

12. Berghel, A.A.a.J., *Biotechnological Applications of Biomass*. 2020
13. Jedrzejczyk, M., et al., Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass, in *Second and Third Generation of Feedstocks*. 2019. p. 143-196.
14. Agbor, V.B., et al., Biomass pretreatment: fundamentals toward application. *Biotechnol Adv*, 2011. 29(6): p. 675-85.
15. Iram, M., et al., Production of bioethanol from sugarcane bagasse using yeast strains: A kinetic study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2018. 40(3): p. 364-372.
16. Yanfeng, H., et al., Physicochemical Characterization of Rice Straw Pretreated with Sodium Hydroxide in the Solid State for Enhancing Biogas Production. *Energy & Fuels*, 2008. 22(4): p. 2775-2781.
17. John, M.J. and R.D. Anandjiwala, Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, 2008. 29(2): p. 187-207.
18. Pongchaiphol, S., et al., Characterization of Cellulose-Chitosan-Based Materials from Different Lignocellulosic Residues Prepared by the Ethanosolv Process and Bleaching Treatment with Hydrogen Peroxide. *ACS Omega*, 2021. 6(35): p. 22791-22802.
19. Then, Y.Y., et al., Influence of alkaline-peroxide treatment of fiber on the mechanical properties of oil palm mesocarp fiber/poly(butylene succinate) biocomposite. *Bioresources and Bioprocessing*, 2015. 10(1): p. 1730-174.
20. Wu, Y., et al., Effect of H₂O₂ Bleaching Treatment on the Properties of Finished Transparent Wood. *Polymers (Basel)*, 2019. 11(5).
21. North, M., What is CO₂? Thermodynamics, Basic Reactions and Physical Chemistry, in *Carbon Dioxide Utilisation*. 2015. p. 3-17.
22. Vedantu. Carbon Dioxide. Available from: <https://www.vedantu.com/chemistry/carbon-dioxide>.
23. Leung, D.Y.C., G. Caramanna, and M.M. Maroto-Valer, An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 39: p. 426-443.
24. Di Gianfrancesco, A., Worldwide overview and trend for clean and efficient use

- of coal, in *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*. 2017. p. 643-687.
25. Sanz-Perez, E.S., et al., Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chem Rev*, 2016. 116(19): p. 11840-11876.
 26. Bert, M., et al. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. 2005; Available from: <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>.
 27. Saleh, T.A. and V.K. Gupta, *An Overview of Membrane Science and Technology, in Nanomaterial and Polymer Membranes*. 2016. p. 1-23.
 28. Malliga, P., R.B. Bela, and N. Shanmugapriya, Conversion of textile effluent wastewater into fertilizer using marine cyanobacteria along with different agricultural waste, in *Biovalorisation of Wastes to Renewable Chemicals and Biofuels*. 2020. p. 87-111.
 29. Rodney, J., et al. *Carbon dioxide separation technologies*. 2003; Available from: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-94-017-0245-4_2.pdf.
 30. Bhatta, L.K.G., et al., Progress in hydrotalcite like compounds and metal-based oxides for CO₂ capture: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2015. 103: p. 171-196.
 31. Petrovic, B., M. Gorbounov, and S. Masoudi Soltani, Influence of surface modification on selective CO₂ adsorption: A technical review on mechanisms and methods. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021. 312.
 32. Zhu, L., D. Shen, and K.H. Luo, A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: Species, mechanisms and modification methods. *J Hazard Mater*, 2020. 389: p. 122102.
 33. Kwon, S., et al., CO₂ Sorption, in *Coal Gasification and Its Applications*. 2011. p. 293-339.
 34. Kaithwas, A., et al., Industrial wastes derived solid adsorbents for CO₂ capture: A mini review. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012. 90(10): p. 1632-1641.
 35. Sillanpää, M. and A. Bhatnagar, NOM Removal by Adsorption, in *Natural Organic Matter in Water*. 2015. p. 213-238.
 36. Hu, X., et al., A review of N-functionalized solid adsorbents for post-combustion

- CO₂ capture. *Applied Energy*, 2020. 260.
37. Delamine. Pentaethylenehexamine. 2014; Available from: https://www.delamine.com/images/stories/documenten/msds/jul2014/pentaethylenehexamine%20peha__english%20us_5.00.pdf.
 38. Bui, T.Q., et al., Switchable Aqueous Pentaethylenehexamine System for CO₂ Capture: An Alternative Technology with Industrial Potential. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018. 6(8): p. 10395-10407.
 39. Teixeira, R.A., et al., Preparation of hybrids of wood sawdust with 3-aminopropyl-triethoxysilane. Application as an adsorbent to remove Reactive Blue 4 dye from wastewater effluents. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021. 125: p. 141-152.
 40. Wamba, A.G.N., et al., Grafting of Amine functional group on silicate based material as adsorbent for water purification: A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018. 6(2): p. 3192-3203.
 41. Deshmukh, K., et al., Biopolymer Composites With High Dielectric Performance: Interface Engineering, in *Biopolymer Composites in Electronics*. 2017. p. 27-128.
 42. Alvarado, Y., et al., Polymer nanoparticles for the release of complex molecules, in *Materials for Biomedical Engineering*. 2019. p. 135-163.
 43. Ali, A. and S. Ahmed, Recent Advances in Edible Polymer Based Hydrogels as a Sustainable Alternative to Conventional Polymers. *J Agric Food Chem*, 2018. 66(27): p. 6940-6967.
 44. Ramachandran, R., D. Jung, and A.M. Spokoyny, Cross-linking dots on metal oxides. *NPG Asia Materials*, 2019. 11(1).
 45. Sánchez-Ramírez, E., et al., Reactive Distillation Column Design for Tetraethoxysilane (TEOS) Production: Economic and Environmental Aspects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018. 57(14): p. 5024-5034.
 46. Kishore, K., et al., Synthesis and Characterization of Hyperbranched Polyurethane Hybrids Using Tetraethoxysilane (TEOS) As Cross-Linker. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008. 47(23): p. 9214-9224.
 47. Xu, F., W. Zeng, and D. Li, Recent advance in alkoxy silane-based consolidants for stone. *Progress in Organic Coatings*, 2019. 127: p. 45-54.

48. Sigma-Aldrich. Tetraethyl orthosilicate. 2021; Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/product/aldrich/86578>.
49. Wang, C., S.K. Biswas, and S. Okubayashi, Polyethylenimine-Impregnated Mesoporous Delignified Wood with High Mechanical Strength for CO₂/N₂ Selective Adsorption. *ACS Applied Nano Materials*, 2020. 3(6): p. 5499-5508.
50. Wang, C. and S. Okubayashi, Polyethyleneimine-crosslinked cellulose aerogel for combustion CO₂ capture. *Carbohydr Polym*, 2019. 225: p. 115248.
51. Sepahvand, S., et al., A promising process to modify cellulose nanofibers for carbon dioxide (CO₂) adsorption. *Carbohydr Polym*, 2020. 230: p. 115571.
52. Liu, Z., et al., CO₂ adsorption performance of different amine-based siliceous MCM-41 materials. *Journal of Energy Chemistry*, 2015. 24(3): p. 322-330.
53. Luo, S., et al., Preparation and characterization of amine-functionalized sugarcane bagasse for CO₂ capture. *J Environ Manage*, 2016. 168: p. 142-8.
54. Jiang, X., et al., Amine grafted cellulose aerogel for CO₂ capture. *Journal of Porous Materials*, 2020. 28(1): p. 93-97.
55. Scientific, T. FTIR Spectrometer. Available from: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/IQLAADGAAGFAHDMAZA>.
56. Corporation, M.I. Surface area and porosity analyzer micromeritics. Available from: <https://www.micromeritics.com/asap-2020-plus/>.
57. University, S.a.T.R.E.C.C. Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer – SEM-EDS (IT500HR). Available from: <https://strec.chula.ac.th/equipments-rates/scanning-electron-microscope-and-energy-dispersive-x-ray-spectrometer-sem-eds-it500hr>.
58. PerkinElmer. Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer. Available from: http://yiqi-oss.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900102447/goods_img/246875.pdf.
59. SHIMADZU. GC-2014 Shimadzu. Available from: <https://www.shimadzu.com/an/gc/gc2014.html>.
60. Pickering, K.L., M.G.A. Efendy, and T.M. Le, A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016. 83: p. 98-112.

61. Abderrahim, B., et al., Kinetic thermal degradation of cellulose, polybutylene succinate and a green composite: comparative study. *World Journal of Environmental Engineering*, 2015. 3(4): p. 95-110.
62. Wulandari, W.T., et al., Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse. In *IOP conference series: materials science and engineering*, 2016. 107(1): p. 012045.
63. Hospodarova, V., E. Singovszka, and N. Stevulova, Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2018. 09(06): p. 303-310.
64. Cheng, S., et al., Effect of different heat treatment temperatures on the chemical composition and structure of Chinese fir wood. *BioRes*, 2016. 11(2): p. 4006-4016.
65. Javier-Astete, R., J. Jimenez-Davalos, and G. Zolla, Determination of hemicellulose, cellulose, holocellulose and lignin content using FTIR in *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) K. Schum. and *Guazuma crinita* Lam. *PLoS One*, 2021. 16(10): p. e0256559.
66. Kumneadklang, S., S. O-Thong, and S. Larpiattaworn, Characterization of cellulose fiber isolated from oil palm frond biomass. *Materials Today: Proceedings*, 2019. 17: p. 1995-2001.
67. Zhang, H., et al., Investigation of alkaline hydrogen peroxide pretreatment and Tween 80 to enhance enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Biotechnol Biofuels*, 2019. 12: p. 107.
68. Abdulkhani, A., et al., Preparation of cellulose/polyvinyl alcohol biocomposite films using 1-n-butyl-3-methylimidazolium chloride. *Int J Biol Macromol*, 2013. 62: p. 379-86.
69. Zabed, H., et al., Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: An overview on feedstocks and technological approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 66: p. 751-774.
70. Poletto, M., et al., Native cellulose: structure, characterization and thermal properties. *Materials*, 2014. 7(9): p. 6105-6119.
71. Gronquist, P., et al., Mesoporosity of Delignified Wood Investigated by Water

- Vapor Sorption. ACS Omega, 2019. 4(7): p. 12425-12431.
72. Chen, Y., et al., Fiber properties of de-inked old newspaper pulp after bleaching with hydrogen peroxide. BioRes, 2015. 10(1): p. 1857-1868.
 73. Peng, H.-L., et al., Chitosan-derived mesoporous carbon with ultrahigh pore volume for amine impregnation and highly efficient CO₂ capture. Chemical Engineering Journal, 2019. 359: p. 1159-1165.
 74. Xu, W.-L., et al., Chitin-derived fibrous carbon microspheres as support of polyamine for remarkable CO₂ capture. Green Chemical Engineering, 2022.
 75. Kim, D.H., et al., Multifunctional Amine-Containing PVA-g-POEM Graft Copolymer Membranes for CO₂ Capture. Macromolecules, 2018. 51(15): p. 5646-5655.
 76. Zakirov, A.S., et al., Comparative Study on the Structural and Electrical Properties of Low-bftextitk SiOC(-H) Films Deposited by Using Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. Journal of the Korean Physical Society 2007. 50(6).
 77. Jabeen, S., et al., Development of a novel pH sensitive silane crosslinked injectable hydrogel for controlled release of neomycin sulfate. Int J Biol Macromol, 2017. 97: p. 218-227.
 78. Ahmed, S., A. Ramli, and S. Yusup, Development of polyethylenimine-functionalized mesoporous Si-MCM-41 for CO₂ adsorption. Fuel Processing Technology, 2017. 167: p. 622-630.
 79. Neves, R.M., et al., The influence of silane surface modification on microcrystalline cellulose characteristics. Carbohydr Polym, 2020. 230: p. 115595.
 80. Tang, X., et al., The effect of the variation in material composition on the heterogeneous pore structure of high-maturity shale of the Silurian Longmaxi formation in the southeastern Sichuan Basin, China. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. 23: p. 464-473.
 81. Murugesu, M.P., Pore Structure Analysis using Subcritical Gas Adsorption Method. . In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro, 2017.
 82. Witoon, T., and M. Chareonpanich, Effect of pore size and surface chemistry of porous silica on CO₂ adsorption. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2012. 34(4).

83. Maciulyte, S., et al., New poly(urethane-urea) microcapsules from PVA modified with APTES: preparation, characterization and enzyme encapsulation. *Polymer Bulletin*, 2020. 78(4): p. 1867-1886.
84. Shaker, K., et al., Extraction and characterization of novel fibers from *Vernonia elaeagnifolia* as a potential textile fiber. *Industrial Crops and Products*, 2020. 152.
85. Narayanasamy, P., et al., Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Calotropis gigantea* fruit bunch for ecofriendly polymer composites. *Int J Biol Macromol*, 2020. 150: p. 793-801.
86. Jaiswal, D., et al., Review on extraction, characterization, surface treatment and thermal degradation analysis of new cellulosic fibers as sustainable reinforcement in polymer composites. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2022. 5.
87. Qin, W., et al., Modifying the carbon fiber–epoxy matrix interphase with silicon dioxide nanoparticles. *RSC Advances*, 2015. 5(4): p. 2457-2465.
88. Fidecka, K., et al., Quantification of amino groups on halloysite surfaces using the Fmoc-method. *RSC Adv*, 2020. 10(24): p. 13944-13948.
89. Liu, Y. and X. Yu, Carbon dioxide adsorption properties and adsorption/desorption kinetics of amine-functionalized KIT-6. *Applied Energy*, 2018. 211: p. 1080-1088.
90. Ramezani Kakroodi, A., et al., Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Nanocomposites Based on Polyvinyl Alcohol and Cellulose Nanofiber from *Aloe vera* Rind. *Journal of Nanomaterials*, 2014. 2014: p. 1-7.
91. Bryaskova, R., et al., Cell adhesive behavior of PVA-based hybrid materials with silver nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 2013. 235: p. 186-191.
92. Yang, S.-q., et al., Effect of reaction temperature on grafting of γ -aminopropyl triethoxysilane (APTES) onto kaolinite. *Applied Clay Science*, 2012. 62-63: p. 8-14.
93. Zhu, W., et al., Preparation of an Amine-Modified Cellulose Nanocrystal Aerogel by Chemical Vapor Deposition and Its Application in CO₂ Capture. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020. 59(38): p. 16660-16668.

94. Sulaiman, N.A., et al., Removal of CU (II) and FE (II) ions through thin film composite (TFC) with hybrid membrane. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2016. 11: p. 36-49.
95. Lin, R., et al., Design of a viscose based solid amine fiber: effect of its chemical structure on adsorption properties for carbon dioxide. *J Colloid Interface Sci*, 2013. 407: p. 425-31.
96. Zhao, Y., et al., Polyethylenimine-Based Solid Sorbents for CO₂ Adsorption: Performance and Secondary Porosity. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019. 58(34): p. 15506-15515.
97. Raganati, F., et al., Kinetic study and breakthrough analysis of the hybrid physical/chemical CO₂ adsorption/desorption behavior of a magnetite-based sorbent. *Chemical Engineering Journal*, 2019. 372: p. 526-535.
98. Niu, M., et al., Amine-Impregnated Mesoporous Silica Nanotube as an Emerging Nanocomposite for CO₂ Capture. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016. 8(27): p. 17312-20.
99. Sanchez-Zambrano, K.S., et al., CO₂ Capture with Mesoporous Silicas Modified with Amines by Double Functionalization: Assessment of Adsorption/Desorption Cycle. *Materials (Basel)* 2018. 11(6).
100. Abu-Zahra, M.R.M., et al., Evaluation on the Stability of Amine-Mesoporous Silica Adsorbents used for CO₂ Capture. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 2020. 36(1).
101. Goepfert, A., et al., Carbon dioxide capture from the air using a polyamine based regenerable solid adsorbent. *J Am Chem Soc*, 2011. 133(50): p. 20164-7.
102. Didas, S.A., et al., Role of amine structure on carbon dioxide adsorption from ultradilute gas streams such as ambient air. *ChemSusChem*, 2012. 5(10): p. 2058-64.
103. Wang, Y., et al., Mechanism and kinetics of CO₂ adsorption for TEPA-impregnated hierarchical mesoporous carbon in the presence of water vapor. *Powder Technology*, 2020. 368: p. 227-236.
104. Mutyala, S., et al., CO₂ capture and adsorption kinetic study of amine-modified MIL-101 (Cr). *Chemical Engineering Research and Design*, 2019. 143: p. 241-248.

105. Wu, Y., et al., Effects of amine loading on the properties of cellulose nanofibrils aerogel and its CO₂ capturing performance. Carbohydrate polymers, 2018. 194: p. 252-259.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

การคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำหนักของเยื่อชานอ้อย

เยื่อชานอ้อยมีความชื้นร้อยละ 74.9 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเยื่อชานอ้อย 100 กรัม (น้ำหนักเปียก) ประกอบด้วยความชื้น 74.9 กรัม และเยื่อชานอ้อย 25.1 กรัม (น้ำหนักแห้ง)

หากต้องการเยื่อชานอ้อย 2 กรัม (น้ำหนักแห้ง) สามารถคำนวณได้ ดังนี้

มีเยื่อชานอ้อยแห้ง 25.1 กรัม ในเยื่อชานอ้อยเปียก 100 กรัม

มีเยื่อชานอ้อยแห้ง 2 กรัม ในเยื่อชานอ้อยเปียก $(2 \times 100) / 25.1 = 7.9681$ กรัม

ดังนั้น ต้องเตรียมเยื่อชานอ้อยเปียก 7.9681 กรัม สำหรับเตรียมเยื่อชานอ้อย 2.0 กรัม (น้ำหนักแห้ง)

2. น้ำหนักของสารที่ต้องการ

น้ำหนักของสารที่ต้องการ = (ความเข้มข้นของสารที่ต้องการ \times น้ำหนักรวมที่ต้องการ) / 100

ตัวอย่างการคำนวณ

หากต้องการเตรียมตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF 5.0 กรัม ซึ่งประกอบด้วยตัวรองรับ 10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และ PEHA ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณตัวรองรับ} &= (40 \times 5) / 100 \\ &= 2.0 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน} &= (60 \times 5) / 100 \\ &= 3.0 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องเตรียมตัวรองรับ 2.0 กรัม และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน 3.0 กรัม

ในส่วนของตัวรองรับ 10APTES/20TEOS/1PVA_BCF 2.0 กรัม ซึ่งประกอบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์, เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต, 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน และเยื่อชานอ้อยแห้ง ความเข้มข้นร้อยละ 1, 20, 10 และ 69 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สามารถคำนวณได้ ดังนี้

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักพอลิไวนิลแอลกอฮอล์} &= (1 \times 2) / 100 \\ &= 0.02 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต} &= (20 \times 2) / 100 \\ &= 0.4 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนัก 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน} &= (10 \times 2) / 100 \\ &= 0.2 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เยื่อชานอ้อยแห้ง ร้อยละ 69 โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักเยื่อชานอ้อยแห้ง} &= (69 \times 2) / 100 \\ &= 1.38 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ในการเตรียมตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF 5.0 กรัม ต้องเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์, เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต, 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน, เยื่อชานอ้อยแห้ง และเพนตะเอทิลีนเฮกซะมีน 0.02, 0.4, 0.2, 1.38 และ 3.0 กรัม ตามลำดับ

ภาคผนวก ข.

ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ข.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเซลลูโลสที่ดัดแปรด้วยเอมีน

ตัวอย่าง	ค่าการดูดซับ CO ₂ (mmol/g)	ภาวะในการดูดซับ	% สูญเสีย (จำนวนรอบการดูดซับ)	ความชื้น	วิธีการ	อ้างอิง
Cellulose nanocrystal aerogel modified with APS	1.50	25 °C, 100 %vol CO ₂ and 1 bar	15% (10)	-	Physical adsorption instrument	[93]
Cellulose nanofibrils aerogels modified with APS	1.91	25 °C and 1 bar	2% (5)	-	Autosorb 1C instrument	[105]
PEI-crosslinked cellulose aerogel	2.31	25 °C, 100 %vol CO ₂ and 1 bar	7% (10)	-	Thermogravimetric analysis	[50]
PEI-impregnated mesoporous delignified wood	2.96	120 °C, 100 %vol CO ₂ and 1 bar	18% (10)	-	Thermogravimetric analysis	[49]
60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF	2.17	110 °C, 30 %vol CO ₂ and 1 bar	- (7)	-	Reactor with gas chromatography	This work
60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF	2.14	110 °C, 30 %vol CO ₂ and 1 bar	4.2% (7)	1 %vol	Reactor with gas chromatography	This work

จากงานวิจัยเกี่ยวกับตัวดูดซับเซลลูโลสที่ดัดแปรด้วยเอมีน แสดงดังตารางที่ ข.1 จะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับเซลลูโลสจากงานวิจัย [50], [93], [105] ส่วนใหญ่แล้วสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ (25 องศาเซลเซียส) อีกทั้งไม่นิยมนำตัวดูดซับเซลลูโลสมาทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊ส เนื่องจากตัวดูดซับเซลลูโลสมีความชอบน้ำสูง ส่งผลให้ตัวดูดซับมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง โดยตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ที่เตรียมจากงานวิจัยนี้ สามารถทำการดัดแปรตัวดูดซับเซลลูโลสด้วยเอมีน และแสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง (110 องศาเซลเซียส) เนื่องจากเกิดการดูดซับเชิงเคมีได้ดี อีกทั้งตัวดูดซับนี้สามารถทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดีภายใต้ภาวะที่มีความชื้นในกระแสแก๊ส ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการต่าง ๆ ที่ส่วนใหญ่แล้วจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องและมีองค์ประกอบของน้ำร่วมด้วย และภายใต้ภาวะในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่คล้ายกัน ตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ยังสามารถแสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับตัวดูดซับที่รายงานไว้ในงานวิจัย [49] ที่แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แม้ว่า จะทำการดูดซับภายใต้ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ตัวดูดซับ 60PEHA/10APTES/20TEOS/1PVA_BCF ยังแสดงเสถียรภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับตัวดูดซับในงานวิจัยอื่น ๆ ทั้งในภาวะที่ไม่มีและมีความชื้นในกระแสแก๊ส

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปวีณ์นุช ไตรเมศ
วัน เดือน ปี เกิด	17 กันยายน 2539
สถานที่เกิด	นครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	117/14 หมู่ 5 ตำบลสีชล อำเภอสีชล จังหวัดนครศรีธรรมราช 80120
ผลงานตีพิมพ์	CO ₂ ADSORPTION PERFORMANCE OF BAGASSE CELLULOSE WITH PENTAETHYLENEHEXAMINE MODIFICATION. THE 27th PPC Symposium on Petroleum and Petrochemicals and Polymers and the 12th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology. Online by Zoom Application, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand July 1st, 2021