การดูดซับคองโกเรดจากสารละลายในน้ำด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส

นายกันตพงศ์ เลิศวิธี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ADSORPTION OF CONGO RED FROM AQUEOUS SOLUTION BY ADSORBENT PREPARED FROM BACTERIAL CELLULOSE

Mr. Kantapong Lerdwitee

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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับคองโกเรดจากสารละลายในน้ำด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส
โดย	นายกันตพงศ์ เลิศวิธี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อาทิวรรณ โชติพฤกษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จูงใจ ปั้นประณต)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. สุชาตา เกิดผลภัทระ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กันตพงศ์ เลิศวิธี : การดูดซับคองโกเรดจากสารละลายในน้ำด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส (ADSORPTION OF CONGO RED FROM AQUEOUS SOLUTION BY ADSORBENT PREPARED FROM BACTERIAL CELLULOSE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์, หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงแบบใหม่จากแบคทีเรียลเซลลูโลสด้วยวิธีกระตุ้นโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น โดยใช้การเผาในเตาอบที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส และทำการเปรียบเทียบระหว่างการผ่านและไม่ผ่านการการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งหมดมีพื้นที่ผิวระหว่าง 929-1150 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมีปริมาตรรูพรุนรวมที่ 0.59 – 0.71 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ 24.5 – 26.5 Å จากนั้น ศึกษาการดูดซับสารละลาย คองโกเรด (Congo red) ในน้ำด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ซึ่งเป็นการทดลองแบบกะ โดยใช้ตัวดูดซับ 0.2 กรัม ในสารละลายความเข้มข้น 80 - 160 ppm ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วใน 2 นาทีแรก และค่อยๆเข้าสู่สมดุลภายใน 120 นาที โดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับสารละลาย คองโกเรดได้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่สภาวะสมดุลสามารถดูดซับ ได้ 138.28 มิลลิกรัมกรัมคองโกเรด ต่อกรัมของตัวดูดซับ จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถใช้อธิบายผลการดูดซับโดยรวมของการดูดซับคองโกเรดจากสารละลายน้ำ ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลสในงานวิจัยนี้ ได้ดีกว่าสมการของ Linear และ Langmuir

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

5570902421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: BACTERIAL CELLULOSE / CONGO RED / ADSORPTION / ACTIVATED CARBON

KANTAPONG LERDWITEE: ADSORPTION OF CONGO RED FROM AQUEOUS SOLUTION BY ADSORBENT PREPARED FROM BACTERIAL CELLULOSE. ADVISOR: ASSOC. PROF. MUENDUEN PHISALAPHONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. PORNSAWAN ASSAWASAENGRAT, Ph.D., pp.

In this study, a new high efficiency adsorbent had been developed from bacterial cellulose by activation with conc phosphoric acid and carbonization in an oven at 400°C and 600°C, with or without following treatment by 1.0 molar HCl. All prepared activated carbons have surface areas between 929-1150 m^2/g, with the total pore volumes of 0.59 – 0.71 cm^3/g and the average pore sizes of 24.5 – 26.5 Å. After that, the adsorbents prepared from bacterial cellulose were examined for the adsorption of Congo red from aqueous solution. The experiment was performed in batch by using 0.2 g adsorbent in 200 mL Congo red solution at concentration varied from 80 - 160 ppm and 30°C. It was shown that the adsorption rates were very fast during the first 2 min and the adsorption process had reached equilibrium within 120 min. The most effective adsorbent is the activated carbon that was prepared by the carbonization at 400°C followed by the treatment of hydrochloric acid. At the equilibrium, the adsorption capacity for Congo red was 138.28 mg/g of adsorbent. Overall, Freundlich isotherm can describe the adsorption isotherm of the adsorption of Congo red from aqueous solution by the adsorbent prepared from bacterial cellulose in this study better than Linear and Langmiur isotherm.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department:	Chemical Engineering	Student's Signature .....
Field of Study:	Chemical Engineering	Advisor's Signature .....
Academic Year:	2015	Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมาได้ตามความคาดหวังของผู้วิจัยได้ เนื่องมาจากความเมตตากรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาและเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำเกี่ยวกับหัวข้อวิทยานิพนธ์ และแนวทางในการเขียนวิทยานิพนธ์ และได้ชี้แนะแนวคิดที่ลึกซึ้งในการทำวิทยานิพนธ์ ตรวจแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนคำแนะนำในการทำงานวิจัยที่ดีเสมอมา อีกท่านกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับการให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือเกี่ยวกับอุปกรณ์ทำการทดลองที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จูงใจ ปั้นประณต และ อาจารย์ ดร.สุชาตา เกิดผลภัทระ ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ คุณมิฟตะห์ฟาริด อิบนูอับดุลวาฮับ คุณอานนท์ คำแก้ว และคุณลำพูน พันธ์ทัง ศิษย์เก่าปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยสนับสนุนด้านการศึกษาและคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้จนกระทั่งมีวันนี้ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูปภาพ ..... ซ

บทที่ 1 1

บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1

บทที่ 2 4

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 เซลลูโลส (Cellulose) 4

2.2 เซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial Cellulose) 4

2.3 คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) 5

2.3.1 การผลิตถ่านกัมมันต์ 7

2.4 สีย้อม 8

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) 9

2.5.1 ลักษณะการดูดซับ 9

2.5.2 กลไกการดูดซับ 10

2.5.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and Adsorption Isotherm) 10

2.5.4 รูปแบบของ Adsorption Isotherm 10

2.5.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetic Models) 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.5.6 แบบจำลองสมดุลดูดซับ (Adsorption Isotherm Models) 13
2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 18
บทที่ 3 24
วิธีการดำเนินงานวิจัย 24
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 24
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 24
3.3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง 24
3.4. การทำกราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red สำหรับการดูดซับ 25
3.5 การเตรียมตัวดูดซับ 25
3.5.1 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 25
3.5.2 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 26
3.5.3 การหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ 26
บทที่ 4 28
ผลการทดลอง 28
4.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลส 28
4.1.1. X-Ray Diffraction (XRD.) 28
4.1.2. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) 30
4.1.3. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค BET Surface Area 34
4.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red 37
4.2 การหาสมดุลการดูดซับสารละลาย Congo red ด้วยตัวดูดที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส 38
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ 44
4.4 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและปริมาณดูดซับสูงสุด (q_{max}) 56

หน้า

บทที่ 5 58

สรุปผลการทดลอง 58

5.1 สรุปผลการทดลอง 58

5.2 ข้อเสนอแนะ 59

..... 60

รายการอ้างอิง 60

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 94

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ 23

ตารางที่ 2 แสดงค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง 34

ตารางที่ 3 ข้อมูลมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลาย Congo red (ppm) และค่าการดูดกลืนแสง 37

ตารางที่ 4 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-400)..... 41

ตารางที่ 5 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-400)..... 41

ตารางที่ 6 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-600)..... 42

ตารางที่ 7 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-600)..... 42

ตารางที่ 8 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com) 43

ตารางที่ 9 สมการไอโซเทอม ค่า R^2 และค่า χ^2 จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับสี Congo red กับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ ต่างๆ 53

ตารางที่ 10 ค่าคงที่ไอโซเทอม ค่า R^2 และค่า χ^2 จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับสี Congo red กับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ 54

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและปริมาณดูดซับสูงสุด (q_{max}) ระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลสและตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการดูดซับคองโกเรดจากสารละลายในน้ำ 56

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส 4

รูปที่ 2 เซลลูโลสจากแบคทีเรียแบบอบแห้งที่ผ่านการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [SEM] 5

รูปที่ 3 รูปเซลลูโลสจากแบคทีเรียแบบเปียก 5

รูปที่ 4 ถ่านกัมมันต์ 7

รูปที่ 5 หมู่ฟังก์ชัน : สีเอโซ 8

รูปที่ 6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม Congo Red 8

รูปที่ 7 รูปแบบของ Adsorption Isotherm 12

รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD. ของตัวดูดซับต่างๆ 29

รูปที่ 9 การแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า 31

รูปที่ 10 การแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 20,000 เท่า 32

รูปที่ 11 การแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่า 33

รูปที่ 12 แสดงผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับ 36

รูปที่ 13 แสดงผลการกระจายปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลสและตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (BJH Pore Size Distribution) 36

รูปที่ 14 กราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red 38

รูปที่ 15 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-400) 38

รูปที่ 16 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-400) 39

รูปที่ 17 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-600)..... 39

รูปที่ 18 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-600)..... 40

รูปที่ 19 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Commercial)..... 40

รูปที่ 20 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-HCl-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear..... 45

รูปที่ 21 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-HCl-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir..... 45

รูปที่ 22 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-HCl-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich..... 46

รูปที่ 23 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear..... 46

รูปที่ 24 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir..... 47

รูปที่ 25 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich..... 47

รูปที่ 26 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (AC.-HCl-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear..... 48

รูปที่ 27 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-HCl-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir 48

รูปที่ 28 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-HCl-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich 49

รูปที่ 29 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear 49

รูปที่ 30 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir 50

รูปที่ 31 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich 50

รูปที่ 32 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com.) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear 51

รูปที่ 33 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com.) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir 51

รูปที่ 34 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com.) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich 52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องมีกิจกรรมการเคลือบสีมักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมสังเคราะห์ และถ้ากระบวนการบำบัดน้ำเสียไม่มีประสิทธิภาพแล้ว ก็อาจจะเกิดปัญหาของสีย้อมสังเคราะห์ปนเปื้อนออกมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังตัวอย่างของอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสีย้อม, เส้นใย, หนังสัตว์, กระดาษ, พลาสติก ซึ่งถ้าเกิดการปนเปื้อนจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม (Ming-Shen Chiou 2006)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งมีมะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจ และเป็นพืชที่สำคัญมากชนิดหนึ่ง ทุกส่วนของมะพร้าวนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนไม่ว่าจะเป็นการบริโภค และเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้วในจากอุตสาหกรรมที่นำมะพร้าวมาเป็นวัตถุดิบนั้นจะมีน้ำมะพร้าวที่เหลือทิ้งอยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งในน้ำมะพร้าวนี้จะประกอบไปด้วย น้ำ 93% ไขมัน 1% โปรตีน 1% เกลือแร่ 1% คาร์โบไฮเดรต 5% (Giuseppe 2010) น้ำมะพร้าวที่เหลือใช้นี้ สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวุ้นมะพร้าวโดยจะทำการหมักน้ำมะพร้าวด้วยเชื้อ *Acetobactor xylinum* (Jonas 1998) และในระหว่างกระบวนการหมักนี้ จุลินทรีย์จะสังเคราะห์เซลลูโลสจากน้ำตาลกูลโคสและปล่อยออกนอกเซลล์ในลักษณะเส้นใยระดับนาโนเมตร สานต่อกันเป็นโครงตาข่ายมีสมบัติอุ้มน้ำได้ดี ผลิตภัณฑ์จึงมีลักษณะเป็นเจลหรือวุ้นหรือที่รู้จักกันในชื่อวุ้นมะพร้าว โดยวุ้นมะพร้าวที่เกิดจากกระบวนการหมักของน้ำมะพร้าวนี้ จะประกอบไปด้วยเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ ไม่มีลิกนิน และวัตถุเจือปนอื่นๆ (Pretre 1999)

จากการศึกษาค้นคว้าทั้งในและต่างประเทศ พบว่าเซลลูโลสจากแบคทีเรียจะมีความบริสุทธิ์ มีความแข็งแรงสูง มีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถนำมาพัฒนาเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้มากมาย เช่น เซลลูโลสจากแบคทีเรียสามารถนำมาทดลองใช้เป็นวัตถุดิบในการทำแผ่นฟิล์มคาร์บอน ในอุตสาหกรรมกระดาษได้นำเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาใช้ทำการวิจัยเพื่อเป็นส่วนประกอบในการผลิตกระดาษที่มีความคงทนและโค้งงอได้เพื่อใช้ในการผลิต

ธนบัตร หรือกระดาษที่มีคุณภาพสูงอื่นๆ (Yamamoto 1989) หรือการเพิ่มประสิทธิภาพของกระดาษที่ใช้ทำแผ่นป้องกันเสียงสะท้อนในลำโพง วิทยุ และหูฟัง (Y.Z. Wan 2009) ทางด้านการแพทย์ได้มีการศึกษาเพื่อนำเอาเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาทำเป็นแผ่นฟิล์ม เพื่อนำมาทำเป็นผิวหนังชั่วคราวสำหรับการรักษาทางการแพทย์ (Lin 2013) (เดชสังกรานนท์. 2555)

ทางด้านกระบวนการแยกสารได้มีการนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาใช้ในกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น โดยเยื่อแผ่นของเซลลูโลสจากแบคทีเรียนั้นได้นำมาพัฒนามาเป็นเยื่อแผ่นหลายชนิด เช่นเยื่อแผ่นสำหรับใช้ในการฟอกเลือดสำหรับผู้ป่วยโรคไต (Dieter Klemm 2001) นอกจากนี้เซลลูโลสจากแบคทีเรียยังถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Budhionoa 1999) และสามารถนำมาทำเป็นตัวรองรับในตัวเร่งปฏิกิริยาได้ (Dieter Klemm 2005)

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุดูดซับที่พัฒนาจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาวิธีการเตรียมและสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียลเซลลูโลส และศึกษาการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่พัฒนาจากแบคทีเรียลเซลลูโลส และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Congo red

a. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเตรียมและสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียลเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาดังนี้
   - อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์
   - ขั้นตอนในการกระตุ้นทางเคมี
2. ศึกษาการดูดซับสีย้อม Congo red และปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่พัฒนาจากแบคทีเรียลเซลลูโลส โดยมีปัจจัยที่ศึกษาดังนี้
   - ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Congo Red
   - ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ
   - ไอโซเทอมของปฏิกิริยาดูดซับ

b. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเตรียมและสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์จากแบคทีเรียลเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ
2. ศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่พัฒนาจากแบคทีเรียลเซลลูโลส โดยทำการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้
   - XRD : วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวอย่าง และวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของคาร์บอนกัมมันต์
   - BET : วิเคราะห์โครงสร้างความเป็นรูพรุน วัดพื้นที่ผิวของอนุภาค
   - SEM : วิเคราะห์ลักษณะของพื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง
3. ศึกษาการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่พัฒนาจากแบคทีเรียลเซลลูโลส

c. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาแบคทีเรียลเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับได้
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส
3. ได้ข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลสเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

d. ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

i. รวบรวมเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ii. จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

iii. ทำการเตรียมตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้นจากเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

iv. ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้นจากนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

v. ทำการศึกษากลไลการดูดซับสีย้อม Congo Red ด้วยตัวดูดซับที่พัฒนาได้จากเซลลูโลสจากแบคทีเรีย

vi. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง

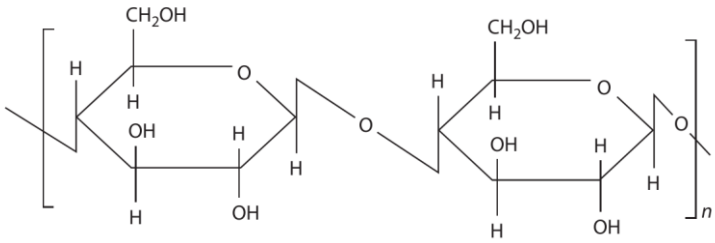
vii. จัดทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ชนิดหนึ่งในหลายๆชนิดที่พบในธรรมชาติโดยแหล่งผลิตที่สำคัญคือพืชต่างๆ เซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคส (Glucose) โมโนเมอร์หลายหน่วย ต่อซ้ำๆ กันดังรูปที่ 1 เซลลูโลสที่ได้จากพืชมักไม่บริสุทธ์ ประกอบด้วยสารอื่นๆเช่นเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นต้น



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (Phisalaphong et al., 2010)

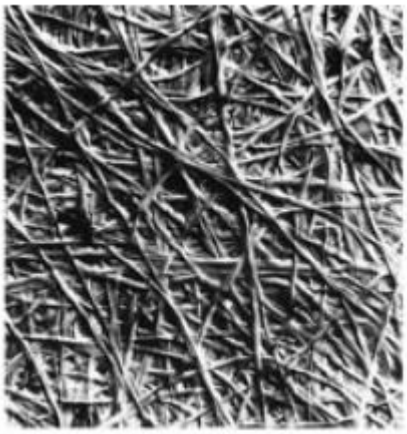
2.2 เซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial Cellulose)

เซลลูโลสนอกจากจะสังเคราะห์โดยพืชแล้ว ยังสามารถสังเคราะห์ได้จากแบคทีเรีย เช่น Acetobacter, Acanthamoeba และ Achromobacter spp. ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย นั้นเป็นเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรีย (Bacterial cellulose) จะมีโครงสร้างและคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างจากเส้นใยเซลลูโลสจากพืช ทั้งคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ตัวอย่างเช่น มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความเป็นผลึกสูง ที่มีลักษณะพิเศษในการอุ้มน้ำ ดูดความชื้น มีความยืดหยุ่นสูง และย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ (Y.Z. Wan 2009)

ในกลุ่มของแบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตเซลลูโลสจะอยู่ในสายพันธุ์ของ Acetobacter (จัดอยู่ในประเภท Gluconacetobacter) โดยแบคทีเรียที่รู้จักกันมากที่สุดและเหมาะสำหรับการผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ก็คือ *Acetobacter xylinum* (Schramm 1957)

ด้วยคุณสมบัติที่ดีของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย จึงทำให้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรม และด้านอื่นๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ทางด้านการแพทย์ ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุตกแต่งแผลเพื่อให้แผลหายได้เร็วขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถทำให้ปลอดเชื้อได้ มีความยืดหยุ่น และมีความ

เข้ากันได้ดีต่อเซลล์ (Dieter Klemm 2001) ทางด้านอาหาร ได้มีการนำเซลลูโลสจากแบคทีเรีย ทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งรู้จักกันในชื่อ วุ้นมะพร้าว (Budhionoa 1999) และเนื่องจากการที่เซลลูโลสจากแบคทีเรียมีลักษณะพิเศษในการอุ้มน้ำ ดูดความชื้น มีความยืดหยุ่นสูง มีรูพรุนสูง ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุทางวิศวกรรมการแพทย์ อวัยวะเทียมต่างๆ เช่น หลอดเลือดเทียม (Svensson 2005) และยังมีการนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียไปผลิตเป็นกระดาษลำโพง วัสดุทำหูฟัง ซึ่งทำให้ได้คุณภาพของเสียงดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุชนิดอื่น (Y.Z. Wan 2009)



รูปที่ 2 เซลลูโลสจากแบคทีเรียแบบอบแห้งที่ผ่านการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [SEM] (Dieter Klemm 2005)

รูปที่ 3 รูปเซลลูโลสจากแบคทีเรียแบบเปียก

2.3 คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon)

คาร์บอนกัมมันต์ หรือถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจาก

พืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ขี้เลื่อย ซังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซต์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์นั้นมีไม่มาก เช่น กระดูก หรือ เขาสัตว์ เป็นต้น มาผ่านกรรมวิธีการกระตุ้นทางกายภาพหรือทางเคมีจนได้ผลิตภัณฑ์สีดำมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมีพื้นที่ผิวสูงมีสมบัติในการดูดซับสารต่าง ๆได้ดี (ชาดา ศิริพัฒนานนท์ 2551)

คาร์บอนกัมมันต์ หรือถ่านกัมมันต์ หมายถึง วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และมีความพรุนซึ่งนำมาทำปฏิกิริยากับก๊าซ บางครั้งก็มีการเติมสารเคมีเข้าไปในระหว่างกระบวนการคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ตัวอย่างสารเคมี เช่น $ZnCl_2$ (Kadirvalu 2000)

คาร์บอนกัมมันต์เป็นรูปอสัณฐานของถ่าน คือ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน จะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวให้มากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ พื้นที่ผิวของคาร์บอนที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 500-2000 ตารางเมตรต่อกรัม ใช้สำหรับในการดูดซับสีกลิ่น หรือ สารปนเปื้อนอื่น ๆ

โดยทั่วไปแล้วคาร์บอนกัมมันต์หรือถ่านกัมมันต์นั้น สามารถสังเคราะห์ได้จากอินทรีย์วัตถุทุกชนิด แต่คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ และความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะแตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ อุณหภูมิ เวลา และวิธีการที่ใช้ในการกระตุ้น (Activation) มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ (นิทัศนจารุกุล 2544)

คาร์บอนกัมมันต์นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารทั้งที่อยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยแบ่งการใช้งานตามลักษณะรูปร่างของคาร์บอนกัมมันต์ คือ คาร์บอนกัมมันต์ชนิดที่เป็นผงละเอียดจะนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เช่น ใช้ในการฟอกสีน้ำตาลดิบ ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเพื่อฟอกสีและทำให้มีรสดีขึ้น ใช้ดูดกลิ่นและสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ใช้ในการดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการในอุตสาหกรรมแอลกอฮอล์และเครื่องดื่ม และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ส่วนคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นเม็ดหรือเกล็ดจะนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษทั้งที่ใช้ในกิจการทหารและที่ใช้ในงานทั่วไป เป็นต้น (ปานสง่า 2545)

2.3.1 การผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่ว ๆ ไป แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน โดยทั่วไปมักใช้วิธีเผาที่ไม่มีอากาศเพื่อไม่ให้วัตถุดิบกลายเป็นเถ้า ซึ่งอุณหภูมิในการเผาประมาณ 200–400 องศาเซลเซียส และขั้นตอนการนำถ่านไปเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ ที่เรียกว่าการกระตุ้น (activation) แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ

1. **การกระตุ้นทางเคมี** เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น แคลเซียมคลอไรด์ สังกะสี-คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปเผาในถังที่มีออกซิเจนเป็นเวลาหลายชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เลย เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน (J.W. 1974)

2. **การกระตุ้นทางกายภาพ** เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้แก๊ส หรือไอน้ำซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated stream) เพื่อทำให้สารอนินทรีย์ต่าง ๆ สลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุน (porous) อยู่ทั่วไป ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถนำมาใช้งานได้เลยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง นอกจากนี้ยังอาจจะใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันก็ได้ คือ เมื่อใช้สารเคมีกระตุ้นแล้วนำไปกระตุ้นต่อโดยใช้แก๊สหรือไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด เพื่อการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น (Kadirvalu 2000)

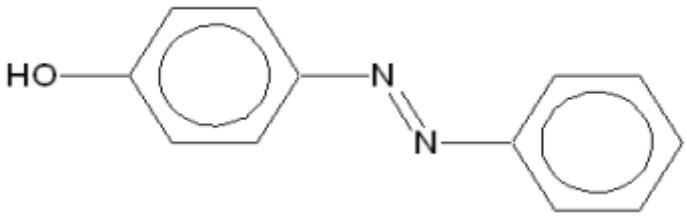
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4 ถ่านกัมมันต์ (Kadirvalu 2000)

2.4 สีย้อม

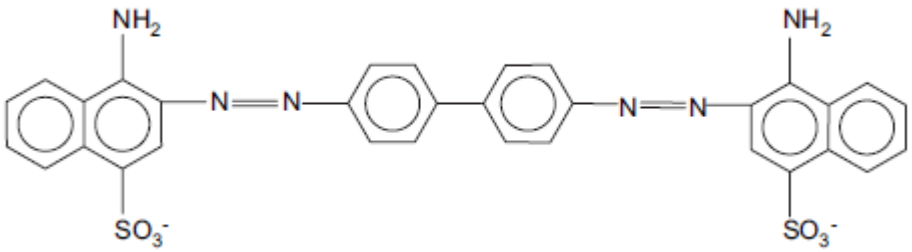
สีย้อม (Dyes) เป็นสารประกอบที่มีสีสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสีย้อมจะมีหมู่ฟังค์ชันที่ทำให้เกิดสีเรียกว่า Chromophores ได้แก่ azo group (–N=N–) , nitroso group (–N=O) , azoxy group (–N=N–), nitro group (NO_2) เป็นต้นนอกจากนี้สีย้อมยังมีออกโซโครม (Auxochromes) ซึ่งเป็นหมู่ฟังค์ชันที่ยึดสีให้ติดกับผ้าได้แก่ –COOH , $–NH_2$, $–SO_3H$, –OH เป็นต้น (M.K. Purkait a 2007)

ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมปัจจุบัน ได้มีการใช้สีสังเคราะห์ประเภทต่างๆเป็นจำนวนมาก โดยสีย้อมสังเคราะห์ที่นิยมใช้มากที่สุดจะจัดอยู่ในกลุ่มของ สีเอโซ เพราะว่ามีการยึดเกาะเส้นใยสูง ย้อมติดสีได้ง่าย จึงทำให้งานยอมผ้ามีคุณภาพและมีสีสันสดใส สีเอโซ เป็นสารพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ Chromophoe ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชั่นที่ทำให้เกิดสี และหมู่ฟังก์ชันที่เป็นสารประกอบอินทรีย์จะทำหน้าที่ ยึดเกาะกับเส้นใย อย่างไรก็ตามสีย้อมเอโซยังคงมีความเป็นอันตรายอยู่ เนื่องจาก สีย้อมเอโซจะไม่สลายตัวหรือ อาจสลายตัวได้น้อยด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และสีชนิดนี้ยังสามารถสะสมภายในสิ่งมีชีวิตซึ่งก่อให้เกิดอันตราย ร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตที่ได้รับสีดังกล่าว ซึ่งถ้ามีการปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งแล้วไหลลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ (A. MAHDAVI TALARPOSHTI 2001)



รูปที่ 5 หมู่ฟังก์ชัน : สีเอโซ (A. MAHDAVI TALARPOSHTI 2001)

โดยการวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้สีย้อม Congo red เป็นตัวแทนสีในการทดลอง ซึ่งสี Congo red เป็นสีย้อมที่ละลายในน้ำได้ดี และเป็นสีที่มีความคงทน มีความสามารถในการยึดเกาะเส้นใยสูง มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 6 (Ewa Lorenc-Grabowska 2007)



รูปที่ 6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม Congo Red (Ewa Lorenc., 2007)

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกันปรากฏการณ์การดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับเองคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกละลายนั้นจำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวและขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้จึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกได้โดยเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับองค์ประกอบนั้น

2.5.1 ลักษณะการดูดซับ

มี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลายดังนั้นองค์ประกอบที่ยึดเกาะแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถแทรกเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตามปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้องให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่นขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซหรือของเหลวชนิดนั้นและสามารถดูดซับก๊าซและของเหลวไว้ได้ในปริมาณสูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับเมื่อลดความดันของระบบลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงทำให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่าการคายซับซึ่งเป็นวิธีการนำตัวถูกละลายกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

ข. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ การสร้างสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง ปฏิกิริยาดูดซับทางเคมีจะให้ความร้อนออกมาสูงมาก ไม่ขึ้นกับความดันมากนักและดูดซับตัวถูกละลายได้ในปริมาณค่อนข้างน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ การดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีมักจะไม่สามารถเกิดการคายซับได้ ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมีแต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็อาจสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

2.5.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลวการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกันดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับการเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกันในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี

2.5.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and Adsorption Isotherm)

ตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลายและก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของของแข็งจนเกิดเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวละลายที่ผิวหน้าหรือสภาวะสมดุลของการดูดซับ (Equilibrium Adsorption) คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนักโดยทั่วไปมักควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับคงที่และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความดันที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เส้นความสัมพันธ์ที่ได้เรียกว่าไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะที่ขึ้นอยู่กับชนิดของรูพรุนบนตัวดูดซับเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่ ทั้งนี้โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเพิ่มขึ้นแต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

2.5.4 รูปแบบของ Adsorption Isotherm มี 6 รูปแบบ (S.J.Gregg 1982) แสดงในรูปที่ 7 คือ

ก. Type I Isotherm

เป็นการดูดซับที่พบมากที่สุดซึ่งดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งชั้น (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพจะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ Microporous Powders ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆเข้าใกล้

1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น Microporous หรือ Nonporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

ข. Type II Isotherm

พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอนันต์) โดยจะเกิดบน Nonporous Powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนกว้างกว่า Micropore (1.5 มิลลิเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) เกิดเมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative Pressure จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้นดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ Multi-layer

ค. Type III Isotherm

เป็นการดูดซับคล้าย Type II Isotherm แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่นเป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับของของเหลวดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าการเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวถูกดูดซับ

ง. Type IV Isotherm

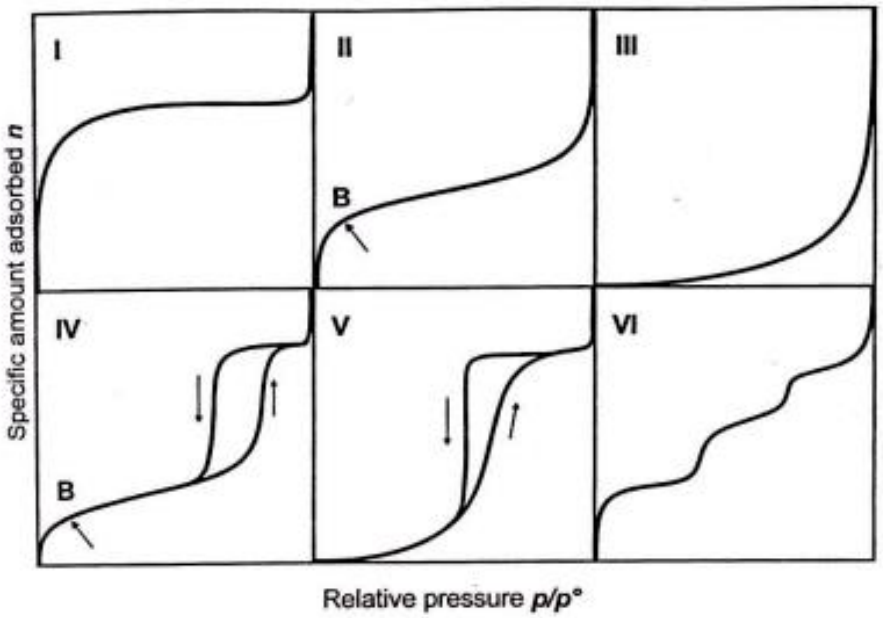
เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type II Isotherm ความหนาของโมเลกุลชั้นแรกๆแต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนเล็กๆภาพในตัวดูดซับเต็มหมดแล้วเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับรัศมีประมาณ 15-1000 อังสตรอมความชันที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับใน Type II Isotherm คือเกือบเป็น Monolayer สมบูรณ์

จ. Type V Isotherm

เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type III Isotherm ในช่วงความเข้มข้นต่ำๆแต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV Isotherm เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับมีค่าน้อยซึ่งเกิดปฏิกิริยาคล้ายกันและขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 15-1000 อังสตรอม

ฉ. Type VI Isotherm หรือ Stepped Isotherm

มีลักษณะการดูดซับเป็นชั้นๆรูปร่างของ Stepped จะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิ



รูปที่ 7 รูปแบบของ Adsorption Isotherm (Rouquerol F. 1999)

2.5.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetic Models)

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับวิเคราะห์อย่างง่ายในรูป Pseudo–First Order Equation และ Pseudo–Second Order Equation ในรูปแบบของ Ho และ McKey ปี 1998 ดังนี้คือ

1) Pseudo–First Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \qquad (2.1)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo–First Order

q_e คือปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล

q_t คือปริมาณการดูดซับสารที่เวลา t

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$q_t = 0$ ที่ $t = 0$

$q_t = q_t$ ที่ $t = t$

$q_t = q_e$ ที่ $t = \infty$

ดังนั้น

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303}t \quad (2.2)$$

2) Pseudo–Second Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo – Second Order

q_e คือ ปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล

q_t คือ ปริมาณการดูดซับสารที่เวลา*t*

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$q_t = 0$ ที่ $t = 0$ และ

$q_t = q_t$ที่ $t = t$

ดังนั้น

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.4)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (2.5)$$

2.5.6 แบบจำลองสมดุลดูดซับ (Adsorption Isotherm Models)

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆโดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (Desorption) ไปพร้อมกันซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากันที่จุดนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ และในสารละลายเช่นในน้ำจะมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆซึ่งสามารถใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/g)

c_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/L)

c_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

1) Linear Adsorption Isotherm

ปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุลโดยปกติจะเรียกว่า Henry's Law มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = K_d c_e \qquad (2.9)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)

c_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/L)

K_d คือ Distribution Coefficient หรือ Henry's Law Constants

2) Langmuir Adsorption Isotherm

เป็นรูปแบบการแสดงระบบของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับตัวถูกดูดซับถูกจำกัดให้ปกคลุมตัวดูดซับเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นไม่มีการซ้อนทับกันของโมเลกุลแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q = \frac{ac_e}{1+bc_e} \qquad (2.7)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อ c_e คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/L)

q คือปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)

a , b คือค่าคงที่

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\frac{c_e}{q} = \frac{1}{a} + \frac{bc_e}{a} \qquad (2.8)$$

เมื่อ a/b คือความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับตัวถูกละลายแต่ละชนิด

3) Freundlich Adsorption Isotherm

สมการ Freundlich Adsorption Isotherm ใช้ความสัมพันธ์ของคณิตศาสตร์ในระบบของเหลวที่ประกอบด้วยน้ำได้ดังนี้

$$q = K_f c_e^{1/n} \qquad (2.10)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)

c_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/L)

K_f คือ Freundlich Capacity Factor

1/n คือ Freundlich Intensity Parameter

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\log(q) = \log(K_f) + \frac{1}{n}\log(c_e) \qquad (2.11)$$

4) BET Adsorption Isotherm

BET Adsorption Isotherm ถูกพัฒนาโดย Brunauer Emmett และ Teller (BET) จากการดูดซับที่ถูกจำกัดให้โมเลกุลปกคลุมตัวดูดซับโดยรอบเพียงหนึ่งชั้นความหนาของ Langmuir Adsorption Isotherm มาเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) BET Adsorption Isotherm มีสมมุติฐานเบื้องต้นคือโมเลกุลของตัวดูดซับสามารถจับในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับและสามารถที่จะซ้อนทับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันได้ไปเรื่อยๆจนกว่าจะเต็มช่องว่างของตัวดูดซับความร้อนของการดูดซับของชั้นที่สองจะถูกสมมุติเท่ากับความร้อนของสารละลายข้างนอกและความแตกต่างของความร้อนของการดูดซับในชั้นแรกสมการ BET Adsorption Isotherm แสดงดังนี้

$$q_i = \frac{Ac_i}{(C - c_i)(1 + c_i)} \qquad (2.12)$$

เมื่อ q_i คือปริมาณตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

c_i คือความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)

i คือชั้นของการดูดซับเช่น 1, 2, 3,.....

A , B และ C คือ ค่าคงที่

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\frac{c_i}{q_i} = \frac{C}{A} + \left(\frac{Bc_i - 1}{A}\right)c_i - \frac{B}{A}c_i^2 \qquad (2.13)$$

2.5.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (ศรีคุณ 2551)

ปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อกระบวนการดูดซับคือลักษณะและสมบัติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

1) ลักษณะและสมบัติตัวดูดซับที่เป็นปัจจัยหลักส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับได้แก่

ก. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับ ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้การดูดซับก็จะสูง ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ความสามารถในการดูดซับจะต่ำ เช่นการใช้ซังข้าวโพดในการดูดซับ PCP เปรียบเทียบกับการใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับ PCP (33 mg/g) สูงกว่าซังข้าวโพด (10 mg/g) เนื่องมาจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีรูพรุนที่มีขนาดที่เหมาะสมมากกว่าซังข้าวโพดจึงทำให้สามารถดูดซับ PCP ได้ดีกว่า

ข.ขนาดของตัวดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กอาจทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้น

ค. เคมีที่ผิวหน้า

หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่นถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วยแต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิลความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2) ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ

ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

ก.ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลายทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลงเพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อนตัวอย่างเช่นการดูดซับฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ด้วยชีวมวลเชื้อรา Phanerochaete chrysosporium และชีวมวลเห็ดนางฟ้า Pleurotus sajor caju พบว่าลำดับความสามารถดูดซับ 2,4,6-TCP > 4-CP > 2-CP >ฟีนอลเนื่องจากสารประกอบคลอโรฟีนอลมีความสามารถละลายน้ำน้อยกว่าฟีนอลจึงทำให้มีความสามารถดูดซับที่ดีกว่า

ข. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกรณีสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้นการดูดซับจะมากขึ้นเพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลงซึ่งดูได้จากการดูดซับ PCPและ TCP ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่าความสามารถดูดซับ PCP สูงกว่า TCPเนื่องจาก PCP มีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

สูงกว่า TCP จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีความสามารถดูดซับ PCP มากกว่า TCP

ค.ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล

นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย เช่นความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้นเพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น

ง. ผลของ $[H^+]$ หรือ pH

วัสดุดูดซับประเภท คาร์บอน (เช่นถ่านกัมมันต์) เมื่อ $[H^+]$ ในระบบเพิ่มขึ้น จะทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางมากขึ้นเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้วค่อนข้างจะมีประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดีขึ้น ดังนั้นพีเอช (pH) จึงมีผลต่อความสามารถดูดซับ ตัวอย่างเช่นการดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP ด้วยกากตะกอนจากระบบบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) ความสามารถในการดูดซับของสารประกอบคลอโรฟีนอลโดยกากตะกอนขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายโดยการดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง และการดูดซับฟีนอลด้วยกากตะกอนแห้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 6 ถึง 8

จ.ผลของอุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับที่พื้นผิวจะลดลงเนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

3) ความปั่นป่วน

นอกจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแล้ว อัตราเร็วโดยรวมในการดูดซับยังขึ้นกับการแพร่ผ่านของโมเลกุลผ่านชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายและตัวดูดซับ (Film diffusion) และ การแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนภายในวัสดุดูดซับ (Pore diffusion) ถ้าสารละลายมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบวัสดุดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มอาจเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงการแพร่ผ่านของสารเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กอาจ เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ

2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากแหล่งต่างๆ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ

วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ ได้ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปีและอายุ 5 ปี โดยที่อุณหภูมิและเวลาเป็นตัวแปรในขั้นตอนคาร์บอไนเซชัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนเซชันของไม้ทั้งสองชนิดคือ ที่เวลา 45นาที และ อุณหภูมิ 450 $^{\circ}$C ในขั้นตอนการกระตุ้นถ่านคาร์บอนมีสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ อุณหภูมิ 900 $^{\circ}$C เป็นเวลา 150 นาที ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.3 - 0.6 มิลลิเมตร และใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี คือค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.1809 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 6.37 ร้อยละผลิตภัณฑ์ 33.14 ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ 1497.32 ตารางเมตรต่อกรัม และ พื้นที่ผิวแบบบีอีที 1076.15ตารางเมตรต่อกรัม (จินดาพันธ์ไพโรจน์ 2543)

สราวุธ ศรีคุณ ได้ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่ว ด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการคาร์บอไนเซชันสองแบบ คือ กระบวนการคาร์บอไนเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และ ภายใต้ความดันสูญญากาศ และทำการกระตุ้นต่อด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคาร์บอไนเซชันภายใต้ความดันสูญญากาศ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู ดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคาร์บอไนเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนในส่วนของการบำบัดถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะปริมาตรรูพรุนประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 แบบดีขึ้น เมื่อนำตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนและบำบัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตรมาดูดซับสียอมต่างๆ พบว่าสามารถดูดซับสี BasicGreen 4 ได้มากกว่าสี Acid Blue 113 และสี Direct Blue 80 พบว่าไอโซเทอมการดูดซับสี BasicGreen 4 และไอออนโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบสิกกรีน 4 เท่ากับ 312.50 43 mg/g และไอออนโลหะเท่ากับ 7.974 mg./g

(ศรีคุณ 2551)

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีอะมิโดแบล็คโดยการดูดซับ ด้วยถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ต่อเนื่องด้วยการย่อยสลายด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (แบบผสมผสาน) ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีอะมิโดแบล็คได้ดีแต่จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีเริ่มต้น โดยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูด

ซับสีอะมิโดแบล็คที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ได้ดีที่สุด รองลงมา คือ 2 มิลลิโมลาร์ แต่ยังคงพบสารสีที่คงเหลือหลังจากการดูดซับทั้ง 2 ความเข้มข้น จากนั้นเมื่อนำสารที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มากำจัดต่อเนื่องด้วยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนเป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าวิธีการกำจัดแบบผสมผสานสามารถกำจัดสีอะมิโดแบล็คที่ความเข้มข้น 1 และ 2 มิลลิโมลาร์ได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีสารสีหลงเหลืออยู่ ดังนั้นจากการศึกษาสรุปได้ว่าการกำจัดสีอะมิโดแบล็คด้วยวิธีผสมผสานน่าจะเป็นวิธีที่นำมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนโดยเฉพาะมีประสิทธิภาพดีเมื่อสีมีความเข้มข้น 1 และ 2 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากกำจัดสีได้สมบูรณ์จากการตรวจวัดของความยาวคลื่นระหว่าง 350-700 นาโนเมตร อย่างรวดเร็วภายใน 1 วันของการทดลองเท่านั้น (นิ่มรัตน์ 2553)

ลลิดา นิทัศนจารุกุล ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือเปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้เกลือแกง (NaCl) ในขั้นตอนการทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านพร้อมกับการกระตุ้นคือ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อเกลือแกงที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ถ่านมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดคืออัตราส่วน 1:0 สำหรับถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด โดยถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ จะมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดเท่ากับ 567 และ 532 มิลลิกรัมของไอโอดีนต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ตามลำดับ และสามารถสรุปได้ว่า การแช่วัตถุดิบด้วยสารละลายเกลือแกงอิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบแห้ง แล้วนำมาทำการเผาและกระตุ้น ก็เพียงพอที่จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูง และปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวตะกั่วพบว่า การดูดติดผิวตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ตั้งแต่พีเอช 2 ถึงพีเอช 9 และที่พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นตั้งแต่ 4 ขึ้นไป พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสูงกว่า 90% ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการดูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์ ร่วมกับการตกตะกอนของตะกั่ว ผลของเวลาสัมผัสพบว่าสมดุลของการดูดติดผิวสำหรับถ่านทั้งสองชนิดคือ 10 นาที ผลของการหาไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดิช แสดงให้เห็นว่าถ่านเปลือกทุเรียนมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงกว่าถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (นิทัศนจารุกุล 2544)

- การสังเคราะห์วัสดุดูดซับจากเซลลูโลสจากแหล่งต่างๆ

จิตตรา ดอกบัว และคณะ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเซลลูโลสฟอสเฟตจากฟางข้าวและชานอ้อยเพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในฟางข้าวและชานอ้อยที่ผ่านปฏิกิริยาฟอสฟอไรเลชัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลลูโลสฟอสเฟตที่เตรียมได้จากฟางข้าวและชานอ้อยในการดูดซับโลหะหนัก ผลการวิจัยพบว่าปริมาณฟอสเฟตในฟางข้าวและชานอ้อยเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นในการทำปฏิกิริยา

ฟอสฟอไรเลชัน และเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการและน้ำเสียจากโรงงาน พบว่าเซลลูโลสฟอสเฟตจากฟางข้าวและชานอ้อยมีความสามารถในการดูดซับ ตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม และเซลลูโลสฟอสเฟตจากฟางข้าวมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ดีกว่าเซลลูโลสฟอสเฟตจากชานอ้อย (ดอกบัว 2551)

Nabais และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกอัลมอนด์ ซึ่งพบว่าเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักถึงร้อยละ 32.5 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ร้อยละ 25.5 และ 24.8 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยที่ในการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้นอยู่ในสภาวะ คาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้ก๊าซ N_2 85 cm^3/ml แล้วกระตุ้นด้วยก๊าซ CO_2 อัตราการไหล 85 cm^3/ml ที่อุณหภูมิ 800 $^{\circ}C$ ซึ่งจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวแบบ BET สูงถึง 1,138 m^2/g และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก เท่ากับ 0.49 cm^3/g จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันพบหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ เอสเทอร์ และ แลกโตนเป็นต้น (João M. Valente Nabais 2011)

Y.Z. Wan และคณะ ได้ทำการศึกษานาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียโดยนำมาพัฒนาเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ โดยการรวมระหว่าง Starch Plasticised กับ กลีเซอรอล ด้วยการ Solution Impregnation และพบว่ากลไกการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมนี้เป็นไปตามแบบ Fickan Diffusion ซึ่งนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียนี้จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของเซลลูโลสให้ดีขึ้นทั้งในเรื่องของ สมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Y.Z. Wan 2009)

- การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

M.K.Purkait และคณะ ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อม Congo Red โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น ค่าพีเอช และอุณหภูมิ ซึ่งในการทดลองเป็นการทดลองแบบ Batch (ทราบปริมาณตัวดูดซับคาร์บอนต์กัมมันต์ 1.0 g/L) และผลการศึกษาสมการไอโซเทอมของพบว่าสอดคล้องกับแบบสมการ Freundlich และจลนศาสตร์ของการดูดซับศึกษาจากแบบจำลองพบว่าจลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second Order. (M.K. Purkait a 2007)

Tor และคณะ ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อม Congo Red ด้วยตัวดูดซับ Acid activated red mud โดยทำการทดลองแบบ Batch โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ เช่น ระยะเวลาสัมผัส ผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นของสีย้อมเบื้องต้น พบว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 90 นาที โดยที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมเท่ากับ 7 และผลการศึกษาสมการไอโซเทอมของพบว่าสอดคล้องกับแบบสมการ Langmuir (Ali Tor 2006)

M. Ghaedi และคณะ ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อม Congo Red ด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจาก Myrtus communis (AC–MC) และ pomegranate (AC–PG) ทำการทดลองแบบ Batch พบว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 30 นาที และผลการศึกษาสมการไอโซเทอมของพบว่าสอดคล้องกับแบบสมการ Langmuir สำหรับ AC–PG และสอดคล้องกับแบบสมการ Freundlich สำหรับ AC–MC และจลนศาสตร์ของการดูดซับศึกษาจากแบบจำลองพบว่าจลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second Orderและค่าการดูดซับจำเพาะของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจาก AC–MC และ AC–PG อยู่ที่ 19.231 and 10 mg/g ตามลำดับ (Mehrorang Ghaedi and Reza Sahraei 2012)

- การสังเคราะห์วัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

J. Jame และ R.S. Rao ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบแกลบ พบว่าแกลบประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน คือ เถ้าแกลบ 20 % เซลลูโลส (Cellulose) 38 % ลิกนิน (Lignin) 22 % เพนโทส (Pentose) 18 % และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ 2 % (J. James 1986)

F. Adam ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแกลบ พบว่า เถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาออกไซด์ (Silica oxide, SiO_2) มากกว่า 94 % (F.Adam 1991)

ณพงศ์ เทียรฆโรจนกุล ได้ศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยการสังเคราะห์ตัวดูดซับจากแกลบ 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าแกลบไม่ต้มกรด เถ้าแกลบต้มกรด และซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรด เพื่อเปรียบเทียบหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทำการทดลองด้วยชุดปั่นกวนจากเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรดเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรด โดยการดูความเป็นผลึกด้วยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ พบว่าซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรดมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึกของซิลิกาคลอไรด์ และบางส่วนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน และจากการตรวจวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรดโดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ พบว่าประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 92.50 และจากการตรวจวัดพื้นที่และปริมาตรของรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที พบว่าพื้นที่ผิวของซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรดเท่ากับ 223.4 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 30.98 อังสตรอม จากศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาจากเถ้าแกลบ พบว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 7 ชั่วโมง และผลการศึกษาสมการไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟลุดดลิชได้สมการเป็น $q_e = \frac{158.7301C_e}{6.1111 - C_e}$ และ $q_e = 0.3310C_e^{0.4289}$ตามลำดับ และมีค่า R^2ของการดูดซับ

สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟลุดดลิช คือ 0.7746 และ 0.7621 ตามลำดับ (ณพงศ์ เทียรฆโรจนกุล 2553)

รวินทร์ สุทธะนันท์ ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมททิลีนบลู โดยใช้แกลบดัดแปรการทดลองนี้ใช้แกลบดัดแปรทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก นำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมททิลีนบลู ทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสีย้อมเมททิลีนบลู นอกจากนั้นยังทำการศึกษาไอโซเทอม จลนศาสตร์และข้อมูลเทอร์โมเคมี ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสีย้อมเมททิลีนบลูมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไอโซเทอมของการดูดซับ ศึกษาจากแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าสอดคล้องกับแบบสมการฟรุนดลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ (สุทธะนันท์ 2554)

ขนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ และคณะ ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้ ระยะเวลาสัมผัส ผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับ และสารละลายที่เหมาะสมในการชะล้างสีย้อมออกจากตะกอนจุลินทรีย์ ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิต กับตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตมีความแตกต่างกัน ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตมีความสามารถในการดูดซับสีได้สูงกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว และยังพบอีกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสี่พระยา มีความสามารถในการดูดซับสีได้มากกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานฟอกย้อม สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสี่พระยาจะใช้ระยะเวลาสัมผัส 6 ชั่วโมงในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานฟอกย้อมใช้ระยะเวลาสัมผัสเพียง 3 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดเท่ากับ 6.12 มิลลิกรัมต่อกรัม-เซลล์ โดยที่ pH ที่เหมาะสมกับตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตเท่ากับ 7 ในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตจะพบว่าที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง และ 0.1% SDS มีประสิทธิภาพในการชะล้างตะกอนได้ดีที่สุด และผลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์ พบว่า ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตจะแสดงความสามารถในการดูดซับสีสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 (ชัยรัตนาวรรณ 2552)

ตารางที่ 1 ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ

Adsorbents	Adsorption capacity (mg/g)	Sources
Clay	300	M.Bagane et al., 2000
Montmorillonite clay	289.12	C.A.P. Almeida et al., 2009
Diatomite	198	M.A. Al-Ghouti et al., 2003
Perlite	162.3	M. Dogan et al., 2000
Diatomite (Jordon)	156.6	R.A. Shawabkeh et al., 2003
Bentonite	150	G. McKay et al., 1986
Spent activated clay	127.5	G. McKay et al., 2007
Hexane-extracted spent bleaching earth	120.5	C.K. Lee et al., 1997
Carbonised spent bleaching earth	94.5	C.K. Lee et al., 1997
Fibrous clay minerals	85	M. Hajjaji et al., 2006
Pyrophyllite	70.42	A. Gucek et al., 2005
Zeolite	53.1	M. Dogan et al., 2000
Palygorskite	50.8	A. Al-Futaisi et al., 2007
Amorphous silica	22.66	C. Woolard et al., 2008
NaOH-treated pure kaolin	20.49	D. Ghosh et al., 2002
NaOH-treated raw kaolin	16.34	D. Ghosh et al., 2002
Pure kaolin	15.55	D. Ghosh et al., 2002
Raw kaolin	13.99	D. Ghosh et al., 2002
Zeolite	10.82	C. Woolard et al., 2002
Calcined pure kaolin	8.88	D. Ghosh et al., 2002
Calcined raw kaolin	7.59	D. Ghosh et al., 2002
Clay	6.3	A. Gurses et al., 2004
Glass wool	2.24	S. Chakrabarti et al., 2005

ที่มา : (Mohd. Rafatullaha 2010)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บีกเกอร์ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
2. ไมโครปิเปต
3. แท่งแก้วคนสาร
4. เครื่องชั่ง (Mettler Toledo รุ่น AX 205 ที่มีความแม่นยำ ± 0.0001 กรัม)
5. เครื่อง UV-Spectrophotometer
6. เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Hotplate and Magnetic Stirrer รุ่น C-MAG HS7, IKA)
7. ตู้อบ
8. เตาเผา
9. ตะแกรงขนาดรู 125 ไมโครเมตร
10. ขวดน้ำกลั่น
11. Syring Filter Nylon 13 mm.(LUBITECH)
12. ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 และ 1000 มิลลิลิตร

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. สารละลายกรดฟอสฟอริก
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก
4. สารละลาย Congo red

3.3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% โดยมวลต่อปริมาตร

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10.00 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

- สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85 % โดยมวลต่อปริมาตร

3.4. การทำกราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red สำหรับการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 500 ppm โดยชั่งสีย้อม Congo red 0.5 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน

2. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 80, 100, 120, 140 และ 160 ppm โดยการเจือจางจากสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 500 ppm

3. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Congo red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

4. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Congo red กับค่าการดูดกลืนแสง

3.5 การเตรียมตัวดูดซับ

3.5.1 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก

1. นำเซลลูโลสจากแบคทีเรีย 500 กรัม มาแช่กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 1 ลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ล้างเซลลูโลสที่ได้ด้วยน้ำ DI. จนกระทั่งมีค่า pH ประมาณ 7 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่ผ่านการอบ มาแช่กับสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ชั่งเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่ผ่านการอบ 22 กรัม ใส่ชามระเหย นำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิของการเผาเป็น 600 องศาเซลเซียส ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

3.5.2 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก

1. นำเซลลูโลสจากแบคทีเรีย 500 กรัม มาแช่กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 1 ลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ล้างเซลลูโลสที่ได้ด้วยน้ำ DI. จนกระทั่งมีค่า pH ประมาณ 7 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่ผ่านการอบ มาแช่กับสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% โดยมวลต่อปริมาตรด้วยอัตราส่วน 1:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ชั่งเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่ผ่านการอบ 22 กรัม ใส่ชามระเหย นำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปกวนพร้อมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 โมลาร์ และนำไปอบที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ DI จนกระทั่งมีค่า pH ประมาณ 7 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของการเผาเป็น 600 องศาเซลเซียส ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

3.5.3 การหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

1. ชั่งตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 0.2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลาย Congo red ความเข้มข้น 80 ppm ใส่ในขวดลูกรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ ในข้อ 1 ปริมาณ 200 มิลลิลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. นำไปกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส
4. เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที (เป็นเวลา 240 นาที)
5. นำสารละลายตัวอย่างมาแยกตัวดูดซับ โดยใช้ Syring Filter ในการแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวดูดซับ และคำนวณความเข้มข้นของ Congo red ที่เหลือในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน
7. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณดูดซับจำเพาะจากสมการ

$$q_e = \left[\frac{C_o - C_e}{m}\right] \times V$$

เมื่อ q_e = น้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (µg/g)

C_o = ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red เริ่มต้น (µg/ml)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (µg/ml)

m = น้ำหนักของสารดูดซับ (g)

V = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ (ml)

8. ทำการทดลองข้อ 1 - 7 ซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย Congo red จาก 80 ppm เป็น 100, 120, 140 และ 160 ppm
9. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับเป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส, คาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส และคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียม และศึกษาลักษณะคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลส จากนั้นทดสอบการใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในการดูดซับ Congo red จากสารละลายในน้ำ และทดสอบหาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) ที่เหมาะสมในการทำนาย สมดุลของการดูดซับ Congo red จากสารละลายในน้ำ โดยการเปรียบเทียบข้อมูลการดูดซับจากผลการทดลองกับ ผลการคำนวณจากทฤษฎีโดยใช้สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ

4.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลส

จากข้อมูลงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับ Congo red จากสารละลายในน้ำด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส โดยตัวดูดซับที่เตรียมนั้นมีทั้งหมด 4 ชนิด ดังนี้

1. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-400)

2. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC. -HCl-400)

3. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (AC.- 600)

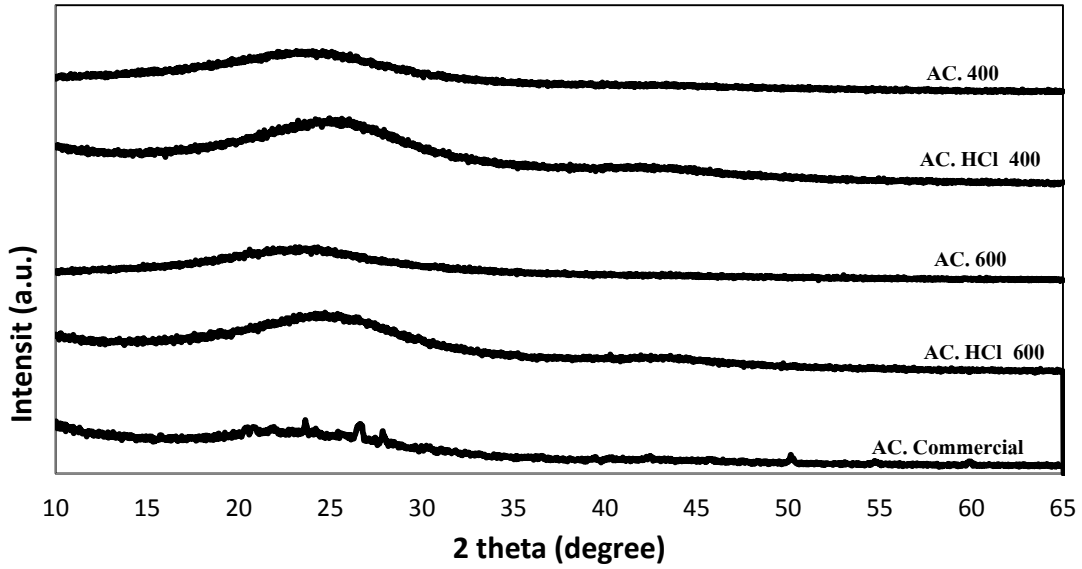
4. ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (AC. -HCl-600)

ทำการทดสอบเพื่อศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ เปรียบเทียบกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม (AC, Commercial) โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น X-Ray Diffraction (XRD), BET Surface area และ Scanning Electron Microscopy (SEM)

4.1.1. X-Ray Diffraction (XRD.)

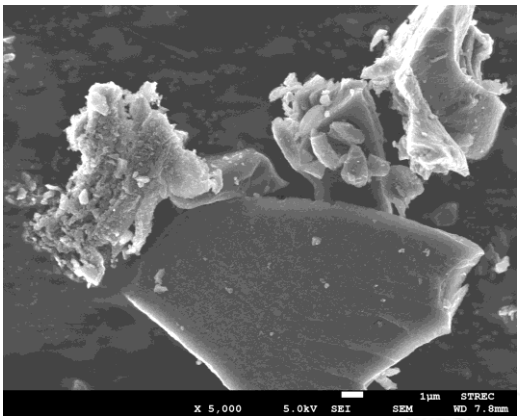
X-Ray Diffraction (XRD) เป็นเทคนิคทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวดูดซับต่างๆ ได้แก่ ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.- 400) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.- HCl 400) ตัวดูดซับ

คาร์บอนกัมมันต์เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.- HCl-600) และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม (AC, Commercial) ได้ลักษณะของกราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระว่าง 2theta (2θ) และ ความสูงของพีค (Intensity) ดังแสดงในรูปที่ 8 พบพีคกว้างของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.- 400) และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.- HCl-400) ที่ 2θ เท่ากับ 23.1° และ 25.0° ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.- 600) และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.- HCl-600) ที่ 2θ เท่ากับ 23.1° และ 24.7° ตามลำดับ ลักษณะพีคที่กว้างแสดงโครงสร้างเป็นอสัณฐานที่เด่นชัด โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลสทั้งหมดมีลักษณะพีค ใกล้เคียงกับพีคของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม (AC, Commercial)

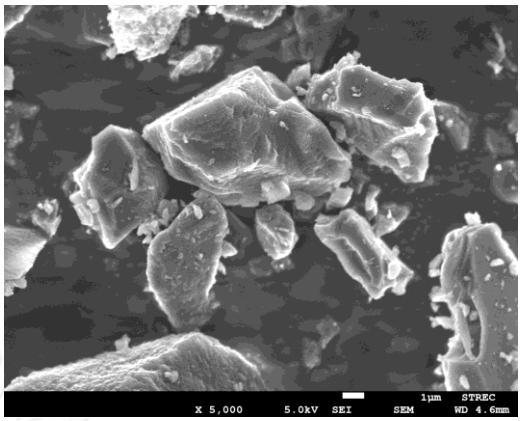


รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD. ของตัวดูดซับต่างๆ : ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.-400); ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.-HCl-400); ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600); ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-HCl-600) และตัวดูดซับคาร์บอนกัม มันต์เกรดการค้า (AC.-Commercial)

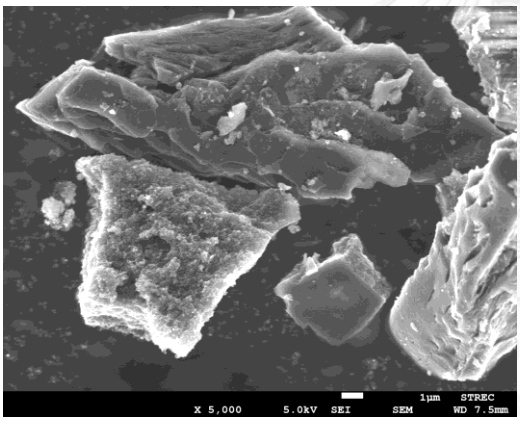
4.1.2. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM)



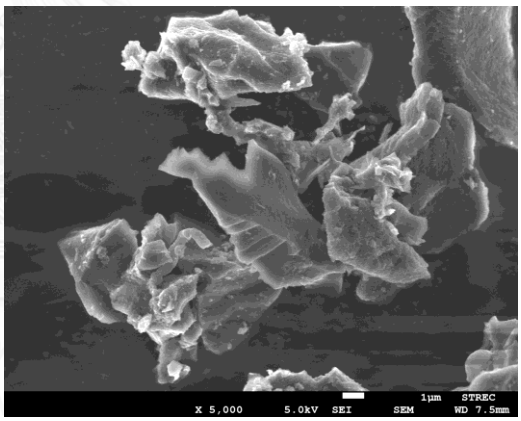
(a.1) AC.-400 ×5,000



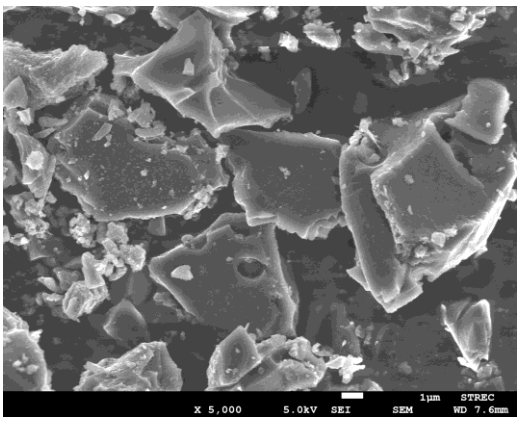
(b.1) AC.-HCl-400 ×5,000



(c.1) AC.-600 ×5,000

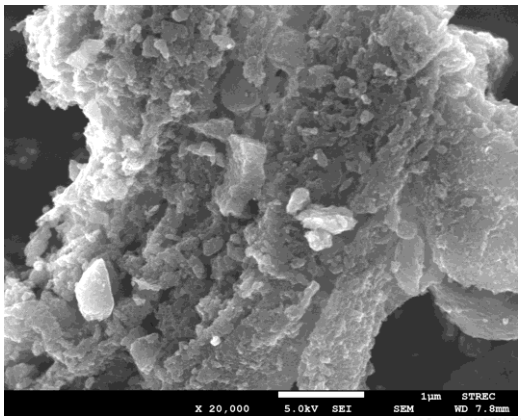


(d.1) AC.-HCl-600 ×5,000

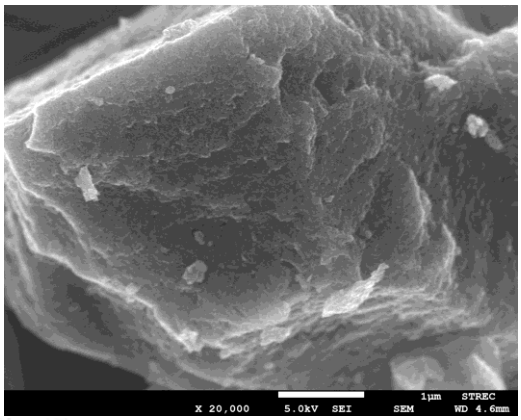


(e.1) AC.-Com ×5,000

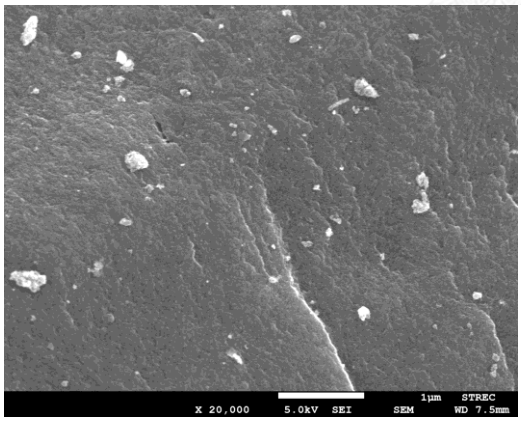
รูปที่ 9 การแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า : (a.1) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 °C; (b.1) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 °C; (c.1) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C; (d.1) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 °C; (e.1) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า



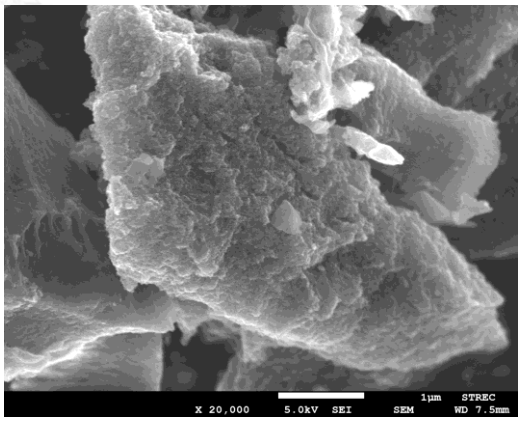
(a.2) AC.-400 ×20,000



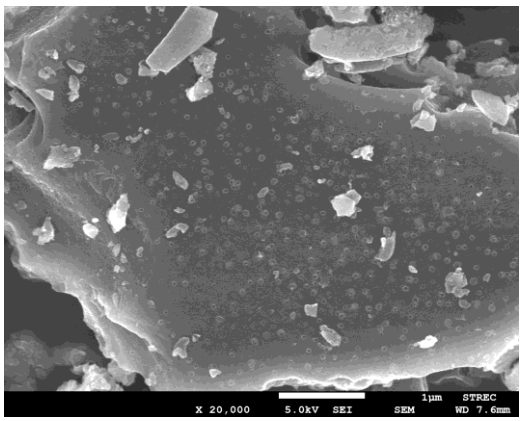
(b.2) AC. -HCl -400 ×20,000



(c.2) AC.-600 ×20,000

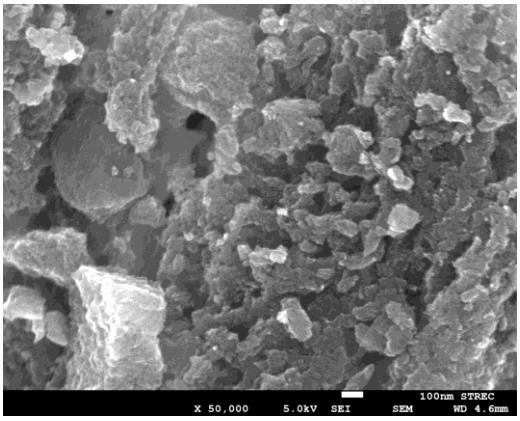


(d.2) AC.- HCl -600 ×20,000

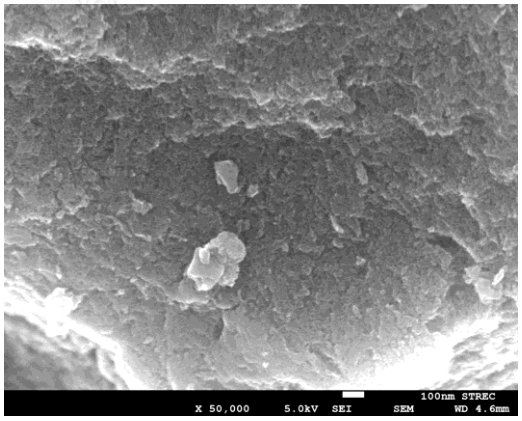


(e.2) AC.-Com ×20,000

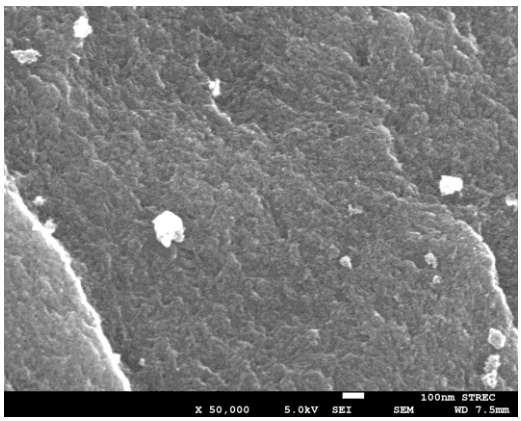
รูปที่ 10 การแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 20,000 เท่า : (a.2) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 °C; (b.2) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 °C; (c.2) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C; (d.2) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 °C; (e.2) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า



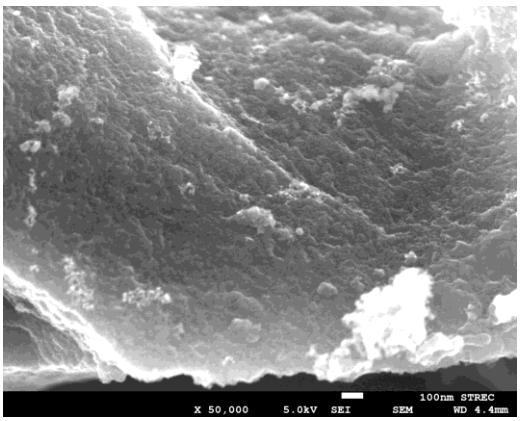
(a.3) AC.-400 ×50,000



(b.3) AC.- HCl -400 ×50,000



(c.3) AC.-600 ×50,000



(d.3) AC. -HCl -600 ×50,000

รูปที่ 11 การแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่า : (a.3) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C; (b.3) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C; (c.3) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C; (d.3) ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C

จากรูปที่ 9 – 11 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ด้วยกำลังขยายต่างๆ ตั้งแต่ 5,000 เท่า ถึง 50,000 เท่า ภาพแสดงพื้นผิวของตัวอย่างโดยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) ด้วยกำลังขยาย 5,000 ไม่แสดงความแตกต่างของพื้นผิวถ่านกัมมันต์แต่ละแบบ อย่างไรก็ดีเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 20,000 และ 50,000 เท่า ภาพ SEM แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีความขรุขระค่อนข้างมากของถ่านกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลส โดยที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้าแสดงลักษณะพื้นผิวที่เรียบกว่า (รูปที่ 10)

จากข้อจำกัดของกำลังขยายของเครื่อง SEM ภาพขยายจนถึงกำลังขยายสูงสุดที่ 50,000 เท่า ยังไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะความเป็นรูพรุนที่ชัดเจน และไม่สามารถประมาณขนาดของรูพรุนของวัสดุดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากภาพ SEM ได้ ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้มีขนาดของรูพรุนที่เล็กมาก ในระดับนาโนเมตร จึงได้พิจารณา ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ด้วยเทคนิค BET Surface Area ต่อไป โดยได้วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน การกระจายของขนาดรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของรูพรุน ของตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1.3

4.1.3. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค BET Surface Area

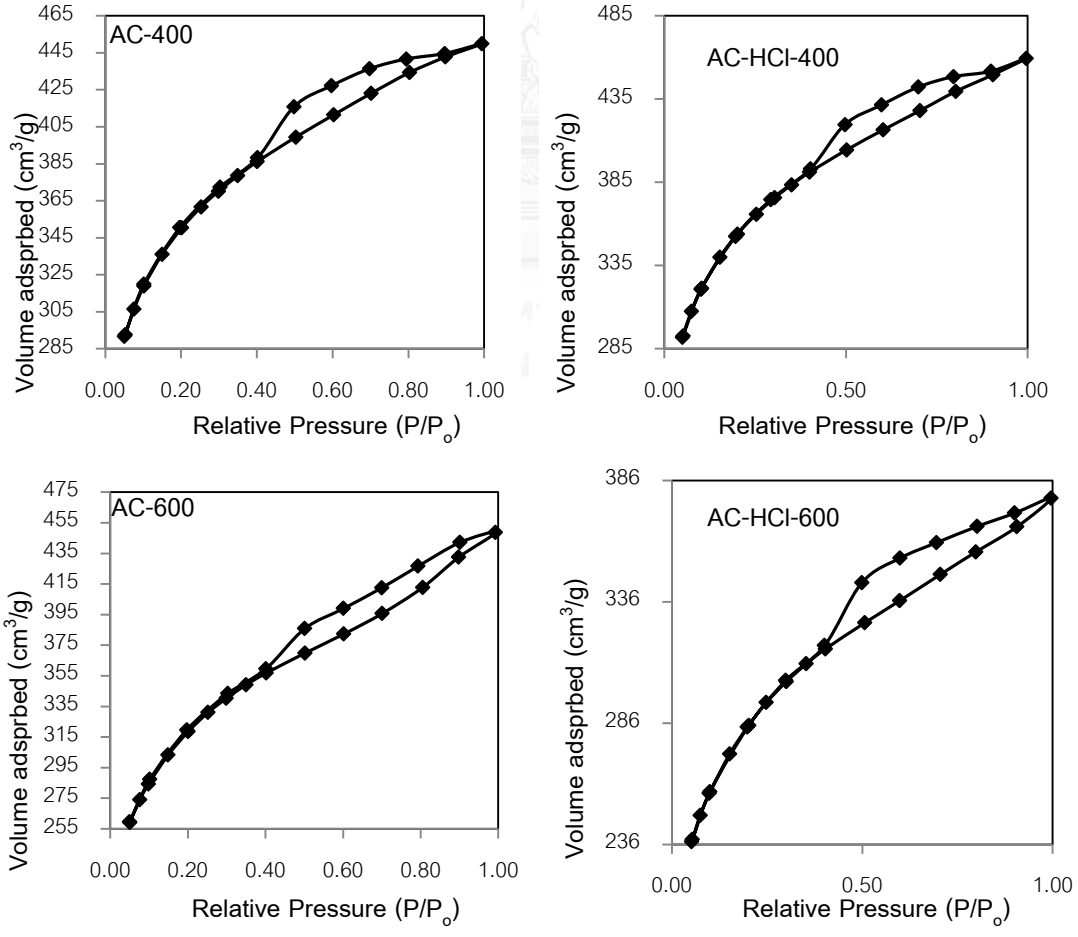
BET Surface Area เป็นเทคนิคการวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคในหน่วยของพื้นที่ต่อน้ำหนัก (m^2/g) ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส โดยใช้เทคนิค BET โดยให้คาร์บอนดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวเป็นฟิล์มบางๆ และคำนวณพื้นที่ผิวโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ กับความดันสัมพัทธ์ (P/Po) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อมีการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของคาร์บอนตัวอย่าง และผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว แสดงดังตารางที่ 2

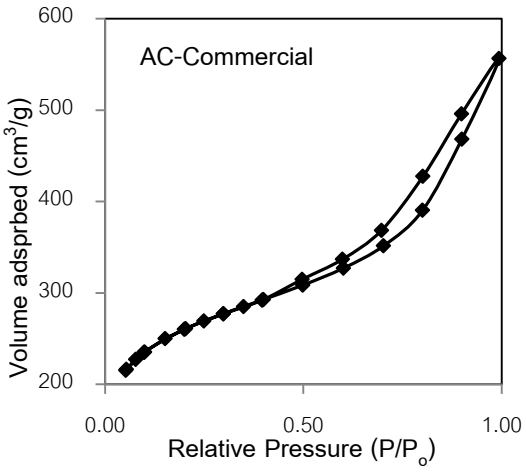
ตารางที่ 2 แสดงค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของตัวดูดซับ	BET Surface Area, S_{BET} (m^2/g)	Total Pore Volume, V_{Total} (cm^3/g)	Average Pore Diameter, D_p (Å)
AC.-400	1,140	0.696	24.5
AC.-600	1,050	0.694	26.5
AC.-HCl-400	1,150	0.711	24.8
AC.-HCl-600	929	0.586	25.2
AC-Commercial	852	0.8606	40.4

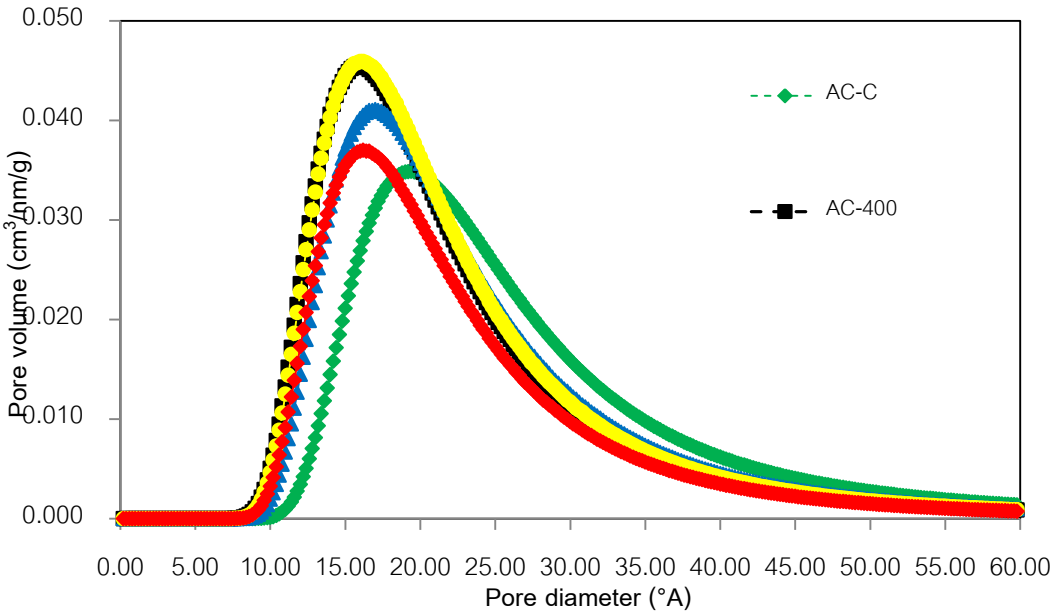
จากตารางที่ 2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิค BET surface area พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ทำให้มีแนวโน้มการลดลงของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และพบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า โดยขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Diameter, D_p) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ทั้งนี้อาจอธิบายผลจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาได้ว่า เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นอาจมีแนวโน้มทำให้รูพรุนขนาดเล็กแตกตัวออก และรวมกันเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น (Xiang 2003) จากค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ BET surface area ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลสมีโครงสร้างลักษณะของรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Diameter, D_p) อยู่ในช่วง 25 -26 Å และมีพื้นที่ผิว 929-1,140 ตารางเมตรต่อกรัม

รูปแบบของโครงสร้างลักษณะรูพรุนของตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส สามารถอธิบายได้จากไอโซเทอมการดูดซับ จากรูปที่ 12 ซึ่งแสดงไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส พบว่าไอโซเทอมการดูดซับเป็นชนิดที่ 4 เมื่อแบ่งตาม IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งเป็นไอโซเทอมที่แสดงลักษณะการดูดซับของตัวดูดซับ ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) (Rouquerol F. 1999) ไอโซเทอมการดูดซับรูปแบบที่ 4 เป็นไอโซเทอมที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุน ส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง หรือ Mesopores (ขนาดของรูพรุนอยู่ระหว่าง 2 -50 nm.) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ จากนั้นการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแบบแคปิลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ทำให้เกิด Hysteresis Loop (วงรอบของการดึงดูด) ในช่วงการคายซับ (Desorption) ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วงการคายซับ มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน (ตาลเถื่อน 2556)





รูปที่ 12 แสดงผลไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของตัวดูดซับ



รูปที่ 13 แสดงผลการกระจายปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลสและตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (BJH Pore Size Distribution)

จากรูปที่ 13 แสดงลักษณะการกระจายปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส พบว่าขนาดรูพรุนของตัวดูดซับโดยส่วนใหญ่ อยู่ระหว่าง 10 – 40 °A. ซึ่งแสดงว่าเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) โดยการเตรียมด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 400° C จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูเล็กกว่าการเผาที่ 600° C เล็กน้อย ทั้งนี้รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก

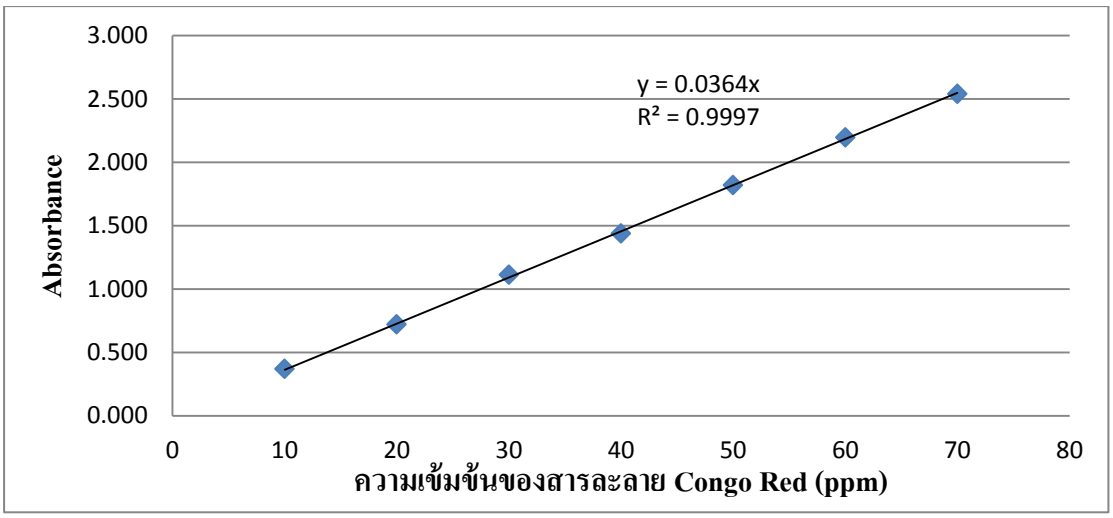
แบคทีเรียลเซลลูโลสมีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม และจะเห็นได้ว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าการกระจายตัวน้อยกว่าตัวอย่างคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม

4.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red

จากการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 10, 20 , 30 , 40 , 50 , 60 และ 70 ppm โดยการเจือจางจากสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 500 ppm วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Congo red กับค่าการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 14 ได้สมการเส้นตรง คือ $y = 0.0364x$, $R^2 = 0.9997$

ตารางที่ 3 ข้อมูลมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลาย Congo red (ppm) และค่าการดูดกลืนแสง

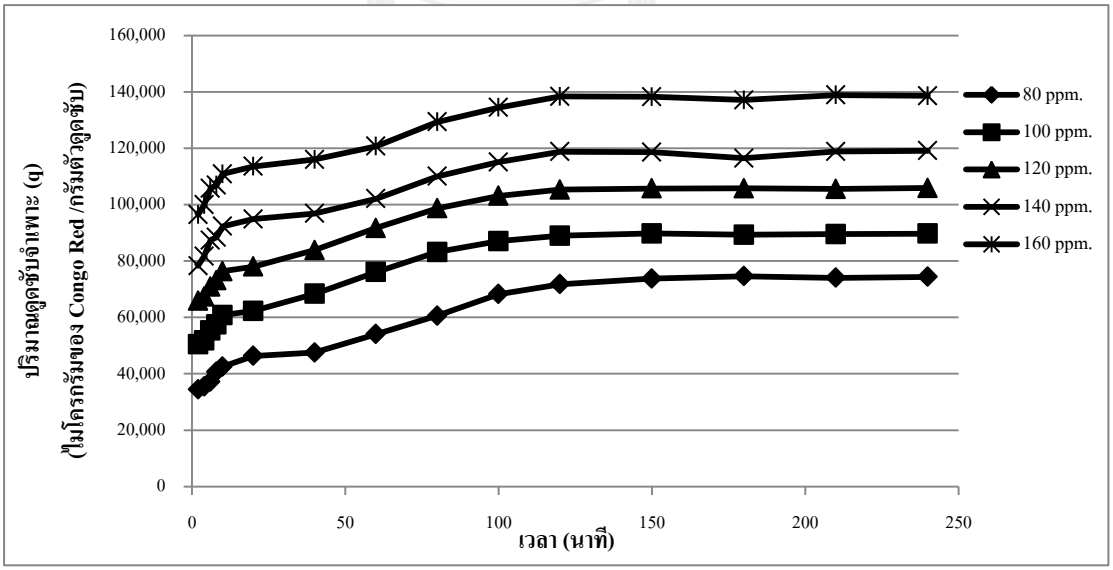
ความเข้มข้นของสารละลาย Congo Red (ppm)	ค่า Absorbance
10	0.371
20	0.721
30	1.112
40	1.438
50	1.820
60	2.197
70	2.541



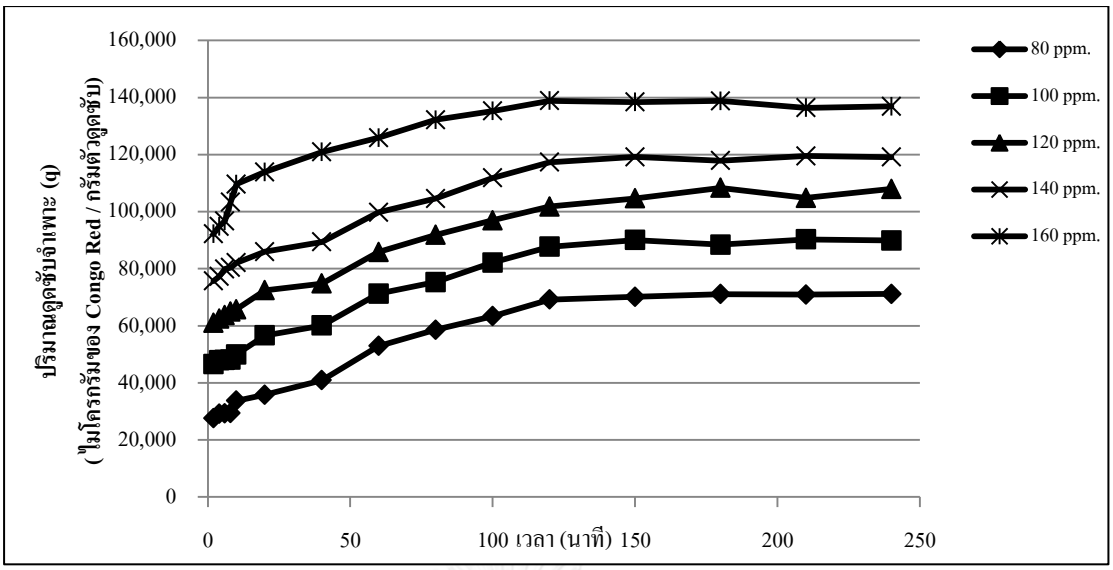
รูปที่ 14 กราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red

4.2 การหาสมดุลการดูดซับสารละลาย Congo red ด้วยตัวดูดที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส

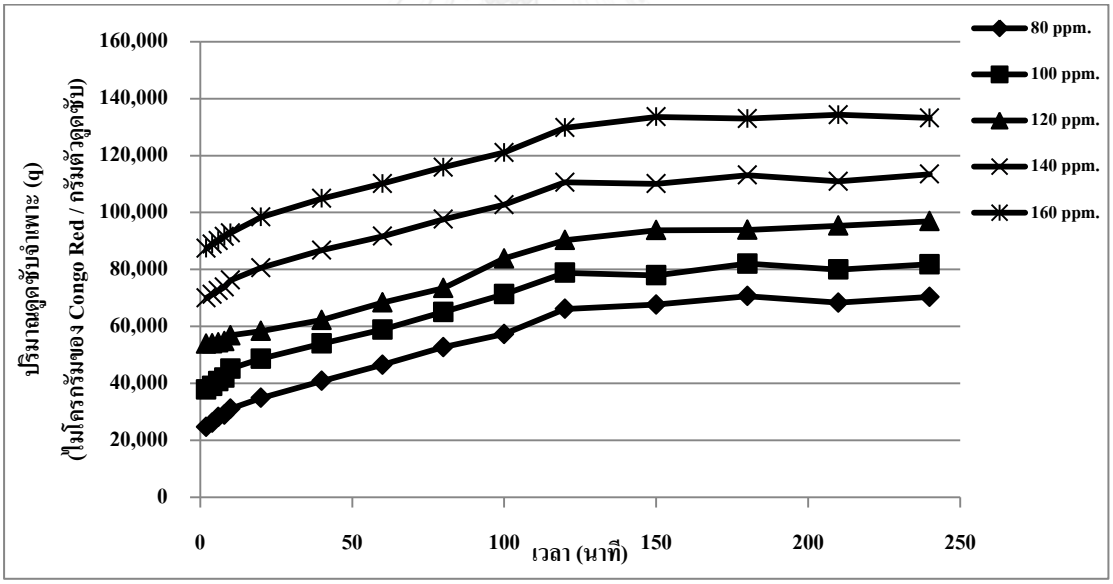
จากการดูดซับสารละลาย Congo red ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 80 , 100 , 120 , 140 และ 160 ppm ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ สามารถวัดปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 15 – 19



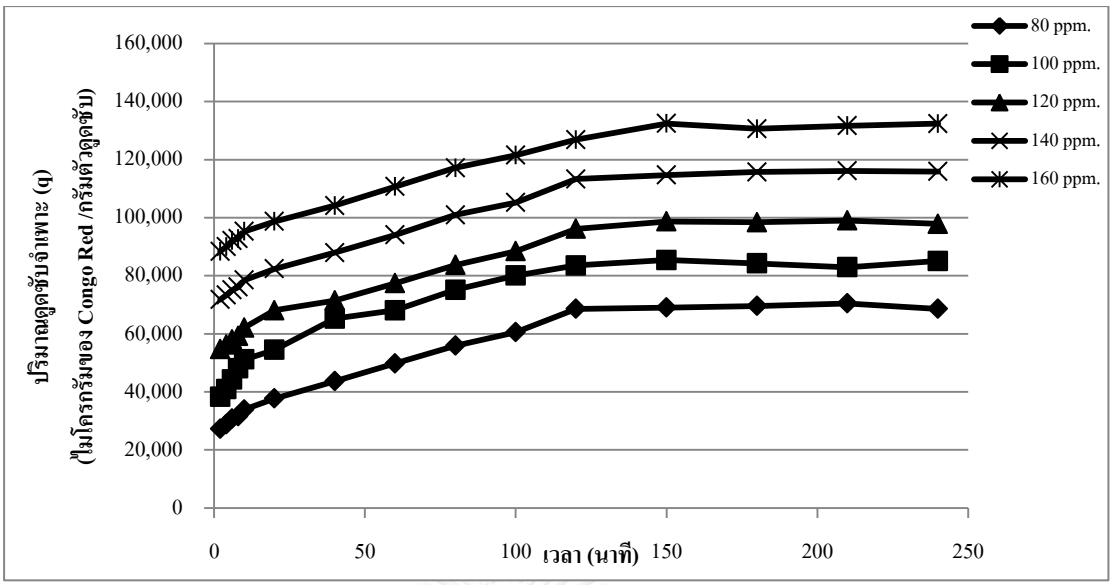
รูปที่ 15 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-400)



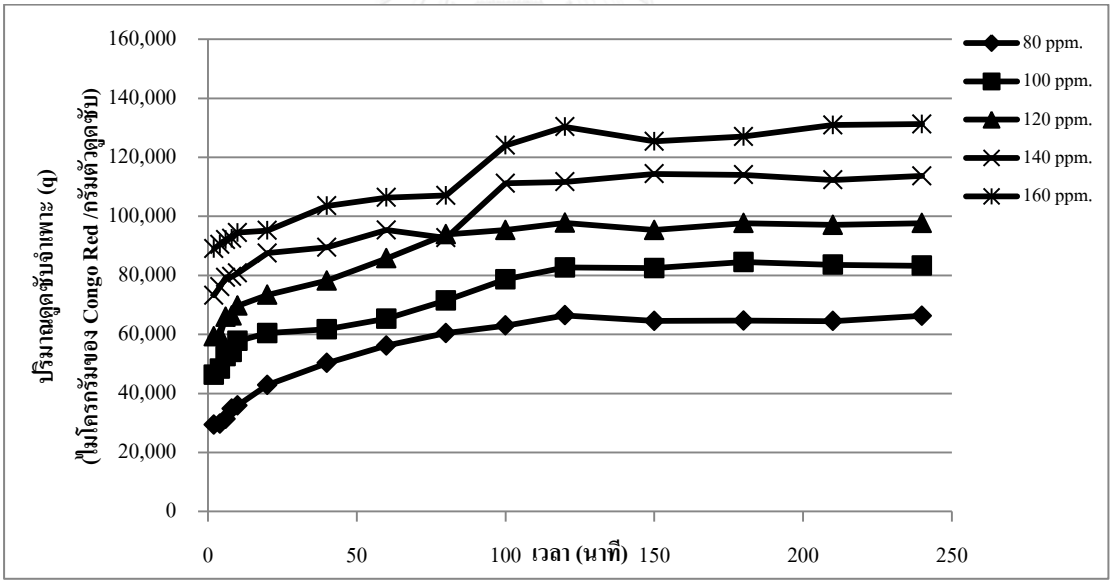
รูปที่ 16 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-400)



รูปที่ 17 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-600)



รูปที่ 18 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-600)



รูปที่ 19 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Commercial)

จากรูปที่ 15 – 19 พบว่าตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้าจะดูดซับสารละลาย Congo red อย่างรวดเร็วภายใน 2 นาทีแรก จากนั้นความเข้มข้นของ Congo red ในสารละลายค่อยๆ ลดลงและเข้าสู่สมดุลภายใน 120 นาที

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Congo red จาก 80 ppm เป็น 160 ppm ส่งผลให้ความเร็วในการดูดซับช่วงต้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงขับดัน (driving force) ของความต่างของความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้น และมีค่าปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยค่าปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุล (q_e) และความเข้มข้นของ Congo red ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (c_e) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4 – 8

ตารางที่ 4 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-400)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Congo red (C_0) (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/ กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
80	73,720	6.28
100	89,468	10.53
120	105,676	14.32
140	118,390	21.61
160	138,280	21.72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-400)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Congo red (C_0) (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/ กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
80	70,517	9.48
100	89,255	10.74
120	105,494	14.51
140	118,616	21.38
160	137,875	22.12

ตารางที่ 6 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-600)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Congo red (C_0) (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/ กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
80	68,589	11.41
100	80,119	19.88
120	94,057	25.94
140	111,656	28.34
160	132,796	27.20

ตารางที่ 7 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (AC.-600)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Congo red (C_0) (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/ กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
80	69,274	10.73
100	84,261	15.74
120	98,052	21.95
140	115,173	24.83
160	130,815	29.18

ตารางที่ 8 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Congo red (C_0) (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/ กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
80	65,271	14.73
100	83,284	16.72
120	97,116	22.88
140	113,213	26.79
160	128,974	31.03

จากตารางที่ 4 - 8 แสดงปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลสและตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลส แบบต่างๆ มีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ใกล้เคียงกัน โดยที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-400) มีปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุล สูงสุดที่ 138,280 µg/g ในขณะที่ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า มีปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุลอยู่ที่ 128,974 µg/g

ซึ่งผลจากการดูดซับสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ คือ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นคุณสมบัติหลักอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลสนี้ มีความพรุนมาก มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม และมีพื้นที่ผิวที่สูงกว่าคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า โดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-400) มีพื้นที่ผิวที่ 1,150 m^2/g ในขณะที่คาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า มีพื้นที่ผิวสัมผัสอยู่ที่ 852 m^2/g จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงกว่า โดยมีค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะสมดุลที่สูงกว่า และมีความเข้มข้นของ Congo red ที่เหลือในสารละลายที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า ทั้งนี้พื้นที่ผิวสัมผัสของตัว

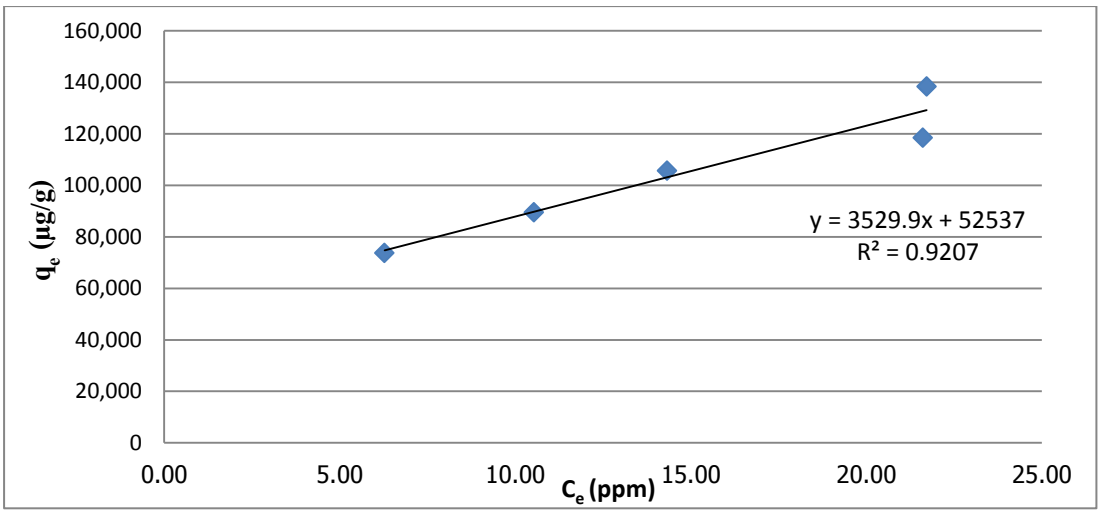
ดูดซับนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) คือ วัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากย่อมสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีวิธีเตรียมต่างๆกัน พบว่าการเตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C ให้ผลดีกว่าที่ 600°C โดยที่ประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสที่เตรียมโดยผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการไม่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเล็กน้อย (มีค่าปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล หรือ q_e มากกว่าเล็กน้อยคือ 1.0 - 12.2 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพิจารณาถึงการลดขั้นตอนการเตรียม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิต ลดพลังงานที่ใช้และลดปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิต ในงานวิจัยนี้การเตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากแบคทีเรียเซลลูโลสโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C ที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

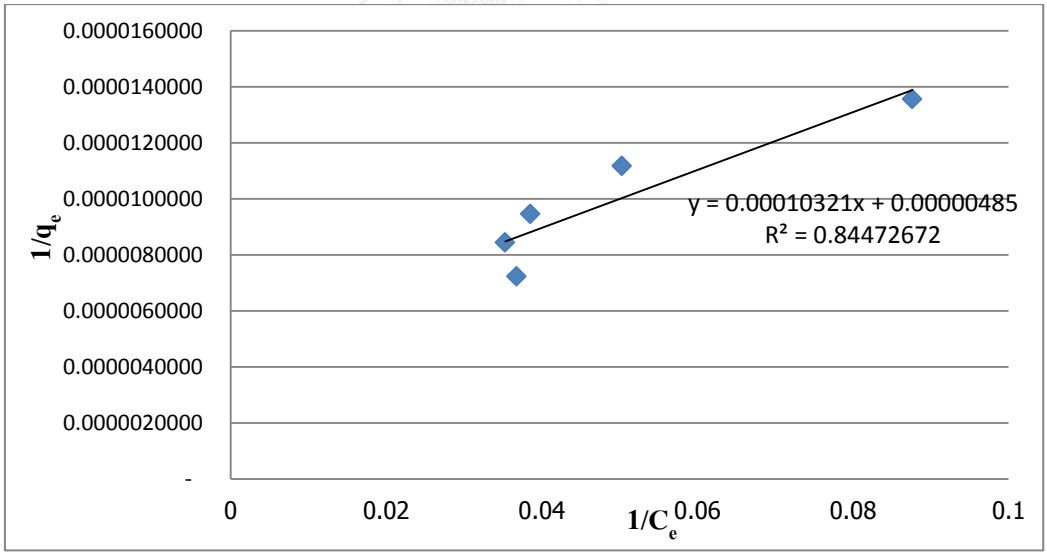
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองการดูดซับสารละลาย Congo red บนตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส สามารถอธิบายผลการทดลองได้ด้วยสมการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 สมการ คือ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบ Linear แบบ Langmuir และแบบ Freundlich ซึ่งจากการจัดรูปสมการแบบ Linear แบบ Langmuir และแบบ Freundlich ให้เป็นสมการเชิงเส้นสามารถนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 20 - 34 ตามลำดับ โดยค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมแบบต่างๆ ตลอดจนค่า R^2 และค่า χ^2 ของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์แบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 9 และ 10

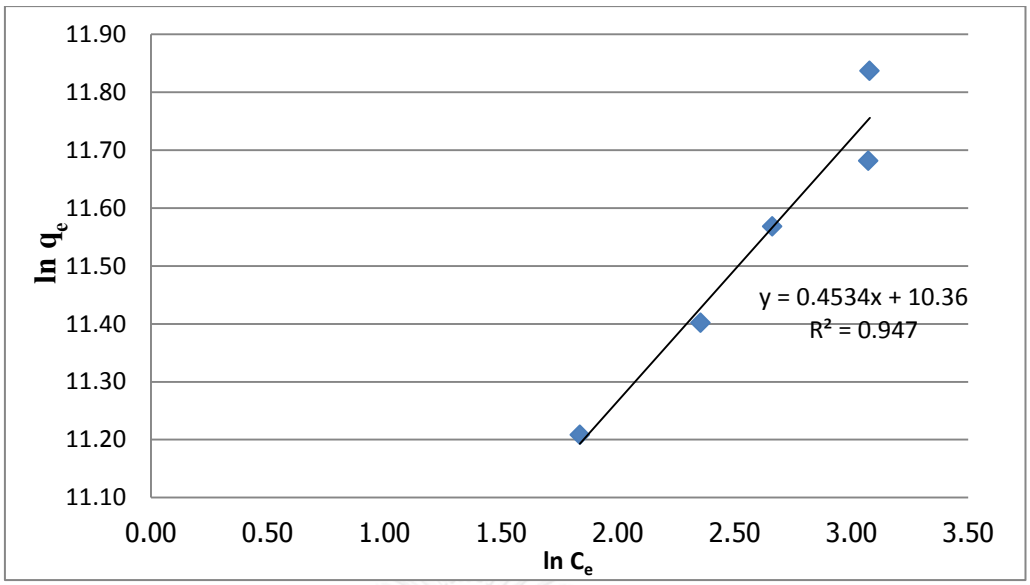
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



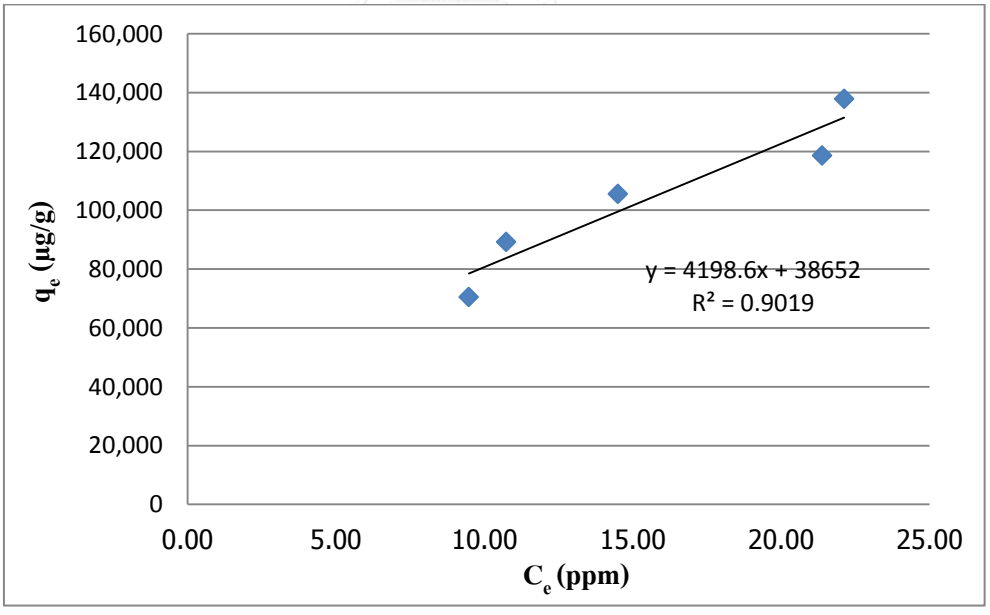
รูปที่ 20 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.-HCl-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



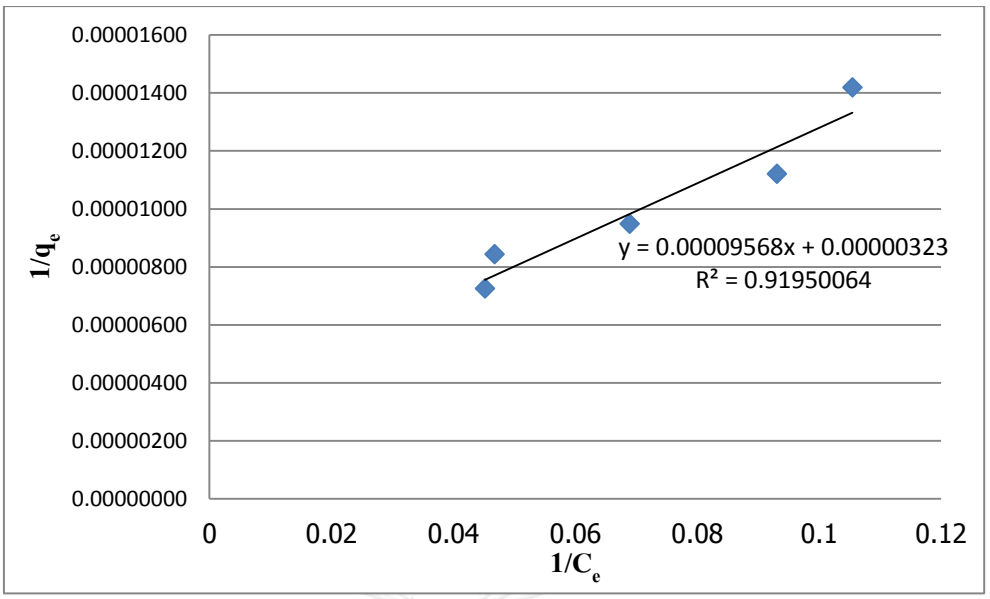
รูปที่ 21 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.-HCl-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



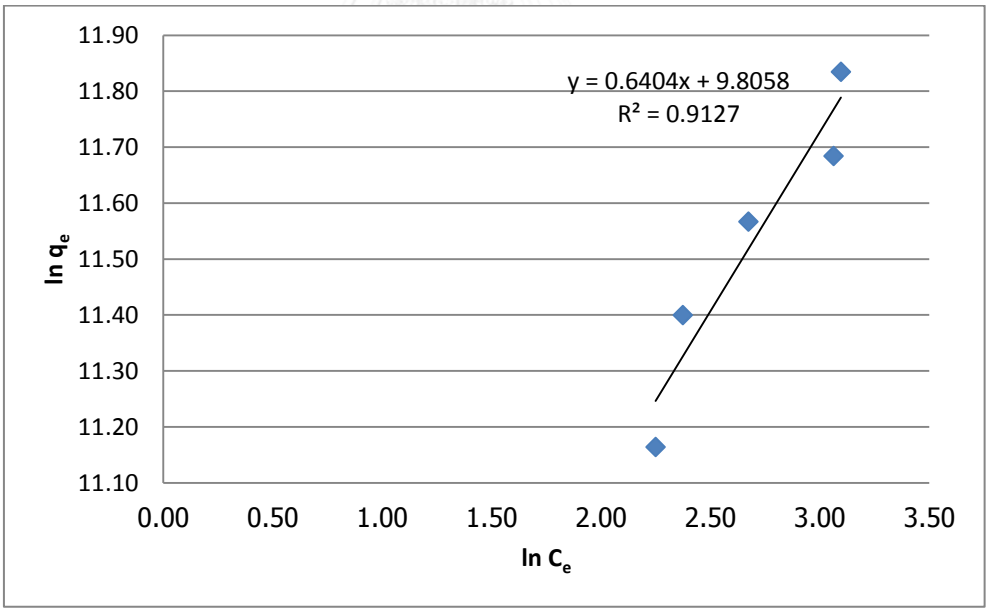
รูปที่ 22 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.-HCl-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich



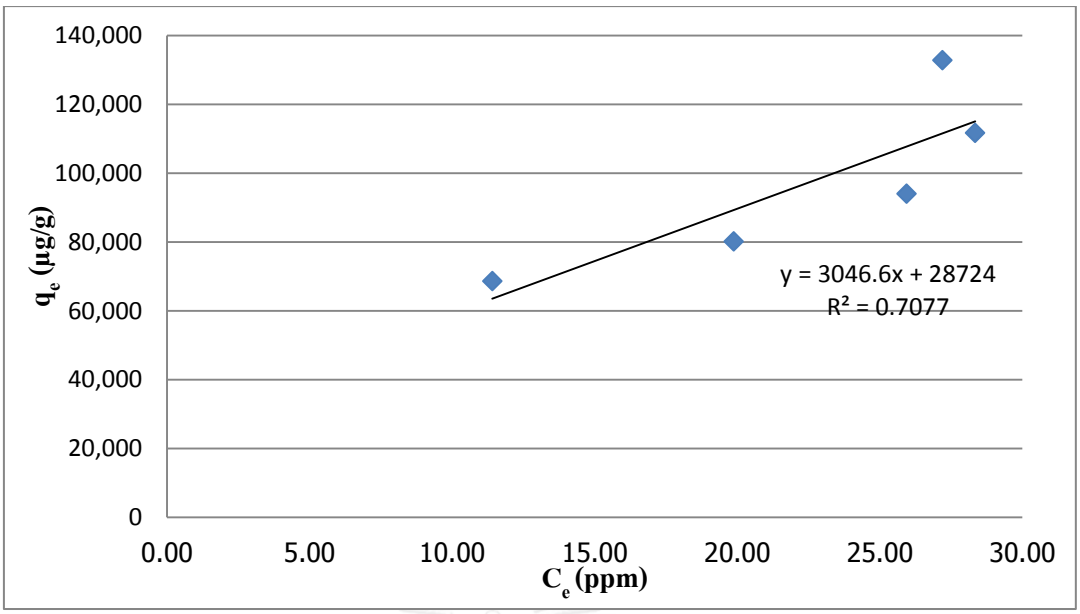
รูปที่ 23 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 °C (AC.-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



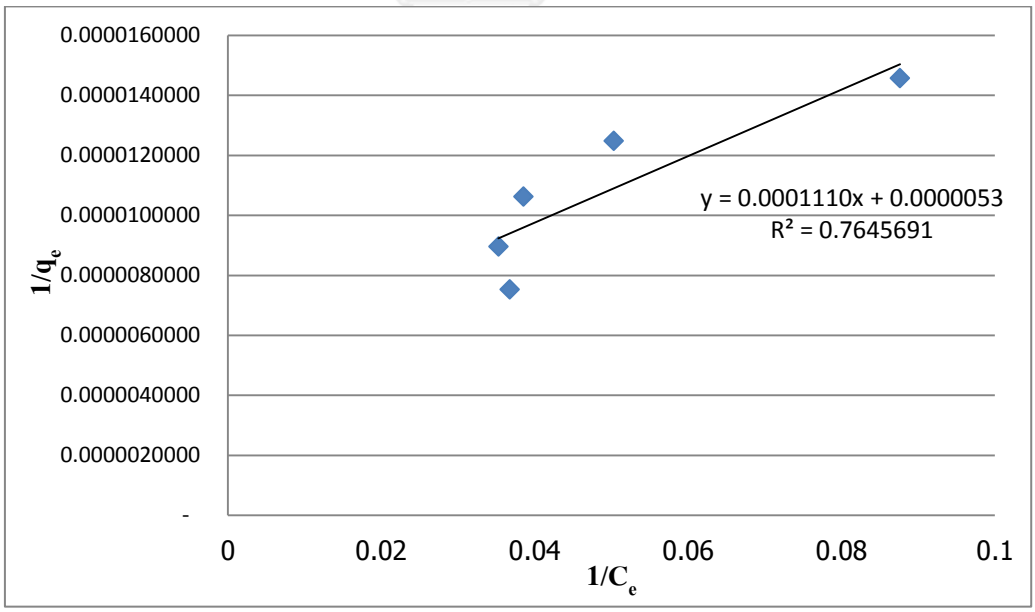
รูปที่ 24 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



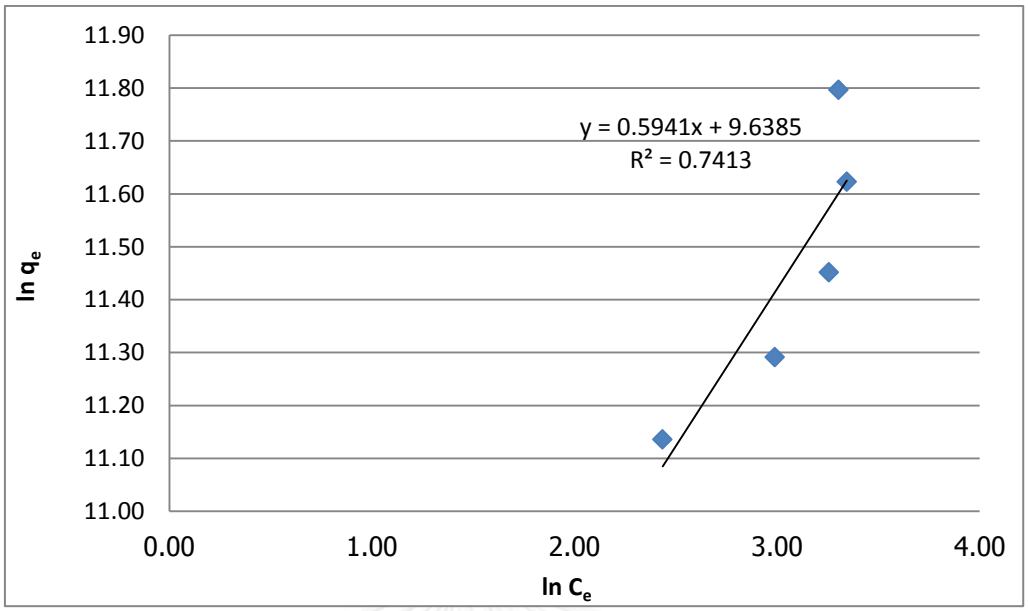
รูปที่ 25 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (AC.-400) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich



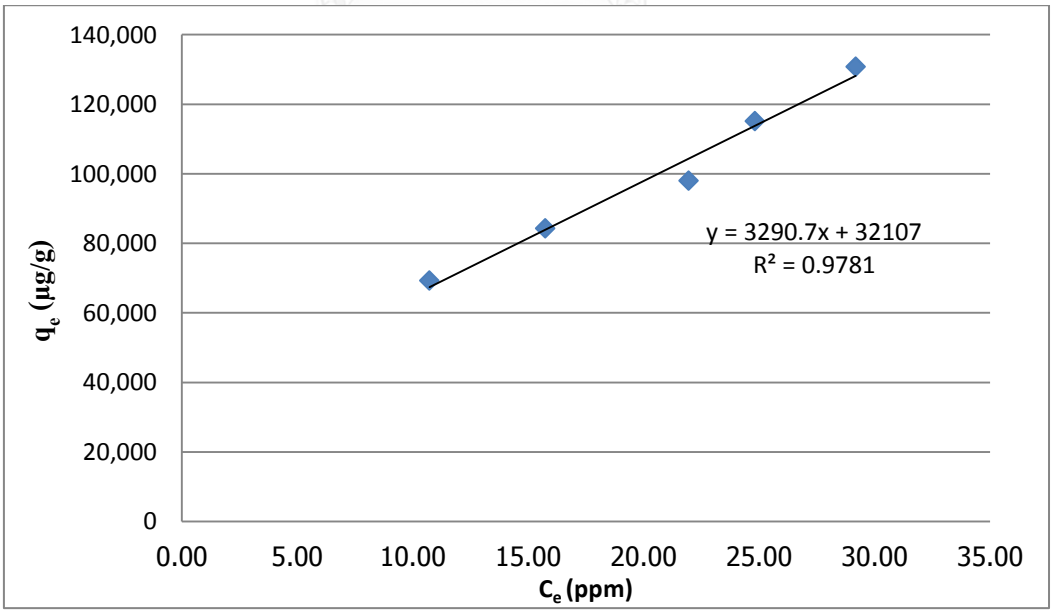
รูปที่ 26 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-HCl-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



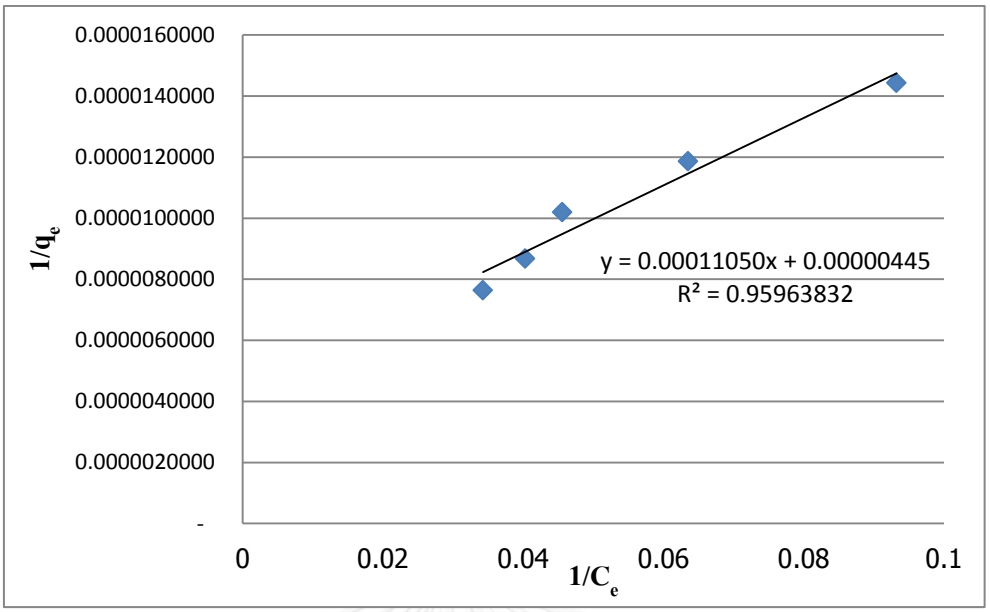
รูปที่ 27 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-HCl-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



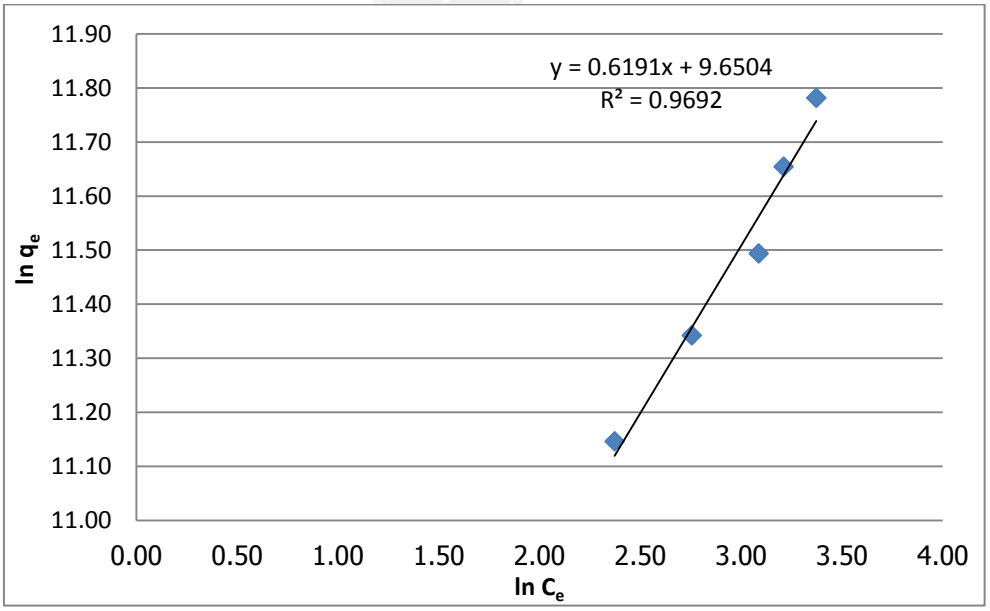
รูปที่ 28 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-HCl-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich



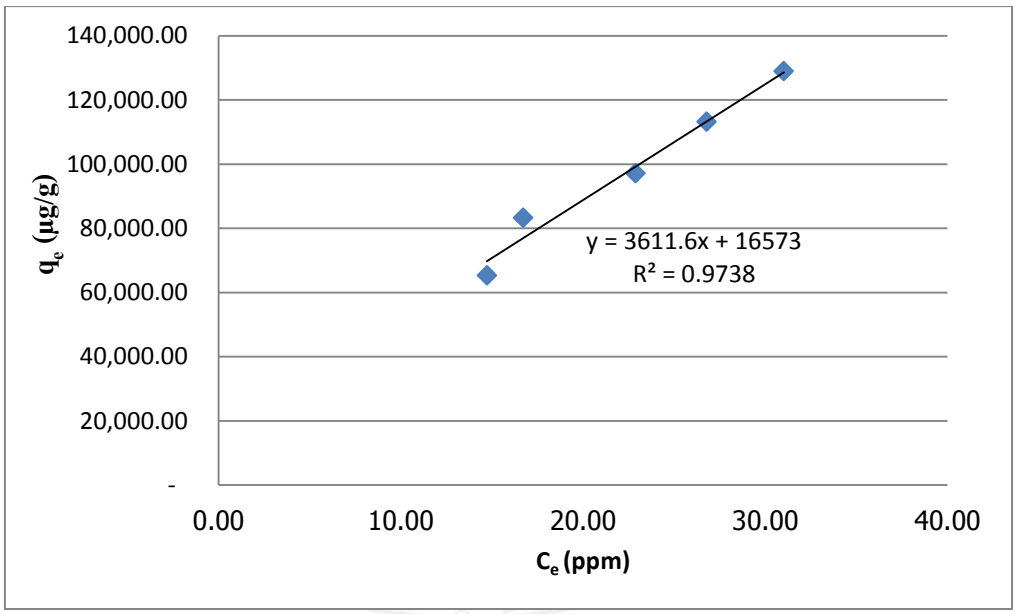
รูปที่ 29 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



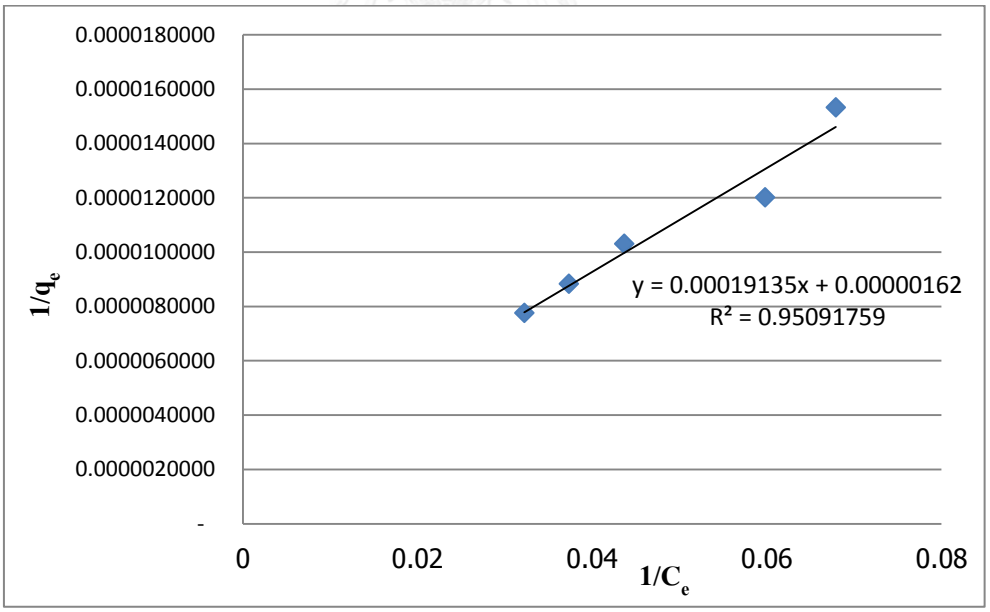
รูปที่ 30 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



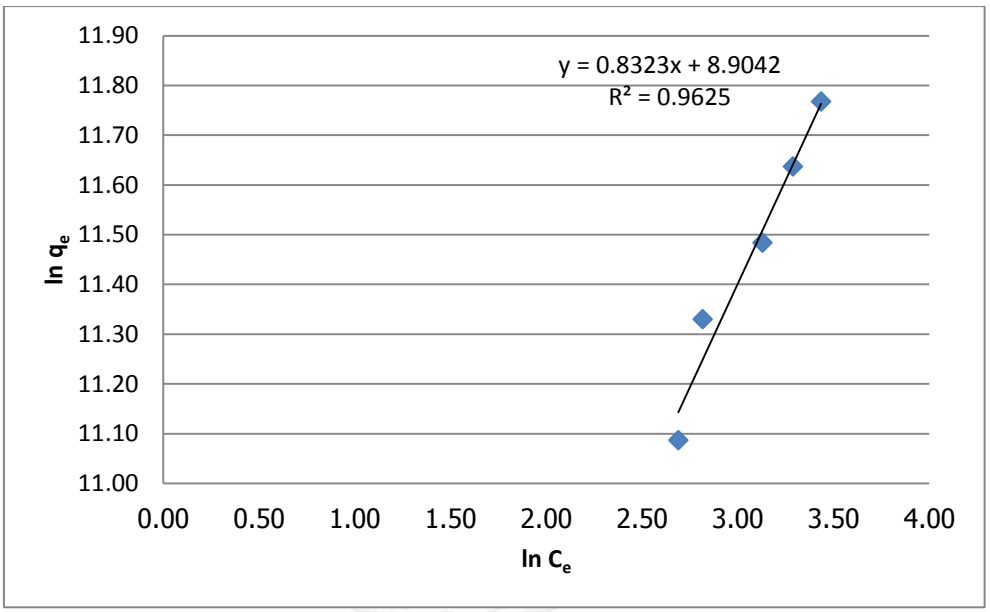
รูปที่ 31 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (AC.-600) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich



รูปที่ 32 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com.) ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



รูปที่ 33 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com.) ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



รูปที่ 34 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (AC.-Com.) ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 9 สมการไอโซเทอม ค่า R^2 และค่า χ^2 จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับสี Congo red กับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ ต่างๆ

ตารางที่ 9 สมการไอโซเทอม ค่า R^2 และค่า χ^2 จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับสี Congo red กับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ ต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	Linear Adsorption Isotherm			Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	ไอโซเทอม	R^2	χ^2	**ไอโซเทอม**	R^2	χ^2	**ไอโซเทอม**	R^2	χ^2
AC.-HCl-400	$q_e = 3529.9C_e + 52537$	0.9207	1,559	$q_e = \frac{206186C_e}{21.28 + C_e}$	0.8447	41,250	$q_e = 31571.18C_e^{\ 0.453}$	0.9470	1,600
AC. -400	$q_e = 4198.6C_e + 38652$	0.9019	2,574	$q_e = \frac{309598C_e}{29.62 + C_e}$	0.9195	2,174	$q_e = 18138.64C_e^{\ 0.64}$	0.9127	2174
AC.-HCl-600	$q_e = 3046.6C_e + 28724$	0.7077	7,220	$q_e = \frac{188679C_e}{20.94 + C_e}$	0.7646	9,118	$q_e = 15344.31C_e^{\ 0.594}$	0.7413	7,877
AC. -600	$q_e = 3290.7C_e + 32107$	0.9781	266	$q_e = \frac{224719C_e}{24.83 + C_e}$	0.9596	1,445	$q_e = 15528\, C_e^{\ 0.619}$	0.9692	802
AC -Com.	$q_e = 3611.6C_e + 16573$	0.9738	858	$q_e = \frac{617284C_e}{118.12 + C_e}$	0.9509	846	$q_e = 7362.83C_e^{\ 0.832}$	0.9625	836

ตารางที่ 10 ค่าคงที่ไอโซเทอม ค่า R^2 และค่า χ^2 จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับสี Congo red กับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ

ตารางที่ 10 ค่าคงที่ไอโซเทอม ค่า R^2 และค่า χ^2 จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับสี Congo red กับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	Linear Adsorption Isotherm			Langmuir Adsorption Isotherm				Freundlich Adsorption Isotherm			
	K_H	R^2	χ^2	q_{max}	K_L	R^2	χ^2	K_F	n	R^2	χ^2
AC.-HCl-400	3529.9	0.9207	21.28	206,186	21.28	0.8447	41,249.65	31,571	0.453	0.9470	1,599.94
AC. - 400	4198.6	0.9019	29.62	309,598	29.62	0.9195	2,173.69	18,138	0.64	0.9127	2,173.69
AC.-HCl-600	3046.6	0.7077	20.94	188,679	20.94	0.7646	9,118.59	15,344	0.594	0.7413	7,877.44
AC. - 600	3290.7	0.9781	24.83	224,719	24.83	0.9596	1,445.70	15,528	0.619	0.9692	802.71
AC - Commercial	3611.6	0.9738	118.12	617,284	118.12	0.9509	846.62	7,362	0.832	0.9625	836.01

จากไอโซเทอมการดูดซับคองโกเรด Congo red จากสารละลายในน้ำ โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส แสดงดังตารางที่ 4.8 ความถูกต้องของไอโซเทอมจากการดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด และ Chi-Square (χ^2) มีค่าน้อยที่สุด จากตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส ชนิดที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC.-HCl-400) เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด คือ มีปริมาณดูดซับจำเพาะได้มากที่สุดถึง 138,280 µg./g หรือ 138.28 mg./g พบว่า ผลการทดลองโดยรวมสอดคล้องกับสมการแบบจำลอง Freundlich มากกว่าสมการแบบจำลอง Langmuir อธิบายได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นอาจเกิดจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้หรือมีปฏิกิริยาผันกลับที่ต่ำมาก โดยผลการคำนวณความสามารถในการดูดซับสมดุลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของคองโกเรดในน้ำที่ 160 ppm จากสมการแบบจำลอง Freundlich มีปริมาณเท่ากับ 127,317 µg./g ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 138,280 µg./g จากกราฟเปรียบเทียบผลจะสังเกตได้ชัดว่าแบบจำลองแบบ linear และแบบจำลอง Langmuir มีแนวโน้มไม่สอดคล้องกับผลจากการทดลองเมื่อใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยเฉพาะที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Congo red ในระบบที่มีค่าสูงๆ สำหรับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า เมื่อพิจารณาโดยรวมจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และ Chi-Square (χ^2) จะสอดคล้องกับสมการแบบจำลอง Freundlich มากกว่าเช่นกัน (B.H. Hameeda 2008)

การดูดซับคองโกเรดจากสารละลายในน้ำโดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส สามารถอธิบายขั้นตอนการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นลำดับดังนี้ (B.H. Hameeda 2008)

1. การเคลื่อนที่ของคองโกเรดจากสารละลายในน้ำ ผ่านชั้นของเหลวไปสู่ผิวภายนอกของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์
2. คองโกเรดแพร่เข้าไปภายในรูของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์
3. การดูดซับของคองโกเรดภายในรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์

4.4 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและปริมาณดูดซับสูงสุด (q_{max})

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและปริมาณดูดซับสูงสุด (q_{max}) ระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้จากแบคทีเรียลเซลลูโลสและตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการดูดซับคองโกเรดจากสารละลายในน้ำ

ที่	ชนิดของดูดซับ	พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ S_{BET} (m^2/g)	ปริมาณดูดซับสูงสุด, q_{max} (mg/g)	แหล่งที่มา
1	เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์	395.0	5.18	(P. Senthil Kumar 2010)
2	คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากใยมะพร้าว	-	6.72	(C. Namasivayam 2002)
3	คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้จากทับทิม	40.69	10.00	(Mehrorang Ghaedi and Reza Sahraei 2012)
4	เถ้าลอยชานอ้อย	168.83	11.89	(Indra Deo Mall 2005)
5	เปลือกส้ม และเปลือกกล้วย	20.6–23.5	18.2, 14.0	(Gurusamy Annadurai 2002)
6	ชานอ้อย	0.58 - 0.66	38.2	(Zhanying Zhang 2010)
7	รากธูปฤาษี	-	38.79	(Zhenhu Hua 2010)
8	ผงใบสะเดา (Azadirachta indica)	-	41.2 - 28.3	(Krishna G. Bhattacharyya 2004)
9	เม็ดพุทราจีน (Jujuba Seeds)	-	55.60	(M.C.S.Reddy et al. 2012)
10	คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส	1,150.0	206.18	จากผลงานวิจัยนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 11 อ้างอิงจากผลการทดลองนี้ ปริมาณดูดซับสูงสุด (q_{max}) ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส มีค่าสูงถึง 206,185 µg./g หรือ 206.18 mg./g ในขณะที่คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากเซลลูโลสจากพืช เช่น จากเปลือกส้ม เปลือกกล้วย และใยมะพร้าว มีค่าปริมาณดูดซับจำเพาะอยู่ที่ 18.2, 14.0 และ 6.72 mg./g ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียเซลลูโลสด้วยวิธีกระตุ้นโดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น โดยใช้อุณหภูมิเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ทำการเปรียบเทียบระหว่างการผ่านและไม่ผ่านการการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งหมดมีพื้นที่ผิวระหว่าง 929-1,150 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมีปริมาตรรูพรุนรวมที่ 0.59 – 0.71 ลูกบาศ์กเซนติเมตรต่อกรัม มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ 24.5 – 26.5 Å จากผลโดยรวมสรุปได้ว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (AC. HCl 400) เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET พบว่า มีพื้นที่ผิวสัมผัส 1,140 m^2/g มีปริมาตรของรูพรุน 0.71 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยที่ 24.8 Å และมีปริมาณดูดซับจำเพาะได้มากที่สุด คือ 138,280 ไมโครกรัมของ Congo red ต่อกรัมของตัวดูดซับ ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo Red เริ่มต้น 160 ppm และใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 120 นาที จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Linear ได้ความสัมพันธ์คือ $q_e = 3529.9C_e + 52537$, สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Langmuir คือ $q_e = \frac{206186C_e}{21.28+C_e}$ และสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Freundlich คือ $q_e = 31571.18C_e^{\ 0.453}$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) จากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Linear, Langmuir และ Freundlich คือ 0.9207, 0.8447 และ 0.9470 ตามลำดับ และค่าการทดสอบ Chi-Square (χ^2) จากสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Linear, Langmuir และ Freundlich คือ 21.28, 41,249.65 และ 1,599.94 ตามลำดับ พบว่าโดยรวมแล้วข้อมูลจากการทดลอง สามารถอธิบายด้วยสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Freundlich ได้เหมาะสมที่สุด โดยมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับการทำนายจากแบบจำลองตลอดทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของ Congo red ที่ทำการทดลอง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่สูงกว่า และค่าการทดสอบ Chi-Square (χ^2) ที่ต่ำกว่าแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Linear และ Langmuir

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดของสีย้อมที่มีคุณสมบัติต่างกับสีย้อม Congo red เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับ
2. ควรปรับปรุงคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

A. MAHDAVI TALARPOSHTI, T. D., G. K. ANDERSON (2001). "COLOUR REMOVAL FROM A SIMULATED DYE WASTEWATER USING A TWO-PHASE ANAEROBIC PACKED BED REACTOR." Wat. Res. 35(2): 425-432.

Ali Tor, Y. C. (2006). "Removal of congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud." Hazardous Materials 138: 409–415.

B.H. Hameeda, M. I. E.-K. (2008). "Removal of basic dye from aqueous medium using a novel agricultural waste material: Pumpkin seed hull." Hazardous Materials 155: 601–609.

B.H. Hameeda, M. I. E.-K. (2008). "Sorption kinetics and isotherm studies of a cationic dye using agricultural waste: Broad bean peels." Hazardous Materials 154: 639–648.

Budhionoa, A., et al., (1999). "Kinetic aspects of bacterial cellulose formation in nata-de-coco culture." Carbohydrate Polymers 40: 137-143.

C. Namasivayam, D. K. (2002). "Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste." Dyes and Pigments 54: 47-58.

Dieter Klemm, B. H., Hans-Peter Fink, Andreas Bohn, (2005). "Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material." Polymer Science, Angew. Chem. Int. Ed. 44: 3358 – 3393.

Chulalongkorn University

Dieter Klemm, D. S., Ulrike Udhardt, Silvia Marsch (2001). "Bacterial synthesied cellulose - artificial blood vessels for microsurgery." Progress in polymer science 26: 1561-1603.

Ewa Lorenc-Grabowska, G. G. (2007). "Adsorption characteristics of Congo Red on coal-based mesoporous activated carbon." Dyes and Pigments 74: 34-40.

F.Adam (1991). The preparation and adsorption studies on silica from rice husk ash Universiti Sains Malaysia.

Giuseppe, S. (2010). "Mechanical Properties of Bacterial Cellulose Implants." Technical report **n.**366: 7-8.

Gurusamy Annadurai , R.-S. J., Duu-Jong Lee (2002). "Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions." Hazardous Materials **B**92: 263-274.

Indra Deo Mall , V. C. S., Nitin Kumar Agarwal, Indra Mani Mishra (2005). "Removal of congo red from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon: Kinetic study and equilibrium isotherm analyses." Chemosphere 61: 492-501.

J. James, M. S. R. (1986). "Characterization of Silica in Rice Husk Ash." Am. Ceram. Soc. Bull. 65: 1177.

J.W., H. (1974). "Purification with Activated Carbon." Chemical Publishinh Co.Inc.

João M. Valente Nabais, C. E. C. L., P.J.M. Carrott, M.M.L. Ribeiro Carrott (2011). "Production of activated carbons from almond shell." Fuel Processing Technology 92: 234–240.

Jonas, R. a. L. F. F. (1998). "Production and application of microbial cellulose." Polymer degradation and Stability 59: 101-106.

Chulalongkorn University

Kadirvalu, K., Palanival, M., Kalpana, R., Rajeswari, S., (2000). "Activated carbon from an agricultural by-product, for treatment od dyeing industry wastewater." Bioresource Technology 74.

Krishna G. Bhattacharyya, A. S. (2004). "Azadirachta indica leaf powder as an effective biosorbent for dyes: a case study with aqueous Congo Red solutions." Environmental Management 71: 217–229.

Lin, W. C., Lien, C. C., Yeh, H. J., Yu, C. M.,Hsu, S. H. (2013). "Bacterial cellulose and bacterial cellulose–chitosan membranes for wound dressing application." Carbohydrate Polymers 94: 603 - 611.

M.K. Purkait a, A. M. b., S. DasGupta b, S. Deb (2007). "Removal of congo red using activated carbon and its regeneration." Hazardous Materials 145: 287–295.

Mehrorang Ghaedi , M. N. B., Syamak Nasiri Kokhdan , Shahdokht Shamsaldini , and A. D. Reza Sahraei , Simin Shahriyar (2012). "Comparison of the efficiency of palladium and silver nanoparticles loaded on activated carbon and zinc oxide nanorods loaded on activated carbon as new adsorbents for removal of Congo red from aqueous solution: Kinetic and isotherm study." 32: 725-734.

Ming-Shen Chiou, G.-S. C. (2006). "Competitive adsorption of dye metanil yellow and RB15 in acid solutions on chemically cross-linked chitosan beads." Chemosphere 62: 731–740.

Mohd. Rafatullaha, O. S., Rokiah Hashima, Anees Ahmadb (2010). "Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review." Hazardous Materials 177: 70-80.

P. Senthil Kumar , S. R., C. Senthamarai , M. Niranjanaa , P. Vijayalakshmi , S. Sivanesan (2010). "Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell:

Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions." Desalination 261: 52-60.

Pretre, G., P. Zarnea, and E. Adrian, (1999). "Biodegradation and bioconversion of cellulose waste using bacterial and fungal cells immobilized in radio polymerized hydrogels." Conservation and Recycling 27: 309-332.

Rouquerol F., R. J., K.S.W. Sing (1999). Adsorption by Powders and Porus Solids London, Academic Press.

S.J.Gregg, K. S. W. S. (1982). Adsorption, Surface Area and Porosity. London, New York, Academic Press.

Schramm, M., Z. Grommet, S. Hestrin, (1957). "Synthesis of cellulose by Acetobacter xylinum." Substrates and Inhibitors Biochemical 67: 669-679.

Svensson, A., Nicklasson, E., Harrah, T., Panilaitis, B., Kaplan, D. L., Brittberg, M., (2005). "Bacterial cellulose as as potential scaffold for tissue engineering of cartilage." Biomaterials 26: 419-431.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Xiang, Q., et al., (2003). "Heterogeneous aspects of acid hydrolysis of α-cellulose." Applied Biochemistry and Biotechnology 505: 105-108.

Y.Z. Wan, H. L., F. He, H. Liang, Y. Huang, X.L. Li (2009). "Mechanical, moisture absorption, and biodegradation behaviours of bacterial cellulose fibre-reinforced starch biocomposites." Composites Science and Technology 69: 1212–1217.

Y.Z. Wan, H. L., F. He, H. Liang, Y. Huang, X.L. Li (2009). "Mechanical, moisture absorption, and biodegradation behaviours of bacterial cellulose fibre-reinforced starch biocomposites." Composites Science and Technology 69: 1212–1217.

Yamamoto, H., F. Horii, H. Odani, (1989). "Structural changes of native cellulose crystals induced by annealing in aqueous alkaline and acidic solutions at high temperatures." 4130-4132.

Zhenhu Hua, H. C., Feng Ji b, Shoujun Yuana (2010). "Removal of Congo Red from aqueous solution by cattail root." Hazardous Materials 173: 292–297.

จินดาพันธ์ไพโรจน์, ว. (2543). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส Eucalyptus camaldulensis Dehnh โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัยรัตนาวรรณ, ข. (2552). "การดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยตะกอนจุลินทรีย์." วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 1(1).

ชาดา ศิริพัฒนานนท์, ศ. ร. (2551). การผลิตถ่านกัมมันต์แบบเม็ดโดยเตรียมจากของเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ. สาขาวิศวกรรมเคมี สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.

ณพงศ์ เทียรฆโรจนกุล, ว. ค., พรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์ (2553). "การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยผลิตภัณฑ์จากแกลบ." วิศวสารลาดกระบัง 27(2): 37-42.

ดอกบัว, จ. (2551). "การศึกษาประสิทธิภาพเซลลูโลสฟอสเฟตจากฟางข้าวและชานอ้อยเพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย." วารสารบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ 2(1).

เดชสังกรานนท์., ม. (2555). บทบาทของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial cellulose) ทางการแพทย์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, เทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต. .

ตาลเถื่อน, ภ. (2556). การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนในก๊าซผสมสังเคราะห์ด้วยซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 4A. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร.

นิทัศนจารุกุล, ล. (2544). การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิ่มรัตน์, ส. (2553). "การพัฒนาวิธีการบำบัดสีอะมิโดแบล็คด้วยการดูดซับ/ตะกอนเร่ง." วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 15(1): 88-97.

ปานสง่า, ก. (2545). การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากกระดูกไก่. วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศรีคุณ, ส. (2551). การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน. สาขาวิศวกรรมเคมี สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุทธะนันท์, ร. (2554). "จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้แกลบดัดแปร." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21(2).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 80 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2012 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.652	43.26	34,402.40
4	1.613	44.60	35,470.37
6	1.552	46.70	37,140.79
8	1.424	51.11	40,645.93
10	1.355	53.49	42,535.42
20	1.216	58.27	46,341.78
40	1.172	59.79	47,546.68
60	0.934	67.99	54,064.05
80	0.695	76.22	60,608.80
100	0.416	85.82	68,248.91
120	0.287	90.27	71,781.43
150	0.215	92.74	73,753.07
180	0.183	93.85	74,629.36
210	0.204	93.12	74,054.30
240	0.192	93.54	74,382.90

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 100 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2000 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.803	50.45	50,449.04
4	1.754	51.80	51,798.90
6	1.625	55.35	55,352.62
8	1.548	57.47	57,473.83
10	1.426	60.83	60,834.71
20	1.374	62.27	62,267.22
40	1.153	68.36	68,355.37
60	0.872	76.10	76,096.42
80	0.615	83.18	83,176.31
100	0.474	87.06	87,060.61
120	0.403	89.02	89,016.53
150	0.376	89.76	89,760.33
180	0.392	89.32	89,319.56
210	0.384	89.54	89,539.94
240	0.378	89.71	89,705.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 120 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2002 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.964	55.01	65,947.83
4	1.912	56.21	67,378.90
6	1.785	59.12	70,874.03
8	1.702	61.03	73,158.25
10	1.584	63.74	76,405.69
20	1.525	65.09	78,029.41
40	1.312	69.98	83,891.32
60	1.028	76.50	91,707.19
80	0.774	82.33	98,697.45
100	0.613	86.03	103,128.28
120	0.532	87.89	105,357.45
150	0.518	88.21	105,742.74
180	0.516	88.25	105,797.78
210	0.524	88.07	105,577.62
240	0.512	88.34	105,907.87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 140 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2064 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.152	88.17	78,328.21
4	2.026	88.86	81,691.65
6	1.812	90.04	87,404.17
8	1.773	90.26	88,445.23
10	1.626	91.07	92,369.25
20	1.531	91.59	94,905.18
40	1.457	92.00	96,880.54
60	1.262	93.07	102,085.87
80	0.964	94.71	110,040.68
100	0.773	95.76	115,139.24
120	0.636	96.52	118,796.31
150	0.641	96.49	118,662.84
180	0.723	96.04	116,473.94
210	0.634	96.53	118,849.70
240	0.622	96.60	119,170.03

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 160 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2003 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.306	87.32	96,447.62
4	2.179	88.02	99,941.00
6	1.966	89.19	105,799.98
8	1.925	89.42	106,927.76
10	1.780	90.22	110,916.27
20	1.682	90.76	113,611.95
40	1.594	91.24	116,032.56
60	1.422	92.19	120,763.76
80	1.109	93.91	129,373.43
100	0.923	94.94	134,489.73
120	0.781	95.72	138,395.71
150	0.784	95.70	138,313.19
180	0.826	95.47	137,157.90
210	0.762	95.83	138,918.34
240	0.773	95.76	138,615.77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 80 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2054 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.878	89.68	27,636.73
4	1.823	89.98	29,112.05
6	1.817	90.01	29,272.99
8	1.812	90.04	29,407.11
10	1.651	90.93	33,725.77
20	1.573	91.36	35,818.04
40	1.382	92.41	40,941.41
60	0.935	94.87	52,931.72
80	0.724	96.03	58,591.58
100	0.546	97.02	63,366.25
120	0.328	98.22	69,213.87
150	0.294	98.40	70,125.88
180	0.257	98.61	71,118.37
210	0.263	98.57	70,957.43
240	0.255	98.62	71,172.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 100 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2006 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.941	89.33	46,507.86
4	1.892	89.60	47,853.68
6	1.886	89.63	48,007.49
8	1.881	89.66	48,155.81
10	1.815	90.02	49,968.55
20	1.573	91.36	56,615.28
40	1.447	92.05	60,075.97
60	1.040	94.29	71,254.56
80	0.892	95.11	75,319.50
100	0.643	96.48	82,158.48
120	0.442	97.59	87,679.11
150	0.356	98.06	90,041.17
180	0.415	97.74	88,420.69
210	0.348	98.11	90,260.90
240	0.362	98.03	89,876.38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 120 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.1997 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.148	50.79	61,036.46
4	2.094	52.03	62,526.30
6	2.052	52.99	63,685.06
8	2.008	54.00	64,899.00
10	1.976	54.74	65,781.87
20	1.735	60.27	72,430.96
40	1.650	62.22	74,776.08
60	1.248	71.45	85,867.09
80	1.032	76.41	91,826.44
100	0.845	80.70	96,985.70
120	0.672	84.67	101,758.70
150	0.568	87.06	104,628.02
180	0.434	90.14	108,325.02
210	0.562	87.20	104,793.55
240	0.447	89.84	107,966.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 140 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2002 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.336	46.47	75,690.15
4	2.278	87.47	77,286.35
6	2.182	88.00	79,928.34
8	2.165	88.10	80,396.19
10	2.104	88.43	82,074.95
20	1.963	89.21	85,955.37
40	1.839	89.89	89,367.93
60	1.462	91.97	99,743.23
80	1.285	92.94	104,614.39
100	1.024	94.38	111,797.29
120	0.823	95.49	117,328.95
150	0.756	95.86	119,172.84
180	0.802	95.60	117,906.89
210	0.743	95.93	119,530.61
240	0.757	95.85	119,145.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 160 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2008 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.452	86.51	92,201.44
4	2.356	87.04	94,835.53
6	2.287	87.42	96,728.79
8	2.045	88.76	103,368.89
10	1.816	90.02	109,652.30
20	1.662	90.87	113,877.82
40	1.406	92.28	120,902.07
60	1.223	93.29	125,923.30
80	0.994	94.55	132,206.71
100	0.882	95.16	135,279.82
120	0.752	95.88	138,846.82
150	0.768	95.79	138,407.80
180	0.753	95.87	138,819.38
210	0.841	95.39	136,404.79
240	0.823	95.49	136,898.69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 80 ppm ตัวดูดซับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2065 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.984	31.83	24,661.32
4	1.929	33.72	26,128.78
6	1.856	36.24	28,076.49
8	1.824	37.34	28,930.29
10	1.743	40.13	31,091.46
20	1.602	44.98	34,853.49
40	1.378	52.70	40,830.05
60	1.165	60.03	46,513.12
80	0.934	67.99	52,676.45
100	0.762	73.91	57,265.59
120	0.431	85.31	66,097.03
150	0.374	87.27	67,617.85
180	0.262	91.13	70,606.13
210	0.348	88.16	68,311.55
240	0.273	90.75	70,312.64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 100 ppm ตัวดูดซับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2014 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.253	38.05	37,787.83
4	2.206	39.35	39,073.59
6	2.145	41.03	40,742.35
8	2.102	42.21	41,918.69
10	1.984	45.46	45,146.78
20	1.856	48.99	48,648.44
40	1.662	54.33	53,955.64
60	1.483	59.26	58,852.50
80	1.256	65.52	65,062.47
100	1.028	71.80	71,299.80
120	0.752	79.40	78,850.25
150	0.786	78.47	77,920.12
180	0.635	82.63	82,050.99
210	0.712	80.50	79,944.52
240	0.643	82.40	81,832.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 120 ppm ตัวดูดซับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2043 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.362	87.01	53,890.93
4	2.358	87.03	53,998.81
6	2.346	87.10	54,322.43
8	2.331	87.18	54,726.95
10	2.252	87.62	56,857.45
20	2.197	87.92	58,340.72
40	2.053	88.71	62,224.16
60	1.826	89.96	68,345.99
80	1.638	91.00	73,416.05
100	1.251	93.13	83,852.81
120	1.013	94.44	90,271.29
150	0.882	95.16	93,804.15
180	0.878	95.19	93,912.02
210	0.824	95.48	95,368.31
240	0.766	95.80	96,932.48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 140 ppm ตัวดูดซับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2052 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.479	86.37	70,006.28
4	2.434	86.61	71,214.54
6	2.385	86.88	72,530.19
8	2.336	87.15	73,845.85
10	2.248	87.64	76,208.66
20	2.086	88.53	80,558.37
40	1.856	89.80	86,733.90
60	1.673	90.81	91,647.47
80	1.452	92.02	97,581.34
100	1.261	93.08	102,709.71
120	0.967	94.70	110,603.64
150	0.985	94.60	110,120.34
180	0.872	95.22	113,154.40
210	0.954	94.77	110,952.70
240	0.861	95.28	113,449.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 160 ppm ตัวดูดซับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600 °C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2000 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.640	54.62	87,391.18
4	2.586	55.55	88,878.79
6	2.542	56.31	90,090.91
8	2.487	57.25	91,606.06
10	2.443	58.01	92,818.18
20	2.241	61.49	98,382.92
40	2.003	65.59	104,939.39
60	1.814	68.84	110,146.01
80	1.605	72.44	115,903.58
100	1.418	75.66	121,055.10
120	1.102	81.10	129,760.33
150	0.962	83.51	133,617.08
180	0.984	83.13	133,011.02
210	0.935	83.98	134,360.88
240	0.976	83.27	133,231.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 80 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.1997 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.921	89.44	27,239.21
4	1.863	89.76	28,839.40
6	1.794	90.14	30,743.08
8	1.765	90.30	31,543.18
10	1.679	90.77	33,915.89
20	1.542	91.53	37,695.66
40	1.326	92.72	43,655.01
60	1.103	93.95	49,807.49
80	0.882	95.16	55,904.79
100	0.713	96.10	60,567.44
120	0.421	97.70	68,623.60
150	0.405	97.79	69,065.03
180	0.386	97.90	69,589.23
210	0.353	98.08	70,499.69
240	0.422	97.70	68,596.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 100 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.1994 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.248	87.64	38,305.00
4	2.151	88.17	40,985.21
6	2.032	88.83	44,273.32
8	1.895	89.58	48,058.78
10	1.782	90.21	51,181.09
20	1.663	90.86	54,469.19
40	1.274	93.00	65,217.69
60	1.169	93.58	68,118.96
80	0.915	94.98	75,137.26
100	0.736	95.97	80,083.22
120	0.610	96.66	83,564.74
150	0.543	97.03	85,416.03
180	0.585	96.80	84,255.52
210	0.632	96.54	82,956.86
240	0.554	96.97	85,112.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 120 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2001 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.371	86.96	54,774.27
4	2.315	87.27	56,316.19
6	2.251	87.62	58,078.40
8	2.208	87.86	59,262.38
10	2.104	88.43	62,125.96
20	1.886	89.63	68,128.47
40	1.765	90.30	71,460.14
60	1.548	91.49	77,435.11
80	1.321	92.75	83,685.43
100	1.147	93.70	88,476.42
120	0.867	95.25	96,186.07
150	0.775	95.75	98,719.24
180	0.786	95.69	98,416.36
210	0.763	95.82	99,049.65
240	0.805	95.59	97,893.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 140 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.1999 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.482	51.25	71,779.69
4	2.425	52.37	73,350.72
6	2.361	53.63	75,114.69
8	2.326	54.32	76,079.36
10	2.238	56.05	78,504.82
20	2.098	58.80	82,363.50
40	1.895	62.80	87,958.58
60	1.672	67.18	94,104.90
80	1.423	72.08	100,967.84
100	1.268	75.13	105,239.95
120	0.975	80.90	113,315.61
150	0.924	81.90	114,721.27
180	0.886	82.65	115,768.63
210	0.872	82.93	116,154.50
240	0.881	82.75	115,906.44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 160 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เผาที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$C (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2004 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.596	55.38	88,426.45
4	2.538	56.38	90,021.06
6	2.461	57.70	92,138.04
8	2.437	58.11	92,797.88
10	2.346	59.68	95,299.76
20	2.221	61.83	98,736.41
40	2.023	65.24	104,180.07
60	1.784	69.36	110,750.95
80	1.549	73.40	117,211.86
100	1.392	76.11	121,528.29
120	1.196	79.48	126,916.96
150	0.994	82.96	132,470.60
180	1.061	81.81	130,628.55
210	1.023	82.46	131,673.29
240	0.997	82.91	132,388.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 80 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2030 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.826	37.27	29,374.80
4	1.813	37.72	29,727.64
6	1.752	39.82	31,383.25
8	1.624	44.23	34,857.31
10	1.585	45.57	35,915.81
20	1.329	54.38	42,863.93
40	1.056	63.78	50,273.45
60	0.838	71.29	56,190.20
80	0.682	76.66	60,424.22
100	0.587	79.93	63,002.62
120	0.460	84.31	66,449.54
150	0.531	81.86	64,522.52
180	0.526	82.04	64,658.23
210	0.533	81.79	64,468.24
240	0.467	84.07	66,259.55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 100 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2006 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	1.950	46.40	46,260.67
4	1.874	48.49	48,348.07
6	1.720	52.74	52,577.80
8	1.668	54.17	54,006.03
10	1.531	57.94	57,768.84
20	1.434	60.61	60,433.03
40	1.386	61.94	61,751.38
60	1.257	65.49	65,294.47
80	1.032	71.69	71,474.28
100	0.771	78.88	78,642.86
120	0.624	82.93	82,680.33
150	0.632	82.71	82,460.61
180	0.558	84.75	84,493.08
210	0.592	83.81	83,559.24
240	0.604	83.48	83,229.65

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 120 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2049 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.155	50.63	59,299.23
4	2.145	50.86	59,568.13
6	1.909	56.27	65,914.03
8	1.892	56.66	66,371.15
10	1.769	59.49	69,678.55
20	1.632	62.63	73,362.40
40	1.452	66.77	78,202.50
60	1.172	73.19	85,731.53
80	0.868	80.17	93,905.92
100	0.814	81.41	95,357.95
120	0.724	83.48	97,777.99
150	0.815	81.39	95,331.06
180	0.728	83.39	97,670.44
210	0.749	82.90	97,105.76
240	0.727	83.41	97,697.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.24 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 140 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2048 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.364	53.57	73,236.81
4	2.257	55.67	76,115.38
6	2.138	58.01	79,316.78
8	2.129	58.19	79,558.91
10	2.085	59.06	80,742.62
20	1.833	64.02	87,522.06
40	1.759	65.47	89,512.85
60	1.542	69.74	95,350.70
80	1.641	67.79	92,687.35
100	0.954	81.31	111,169.40
120	0.936	81.67	111,653.65
150	0.835	83.65	114,370.80
180	0.846	83.44	114,074.88
210	0.912	82.14	112,299.31
240	0.861	83.14	113,671.34

ตารางที่ ก.25 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 160 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2052 กรัม)

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.495	57.12	89,069.86
4	2.442	58.03	90,492.91
6	2.385	59.01	92,023.37
8	2.367	59.32	92,506.67
10	2.294	60.58	94,466.73
20	2.268	61.02	95,164.83
40	1.957	66.38	103,515.22
60	1.851	68.20	106,361.33
80	1.824	68.67	107,086.28
100	1.192	79.55	124,055.55
120	0.958	83.58	130,338.47
150	1.143	80.39	125,371.20
180	1.082	81.44	127,009.06
210	0.937	83.94	130,902.32
240	0.924	84.16	131,251.38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค.1 การคำนวณค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ (q)

ตารางที่ ค.1 ค่าปริมาณการดูดกลืนแสงของสารละลาย Congo red ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 160 ppm ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า เพื่อใช้เป็นตัวอย่างการคำนวณค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	%Adsorption	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
2	2.495	57.12	89,069.86
4	2.442	58.03	90,492.91
6	2.385	59.01	92,023.37
8	2.367	59.32	92,506.67
10	2.294	60.58	94,466.73
20	2.268	61.02	95,164.83
40	1.957	66.38	103,515.22
60	1.851	68.20	106,361.33
80	1.824	68.67	107,086.28
100	1.192	79.55	124,055.55
120	0.958	83.58	130,338.47
150	1.143	80.39	125,371.20
180	1.082	81.44	127,009.06
210	0.937	83.94	130,902.32
240	0.924	84.16	131,251.38

(น้ำหนักของสารดูดซับ 0.2052 กรัม)

จากตารางที่ ค. 1 จะทราบค่าปริมาณการการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างๆ นำมาหาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 กราฟสารละลายมาตรฐาน Congo red

ตัวอย่างเช่น สารละลาย Congo red ที่ความเข้มข้น 160 ppm ที่เวลา 60 : นำค่าการดูดกลืนแสง = 1.851 มาหาค่า ความเข้นข้นของสารละลายที่เหลือ จากรูปที่ 4.1 ได้ความเข้มข้นของสารละลาย 50.873 ppm แล้วนำมาแทนในสมการปริมาณการดูดซับจำเพาะ (q)

ค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ(q) = $\left[\frac{c_o - c_e}{m}\right] \times V$

เมื่อ q = น้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (µg/g)

C_o = ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red เริ่มต้น

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (µg/ml)

m = น้ำหนักของสารดูดซับ (g)

V = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ (ml)

จากค่าความเข้มข้นของสารละลาย Congo red เริ่มต้น 160 ppm ดังนั้น

ค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ(q) = $\left(\frac{160 \text{ ppm} - 50.873 \text{ ppm}}{0.2052\ g}\right) \times 200\ ml.$

ค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ(q) = 106,361.33 µg / g

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกันตพงศ์ เลิศวิธี ภูมิลำเนาอยู่ที่ จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2553 และเข้าศึกษาในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2555 ขณะศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี ได้ปฏิบัติงานในตำแหน่ง วิศวกรควบคุมกระบวนการ ณ บริษัทแห่งหนึ่ง ในนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University