

คาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลล์โลสที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดสาร
แอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ACTIVATED CARBON FROM BACTERIAL CELLULOSE BY KOH ACTIVATION FOR REMOVAL
OF AMMONIUM ION FROM AQUEOUS SOLUTIONS

Miss Waroonsiri Sanprom



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

คาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสที่กระตุ้นด้วย
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดสารแอมโมเนียมไอออน
ออกจากสารละลายน้ำ

โดย

นางสาววรรณศิริ แสนพรม

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวทอม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุชาติา เกิดผลภักดิ์)

วรรณศิริ แสพนพรม : คาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดสารแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำ (ACTIVATED CARBON FROM BACTERIAL CELLULOSE BY KOH ACTIVATION FOR REMOVAL OF AMMONIUM ION FROM AQUEOUS SOLUTIONS) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์, 109 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวดูดซับจากแบคทีเรียเซลลูโลสด้วยวิธีการกระตุ้นโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำ โดยมีการศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะและโครงสร้างภายในด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เทคนิค BET surface area (BET) เทคนิค Fourier transforms infrared (FTIR) spectroscopy และเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ซึ่งพบว่าโครงสร้างภายในคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนจำนวนมากและพื้นผิวมีประจุลบ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการจับกับประจุบวกของแอมโมเนียมไอออนในสารละลายน้ำได้เป็นอย่างดี จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ประกอบด้วยความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นจาก 60 ถึง 360 ppm ระยะเวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิสำหรับการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบกะ และจากการทดลองพบว่าคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสจะสามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรก และค่อยๆเข้าสู่สมดุลภายในเวลาประมาณ 150 นาที โดยปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สูงที่สุดคือ 221.44 มิลลิกรัม/กรัม โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียมไอออน 360 ppm นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาสมการสมดุลการดูดซับพบว่าสมการสมดุลการดูดซับแบบ Freundlich สามารถใช้อธิบายผลการดูดซับแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียเซลลูโลสได้ดีกว่าสมการสมดุลการดูดซับแบบ Langmuir

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5771007121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: BACTERIAL CELLULOSE, AMMONIUM ION, ADSORPTION, ACTIVATED CARBON

WAROONSIRI SANPROM: ACTIVATED CARBON FROM BACTERIAL CELLULOSE BY KOH ACTIVATION FOR REMOVAL OF AMMONIUM ION FROM AQUEOUS SOLUTIONS. ADVISOR: ASSOC. PROF. MUENDUEN PHISALAPHONG, Ph.D., 109 pp.

Activated carbon was prepared from bacterial celluloses by potassium hydroxide (KOH) activation at 400 and 500^oC and was used as adsorbent for removal of ammonium ion (NH₄⁺) from aqueous solutions. The activated carbons derived from BC were characterized for chemical property and morphology by Scanning electron microscope (SEM), BET surface area (BET), Fourier transforms infrared (FTIR) spectroscopy and X-ray Diffraction (XRD). The obtained activated carbon has highly porous structure with a negative surface charge. It was shown that the prepared activated carbon had high efficiency to capture positive charged ions (NH₄⁺) in aqueous solution. The effect of influential parameters, including initial concentration of NH₄⁺ varying from 60 to 360 ppm, contact time and temperature were studied using batch-adsorption experiments. It was shown that the adsorption rates were very fast during the first 40 minute and the adsorption process had reached equilibrium within about 150 min. The maximum NH₄⁺ adsorption capacity was 221.44 mg/g obtained from the activated carbon treated with 10 M KOH at 500 °C for 7 h and 360 ppm of initial concentration of NH₄⁺. Furthermore, the adsorption of ammonium ion decreased with increase of temperature from 30 to 50 °C. From the experimental adsorption data which were obtained by batch tests in lab, Freundlich isotherm can describe the adsorption isotherm of the adsorption of ammonium ion from aqueous solution by the adsorbent prepared from bacterial cellulose better than Langmiur isotherm.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ตามเป้าประสงค์ของผู้วิจัยได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ คำปรึกษา และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าจากผู้มีพระคุณหลายท่าน

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาและเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ ตรวจสอบและแก้ไขความถูกต้อง ตลอดจนชี้แนะแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ที่ดีเสมอมา รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สิริรุ่ง ปริษานนท์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม และ ดร.สุชาดา เกิดผลภัทร ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณอนันต์ กาญจนวุฒิธรรม คุณदनุยศ แดงประดิษฐ์ คุณวันฉัตร ญัฐพัทธนิษย์ คุณกันตพงศ์ เลิศวิธิ ศิษย์เก่าปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณอานนท์ ขำแก้ว นิสิตปัจจุบันปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกคนในครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้มาจนกระทั่งประสบผลสำเร็จในวันนี้ได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1	5
บทนำ.....	5
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	5
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	8
บทที่ 2	10
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	10
2.2 แบคทีเรียเซลลูโลส (Bacterial Cellulose).....	10
2.3 แอมโมเนียมไอออน (Amminium ion)	11
2.4 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon).....	12
2.4.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	14
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	14
2.4.3 กระบวนการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	17
2.4.4 ลักษณะและโครงสร้างของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	23
2.4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	23

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	25
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ	25
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	26
2.5.3 กลไกการดูดซับ	28
2.5.4 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	28
2.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3	36
วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง.....	37
3.4 การทำกราฟมาตรฐานของสารละลาย.....	38
3.5 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	38
3.6 การหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	39
บทที่ 4	41
ผลการทดลอง	41
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	41
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM).....	42
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET Surface Area (BET)	44
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	52
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	54
4.2 ประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	55

4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	60
4.4 ผลการวิเคราะห์สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ	61
บทที่ 5	69
สรุปผลการทดลอง.....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
รายการอ้างอิง	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	109



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของ ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	47
ตารางที่ 2 โครงสร้างของรูพรุน	48
ตารางที่ 3 สรุปค่าจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir	66
ตารางที่ 4 สรุปค่าจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich.....	67
ตารางที่ 5 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ และค่า R^2 สำหรับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	67
ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ	70



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication).....	6
รูปที่ 2 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	10
รูปที่ 3 แบบที่เรียลเซลลูโลสแบบเปียก.....	11
รูปที่ 4 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	13
รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	13
รูปที่ 6 ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์.....	14
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเผา ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	18
รูปที่ 8 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเมล็ดโกโก้.....	19
รูปที่ 9 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว.....	21
รูปที่ 10 โครงสร้างผลึกแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัล (Hexagonal).....	23
รูปที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลลีนบลู.....	25
รูปที่ 12 Langmuir Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง.....	29
รูปที่ 13 กราฟ Freundlich Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง.....	31
รูปที่ 14 AC-10M-400 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	42
รูปที่ 15 AC-10M-400 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	42
รูปที่ 16 AC-10M-500 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	42
รูปที่ 17 AC-10M-500 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	42
รูปที่ 18 AC-20M-400 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	43
รูปที่ 19 AC-20M-400 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	43
รูปที่ 20 AC-20M-500 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	43
รูปที่ 21 AC-20M-500 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	43
รูปที่ 22 AC-COM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	43

รูปที่ 23 AC-COM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	43
รูปที่ 24 BET plot ของ AC-10M-400	45
รูปที่ 25 BET plot ของ AC-10M-500	45
รูปที่ 26 BET plot ของ AC-20M-400	46
รูปที่ 27 BET plot ของ AC-20M-500	46
รูปที่ 28 BET plot ของ AC-COM.....	47
รูปที่ 29 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400 ...	50
รูปที่ 30 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500 ...	50
รูปที่ 31 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400 ...	51
รูปที่ 32 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500 ...	51
รูปที่ 33 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM.....	52
รูปที่ 34 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง	53
รูปที่ 35 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า	53
รูปที่ 36 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ชนิดต่างๆ	54
รูปที่ 37 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400	56
รูปที่ 38 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500	56
รูปที่ 39 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400	57
รูปที่ 40 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500	57
รูปที่ 41 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM.....	58
รูปที่ 42 ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารละลายแอมโมเนียมไอออน	59
รูปที่ 43 ความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ชนิดต่างๆ	59
รูปที่ 44 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ...	60
รูปที่ 45 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400	61

รูปที่ 46 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400	62
รูปที่ 47 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500	62
รูปที่ 48 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500	63
รูปที่ 49 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400	63
รูปที่ 50 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400	64
รูปที่ 51 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500	64
รูปที่ 52 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500	65
รูปที่ 53 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM	65
รูปที่ 54 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM	66

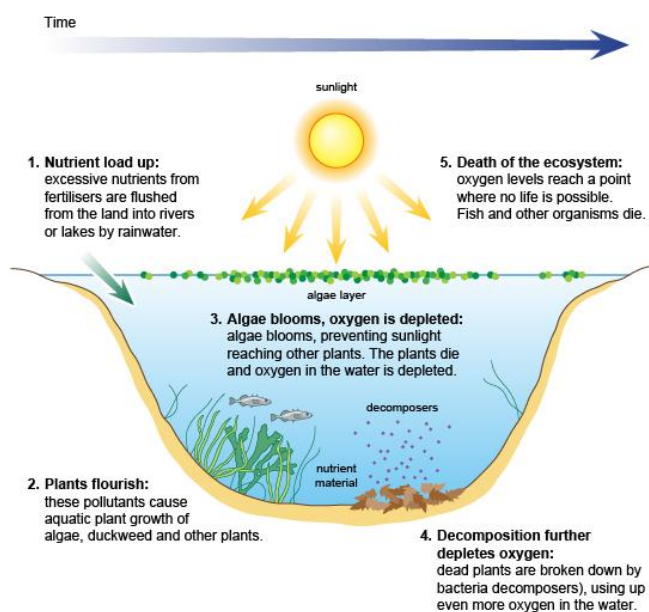
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบนิเวศแหล่งน้ำเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าและมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากเป็นแหล่งอาศัยของสัตว์น้ำ พืชน้ำ เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญต่อการอุปโภคบริโภค และยังเอื้ออำนวยประโยชน์ให้กับมนุษย์หลายด้าน เช่น เศรษฐกิจ สังคม และคุณภาพชีวิต เป็นต้น (1) แต่ในปัจจุบันระบบนิเวศแหล่งน้ำได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมสภาพของระบบนิเวศแหล่งน้ำอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ทำให้แหล่งน้ำบางแห่งไม่สามารถนำน้ำมาใช้ประโยชน์ได้

สารประกอบแอมโมเนียเป็นสารประกอบอนินทรีย์ของไนโตรเจน เป็นสารมลพิษที่ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำ ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียจากครัวเรือนลงสู่แหล่งน้ำ (2) สารประกอบแอมโมเนียมี 2 รูปแบบที่สำคัญ ได้แก่ แอมโมเนียอิสระ (NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) โดยปริมาณแอมโมเนียทั้งสองรูปแบบขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย (3) กล่าวคือเมื่อ pH ของสารละลายสูง ปริมาณแอมโมเนียจะมาก แต่โดยปกติน้ำมักมี pH เป็นกลาง ทำให้แอมโมเนียอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนเป็นส่วนใหญ่ โดยแอมโมเนียมไอออนนี้เป็นสารอาหารที่สำคัญและจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชและพืชน้ำ ดังนั้นเมื่อปริมาณแอมโมเนียมไอออนในน้ำสูงขึ้น การเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชและพืชน้ำเหล่านี้ก็จะสูง และแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ช่วงเวลากลางวันจะมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่าความเข้มข้นสูงสุด แต่ในตอนกลางคืนระดับออกซิเจนจะลดลง และบางแห่งอาจลดลงถึงศูนย์ ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น และอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้ นอกจากนี้แอมโมเนียมไอออนยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หากได้รับเข้าสู่ร่างกาย เช่น การรับประทานน้ำดื่มที่มีแอมโมเนียมไอออนปนเปื้อนสามารถทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียน ปวดท้องรุนแรง เจ็บหน้าอก และอาจจะชักจนถึงตายได้ หากสัมผัสกับผิวหนังหรือดวงตาจะทำให้เกิดการระคายเคือง และหากหายใจเข้าไปสามารถทำให้เกิดพิษต่อระบบหายใจได้ ในหลายปีที่ผ่านมาพบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนในน้ำมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดไว้มาก จึงได้มีการตระหนักถึงอันตรายของแอมโมเนียมไอออนเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากประเทศต่างๆมีการกำหนดมาตรฐานการปล่อยแอมโมเนียมลงสู่แหล่งน้ำ เช่น ประเทศจีน เป็นต้น



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) (4)

ดังนั้นการพิจารณาหาแนวทางสำหรับการกำจัดแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำหรือน้ำทิ้งเป็นสิ่งจำเป็นและควรปฏิบัติอย่างเร่งด่วน เพื่อลดปริมาณแอมโมเนียมไอออนในระบบนิเวศแหล่งน้ำให้เหลือน้อยที่สุด (5, 6) โดยมีการศึกษาและพัฒนาหลากหลายวิธี เพื่อให้ได้การกำจัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้คุณภาพน้ำตามที่ต้องการ เช่น Electrochemical technology (7), Chemical precipitation (8), air stripping, break-point chlorination, Ion Exchange (9, 10), Biological treatment (11, 12), nitrification-denitrification, Membrane distillation (13), reverse osmosis (14), Forward osmosis (15) และ Adsorption (16, 17) โดยกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมานี้มีทั้งข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เช่น วิธี Ion exchange มีข้อจำกัดสำหรับของเสียที่มีปริมาณน้อย เพราะแอมโมเนียมไอออนจะต้องถูกแลกเปลี่ยนด้วยไอออนชนิดอื่นในน้ำที่มีวาเลนซ์ของไอออนสูง และมีต้นทุนในการดำเนินการค่อนข้างสูง วิธี biological filter เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไอออน แต่อย่างไรก็ตามต้นทุนในการดำเนินการยังคงสูง มีความเสี่ยงเกี่ยวกับความปลอดภัย อีกทั้งอุณหภูมิและสภาพอากาศก็ยังมีผลต่อการดำเนินการอีกด้วย ซึ่งถือว่าเป็นข้อเสียสำหรับกระบวนการนี้ (18-20) ส่วนวิธี Biological treatment ต้องใช้ retention time สูง และทำให้เกิดกากตะกอนปริมาณมาก

การดูดซับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้สำหรับกำจัดแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง ดำเนินการได้ง่าย มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำ และไม่มีกากตะกอนเกิดขึ้น (21) จึงได้มีการศึกษา ค้นคว้า และพัฒนาตัวดูดซับหลากหลายชนิดเพื่อกำจัดแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำและน้ำเสีย เช่น Zeolite (22), loose-pore geothermal reservoir (23), Fe_3O_4

nanoparticles (24), graphene laminate electrodes (25) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (26) เนื่องจากตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมาก ขนาดเล็ก และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง

ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon หรือ activated charcoal) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น สารเซลลูโลสที่มาจากพืชจำพวก แกลบ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชี้อ้อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด สารเซลลูโลสที่มาจากถ่านหินจำพวก ลิกไนต์ (lignite) พีท (peat) บิทูมินัส (bituminous) และสารเซลลูโลสที่มาจากสัตว์ เช่น เลือด กระดุก เป็นต้น มาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (activation process) ภายใต้การควบคุมความดันและอุณหภูมิ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือกระตุ้นให้ถ่านมีพื้นที่ผิวมากขึ้น นอกจากนี้การกระตุ้นอาจใช้สารที่มีคุณสมบัติดูดน้ำ (dehydrating agent) ร่วมด้วย เช่น สังกะสีคลอไรด์ (zinc chloride) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น จนได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีดำ ที่เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี จึงทำให้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีความสำคัญมากในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การทำแก๊สให้บริสุทธิ์ (27) การกำจัดโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสีย (28) การกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำ (29) และการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาต่างๆ (30) เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่าแบคทีเรียเซลลูโลสเป็นอีกหนึ่งวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมอย่างมากสำหรับนำไปทำเป็นตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีความบริสุทธิ์ ความแข็งแรง ความเป็นผลึก และความยืดหยุ่นสูง มีลักษณะพิเศษในการอุ้มน้ำและดูดความชื้น มีสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ นอกจากนี้วัตถุดิบยังมีราคาถูกและหาง่ายอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารแอมโมเนียในไอออนออกจากสารละลายน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1. เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลส และคุณลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารแอมโมเนียในไอออนออกจากสารละลายน้ำด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่พัฒนาจากแบคทีเรียเซลลูโลส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้สำหรับผลิตคาร์บอนกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ คือ แבקทีเรียลเซลลูโลส
2. สารกระตุ้นสำหรับคาร์บอนกัมมันต์ คือ สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส
4. คาร์บอนกัมมันต์จะได้รับการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อคาร์บอนกัมมันต์เป็น 3:1 หลังจากนั้นนำไปทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส
5. ศึกษาคุณลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เทคนิค BET surface area (BET) เทคนิค Fourier transforms infrared (FTIR) spectroscopy และเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)
6. ศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับด้วยสารละลายแอมโมเนียมไอออนที่ความเข้มข้น 60 120 240 และ 360 ppm ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีการดูดซับ
2. ทราบถึงคุณลักษณะและคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่พัฒนาจากแบคทีเรียลเซลลูโลส
3. ทราบถึงกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์และสามารถพัฒนาคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียลเซลลูโลสสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ได้
4. ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารแอมโมเนียมไอออนด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่พัฒนาจากแบคทีเรียลเซลลูโลสออกจากสารละลายน้ำ
5. สามารถนำข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับสารแอมโมเนียมไอออนด้วยตัวดูดซับโลหะที่เตรียมจากคาร์บอนกัมมันต์ของแบคทีเรียลเซลลูโลสไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการผลิตคาร์บอนกัมมันต์และปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์
3. ออกแบบและวางแผนการทดลอง
4. เตรียมอุปกรณ์และสารเคมี

5. ผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่พัฒนาจากแบคทีเรียเซลลูโลส
6. วิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์
7. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำที่สภาวะต่างๆ
8. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง
9. สรุปผลการทดลองและเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

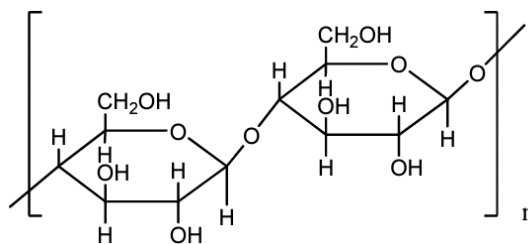


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส (cellulose) เป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืชชั้นสูงทุกชนิด และเป็นสารประกอบอินทรีย์คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) หรือประเภทโฮมโพลิแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรง ที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆกันของน้ำตาลกลูโคส (glucose) โดยสายโมเลกุลต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ยาวมาก มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและภายในโมเลกุลยึดติดกันแน่น ทำให้มีความเป็นผลึกสูง จึงทำปฏิกิริยากับสารต่างๆได้ช้า ทนต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ กรด และเบสที่เจือจาง และยังพบว่าความต้านทานแรงดึงขาด ค่าความยืดหยุ่น และอุณหภูมิการหลอมตัวสูงมากเช่นกัน อีกทั้งไม่ละลายในน้ำ เซลลูโลสสามารถหาได้ง่ายตามธรรมชาติ มีปริมาณมาก และสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เรื่อยๆ อีกทั้งยังสามารถพบได้ในผนังเซลล์ของรา (mold) และสามารถสร้างได้จากแบคทีเรีย เช่น *Acetobacter xylinum* ในวุ้นมะพร้าว (NATA de coco) มีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ จึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อเป็นการลดต้นทุนสำหรับกระบวนการต่างๆ



รูปที่ 2 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส (31)

2.2 แบคทีเรียลเซลลูโลส (Bacterial Cellulose)

แบคทีเรียลเซลลูโลส (bacterial cellulose) เป็นชีววัสดุธรรมชาติที่รู้จักกันในชื่อ Nata de Coco หรือวุ้นมะพร้าว ผลิตจากแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* (*Gluconacetobacter xylinus*) โครงสร้างประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เรียกว่าไมโครไฟบริลซึ่งประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสประมาณ 2,000-18,000 หน่วย มีเส้นใยขนาดเล็กมากเชื่อมกันเป็นร่างแห มีลักษณะใสและมีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีการเจือปนของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพกตินเหมือนเซลลูโลสที่ได้จากพืช มีความเป็นผลึก ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และทนต่อแรงดึงได้สูง โดยมีค่า Young's modulus ประมาณ 30,000

เมกกะปาสคาล ซึ่งมากกว่าไฟเบอร์อินทรีย์ประมาณ 4 เท่าและมากกว่าพอลิเอทิลีนและไวนิลคลอไรด์ประมาณ 5 เท่า มีลักษณะพิเศษในการอุ้มน้ำและดูดความชื้น เนื่องจากเส้นใยมีความเป็น Hydrophilic สูง จึงสามารถอุ้มน้ำได้ประมาณ 60 - 700 เท่าของน้ำหนักแห้ง และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

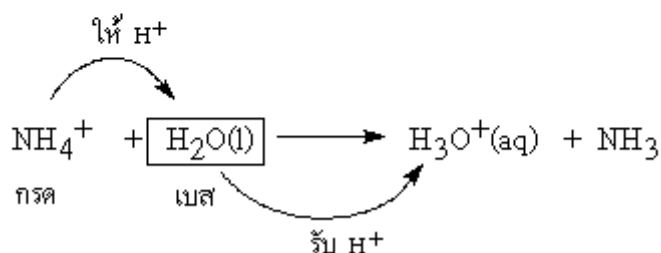
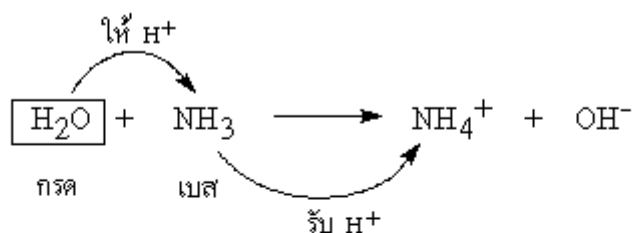


รูปที่ 3 แบริลที่เรียลเซลลูโลสแบบเปียก

ปัจจุบันมีการนำแบริลที่เรียลเซลลูโลสไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยเทคโนโลยีและเทคนิคจำเพาะในการดัดแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมี ทั้งยังมีการวิจัยเพิ่มเติมในระดับอุตสาหกรรมเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของผู้บริโภค เช่น นำแบริลที่เรียลเซลลูโลสลงไปผสมกับพินอลเรซินหรือเส้นใยคาร์บอนเพื่อช่วยให้เส้นใยดังกล่าวขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ง่ายขึ้น นำแบริลที่เรียลเซลลูโลสไปเป็นส่วนผสมร่วมกับซีทีไฟเบอร์คาร์บอนกัมมันต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารพิษ นำไปใช้ทำเป็นส่วนประกอบในการผลิตกระดาษชนิดพิเศษเนื่องจากมีความคงทนและโค้งงอได้ เป็นต้น และเนื่องจากแบริลที่เรียลเซลลูโลสมีความเหนียวแม้อยู่ในสภาพเปียกและไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อร่างกาย จึงมักจะถูกนำไปใช้เป็นชีววัสดุทางการแพทย์และเภสัชกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น นำแบริลที่เรียลเซลลูโลสไปทำเป็นผิวหนังชั่วคราวสำหรับการรักษาทางการแพทย์ นำไปทำเยื่อแผ่นสำหรับฟอกเลือดให้กับผู้ป่วยโรคไต เป็นต้น นอกจากนี้แบริลที่เรียลเซลลูโลสยังสามารถนำไปทำตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์สำหรับใช้ดูดซับได้อีกด้วย ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพได้ตามที่ต้องการ

2.3 แอมโมเนียมไอออน (Amminium ion)

แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เป็นอีกรูปหนึ่งของแอมโมเนียที่อยู่ในสารละลายน้ำ โดยขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย เป็นสารประกอบอนินทรีย์ของไนโตรเจน ซึ่งประกอบด้วยธาตุไนโตรเจนและไฮโดรเจน โดยมีสูตรทางเคมีคือ NH_4^+ เกิดจากแอมโมเนียละลายในน้ำ โดยแอมโมเนียมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone electron pair) ในอะตอมของไนโตรเจน จึงมีฤทธิ์เป็นเบสในสารละลายน้ำ (aqueous solution) ที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง ดังสมการ



แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารมลพิษที่ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำ ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียจากครัวเรือนลงสู่แหล่งน้ำและเป็นสาเหตุที่สำคัญของการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน โดยปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำที่มีปริมาณธาตุอาหารจำพวกสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน (รวมถึงแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์) ซึ่งธาตุอาหารเหล่านี้จำเป็นต่อการเจริญเติบโตสำหรับพืชน้ำจืดเป็นแหล่งอาหารชั้นต้นของห่วงโซ่อาหาร ซึ่งธาตุอาหารเหล่านี้ก็จะไปกระตุ้นให้พืชสีเขียวในลำน้ำมีการสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น และเจริญเติบโตแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางระบบนิเวศทางน้ำขึ้น โดยปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะสูงเกินกว่าขีดความเข้มข้นสูงสุด แต่ในตอนกลางคืนระดับออกซิเจนจะลดลง โดยสภาวะยูโทรฟิเคชันมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมดังนี้

1. ทำให้ความเป็นกรด-ด่างและออกซิเจนที่ละลายน้ำในเวลากลางวันมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับปกติ
2. เพิ่มการผันแปรของความเป็นกรด-ด่างและออกซิเจนที่ละลายน้ำในรอบวัน
3. ลดความสามารถในการสิ่งผ่านของแสงลงไปใต้น้ำ
4. เป็นสาเหตุการตายของปลา
5. เพิ่มจำนวนพืชน้ำอย่างรวดเร็ว

2.4 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon)

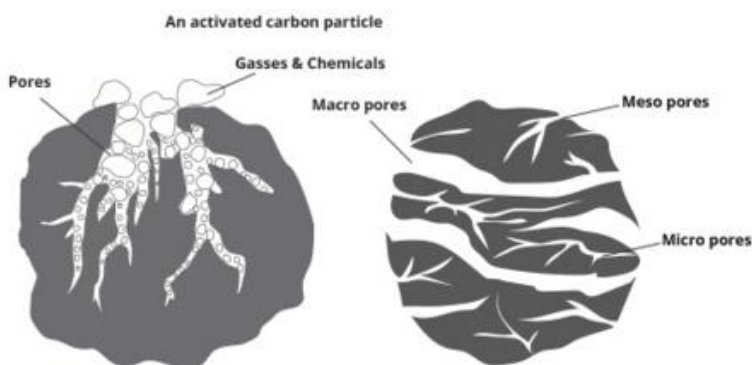
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ คือ ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) เป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ ซึ่งหากดูที่พื้นที่หน้าตัดจะมีลักษณะคล้ายรังผึ้งเนื่องจากมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยทั่วไปมักจะทำจากวัตถุดิบตามธรรมชาติที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่สูงถึง 87 – 90 % โดยกระบวนการก่อกัมมันต์และกระบวนการกระตุ้น



รูปที่ 4 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (32)

ซึ่งจะทำให้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีความพรุนมากขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน มีพื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าสารชนิดอื่นที่มีน้ำหนักเท่ากัน และมีประสิทธิภาพในการดูดซับค่อนข้างสูง จึงเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งสามารถแบ่งขนาดโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ได้ดังนี้

1. โครงสร้างรูพรุนแบบแมโครพอร์ (macropores) คือ โครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดรัศมีมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 – 2,000 อังสตรอม มีพื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมโครพอร์จึงเป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่าเท่านั้น
2. โครงสร้างรูพรุนแบบมีโซพอร์ (mesopores) คือ โครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15 – 2,000 อังสตรอม มีพื้นที่ผิวประมาณ 20 – 100 ตารางเมตร/กรัม เช่น ซิลิกาเจล (silica gels) อะลูมินาเจล (alumina gels) เป็นต้น
3. โครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์ (micropores) คือ โครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดรัศมีน้อยกว่า 15 – 16 อังสตรอม มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,500 ตารางเมตร/กรัม มีความสำคัญมากที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด เช่น ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นต้น



รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (33)

2.4.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์นั้นจะต้องมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่สูง ซึ่งวัตถุดิบนั้นอาจเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ หรือได้จากการสังเคราะห์ เช่น กะลามะพร้าว ชานอ้อย กะลาปาล์ม ไม้ไผ่ หรือถ่านหินประเภทลิกต์ไนต์ เป็นต้น ในปัจจุบันมีการนำของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากหาได้ง่าย และมีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามปัญหาในการนำของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ คือวัตถุดิบมีคุณสมบัติไม่คงที่ วัตถุดิบที่นำมาผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์นอกจากจะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงแล้ว ควรจะต้องมีปริมาณสารระเหยต่ำ ปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ ปริมาณเถ้าต่ำ และต้องมีคุณสมบัติคงที่อีกด้วย



รูปที่ 6 ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (34)

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเรื่องเกี่ยวกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์หลากหลายประเภท โดยมีการควบคุมการดำเนินการที่สภาวะต่าง ๆ กัน ดังงานวิจัยดังต่อไปนี้

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

เมื่อปี 1998 โดย Lua และ Guo ได้ศึกษาผลของสภาวะของการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกะลาปาล์ม และอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่แตกต่างกันในการทำไพโรไลซิส เช่น ขนาดเริ่มต้นของวัสดุ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ และเวลาในการทำไพโรไลซิส โดยถ่านชาร์ที่ได้นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการไพโรไลซิส ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถหาพื้นที่ผิว BET พื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก และการกระจายขนาดของรูพรุน ได้จากพื้นที่ผิวที่ถูกกระตุ้นและรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยการไพโรไลซิสนั้นทำโดยนำเส้นใยปาล์มประมาณ 15 กรัม มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 550 650 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ภายใต้การไหลของไนโตรเจนเป็นเวลา 0.5 1.5 2.5 3.5 และ 4.5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5-20 องศาเซลเซียส/นาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 100-250

มิลลิลิตร/นาที โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำไพโรไลซิส คือใช้วัสดุดิบขนาด 0.5-1 มิลลิลิตร อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตร/นาที เนื่องจากทำให้ได้พื้นที่ผิว BET มากที่สุดคือ 521 ตารางเมตร/กรัม (35)

เมื่อปี 2000 โดย Hayashi และคณะ ได้ศึกษาผลของสภาวะของการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากลิกนิน ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และองค์ประกอบของโลหะแอลคาไลน์ พบว่าการคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) จะทำให้ได้พื้นที่ผิวมากที่สุด และมีขนาดใกล้เคียงกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ในเชิงการค้ามาก (36)

เมื่อปี 2007 โดย Azevendo และคณะ ได้ศึกษาผลของสภาวะของการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ตามด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ ผลที่ได้คือมีพื้นที่ผิวสูงสุดคือ 2,114 ตารางเมตร/กรัม ปริมาตรรูรวมทั้งหมดคือ 1.307 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม และปริมาตรรูแบบ micro คือ 1.142 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม (37)

เมื่อปี 2009 โดย A.H. Basta และคณะ ได้ศึกษาผลของสภาวะของการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากฟางข้าว ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมี 2 ขั้นตอนโดยใช้สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของการ pre-treatment จำนวนของขั้น และคุณสมบัติในการดูดซับที่อุณหภูมิกว่า 800 องศาเซลเซียส ผลที่ได้คือการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 ขั้นตอน สามารถผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงมากประมาณ 1,917 ตารางเมตร/กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงกว่าการกระตุ้นเพียง 1 ขั้นตอนด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ช่วยเพิ่มค่า yield ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ มีปริมาณเถ้าปานกลางประมาณ 8-14% และมีปริมาตรรูแบบ meso เท่ากับ 0.21 ตารางเซนติเมตร/กรัม (38)

เมื่อปี 2010 โดย Lamia Khenniche and Farida Benissad-Aissani ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกากกาแฟ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โดยศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ใช้ในการกระตุ้นพบว่า ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่ความเข้มข้น 25% โดยน้ำหนัก สามารถทำให้ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูรวมมากที่สุด เท่ากับ 520 ตารางเมตร/กรัม และ 0.28 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ (39)

เมื่อปี 2012 โดย Murat Kilic และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ จากดอก Euphorbia rigida ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสาร $ZnCl_2$, K_2CO_3 , $NaOH$ และ H_3PO_4 ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ 25 50 75 และ 100% โดยน้ำหนักของชีวมวล โดยกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสด้วยแก๊สใน fixed bed reactor เพื่อศึกษาหาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบของ C, H, N และ O โดยใช้ FT-IR และใช้สมการของ BET คำนวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ และใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งทำให้ได้ Maximum BET surface area เท่ากับ 2613 ตารางเมตร/กรัม โดยใช้ 75% ของ K_2CO_3 การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าชนิดของสารกระตุ้นและอัตราส่วนมีความสำคัญต่อโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (40)

เมื่อปี 2013 โดย Qingqing Miao และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเมล็ดถั่วเหลือง ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสาร $ZnCl_2$ และศึกษารูปร่างของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์โดยใช้เครื่อง scanning electron microscopy (SEM) ทำการทดลองดูดซับสารไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน เพื่อหาโครงสร้างรูพรุนของเมล็ดถั่วเหลือง ทำให้ได้พื้นที่ผิวสูงสุดที่ 2271 ตารางเมตร/กรัม วิเคราะห์การกระจายรูโดยใช้ BJH ระหว่าง 1.73 และ 3.95 นาโนเมตร. ค่าการดูดซับพินอลสูงสุดคือ 278 มิลลิกรัม/กรัม พบว่าค่า RL ต่ำกว่า 1.0 บ่งบอกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์สามารถดูดซับพินอลได้ดี (41)

เมื่อปี 2013 โดย Abdessalem Omri และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกอัลมอนต์ในการดูดซับ $Ag(I)$ ได้ค่าพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูพรุนรวม และปริมาตรรูพรุนแบบ mesopore ได้ 893.62 ตารางเมตร/กรัม 0.472 และ 0.293 ตารางเซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับคือความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ag (170–680 มิลลิกรัม/ลิตร) pH (2–12) เวลาในการทำปฏิกิริยา (10–180 นาที) และอุณหภูมิ (298–308 K) ประสิทธิภาพการดูดซับจะมีค่าสูงสุดที่เวลา 60 นาที pH 4.5 (42)

เมื่อปี 2016 โดย M. Al Bahri และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเมล็ดองุ่น ซึ่งสามารถเตรียมได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่ 600 องศาเซลเซียส กระตุ้นทางกายภาพด้วยสาร CO_2 (750-900 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง เผาที่ 25-74% คาร์บอน ปริมาณถ่านเพิ่มขึ้นระหว่างการกระตุ้น จนกระทั่งเหลือ 79.0 และ 11.4% ตามลำดับ ทำให้ได้พื้นที่ผิว BET ระหว่าง 380-714 ตารางเมตร/กรัม โดยศึกษาที่ช่วงอุณหภูมิ 15-45 องศาเซลเซียส ข้อมูลเมื่อเข้าสู่สมดุลแสดงให้เห็นว่าค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจาก 120 ถึง 470 ไมโครโมล/กรัม (43)

2.4.3 กระบวนการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่

2.4.3.1 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

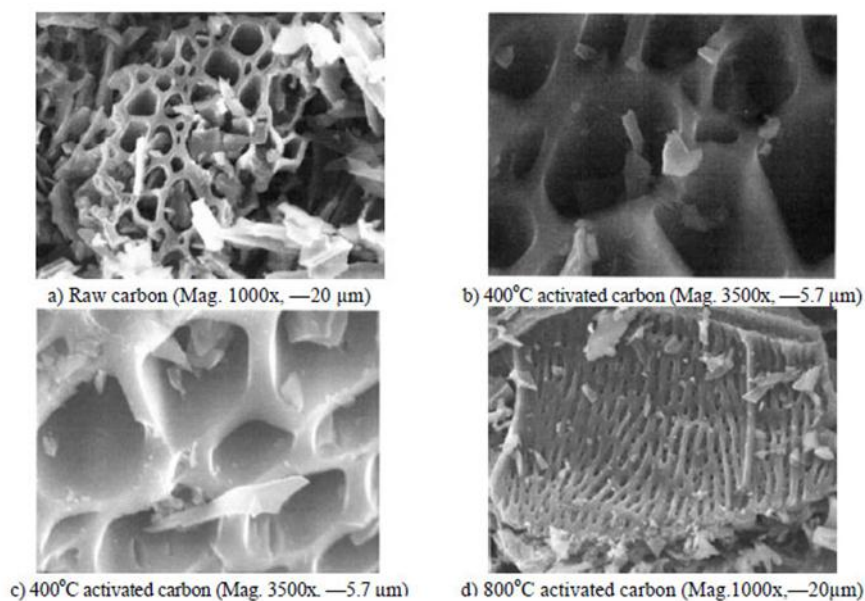
เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เนื่องจากจะมีการเริ่มสร้างรูพรุนในขั้นตอนนี้ โดยเป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (pyrolysis) กล่าวคือจะเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ทำให้องค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนและสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ ถูกกำจัดออกจากโครงสร้างในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ ทำให้ได้ถ่านคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท ได้แก่

1. ถ่านสีดำ เรียกว่า ชาร์ (char) เป็นถ่านคาร์บอนที่มีลักษณะสีดำตลอด เมื่อหักดูจะมีผิวมันเงา มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ และมีรูพรุนระหว่างผลึก
2. ของเหลว เรียกว่า ทาร์ (tar) ซึ่งได้จากการกำจัดธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนออก
3. แก๊ส (gas) ได้จากการกำจัดสารระเหยต่างๆออก เช่น ไฮโดรเจน เป็นต้น

โดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือ

อัตราความร้อน เมื่อเพิ่มอัตราความร้อนอย่างรวดเร็ว ปริมาณสารระเหยจะถูกกำจัดออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ และยังมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเท่าไร คาร์บอนก็จะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยลงเท่านั้น ทำให้สารกระตุ้นสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

อุณหภูมิ เป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบ ทำให้การจัดเรียงตัวของคาร์บอนเปลี่ยนไป และทำให้น้ำมันทาร์มีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนไป



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (44)

ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium) ตัวกลางที่เป็นแก๊สจากการเผาไหม้จะทำให้ได้ถ่านปริมาณน้อย แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่าตัวกลางแก๊สไนโตรเจน

ธรรมชาติของวัตถุดิบ ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ต่างกันมีวิธีการกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุดเหมาะแก่การนำไปใช้งานในระบบที่เหมาะสมต่อไป

ถ่านคาร์บอนที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันนี้ มีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เพราะยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านคาร์บอนไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับต่อไป

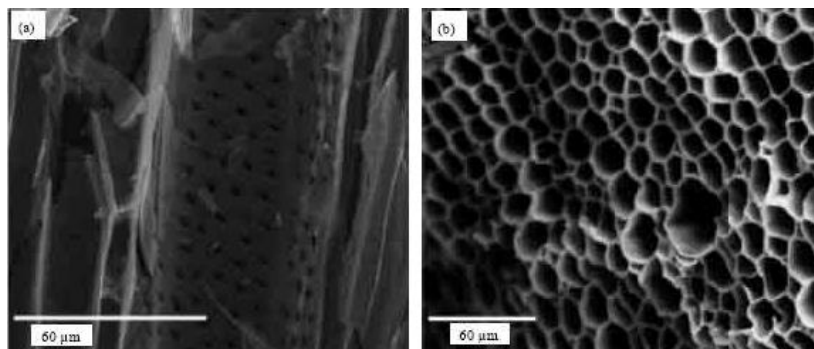
2.4.3.2 กระบวนการกระตุ้น (Activation)

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของคาร์บอน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวหรือรูพรุนให้มากขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ

คือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เพื่อให้รูพรุนเพิ่มขึ้นและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น จัดเรียงโครงสร้างใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยสารที่ใช้ในการกระตุ้นเรียกว่า แก๊สออกซิไดซ์ (oxidizing gas) เช่น ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้

คือไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ แต่ข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบของวัสดุ คคุณสมบัติทางเคมี อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิของปฏิกิริยา และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา เช่น การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ดังสมการ



รูปที่ 8 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเมล็ดโกโก้ก่อนการกระตุ้น

(a) และหลังกระตุ้นด้วย CO_2 (b) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (45)

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเรื่องเกี่ยวกับการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากวัสดุประเภทต่างๆ ที่ใช้วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยมีการควบคุมการดำเนินการที่สภาวะต่างๆ กัน ดังงานวิจัยดังต่อไปนี้

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ

เมื่อปี 2008 โดย Li et al. ได้ศึกษาผลของสภาวะของการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการทำคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 400 600 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำถ่านชาร์ที่ได้ประมาณ 30 กรัม ไปทำการกระตุ้นในเตาเผาโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส/นาที และใช้ไอน้ำกระตุ้นด้วยอัตราการไหล 1.35 กรัม/นาที พบว่าสมบัติความพรุน พื้นที่ผิว ปริมาตรรวม ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และผลผลิตของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ที่เวลาการกระตุ้น 120 นาที ซึ่งได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,926 ตารางเมตร/กรัม ส่วนปริมาตรรูพรุนรวม และรูพรุนขนาดเล็ก มีค่าเท่ากับ 1.26 และ 0.931 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ (46)

เมื่อปี 2009 โดย Guo et al. ได้ศึกษาผลของสภาวะของการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการทำคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที่ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำถ่านชาร์ที่ได้ประมาณ 30 กรัม ไปทำการกระตุ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 800 850 900 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 180 240 300 และ 360 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส/นาที่ โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กระตุ้นด้วยอัตราการไหล 200 400 600 800 และ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที่ พบว่าอุณหภูมิ เวลาในการกระตุ้น และอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และผลผลิตของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ดังนี้ (1) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นให้สูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลางมากขึ้น (2) เมื่อเพิ่มเวลาการกระตุ้นให้นานขึ้น จะส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางมากขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะทำให้รูพรุนยุบตัว (3) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้สูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิวกระตุ้นมากขึ้น และทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินไปจะส่งผลให้รูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบมาก ผลที่ได้คือมีพื้นที่ผิวสูงสุด 1,700 ตารางเมตร/กรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 1.135 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม และปริมาตรรูพรุนแบบ micro มีค่า 0.882 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม (47)

เมื่อปี 2010 โดย Kang Sun et al. ได้ศึกษาผลของสภาวะของการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดยาง ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางกายภาพศึกษาโดยการนำไปดูดซับไนโตรเจนแล้วใช้เครื่อง Scanning electron microscope เครื่อง Thermo-gravimetric และเครื่อง Differential scanning calorimetric ผลการทดลองทำให้ทราบว่าเราสามารถใช้อุณหภูมิการทำเปลือกเมล็ดยางมาเป็นตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ได้ดี โดยสภาวะที่ดีที่สุดคืออุณหภูมิ 880 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไอน้ำ 6 กิโลกรัม/ชั่วโมง เป็นเวลา 60 นาที ได้ค่า yield สูง (30.5%) คือพื้นที่ผิวจำเพาะ (SBET) 948 ตารางเมตร/กรัม ปริมาตรรวม 0.988 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม ค่า iodine number 1.326 กรัม/กรัม ปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ 265 มิลลิกรัม/กรัม ค่าความแข็ง 94.7% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเปลือกเมล็ดยางเป็นแหล่งผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงด้วยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ (48)

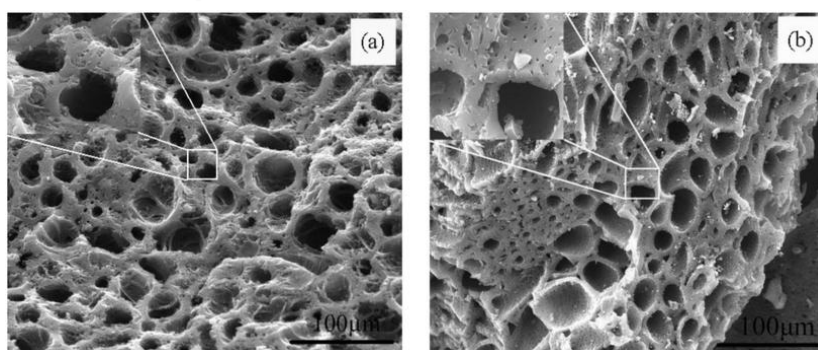
เมื่อปี 2010 โดย J.M. Rosas et al. ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกส้ม ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยเปลี่ยนแปลงวิธีการทดลองและเงื่อนไขในการกระตุ้นให้แตกต่างกันออกไป ผลที่ทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิว BET สูงที่สุด คือ 1,185 ตารางเมตร/กรัม ปริมาตรรูคือ 0.41

ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม. ขั้นตอนที่เหมาะสมที่สุดคือการคาร์บอนในเซชันของเปลือกผลไม้, บำบัดทางอุณหภูมิจึงล้างด้วยกรด (SC-GTW) (49)

เมื่อปี 2013 โดย Kaifang Fu และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเส้นใยลิกนิน Black liquor ที่ได้จากโรงงานทำเยื่อกระดาษ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการการคาร์บอนไนเซชันที่อับอากาศ แล้วกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ จากนั้นจึงทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ได้แก่ อุณหภูมิการเผา อุณหภูมิการกระตุ้น และระยะเวลาในการกระตุ้น แล้วจึงนำถ่านที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เครื่อง FTIR และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาคือ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที และที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 725 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 40 นาที ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับที่สามารถทำได้สูงที่สุดคือ 92.51 มิลลิกรัม/กรัม (50)

3. กระบวนการกระตุ้นทางเคมี

เป็นการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยทำปฏิกิริยากับสารเคมี สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นเป็นสารประเภทอัลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอนเนต สารประเภทเบส และกรดบางชนิด เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอนเนต (K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ร่วมกับการให้อุณหภูมิกระตุ้นในช่วง 500-900 องศาเซลเซียส ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่ข้อเสียคือมีสารตกค้างในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์



รูปที่ 9 ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวก่อนการกระตุ้น (ซ้าย) และหลังกระตุ้นด้วย KOH (ขวา) (51)

หรืออีกหนึ่งตัวอย่างสำหรับการกระตุ้นทางเคมี เช่น การใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น จะใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำคือประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส และยังสามารถนำไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยยังได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งการผลิตตัวดูด

ซัลคาร์บอนกัมมันต์จากวัตถุดิบที่เป็นไม้สามารถใช้วิธีนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ผ่านมามีการศึกษาเรื่องเกี่ยวกับการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากวัตถุดิบประเภทต่างๆ ซึ่งใช้สารเคมีหลากหลายประเภทสำหรับกระตุ้น โดยมีการควบคุมการดำเนินการที่สภาวะต่างๆกัน ดังงานวิจัยต่อไปนี้

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

เมื่อปี 2007 โดย V.Fierro และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเส้นใยลิกนิน ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยเตรียมที่สภาวะแตกต่างกัน คือการกระตุ้นที่อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยมวลของไฮดรอกไซด์ต่อเส้นใยลิกนิน ระยะเวลาการกระตุ้น อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย และอัตราการให้ความร้อนที่ต่างกัน แล้วหาค่าพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรวมของรูพรุนแบบ micro และ meso ความกว้างของรูเฉลี่ย ความหนาแน่น และค่า yield ของคาร์บอน เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งทำให้ทราบว่า KOH ทำให้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกิดรูพรุนมากที่สุด มีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนสูงกว่า NaOH 1.5 และ 1.2 เท่า (52)

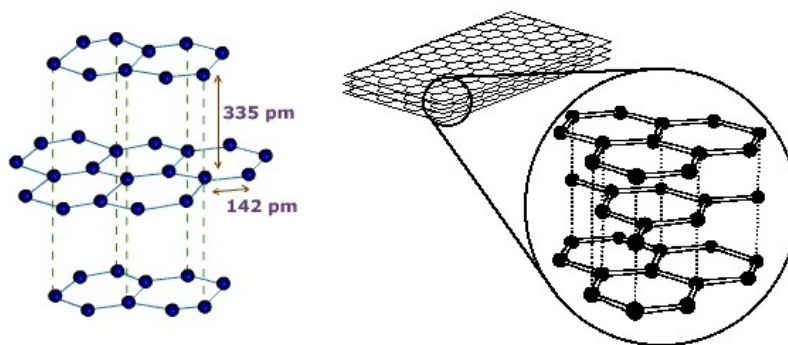
เมื่อปี 2011 โดย Yandan Chen et al. ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกมังคุด ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โดยเปลี่ยนแปลงวิธีการทดลองและอัตราส่วนของสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ต่อถ่านชาร์ (Char) ให้แตกต่างกันออกไป ซึ่งเงื่อนไขของการทดลองที่ทำให้ได้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 1,123 ตารางเมตร/กรัม คือเงื่อนไขที่ให้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลาการกระตุ้น 2 ชั่วโมง และใช้อัตราส่วนของสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ต่อถ่านชาร์ (Char) เป็น 1.0 (53)

เมื่อปี 2013 โดย Yuan Gao และคณะ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีต้นทุนต่ำ แต่มีพื้นที่ผิวสูงจากจากเส้นใยลิกนิน Black liquor (BL) ของกระบวนการทำกระดาษ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ก่อนที่จะเข้ากระบวนการเผา จากนั้นทำการศึกษาตัวแปร อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น แล้วศึกษาพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (BET) และเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transformed Infrared spectroscopy (FTIR) และเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TA) เพื่อศึกษาสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ พบว่าโครงสร้างของพื้นผิวหลังจากการทดลองที่มีรูพรุนมากที่สุดถึง 2,943 ตารางเมตร/กรัม โดยอัตราส่วนของเส้นใยลิกนินต่อสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้ได้พื้นที่ผิว

ของการดูดซับสูงสุด คืออัตราส่วน 3:1 ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง (54)

2.4.4 ลักษณะและโครงสร้างของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

หลังจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน อะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนจะถูกกำจัดออกในรูปของของเหลว ที่เรียกว่า ทาร์ (tar) และในรูปของแก๊ส (gas) ส่วนอะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆโดยมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับแกรไฟต์แต่ไม่สมบูรณ์ ในลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นระนาบในรูปของวงเบนซีน (benzene ring) อย่างไม่เป็นระเบียบ ที่เรียกว่าชั้นแกรไฟน์ (grapheme layer) และเมื่อล้างทาร์และสารต่างๆออก จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้น โดยช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นโครงสร้างพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ที่ทำให้ผิวหน้าของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารได้มากกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีนี้



รูปที่ 10 โครงสร้างผลึกแกรไฟต์แบบเฮกซะโกนัล (Hexagonal) (55)

2.4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

ในการนำตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องพิจารณาเลือกชนิดของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในแต่ละประเภท ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ดังต่อไปนี้

2.4.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

1. ความหนาแน่น (Density) คือการหาน้ำหนักของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร โดยปริมาตรนั้น หมายถึง ปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาค ปริมาตรของรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ และปริมาตรของเนื้อตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ดังนั้นค่านี้จึงขึ้นกับขนาดและความพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีความหนาแน่น

เชิงปริมาตรต่ำจะมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความชื้นอีกด้วย โดยอนุภาคที่มีค่าความชื้นสูงจะมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง

2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) คือค่ามาตรฐานที่นิยมใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการของบีอีที (BET) ซึ่งใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สดูดซับ และใช้เครื่องทดสอบพื้นที่ผิวเป็นเครื่องวิเคราะห์

3. ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) เป็นการหาปริมาณสารระเหยที่อยู่ในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.1 นาโนเมตร จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950±25 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 7 นาที ค่าของปริมาณสารระเหยคือมวลที่หายไปจากการให้ความร้อนที่สภาวะดังกล่าว

4. ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เป็นการหาปริมาณน้ำในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยบดตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณปริมาณความชื้นได้จากน้ำหนักที่หายไป

5. ปริมาณเถ้า (Ash) เป็นการหาปริมาณเถ้าในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง และระยะเวลาสั้น ทำให้ได้ปริมาณเถ้ามากขึ้น โดยเถ้าประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกอน นอกจากนี้จะเป็นสารประกอบพวกซิลเฟต คาร์บอนเนต สารประกอบอื่นๆของเหล็ก และโลหะอื่นๆ

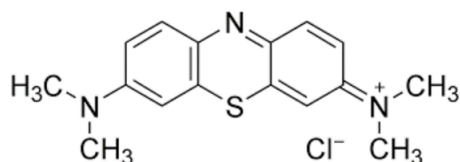
2.4.5.2 คุณสมบัติทางเคมี

1. กลุ่มฟังก์ชันบนผิวตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (Functional Group) คือการหาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เนื่องจากการนำตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต้องคำนึงถึงกลุ่มฟังก์ชันบนผิวตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เป็นสำคัญ

2. คุณสมบัติในการดูดซับ หาได้จากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของของเหลวบนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ประกอบไปด้วย

2.1 การดูดซับไอโอดีน การดูดซับไอโอดีนเป็นวิธีที่ง่ายในการหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยเป็นการหาปริมาณสารละลายไอโอดีน (มิลลิกรัม) ที่ถูกดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 1 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ 0.02 นอร์มัล หรือความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในช่วง 0.007 - 0.03 นอร์มัล โดยโมเลกุลของไอโอดีนมีขนาดเท่ากับ 0.54 นาโนเมตร

2.2 การดูดซับเมทิลีนบลู เป็นการดูดซับที่สามารถบอกค่าการดูดซับของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ได้ ซึ่งอยู่ในช่วงรูพรุนแบบเมโซพอร์ คือมีขนาดใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร โดยเมทิลีนบลูมีขนาดรัศมีโมเลกุลเท่ากับ 1.6 นาโนเมตร



รูปที่ 11 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู (56)

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของตัวดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Adsorbate) ให้มาเกาะติดบนพื้นผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (interaction potential energy) ระหว่างสารที่ถูกดูดซับ โดยเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ (Phase) เช่น แก๊ส-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง ของเหลว-ของเหลว ของเหลว-ของแข็ง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้ง่าย ในขณะที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะถูกดูดซับได้ยาก และปัจจัยที่สำคัญที่สามารถบอกประเภทของกระบวนการดูดซับได้ คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ที่มีทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) และแรงยึดเหนี่ยวที่ทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุล

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

จากที่ทราบมาข้างต้นแล้วว่า ปัจจัยที่สำคัญในการบอกประเภทของกระบวนการดูดซับคือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับจะเรียกว่าการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่สามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน และไม่มีการเกิดพันธะเคมี คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและสารถูกดูด

ซับ การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนนี้มีข้อดี คือทำให้เกิดการคายพลังงานความร้อนค่อนข้างน้อย เกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ทำให้สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายเช่นกัน เช่น การดูดซับของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เป็นต้น

2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น เกิดจากแรงดึงดูดแบบพันธะโคเวเลนต์ และปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ส่งผลให้เกิดพันธะเคมีที่แข็งแรง ซึ่งอาจจะเป็นการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ โดยขึ้นกับชนิดของสารถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ มีค่าพลังงานสูง เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งมีความร้อนของการดูดซับสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งหมายความว่า การกำจัดสารถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible reaction)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโมเลกุลตัวดูดซับ สารที่ถูกดูดซับ และเงื่อนไขการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ขนาดและพื้นที่ผิว

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ กล่าวคืออัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นการลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วยิ่งขึ้น ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นจะมีแปรผันโดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) กล่าวคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวและพื้นที่ภายในโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การใช้ซังข้าวโพดในการดูดซับ PCP เปรียบเทียบกับการใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับ PCP สูงกว่าซังข้าวโพด เนื่องจากโครงสร้างของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มีรูพรุนมากกว่าซังข้าวโพด เป็นต้น

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยจะสามารถดูดซับได้มากขึ้นตามขนาดและน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น เช่น ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ดูดซับกรดอินทรีย์ได้มากขึ้นตามขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลยังส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาว จะมีความสามารถละลายน้ำได้ลดลง แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนจำนวนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าสู่รูพรุนได้

2.5.2.2 คุณลักษณะทางเคมี

หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผิวโมเลกุลของตัวดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโดยตรง เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์ และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น เป็นต้น

2.5.2.3 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเป็นด่างของสารละลายที่ต่ำจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) มากกว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่สูง และค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เป็นศูนย์ (pH_{zpc}) สามารถแสดงถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (H^+) ในสารละลาย โดยมีความสัมพันธ์คือ หากค่า $pH_{sol} > pH_{zpc}$ แสดงว่าตัวดูดซับนั้นจะเกิดการแตกตัวทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับแสดงประจุลบมากกว่าประจุบวก ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับไอออนหรือโมเลกุลที่มีประจุบวกได้ ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า $pH_{sol} < pH_{zpc}$ ตัวดูดซับดังกล่าวจะไม่เกิดการแตกตัวและแลกเปลี่ยนไอออนบวก ทำให้ตัวดูดซับนั้นมีความสามารถในการดูดซับไอออนหรือโมเลกุลที่มีประจุลบได้

2.5.2.4 อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิสำหรับการดูดซับทางกายภาพจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิสำหรับการดูดซับทางเคมีจะทำให้ความสามารถในการดูดซับหรืออัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.5.2.5 ความสามารถในการละลายน้ำ

สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน เช่น สารประกอบคลอโรฟีนอลมีความสามารถละลายน้ำน้อยกว่าฟีนอลจึงทำให้มีความสามารถดูดซับที่ดีกว่า เป็นต้น

2.5.2.6 ความปั่นป่วน (Turbulence)

ความปั่นป่วนของระบบมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore Diffusion) กล่าวคือถ้าน้ำมีความปั่นป่วน

ต่ำ พิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมาก ซึ่งนับว่าเป็นอุปสรรคสำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาตัวดูดซับ ทำให้อัตราการแพร่ผ่านฟิล์มของน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าหากน้ำมีความปั่นป่วนสูง พิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นน้อย ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มของน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้ง่ายกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ดังนั้นสำหรับกรณีเช่นนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.5.2.7 ความมีขั้วของโมเลกุล (Polarity)

การเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

2.5.3 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากสถานะหนึ่งไปยังสถานะหนึ่ง โดยมีกระบวนการเกิดขึ้น แบ่งเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ (Adsorbent)

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ (Adsorbent)

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) เกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ด้วยแรงทางฟิสิกส์ หรือแรงทางเคมี หรือทั้งสองชนิด

2.5.4 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

สมการที่ใช้ในการทำนายกลไกของการดูดซับ สามารถบอกประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับได้ ซึ่งในการหาค่าประสิทธิภาพของกระบวนการ ต้องควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้มีค่าคงที่ โดยนิยมใช้ 2 วิธี คือ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm

2.5.4.1 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบง่ายที่สุด โดยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับนี้พัฒนามาจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของของแข็ง โดยมีสมมติฐานว่าพลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิว โดยการ

ดูดซับจะเกิดเมื่อไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับ และการดูดซับจะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับยึดเกาะบนผิวตัวดูดซับเพียงอย่างเดียว โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monomolecular layer คือมีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วอออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับกัน หรือชั้นของสารถูกดูดซับมีความหนาแน่นเท่ากันทั้งหมด
2. การดูดซับสารถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งที่แน่นอน ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นผิวสัมผัส ทำให้สารถูกดูดซับไม่มีผลกระทบต่อกัน
3. พื้นผิวสำหรับการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเป็นแบบ homogeneous surface
4. พลังงานของการดูดซับจะเท่ากันทุกๆพื้นที่ของตัวดูดซับ

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ

$$Q = Q_m b C_{eq} / (1 + b C_{eq})$$

$$C_{eq} / Q = (1 / Q_m b) + (C_{eq} / Q_m)$$

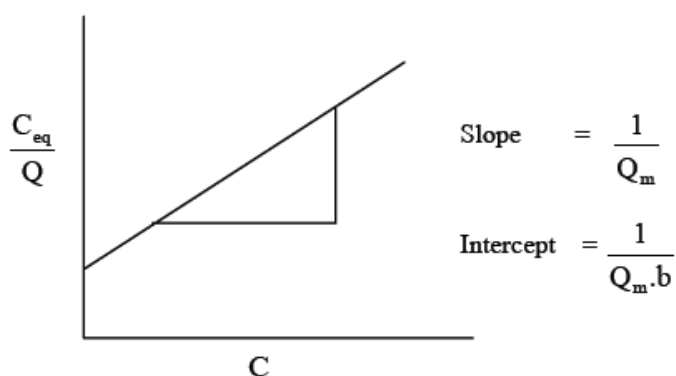
เมื่อ Q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

C_{eq} คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

Q คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

เมื่อนำสมการด้านบนไปเขียนกราฟ จะได้กราฟสมการเส้นตรงโดยที่ b และ Q_m สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกน ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 Langmuir Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

2.5.4.2 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับการดูดซับติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลาย เพื่ออธิบายการดูดซับในระบอบของเหลว ที่พัฒนามาจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับการดูดซับแบบแลงเมียร์ ที่เกิดบนผิวหน้าที่ไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) โดยการดูดซับบนพื้นผิวของสารถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) สามารถใช้ได้สำหรับการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ มักอธิบายบนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ และเรซินสังเคราะห์ โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. การดูดซับมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่อง
2. ใช้สำหรับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous)

3. ใช้ได้ดีสำหรับตัวดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดซับได้ง่าย และมีความเข้มข้นต่ำ

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ

$$\frac{x}{m} = q = K_f C_e^{1/n}$$

เมื่อ

K_f คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ (Sorption Capacity)

$1/n$ คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา (Adsorption Intensity)

X คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

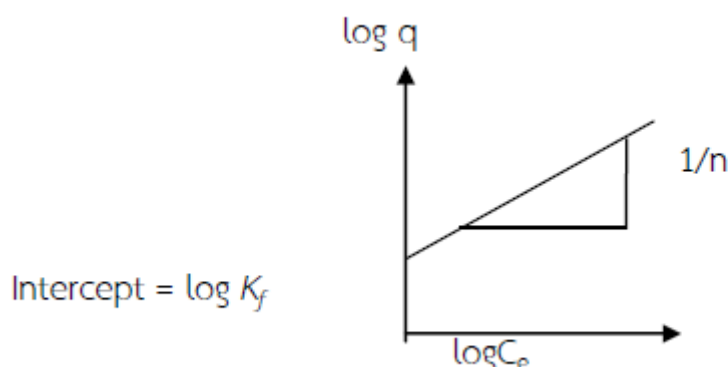
m คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับ (g)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (mg/l)

โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Logarithm ได้ดังนี้

$$\log q = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e$$

เมื่อนำสมการ Logarithm ไปเขียนกราฟ ระหว่างค่า $\log q$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟสมการเส้นตรง โดยค่าความชันของกราฟ (Slope) และจุดตัดแกน y (Intercept) มีค่าเท่ากับ $1/n$ และ $\log K_f$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟ Freundlich Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

2.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเรื่องเกี่ยวกับวัสดุดูดซับที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์หลากหลายประเภท เพื่อดูดซับสารต่างๆโดยมีการควบคุมการดำเนินการที่สภาวะต่างกัน ดังงานวิจัยต่อไปนี้

เมื่อปี 2013 โดย V. Coman และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับนิกเกิลออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยนิกเกิลเป็นโลหะหนักที่มีความสำคัญและมักจะถูกใช้กันมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อิเล็กทรอนิกส์ และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งของเสียจากกระบวนการดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ถ้าหากมีการปนเปื้อนลงในดิน น้ำ และอากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดออก ไม่เพียงแต่ช่วยในด้านเศรษฐกิจเท่านั้น แต่ยังสามารถช่วยปกป้องสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย (57)

เมื่อปี 2014 โดย Jing Wang และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย alkyl phosphate triesters ที่แตกต่างกัน 5 ตัวอย่าง ประกอบด้วย trimethyl phosphate (TMP), triethyl phosphate (TEP), triisopropyl phosphate (TPP), tributyl phosphate (TBP) และ trioctyl phosphate (TOP) เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวมีความเป็นกรดสูงและสามารถดูดซับไอออนของโลหะได้ดี เพื่อศึกษา Adsorption/Desorption isotherm ของไนโตรเจน ลักษณะของพื้นผิว องค์ประกอบของสาร ผลของ Boehm's Titration และความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า AC-APTEs มีหมู่กรดมากกว่าและมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า ($< 500 \text{ m}^2/\text{g}$) เมื่อเปรียบเทียบกับ AC-PPA ซึ่งมีพื้นที่ผิว $1,145 \text{ m}^2/\text{g}$ เนื่องจากมีการกระตุ้นด้วยกรด

ฟอสฟอริก สำหรับ AC-APTEs และ AC-TOP มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดคือ $488 \text{ m}^2/\text{g}$ ส่วน AC-TMP มีค่า Yield สูงที่สุดคือ 41.1% และ AC-TBP มีหมู่กรดสูงที่สุดคือ 2.95 mmol/g ออกซิเจน 47% การดูดซับโลหะหนัก Ni (II) มีค่า 40.1 mg/g และ Cd (II) มีค่า 53.5 mg/g สำหรับ AC-APTEs มีค่าการดูดซับ Ni (II) และ Cd (II) มากกว่า AC-PPA ยกเว้น AC-TPP ปัจจัยหลักสำหรับความแตกต่างของคุณสมบัติการดูดซับของคาร์บอนคือ ลักษณะของพื้นที่ผิว ในขณะที่โครงสร้างของรูพรุนเป็นปัจจัยรองลงมา (58)

เมื่อปี 2014 โดย Mona Karnib และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกาในการดูดซับโลหะหนัก เนื่องจากปัจจุบันโลหะหนักเป็นมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก การกำจัดโลหะหนักจากสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ โดยการทดลองนี้จะทดสอบความสามารถของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ในการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล โครเมียม และสังกะสี ออกจากน้ำ โดยใช้ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการดูดซับ ซึ่งพบว่านิกเกิลจะมี Removal percentages สูงที่สุดในทุกความเข้มข้น และ Removal percentages จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น โดยค่า Correlation coefficient (R^2) ที่ได้สำหรับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่แตกต่างกัน สามารถบอกได้ว่าข้อมูลการทดลองเหมาะสมกับ Freundlich isotherm มากกว่า Langmuir isotherm โดยสารประกอบซิลิกาต่อตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ในอัตรา 2:3 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของนิกเกิลได้มากกว่าซิลิกาเพียงอย่างเดียว โดยในการทดลองนี้จะใช้เครื่อง SEM ในการวิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (59)

เมื่อปี 2014 โดย Yuanyuan Sun และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับ Ciprofloxacin (CIP) และนิกเกิล (Ni (II)) โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อประเมินปฏิกิริยาภายในระหว่าง CIP และ Ni (II) ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับบนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา pH ของสารละลาย และความเข้มข้นเริ่มต้น ทั้งการ Adsorption และ Cosorption ของ CIP และ Ni (II) บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย จากการทดลองพบว่า Ni (II) ในสารละลายน้ำสามารถดูดซับ CIP บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ได้ดีที่ pH ระหว่าง 3.4-6.5 และสารประกอบของ Ni-CIP จะมีค่าการดูดซับบนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มากกว่า CIP บริสุทธิ์ในช่วง pH เดียวกัน (60)

เมื่อปี 2014 โดย Hanna Runtti และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จาก biomass gasification ในการดูดซับเหล็ก (Iron (II)) ทองแดง (Copper (II)) และ นิกเกิล (Nickel (II)) ออกจากสารละลายน้ำ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากกระบวนการ biomass gasification ทั้งที่มีการกระตุ้นและไม่กระตุ้นด้วยสารเคมี และเพื่อใช้เป็น

ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีราคาถูก โดยมีการเปรียบเทียบกับ Commercial activated carbon สำหรับอ้างอิงอีกด้วย โดยจะทดลองที่ pH ความเข้มข้นเริ่มต้น และ Contact time ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งพบว่า pH ที่ให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจะอยู่ที่ 4 5 และ 8 สำหรับการดูดซับเหล็ก ทองแดง และนิกเกิล ตามลำดับ การกำจัดโลหะหนักโดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่มีการกระตุ้นและไม่กระตุ้นด้วยสารเคมีจะมีค่าสูงกว่า Commercial activated carbon และความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดของการทดลอง ($Q_{m, exp}$) สำหรับเหล็ก ทองแดง และนิกเกิลมีค่าเป็น 21 23 และ 18 ตามลำดับ นอกจากนี้ข้อมูลการดูดซับของการทดลองนี้เหมาะสมกับสมการของ Langmuir และ Freundlich มากที่สุด ส่วนค่าการดูดซับแบบ Kinetic ของเหล็ก ทองแดง และนิกเกิล จะเป็นไปตาม Pseudo-second-order model (61)

เมื่อปี 2015 โดย Rigoberto Tovar-Gómez และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกไข่ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งประกอบไปด้วยสังกะสี (Zn^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) และ acid blue 250 (AB25) จากระบบ 3 สาร ซึ่งประกอบด้วย Zn^{2+} - Ni^{2+} -AB25, Ni^{2+} - Cd^{2+} -AB25 และ Zn^{2+} - Cd^{2+} -AB25 จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ AB25 ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ AB25 ปริมาณโลหะหนัก และไอออนของโลหะหนัก ซึ่งเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะหนักและไอออนของ Na^+ จากหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล AB25 ซึ่ง Isotherm model ที่เหมาะสมอยู่บนพื้นฐานของการตอบสนองของพื้นผิว โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองใหม่สำหรับการดูดซับในระบบ Multicomponent (62)

เมื่อปี 2015 โดย Xinsheng Luo และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ราคาถูก (PRAC) ที่ได้จากเปลือกมันฝรั่ง ในการดูดซับ acid blue 80 dye (AB80) และไอออนของโลหะหนัก (Cu^{2+} หรือ Ni^{2+}) ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงที่สุด (Maximum adsorption capacity) ของ AB80 และ Cu^{2+} มีค่าเท่ากับ 294.7 mg/g และ 45.0 mg/g ตามลำดับ ในของผสมระหว่าง AB80- Cu^{2+} ส่วนในกรณีของระบบที่มีสารเดียวจะมีค่า 173.0 mg/g และ 26.8 mg/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่า AB80 และ Cu^{2+} สามารถทำงานร่วมกันได้ดีบน PRAC คล้ายกับระบบของผสมระหว่าง AB80- Ni^{2+} โดยค่า Adsorption isotherm ของ AB80 และไอออนของโลหะหนัก จะเป็นไปตาม Non modified sips model ในขณะที่ Adsorption kinetic models จะเป็นไปตาม Pseudo-second order kinetic model นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาผลของค่า pH และค่า Selectivity ด้วย เนื่องจากมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระบบ Binary component ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของ PRAC คือ BET, FE-SEM/EDX และ XPS (63)

เมื่อปี 2015 โดย Zizhang Guo และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จาก Phragmites australis ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (PPA) และแอมโมเนียมฟอสเฟต (APs)

ซึ่งประกอบด้วย Triammonium phosphate (TAP), Diammonium phosphate (DAP) และ Monoammonium phosphate (MAP) ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งวิเคราะห์โดย Thermogravimetric ส่วนคุณสมบัติของ AC-PPA และ AC-APs ถูกทดสอบโดย Adsorption/Desorption ของสารไนโตรเจน วิเคราะห์องค์ประกอบ Boehm's titration และ XPS ซึ่งพบว่า AC-PPA มีค่าพื้นที่ผิว BET 894.5 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวม 1.108 cm³/g ซึ่งมีค่ามากกว่า AP-APs ที่มีพื้นที่ผิว BET < 500 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวม < 0.3 cm³/g แต่มีค่า S_{mic}/S_{BET} เท่ากับ 29.35% และ V_{mic}/V_{tot} เท่ากับ 14.9% ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ AC-APs มีค่า $S_{mic}/S_{BET} > 60%$ และ V_{mic}/V_{tot} ซึ่งมีค่า > 50% อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ของสารประกอบ Boehm's titration และ XPS แสดงให้เห็นว่า AC-APs ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไนโตรเจนมากกว่า สำหรับข้อมูลสมมูลของการดูดซับไอออนของโลหะหนัก Ni (II), Cu (II) และ Cd (II) บนคาร์บอนถูกวิเคราะห์โดยใช้สมการแบบจำลองสมมูลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยความแตกต่างของคาร์บอนทั้งทางด้านกายภาพและคุณสมบัติของการดูดซับ ทำให้ AC-APs มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้สูงกว่า AC-PPA เนื่องจากมีรูพรุนที่ดีกว่า (64)

เมื่อปี 2015 โดย Amarendra Dhar Dwivedi และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากสาหร่าย *Chamerion angustifolium* และ Powdered Activated Carbon (PAC) ประกอบด้วย Amine-modified Fireweed carbon (AFWC) และ Amine-unmodified Fireweed carbon (FWC) ในการดูดซับโลหะผสมระหว่างโคบอลต์ (Co (II)) และ นิกเกิล (Ni (II)) ซึ่งพบว่าหมู่ฟังก์ชันที่กระจายอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ ซึ่งพบว่า AFWC มีประสิทธิภาพการดูดซับสูง และข้อมูลจาก Langmuir Capacity ยังแสดงให้เห็นว่ามีค่ามากกว่า 3 และ 5 เท่า เมื่อเทียบกับ FWC และ PAC ตามลำดับ กราฟ Pseudo second order kinetic แสดงให้เห็นถึง Rate limiting step ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันของ Amine บนพื้นผิวของ AFWC และเป็นที่น่าสนใจว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนของสารละลายน้ำ จาก 0.0095-0.95 M (as NaCl) สำหรับ AFWC ในขณะที่ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนสำหรับ FWC และ PAC ส่วนความเป็นกรด (1 M HNO₃) จะถูก Desorbed ประมาณ 97% ของไอออนโลหะ กลไกการดูดซับถูกวิเคราะห์ด้วย X-ray photoelectron spectroscopy และความเสถียรทางอุณหภูมิถูกวิเคราะห์จาก Scanning calorimetry thermogravimetric ซึ่งผลที่ได้พบว่า ข้อดีของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากสาหร่ายทะเลมีมากกว่า PAC เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็ว และเป็นวัสดุที่มีราคาถูกสำหรับการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำในระดับอุตสาหกรรมได้ (65)

เมื่อปี 2015 โดย Jozsef Dobor และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เคลือบด้วย Diatomite earth (DE) ในการกำจัดโลหะหนักตะกั่ว (Pb (II)) และนิกเกิล (Ni (II)) ออกจากสารละลายน้ำ โดยเตรียมจากเซลลูโลส มีการทำ Carbonization และ Functionalization กับสารตั้งต้นหลายชนิด โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นสำหรับขั้นตอนเดียว ผลที่ได้คือมี Functionalized สูงและเกิดเนื้อรูพรุน ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยถูกวิเคราะห์คุณลักษณะโดยใช้เครื่องมือ Scanning electron microscopy (SEM) และ Electron probe microanalysis (EPMA) ซึ่งดำเนินการทั้งในระบบปิดและระบบที่มีการไหล ในกรณีระบบปิดกระบวนการดูดซับจะเป็นไปตาม Langmuir Isotherm และขึ้นอยู่กับค่า pH ทำให้ได้ค่า Adsorption capacity ที่สูงที่สุดคือ 80 และ 380 mg/g สำหรับ Ni (II) และ Pb (II) ตามลำดับ (66)

เมื่อปี 2015 โดย Yan Kang และคณะ ได้ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จาก Pennisetum alopecuroides ที่ได้รับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในการดูดซับนิกเกิล (Ni (II)) ออกจากสารละลายน้ำ โดยใช้ Urea-modified activated carbon คือ Original Activated Carbon (PAC) และ Urea-modified activated carbon (PUAC) โดยวิเคราะห์คุณลักษณะด้วย Adsorption/Desorption ของสารไนโตรเจน วิเคราะห์องค์ประกอบ Boehm's Titration และ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) พบว่าการ Adsorption/Desorption ของสารไนโตรเจนให้ค่าพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมของ PAC เท่ากับ 1,108 m²/g และ 1.469 cm³/g ซึ่งมากกว่า PUAC ที่มีค่าพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 1,060 m²/g และ 1.226 cm³/g อย่างไรก็ตาม ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบ Boehm's Titration และ XPS แสดงให้เห็นว่า PUACs มีหมู่ฟังก์ชันของไนโตรเจนมากกว่า PAC ทำให้มีความสามารถในการดูดซับ Ni (II) มากกว่า และข้อมูลจุดสมดุลของ PAC และ PUACs เป็นไปตาม Langmuir model มากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Ni (II) จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น และเมื่อความแข็งแรงของพันธะไอออนิกของสารละลายลดลง ส่วนกลไกหลักสำหรับการดูดซับ Ni (II) บนคาร์บอนคือ Cation exchange, Electrostatic attraction และ Surface complexation (67)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่ง Mettler Toledo รุ่น ME204
2. ตู้อบ Snol รุ่น Snol 58/350
3. เต้าเผา Carbolite รุ่น CWF 11/13/91e
4. เครื่อง Refrigerated Incubator Shaker รุ่น Innova 4330
5. เครื่อง UV-Visible spectrophotometer รุ่น UV-2450
6. ปีกเกอร์ขนาด 25 100 200 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
7. กระดาษกรอง Whatman รุ่น Cat No 1001-110
8. Cylinder ขนาด 5 มิลลิลิตร
9. ถ้วยกระเบื้อง
10. แท่งแก้วคนสาร
11. ขวดน้ำกลั่น

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
2. สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
3. สารแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4^+)
4. สาร Phenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$)
5. สาร Ethyl alcohol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
6. สาร Sodium Nitroprusside ($\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
7. สาร Tri Sodium citrate ($\text{C}_3\text{H}_4\text{OH}(\text{COONa})_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
8. น้ำยาไฮโปคลอไรต์ (น้ำยาซักผ้าขาวไฮเตอร์)
9. น้ำกลั่น (Deionized)

3.3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% โดยมวลต่อปริมาตร เตรียมได้โดยชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 10 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
2. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M และ 20 M
 - สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M เตรียมได้โดยชั่งสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จำนวน 560 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
 - สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 20 M เตรียมได้โดยชั่งสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จำนวน 1,120 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
3. สารละลาย Phenol เตรียมได้โดยชั่งสาร Phenol จำนวน 10 กรัม ละลายใน Ethyl alcohol 95% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
4. สารละลาย Sodium Nitroprusside เตรียมได้โดยชั่งสาร Sodium Nitroprusside จำนวน 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
5. สารละลาย Oxidizing เตรียมได้โดยชั่งสาร Tri Sodium citrate จำนวน 20 กรัม และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วผสมน้ำยาไฮโปคลอไรต์ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
6. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1,200 360 240 120 และ 60 ppm
 - สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1,200 ppm เตรียมได้โดยชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์ 3.776 กรัม ในปิเก็ตเจอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
 - สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 360 ppm เตรียมได้โดยตวงสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1,200 ppm จำนวน 60 มิลลิลิตร ในปิเก็ตเจอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
 - สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 240 ppm เตรียมได้โดยตวงสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1,200 ppm จำนวน 40 มิลลิลิตร ในปิเก็ตเจอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
 - สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 120 ppm เตรียมได้โดยตวงสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1,200 ppm จำนวน 20 มิลลิลิตร ในปิเก็ตเจอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

- สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 60 ppm เตรียมได้โดยตวงสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 1,200 ppm จำนวน 10 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

3.4 การทำกราฟมาตรฐานของสารละลาย

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนเข้มข้น 360, 240, 120, 60 ppm โดยการเจือจางจากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนเข้มข้น 1,200 ppm
2. วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารละลายแอมโมเนียมไอออนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer รุ่น UV-2450
3. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออนกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.5 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

1. นำแบคทีเรียเซลลูโลส 15 กิโลกรัม แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% โดยมวลต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ล้างเซลลูโลสที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่า pH ประมาณ 7
3. นำเซลลูโลสที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำเซลลูโลสอบแห้งมาแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M และ 20 M ด้วยอัตราส่วน 3:1 (สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์:เซลลูโลสอบแห้ง) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. ชั่งแบคทีเรียเซลลูโลสที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M และ 20 M อบแห้ง ใส่ถ้วยกระเบื้อง 2 ถ้วย แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 20 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำดังข้อที่ 5 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาเป็น 500 องศาเซลเซียส ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 20 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.6 การหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

1. ชั่งตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสจำนวน 0.15 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายแอมโมเนียมไอออนความเข้มข้น 360 ppm ใส่ในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ในข้อ 1. ปริมาณ 150 มิลลิลิตร
3. นำไปกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. เก็บตัวอย่างที่เวลา 10 20 30 40 50 60 90 120 150 180 210 240 300 360 และ 420 นาที ครึ่งละ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ
5. นำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้มากรองด้วยกระดาษกรอง เพื่อแยกตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ออกจากสารละลาย
6. จากนั้น นำสารละลายตัวอย่างที่กรองแล้วมาเติมสารละลาย Phenol ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วกวนผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลาย Sodium Nitroprusside ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วกวนผสมให้เข้ากัน และสุดท้าย เติมสารละลาย Oxidizing ปริมาตร 1 มิลลิลิตร กวนผสมสารละลายทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดสีอย่างสมบูรณ์
7. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer แล้วคำนวณความเข้มข้นจากกราฟสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้
8. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาดูดซับจำเพาะจากสมการ $q_e = \left[\frac{C_0 - C_{eq}}{m} \right] \times V$ โดยที่

q_e หมายถึง น้ำหนักของสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออน (ppm)

C_{eq} หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออนที่สภาวะสมดุล (ppm)

m หมายถึง น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

V หมายถึง ปริมาตรของสารละลาย (ml)
9. ทำการทดลองข้อ 1 – 8 ซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออน จาก 360 ppm เป็น 240 120 และ 60 ppm ตามลำดับ
10. ทำการทดลองข้อ 1 – 9 ซ้ำ โดยเปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เป็น
 - ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
 - ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 20 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

- ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 20 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

- ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า

11. ทดสอบค่าของอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยทำการทดลองข้อที่ 1 - 8 ซ้ำ แล้วเลือกตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์และความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออนที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด (ในการทดลองนี้คือตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออน 360 ppm)



บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้จัดเตรียมและศึกษาลักษณะคุณสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลส และทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับโดยการดูดซับแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ (adsorption isotherm) ที่เหมาะสมเพื่อทำนายสมดุลการดูดซับจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich หลังจากนั้นจึงเปรียบเทียบข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างผลการทดลองกับผลการคำนวณจากทฤษฎีของสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับทั้ง 2 แบบ โดยมีรายละเอียดผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ทั้งหมด 5 ชนิด ดังนี้

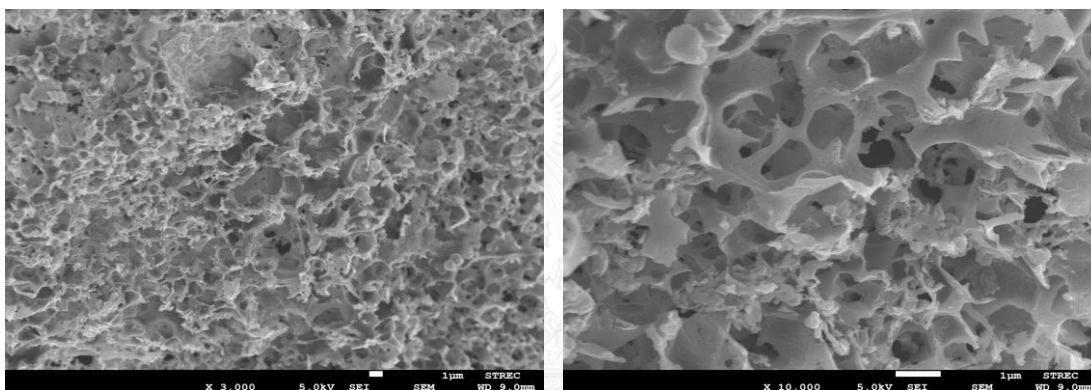
1. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 M และเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC-10M-400)
2. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 M และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (AC-10M-500)
3. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20 M และเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC-20M-400)
4. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20 M และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (AC-20M-500)
5. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า (AC-COM)

หลังจากนั้น ทำการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยใช้เทคนิคต่างๆ ประกอบด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เทคนิค BET surface area (BET) เทคนิค Fourier transforms infrared (FTIR) spectroscopy และเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

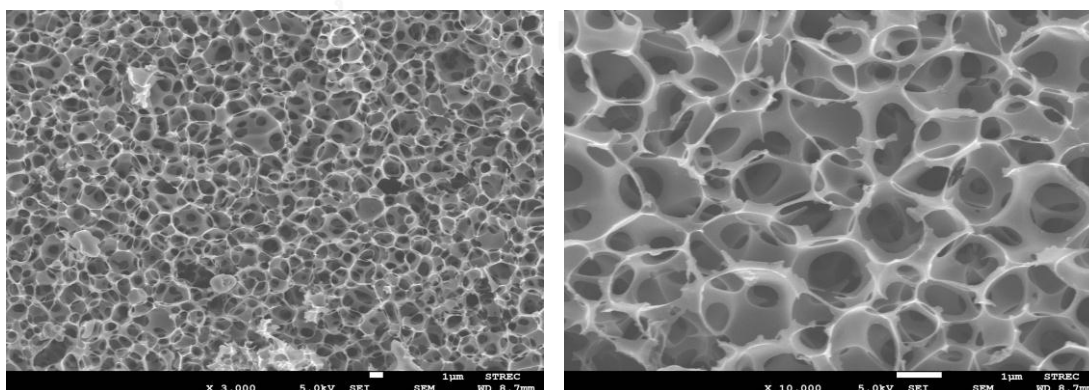
Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร สร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติ ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยผลจากการวิเคราะห์ถ่านคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้ดังรูปภาพต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์ที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400 ที่กำลังขยาย 3,000 และ 10,000 เท่า



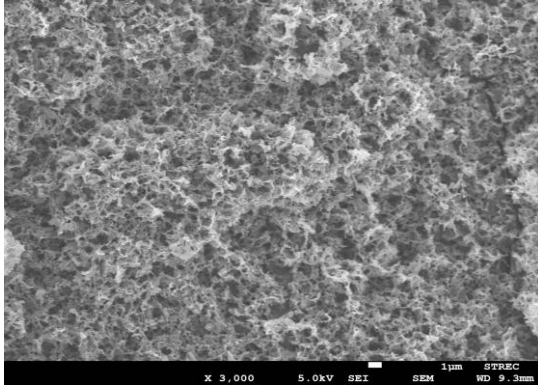
รูปที่ 14 AC-10M-400 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า รูปที่ 15 AC-10M-400 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

2. ผลการวิเคราะห์ที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500 ที่กำลังขยาย 3,000 และ 10,000 เท่า

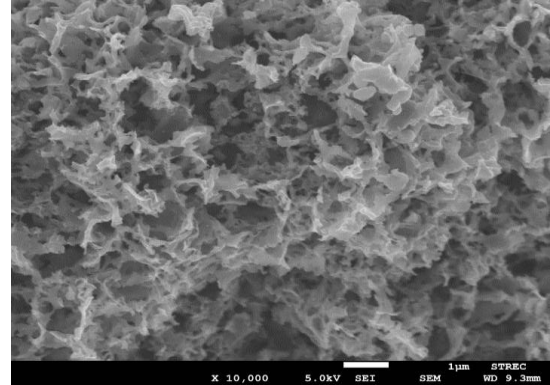


รูปที่ 16 AC-10M-500 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า รูปที่ 17 AC-10M-500 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

3. ผลการวิเคราะห์ที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400 ที่กำลังขยาย 3,000 และ 10,000 เท่า

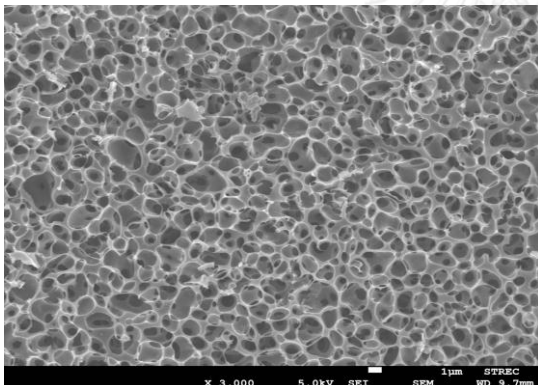


รูปที่ 18 AC-20M-400 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

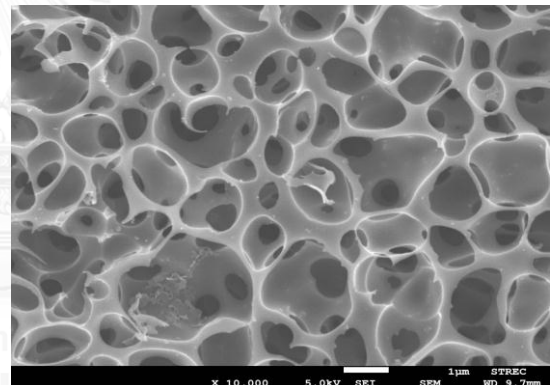


รูปที่ 19 AC-20M-400 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

4. ผลการวิเคราะห์ที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500 ที่กำลังขยาย 3,000 และ 10,000 เท่า

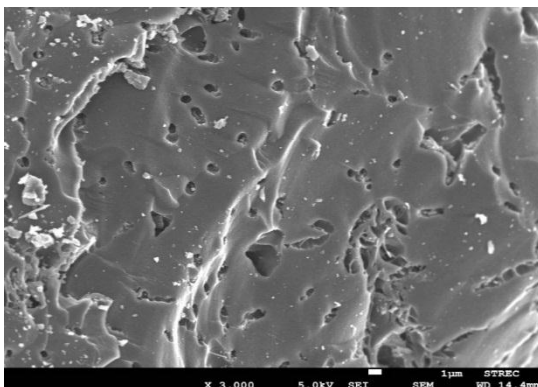


รูปที่ 20 AC-20M-500 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

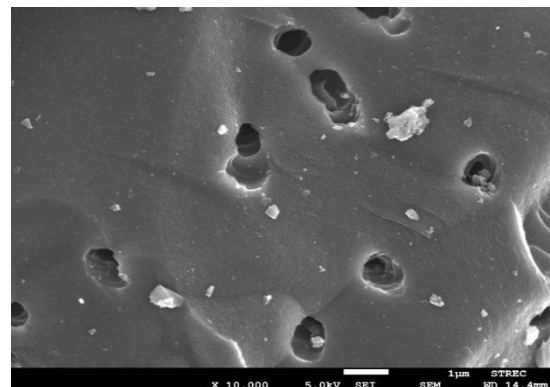


รูปที่ 21 AC-20M-500 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

5. ผลการวิเคราะห์ที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM ที่กำลังขยาย 3,000 และ 10,000 เท่า



รูปที่ 22 AC-COM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



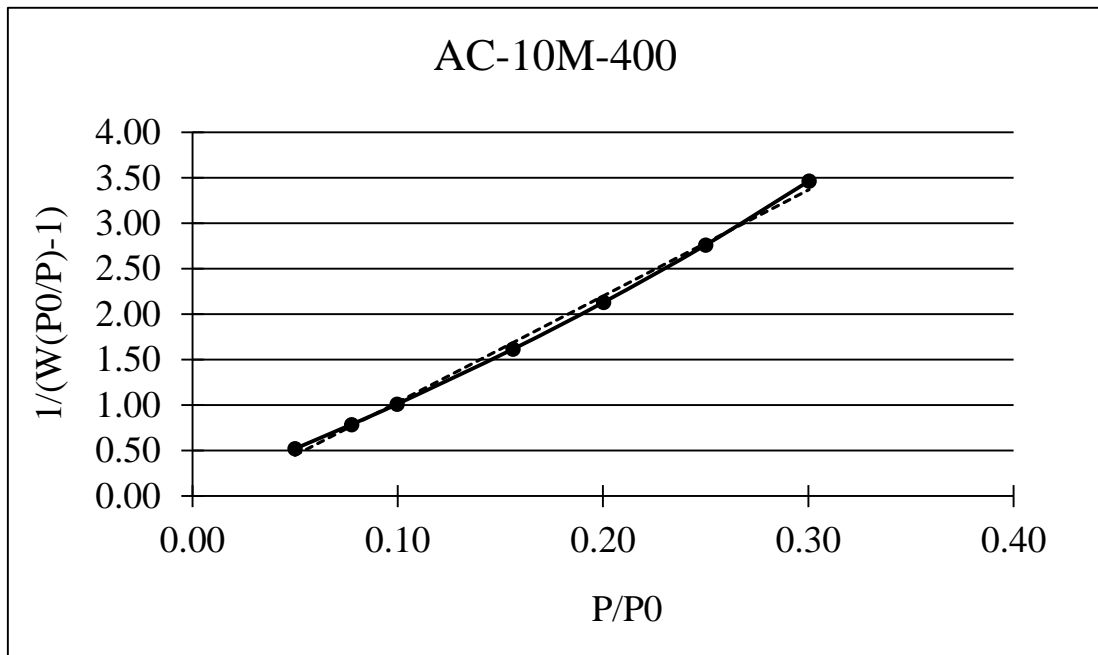
รูปที่ 23 AC-COM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากรูปที่ 14-23 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและลักษณะโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วยกำลังขยาย 3,000 เท่า และ 10,000 เท่า จะเห็นว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400 มีพื้นผิวก่อนข้างขรุขระ และมีโครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก แต่ลักษณะการจัดเรียงตัวของรูพรุนยังไม่เป็นระเบียบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500 ที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างรูพรุนอย่างเป็นระเบียบ ในขณะที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400 มีลักษณะคล้ายคลึงกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400 มาก เนื่องจากเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันมากตามไปด้วย และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500 มีการจัดเรียงโครงสร้างรูพรุนอย่างเป็นระเบียบเช่นเดียวกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500 เนื่องจากเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่าเล็กน้อย จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เซชันมีผลต่อการจัดเรียงตัวของโครงสร้างรูพรุน กล่าวคือการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัสดุดิบ ทำให้การจัดเรียงตัวของคาร์บอนเปลี่ยนไปดังจะเห็นได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ที่มีการจัดเรียงโครงสร้างของรูพรุนแตกต่างกัน ในขณะที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM มีพื้นผิวก่อนข้างเรียบ มีโครงสร้างรูพรุนน้อย และมีการจัดเรียงตัวของรูพรุนที่ไม่เป็นระเบียบ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองทั้ง 4 แบบ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กมากที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยกำลังขยายที่ 3,000 และ 10,000 เท่า จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ได้จากการทดลอง

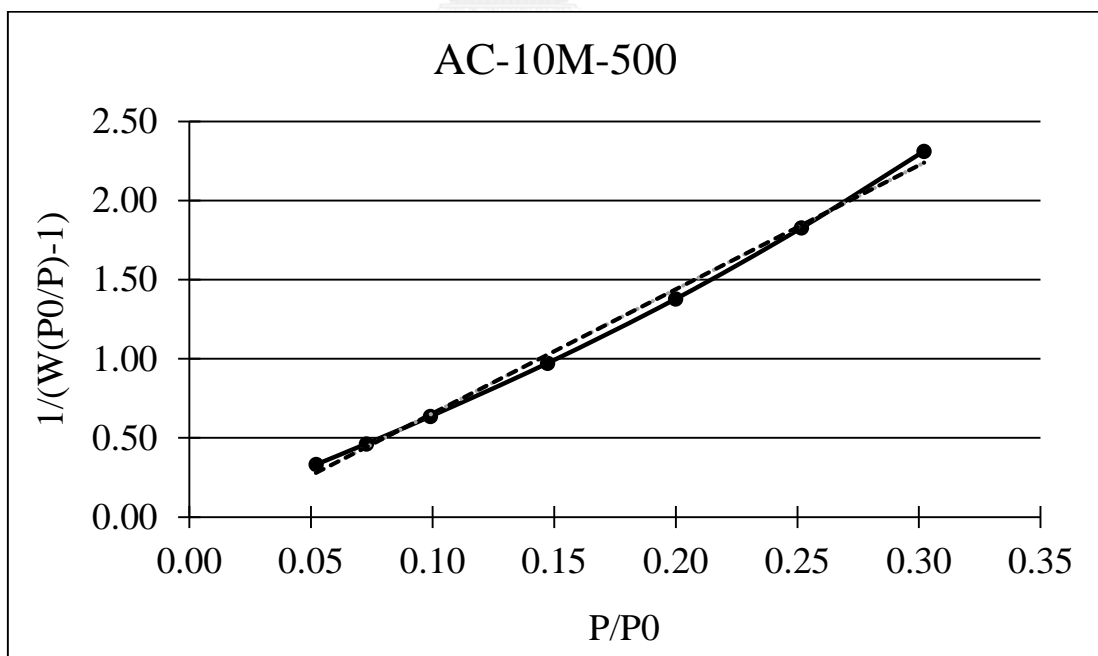
เนื่องจากตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ในงานวิจัยนี้มีขนาดรูพรุนที่เล็กมากระดับนาโนเมตร จึงได้มีการวิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค BET Surface Area เพื่อหาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของรูพรุน ดังจะแสดงในหัวข้อที่ 4.1.2 ต่อไป

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET Surface Area (BET)

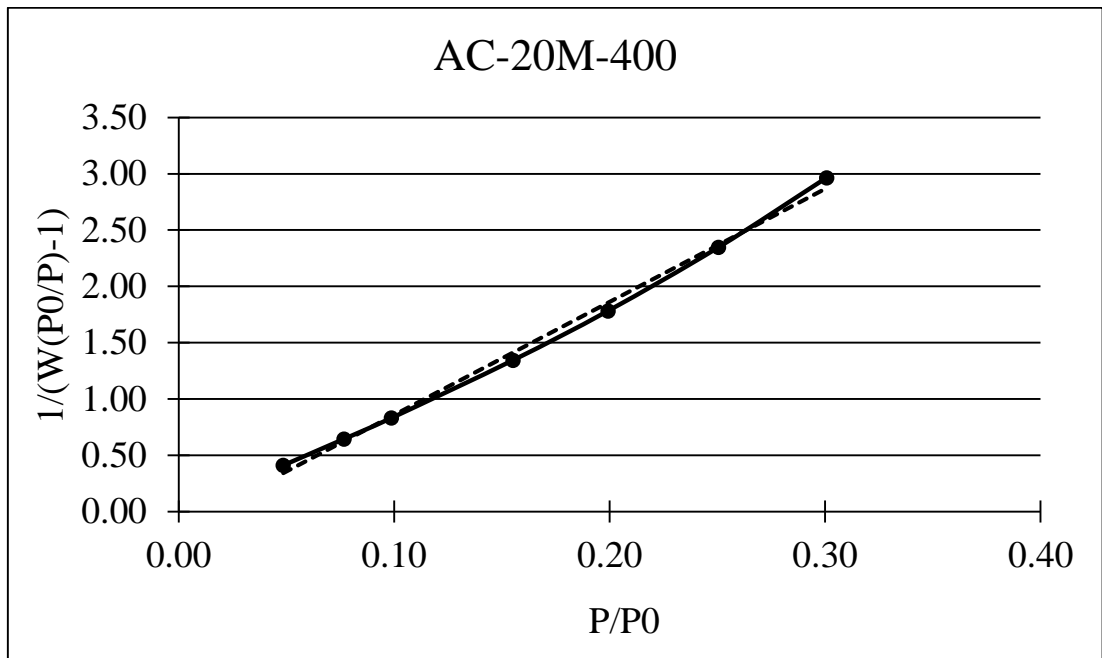
BET Surface Area เป็นเทคนิคการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ตามทฤษฎีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยใช้หลักการการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ซึ่งมีสมมติฐานว่าการดูดซับของก๊าซเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว และก๊าซที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวได้ดีกว่าการที่ก๊าซเกิดดึงดูดกันเอง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อมีการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของคาร์บอนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 24-28



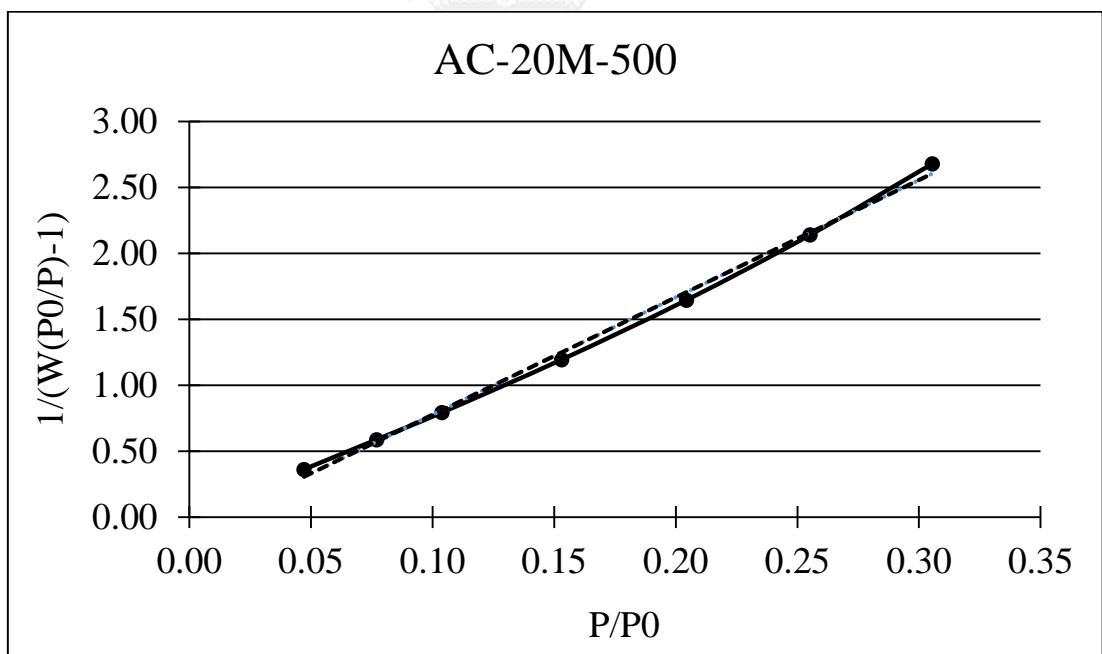
รูปที่ 24 BET plot ของ AC-10M-400



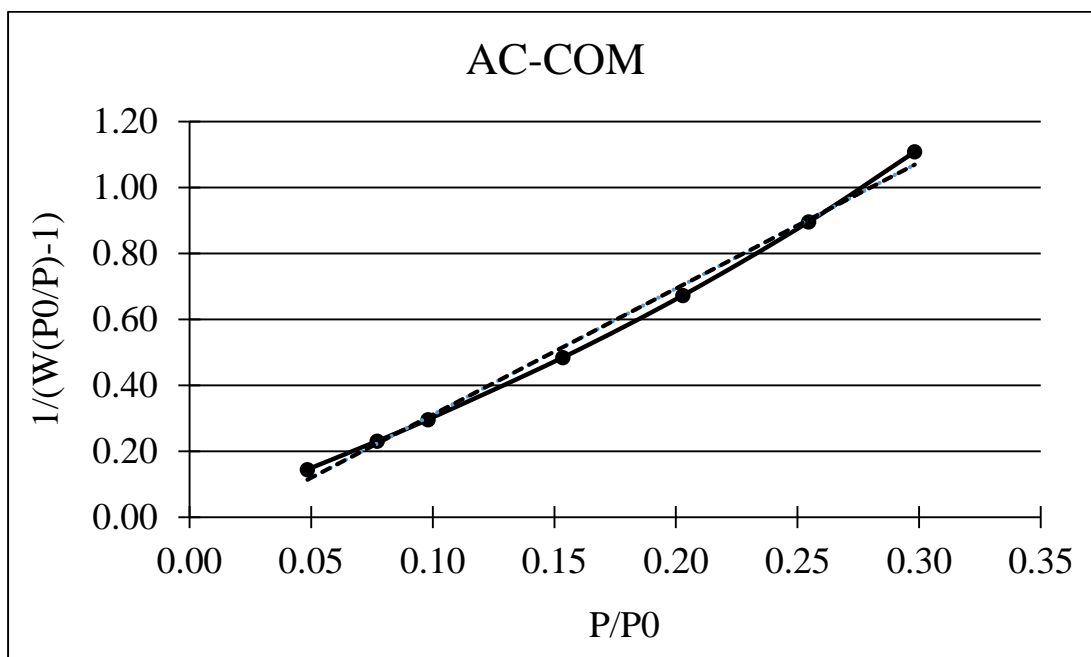
รูปที่ 25 BET plot ของ AC-10M-500



รูปที่ 26 BET plot ของ AC-20M-400



รูปที่ 27 BET plot ของ AC-20M-500



รูปที่ 28 BET plot ของ AC-COM

และจากรูปข้างต้น สามารถคำนวณพื้นที่ผิวโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อมีการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของคาร์บอนตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

Sample names	Multipoint BET (m ² /g)	Average pore diameter (Å)	Total pore volume (cc/g)
AC-10M-400	301.78	27.60	0.2082
AC-10M-500	451.39	25.71	0.2901
AC-20M-400	351.94	29.74	0.2617
AC-20M-500	396.42	27.87	0.2762
AC-COM	927.79	22.22	0.5154

จากตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิค BET surface area ซึ่งหาได้จาก BET plot พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ประกอบด้วย AC-10M-400, AC-10M-500, AC-20M-400 และ AC-20M-500 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Diameter, Dp) 27.60 Å, 25.71 Å, 29.74 Å และ 27.87 Å ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีขนาดใกล้เคียงกันมาก โดยอยู่ในช่วง 25 - 30 Å ซึ่งนับว่าเป็นลักษณะโครงสร้างของรูพรุนขนาดกลาง หรือ Mesopores และมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกันคือประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม โดยพื้นที่ผิวมีส่วนสำคัญต่อการดูดซับ กล่าวคือเมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับ AC-COM พบว่ามีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 22.22 Å แต่มีพื้นที่ผิวเยอะกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลสมาก อาจจะเป็นเนื่องจาก AC-COM มีโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดเล็ก หรือ micropore จำนวนมากที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยเทคนิค SEM แต่พื้นที่ผิวอาจจะไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ เพราะขนาดที่เหมาะสมระหว่างโมเลกุลของ adsorbate และรูพรุนของ adsorbent ที่ยอมให้โมเลกุลผ่านเข้ามาก็มีความสำคัญ หากรูพรุนมีขนาดเล็กมากเกินไปอาจจะทำให้พื้นที่ผิวมาก แต่ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพในการดูดซับก็อาจจะไม่มากตามไปด้วย จึงได้มีการวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างรูพรุนดังแสดงได้ในตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 โครงสร้างของรูพรุน

Sample names	Mesopore diameter (Å) *	Macropore diameter (Å) **	Total pore volume (cc/g) ***
AC-10M-400	27.60	12,619.05 ± 890.87	0.1529 ± 0.0075
AC-10M-500	25.71	20,952.38 ± 336.72	0.2254 ± 0.0105
AC-20M-400	29.74	14,047.62 ± 673.44	0.2002 ± 0.0087
AC-20M-500	27.87	22,142.86 ± 1,010.15	0.2131 ± 0.0096
AC-COM	22.22	7,142.86 ± 1,166.42	0.1152 ± 0.0134

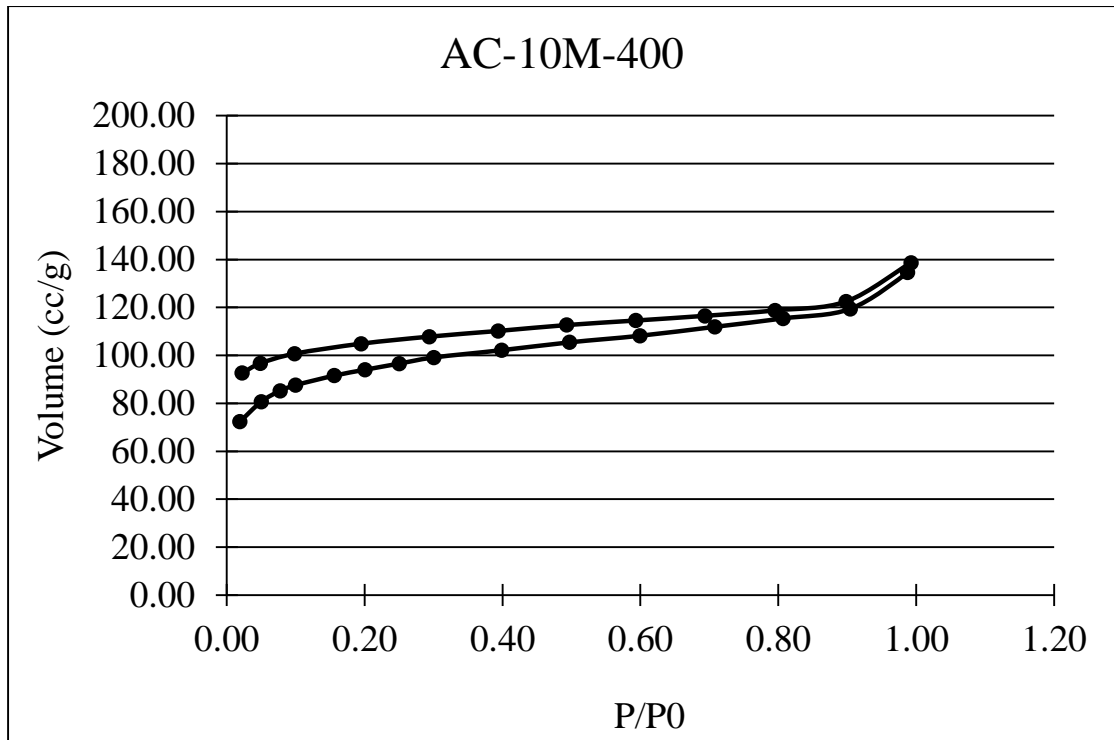
* Mesopore หาได้จากเทคนิคการวิเคราะห์แบบ BET

** Macropore หาได้จากเทคนิคการวิเคราะห์โดยการวัด

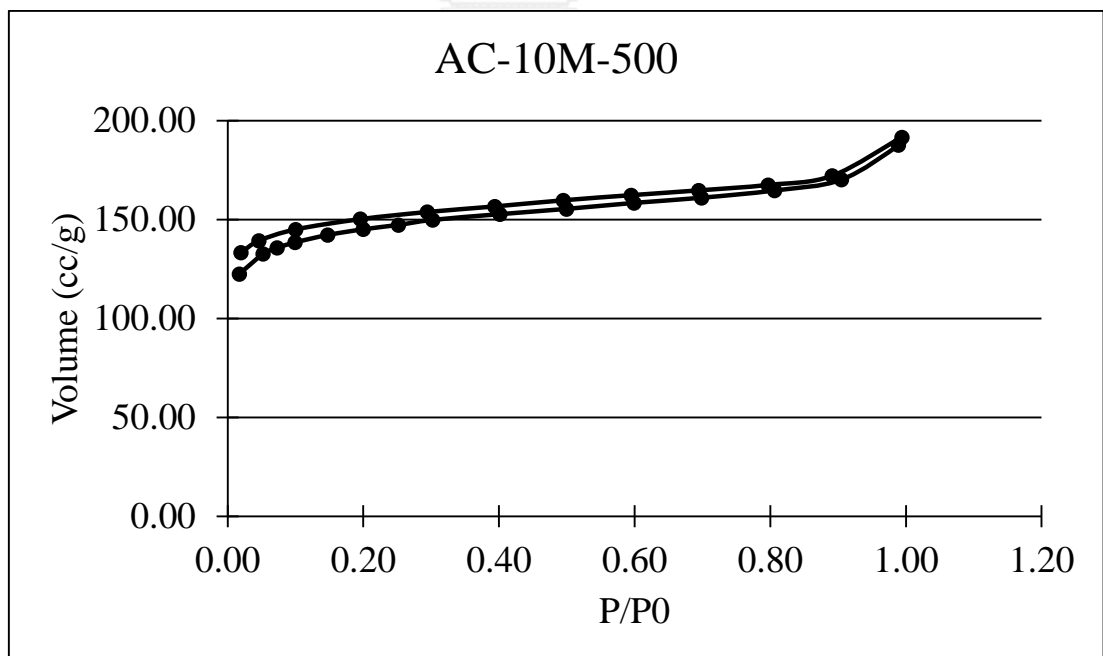
*** Total pore volume หาได้จากเทคนิคการวิเคราะห์โดยการแทนที่ด้วยน้ำ

จากการวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับรูพรุนแบบ Macropore ด้วยเทคนิคการวัด พบว่าขนาดรูพรุนสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ AC-20M-500 > AC-10M-500 > AC-20M-400 > AC-10M-400 > AC-COM ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 2 และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแทนที่ด้วยน้ำเพื่อหาปริมาตรรูพรุนรวม พบว่าปริมาตรรูพรุนเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ AC-10M-500 > AC-20M-500 > AC-20M-400 > AC-10M-400 > AC-COM โดยค่าที่ได้อาจจะน้อยกว่าที่ควร เนื่องจากได้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อแยกน้ำส่วนเกินออกจากคาร์บอนกัมมันต์ที่ดูดซับน้ำจนอิ่มตัว ทำให้มีคาร์บอนกัมมันต์บางส่วนเกาะติดอยู่ที่ผิวของกระดาษกรอง น้ำหนักบางส่วนจึงหายไป โดยปริมาตรรูพรุนนี้นับเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลาย กล่าวคือ ถ้าหากปริมาตรรูพรุนรวมมาก หมายความว่าความสามารถในการดูดซับของเหลวไว้ในรูพรุนที่มากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อปริมาตรของรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้รูพรุนขนาดเล็กแตกตัวออกซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ แต่ถ้าหากเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไปตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ก็มีแนวโน้มที่จะถูกทำลายเพิ่มมากขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าคาร์บอนกัมมันต์ถูกเผาจนกระทั่งโครงสร้างถูกทำลายกลายเป็นเถ้า

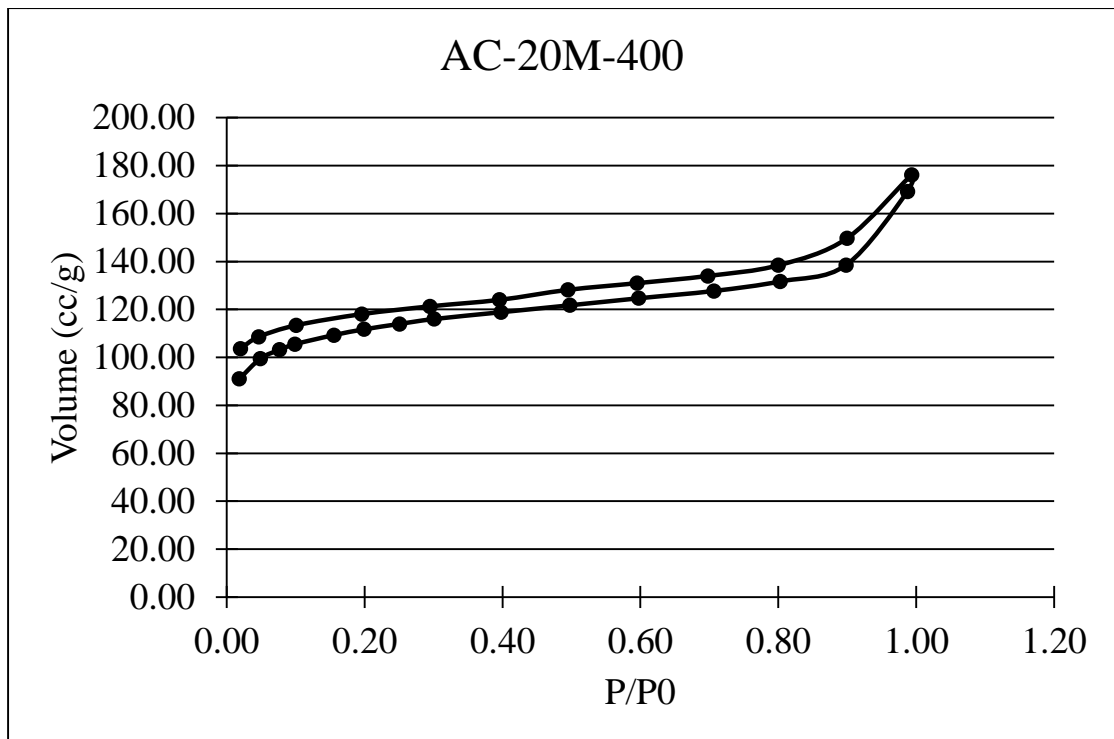
นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ได้ดังรูปที่ 29-33 พบว่าเมื่อแบ่งตาม IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ไอโซเทอมที่ได้จะเป็นไอโซเทอมชนิดที่ 4 ซึ่งพบได้มากในวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) โดยมีขนาดของรูพรุนอยู่ระหว่าง 2 -50 nm (68) กล่าวคือในช่วงแรกที่ค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำการดูดซับก็จะต่ำ และเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแบบแคปิลลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ทำให้เกิด Hysteresis Loop (วงรอบของการดูด) ในช่วงการคายซับ (Desorption)



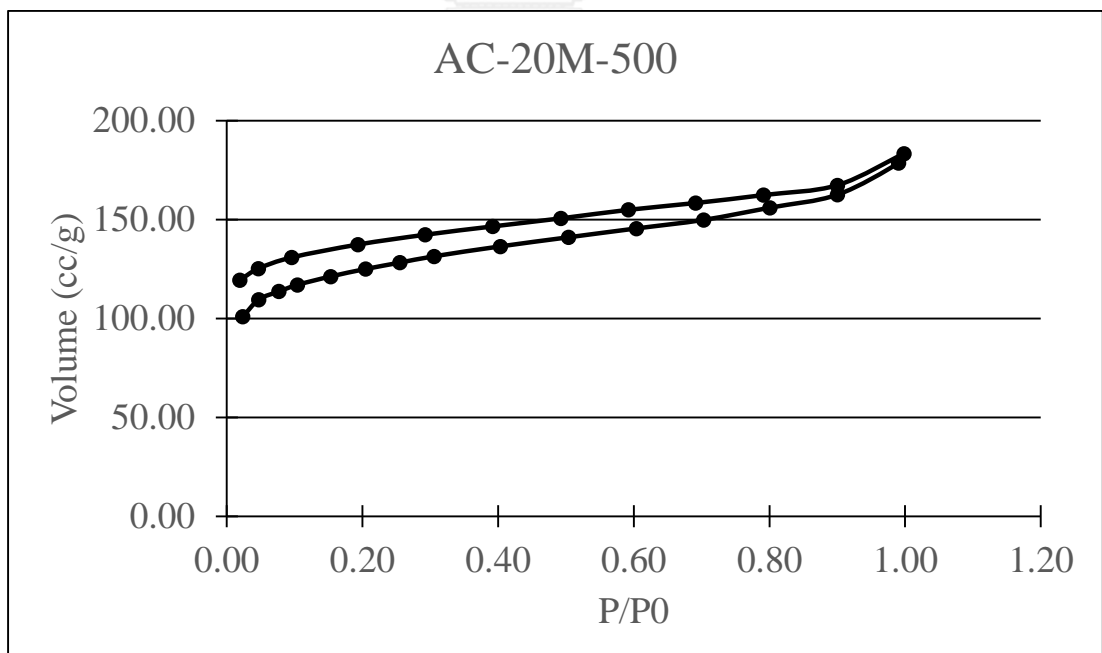
รูปที่ 29 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400



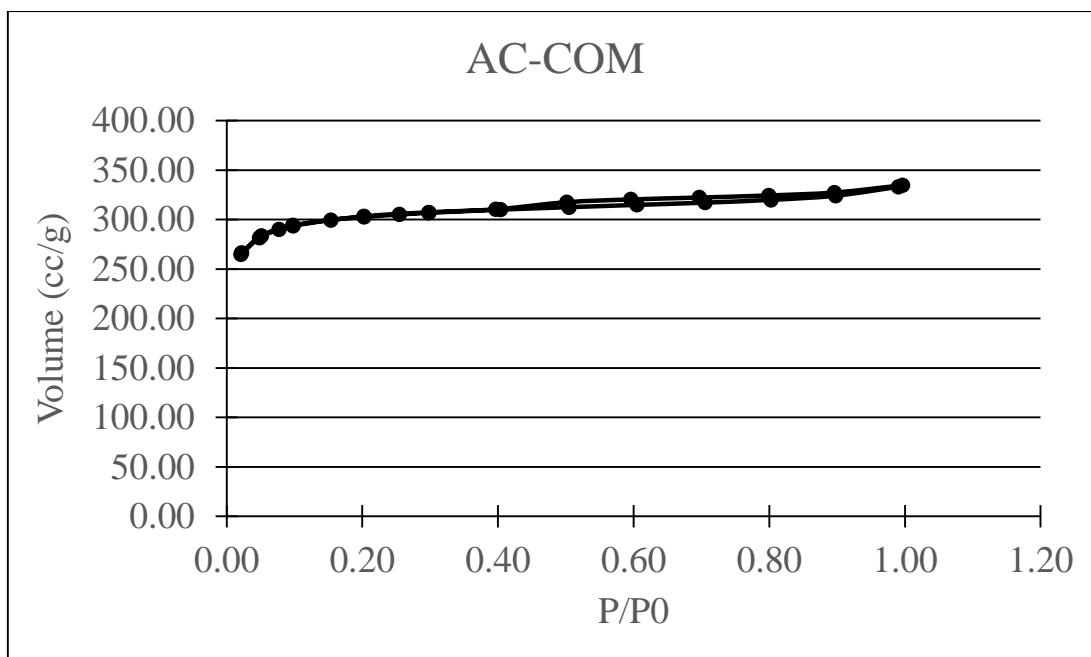
รูปที่ 30 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500



รูปที่ 31 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400



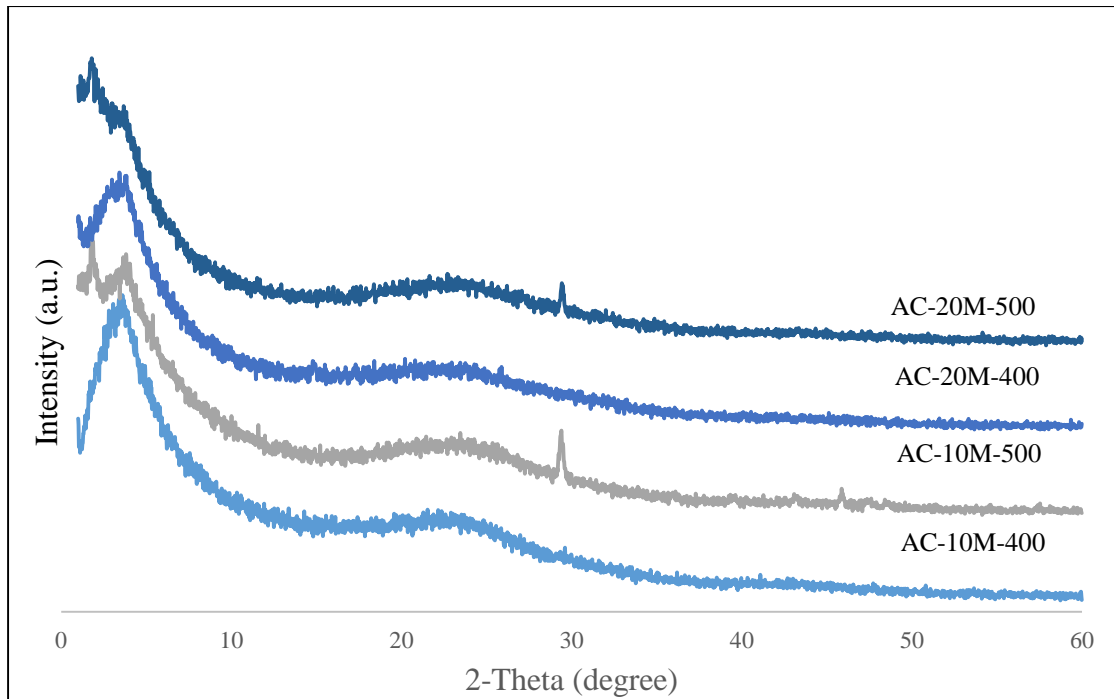
รูปที่ 32 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500



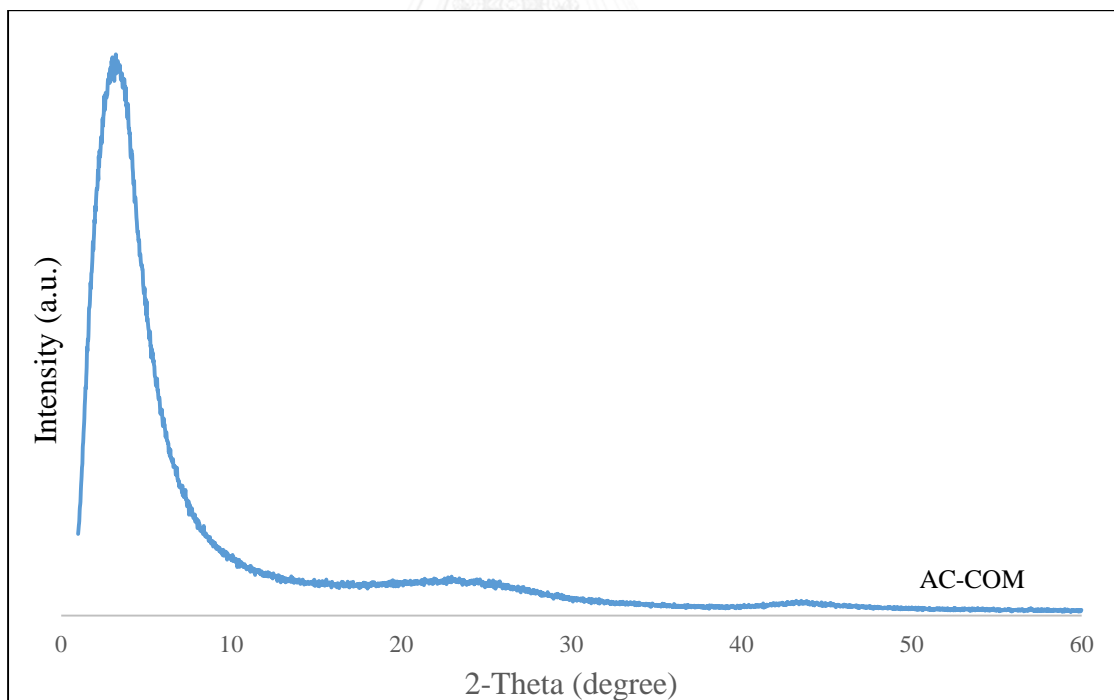
รูปที่ 33 ผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อตกกระทบกับวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อน และทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ จึงนิยมใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน โดยผลจากการวิเคราะห์ถ่านคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปภาพต่อไปนี้



รูปที่ 34 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง

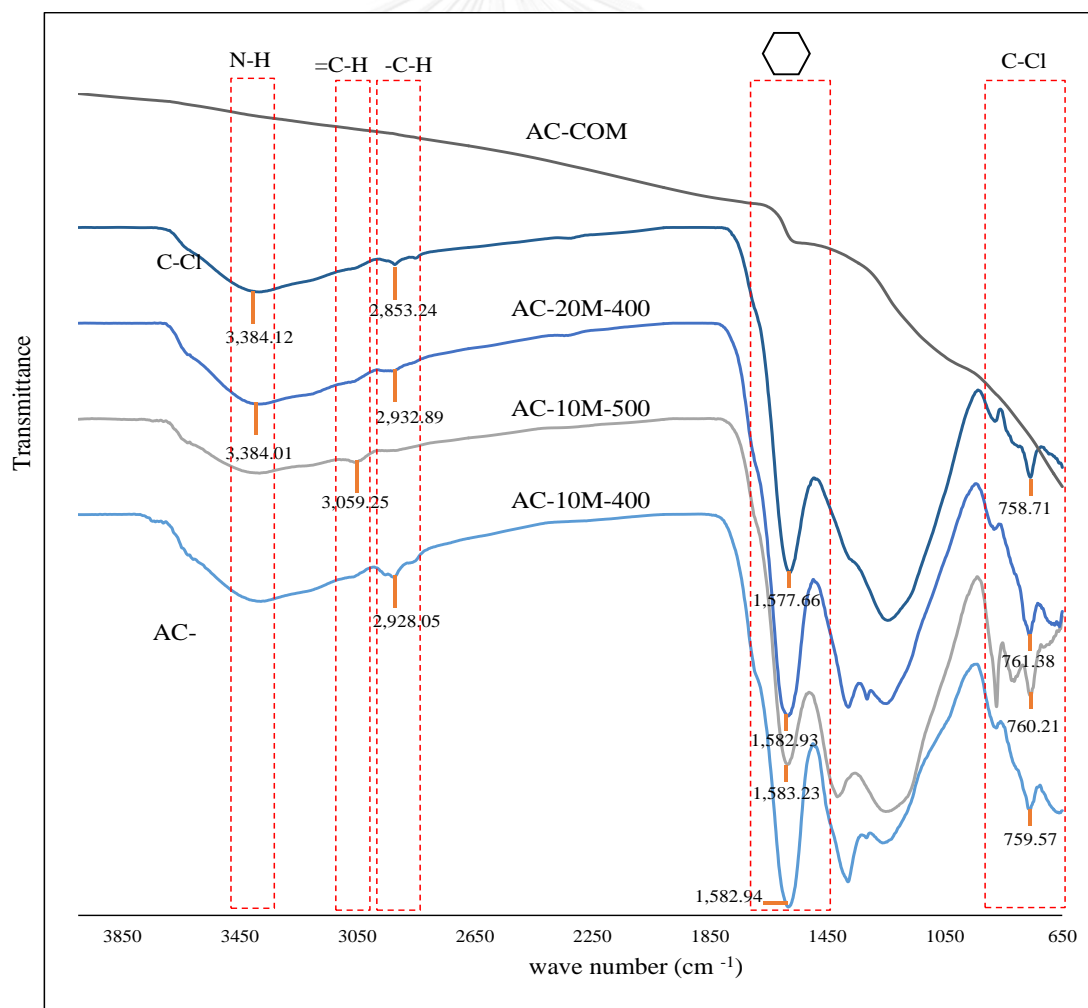


รูปที่ 35 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า

ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองทั้ง 4 แบบ (AC-10M-400, AC-10M-500, AC-20M-400, AC-20M-500) และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า (AC-COM) มีลักษณะของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 2-Theta scale และ ความสูงของพีค (Intensity) ดังรูปที่ 34-35 โดยพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นช่วงกว้าง และพบพีคระหว่าง 2-theta กับ Intensity ที่มุมเท่ากันทั้งหมดคือประมาณ 3.1° แต่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าจะมีลักษณะพีคที่ชัดเจนกว่า นั้นแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเป็นอสัณฐานที่เด่นชัด และไม่ปรากฏพีคอื่นๆ ทำให้มั่นใจได้ว่าไม่มีผลึกใดๆปนอยู่ในตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของสารดูดซับ

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR เป็นเทคนิคสำหรับจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงบอกปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมที่ไม่ทราบชนิด โดยผลจากการวิเคราะห์ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้ดังรูปภาพต่อไปนี้



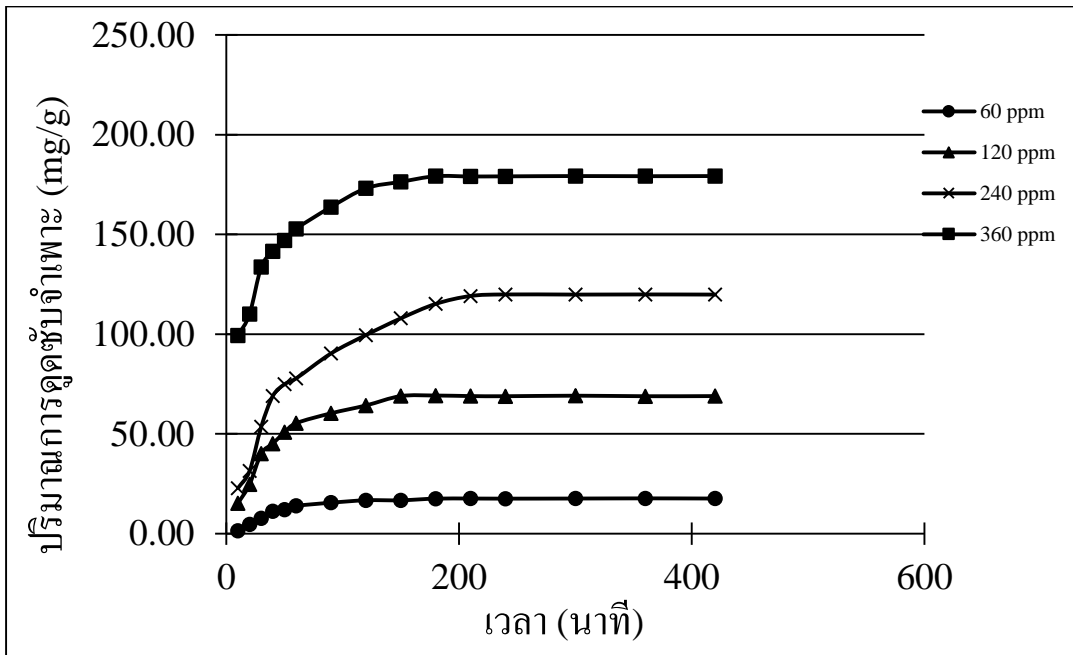
รูปที่ 36 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 36 เป็นผลการวิเคราะห์จากเทคนิค FTIR ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทั้ง 5 แบบ พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 4 แบบที่ได้จากแบคทีเรียเซลลูโลสจากการทดลองจะมีพีคของหมู่ฟังก์ชันเหมือนกันเกือบทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน Alkyl halides (C-Cl) ที่มีช่วงกว้างของพีคประมาณ $600-800\text{ cm}^{-1}$ หมู่ฟังก์ชัน Aromatics ที่มีช่วงกว้างของพีคอยู่ที่ $1,450-2,000\text{ cm}^{-1}$ หมู่ฟังก์ชัน Alkanes หรือ alkyl groups (C-H) ซึ่งมีช่วงกว้างของพีคอยู่ระหว่าง $2,850-2,960\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ฟังก์ชัน Alkenes (=C-H) ซึ่งมีช่วงกว้างของพีคอยู่ระหว่าง $3,020-3,100\text{ cm}^{-1}$ โดยที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีลักษณะคล้ายกันมากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างกัน ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นมีผลต่อการเกิดหมู่ฟังก์ชัน นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิที่กระตุ้นสูงขึ้นความยาวของพีคจะลดลง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะสลายพันธะมากขึ้น ส่วนหมู่ฟังก์ชัน Carboxylic acids (O-H) ที่มีช่วงพีคประมาณ $3,400-3,650\text{ cm}^{-1}$ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการนำแบคทีเรียเซลลูโลสไปกระตุ้นด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้น พบว่ามีลักษณะเป็นเพียงเส้นโค้งที่กว้าง และไม่ปรากฏเป็นพีคอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันนี้ถูกสลายไประหว่างการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองก็ยังมีหมู่ฟังก์ชัน C-Cl ที่นับว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการจับกับประจุบวกของ NH_4^+ ออกจากสารละลายน้ำได้ดีกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า (AC-COM) ที่ไม่ปรากฏพีคใดๆ ซึ่งหมายความว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันใดๆบนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM ทำให้ความสามารถในการจับกับ NH_4^+ น้อยกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง

4.2 ประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

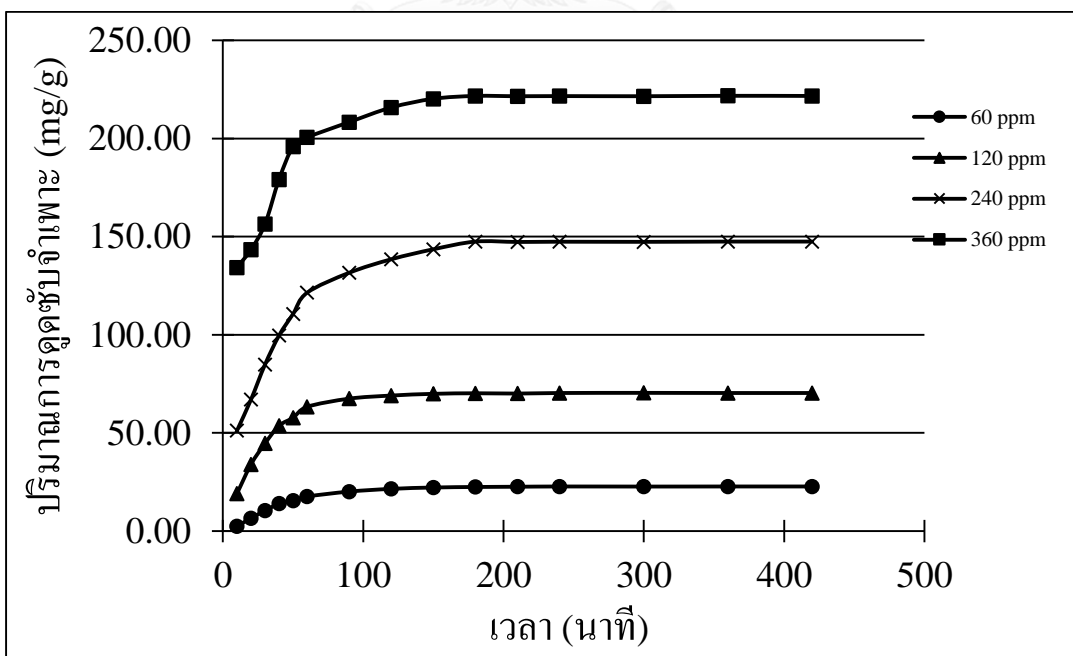
จากการทดลองสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการทดลอง และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า จากการดูดซับแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 120 240 และ 360 ppm โดยการหาค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 37-41

1. กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400



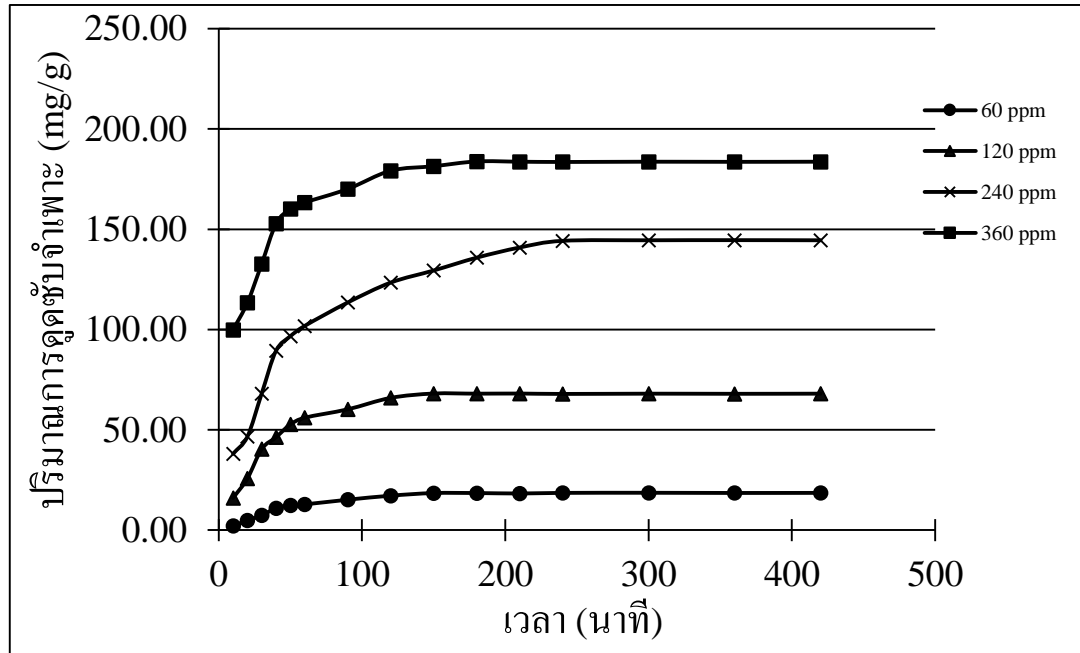
รูปที่ 37 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400

2. กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500



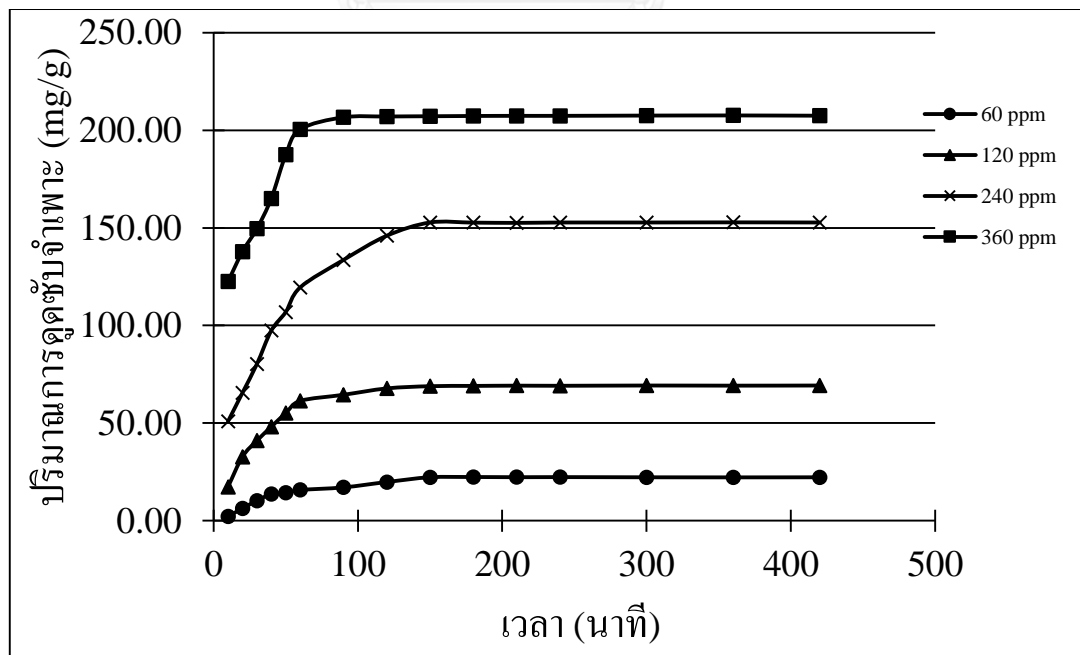
รูปที่ 38 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500

3. กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400



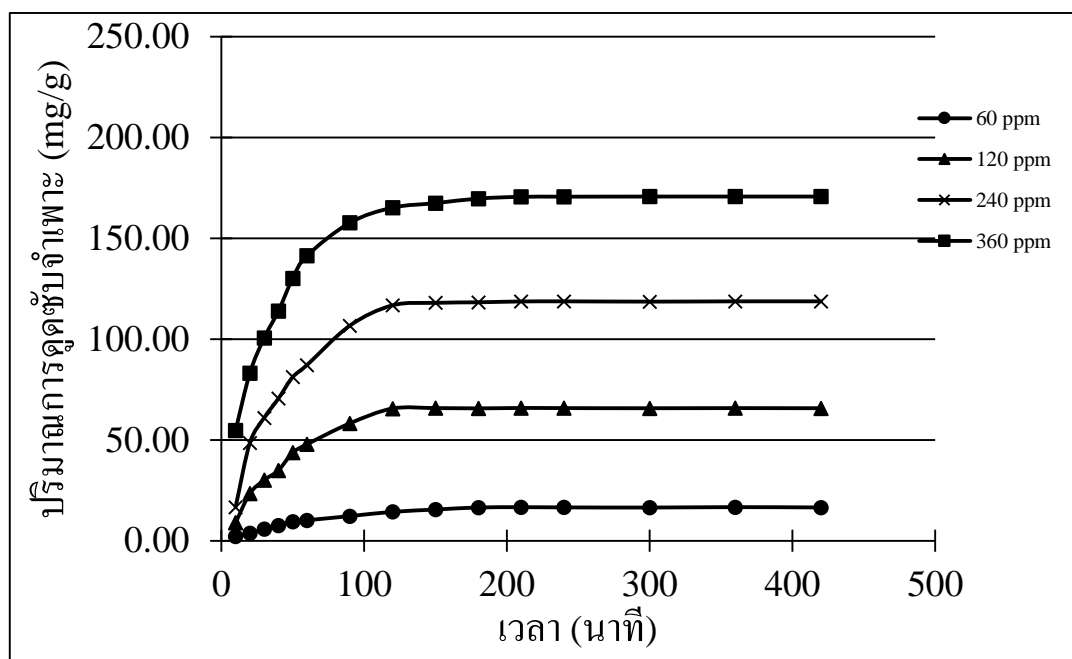
รูปที่ 39 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400

4. กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500



รูปที่ 40 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500

5. กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM

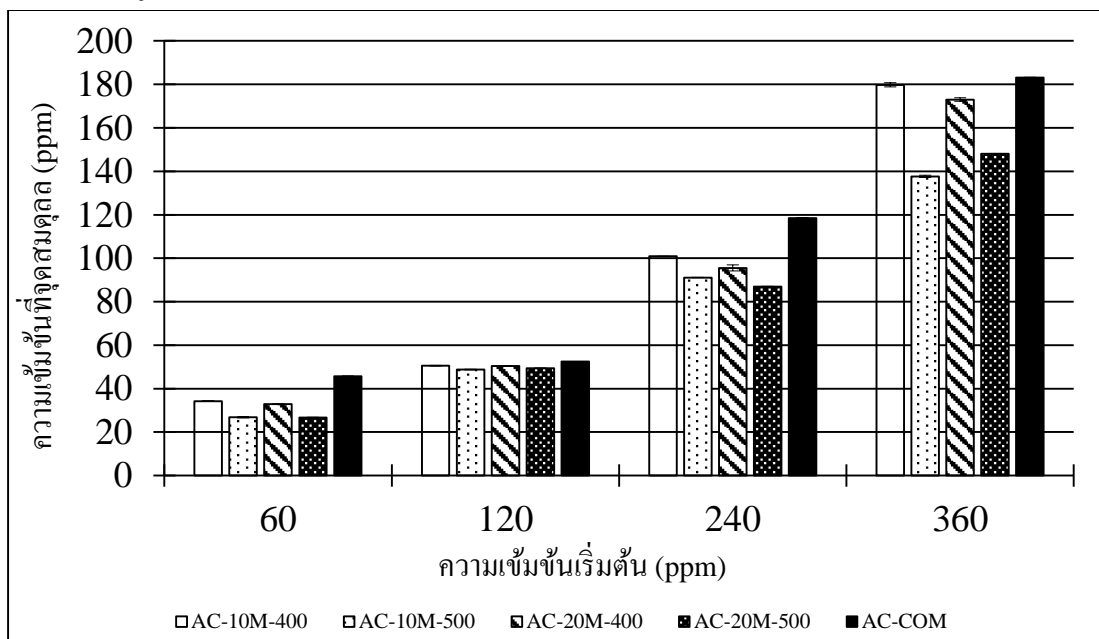


รูปที่ 41 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM

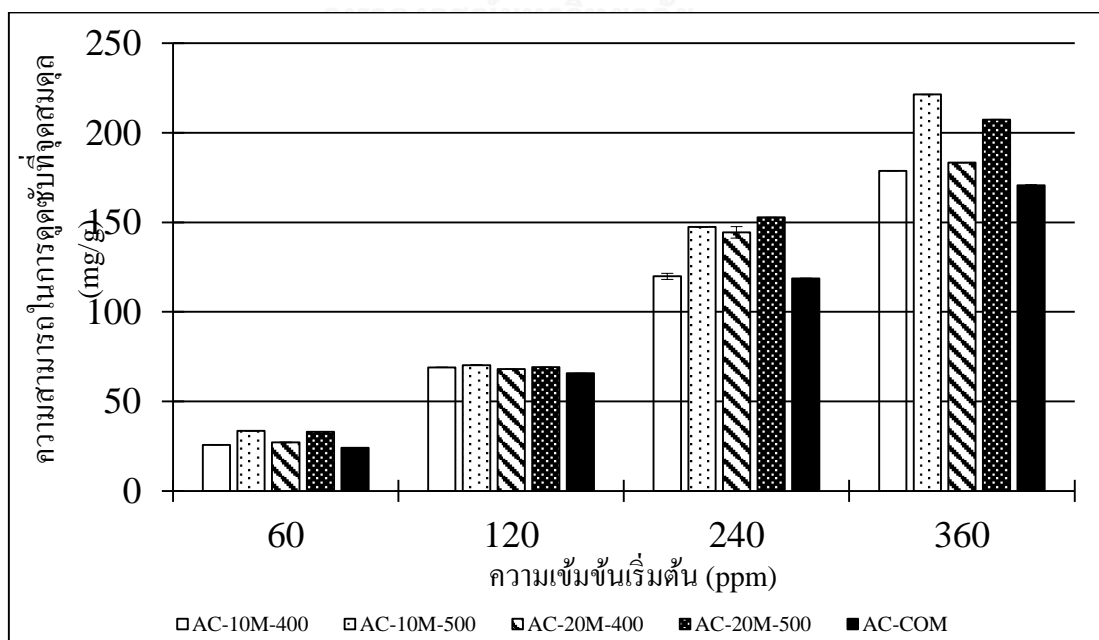
จากกราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทั้ง 5 แบบ จะเห็นได้ว่า กราฟที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก โดยความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ สามารถเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ AC-10M-500 มีค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ 221.44 mg/g AC-20M-500 มีค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ 207.36 mg/g AC-20M-400 มีค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ 183.36 mg/g AC-10M-400 มีค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ 178.78 mg/g และ AC-COM มีค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ 170.69 mg/g โดยใช้สารละลายแอมโมเนียมไอออน 360 ppm ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค BET กล่าวคือเมื่อมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ก็จะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นไปด้วย แต่สำหรับ AC-COM ที่มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องจากว่ารูพรุนของตัวดูดซับอาจจะมีขนาดเล็กเกินไปที่จะทำให้โมเลกุลของแอมโมเนียมไอออนผ่านเข้าไปได้

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ จากกราฟพบว่าแอมโมเนียมไอออนที่ความเข้มข้น 360 ppm มีปริมาณการดูดซับจำเพาะสูงที่สุด และปริมาณการดูดซับจะลดลงเรื่อยๆเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 240 120 และ 60 ppm ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นสูงมากเท่าไร ก็ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับสูงมากขึ้นเท่านั้น

และหากพิจารณาผลของระยะเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรก และหลังจากนั้นจะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลภายในเวลาประมาณ 150 นาที นั้นแสดงให้เห็นว่าธรรมชาติของตัวดูดซับจะสามารถเป็น active site ได้จนกว่าจะถึงจุดสมดุลการดูดซับของมัน โดยสามารถสรุปผลความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารละลายแอมโมเนียมไอออน และความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ชนิดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 42-43



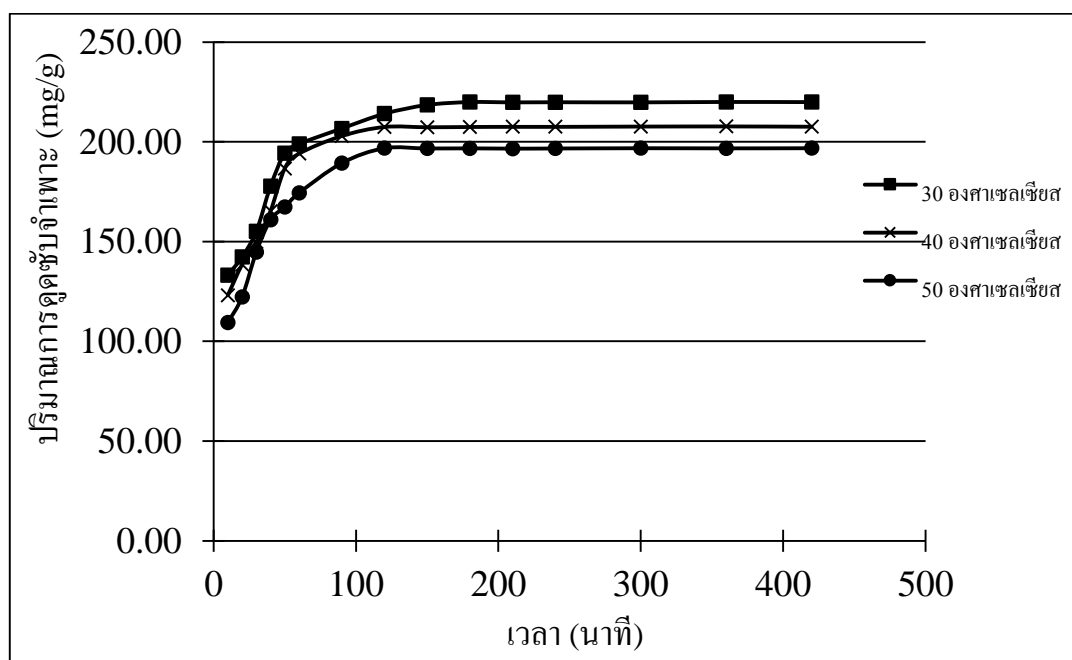
รูปที่ 42 ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารละลายแอมโมเนียมไอออน



รูปที่ 43 ความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ชนิดต่างๆ

4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ข้างต้น ได้พิจารณาถึงปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออน และระยะเวลาในการดูดซับไปแล้ว ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ซึ่งเปรียบเทียบผลการทดลองที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส โดยเลือกตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500 และใช้แอมโมเนียมไอออนความเข้มข้น 360 ppm มาทำการทดสอบ เนื่องจากพบว่าเป็นเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุดจากการทดลองข้างต้น ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 44



รูปที่ 44 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

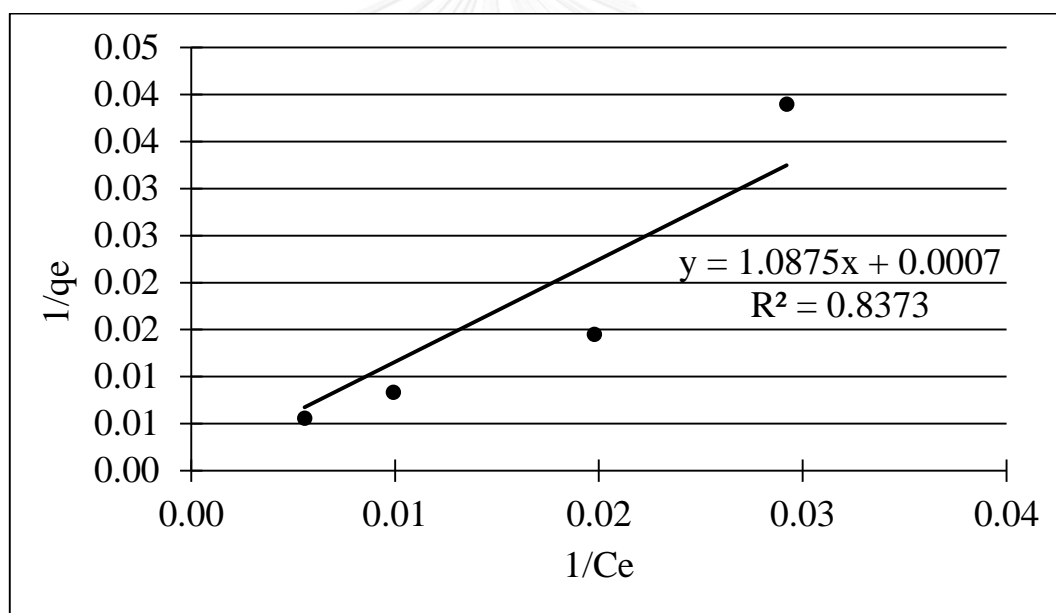
จากการทดลองหาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของแอมโมเนียมไอออนมักจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำๆ (69) อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงมักจะไม่ใช่ปฏิกิริยาการคายความร้อน ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะคายแอมโมเนียมไอออนออกจากตัวดูดซับสู่สารละลายตามการเพิ่มอุณหภูมิ (70) ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มอุณหภูมิยังเป็นการเพิ่มอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายในสารละลาย จึงทำให้เป็นการลดแรงยึดระหว่างไอออนที่เป็นตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ลง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงตามไปด้วย ดังเช่นการทดลองของ Ramasamy Boopathy ที่ทดลองการดูดซับแอมโมเนียมไอออนโดยใช้กะลามะพร้าว

พบว่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไอออนบน CSAC ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 10-50 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 2.48 มิลลิกรัม/กรัม ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (71)

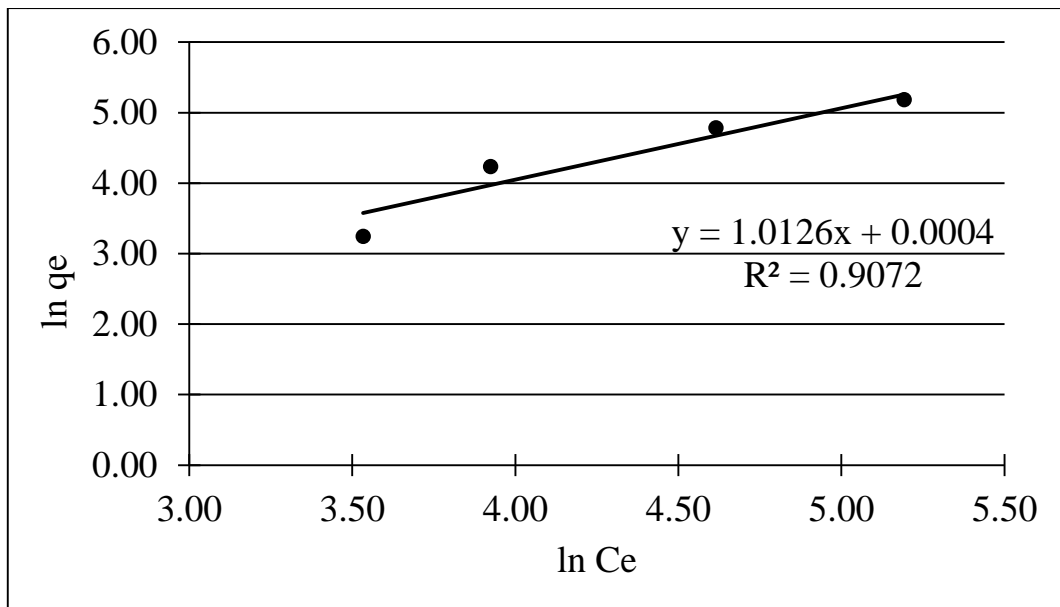
4.4 ผลการวิเคราะห์สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายแอมโมเนียมไอออนบนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส สามารถอธิบายได้ด้วยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับใน 2 รูปแบบสมการ คือ สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยจัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 45-54 จากนั้นจะสามารถหาค่าคงที่ของสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับต่างๆ ตลอดจนค่า R^2 ได้ดังแสดงในตารางที่ 3-4

1. สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400

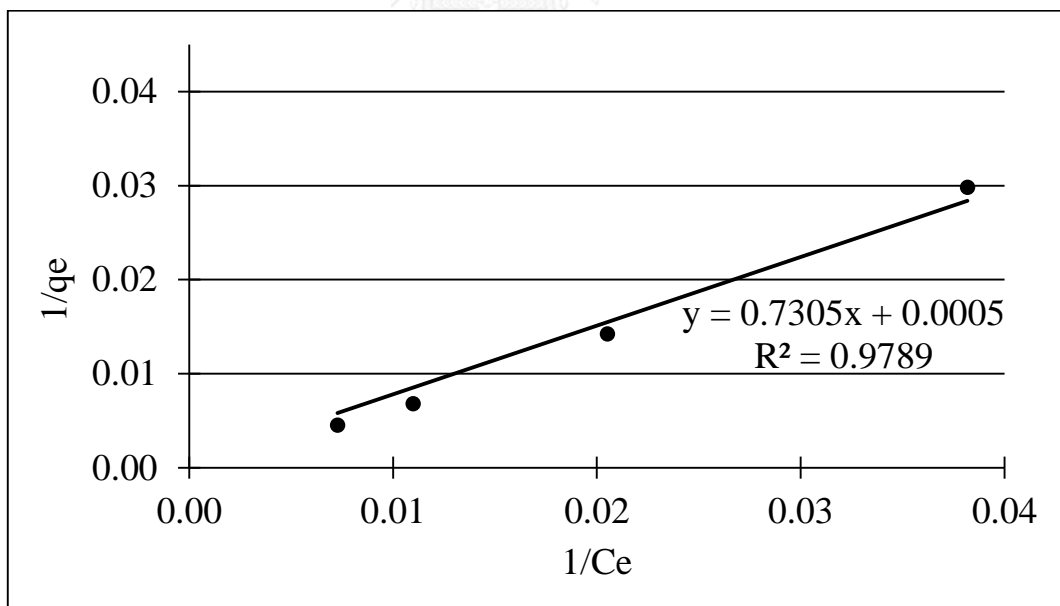


รูปที่ 45 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400

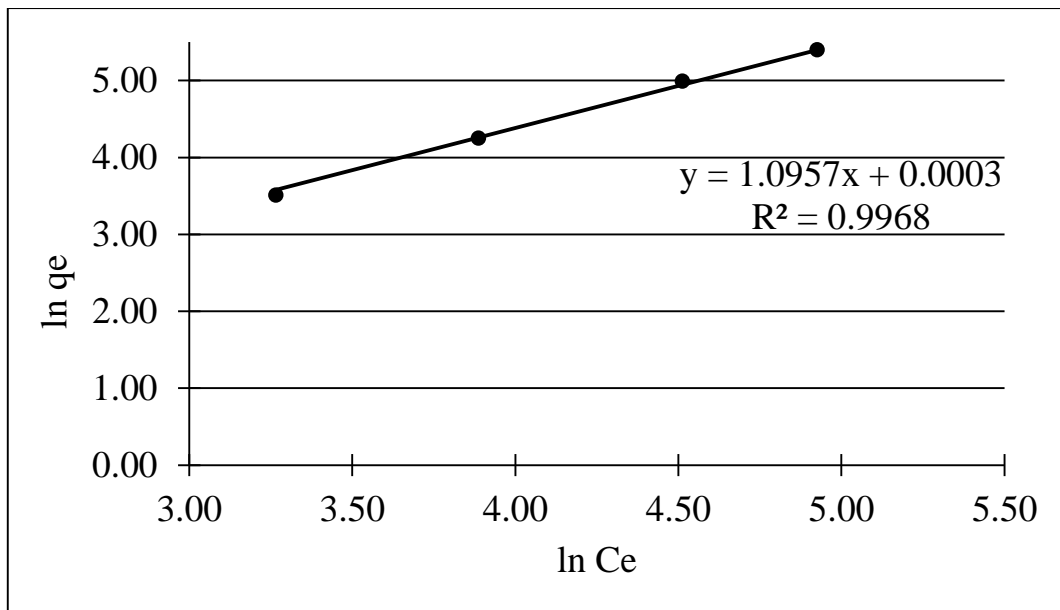


รูปที่ 46 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400

2. สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500

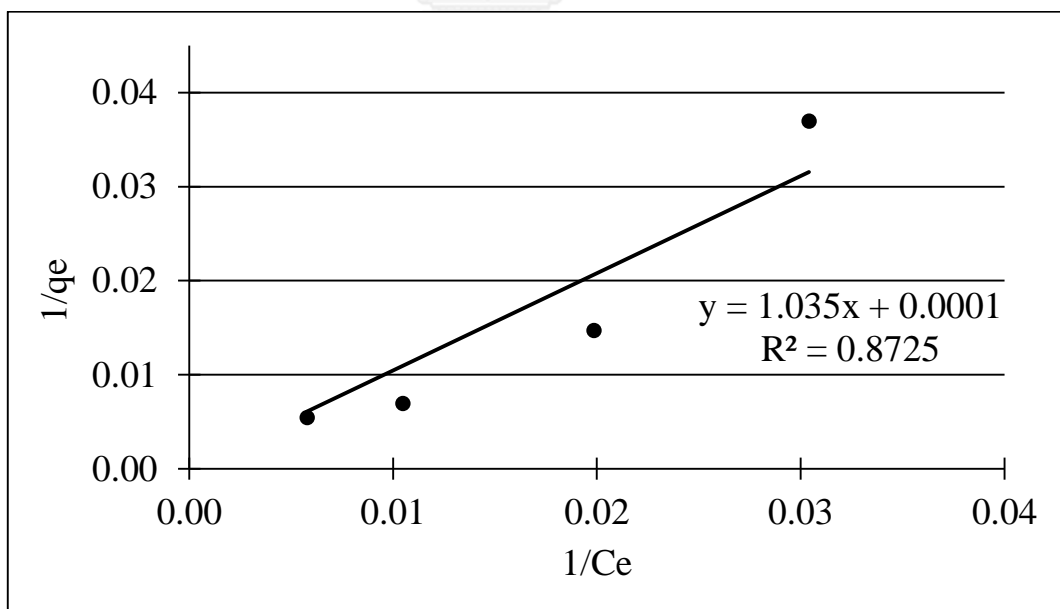


รูปที่ 47 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500

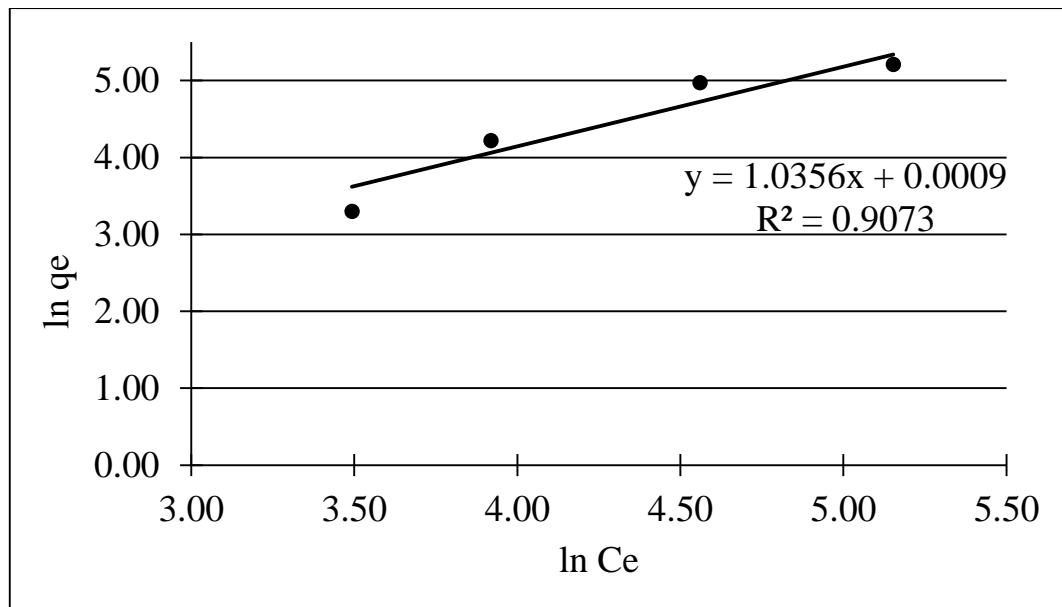


รูปที่ 48 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-500

3. สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400

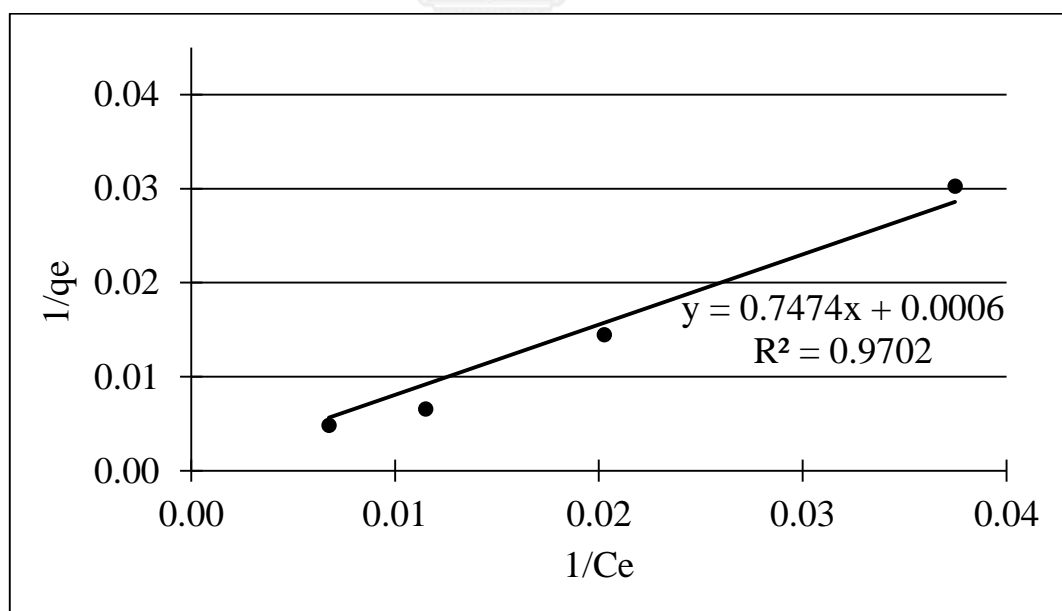


รูปที่ 49 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400

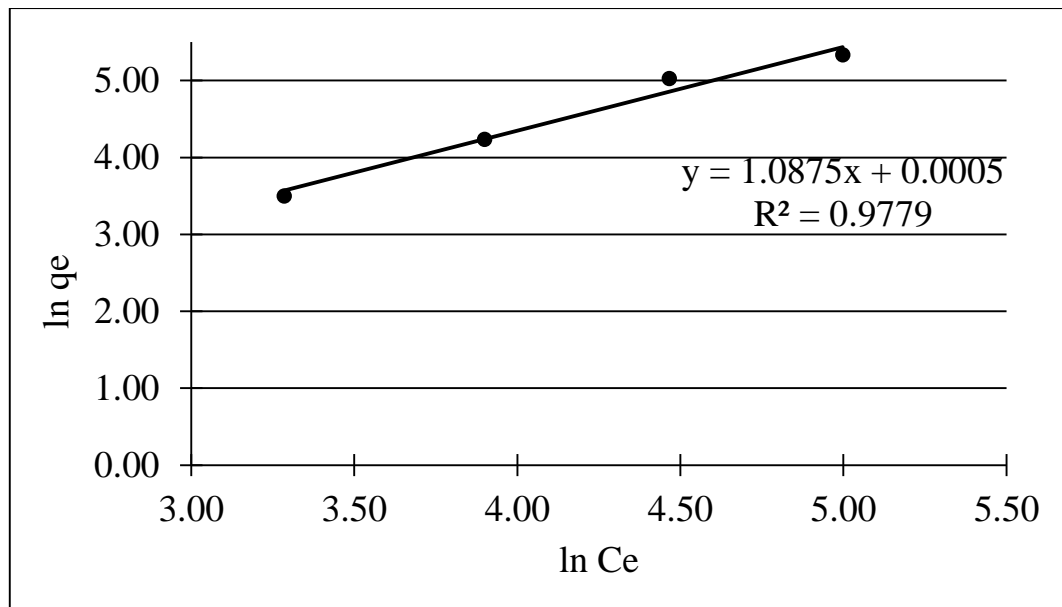


รูปที่ 50 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400

4. สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500

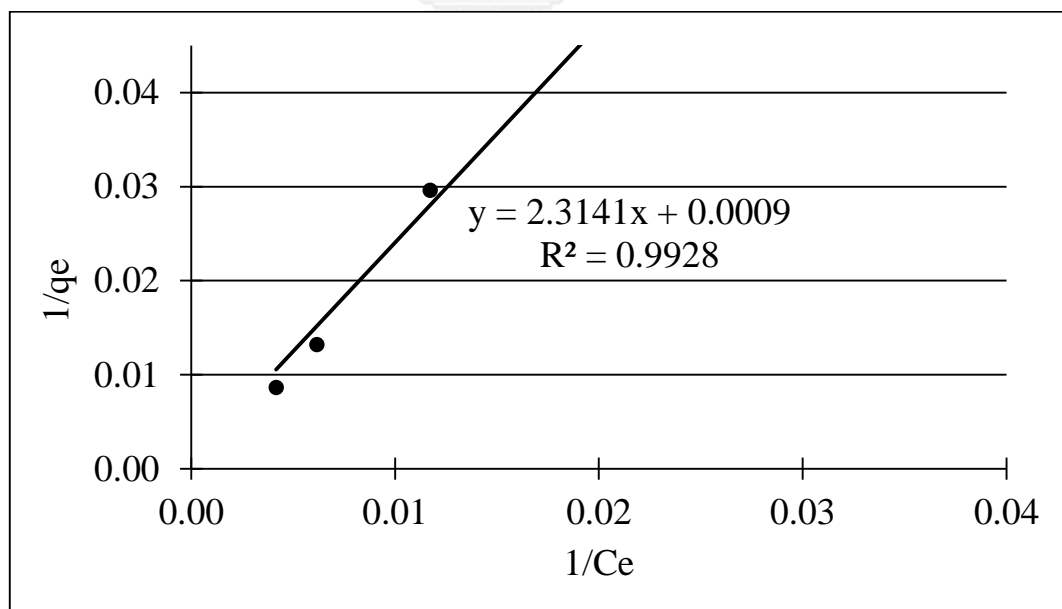


รูปที่ 51 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500

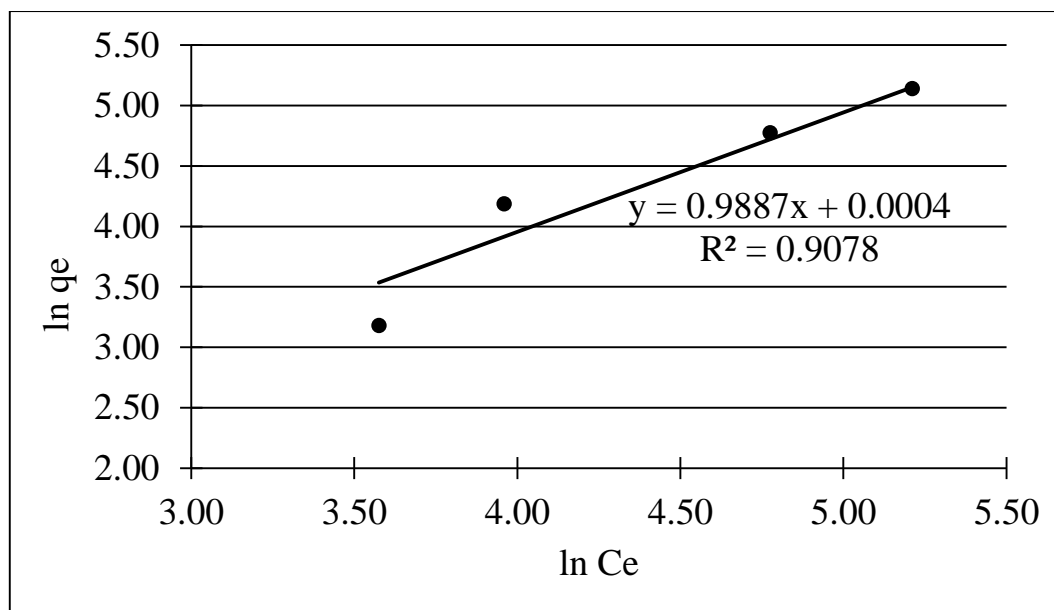


รูปที่ 52 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500

5. สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM



รูปที่ 53 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM



รูปที่ 54 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM

6. สรุปค่าจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir

ตารางที่ 3 สรุปค่าจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir

ชนิดของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	AC-10M-400	AC-10M-500	AC-20M-400	AC-20M-500	AC-COM
จุดตัดแกน Y	0.0007	0.0005	0.0001	0.0006	0.0009
ความชัน	1.0875	0.7305	1.035	0.7474	2.3141
R^2	0.8373	0.9789	0.8725	0.9702	0.9928
a	0.91954	1.36893	0.96618	1.33797	0.43213
b	0.00064	0.00068	0.00015	0.0008	0.00039

7. สรุปค่าจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich

ตารางที่ 4 สรุปค่าจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich

ชนิดของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	AC-10M-400	AC-10M-500	AC-20M-400	AC-20M-500	AC-COM
จุดตัดแกน Y	0.0004	0.0003	0.0009	0.0005	0.0004
ความชัน	1.0126	1.0957	1.0356	1.0875	0.9557
R ²	0.9072	0.9968	0.9073	0.9779	0.9075
K _f	1.0004	1.0003	1.0009	1.0005	1.0004
1/n	1.0126	1.0957	1.0356	0.91954	0.9887

8. สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ และค่า R² ของ Langmuir และ Freundlich

เมื่อทราบค่าคงที่ต่างๆจากผลการทดลองแล้ว สามารถนำมาเขียนเป็นสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich ได้โดยมีรูปสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir คือ $q = \frac{aC_e}{1+bC_e}$ และรูปสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich คือ $q = K_f C_e^{1/n}$ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ และค่า R² สำหรับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

ชนิดตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	Langmuir Adsorption Isotherm		Freundlich Adsorption Isotherm	
	สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ	R ²	สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ	R ²
AC-10M-400	$q = \frac{0.91954C_e}{1 + 0.00064C_e}$	0.8373	$q = 1.0004C_e^{1.0126}$	0.9072
AC-10M-500	$q = \frac{1.36893C_e}{1 + 0.00068C_e}$	0.9789	$q = 1.0003C_e^{1.0957}$	0.9968
AC-20M-400	$q = \frac{0.96618C_e}{1 + 0.00015C_e}$	0.8725	$q = 1.0009C_e^{1.0356}$	0.9073
AC-20M-500	$q = \frac{1.33797C_e}{1 + 0.0008C_e}$	0.9702	$q = 1.0005C_e^{0.91954}$	0.9779
AC-COM	$q = \frac{0.43213C_e}{1 + 0.00039C_e}$	0.9928	$q = 1.0004C_e^{0.9887}$	0.9078

จากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของการดูดซับแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำ โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียเซลลูโลส จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีความใกล้เคียง 1 มาก ซึ่งหมายความว่าผลจากการทดลองมีความเหมาะสมกับทฤษฎีมาก และเมื่อคำนวณเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับจำเพาะจากการทดลอง และจากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich ที่ได้ พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich Adsorption Isotherm มากกว่าของ Langmuir Adsorption Isotherm ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของ Freundlich ที่ว่าเป็นการดูดซับบนพื้นผิวแบบหลายชั้น (Multilayer) สามารถใช้ได้สำหรับการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ โดยมีสมมติฐานคือเป็นการดูดซับที่มีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่อง ใช้ได้ดีสำหรับตัวดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดซับได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็น 3 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) แอมโมเนียมไอออนเคลื่อนที่ออกจากสารละลายน้ำผ่านชั้นของเหลวไปสู่ผิวภายนอกของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของแอมโมเนียมไอออนแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

และระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่โมเลกุลของแอมโมเนียมไอออนเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสด้วยวิธีกระตุ้นโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M และ 20 M และเผาในเตาอบที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำ โดยมีการศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะและโครงสร้างภายในด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เทคนิค BET surface area (BET) เทคนิค Fourier transforms infrared (FTIR) spectroscopy และเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) เพื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้ง 4 ชนิด กับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งพบว่าโครงสร้างของรูพรุนภายในของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และมีหมู่ฟังก์ชันที่ผิวที่เหมาะสมในการจับกับแอมโมเนียมไอออนมากกว่า จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ประกอบด้วยความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออนเริ่มต้นจาก 60 ถึง 360 ppm ระยะเวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิสำหรับการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบกะ พบว่าคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสและตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าจะดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรก และค่อยๆเข้าสู่สมดุลภายในเวลาประมาณ 150 นาทีเหมือนกัน แต่ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สูงที่สุดคือ 221.75 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งได้จากตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 M และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (AC-10M-500) โดยใช้สารละลายแอมโมเนียมไอออนเข้มข้นเริ่มต้น 360 ppm นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับ พบว่าสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich สามารถใช้อธิบายประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมไอออนออกจากสารละลายน้ำด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลส ได้ดีกว่าสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออนของตัวดูดซับชนิดต่างๆดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากแบคทีเรียเซลลูโลสจากการทดลองมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออนของ
ตัวดูดซับชนิดต่างๆ

Absorbate	Absorbent	BET surface area	Average pore size	Total pore volume	Equilibrium reaching (min)	Q _e (mg/g)	Ref.
Ammonium ion	Arenesulfonic Acid Functionalized Mesoporous Silica	395.4 m ² /g	3.9 nm	0.29 cm ³ /g	5	25.35	(16)
Ammonium ion	Propylsulfonic Acid Functionalized Mesoporous Silica	455.1 m ² /g	3.7 nm	0.45 cm ³ /g	5	24.3	(16)
Ammonium ion	zeolite 13X	-	-	-	-	22.79	(17)
Ammonium ion	C. vulgaris coimmobilized with A. brasilense	-	-	-	-	2.9	(19)
Ammonium ion	natural Turkish (Yildizeli) zeolite	-	-	-	-	8.12	(20)
Ammonia	Turkish (Yildizeli) zeolite	-	-	-	-	9.64	(20)
Ammonia	Scotland's clinoptilolite (Na-form)	-	-	-	-	28.98	(21)
Ammonium ion	Chinese Natural Zeolite	6.95 m ² /g	112.44 Å	0.0191 ml/g	10	108 meq/g	(22)
Ammonium ion	loosepore geothermal reservoir	-	-	-	15	0.276	(23)
Ammonium ion	Fe ₃ O ₄ nanoparticles	-	-	-	-	132.1	(24)
Ammonium ion	graphene laminate electrodes	-	-	-	-	25.3	(25)
Ammonia	functionalized nanoporous carbons	1458 m ² /g	-	0.79 cc/g	-	11.5-17.0 mmol/g	(26)
Ammonia	Turkish clinoptilolite	-	-	-	-	8.12-5.17	(70)
Ammonium ion	natural Turkish clinoptilolite	-	-	-	-	5.95	(70)

Ammonium ion	coconut shell-activated carbon	-	-	-	150	2.19-2.32	(71)
Ammonia	Natural Chinese clinoptilolite	-	-	-	-	18.54	(72)
Ammonia	Chilean natural zeolite	-	-	-	-	11.4-14.8	(73)
Ammonia	Croatian natural zeolite	-	-	-	-	4.2	(74)
Ammonia	Natural Turkish (Dogantepe) zeolite	-	-	-	-	0.7-1.08	(75)
Ammonia	Croatian bentonite clay	-	-	-	-	23.07	(76)
Ammonia	China's natural clinoptilolite (Ca-form)	-	-	-	-	14.76	(77)
Ammonia	Chinese natural and modified clinoptilolite	-	-	-	-	10.5-19.3	(78)
Ammonia	Chinese natural, Na-Y and Na-P zeolite	-	-	-	-	21.68 - 64.40	(79)
Ammonia	Akita's natural and modified clinoptilolite	-	-	-	-	16.02-23.22	(80)

รายการอ้างอิง

1. Vorosmarty CJ. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*. 2000;289(5477):284-8.
2. Borgmann U. Chronic Toxicity of Ammonia to the Amphipod *Hyaella azteca*; Importance of Ammonium Ion and Water Hardness. *Environmental Pollution*. 1994;86:329-35.
3. Sabine Körner SKD, Siemen Veenstra, Jan E. Vermaat. The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to *Lemna gibba*. *Aquatic Botany*. 2001;71:71-8.
4. BBC. Eutrophication: BBC, UK; 2014. Available from: http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/edexcel/problems_in_environment/pollutionrev4.shtml.
5. Y. K. IP SFC, and D. J. RANDALL. Ammonia Toxicity, Tolerance, and Excretion. *Fish Physiology*. 2001;20:109-48.
6. Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment international*. 2006;32(6):831-49.
7. Mook WT, Chakrabarti MH, Aroua MK, Khan GMA, Ali BS, Islam MS, et al. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review. *Desalination*. 2012;285:1-13.
8. Chen Y-n, Liu C-h, Nie J-x, Luo X-p, Wang D-s. Chemical precipitation and biosorption treating landfill leachate to remove ammonium-nitrogen. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2012;15(2):395-9.
9. Sica M, Duta A, Teodosiu C, Draghici C. Thermodynamic and kinetic study on ammonium removal from a synthetic water solution using ion exchange resin. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2013;16(2):351-9.

10. Alshameri A, Ibrahim A, Assabri AM, Lei X, Wang H, Yan C. The investigation into the ammonium removal performance of Yemeni natural zeolite: Modification, ion exchange mechanism, and thermodynamics. *Powder Technology*. 2014;258:20-31.
11. Kuntke P, Geleji M, Bruning H, Zeeman G, Hamelers HV, Buisman CJ. Effects of ammonium concentration and charge exchange on ammonium recovery from high strength wastewater using a microbial fuel cell. *Bioresource technology*. 2011;102(6):4376-82.
12. Zhang F, He Z. Simultaneous nitrification and denitrification with electricity generation in dual-cathode microbial fuel cells. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2012;87(1):153-9.
13. You W-T, Xu Z-L, Dong Z-Q, Zhao Y-J. Separated performances of ammonium sulphate and ammonium chloride solutions treated by vacuum membrane distillation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2014;92(7):1306-13.
14. Košutić K, Dolar D, Strmecky T. Treatment of landfill leachate by membrane processes of nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination and Water Treatment*. 2014;55(10):2680-9.
15. Zhang J, She Q, Chang VW, Tang CY, Webster RD. Mining nutrients (N, K, P) from urban source-separated urine by forward osmosis dewatering. *Environmental science & technology*. 2014;48(6):3386-94.
16. Babou Kammoe RB, Hamoudi S. Investigation of ammonium ion removal from aqueous solutions using arene- and propylsulfonic Acid functionalized mesoporous silica adsorbents. *Journal of environmental quality*. 2014;43(3):1032-42.
17. Zheng H, Han L, Ma H, Zheng Y, Zhang H, Liu D, et al. Adsorption characteristics of ammonium ion by zeolite 13X. *Journal of hazardous materials*. 2008;158(2-3):577-84.
18. V.K. Gupta HS, M. Yari, R. Shahryari Ghoshekandi, B. Maazinejad, M. Chahardori. Removal of ammonium ions from wastewater A short review in development of efficient methods. *Global J Environ Sci Manage*. 2015;1(2):1490158.
19. Luz E. de-Bashan MM, Juan-Pablo Hernandez, Yoav Bashan. Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Research*. 2002;36:2941-8.

20. Saltali K, Sari A, Aydin M. Removal of ammonium ion from aqueous solution by natural Turkish (Yildizeli) zeolite for environmental quality. *Journal of hazardous materials*. 2007;141(1):258-63.
21. Moussavi G, Talebi S, Farrokhi M, Sabouti RM. The investigation of mechanism, kinetic and isotherm of ammonia and humic acid co-adsorption onto natural zeolite. *Chemical Engineering Journal*. 2011;171(3):1159-69.
22. Wen D, Ho YS, Xie S, Tang X. Mechanism of the Adsorption of Ammonium Ions from Aqueous Solution by a Chinese Natural Zeolite. *Separation Science and Technology*. 2006;41(15):3485-98.
23. Zhao L, Li Y, Wang S, Wang X, Meng H, Luo S. Adsorption and transformation of ammonium ion in a loose-pore geothermal reservoir: Batch and column experiments. *Journal of contaminant hydrology*. 2016;192:50-9.
24. Zare K, Sadegh H, Shahryari-ghoshekandi R, Asif M, Tyagi I, Agarwal S, et al. Equilibrium and kinetic study of ammonium ion adsorption by Fe₃O₄ nanoparticles from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*. 2016;213:345-50.
25. Wimalasiri Y, Mossad M, Zou L. Thermodynamics and kinetics of adsorption of ammonium ions by graphene laminate electrodes in capacitive deionization. *Desalination*. 2015;357:178-88.
26. Qajar A, Peer M, Andalibi MR, Rajagopalan R, Foley HC. Enhanced ammonia adsorption on functionalized nanoporous carbons. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2015;218:15-23.
27. Luo J, Lu J, Niu Q, Chen X, Wang Z, Zhang J. Preparation and characterization of benzoic acid-modified activated carbon for removal of gaseous mercury chloride. *Fuel*. 2015;160:440-5.
28. Daifullah AAM, Girgis BS, Gad HMH. Utilization of agro-residues (rice husk) in small waste water treatment plans. *Materials Letters*. 2003;57(11):1723-31.
29. Yao S, Zhang J, Shen D, Xiao R, Gu S, Zhao M, et al. Removal of Pb(II) from water by the activated carbon modified by nitric acid under microwave heating. *Journal of colloid and interface science*. 2016;463:118-27.

30. Rey A, Hungria AB, Duran-Valle CJ, Faraldos M, Bahamonde A, Casas JA, et al. On the optimization of activated carbon-supported iron catalysts in catalytic wet peroxide oxidation process. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2016;181:249-59.
31. Astamuse. Method for inhibiting the coloration of a high temperature cellulose 2010. Available from: <http://astamuse.com/ja/published/JP/No/2010159364>.
32. hmicronpowder. Hosokawa Micron Powder Systems 2015. Available from: <http://www.hmicronpowder.com/industries/chemical/activated-carbon>.
33. Aquacache. GAC Mechanism for Chemical Adsorption. Available from: <http://aquacache.com/components/wpu>.
34. Organicthailand.
35. AIK CHONG LUA aJG. PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CHARS FROM OIL PALM WASTE. *Carbon*. 1998;36(11):1663-70.
36. Jun'ichi Hayashia AK, Katsuhiko Muroyamaa, A.Paul Watkinson. Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. *Carbon*. 2000;38:1873-8.
37. Azevedo DCS, Araújo JCS, Bastos-Neto M, Torres AEB, Jaguaribe EF, Cavalcante CL. Microporous activated carbon prepared from coconut shells using chemical activation with zinc chloride. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2007;100(1-3):361-4.
38. Basta AH, Fierro V, El-Saied H, Celzard A. 2-Steps KOH activation of rice straw: an efficient method for preparing high-performance activated carbons. *Bioresource technology*. 2009;100(17):3941-7.
39. Lamia Khenniche aFB-A. Adsorptive Removal of Phenol by Coffee Residue Activated Carbon and Commercial Activated Carbon: Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamics. *Chem Eng Data*. 2010;55:4677-86.
40. Kılıç M, Apaydın-Varol E, Pütün AE. Preparation and surface characterization of activated carbons from *Euphorbia rigida* by chemical activation with $ZnCl_2$, K_2CO_3 , $NaOH$ and H_3PO_4 . *Applied Surface Science*. 2012;261:247-54.
41. Miao Q, Tang Y, Xu J, Liu X, Xiao L, Chen Q. Activated carbon prepared from soybean straw for phenol adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2013;44(3):458-65.

42. Omri A, Benzina M. Adsorption characteristics of silver ions onto activated carbon prepared from almond shell. *Desalination and Water Treatment*. 2013;51(10-12):2317-26.
43. Al Bahri M, Calvo L, Gilarranz MA, Rodriguez JJ. Diuron Multilayer Adsorption on Activated Carbon from CO₂ Activation of Grape Seeds. *Chemical Engineering Communications*. 2014;203(1):103-13.
44. F. K. Bangash aSA. Adsorption of Acid Blue 1 on Activated Carbon Produced from the Wood of Ailanthus Altissima. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2009;26(02):275-85.
45. Olugbenga Solomon Bello MAA, and Tan Tong Siang. Trend in Applied Sciences Reserch. *Academic Journals Inc*. 2011:793-812.
46. Li W, Yang K, Peng J, Zhang L, Guo S, Xia H. Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Industrial Crops and Products*. 2008;28(2):190-8.
47. Guo S, Peng J, Li W, Yang K, Zhang L, Zhang S, et al. Effects of CO₂ activation on porous structures of coconut shell-based activated carbons. *Applied Surface Science*. 2009;255(20):8443-9.
48. Sun K, Jiang Jc. Preparation and characterization of activated carbon from rubberseed shell by physical activation with steam. *Biomass and Bioenergy*. 2010;34(4):539-44.
49. Rosas JM, Bedia J, Rodríguez-Mirasol J, Cordero T. On the preparation and characterization of chars and activated carbons from orange skin. *Fuel Processing Technology*. 2010;91(10):1345-54.
50. Fu K, Yue Q, Gao B, Sun Y, Zhu L. Preparation, characterization and application of lignin-based activated carbon from black liquor lignin by steam activation. *Chemical Engineering Journal*. 2013;228:1074-82.
51. Song C, Wu S, Cheng M, Tao P, Shao M, Gao G. Adsorption Studies of Coconut Shell Carbons Prepared by KOH Activation for Removal of Lead(II) From Aqueous Solutions. *Sustainability*. 2013;6(1):86-98.

52. Fierro V, Torné-Fernández V, Celzard A. Methodical study of the chemical activation of Kraft lignin with KOH and NaOH. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2007;101(3):419-31.
53. Chen Y, Huang B, Huang M, Cai B. On the preparation and characterization of activated carbon from mangosteen shell. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2011;42(5):837-42.
54. Gao Y, Yue Q, Gao B, Sun Y, Wang W, Li Q, et al. Preparation of high surface area-activated carbon from lignin of papermaking black liquor by KOH activation for Ni(II) adsorption. *Chemical Engineering Journal*. 2013;217:345-53.
55. Chemicalbond. Giant Covalent Structure. Available from: <http://chemicalbond.wikispaces.com/3.5+Giant+Covalent+Structures>.
56. Wikimediacommons. Chemical structure of methylene blue. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Methylene_blue.svg.
57. Coman V, Robotin B, Ilea P. Nickel recovery/removal from industrial wastes: A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;73:229-38.
58. Wang J, Liu H, Yang S, Zhang J, Zhang C, Wu H. Physicochemical characteristics and sorption capacities of heavy metal ions of activated carbons derived by activation with different alkyl phosphate triesters. *Applied Surface Science*. 2014;316:443-50.
59. Karnib M, Kabbani A, Holail H, Olama Z. Heavy Metals Removal Using Activated Carbon, Silica and Silica Activated Carbon Composite. *Energy Procedia*. 2014;50:113-20.
60. Sun Y, Yue Q, Gao B, Gao Y, Xu X, Li Q, et al. Adsorption and cosorption of ciprofloxacin and Ni(II) on activated carbon-mechanism study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014;45(2):681-8.
61. Runtti H, Tuomikoski S, Kangas T, Lassi U, Kuokkanen T, Rämö J. Chemically activated carbon residue from biomass gasification as a sorbent for iron(II), copper(II) and nickel(II) ions. *Journal of Water Process Engineering*. 2014;4:12-24.
62. Tovar-Gómez R, Moreno-Virgen MdR, Moreno-Pérez J, Bonilla-Petriciolet A, Hernández-Montoya V, Durán-Valle CJ. Analysis of synergistic and antagonistic adsorption of heavy metals and acid blue 25 on activated carbon from ternary systems. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015;93:755-72.

63. Luo X, Zhang Z, Zhou P, Liu Y, Ma G, Lei Z. Synergic adsorption of acid blue 80 and heavy metal ions ($\text{Cu}^{2+}/\text{Ni}^{2+}$) onto activated carbon and its mechanisms. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015;27:164-74.
64. Guo Z, Fan J, Zhang J, Kang Y, Liu H, Jiang L, et al. Sorption heavy metal ions by activated carbons with well-developed microporosity and amino groups derived from *Phragmites australis* by ammonium phosphates activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2016;58:290-6.
65. Dwivedi AD, Dubey SP, Sillanpää M, Kwon Y-N, Lee C. Distinct adsorption enhancement of bi-component metals (cobalt and nickel) by Fireweed-derived carbon compared to activated carbon: Incorporation of surface group distributions for increased efficiency. *Chemical Engineering Journal*. 2015;281:713-23.
66. Dobor J, Perényi K, Varga I, Varga M. A new carbon–diatomite earth composite adsorbent for removal of heavy metals from aqueous solutions and a novel application idea. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2015;217:63-70.
67. Kang Y, Guo Z, Zhang J, Xie H, Liu H, Zhang C. Enhancement of Ni(II) removal by urea-modified activated carbon derived from *Pennisetum alopecuroides* with phosphoric acid activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2016;60:335-41.
68. Françoise Rouquerol JRaKS. *Adsorption by Powders and Porous Solids*. London: Academic Press; 1999.
69. E. Sabah MT, M.S. Celik Adsorption mechanism of cationic surfactants onto acid- and heat-activated sepiolites. *Water Research*. 2002;36:3957-64.
70. Karadag D, Koc Y, Turan M, Armagan B. Removal of ammonium ion from aqueous solution using natural Turkish clinoptilolite. *Journal of hazardous materials*. 2006;136(3):604-9.
71. Boopathy R, Karthikeyan S, Mandal AB, Sekaran G. Adsorption of ammonium ion by coconut shell-activated carbon from aqueous solution: kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. *Environmental science and pollution research international*. 2013;20(1):533-42.
72. Du Q, Liu S, Cao Z, Wang Y. Ammonia removal from aqueous solution using natural Chinese clinoptilolite. *Separation and Purification Technology*. 2005;44(3):229-34.

73. Englert AH, Rubio J. Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*. 2005;75(1-2):21-9.
74. Farkas A, Rozic M, Barbaric-Mikocevic Z. Ammonium exchange in leakage waters of waste dumps using natural zeolite from the Krapina region, Croatia. *Journal of hazardous materials*. 2005;117(1):25-33.
75. Sarioglu M. Removal of ammonium from municipal wastewater using natural Turkish (Dogantepe) zeolite. *Separation and Purification Technology*. 2005;41(1):1-11.
76. Sprynskyy M, Lebedynets M, Zbytniewski R, Namiesnik J, Buszewski B. Ammonium removal from aqueous solution by natural zeolite, Transcarpathian mordenite, kinetics, equilibrium and column tests. *Separation and Purification Technology*. 2005;46(3):155-60.
77. Ji ZY, Yuan JS, Li XG. Removal of ammonium from wastewater using calcium form clinoptilolite. *Journal of hazardous materials*. 2007;141(3):483-8.
78. Wang YF, Lin F, Pang WQ. Ammonium exchange in aqueous solution using Chinese natural clinoptilolite and modified zeolite. *Journal of hazardous materials*. 2007;142(1-2):160-4.
79. Wang Y, Lin F, Pang W. Ion exchange of ammonium in natural and synthesized zeolites. *Journal of hazardous materials*. 2008;160(2-3):371-5.
80. Jha VK, Hayashi S. Modification on natural clinoptilolite zeolite for its NH_4^+ retention



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

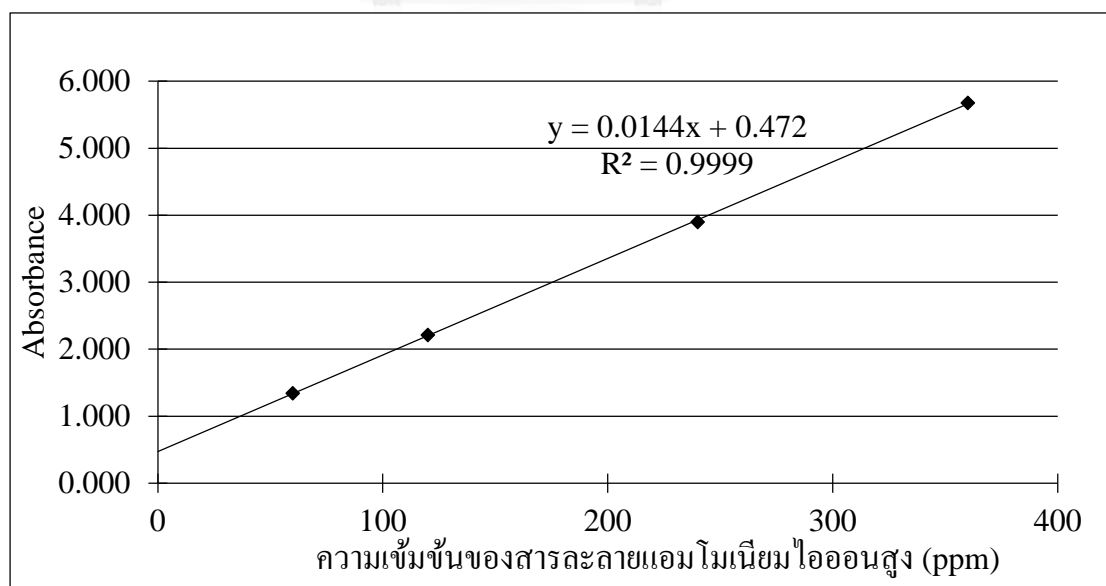
กราฟมาตรฐานของสารละลายแอมโมเนียมไอออน

กราฟมาตรฐานของสารละลายแอมโมเนียมไอออนสร้างขึ้นจากการวัดค่า Absorbance ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ของสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 360 240 120 และ 60 ppm ที่ถูกเตรียมมาจากการเจือจางสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนเข้มข้น 1,200 ppm ดังแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออนที่สูง (ppm) และค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนที่สูง (ppm)	ค่า Absorbance
60	1.342
120	2.212
240	3.897
360	5.679

จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนกับค่า Absorbance ที่วัดได้ ทำให้ได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.0144 มีจุดตัดแกน Y เท่ากับ 0.472 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9999 ดังแสดงในรูปที่ ก.1

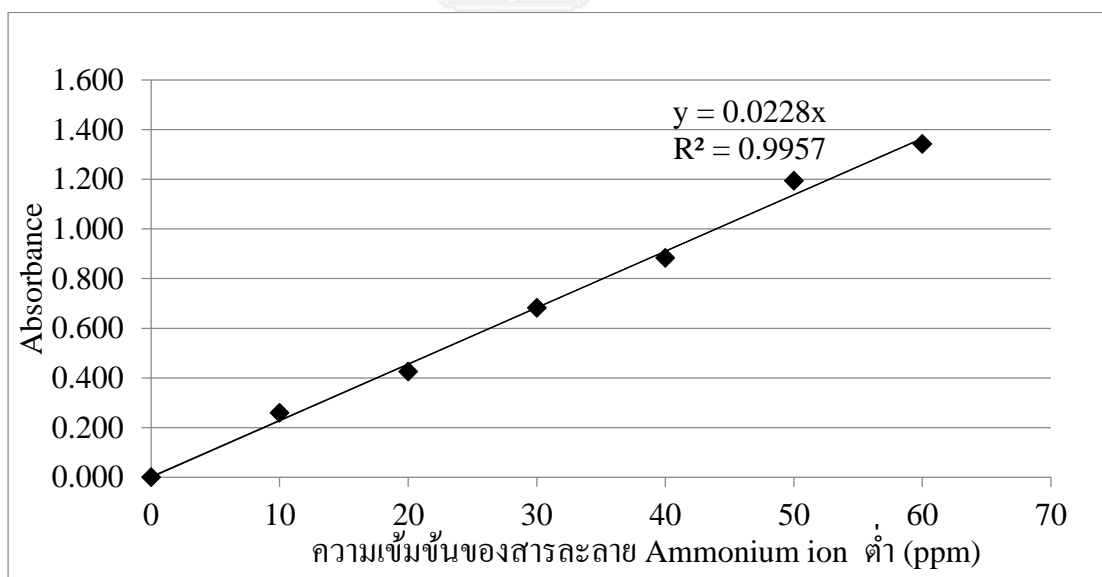


รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายแอมโมเนียมไอออนสูง

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออนที่ต่ำ (ppm) และค่า Absorbance

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออน (ppm)	ค่า Absorbance
0	0.000
10	0.259
20	0.425
30	0.682
40	0.883
50	1.193
60	1.342

จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมไอออนกับค่า Absorbance ที่วัดได้ ทำให้ได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.0228 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9957 ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายแอมโมเนียมไอออนต่ำ

**ผลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้ตัวดูดซับ
คาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์
ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC-10M-400)**

ตารางที่ ก.3 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 60 ppm โดย AC-10M-400

(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1506 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.334 ± 0.005	0.60	58.51	1.49
20	1.260 ± 0.100	6.11	55.26	4.72
30	1.193 ± 0.080	11.10	52.32	7.64
40	1.112 ± 0.012	17.14	48.77	11.18
50	1.094 ± 0.030	18.48	47.98	11.97
60	1.050 ± 0.057	21.76	46.05	13.89
90	1.013 ± 0.083	24.52	44.43	15.51
120	0.985 ± 0.019	26.60	43.20	16.73
150	0.985 ± 0.022	26.60	43.20	16.73
180	0.966 ± 0.015	28.02	42.37	17.56
210	0.965 ± 0.021	28.09	42.32	17.61
240	0.966 ± 0.016	28.02	42.37	17.56
300	0.965 ± 0.013	28.09	42.32	17.61
360	0.963 ± 0.014	28.24	42.24	17.69
420	0.965 ± 0.013	28.09	42.32	17.61

ตารางที่ ก.4 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 120 ppm โดย AC-10M-400
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1509 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.980 ± 0.101	10.49	104.72	15.19
20	1.842 ± 0.077	16.73	95.14	24.71
30	1.619 ± 0.586	26.81	79.65	40.11
40	1.546 ± 0.152	30.11	74.58	45.15
50	1.464 ± 0.094	33.82	68.89	50.81
60	1.398 ± 0.040	36.80	64.31	55.36
90	1.326 ± 0.030	40.05	59.31	60.33
120	1.269 ± 0.045	42.63	55.35	64.27
150	1.201 ± 0.066	45.71	50.63	68.96
180	1.197 ± 0.117	45.89	50.35	69.24
210	1.201 ± 0.064	45.71	50.63	68.96
240	1.202 ± 0.057	45.66	50.69	68.89
300	1.198 ± 0.082	45.84	50.42	69.17
360	1.202 ± 0.070	45.66	50.69	68.89
420	1.201 ± 0.072	45.71	50.63	68.96

ตารางที่ ก.5 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 240 ppm โดย AC-10M-400
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1740 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.547 ± 0.095	8.98	213.54	22.81
20	3.403 ± 0.087	12.68	203.54	31.43
30	3.033 ± 0.073	22.17	177.85	53.58
40	2.775 ± 0.097	28.79	159.93	69.03
50	2.677 ± 0.081	31.31	153.13	74.89
60	2.628 ± 0.036	32.56	149.72	77.83
90	2.419 ± 0.065	37.93	135.21	90.34
120	2.265 ± 0.052	41.88	124.51	99.56
150	2.125 ± 0.080	45.47	114.79	107.94
180	2.004 ± 0.030	48.58	106.39	115.18
210	1.938 ± 0.082	50.27	101.81	119.13
240	1.925 ± 0.054	50.60	100.90	119.91
300	1.926 ± 0.052	50.58	100.97	119.85
360	1.925 ± 0.043	50.60	100.90	119.91
420	1.926 ± 0.038	50.58	100.97	119.85

ตารางที่ ก.6 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-10M-400
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1512 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	4.215 ± 0.060	25.78	259.93	99.28
20	4.058 ± 0.062	28.54	249.03	110.09
30	3.715 ± 0.081	34.58	225.21	133.72
40	3.601 ± 0.070	36.59	217.29	141.58
50	3.523 ± 0.101	37.96	211.88	146.95
60	3.438 ± 0.098	39.46	205.97	152.81
90	3.279 ± 0.041	42.26	194.93	163.76
120	3.143 ± 0.100	44.66	185.49	173.13
150	3.096 ± 0.052	45.48	182.22	176.37
180	3.055 ± 0.055	46.21	179.38	179.19
210	3.057 ± 0.050	46.17	179.51	179.05
240	3.056 ± 0.050	46.19	179.44	179.12
300	3.054 ± 0.050	46.22	179.31	179.26
360	3.055 ± 0.036	46.21	179.38	179.19
420	3.054 ± 0.036	46.22	179.31	179.26

ผลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (AC-10M-500)

ตารางที่ ก.7 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 60 ppm โดย AC-10M-500

(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1512 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C _e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.312 ± 0.051	2.24	57.54	2.44
20	1.217 ± 0.022	9.31	53.38	6.57
30	1.129 ± 0.061	15.87	49.52	10.40
40	1.047 ± 0.020	21.98	45.92	13.97
50	1.013 ± 0.011	24.52	44.43	15.45
60	0.964 ± 0.096	28.17	42.28	17.58
90	0.906 ± 0.104	32.49	39.74	20.10
120	0.874 ± 0.108	34.87	38.33	21.49
150	0.858 ± 0.110	36.07	37.63	22.19
180	0.852 ± 0.102	36.51	37.37	22.45
210	0.849 ± 0.083	36.74	37.24	22.58
240	0.846 ± 0.079	36.96	37.11	22.71
300	0.847 ± 0.052	36.89	37.15	22.67
360	0.846 ± 0.109	36.96	37.11	22.71
420	0.846 ± 0.082	36.96	37.11	22.71

ตารางที่ ก.8 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 120 ppm โดย AC-10M-500
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1521 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.922 ± 0.093	13.11	100.69	19.04
20	1.704 ± 0.072	22.97	85.56	33.97
30	1.548 ± 0.082	30.02	74.72	44.65
40	1.417 ± 0.069	35.94	65.63	53.62
50	1.357 ± 0.058	38.65	61.46	57.73
60	1.276 ± 0.052	42.31	55.83	63.28
90	1.215 ± 0.059	45.07	51.60	67.46
120	1.192 ± 0.028	46.11	50.00	69.03
150	1.179 ± 0.089	46.70	49.10	69.92
180	1.175 ± 0.120	46.88	48.82	70.20
210	1.177 ± 0.094	46.79	48.96	70.06
240	1.173 ± 0.095	46.97	48.68	70.33
300	1.172 ± 0.084	47.02	48.61	70.40
360	1.173 ± 0.083	46.97	48.68	70.33
420	1.173 ± 0.072	46.97	48.68	70.33

ตารางที่ ก.9 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 240 ppm โดย AC-10M-500
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1515 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.184 ± 0.092	18.30	188.33	51.16
20	2.954 ± 0.089	24.20	172.36	66.97
30	2.694 ± 0.135	30.87	154.31	84.85
40	2.479 ± 0.085	36.39	139.38	99.63
50	2.319 ± 0.072	40.49	128.26	110.63
60	2.162 ± 0.097	44.52	117.36	121.42
90	2.014 ± 0.107	48.32	107.08	131.60
120	1.914 ± 0.056	50.89	100.14	138.48
150	1.840 ± 0.089	52.78	95.00	143.56
180	1.783 ± 0.104	54.25	91.04	147.48
210	1.786 ± 0.109	54.17	91.25	147.28
240	1.784 ± 0.059	54.22	91.11	147.41
300	1.785 ± 0.055	54.20	91.18	147.35
360	1.783 ± 0.056	54.25	91.04	147.48
420	1.783 ± 0.060	54.25	91.04	147.48

ตารางที่ ก.10 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-10M-500
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1506 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.715 ± 0.061	34.58	225.21	134.25
20	3.583 ± 0.082	36.91	216.04	143.38
30	3.395 ± 0.091	40.22	202.99	156.39
40	3.066 ± 0.089	46.01	180.14	179.14
50	2.824 ± 0.093	50.27	163.33	195.88
60	2.757 ± 0.096	51.45	158.68	200.52
90	2.644 ± 0.112	53.44	150.83	208.33
120	2.536 ± 0.078	55.34	143.33	215.80
150	2.472 ± 0.094	56.47	138.89	220.23
180	2.451 ± 0.083	56.84	137.43	221.68
210	2.453 ± 0.079	56.81	137.57	221.54
240	2.452 ± 0.097	56.82	137.50	221.61
300	2.453 ± 0.061	56.81	137.57	221.54
360	2.450 ± 0.065	56.86	137.36	221.75
420	2.451 ± 0.098	56.84	137.43	221.68

**ผลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้ตัวดูดซับ
คาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20 โมลาร์ ที่
อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC-20M-400)**

ตารางที่ ก.11 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 60 ppm โดย AC-20M-400

(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1503 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.321 ± 0.069	1.56	57.94	2.06
20	1.259 ± 0.086	6.18	55.22	4.77
30	1.200 ± 0.128	10.58	52.63	7.35
40	1.118 ± 0.090	16.69	49.04	10.94
50	1.086 ± 0.060	19.08	47.63	12.34
60	1.075 ± 0.054	19.90	47.15	12.83
90	1.022 ± 0.081	23.85	44.82	15.15
120	0.976 ± 0.095	27.27	42.81	17.16
150	0.946 ± 0.072	29.51	41.49	18.47
180	0.946 ± 0.087	29.51	41.49	18.47
210	0.951 ± 0.080	29.14	41.71	18.25
240	0.944 ± 0.077	29.66	41.40	18.56
300	0.943 ± 0.086	29.73	41.36	18.60
360	0.945 ± 0.091	29.58	41.45	18.52
420	0.944 ± 0.087	29.66	41.40	18.56

ตารางที่ ก.12 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 120 ppm โดย AC-20M-400
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1536 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.964 ± 0.092	11.21	103.61	16.00
20	1.821 ± 0.104	17.68	93.68	25.70
30	1.604 ± 0.096	27.49	78.61	40.42
40	1.517 ± 0.071	31.42	72.57	46.32
50	1.423 ± 0.079	35.67	66.04	52.69
60	1.374 ± 0.075	37.88	62.64	56.02
90	1.312 ± 0.091	40.69	58.33	60.22
120	1.228 ± 0.111	44.48	52.50	65.92
150	1.196 ± 0.103	45.93	50.28	68.09
180	1.197 ± 0.101	45.89	50.35	68.02
210	1.196 ± 0.109	45.93	50.28	68.09
240	1.199 ± 0.103	45.80	50.49	67.88
300	1.197 ± 0.122	45.89	50.35	68.02
360	1.198 ± 0.103	45.84	50.42	67.95
420	1.197 ± 0.110	45.89	50.35	68.02

ตารางที่ ก.13 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 240 ppm โดย AC-20M-400
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1500 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.380 ± 0.098	13.27	201.94	38.06
20	3.257 ± 0.078	16.42	193.40	46.60
30	2.947 ± 0.087	24.38	171.88	68.13
40	2.640 ± 0.081	32.26	150.56	89.44
50	2.536 ± 0.089	34.92	143.33	96.67
60	2.462 ± 0.078	36.82	138.19	101.81
90	2.294 ± 0.092	41.13	126.53	113.47
120	2.151 ± 0.071	44.80	116.60	123.40
150	2.064 ± 0.093	47.04	110.56	129.44
180	1.972 ± 0.065	49.40	104.17	135.83
210	1.899 ± 0.135	51.27	99.10	140.90
240	1.851 ± 0.106	52.50	95.76	144.24
300	1.847 ± 0.102	52.60	95.49	144.51
360	1.846 ± 0.101	52.63	95.42	144.58
420	1.847 ± 0.108	52.60	95.49	144.51

ตารางที่ ก.14 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-20M-400
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1530 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	4.189 ± 0.090	26.24	258.13	99.88
20	3.991 ± 0.120	29.72	244.38	113.36
30	3.706 ± 0.106	34.74	224.58	132.76
40	3.412 ± 0.092	39.92	204.17	152.78
50	3.303 ± 0.089	41.84	196.60	160.20
60	3.257 ± 0.084	42.65	193.40	163.33
90	3.158 ± 0.081	44.39	186.53	170.07
120	3.024 ± 0.103	46.75	177.22	179.19
150	2.991 ± 0.087	47.33	174.93	181.44
180	2.956 ± 0.079	47.95	172.50	183.82
210	2.958 ± 0.080	47.91	172.64	183.69
240	2.960 ± 0.071	47.88	172.78	183.55
300	2.958 ± 0.079	47.91	172.64	183.69
360	2.959 ± 0.077	47.90	172.71	183.62
420	2.958 ± 0.077	47.91	172.64	183.69

**ผลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้ตัวดูดซับ
คาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20 โมลาร์ ที่
อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (AC-20M-500)**

ตารางที่ ก.15 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 60 ppm โดย AC-20M-500

(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1512 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.319 ± 0.055	1.71	57.85	2.13
20	1.223 ± 0.074	8.87	53.64	6.31
30	1.133 ± 0.059	15.57	49.69	10.23
40	1.054 ± 0.077	21.46	46.23	13.66
50	1.041 ± 0.110	22.43	45.66	14.23
60	1.007 ± 0.100	24.96	44.17	15.71
90	0.976 ± 0.092	27.27	42.81	17.06
120	0.913 ± 0.107	31.97	40.04	19.80
150	0.857 ± 0.092	36.14	37.59	22.23
180	0.854 ± 0.110	36.36	37.46	22.36
210	0.856 ± 0.085	36.21	37.54	22.28
240	0.855 ± 0.088	36.29	37.50	22.32
300	0.857 ± 0.089	36.14	37.59	22.23
360	0.858 ± 0.097	36.07	37.63	22.19
420	0.857 ± 0.085	36.14	37.59	22.23

ตารางที่ ก.16 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 120 ppm โดย AC-20M-500
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1533 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.945 ± 0.078	12.07	102.29	17.33
20	1.718 ± 0.126	22.33	86.53	32.75
30	1.597 ± 0.091	27.80	78.13	40.97
40	1.492 ± 0.081	32.55	70.83	48.11
50	1.389 ± 0.074	37.21	63.68	55.11
60	1.297 ± 0.078	41.37	57.29	61.36
90	1.251 ± 0.103	43.44	54.10	64.48
120	1.203 ± 0.086	45.61	50.76	67.75
150	1.186 ± 0.095	46.38	49.58	68.90
180	1.184 ± 0.090	46.47	49.44	69.04
210	1.182 ± 0.084	46.56	49.31	69.17
240	1.183 ± 0.086	46.52	49.38	69.10
300	1.181 ± 0.092	46.61	49.24	69.24
360	1.182 ± 0.112	46.56	49.31	69.17
420	1.181 ± 0.094	46.61	49.24	69.24

ตารางที่ ก.17 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 240 ppm โดย AC-20M-500
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1503 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.194 ± 0.091	18.04	189.03	50.87
20	2.983 ± 0.096	23.45	174.38	65.49
30	2.771 ± 0.092	28.89	159.65	80.19
40	2.523 ± 0.070	35.26	142.43	97.37
50	2.386 ± 0.091	38.77	132.92	106.87
60	2.204 ± 0.080	43.44	120.28	119.48
90	2.001 ± 0.157	48.65	106.18	133.55
120	1.822 ± 0.091	53.25	93.75	145.96
150	1.724 ± 0.083	55.76	86.94	152.75
180	1.725 ± 0.077	55.74	87.01	152.68
210	1.727 ± 0.094	55.68	87.15	152.54
240	1.724 ± 0.107	55.76	86.94	152.75
300	1.724 ± 0.116	55.76	86.94	152.75
360	1.723 ± 0.078	55.79	86.88	152.82
420	1.724 ± 0.098	55.76	86.94	152.75

ตารางที่ ก.18 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-20M-500
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1533 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.853 ± 0.103	32.15	234.79	122.51
20	3.628 ± 0.112	36.12	219.17	137.80
30	3.455 ± 0.102	39.16	207.15	149.56
40	3.227 ± 0.065	43.18	191.32	165.05
50	2.898 ± 0.237	48.97	168.47	187.40
60	2.706 ± 0.161	52.35	155.14	200.45
90	2.615 ± 0.165	53.95	148.82	206.63
120	2.609 ± 0.091	54.06	148.40	207.04
150	2.607 ± 0.154	54.09	148.26	207.18
180	2.605 ± 0.208	54.13	148.13	207.31
210	2.604 ± 0.177	54.15	148.06	207.38
240	2.604 ± 0.150	54.15	148.06	207.38
300	2.602 ± 0.133	54.18	147.92	207.52
360	2.601 ± 0.129	54.20	147.85	207.59
420	2.603 ± 0.115	54.16	147.99	207.45

**ผลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยใช้ตัวดูดซับ
คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า (AC-COM)**

ตารางที่ ก.19 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 60 ppm โดย AC-COM
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1518 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C _e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	1.319 ± 0.094	1.71	57.85	2.12
20	1.282 ± 0.106	4.47	56.23	3.73
30	1.235 ± 0.094	7.97	54.17	5.76
40	1.194 ± 0.102	11.03	52.37	7.54
50	1.148 ± 0.084	14.46	50.35	9.53
60	1.133 ± 0.076	15.57	49.69	10.18
90	1.086 ± 0.093	19.08	47.63	12.22
120	1.037 ± 0.094	22.73	45.48	14.35
150	1.011 ± 0.071	24.66	44.34	15.47
180	0.987 ± 0.131	26.45	43.29	16.51
210	0.984 ± 0.090	26.68	43.16	16.64
240	0.986 ± 0.110	26.53	43.25	16.56
300	0.988 ± 0.144	26.38	43.33	16.47
360	0.983 ± 0.115	26.75	43.11	16.69
420	0.987 ± 0.091	26.45	43.29	16.51

ตารางที่ ก.20 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 120 ppm โดย AC-COM
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1542 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C _e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	2.067 ± 0.092	6.56	110.76	8.98
20	1.853 ± 0.103	16.23	95.90	23.44
30	1.755 ± 0.099	20.66	89.10	30.06
40	1.683 ± 0.079	23.92	84.10	34.92
50	1.553 ± 0.075	29.79	75.07	43.71
60	1.492 ± 0.089	32.55	70.83	47.83
90	1.338 ± 0.119	39.51	60.14	58.23
120	1.229 ± 0.103	44.44	52.57	65.59
150	1.226 ± 0.152	44.58	52.36	65.80
180	1.228 ± 0.104	44.48	52.50	65.66
210	1.225 ± 0.100	44.62	52.29	65.86
240	1.226 ± 0.091	44.58	52.36	65.80
300	1.227 ± 0.062	44.53	52.43	65.73
360	1.226 ± 0.093	44.58	52.36	65.80
420	1.227 ± 0.129	44.53	52.43	65.73

ตารางที่ ก.21 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 240 ppm โดย AC-COM
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1536 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.682 ± 0.109	5.52	222.92	16.68
20	3.213 ± 0.102	17.55	190.35	48.49
30	3.029 ± 0.087	22.27	177.57	60.97
40	2.888 ± 0.109	25.89	167.78	70.53
50	2.731 ± 0.105	29.92	156.88	81.18
60	2.643 ± 0.090	32.18	150.76	87.14
90	2.355 ± 0.072	39.57	130.76	106.68
120	2.206 ± 0.067	43.39	120.42	116.78
150	2.188 ± 0.091	43.85	119.17	118.00
180	2.184 ± 0.079	43.96	118.89	118.27
210	2.178 ± 0.092	44.11	118.47	118.68
240	2.177 ± 0.096	44.14	118.40	118.75
300	2.179 ± 0.083	44.09	118.54	118.61
360	2.177 ± 0.097	44.14	118.40	118.75
420	2.177 ± 0.079	44.14	118.40	118.75

ตารางที่ ก.22 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-COM
(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1533 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C _e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	4.839 ± 0.125	14.79	303.26	54.76
20	4.416 ± 0.156	22.24	273.89	83.12
30	4.156 ± 0.083	26.82	255.83	100.55
40	3.956 ± 0.066	30.34	241.94	113.95
50	3.714 ± 0.112	34.60	225.14	130.17
60	3.547 ± 0.103	37.54	213.54	141.37
90	3.303 ± 0.091	41.84	196.60	157.72
120	3.191 ± 0.099	43.81	188.82	165.23
150	3.158 ± 0.088	44.39	186.53	167.44
180	3.124 ± 0.157	44.99	184.17	169.72
210	3.111 ± 0.158	45.22	183.26	170.59
240	3.110 ± 0.132	45.24	183.19	170.66
300	3.109 ± 0.108	45.25	183.13	170.73
360	3.109 ± 0.134	45.25	183.13	170.73
420	3.109 ± 0.066	45.25	183.13	170.73

ตารางที่ ก.23 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-10M-500

ที่ 30 องศาเซลเซียส

(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1518 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.715 ± 0.126	34.58	225.21	133.19
20	3.583 ± 0.090	36.91	216.04	142.25
30	3.395 ± 0.101	40.22	202.99	155.15
40	3.066 ± 0.097	46.01	180.14	177.73
50	2.824 ± 0.096	50.27	163.33	194.33
60	2.757 ± 0.091	51.45	158.68	198.93
90	2.644 ± 0.105	53.44	150.83	206.69
120	2.536 ± 0.109	55.34	143.33	214.10
150	2.472 ± 0.095	56.47	138.89	218.49
180	2.451 ± 0.170	56.84	137.43	219.93
210	2.453 ± 0.066	56.81	137.57	219.79
240	2.452 ± 0.077	56.82	137.50	219.86
300	2.453 ± 0.062	56.81	137.57	219.79
360	2.450 ± 0.064	56.86	137.36	220.00
420	2.451 ± 0.092	56.84	137.43	219.93

ตารางที่ ก.24 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-10M-500

ที่ 40 องศาเซลเซียส

(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1542 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C _e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	3.834 ± 0.067	32.49	233.47	123.08
20	3.606 ± 0.137	36.50	217.64	138.48
30	3.438 ± 0.074	39.46	205.97	149.83
40	3.209 ± 0.101	43.49	190.07	165.30
50	2.893 ± 0.094	49.06	168.13	186.65
60	2.783 ± 0.094	50.99	160.49	194.08
90	2.652 ± 0.081	53.30	151.39	202.93
120	2.585 ± 0.094	54.48	146.74	207.46
150	2.587 ± 0.097	54.45	146.88	207.32
180	2.585 ± 0.092	54.48	146.74	207.46
210	2.584 ± 0.066	54.50	146.67	207.52
240	2.584 ± 0.069	54.50	146.67	207.52
300	2.582 ± 0.086	54.53	146.53	207.66
360	2.581 ± 0.088	54.55	146.46	207.73
420	2.583 ± 0.073	54.52	146.60	207.59

ตารางที่ ก.25 ผลประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้น 360 ppm โดย AC-10M-500

ที่ 50 องศาเซลเซียส

(ใช้คาร์บอนกัมมันต์ 0.1536 กรัม/สารละลาย Ammonium ion 150 มิลลิลิตร)

เวลา (นาที)	ค่า Absorbance	%Adsorption	ความเข้มข้น (C_e) (ppm)	ปริมาณการดูด ซับจำเพาะ (mg/g)
10	4.044 ± 0.081	28.79	248.06	109.32
20	3.854 ± 0.082	32.14	234.86	122.21
30	3.522 ± 0.123	37.98	211.81	144.72
40	3.284 ± 0.077	42.17	195.28	160.86
50	3.188 ± 0.086	43.86	188.61	167.37
60	3.085 ± 0.093	45.68	181.46	174.36
90	2.864 ± 0.099	49.57	166.11	189.34
120	2.754 ± 0.107	51.51	158.47	196.80
150	2.756 ± 0.084	51.47	158.61	196.67
180	2.755 ± 0.076	51.49	158.54	196.74
210	2.757 ± 0.071	51.45	158.68	196.60
240	2.756 ± 0.062	51.47	158.61	196.67
300	2.754 ± 0.057	51.51	158.47	196.80
360	2.755 ± 0.064	51.49	158.54	196.74
420	2.754 ± 0.087	51.51	158.47	196.80

ตารางที่ ก.26 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion

โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-10M-400

ด้วยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich

ความเข้มข้น (ppm)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\ln C_e$	$\ln q_e$
60	0.0292	0.0390	3.53	3.24
120	0.0198	0.0145	3.92	4.23
240	0.0099	0.0083	4.61	4.79
360	0.0056	0.0056	5.19	5.19

ตารางที่ ก.27 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion

โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ AC-10M-500

ด้วยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich

ความเข้มข้น (ppm)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\ln C_e$	$\ln q_e$
60	0.0382	0.0298	3.27	3.51
120	0.0205	0.0142	3.89	4.25
240	0.0110	0.0068	4.51	4.99
360	0.0073	0.0045	4.92	5.40

ตารางที่ ก.28 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion

โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-400

ด้วยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich

ความเข้มข้น (ppm)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\ln C_e$	$\ln q_e$
60	0.0304	0.0370	3.49	3.30
120	0.0199	0.0147	3.92	4.22
240	0.0105	0.0069	4.56	4.97
360	0.0058	0.0055	5.15	5.21

ตารางที่ ก.29 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion

โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-20M-500

ด้วยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich

ความเข้มข้น (ppm)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\ln C_e$	$\ln q_e$
60	0.0375	0.0303	3.28	3.50
120	0.0203	0.0145	3.90	4.24
240	0.0115	0.0065	4.47	5.03
360	0.0068	0.0048	5.00	5.33

ตารางที่ ก.30 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย Ammonium ion

โดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ AC-COM

ด้วยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ Freundlich

ความเข้มข้น (ppm)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\ln C_e$	$\ln q_e$
60	0.0280	0.0416	3.57	3.18
120	0.0191	0.0152	3.96	4.19
240	0.0084	0.0084	4.78	4.78
360	0.0055	0.0059	5.21	5.14

ตารางที่ ก.31 ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารละลายแอมโมเนียมไอออนและความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุลของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนียมไอออน (C_0) (ppm)	ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของสารละลายแอมโมเนียมไอออน (C_e) (ppm)	ความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล (q_e) (mg/g)	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) (mg/g)
AC-10M-400	60	34.24	25.66	25.80
AC-10M-500		26.19	33.54	33.76
AC-20M-400		32.89	27.06	27.24
AC-20M-500		26.69	33.05	33.21
AC-COM		35.68	24.03	24.22
AC-10M-400	120	50.58	69.01	69.24
AC-10M-500		48.74	70.28	70.40
AC-20M-400		50.36	68.01	68.09
AC-20M-500		49.36	69.12	69.24
AC-COM		52.41	65.75	65.86
AC-10M-400	240	100.94	119.88	119.91
AC-10M-500		91.11	147.41	147.48
AC-20M-400		95.54	144.46	144.58
AC-20M-500		86.97	152.72	152.82
AC-COM		118.52	118.63	118.75
AC-10M-400	360	179.79	178.78	179.26
AC-10M-500		137.68	221.44	221.75
AC-20M-400		172.98	183.36	183.82
AC-20M-500		148.08	207.36	207.59
AC-COM		183.17	170.69	170.73

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรณศิริ แสนพรม ภูมิลำเนาอยู่ที่ จังหวัดอุทัยธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2557 และในขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมีนี้ ได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้ตรวจประเมินระบบ ISO 9001 และ ISO 14001 ควบคู่ไปด้วย

