การดูดซับยูเรียในสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น

นายณัฐพล นิลประดับแก้ว

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 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF UREA FROM AQUEOUS SOLUTION BY USING HIERARCHICAL POROUS CARBON MONOLITH

Mr. Natthaphon Ninpradubkaew

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับยูเรียในสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น
โดย	นายณัฐพล นิลประดับแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. มงคล สุขวัฒนาสินิทธิ์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. อดิศักดิ์ ไสยสุข)

ณัฐพล นิลประดับแก้ว : การดูดซับยูเรียในสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น (ADSORPTION OF UREA FROM AQUEOUS SOLUTION BY USING HIERARCHICAL POROUS CARBON MONOLITH) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ณัฐพร โทณานนท์, 73 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับยูเรียในสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นเป็นตัวดูดซับ ในขั้นแรกทำการเตรียมตัวดูดซับซึ่งสังเคราะห์จากริซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ในรูปของคาร์บอนเจลลักษณะเป็นแท่งซึ่งมีรูพรุนแบบแมคโครพอร์ที่เชื่อมทะลุถึงกัน โดยการเตรียมคาร์บอนเจลจะไม่ใช้เทมเพลตและคลื่นอัลตร้าโซนิก แต่จะควบคุมขนาดรูพรุนแมคโครพอร์จากความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนเจลที่ได้จะนำไปกระตุ้นด้วยความร้อน 3 วิธี (การคาร์บอไนเซชัน กระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี) เพื่อปรับปรุงพื้นที่ผิว เพิ่มรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันให้เกิดขึ้นภายในพื้นผิวโครงสร้างรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

เมื่อนำไปศึกษาสมดุลการดูดซับ พบว่าคาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นทางเคมีจะมีความสามารถในการดูดซับยูเรียสูงที่สุด เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ผสมกับไมโครพอร์และหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการกระตุ้น การดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นด้วยวิธีคาร์บอไนเซชันมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ แค่คาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมีจะมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรุนดิช โดยคาร์บอนโมโนลิทที่คาร์บอไนเซชัน กระตุ้นทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมี มีค่าความสามารถในการดูดซับยูเรียสูงสุด เท่ากับ 3.14, 66.23 และ 212.77 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้วิธีการไหลวนสารละลายยูเรียผ่านคอลัมน์ที่บรรจุคาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิด พบว่าที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที การดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิดจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที คาร์บอนโมโนลิทจากการคาร์บอไนเซชันจะมีความสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน ต่างจากคาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมีซึ่งมีความสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และอิทธิพลของอัตราไหลที่เพิ่มขึ้นในระบบส่งผลให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
ปีการศึกษา 2557	

5570190921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEYWORDS: HIERARCHICAL POROUS CARBON MONOLITH / UREA / ADSORPTION / ISOTHERM AND KINETICS MODELING

NATTHAPHON NINPRADUBKAEW: ADSORPTION OF UREA FROM AQUEOUS SOLUTION BY USING HIERARCHICAL POROUS CARBON MONOLITH. ADVISOR: ASST. PROF. NATTAPORN TONANON, Ph.D., 73 pp.

This research aims to study the adsorption of urea in aqueous solution using hierarchical porous carbon monolith as adsorbents. Initially, the adsorbent synthesized from resorcinol and formaldehyde in the rod form, which contained interconnected macroporous. This research, preparation of carbon gel without using any templates and ultrasonic wave but the interconnected macroporous texture depends on the catalyst concentration. Carbon gels were activated with three methods (carbonization, physical activation and chemical activation) in order to improve the surface area, porosity and functional group within the macroporous structure for increasing urea adsorption capacity.

The equilibrium adsorption, carbon monolith prepared by chemical activation is able to absorb highest amount of urea because of micro-mesoporous and functional groups. Urea adsorption of carbon monolith prepared by carbonization was well fitted to Langmuir model but physical activation and chemical activation were well fitted to both Langmuir and Freundlich model. The maximum adsorption capacities of carbon monolith prepared by carbonization, physical activation and chemical activation were 3.14, 66.23 and 212.77 mg/g, respectively.

The adsorption kinetics study, the flow solution through a column packed carbon monolith was used at 5 ml/min. All of these carbon monoliths, reaching equilibrium point at 120 minutes, Adsorption kinetic of carbon monolith prepared by carbonization was followed the pseudo-first-order kinetic model but carbon monolith prepared by physical and chemical activation were followed the pseudo-second-order kinetic model. Surface functional group from activation affected on adsorption and the increasing of flow rate in the system causes the adsorption to reach equilibrium faster, but do not affect the efficiency of absorption.

Department:	Chemical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Chemical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2014		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัย และข้อคิดเห็นต่างๆ จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารธวัช และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินิทธิ์ และอาจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ไสยสุข ที่สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนถึงคำปรึกษาที่มีประโยชน์ยิ่ง

ท้ายสุดนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่างๆเรื่อยมา จนทำให้สำเร็จการศึกษาครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ... จ

กิตติกรรมประกาศ ... ฉ

สารบัญ ... ช

สารบัญตาราง ... ญ

สารบัญรูป ... ฎ

บทที่ 1 บทนำ ... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย ... 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ... 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 4

2.1 ยูเรีย ... 4

2.1.1 คุณสมบัติและแหล่งที่มา ... 4

2.1.2 การนำมาใช้ประโยชน์ ... 4

2.1.3 ข้อเสียของยูเรีย ... 5

2.1.4 การกำจัดยูเรีย ... 6

2.2 การดูดซับ ... 8

2.2.1 กระบวนการดูดซับ ... 8

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ... 10

2.2.3 สมดุลของการดูดซับ ... 10

2.2.4 จลนศาสตร์การดูดซับ ... 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.2.5 งานวิจัยที่ศึกษาไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ 14
2.3 คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น 15
2.3.1 คุณสมบัติของคาร์บอนโมโนลิท 16
2.3.2 การสังเคราะห์คาร์บอนโมโนลิทลำดับขั้นจากริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล 16
2.3.3 การประยุกต์ใช้คาร์บอนโมโนลิทในการดูดซับ 19
2.3.4 การกระตุ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ 23
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย 25
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี 25
3.1.1 อุปกรณ์ 25
3.1.2 สารเคมี 26
3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง 26
3.2.1 การเตรียมคาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้น 26
3.2.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับคาร์บอนโมโนลิท 30
3.2.3 การทดลองหาสมดุลและไอโซเทอมการดูดซับยูเรีย 30
3.2.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นที่ส่งผลต่อการดูดซับยูเรีย 30
3.2.3.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาตรสารละลายกับปริมาณตัวดูดซับ 32
3.2.4 การทดลองเพื่อหาจลนศาสตร์ของการดูดซับยูเรีย 32
3.2.4.1 การทดลองหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 32
3.2.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราไหลต่อการดูดซับ 35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 37
4.1 สมบัติของคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้เป็นตัวดูดซับ 37
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) 38

หน้า

4.1.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนระดับไมโครพอร์และเมโซพอร์ของตัวดูดซับด้วยวิธีการวัดไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจน (BET) 39

4.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันตัวดูดซับ ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FTIR).. 41

4.2 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับยูเรีย 42

4.2.1 อิทธิพลของชนิดคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้ในการดูดซับยูเรีย.. 42

4.2.2 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น 44

4.2.3 อิทธิพลของอัตราส่วนปริมาตรสารละลายกับปริมาณตัวดูดซับ 44

4.2.4 ไอโซเทอมการดูดซับ.. 46

4.3 จลนศาสตร์การดูดซับยูเรีย.. 51

4.3.1 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล 51

4.3.2 อิทธิพลของอัตราไหลต่อการดูดซับ.. 52

4.3.3 จลนศาสตร์การดูดซับ 53

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.. 57

5.1 สรุปผลการวิจัย 57

5.1.1 ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนโมโนลิท.. 57

5.1.2 ศึกษาการดูดซับยูเรีย 57

5.2 ข้อเสนอแนะ 58

รายการอ้างอิง 59

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี 9

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ.. 14

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่ใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ 22

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของการผสมสารตั้งต้นของคาร์บอน 26

ตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์รูพรุนและพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิท.. 41

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับยูเรียของไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรุนดิช....... 48

ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับยูเรียของงานวิจัยอื่นๆ 49

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดซับยูเรียของจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน และจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน... 56

ตารางที่ ก.1 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน 67

ตารางที่ ก.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทาง กายภาพ.. 67

ตารางที่ ก.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี 68

ตารางที่ ก.4 สมดุลการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ กับปริมาตรสารละลายต่างๆ.. 68

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทดลองทางจลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่ คาร์บอไนเซชัน ที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที... 69

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการทดลองทางจลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้น ทางกายภาพ ที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที 70

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการทดลองทางจลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้น ทางเคมี ที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที... 71

ตารางที่ ก.8 จลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่อัตราไหล ต่างๆ 72

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปร่างโมเลกุลของยูเรีย 4
รูปที่ 2.2 การฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียมและการล้างไตทางช่องท้อง 6
รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนของการดูดซับ 8
รูปที่ 2.4 ลักษณะรูพรุนของวัสดุดูดซับ 15
รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่ผ่านรูพรุนของคอลัมน์แบบแพคเบดและแท่งโมโนลิท 16
รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของริซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ 17
รูปที่ 2.7 การรวมตัวของอนุพันธ์โมโนเมอร์เป็นพอลิเมอร์ของอาร์เอฟเจล 18
รูปที่ 3.1 แผนผังการกระตุ้นด้วยความร้อนให้กลายเป็นคาร์บอน 28
รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนโมโนลิท 29
รูปที่ 3.3 การเตรียมคอลัมน์ในระบบไหลวน 33
รูปที่ 3.4 การดูดซับยูเรียแบบไหลวน 34
รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการทดลองการดูดซับยูเรียบนคาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้น 36
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของคาร์บอนเจลและคาร์บอนโมโนลิทหลังการกระตุ้น 38
รูปที่ 4.2 รูปขยายของคาร์บอนโมโนลิทที่กำลังขยาย2,000เท่า (ก) คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน (ข) คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และ (ค) คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี 39
รูปที่ 4.3 แสดงไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของคาร์บอนโมโนลิท 40
รูปที่ 4.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิท 41
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นกับประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ 43

หน้า

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นกับความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ 43

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลายกับประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ ที่สารละลายเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร 45

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลายกับความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ ที่สารละลายเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร........ 45

รูปที่ 4.9 กราฟไอโซเทอมแสดงการดูดซับยูเรียโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ 46

รูปที่ 4.10 แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ 47

รูปที่ 4.11 แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิช 48

รูปที่ 4.12 แสดงความสามารถการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณพื้นที่ผิวของคาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นแบบต่างๆ........ 50

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาสัมผัสของยูเรียโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ........ 52

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับยูเรียกับเวลาสัมผัสสารละลายที่อัตราการไหลที่เปลี่ยนไป 53

รูปที่ 4.15 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน........ 54

รูปที่ 4.16 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน 55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยูเรียเป็นของเสียที่เกิดขึ้นภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตจำพวกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของกรดอะมิโนที่ตับกลายเป็นแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียเหล่านี้จะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด อยู่ในรูปของกรดยูริกและยูเรีย โดยของเสียเหล่านี้จะถูกลำเลียงมาที่ไตเพื่อเอาของเสียออกจากเลือด และขับออกมาในรูปของปัสสาวะ แต่ถ้าเมื่อร่างกายเกิดความผิดปกติขึ้น เนื่องจากไตไม่สามารถกำจัดยูเรียในกระแสเลือดได้ จึงทำให้เลือดเกิดความเป็นพิษขึ้น เป็นอันตรายต่อชีวิตได้ ซึ่งอาการเหล่านี้สามารถรักษาโดยการผ่าตัดเปลี่ยนไตหรือบรรเทาโดยการบำบัดเลือด

จากข้อมูลของสมาคมโรคไตแห่งประเทศไทย [1] พบว่าตั้งแต่ปี ค.ศ.1997 ประเทศไทยมีจำนวนผู้ป่วยเกี่ยวกับโรคไตเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของการผ่าตัดเปลี่ยนไตมากขึ้นแต่ก็ไม่เพียงพอกับจำนวนผู้ป่วย ทำให้ผู้ป่วยส่วนใหญ่หันไปรักษาโดยวิธีบำบัดเลือด ซึ่งมี 2 วิธี โดยวิธีแรกคือ การฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม และการล้างไตทางช่องท้อง แต่อย่างไรก็ตามการรักษาโรคนี้ยังต้องแบกรับภาระค่าใช้จ่ายแต่ละรายเป็นจำนวนมาก ทั้งค่ารักษาและอุปกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำยาที่นำมาใช้ในการฟอกไต ที่ต้องใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งน้ำยาเหล่านี้หลังจากนำไปใช้แล้วจะมีการปนเปื้อนของยูเรียที่ถูกกำจัดจากกระแสเลือดอยู่ ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ จึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาการกำจัดยูเรียในสารละลาย เพื่อจะเป็นแนวทางที่จะนำน้ำยาฟอกไตกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเทคนิคที่เลือกในงานวิจัยนี้คือ การดูดซับ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง

ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการสังเคราะห์และผลิตวัสดุแบบใหม่โดยมุ่งเน้นให้มีคุณสมบัติพิเศษที่ช่วยในการดูดซับ วัสดุที่เป็นคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นซึ่งเกิดจากกระบวนการคาร์บอไนเซชันของริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจลเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนสูง อีกทั้งยังเป็นรูพรุนที่ต่อเนื่องทำให้มีความต้านทานการไหลที่ต่ำ จึงนิยมมาประยุกต์ใช้ในระบบคอลัมน์ ซึ่งเป็นระบบการดูดซับแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมลักษณะและขนาดรูพรุนได้ ต่างจากคาร์บอนตามปกติที่ใช้ดูดซับโดยทั่วไป ซึ่งคาร์บอนที่สังเคราะห์เองจะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่า

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการดูดซับยูเรียในสารละลาย ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้วิธีการป้อนสารละลายไหลวนผ่านคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุน และศึกษาสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการดูดซับยูเรีย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เตรียมคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นด้วยวิธีการโซลเจลแต่ไม่ใช้คลื่นอัลตร้าโซนิกในการควบคุมให้เกิดรูพรุน

1.2.2 ศึกษาผลของรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนโมโนลิทต่อการดูดซับยูเรีย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์นำคาร์บอนในรูปโมโนลิทเพื่อใช้ในการดูดซับยูเรียในสารละลาย จากการสังเคราะห์คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนนำมาบรรจุในคอลัมน์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับยูเรียโดยใช้วิธีการป้อนสารละลายยูเรียไหลวนผ่านคาร์บอนโมโนลิท ซึ่งคาร์บอนโมโนลิทต้องมีรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ เพื่อที่จะให้เกิดการถ่ายเทมวลที่ดีและมีค่าความดันลดน้อย ยิ่งไปกว่านั้น เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการในการดูดซับยูเรีย คาร์บอนที่ใช้จึงต้องทำการกระตุ้นให้เกิดรูพรุนขนาดเมโซพอร์หรือไมโครพอร์และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเพื่อช่วยทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัยดังนี้

(1) งานวิจัยนี้สังเคราะห์คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นโดยกระบวนการโซลเจล (sol-gel technology) โดยไม่ใช้เทมเพลตและคลื่นอัลตร้าโซนิก ควบคุมขนาดรูพรุนแมคโครพอร์โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างสารริซอร์ซินอล ฟอร์มัลดีไฮด์ และโซเดียมคาร์บอเนตที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

(2) ปรับปรุงพื้นที่ผิวให้ตัวดูดซับด้วยวิธีการกระตุ้นแบบคาร์บอไนเซชัน การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี

(3) ศึกษาขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวและหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนโมโนลิทที่มีผลต่อการดูดซับยูเรีย

(4) ศึกษาสมดุลและไอโซเทอมในการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิทที่ถูกกระตุ้นแบบต่างๆ

(5) ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับยูเรียโดยวิธีการไหลวนสารละลายยูเรียผ่านคอลัมน์คาร์บอนโมโนลิท

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำคาร์บอนโมโนลิทมาใช้ในการดูดซับยูเรียได้

1.4.2 ทราบขนาดรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนโมโนลิทที่เหมาะสมที่ทำให้ดูดซับยูเรียได้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.4.3 ทราบสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับยูเรียด้วยคาร์บอนโมโนลิทในระบบไหลวน

1.4.4 นำไปพัฒนาการดูดซับยูเรียในระบบต่างๆ เช่น การนำน้ำยาฟอกไตที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น

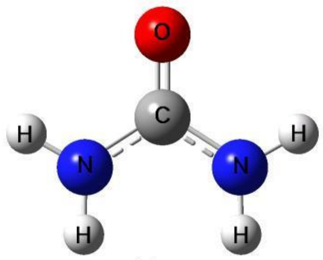
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยูเรีย

2.1.1 คุณสมบัติและแหล่งที่มา

ยูเรีย (Urea) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมี คือ $CO(NH_2)_2$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60 โดยมีไนโตรเจนประกอบร้อยละ 46 ในสภาพบริสุทธิ์เป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้ดี ยูเรียค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1727 ซึ่งพบในปัสสาวะของสิ่งมีชีวิตโดยเฮอร์แมน โบเออลาวฟ นักวิทยาศาสตร์ชาวดัตช์ จากนั้นในปี ค.ศ.1828 ฟรีดริช เวอเลอร์ นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน สามารถสังเคราะห์ยูเรียขึ้นมาได้จากสารอนินทรีย์ การค้นพบนี้ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นการค้นคว้าทดลอง และสามารถสังเคราะห์และผลิตยูเรียนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในปัจจุบัน [2, 3]



รูปที่ 2.1 รูปร่างโมเลกุลของยูเรีย [3]

2.1.2 การนำมาใช้ประโยชน์

ยูเรียสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ในทางการเกษตร มักใช้เป็นตัวเร่งการเจริญเติบโตของพืชโดยผสมลงในปุ๋ยซึ่งมักเรียกว่าปุ๋ยยูเรีย นอกจากนั้นนำมาผสมกับตัวยาทำเป็นยากำจัดศัตรูพืชและวัชพืชอีกด้วย ในทางปศุสัตว์ เกษตรกรใช้เป็นแหล่งโปรตีนโดยผสมกับอาหารสัตว์จำพวกเคี้ยวเอื้อง เช่น วัว ควาย เป็นต้น เพราะในกระเพาะของสัตว์พวกนี้สามารถสังเคราะห์สารอินทรีย์เชิงซ้อนจากยูเรียได้ ในทางการแพทย์ใช้เตรียมตัวยาบางชนิด เช่น ยานอนหลับ ยาขับปัสสาวะ เป็นต้น ทางอุตสาหกรรมใช้เป็นวัตถุดิบในการทำวัสดุพอลิเมอร์ เช่น ยูเรียเรซินและเมลามีนเรซินใช้ทำเป็นกาว ทำภาชนะพลาสติก และยังสามารถนำมาเคลือบเนื้อไม้ได้ด้วย ไซคลิกยูเรียเรซิน นำไปใช้ในกระบวนการตกแต่งสิ่งทอ ไซคลิกยูเรียเรซินที่ใช้ ได้แก่ เอทิลีนยูเรีย โพรพิลีนยูเรีย และเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน เป็นต้น [4-6]

2.1.3 ข้อเสียของยูเรีย

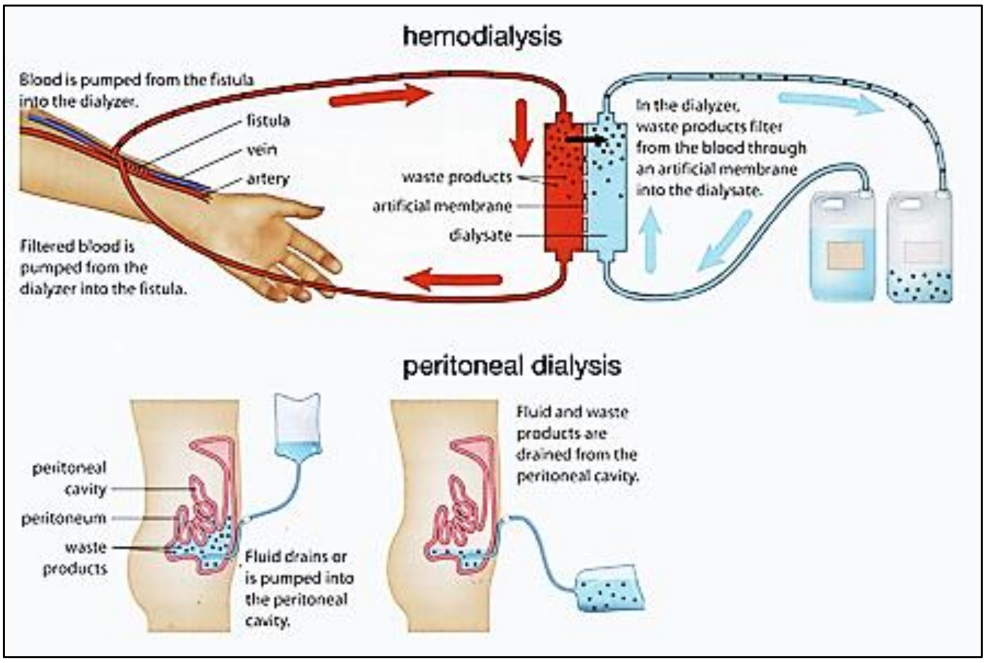
ยูเรียมีบทบาทที่ส่งผลต่อร่างกายสิ่งมีชีวิต เนื่องจากในร่างกายของสิ่งมีชีวิตจำพวกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น มนุษย์ ยูเรียจัดเป็นของเสีย ซึ่งเกิดจากการสลายตัวกรดอะมิโนจากโปรตีนที่รับประทานเข้าไป โปรตีนจะถูกย่อยเป็นกรดอะมิโนที่ลำไส้เล็ก กรดอะมิโนจะถูกดูดซึมไปใช้ในระบบต่างๆ และถูกส่งไปกำจัดที่ตับได้เป็นแอมโมเนียปริมาณมากออกมา ตับจะเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียให้เป็นยูเรียส่งผ่านไตให้กำจัดในรูปของปัสสาวะทิ้งออกไป หากไตเริ่มทำหน้าที่บกพร่องหรือทำงานหนักไม่สามารถจำกัดของเสียออกจากร่างกายได้ ยูเรียจะเกิดการสะสมในกระแสเลือด เกิดการเสียสมดุลกรด-ด่าง เสียสมดุลน้ำ ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อชีวิตได้ โดยปกติแล้วความเข้มข้นยูเรียในเลือด จะมีประมาณ 6-20 มิลลิกรัม/เดซิลิตร [7]

โรคไตที่เกิดขึ้นนี้ไม่อาจจะรักษาให้หายขาดได้ นอกจากจะทำการผ่าตัดเปลี่ยนไตซึ่งเป็นวิธีที่มีโอกาสน้อยและต้องรอผู้บริจาคเป็นเวลานาน จึงมักทำการบำบัดด้วยยาและการบำบัดเลือด ซึ่งมี 2 วิธี [8] คือ

(1) การฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม (Hemodialysis) ซึ่งเป็นการนำเลือดออกจากร่างกายผ่านเข้ามาในตัวกรองของเสียที่เครื่องไตเทียม เพื่อดึงน้ำและของเสียออกจากร่างกาย เลือดที่ถูกกรองแล้วจะไหลกลับเข้าร่างกายทางหลอดเลือดอีกหลอดหนึ่งซึ่งคล้ายกับการให้เลือดผ่านสายน้ำเกลือ มีข้อดีคือ ไม่ต้องทำเองและใช้เวลาไม่มาก โดยทั่วไปทำครั้งละ 4-5 ชั่วโมง สัปดาห์ละ 2-3 ครั้ง แต่มีข้อเสียที่การฟอกเลือดต้องทำที่ศูนย์ไตเทียมหรือโรงพยาบาล และต้องมาบ่อยครั้ง เนื่องจากปกติแล้วไตต้องทำหน้าที่ขับของเสียที่เกิดขึ้นในร่างกายตลอดเวลา เมื่อไตเสียไปแล้วจึงต้องทำการฟอกเลือดให้บ่อยเช่นเดียวกัน

(2) การล้างไตทางช่องท้อง (Peritoneal dialysis) วิธีนี้อาศัยเยื่อบุช่องท้องช่วยกรองของเสียออกจากร่างกาย โดยการใส่น้ำยาเข้าในช่องท้องผ่านทางสายพลาสติกที่แพทย์ได้ทำผ่าตัดฝังไว้ในช่องท้อง ทิ้งน้ำยาไว้ในช่องท้องประมาณ 4-6 ชั่วโมง แล้วปล่อยน้ำยาออกจากช่องท้องแล้วทิ้งไป น้ำและของเสียในเลือดที่ซึมออกมาอยู่ในน้ำยาจะถูกกำจัดออกจากร่างกาย ผู้ป่วยและญาติสามารถเปลี่ยนน้ำยาได้เองที่บ้าน โดยทั่วไปจะทำการเปลี่ยนน้ำยาวันละ 4-5 ครั้งและต้องทำต่อเนื่องทุกวัน ผู้ป่วยและญาติสามารถปรับการเปลี่ยนถุงน้ำยาให้เข้ากับกิจวัตรประจำวันของผู้ป่วยได้ ในขณะที่มีน้ำยาในช่องท้อง ผู้ป่วยสามารถทำงานและมีกิจกรรมได้ตามปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.2 การฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียมและการล้างไตทางช่องท้อง [9]

แต่อย่างไรก็ตามการรักษาโรคนี้มีค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ทั้งค่ารักษาและอุปกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำยาที่นำมาใช้ในการฟอกไต ที่ต้องใช้เป็นจำนวนมาก น้ำยาเหล่านี้เมื่อนำไปใช้แล้ว จะมีการปนเปื้อนของยูเรีย ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้

2.1.4 การกำจัดยูเรีย

ปัจจุบันมีการศึกษาการกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในสารละลายอย่างมากมาย ซึ่งวิธีที่นิยมคือการดูดซับ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายน้อย โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับยูเรีย ดังนี้

Bakheit et al. (1972) [10] ใช้ดินในซูดานเป็นตัวดูดซับยูเรีย โดยทำการไฮโดรไลซิสยูเรียให้กลายเป็นแอมโมเนียแล้วทำการดูดซับด้วยดินประเภทต่างๆ โดยดินซูเลไม มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด คือ 0.38 มิลลิกรัม/กรัม โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการดูดซับด้วยดิน คือความเป็นกรด-ด่างและสัดส่วนของดินแต่ละชนิดที่ต่างกัน

Grynpas et al. (1984) [11] ใช้ดินเหนียวอะลูมิเนียมซิลิเกตในการศึกษาการดูดซับยูเรียเพื่อหาสมดุลของการดูดซับ โดยความเข้มข้นของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับที่สูงขึ้นมีผลให้การดูดซับสูงขึ้น มีค่าความสามารถในการดูดซับโดยเฉลี่ย 2.38 มิลลิกรัม/กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายยูเรีย 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร

Shi et al. (1999) [12] ศึกษาการดูดซับยูเรียในสารละลายเซรัมอะบูมินจากมนุษย์ โดยใช้พอลิเมอร์ที่เตรียมจากเบต้าไซโคเดกตรินเป็นตัวดูดซับนำไปแช่ในสารละลายยูเรียที่มีความเข้มข้น 130 มิลลิกรัม/เดซิลิตรและเขย่าที่อุณหภูมิ 37°C เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าพอลิเมอร์เบต้าไซโคเดกตรินมีความสามารถในการดูดซับยูเรียสูงสุดเท่ากับ 50.6 มิลลิกรัม/กรัม

Climent et al. (2000) [13] ศึกษาการดูดซับยูเรียบนโรเดียมอิเล็กโทรด โดยปรับปรุงสภาพผิวด้วยกรดและความร้อนเพื่อให้มีหมู่ฟังก์ชันเหมาะกับการยึดติดของยูเรีย โดยการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องทำลายพันธะ C-N ด้วยการย่อยยูเรียให้เป็นแอมโมเนีย ซึ่งยูเรียสามารถเกาะบนผิวของอิเล็กโทรดที่มีหมู่ออกไซด์ดีที่สุด

Liang et al. (2005) [14] ใช้ไคโตซานที่หุ้มด้วยสารพวกเซลลูโลสในการดูดซับยูเรีย โดยนำยูเรียมาย่อยสลายให้เล็กลงด้วยเอนไซม์ให้กลายเป็นแอมโมเนียแล้วทำการดูดซับในสารละลาย จากผลการทดลองเมื่อนำมาหาไอโซเทอมจะมีความสอดคล้องกับการดูดซับแบบจำลองแลงก์เมียร์ โดยมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 90.42 มิลลิกรัม/กรัม และจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน

Wernert et al. (2005) [15] ศึกษาการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในเลือดซึ่งเป็นสารจำพวกยูเรีย กรดยูริก และครีแอทีนีน เป็นต้น โดยงานวิจัยใช้ซีโอไลท์เป็นตัวดูดซับในสารละลายที่มีอุณหภูมิ 37°C ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของร่างกาย มีความสามารถในการดูดซับยูเรียเท่ากับ 28.7 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งปัจจัยในการดูดซับขึ้นกับขนาดของรูพรุนที่ต้องกว้างเพียงพอและมีหมู่ฟังก์ชันด้วย

Kim et al. (2009) [16] ศึกษาการดูดซับยูเรียในน้ำยาล้างไตโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นแล้วมาบรรจุใส่คอลัมน์แล้วทำการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้อัตราไหลผ่านคอลัมน์ 300 มิลลิลิตร/นาที พบว่าที่อุณหภูมิที่ต่ำทำให้เกิดการดูดซับยูเรียได้ดี เนื่องจากเป็นการดูดซับทางกายภาพ โมเลกุลยูเรียเคลื่อนไหวเป็นอิสระที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถเกาะติดบนคาร์บอนได้เป็นระเบียบขึ้น และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการล้างได้อีกด้วย มีประสิทธิภาพในการดูดซับโดยเฉลี่ย 60 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายยูเรียเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร

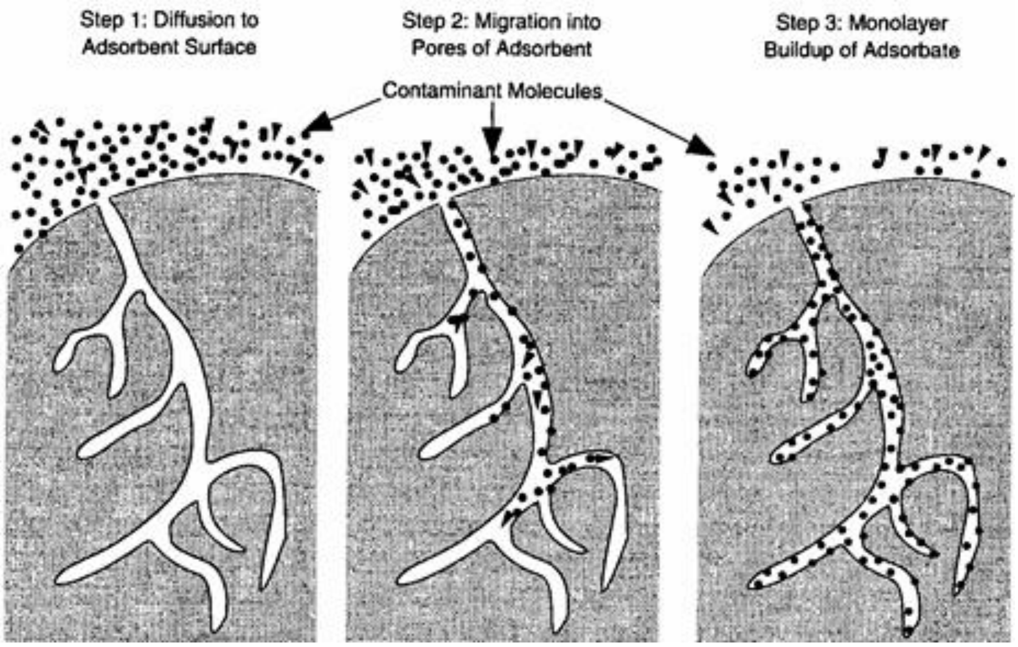
Pillai et al. (2013) [17] ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมมาจากกะลามะพร้าวโดยกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในดูดซับยูเรียในปัสสาวะมนุษย์ พบว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 256.41 มิลลิกรัม/กรัม และมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับชั้นเดียวแบบแลงก์เมียร์และจลนศาสตร์การดูดซับแบบจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน

ในการศึกษาการดูดซับยูเรียในงานวิจัยต่างๆ นิยมนำวัสดุคาร์บอนมาใช้เป็นตัวดูดซับโดยมีการพัฒนาระบบและประสิทธิภาพของตัวดูดซับให้สูงขึ้น จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะพัฒนาตัวดูดซับคาร์บอนแบบใหม่มาใช้ในการดูดซับยูเรีย

2.2 การดูดซับ

2.2.1 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้ในการแยกสารบางชนิดโดยอาศัยการดึงดูดโมเลกุลหรือคอลลอยด์ออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะและจับติดกับผิวของวัตถุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในขณะที่ของแข็งที่ใช้ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยมีขั้นตอนการดูดซับต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอน คือ การแพร่ภายนอก การแพร่ภายใน และการดูดซับ [18] ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนของการดูดซับ [19]

โดยกระบวนการดูดซับนั้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ทางกายภาพ และทางเคมี

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ มักประกอบไปด้วยแรงยึดเหนี่ยวอ่อนๆ คือ แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal's force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแรงที่เกิดจากการแพร่ (Dispersion force) และ

แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลตัวดูดซับเข้าด้วยกัน

การดูดซับประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรงและชั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนตัวดูดซับโดยไม่จำกัดจำนวน จึงสามารถเกิดการทับซ้อนกันของโมเลกุลทับซ้อนกันได้ ดังนั้นจึงมักเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย และเนื่องจากการดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับที่ต่ำและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีใดๆ จึงส่งผลให้เกิดการคายโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (Desorption) ได้ นั่นคือสามารถเกิดการผันกลับได้ (Reversible) นั่นเอง ส่งผลให้ฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายขึ้น

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวตัวดูดซับ ซึ่งทำให้เกิดการสร้างสารประกอบใหม่ขึ้นมาบนผิวของตัวดูดซับนั้น ทำให้ปริมาณตัวดูดซับลดลง การดูดซับประเภทนี้จะเกิดเฉพาะบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเท่านั้น ทำให้เกิดการดูดซับได้เพียงชั้นเดียว จึงเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption) เนื่องจากการดูดซับประเภทนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดได้เร็วขึ้น แต่เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ความแข็งแรงสูงจึงไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) จึงสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้ยาก

Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [20]

การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์	1. เกิดจากพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. สามารถผันกลับได้	2. ไม่สามารถผันกลับได้
3. เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ	3. เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง
4. เกิดได้ทั้งแบบชั้นเดียวและหลายชั้น	4. เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว
5. เกิดขึ้นได้แม้ไม่มีพลังงานกระตุ้น	5. จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อมีพลังงานกระตุ้น

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และปัจจัยภายนอก ดังต่อไปนี้ [21]

(1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ โครงสร้างรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้การดูดซับเพิ่มสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากช่องว่างหรือรูพรุนภายในตัวดูดซับและถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ถ้ารูพรุนมีขนาดใหญ่ไม่เพียงพอที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง

(2) ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสัมพันธ์ต่อการดูดซับ เพราะขนาดโมเลกุลต้องมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะเข้าภายในรูพรุน และความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากในการดูดซับ ตัวถูกดูดซับต้องถูกแยกออกมาจากสารละลาย ดังนั้นสารที่ละลายได้น้อยจะถูกดูดซับได้ง่ายขึ้น

(3) การดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยขึ้นกับอุณหภูมิในการทดลองด้วย เนื่องจากพันธะที่ยึดเหนี่ยวที่ต่างๆกัน เช่น ถ้าเป็นการดูดซับแบบคายความร้อน การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

(4) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจมีผลขึ้นกับการขนส่งโมเลกุลของระบบ คือถ้าหากความปั่นป่วนของระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ในทางตรงข้าม ถ้าความปั่นป่วนในระบบต่ำ ชั้นฟิล์มจะมีความหนาจึงเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

2.2.3 สมดุลของการดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยจะการดูดซับและการคายซับเกิดขึ้นไปพร้อมๆกัน จนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่ง อัตราการดูดซับโมเลกุลและการคายซับออกมาจะมีอัตราที่เท่ากันหรือระบบเข้าสู่สมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ที่สภาวะสมดุลความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลง โดยจุดสมดุลของระบบการดูดซับหนึ่งๆจะเป็นสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น

โดยทั่วไปเพื่อจะอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้น จะอธิบายด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่

เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยจะเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งจะมีประโยชน์มากในการเปรียบเทียบหาตัวดูดซับที่ดีที่สุดในระบบนั้นๆ โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ปริมาณสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น

มีหลายทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้อธิบายถึงความแตกต่างของไอโซเทอมการดูดซับแต่ละแบบ ไอโซเทอมมีหลายรูปแบบแต่ที่นิยมการใช้งานมากในการศึกษาการดูดซับคือ แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (Langmuir model) และแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich model) [22-25]

1) แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (Langmuir model)

แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ได้นำมาใช้อธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับ โดยมีสมมติฐาน คือ การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับแน่นอนและเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียว ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ โดยทุกๆตำแหน่งในการดูดซับมีลักษณะเหมือนกัน พลังงานในการดูดซับเท่ากัน โดยสมการที่ใช้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + (K_L C_e)} \tag{2.1}$$

โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/เดซิลิตร)

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงก์เมียร์

เขียนสมการในรูปสมการเชิงเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ 2.2

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L\, q_m}\,\frac{1}{C_e} \tag{2.2}$$

จากสมการที่ 2.2 เมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ และ $1/C_e$ จะสามารถคำนวณค่า q_mและ K_L ได้จากความชันและจุดตัดแกนY จากกราฟ

2) แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich model)

แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิช สามารถอธิบายการดูดซับของตัวดูดซับที่มีพื้นผิวของการดูดซับซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีโอกาสเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น มีการกระจายพลังงานการดูดซับซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ 2.3

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \qquad (2.3)$$

โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดิช

1/n คือ ค่าคงที่ อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

เขียนสมการในรูปสมการเชิงเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ 2.4

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n}\log(C_e) \qquad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 เมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e)$ และ $\log(C_e)$ จะสามารถคำนวณค่า K_L และ 1/n ได้จากความชันและจุดตัดแกนYจากกราฟ โดยค่า 1/n=1 อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นตรง ค่า 1/n>1 อธิบายถึงพื้นที่ผิวของตัวถูกดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และค่า 1/n<1 อธิบายถึงพื้นที่ผิวของตัวถูกดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

2.2.4 จลนศาสตร์การดูดซับ

เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับ โดยตัวแปรทางจลนศาสตร์จะช่วยในการทำนายอัตราการดูดซับและมีความสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการ โดยปกติแล้วอัตราเร็วในการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงระยะเริ่มต้นในการดูดซับและอัตราเร็วจะลดลงช้าๆจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ

แบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order kinetics) และจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order kinetics) โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (Pseudo-chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง ว่าขั้นตอนใดเกิดขึ้นช้าที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ [26, 27]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(1) จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order kinetics) คือ อัตราการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง มีรูปทั่วไปดังสมการในสมการที่ 2.5 มีสมมติฐานว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับเป็นปฏิกิริยาที่ผันแปรตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นชนิดเดียว และสามารถเขียนให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.6

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.5)$$

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2.6)$$

โดยที่ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน

t คือ เวลา (นาที)

(2) จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order kinetics) คือ อัตราการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสองหรือขึ้นกับความเข้มข้นของของสารตั้งต้นสองชนิด โดยมีรูปทั่วไปดังสมการในสมการที่ 2.7 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือนเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีที่เกิดประจุของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ อัตราการดูดซับจะขึ้นกับจำนวนของตัวถูกดูดซับและจำนวนตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล ซึ่งสามารถเขียนให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.7)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.8)$$

โดยที่ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน

t คือ เวลา (นาที)

2.2.5 งานวิจัยที่ศึกษาไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่ศึกษาไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับ

Adsorbent	Adsorbate	Model		Ref.
		Isotherm	Kinetics	
Granular activated carbon	Cadmium	Langmuir	Pseudo-second-order	[28]
Coconut husk-based activated carbon	2,4,6-trichlorophenol	Langmuir	Pseudo-second-order	[29]
Activated carbon from date stones	2,4-D pesticide	Langmuir	Pseudo-first order	[30]
Sawdust activated carbon	Lead(II) ion	Langmuir	Pseudo-first order	[31]
Activated carbon	Acid blue 92	Freundlich	Pseudo-second-order	[32]
Bael tree leaf powder	Nickel	Langmuir	Pseudo-second-order	[33]
Activated carbon from wood apple shell	Chromium(VI)	Langmuir	Pseudo-second-order	[34]
Activated carbon	Methylene Blue dye	Langmuir	Pseudo-second-order	[35]
Activated carbon from waste rice hulls	Eriochrome Black T dye	Freundlich	Pseudo-second-order	[36]
Polyacrylonitrile/ activated carbon	Acid Yellow99	Freundlich	Pseudo-second-order	[37]
Activated carbons	Lead(II) ion	Langmuir	Pseudo-first order	[38]

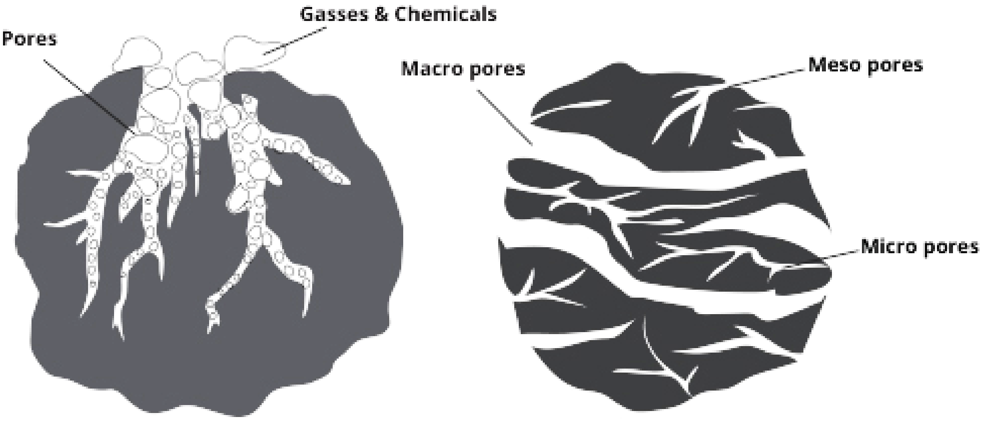
จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับที่ทำการดูดซับสารหนึ่งๆนั้น มีลักษณะไอโซเทอมและจลนศาสตร์ที่ต่างกัน โดยขึ้นกับหลายๆปัจจัย เช่น ชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เป็นต้น โดยลักษณะของแบบจำลองต่างๆจะเป็นสิ่งที่ช่วยอธิบายถึงหลักการและกลไกในการดูดซับของสาร

เหล่านั้น เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น ทำนายผลล่วงหน้า ใช้ในการเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพ และรวมไปถึงการออกแบบในระบบที่ใหญ่ขึ้นซึ่งอาจนำไปสู่การผลิตเครื่องมือหรือระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อที่งานวิจัยนี้จะมีโอกาสนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดยูเรียจริง จึงควรศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการดูดซับดังแสดงในงานวิจัยข้างต้น เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาการดูดซับยูเรียโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนลำดับขั้นต่อไป

2.3 คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น

การนำวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กในระดับโมเลกุลมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหามลพิษหรือการปนเปื้อนเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากวัสดุพรุนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทั้งด้านเคมีประยุกต์และด้านเทคโนโลยีสาขาอื่นๆ เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับ ตัวคัดขนาดระดับโมเลกุล ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวตรวจจับก๊าซ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิคส์ และวัสดุปลูกถ่ายทางการแพทย์ เป็นต้น [39]

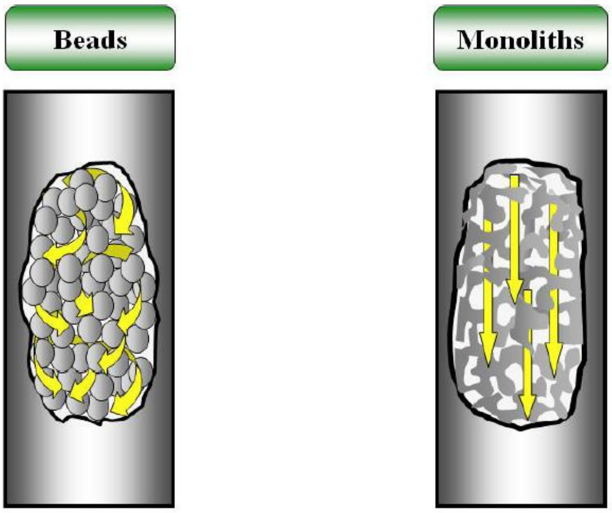
โดยทั่วไปวัสดุพรุนสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามขนาดของรูพรุนตามระบบIUPAC [18] ได้แก่ รูพรุนขนาดไมโครพอร์ (Micropore) มีขนาดรูพรุนในช่วงที่น้อยกว่า 2 นาโนเมตร เหมาะสำหรับดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กจำพวกสารระเหยและก๊าซ รูพรุนขนาดเมโซพอร์ (Mesopore) มีขนาดรูพรุนในช่วงระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร เหมาะสำหรับดูดซับในวัฏภาคของเหลว และรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ (Macropore) มีขนาดรูพรุนในช่วงที่มากกว่า 50 นาโนเมตร เป็นช่องทางนำโมเลกุลไปยังรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งในปัจจุบันมีบทบาทเป็นอย่างมากในวัสดุรูพรุนโครงสร้างแบบโมโนลิทที่ประยุกต์ไปใช้เป็นคอลัมน์ [40, 41]



รูปที่ 2.4 ลักษณะรูพรุนของวัสดุดูดซับ [18]

2.3.1 คุณสมบัติของคาร์บอนโมโนลิท

คาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้นเป็นวัสดุที่น่าสนใจในปัจจุบันเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กภายในพื้นผิวโครงสร้างของรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ โดยโครงสร้างของรูพรุนขนาดแมคโครพอร์เป็นรูพรุนแบบต่อเนื่อง มีประโยชน์ต่อการลำเลียงโมเลกุลต่างๆไปยังรูพรุนที่ขนาดเล็กกว่าได้ง่าย ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลผ่านรูพรุนที่ดีและทำให้เกิดความดันลดที่น้อย [42, 43] ซึ่งเหมาะกับระบบคอลัมน์ที่ต้องการประสิทธิภาพที่สูงและควบคุมระบบแบบต่อเนื่อง อีกทั้งคาร์บอนโมโนลิทยังมีความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวที่มากจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ในการแยกสารโครมาโตกราฟฟี และในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ เป็นต้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

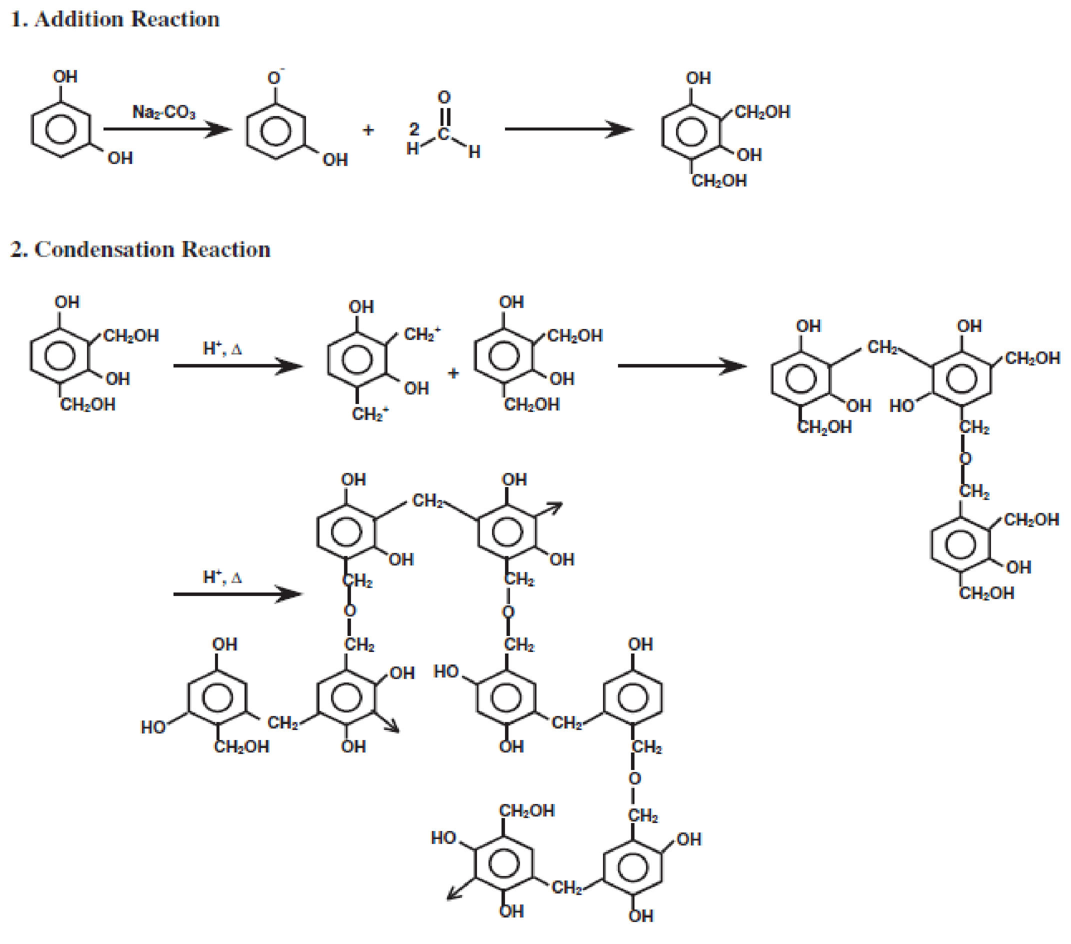
รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่ผ่านรูพรุนของคอลัมน์แบบแพคเบดและแท่งโมโนลิท [39]

คาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้นสามารถสังเคราะห์ได้ง่ายหลายวิธี [44] โดยเฉพาะจากวิธีการพอลิเมอไรเซชัน หรือวิธีการโซลเจล (Sol-gel) ของวัตถุดิบพอลิเมอร์ต่างๆ เช่น ริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล (Resorcinol-formaldehyde gel) พอลิเมอร์จากน้ำตาลซูโครส และสารเฟอฟิวริลแอลกอฮอล์ (Furfuryl alcohol) เป็นต้น วัสดุที่ได้จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนขนาดแมคโครพอร์จากนั้นนำไปเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนและกระตุ้นให้เกิดรูพรุนขนาดเมโซพอร์หรือไมโครพอร์บนผิวโครงสร้างซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆต่อไป

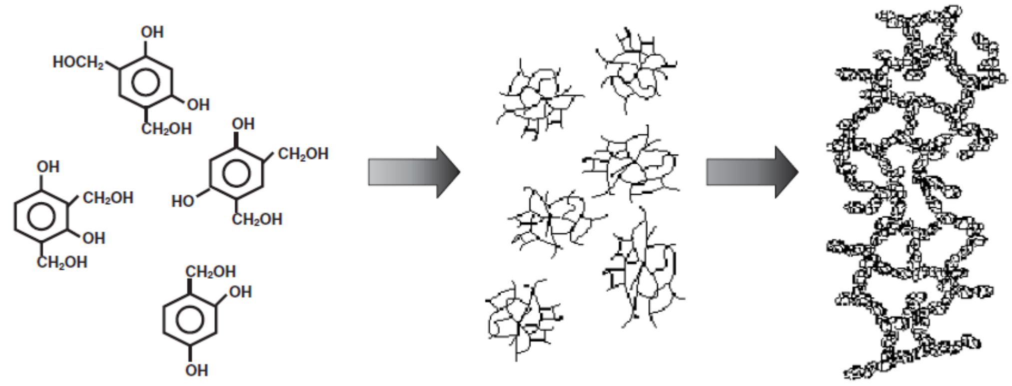
2.3.2 การสังเคราะห์คาร์บอนโมโนลิทลำดับขั้นจากริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล

ริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล หรืออาร์เอฟเจล (RF gel) เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายว่ามีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นคาร์บอนที่มีความเป็นรูพรุนที่สูง สังเคราะห์

ขึ้นมาครั้งแรกโดย Pekala et al. (1989) [45] จากการนำอาร์เอฟเจลที่เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันไปคาร์บอไนเซชันภายใต้สภาวะก๊าซเฉื่อย ทำให้ได้คาร์บอนที่มีความเป็นรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิวมากและมีความหนาแน่นต่ำ แตกต่างจากวัสดุคาร์บอนในอดีตซึ่งมักนิยมใช้วัสดุจากธรรมชาติ เช่น ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส และกะลามะพร้าว เป็นต้น ซึ่งคาร์บอนที่ได้จากวัสดุดังกล่าว มีรูพรุนที่สูงแต่ไม่สามารถควบคุมขนาดรูพรุนได้ตามต้องการ ซึ่งต่างจากอาร์เอฟเจลซึ่งเกิดจากการเริ่มทำปฏิกิริยารวมตัวของโมเลกุลขนาดเล็กหรือโมโนเมอร์ (Monomer) ของริซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์กันอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่หรือพอลิเมอร์ (Polymer) โดยมีน้ำอยู่ภายในทำให้เกิดรูพรุน ทำให้สามารถควบคุมรูพรุนได้ สารที่ได้หลังจากทำปฏิกิริยาจะมีลักษณะเป็นเจล ซึ่งมักเรียกว่า คาร์บอนเจล [46] โดยส่วนใหญ่มักใช้ตัวเร่งจำพวกเบส เช่น โซเดียมคาร์บอเนต เนื่องจากจะได้รูพรุนที่มีช่วงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่กว้างกว่าการใช้ตัวเร่งจำพวกกรดที่มักให้รูพรุนที่มีช่วงการกระจายตัวแคบกว่า แต่ก็มีการใช้ตัวเร่งกรดในบางกรณี เนื่องจากตัวเร่งจำพวกนี้มีผลต่อระยะเวลาการรวมตัวเป็นเจลของพอลิเมอร์ทำให้ลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ลดลง [47]



รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของริซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ [47]



รูปที่ 2.7 การรวมตัวของอนุพันธ์โมโนเมอร์เป็นพอลิเมอร์ของอาร์เอฟเจล [47]

ในปัจจุบันมีงานวิจัยอย่างมากมายศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดรูพรุนของอาร์เอฟเจลในขั้นตอนต่างๆ เช่น การควบคุมอัตราส่วนของสารตั้งต้นในขั้นตอนการเตรียม ขั้นตอนการบ่ม ขั้นตอนการอบแห้ง และขั้นตอนการทำให้เป็นคาร์บอน เป็นต้น

Yamamoto et al. (2002) [48] ได้ศึกษาผลกระทบจากการอบแห้งของอาร์เอฟเจล โดยใช้วิธีการอบแห้งแบบต่างๆ คือ แบบใช้ลมร้อน แบบใช้คลื่นไมโครเวฟ และแบบเย็นเยือก จากนั้นนำไปเผาภายใต้สภาวะก๊าซเฉื่อย พบว่าการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นออกจากเจลมีผลต่อการหดตัวของโครงสร้างภายใน จากการอบแห้งแบบเย็นเยือกซึ่งจะได้คาร์บอนที่เรียกว่า คาร์บอนไครโอเจล จะได้รูพรุนขนาดเมโซพอร์ ในช่วงที่อัตราส่วนโมลของริซอร์ซินอลกับตัวเร่ง (R/C)และอัตราส่วนของริซอร์ซินอลกับน้ำ (R/W) ในขั้นตอนการเตรียมอาร์เอฟเจลที่กว้าง และคาร์บอนที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เรียกว่า คาร์บอนเซโรเจล ไม่เกิดรูพรุนขนาดเมโซพอร์

Yamamoto et al. (2003) [49] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำ (C/W) ในขั้นตอนการผสมสารละลายริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีผลต่ออัตราการเกิดการรวมตัวและขนาดของอนุภาค พบว่า C/W ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคที่เกาะกันเป็นโครงร่างตาข่าย เมื่อ C/W มีค่ามากทำให้เพิ่มจำนวนของอนุพันธ์ส่งผลให้เกิดการรวมกันมากในช่วงแรกและมีขนาดเล็ก ทำให้อนุพันธ์ที่เกิดขึ้นมาทีหลังมีปริมาณน้อยเข้าแทรกรวมตัวกับอนุภาคเดิมทำให้เจลมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เล็ก ในขณะที่ C/W ที่น้อย จะเกิดการรวมตัวอย่างช้าๆทำให้อนุพันธ์ที่เกิดมาขึ้นทีหลังที่มีจำนวนมากเข้ารวมกับอนุภาคเดิมทำให้อนุภาคใหญ่ขึ้น ทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มากหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่

Siyasukh et al. (2008) [50] ได้ทำการศึกษาการเตรียมคาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้นที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ เมโซพอร์และไมโครพอร์ โดยในขั้นตอนแรกสังเคราะห์คาร์บอนโมโนลิทให้มีรูพรุนขนาดแมคโครพอร์โดยวิธีการโซลเจลและยิงกระตุ้นด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค โดยขนาดแมคโครพอร์จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดลงของอัตราส่วน C/W และสามารถสังเคราะห์

ให้เกิดรูพรุนขนาดเมโซพอร์ได้จากการกระตุ้นด้วยแคลเซียมไนเตรทและการกระตุ้นด้วยความร้อนภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Job et al. (2004) [51] ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนเจลทำเป็นตัวรองรับสารตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สารละลายริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้น พบว่านอกจากการควบคุมลักษณะของรูพรุนด้วยสัดส่วนของสารตั้งต้นและการทำให้แห้งแล้ว ความเป็นกรดด่างในสภาวะเริ่มต้นยังเป็นตัวควบคุมลักษณะโครงสร้างของรูพรุนอีกด้วย โดยปริมาตรรูพรุน มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0.4 ไปเป็น 1.4 ลบ.ซม./กรัม เมื่อค่าความเป็นกรดด่างลดลงจาก 6.25 เป็น 5.45 และเมื่อค่าความเป็นกรดด่างมีค่ามากกว่า 6.5 ขึ้นไป โครงสร้างรูพรุนจะเกิดการยุบตัวทำให้กลายเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุน

2.3.3 การประยุกต์ใช้คาร์บอนโมโนลิทในการดูดซับ

เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนที่เชื่อมทะลุกัน ยังสามารถควบคุมขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวได้ในขั้นตอนการเตรียมและการกระตุ้น จึงเป็นที่สนใจที่จะนำมาศึกษาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ

Fuertes et al. (2003) [52] ใช้คาร์บอนโมโนลิทที่สังเคราะห์จากเส้นใยพอลิเมอร์เหลือใช้ผสมกับฟีโนลิกเรซิน ซึ่งกระตุ้นให้เป็นคาร์บอนด้วยก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ นำมาดูดซับ เอ็น-บิวเทนที่ 30°C พบว่าที่ ความสามารถดูดซับขึ้นกับขนาดของรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน โดยคาร์บอนโมโนลิทที่สังเคราะห์ได้มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดไมโครพอร์ที่มีการกระจายตัวของรูพรุนที่แคบซึ่งมีลักษณะต่างจากคาร์บอนเกรดอุตสาหกรรมซึ่งจะมีการกระจายตัวของรูพรุนมากกว่า

Solis et al. (2004) [53] ศึกษาการดูดซับเอ็น-บิวเทนที่ความเข้มข้นต่ำ ด้วยเซรามิกโมโนลิทที่หุ้มไปด้วยคาร์บอน โดยการแช่เซรามิกโมโนลิทในฟีโนริกเรซินแล้วเผาที่ 700°C ซึ่งได้คาร์บอนมีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดไมโครพอร์ที่มีการกระจายตัวของรูพรุนที่แคบ จากนั้นนำไปดูดซับเอ็น-บิวเทนในระบบไดนามิกโดยการป้อนเอ็น-บิวเทนผ่านเซรามิกโมโนลิทที่เคลือบไปด้วยคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ ผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในคอลัมน์ที่สภาวะเดียวกันจากกราฟเบรคทรูแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงกว่าของเซรามิกโมโนลิท

Hodar et al. (2007) [54] ใช้แอโรเจลคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนทั้งขนาดไมโครพอร์และแอโรเจลที่มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ผสมกับเมโซพอร์ดูดซับโทลูอีนในสภาวะสมดุลและไดนามิค พบว่าคาร์บอนเจลที่มีรูพรุนผสมไมโครพอร์และเมโซพอร์สามารถดูดซับโทลูอีนได้สูง โดยที่สภาวะสมดุลที่ 25°C ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับโทลูอีน 1.36 ลบ.ซม./กรัม หรือ 1,180 มิลลิกรัม/กรัม ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการให้ความร้อนที่ 400°C รูพรุนและพื้นที่ผิวตัวดูดซับจะมีขนาดใหญ่ขึ้นแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการอุดตันจากตัวถูกดูดซับ ในการดูดซับทางไดนามิกที่ 100°C พบว่าสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 3 รอบก่อนหมดประสิทธิภาพ

Wu et al. (2007) [55] ศึกษาการดูดซับสีย้อม X-3B โดยใช้เมโซพอร์คาร์บอนแอโรเจลและเมโซพอร์ออกานิกแอโรเจลที่ทำการเผาภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เกิดรูพรุนขนาดไมโครพอร์บนพื้นผิวให้กลายเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น จากการเตรียมโดยศึกษาถึงสมดุลในการดูดซับพบว่าตัวดูดซับทั้งสองมีความสอดคล้องกับสมการดูดซับทั้งแบบแลงก์เมียร์และฟรุนดิช และการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าคาร์บอนแอโรเจลสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือนและจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน แต่ออกานิกแอโรเจลสอดคล้องกับกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นกับความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณและขนาดของตัวดูดซับ

Beneyto et al. (2008) [56] ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้คาร์บอนโมโนลิท ซึ่งตัวดูดซับมีความเป็นรูพรุนแบบลำดับขั้น โดยมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ที่สูง ซึ่งเหมาะกับการดูดซับก๊าซ เนื่องจากมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์สูงถึง 1.04 ลบ.ซม./กรัม ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนสูงถึง 29.7 มิลลิกรัม/ลิตร ที่สภาวะ 77 K และ 4 เมกะปาสกาล

Liu et al. (2008) [57] ศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยใช้เมโซพอร์ไฮบริดโมโนลิทที่สังเคราะห์จากการผสม$Si(OC_2H_5)_4$ หรือ TEOS, $(C_2H_5O)_3Si(CH_2)_2CH_3$ หรือ PTES, $(CH_3O)_3Si(CH_2)_6Si(OCH_3)_3$ หรือ TSH และ$(CH_3O)_3Si(CH_2)_3NH(CH_2)_3Si(OCH_3)_3$ หรือTSPA นำมาผสมเข้าด้วยกันที่อัตราส่วนต่างๆ นำมาใช้ศึกษาจลนศาสตร์ดูดซับซึ่งมีความสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน โดยจากการทดลองพบว่าอัตราการดูดซับมีผลขึ้นกับอุณหภูมิและความเป็นกรดด่างของสารละลาย

Marin et al. (2009) [58] ใช้คาร์บอนเจลที่สังเคราะห์จากกรดแกลลิกผสมกับริซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ให้มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์เชื่อมทะลุต่อเนื่องมีขนาดในช่วง 0.56 ถึง 0.67 ลบ.ซม./กรัม และกระตุ้นด้วยความร้อนภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เกิดรูพรุนไมโครพอร์บนพื้นผิว มาใช้ดูดซับเบนซีน โทลูอีน และไซลีนในอากาศ การทดลองแบบไดนามิกศึกษาโดยป้อนก๊าซไหลผ่านคอลัมน์ซึ่งอธิบายผลในรูปของกราฟเบรคทรู ซึ่งค่าการดูดซับไซลีนจะสูงสุด รองลงมาคือโทลูอีน และเบนซีนน้อยที่สุด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความดันไอของสารไฮโดรคาร์บอน

Delgadillo et al. (2010) [59] สังเคราะห์แมคโครพอร์คาร์บอนโมโนลิทเพื่อใช้ดูดซับฟีนอลโดยใช้กะลามะพร้าวกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์โดยไม่ใช้สารเชื่อมประสานแต่จะขึ้นรูปให้มีรูพรุนขนาดใหญ่แบบรังผึ้ง ซึ่งตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้จะมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ที่ได้จากการกระตุ้น 0.38 ถึง 0.79 ลบ.ซม./กรัม และมีพื้นที่ผิว 725 ถึง 1,523 ตารางเมตร/กรัม ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ และจากการทดลองพบว่า ปริมาณพื้นที่ผิวของคาร์บอนโมโนลิทและความเข้มข้นของฟีนอลส่งผลต่อการดูดซับ

Banciu et al. (2011) [60] สังเคราะห์แมคโครพอร์คาร์บอนโมโนลิทจากเส้นใยคาร์บอนผสมกับฟีโนลิกเรซิน ผสมกันในรูปแบบผงผสมในน้ำแล้วใส่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูป แล้วทำการกระตุ้นแบบต่างๆ พบว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนโดยใช้ไอน้ำมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยรูพรุนขนาดแมคโครพอร์เกิดจากช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนซึ่งทำให้ก๊าซไหลผ่านได้ดีและรูพรุนขนาดไมโครพอร์จากการกระตุ้นช่วยในการดูดซับ โดยมีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 35.94 โมล/กิโลกรัม ที่ความดัน 10 บาร์

Giraldo et al. (2011) [61] ศึกษาการดูดซับก๊าซมีเทนโดยใช้แมคโครพอร์คาร์บอนโมโนลิทที่สังเคราะห์มาจากกากกาแฟผสมกับพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถปรับปรุงให้มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์และพื้นที่ผิวสูงที่สุดซึ่งมีผลต่อการดูดซับโดยสามารถดูดซับก๊าซมีเทนได้สูงที่สุด เท่ากับ 130 ปริมาตร/ปริมาตร ที่สภาวะอุณหภูมิ 298 K และที่ความดัน 30 บรรยากาศ โดยจากการทดลองการให้พลังความร้อนเพิ่มขึ้นในระบบส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง อธิบายได้ว่าระบบเป็นระบบคายความร้อน

Luangon et al. (2012) [62] ศึกษาการตรึงเอนไซม์ไลเพสบนคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นคือมีรูพรุนไมโครพอร์ภายในโครงสร้างรูพรุนแมคโครพอร์ โดยคาร์บอนโมโนลิทสังเคราะห์มาจากริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์และกระตุ้นเชิงความร้อนเพื่อให้มีออกซิเจนอยู่บนพื้นผิวซึ่งรูพรุนและพื้นที่ผิวที่สูง คาร์บอนที่ได้นำมาตรึงเอนไซม์ไลเพสด้วยวิธีการดูดซับเชิงกายภาพ โดยป้อนสารละลายเอนไซม์ไหลวนผ่านคาร์บอนโมโนลิทที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ จากการทดลองพบว่าความเป็นกรดด่างมีค่าเท่ากับ 7 และความเข้มข้นของสารละลายบัพเฟอร์และเอนไซม์ที่ 20 มิลลิโมล/ลิตร และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และในการตรึงผ่านคอลัมน์ผลการตรึงเอนไซม์จะสั้นมากเนื่องจากที่อัตราไหลสูงทำให้เอนไซม์กระจายตัวได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

Eichhorn et al. (2013) [43] ศึกษาการดูดซับสารพิษจากการเมตาบอลิซึมในเลือดโดยใช้ไครโอเจลในรูปโมโนลิท ที่เตรียมจากพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนขนาดแมคโครพอร์เชื่อมทะลุกันและมีรูพรุนเมโซพอร์และไมโครพอร์อยู่ภายในโครงสร้างด้วย โดยการดูดซับทั้งแบบคงที่และไดนามิก พบว่าสามารถดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่สูงอีกทั้งยังมีรูพรุนทั้งขนาดไมโครพอร์และเมโซพอร์ช่วยในการดูดซับ

Muhammad et al. (2013) [63] ใช้คอร์เดียไรท์โมโนลิทที่มีช่องผ่านขนาดใหญ่ตลอดแท่งนำมาหุ้มด้วยคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ โดยนำคอลัมน์แช่ในสารละลายพอลิเมอร์จากนั้นนำไปเผาให้เป็นคาร์บอน นำมาทำการดูดซับเบต้าแคโรทีนแบบต่อเนื่องโดยการไหลสารละลายผ่านคอลัมน์ผลการทดลองอธิบายในรูปกราฟเบรคทรู พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ปริมาตรของ

สารละลาย ความสูงเบด และอัตราไหล มีผลต่อความชันของกราฟเบรคทรู และจากการทดลองในระบบไดนามิกอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

Nandi et al. (2013) [64] คาร์บอนโมโนลิทที่เตรียมจากพอลีอะคริโลไรไตล์ซึ่งลักษณะตัวดูดซับที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเมโซพอร์และรูพรุนขนาดไมโครพอร์เกิดจากการกระตุ้น ทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวถึง 2500 ตารางเมตร/กรัม นำมาศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดัน 3 บาร์ได้สูงถึง 22.5 และ 10.6 มิลลิโมล/กรัม ที่ 273 และ 298 K

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่ใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ

Materials	Adsorbent	Pore size	Adsorbate	Ref.
Carbon fibre	Carbon monolith	Micro/macro pore	n-butane	[52]
Phenolic resin	Carbon-coated monoliths	Micro/macro pore	n-butane	[53]
Resorcinol - formaldehyde	Carbon aerogel monolith	Micro/meso pore	Toluene	[54]
Resorcinol - formaldehyde	Carbon aerogel monolith	Micro/meso pore	X-3B dye	[55]
Powder activated carbon	Carbon monolith	Micro/macro pore	Hydrogen	[56]
Silica-based gel powders	Wet hybrid gel monolith	Mesopore	Triphenyl methane dye	[57]
Gallic acid–resorcinol mixtures	Carbon aerogel monolith	Meso/macro pore	Benzene, Toluene, Xylenes	[58]
Coconut shells	Carbon monolith	Micro/macro pore	Phenol	[59]
Carbon fibers	Carbon monolith	Micro/macro pore	CO_2	[60]
Coffee Husks	Carbon monolith	Micro/macro pore	Methane	[61]
Resorcinol - formaldehyde	Carbon monolith	Micro/macro pore	Lipase	[62]
Poly(vinyl alcohol).	Carbon cryogel monolith	Micro/meso/macro pore	Toxic metabolites	[43]
Polyethylene glycol	Carbon-coated Monolith	Meso/macro pore	β-carotine	[63]
Polyacrylonitrile	Carbon monolith	Micro/meso pore	CO_2	[64]

จากตารางที่ 2.3 สรุปได้ว่าในการศึกษาการดูดซับโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น ปัจจัยที่มีผลอย่างยิ่งต่อการดูดซับคือรูพรุนที่อยู่ในโครงสร้าง โดยรูพรุนขนาดแมคโครพอร์มักใช้ช่วยในการถ่ายเทและลำเลียงสารให้กระจายสู่รูพรุนที่ขนาดเล็กกว่า และรูพรุนขนาดเมโซพอร์และไมโครพอร์จะเป็นส่วนช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวและกักเก็บโมเลกุลไว้บนผิวของตัวดูดซับ จึงแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นมีลักษณะพิเศษที่ช่วยในการดูดซับให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

โดยในงานวิจัยนี้จะสังเคราะห์คาร์บอนโมโนลิทให้มีรูพรุนแบบลำดับขั้น โดยมีโครงสร้างหลักเป็นรูพรุนขนาดแมคโครพอร์จากการกำหนดสัดส่วนของสารตั้งต้น และกระตุ้นให้เกิดรูพรุนขนาดเมโซพอร์และไมโครพอร์จากวิธีทางกายภาพและเคมี ทำให้ได้คาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนผสมกันทั้งไมโครพอร์และเมโซพอร์อยู่ภายในโครงสร้างรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ ซึ่งจะมีส่วนช่วยให้สามารถดูดซับได้ดีขึ้น ยิ่งกว่านั้นงานวิจัยนี้ยังใช้ระบบไหลวนมาใช้ในการดูดซับยูเรีย โดยป้อนสารละลายยูเรียไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยคาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้น ซึ่งเป็นแนวทางใหม่เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับยูเรีย

2.3.4 การกระตุ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับประเภทคาร์บอน เช่น ถ่านกัมมันต์ โดยขั้นตอนหลักๆมักเป็นการนำวัตถุดิบอินทรีย์มาให้ความร้อนภายใต้การควบคุมสภาวะไร้ก๊าซออกซิเจน ซึ่งมักมี 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอไนเซชันและการกระตุ้น

(1) การคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) เป็นขั้นตอนพื้นฐานในการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นคาร์บอน โดยมีการควบคุมการเผาด้วยความร้อนภายใต้สภาวะไร้ก๊าซออกซิเจนเพื่อป้องกันไม่ให้วัตถุดิบลุกติดไฟกลายเป็นเถ้า จึงมักทำการเผาภายใต้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน เป็นต้น แต่การคาร์บอไนเซชันนี้มักมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องจากมีรูพรุนต่ำและไม่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ดังนั้นจึงมักนิยมทำการกระตุ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

(2) การกระตุ้น (Activation) เป็นกระบวนการให้ความร้อนเช่นเดียวกับการคาร์บอไนเซชัน แต่จะมีการเปลี่ยนสารหรือขั้นตอนทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวและทำให้ผิวตัวดูดซับมีความว่องไวมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิของตัวดูดซับ โดยทั่วไปการกระตุ้นมี 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี

- การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) คือการพัฒนาให้คาร์บอนที่ได้มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น โดยการออกซิไดซ์ด้วยก๊าซ ซึ่งในขั้นตอนการกระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ระหว่างก๊าซออกซิไดซ์กับสารระเหยที่ยังเหลืออยู่ในคาร์บอนอะตอมทำให้เกิด

รูพรุนขึ้น ก๊าซออกซิไดซ์มักใช้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำ โดยใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง 800–1000°C เพื่อให้สารอินทรีย์สลายตัวไป แต่รูพรุนที่ได้มักมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี

- การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการผลิตตัวดูดซับโดยใช้สารเคมีทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น โดยนำวัตถุดิบไปแช่ในสารเคมีจากนั้นนำไปทำการเผาที่อุณหภูมิสูงๆซึ่งขึ้นกับสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นมักอยู่ในช่วง 500-800°C โดยรูพรุนจะเกิดขึ้นจากสารเคมีที่แทรกตัวอยู่ในวัตถุดิบจะทำลายโครงสร้างเดิมของวัตถุดิบ และเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวของสารเคมีบนผิวของตัวดูดซับทำให้วัสดุเกิดเป็นโครงข่ายรูพรุนขึ้น และจากการที่สารเคมีแทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง จึงทำให้คาร์บอนหดตัวได้น้อย จึงมักมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าวิธีอื่น

โดยทั่วไปพื้นผิวของถ่านคาร์บอนจะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่นๆได้เช่นอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจนในกระบวนผลิตถ่านคาร์บอนทั้งในกระบวนการคาร์บอไนเซชันและการกระตุ้นจะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปการที่มีอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจนนี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อรวมตัวกับอะตอมของคาร์บอนโดยเกิดพันธะเคมีจะเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งมีผลต่อการยึดเกาะของโมเลกุลสารบนตัวดูดซับ

สรุป

จากการค้นคว้าหาข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ พบว่าคาร์บอนโมโนลิทเป็นวัสดุที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะมาทำเป็นวัสดุดูดซับ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ด้วยการกระตุ้น โดยเฉพาะคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแมคโครพอร์เชื่อมทะลุซึ่งเหมาะกับการดูดซับในระบบสารละลายไหลผ่านคอลัมน์เป็นอย่างยิ่ง จึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการนำคาร์บอนโมโนลิทมาศึกษาดูดซับยูเรียในระบบไหลวน ซึ่งเป็นการวิจัยใหม่ที่ยังไม่มีการศึกษามาก่อน

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- เครื่องวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน Surface area and porosity analyzer (BET) : ยี่ห้อ Quantachrome, รุ่น Autosorb-1

- เครื่องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) : ยี่ห้อ JEOL, รุ่น JSM-5410LV

- เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscope (FTIR) : ยี่ห้อ Thermo Scientific, รุ่น Nicolet 6750

- เครื่อง UV-spectrophotometer : ยี่ห้อ JASCO, รุ่น V-530

- เครื่องเขย่า

- ตู้อบความร้อน

- เตาเผาอุณหภูมิสูง

- เครื่องชั่งละเอียด

- เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก

- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

- ท่อแก้วเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร

- กาวอีพ๊อกซี่

- ปั๊มน้ำ

- ท่อยาง

- ไมโครปิเปต

- นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 สารเคมี

- ริซอร์ซินอล (Resorcinol), $C_6H_6O_2$: บริษัท Fluka
- ฟอร์มัลดีไฮด์ 37% (Formaldehyde), CH_2O : บริษัท Ajax Fineehem
- โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate), Na_2CO_3 : บริษัท Ajax Fineehem
- แคลเซียมไนเตรท (Calcium nitrate), $Ca(NO_3)_2.4H_2O$: บริษัท Ajax Fineehem
- ยูเรีย (Urea), $CO(NH_2)_2$: บริษัท Ajax Fineehem

3.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาการการดูดซับยูเรียในสารละลายด้วยคาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับโดย มีวิธีการดังนี้

3.2.1 การเตรียมคาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้น

1) ผสมสารริซอร์ซินอล (R) กับน้ำ (W) แล้วทำการปั่นกวนให้ละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous solution) เป็นเวลา 10 นาที โดยอัตราส่วนของสารเคมีแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของการผสมสารตั้งต้นของคาร์บอน

สารเคมี	อัตราส่วน
อัตราส่วนโดยโมลของริซอร์ซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ (R/F)	0.5 mol/mol
อัตราส่วนโดยโมลของริซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (R/C)	800 mol/mol
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำ (C/W)	6 mol/m^3

2) เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (C) แล้วกวนจนเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 10 นาที

3) เติมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (F) ลงไปแล้วปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที จะได้สารละลายริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งมีลักษณะเป็นสารละลายสีน้ำตาล

4) เทสารละลายริซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ลงในท่อแก้วปลายเปิด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร) ที่ปิดท้ายด้วยกระดาษฟอยล์และหุ้มด้วยพาราฟิล์ม จากนั้นปิดท่อแก้วอีกด้านด้วยกระดาษฟอยล์และพันด้วยพาราฟิล์มอีกครั้งเพื่อไม่ให้รั่วไหล

5) นำท่อแก้วที่บรรจุสารละลายไปแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่ 30°C เป็นระยะเวลา 4 วัน สารละลายจะเริ่มขุ่น

6) นำท่อแก้วออกจากอ่างน้ำแล้วไปบ่มต่อในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 75°C เป็นระยะเวลา 3 วัน

7) นำท่อแก้วออกจากตู้อบแล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ออกจากท่อแก้ว โดยตัวอย่างที่ได้จะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกสีน้ำตาล เรียกว่า คาร์บอนเจล

8) นำแท่งคาร์บอนเจลไปอบแห้งด้วยลมร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 75°C จนน้ำหนักคงที่

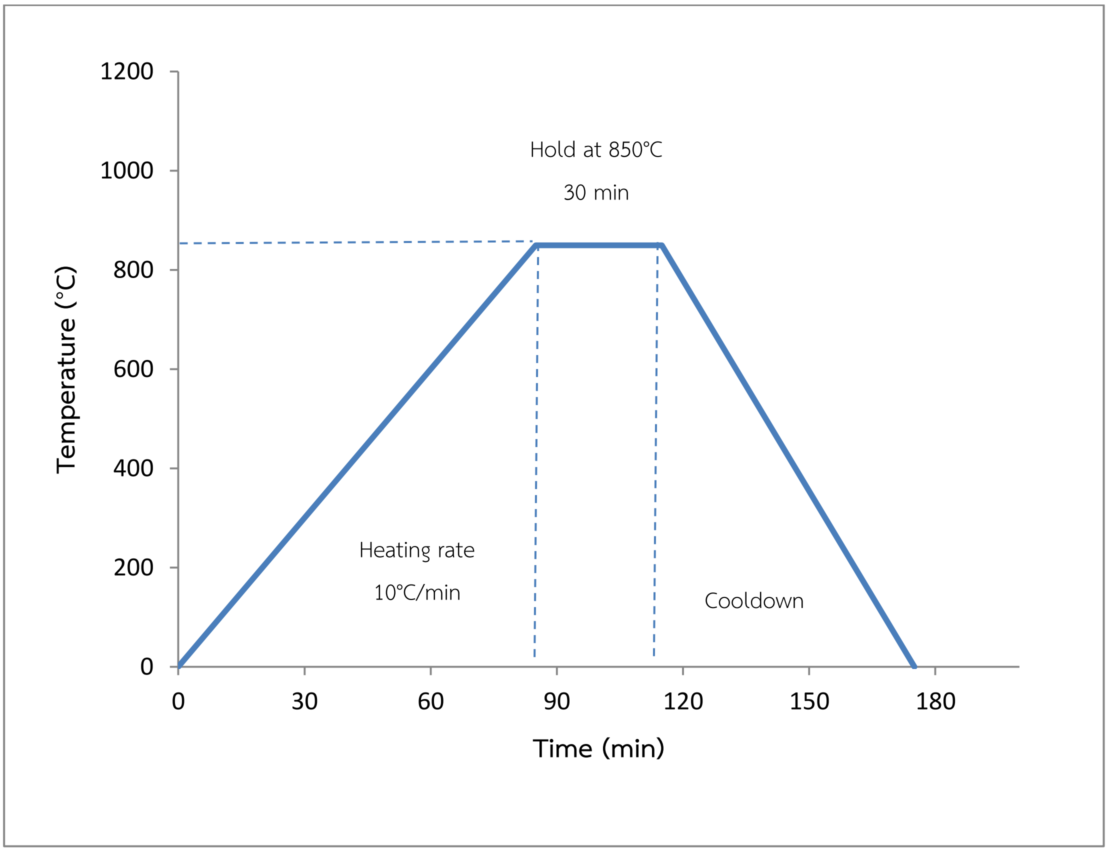
9) นำคาร์บอนเจลไปกระตุ้นด้วยความร้อนเพื่อให้เป็นกลายเป็นคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นเพื่อนำไปดูดซับยูเรีย โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของการดูดซับที่เกิดจากการกระตุ้น 3 วิธี คือ การคาร์บอไนเซชัน การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้น ดังรูปที่ 3.2

- วิธีที่ 1 คาร์บอไนเซชัน (Carbonization) คือ การนำแท่งคาร์บอนเจลไปกระตุ้นด้วยความร้อนภายใต้ก๊าซไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลก๊าซ เท่ากับ 50 ลบ.ซม./นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/นาที โดยอุณหภูมิสูงสุด คือ 850°C ดังรูปที่ 3.1 จะได้ คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน

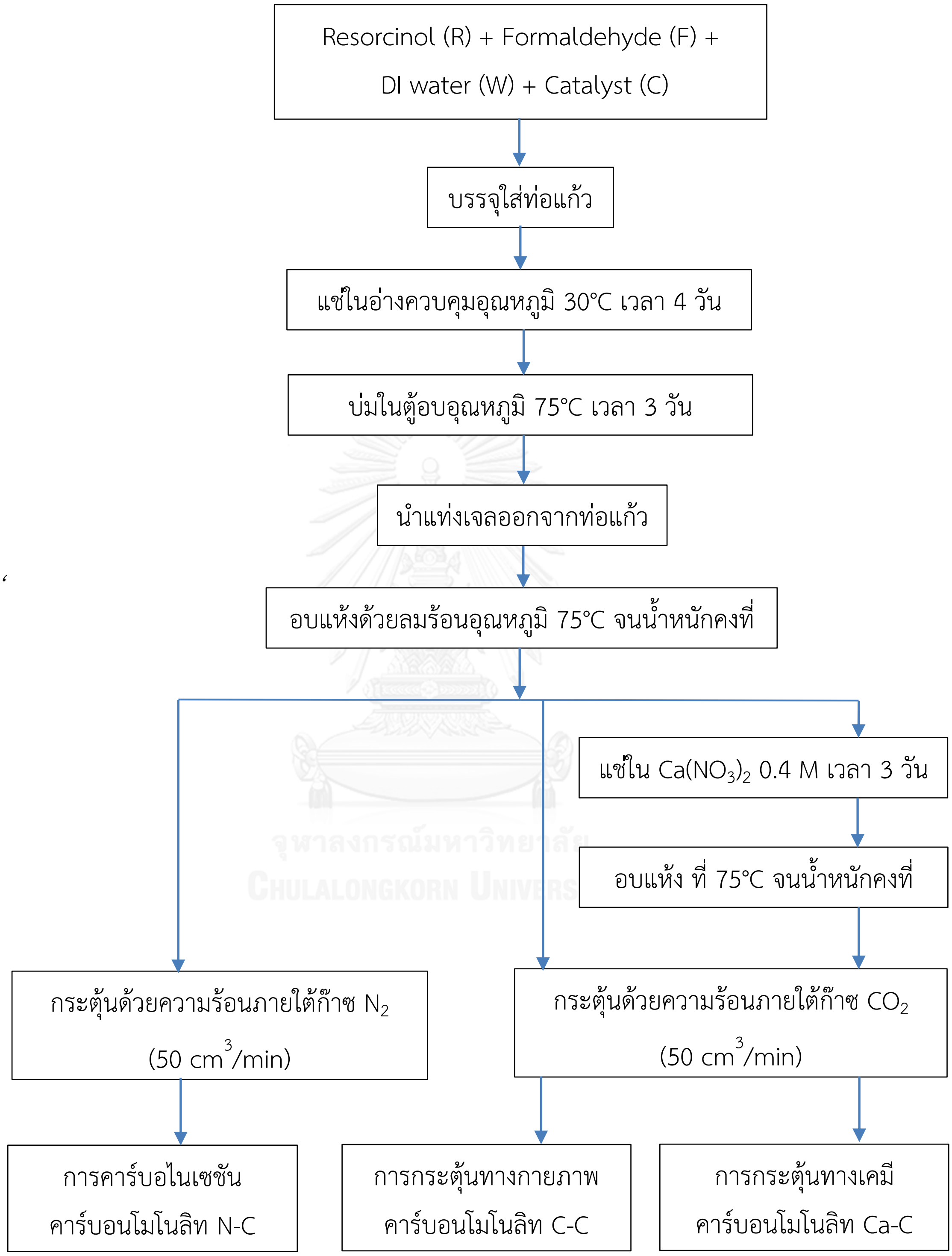
- วิธีที่ 2 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) คือ การนำแท่งคาร์บอนเจลไปกระตุ้นด้วยความร้อนภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมอัตราการไหลก๊าซ เท่ากับ 50 ลบ.ซม./นาที ทำการกระตุ้นด้วยความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.1 จะได้ คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ

- วิธีที่ 3 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) คือ การนำแท่งคาร์บอนเจลไปแช่ในสารละลายแคลเซียมไนเตรท 0.4 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 3 วัน หลังจากนั้นนำไปอบแห้ง ในตู้อบที่อุณหภูมิ 75°C จนน้ำหนักคงที่ นำแท่งเจลที่ได้ไปกระตุ้นด้วยความร้อนภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมอัตราการไหลก๊าซ เท่ากับ 50 ลบ.ซม./นาที และการกระตุ้นด้วยความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.1 จะได้ คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.1 แผนผังการกระตุ้นด้วยความร้อนให้กลายเป็นคาร์บอน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนโมโนลิท

3.2.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับคาร์บอนโมโนลิท

ในขั้นตอนนี้จะทำการวิเคราะห์ลักษณะของคาร์บอนโมโนลิทที่จะมาใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อทราบถึงโครงสร้างสัณฐานวิทยา ลักษณะของรูพรุน และคุณสมบัติทางเคมีบนพื้นผิว ซึ่งตรวจวัดได้โดย

1) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว โดยทำการเคลือบตัวดูดซับด้วยทองในเครื่องเคลือบสุญญากาศ เพื่อให้ผิวตัวดูดซับมีสภาพนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งจะให้ข้อมูลสัณฐานและโครงสร้างบนผิวของคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้น

2) วิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน ด้วยวิธี BET โดยใช้หลักการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer โดยผลที่ได้นำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวแบบ BET ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครพอร์และเมโซพอร์ โดยใช้หลักการคำนวณแบบ t-plot และ Dollimore-Heal (DH) [65]

3) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscope (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งผลต่อการสั่นของพันธะโมเลกุล โดยจะทำการวัดในช่วงคลื่น 400-4000 ซม.$^{-1}$ เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของสารประกอบอินทรีย์

3.2.3 การทดลองหาสมดุลและไอโซเทอมการดูดซับยูเรีย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลอง เพื่อศึกษาการดูดซับยูเรียบนคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนแบบลำดับขั้นที่มีลักษณะพื้นผิวภายในโครงสร้างต่างกันซึ่งเกิดจากการกระตุ้นต่างๆกัน โดยศึกษาการดูดซับโดยทดลองแบบกะเพื่อหาสมดุล

3.2.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นที่ส่งผลต่อการดูดซับยูเรีย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ซึ่งจากข้อมูลการทดลองส่วนนี้ สามารถนำไปหาสมดุลและไอโซเทอมการดูดซับได้

1) เตรียมสารละลายยูเรีย ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 400, 600, 800 และ 1000 มิลลิกรัม/เดซิลิตร และใช้ไมโครปิเปตเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนทำการดูดซับ

2) นำคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน จำนวน 1 กรัม ใส่ขวดก้นกลมเป็นจำนวน 7 ขวด จากนั้นเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้นต่างๆที่เตรียมไว้ ในแต่ละขวด ขวดละ 20 มิลลิลิตร

3) นำขวดสารละลายยูเรียที่แช่คาร์บอนโมโนลิทไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) และใช้ไมโครปิเปตเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นของยูเรียหลังการดูดซับ

4) วัดความเข้มข้นของยูเรียในสารละลาย ใช้เครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร

5) วิเคราะห์และคำนวณหาความสามารถในการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิทที่สมดุล (Urea adsorption capacity) และประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลาย (Urea adsorption efficiency) จากสมการ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \qquad (3.1)$$

$$\%UA = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \qquad (3.2)$$

โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับยูเรียในสารละลายต่อน้ำหนักของคาร์บอนโมโนลิทที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

%UA คือ ประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลาย (เปอร์เซ็นต์)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียในสารละลายที่เวลาเริ่มต้น (มิลลิกรัม/เดซิลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของยูเรียในสารละลายหลังการดูดซับด้วยคาร์บอนโมโนลิทที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/เดซิลิตร)

W คือ น้ำหนักของคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (กรัม)

V คือ ปริมาตรสารละลายยูเรียที่ใช้ (เดซิลิตร)

6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี จากนั้นทำการบันทึกผล

7) นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปพลอตกราฟไอโซเทอมและศึกษาความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์และฟรุนดิช

3.2.3.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาตรสารละลายกับปริมาณตัวดูดซับ

การทดลองนี้เลือกคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่มีแนวโน้มว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนโมโนลิทชนิดอื่นมาทำการศึกษา

1) เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร และใช้ไมโครปิเปตเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนทำการดูดซับ

2) นำคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี จำนวน 1 กรัม ใส่ขวดก้นกลม เป็นจำนวน 3 ขวด จากนั้นเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้นที่เตรียมไว้ ในแต่ละขวด ขวดละ 20, 50 และ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3) นำขวดสารละลายยูเรียที่แช่คาร์บอนโมโนลิทไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) และใช้ไมโครปิเปตเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นของยูเรียหลังการดูดซับ

4) วัดความเข้มข้นของยูเรียในสารละลายโดยใช้เครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร

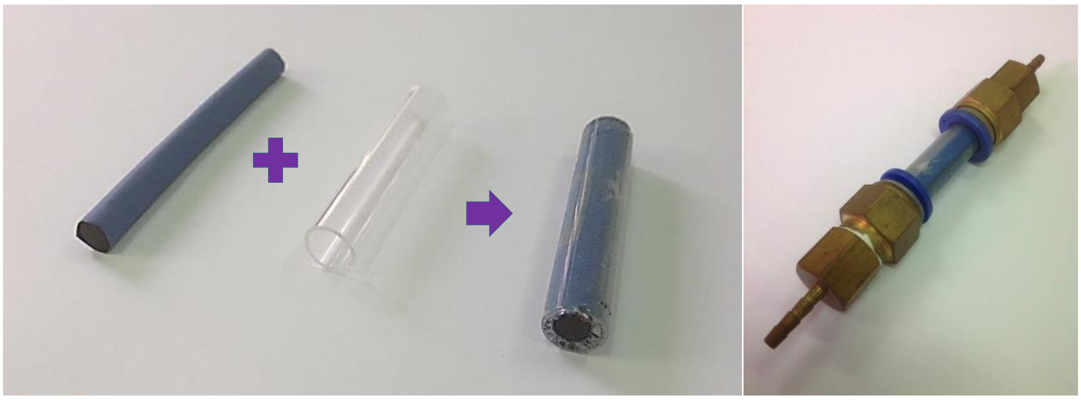
5) วิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิทที่สมดุล (Urea adsorption capacity) และประสิทธิภาพการดูดซับ (Urea adsorption efficiency) จากสมการ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

3.2.4 การทดลองเพื่อหาจลนศาสตร์ของการดูดซับยูเรีย

การทดลองนี้ศึกษาอัตราการดูดซับในระยะเวลาเริ่มต้นจนถึงจุดสมดุลของระบบ จึงเป็นส่วนหนึ่งในการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล และจากผลการทดลองยังสามารถนำไปหาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับได้อีกด้วย โดยจลนศาสตร์นี้ศึกษาการดูดซับในระบบไหลวนสารละลายผ่านคอลัมน์

3.2.4.1 การทดลองหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

1) นำคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน บรรจุใส่ท่อหดแล้วเป่าด้วยลมร้อนให้หดรัดแท่งคาร์บอนโมโนลิทจากนั้นนำไปใส่ในท่อแก้ว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 60 มิลลิเมตร) เติมช่องว่างระหว่างขอบแก้วและแท่งโมโนลิทด้วยกาวอีพ๊อกซี่ บันทึกน้ำหนักคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้บรรจุเป็นคอลัมน์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเตรียมคอลัมน์ในระบบไหลวน

2) เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนดูดซับ

3) ทำการไหลวนสารละลายไหลผ่านคอลัมน์ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้ปั๊มปรับอัตราการไหลของสารละลาย 5 มิลลิลิตร/นาที แล้วทำการวัดความเข้มข้นยูเรียที่เวลาต่างๆเพื่อนำมาหาจลนศาสตร์ของการดูดซับ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4) วัดความเข้มข้นของยูเรียในสารละลาย โดยใช้เครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร

5) วิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิทที่เวลาต่างๆ (q_t) จากสมการ 3.3

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{W} \times V \qquad (3.3)$$

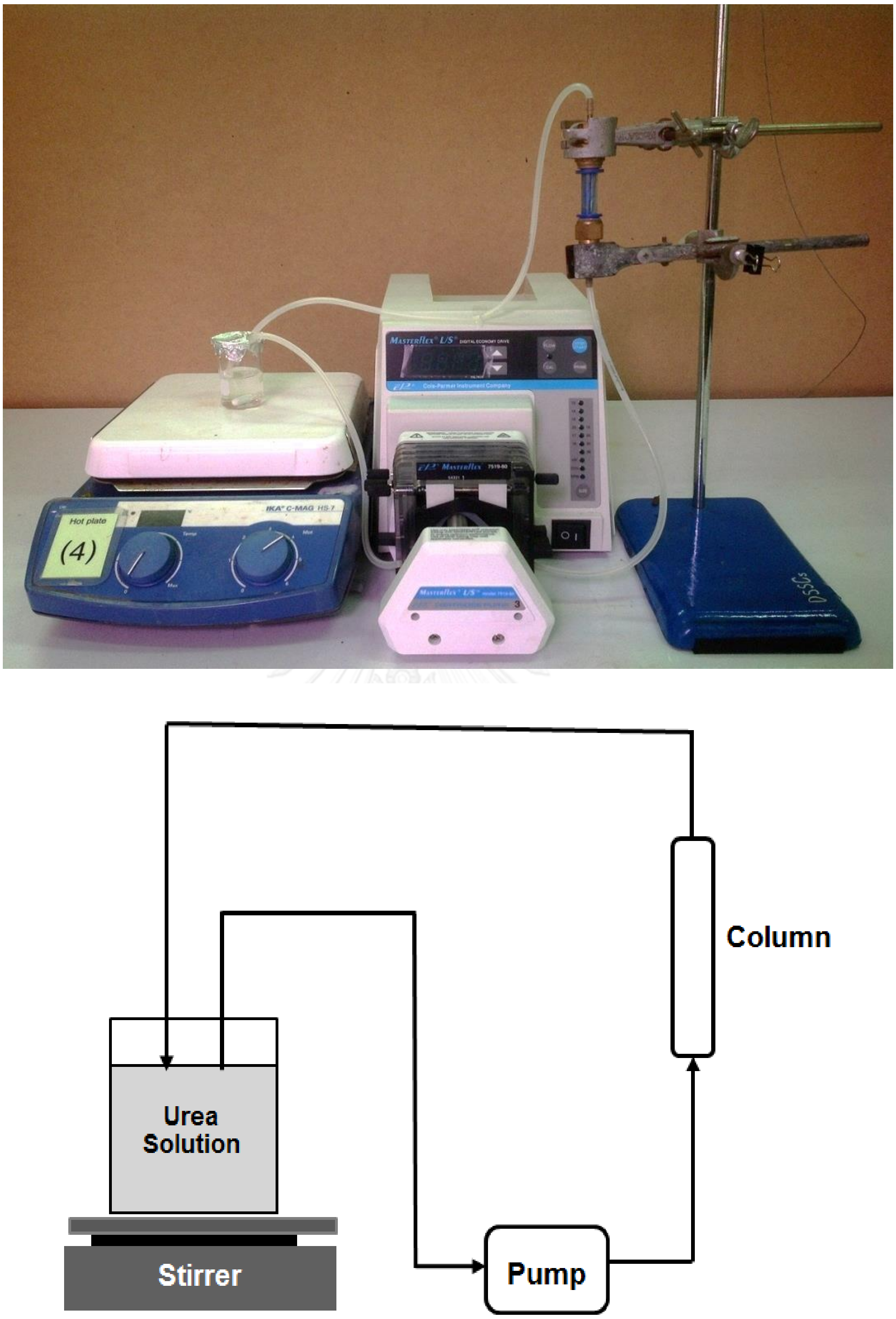
โดยที่ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับยูเรียในสารละลายต่อน้ำหนักของคาร์บอนโมโนลิทที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรียในสารละลายที่เวลาเริ่มต้น (มิลลิกรัม/เดซิลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของยูเรียในสารละลายที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัม/เดซิลิตร)

W คือ น้ำหนักของคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (กรัม)

V คือ ปริมาตรสารละลายยูเรียที่ใช้ (เดซิลิตร)



รูปที่ 3.4 การดูดซับยูเรียแบบไหลวน

6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี โดยใช้อัตราไหลตามการทดลองข้างต้น จากนั้นทำการบันทึกผล

7) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความสามารถในการดูดซับยูเรียที่เวลาต่างๆ เพื่อหาจลนศาสตร์ของการดูดซับยูเรียโดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือนและจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน

3.2.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราไหลต่อการดูดซับ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาหาจลนศาสตร์ในระบบไหลวน จึงมีอิทธิพลของอัตราไหลมาเกี่ยวข้องด้วย โดยการทดลองนี้เลือกคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่มีแนวโน้มว่ามีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนโมโนลิทชนิดอื่นมาทำการศึกษา

1) นำคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มาบรรจุเป็นคอลัมน์และบันทึกน้ำหนักคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้ทำการดูดซับ

2) เตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายก่อนดูดซับ

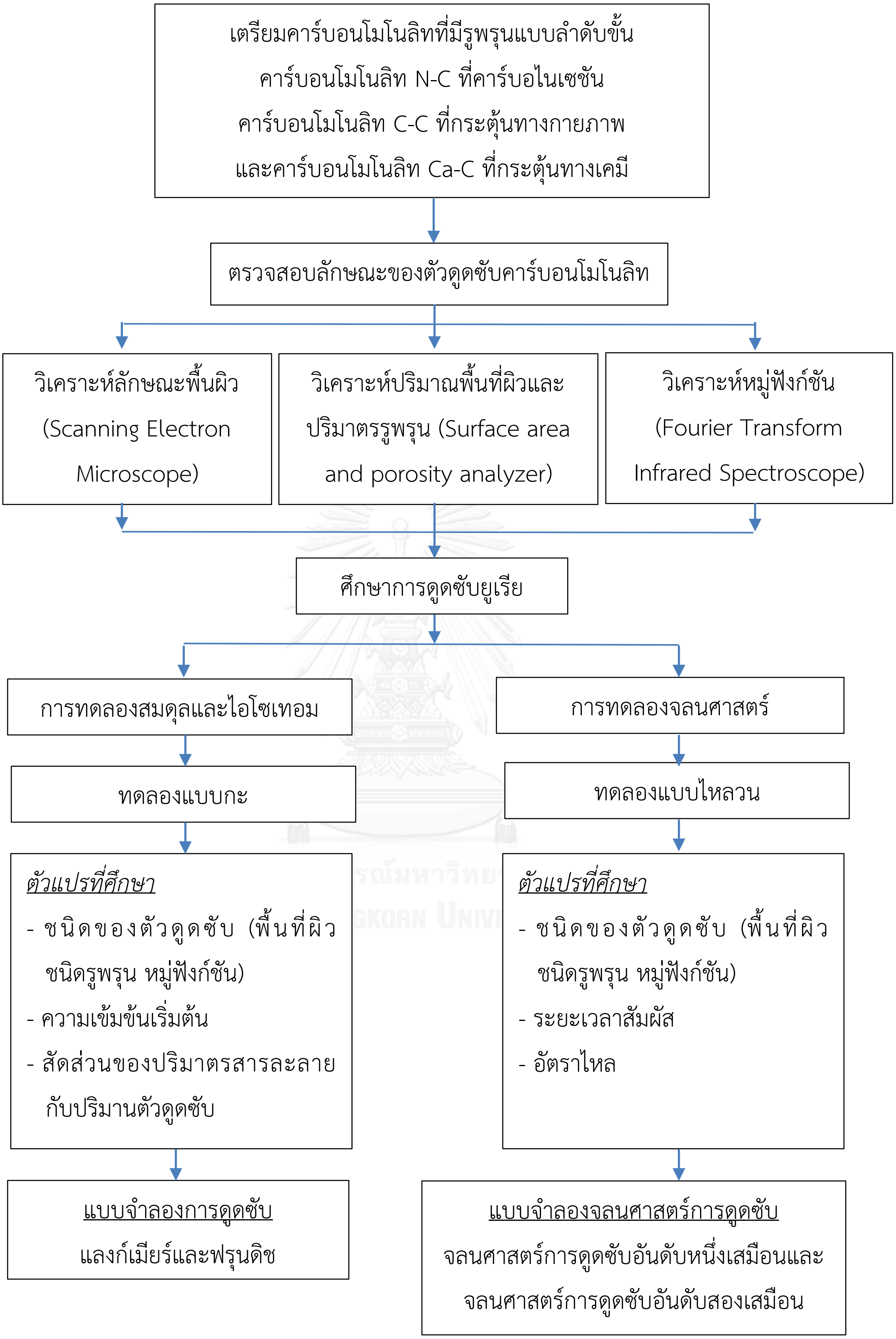
3) ไหลวนสารละลายยูเรียที่เตรียมไว้ผ่านคอลัมน์ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้ปั๊มปรับอัตราการไหลของสารละลาย 5 มิลลิลิตร/นาที แล้วทำการวัดความเข้มข้นยูเรียที่เวลาต่างๆ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4) วัดความเข้มข้นของยูเรียในสารละลาย โดยใช้เครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร

5) วิเคราะห์หาความสามารถการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิทที่เวลาต่างๆ (q_t) จากสมการ 3.3

6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยทำการเปลี่ยนอัตราไหลเป็น 10 และ 15 มิลลิลิตร/นาที เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการดูดซับที่อัตราไหลเปลี่ยนไป

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการทดลองการดูดซับยูเรียบนคาร์บอนโมโนลิทแบบลำดับขั้น

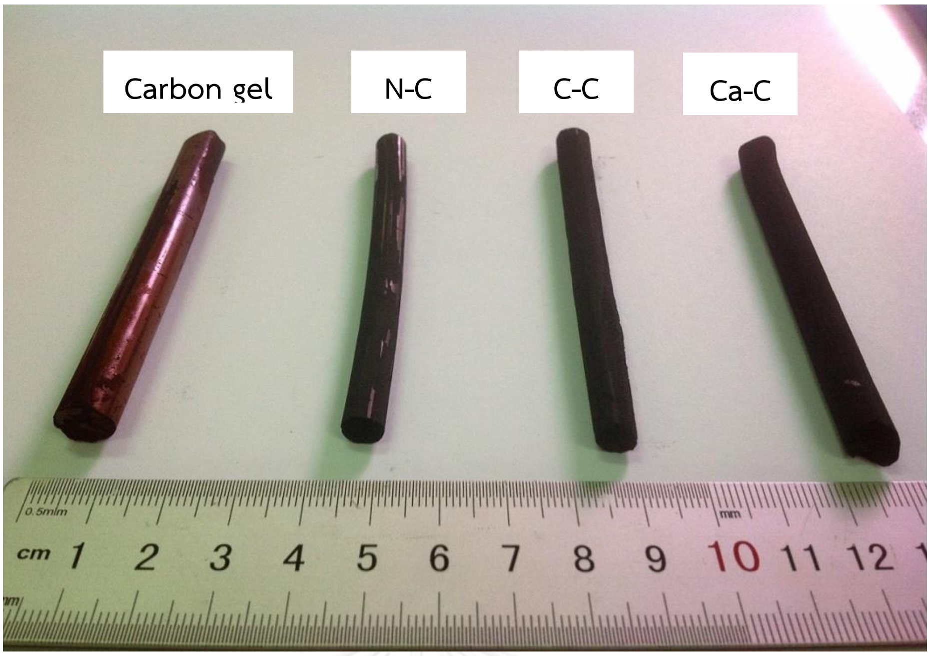
บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติของคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้เป็นตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมคาร์บอนโมโนลิทเพื่อนำมาใช้ในการดูดซับยูเรียในสารละลาย ซึ่งเตรียมมาจากการผสมของรีซอร์ซินอล (R) กับฟอร์มัลดีไฮด์ (F) โดยมีโซเดียมคาร์บอเนต (C) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นคาร์บอนเจล งานวิจัยนี้จะสังเคราะห์คาร์บอนเจลให้มีรูพรุนแมคโครพอร์โดยไม่ใช้เทมเพลตและคลื่นอัลตร้าโซนิก แต่จะควบคุมเพียงอัตราส่วน C/W, R/C และ R/F โดยอ้างอิงการเตรียมคาร์บอนโมโนลิทโดยไม่ใช้เทมเพลตจากงานวิจัยของ Siyasukh et al.(2008) [65] ซึ่งจะได้รูพรุนขนาดแมคโครพอร์ที่เชื่อมทะลุถึงทั่วกันทั้งเนื้อวัสดุ

คาร์บอนโมโนลิทที่ใช้ในการทดลองเตรียมมาจากการนำคาร์บอนเจลมาทำการกระตุ้นด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนด้วยวิธีที่ต่างกัน 3 วิธีคือ การคาร์บอไนเซชัน โดยคาร์บอนโมโนลิทจะได้จากการเผาใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน ใช้สัญลักษณ์แทนว่า N-C การกระตุ้นทางกายภาพคือการเผาภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้สัญลักษณ์แทนว่า C-C และการกระตุ้นทางเคมี โดยการนำคาร์บอนเจลแช่แคลเซียมไนเตรท จากนั้นทำการเผาภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้สัญลักษณ์แทนว่า Ca-C

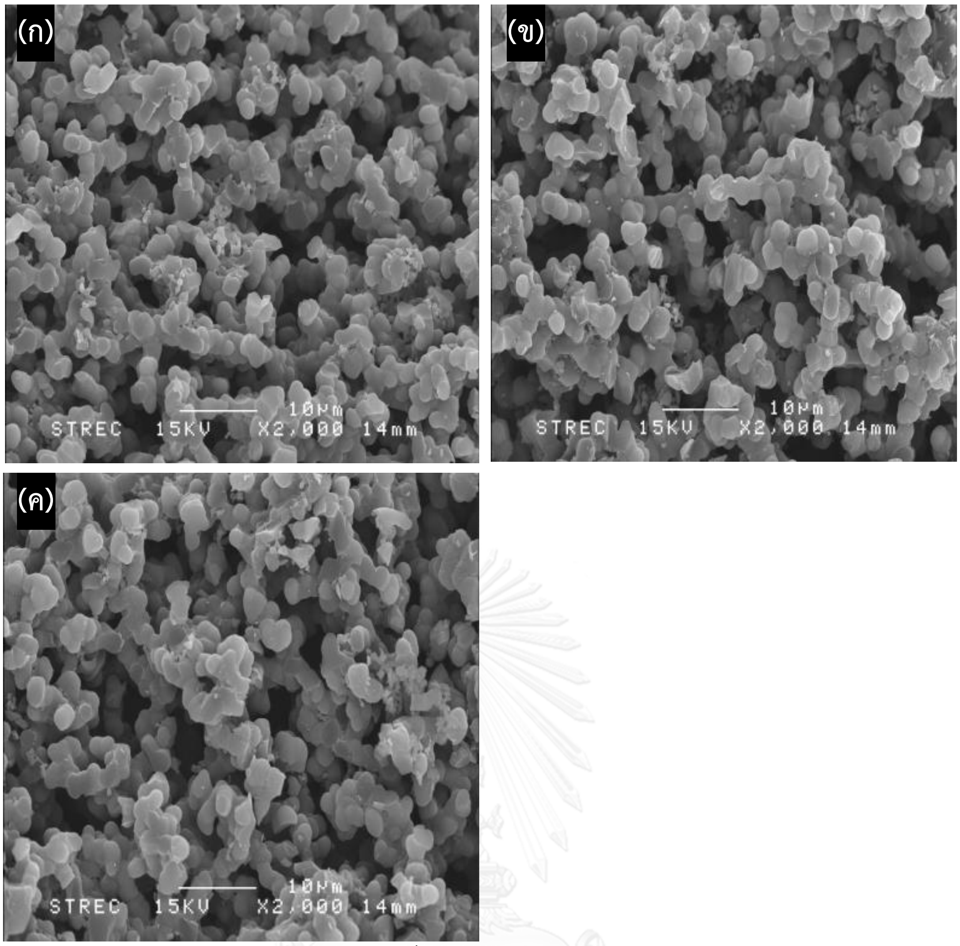
จากรูปที่ 4.1 เมื่อทำการสังเคราะห์คาร์บอนเจลจากขั้นตอนข้างต้นที่กำหนดไว้ จะได้เจลที่มีลักษณะเป็นรูปแท่งทรงกระบอก มีสีน้ำตาลเข้ม และเมื่อนำไปกระตุ้นทั้ง 3 วิธีเพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอน จะได้เป็นแท่งคาร์บอนโมโนลิททรงกระบอกสีดำ มีขนาดเล็กกว่ากว่าคาร์บอนเจลก่อนเผาเล็กน้อยและมีน้ำหนักลดลงเนื่องจากระหว่างการให้ความร้อนแก่คาร์บอนเจล จะเกิดการสลายตัวทางความร้อน โดยธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกขจัดออกไปอยู่ในสถานะก๊าซ โดยคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี จะมีค่า %Burn off หลังเผาโดยเฉลี่ย เท่ากับ 71, 73 และ 74 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้ง 3 วิธีจะเกิดลักษณะรูพรุนและสมบัติทางเคมีที่พื้นผิวต่างกัน จากนั้นนำคาร์บอน โมโนลิทที่ได้ไปทำการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ และนำไปศึกษาการดูดซับยูเรีย



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของคาร์บอนเจลและคาร์บอนโมโนลิทหลังการกระตุ้น

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

เมื่อนำคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มาวิเคราะห์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากภาพขยายพบว่าพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิด มีลักษณะโครงสร้างรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ไม่แตกต่างกัน จากภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิทที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ลักษณะที่สังเกตได้ คือ ลักษณะพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วอย่างสม่ำเสมอ โดยคาร์บอนเจลหลังจากการกระตุ้นทั้ง 3 วิธี ยังสามารถคงสภาพโครงสร้างความเป็นความเป็นรูพรุนขนาดเมโซพอร์เอาไว้ได้แม้ไม่ได้กระตุ้นด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิก ทั้งนี้เพราะวิธีการใช้กระตุ้นคาร์บอนทั้ง 3 วิธี ไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวที่จะทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ แต่จะส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดเมโซพอร์และไมโครพอร์มากกว่า ซึ่งรูพรุนขนาดแมคโครพอร์นี้เชื่อมทะลุถึงกัน เหมาะเป็นช่องทางสำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพื่อลำเลียงไปยังรูพรุนขนาดที่เล็กกว่าได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น [66]



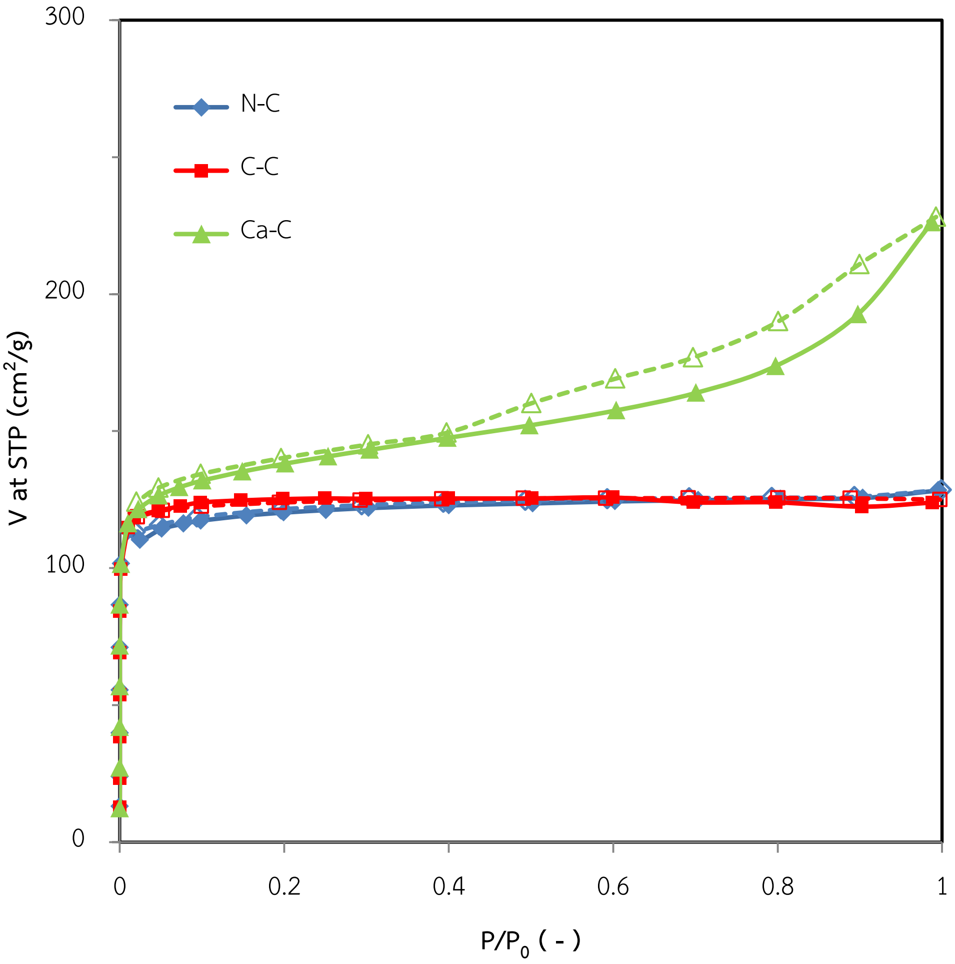
รูปที่ 4.2 รูปขยายของคาร์บอนโมโนลิทที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ก) คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน (ข) คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และ(ค) คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนระดับไมโครพอร์และเมโซพอร์ของตัวดูดซับด้วยวิธีการวัดไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจน (BET)

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K บนคาร์บอนโมโนลิท ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาลักษณะไอโซเทอมของคาร์บอนโมโนลิทจำแนกตาม IUPAC พบว่าคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันและคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ จะจำแนกอยู่ใน Type I คือ บ่งบอกว่ามีรูพรุนในโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดไมโครพอร์ ซึ่งต่างจากคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ซึ่งมีลักษณะของไอโซเทอมจำแนกอยู่ใน Type VI เนื่องจากไอโซเทอมเกิดช่องว่างแบบฮีทเทอรีซิส (Hysteresis loop) ขึ้นอย่างชัดเจนในขั้นตอนการคายการดูดซับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ามีรูพรุนขนาดเมโซพอร์เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ ปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ และปริมาณพื้นผิวโดยใช้หลักการคำนวณแบบ t-plot, Dollimore-Heal (DH) และ BET ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน, คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (V_{micro}) คือ 0.25, 0.24 และ 0.15 ลบ.ซม./กรัม ตามลำดับ มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ (V_{meso}) คือ 0.02, 0.04 และ 0.21 ลบ.ซม./กรัม ตามลำดับ และปริมาณพื้นที่ผิว คือ 321, 325 และ 431 ลบ.ซม./กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างคาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นทั้ง 3 วิธี พบว่าคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่ทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีมีพื้นที่ผิวมากกว่า เนื่องจากแคลเซียมไนเตรทที่มีฤทธิ์เป็นกรดกัดกร่อนและแทรกซึมในเนื้อเจลได้ดี เมื่อทำการกระตุ้นด้วยความร้อนโดยการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงทำให้สารที่เหลือค้างบนคาร์บอนโมโนลิทเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวจะเกิดการสลายตัว และเปลี่ยนเป็นก๊าซระเหยออกไปเปิดรูพรุนเดิมและสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้มีรูพรุนเมโซพอร์และไมโครพอร์ปะปนกัน ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น [67]



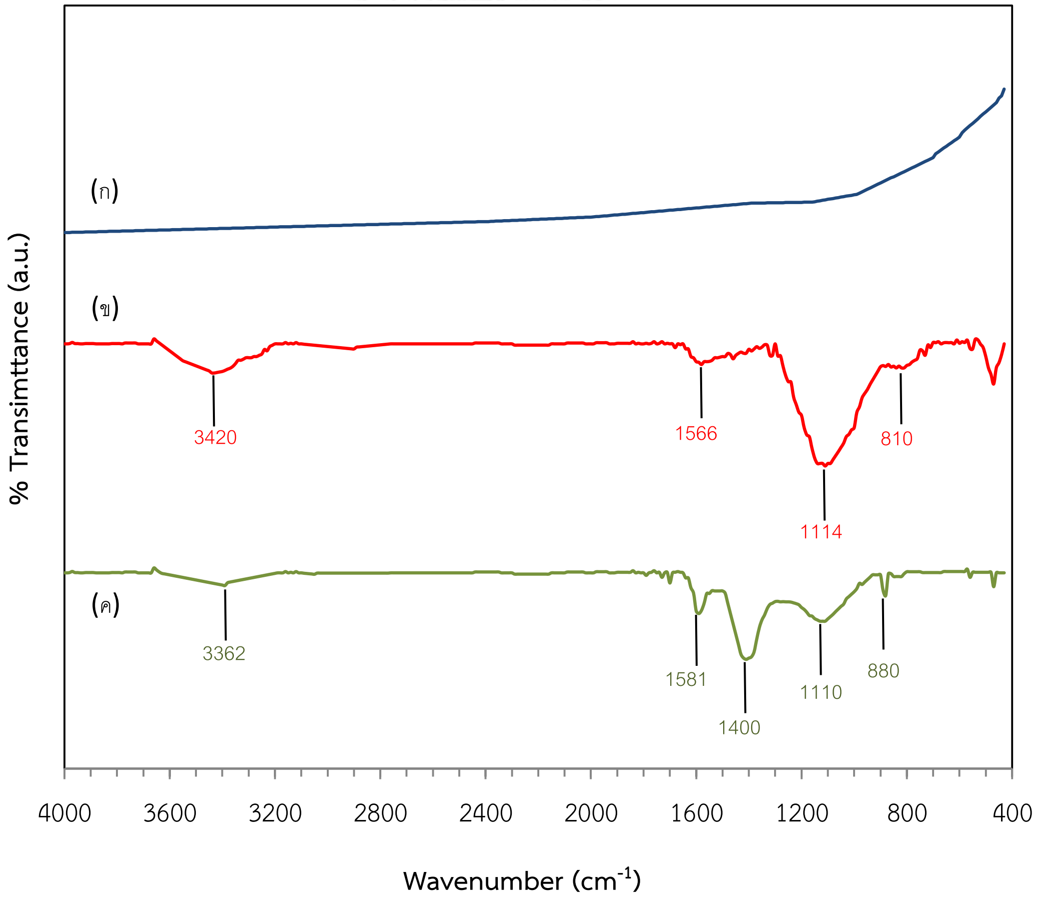
รูปที่ 4.3 แสดงไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของคาร์บอนโมโนลิท

ตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์รูพรุนและพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิท

Samples	Type of Isotherm	Pore volume (cm^3/g)		S_{BET} (m^2/g)
		V_{micro}	V_{meso}	
N-C	I	0.25	0.02	321
C-C	I	0.24	0.04	325
Ca-C	IV	0.15	0.21	431

4.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันตัวดูดซับ ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FTIR)

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีโดยการใช้เทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิท

จากรูปที่ 4.4(ก) จากกราฟพบว่าไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงตลอดทุกค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งบ่งบอกถึงการไม่มีหมู่ฟังก์ชันใดๆบนพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน แสดงให้เห็นว่าการคาร์บอไนเซชันด้วยการใช้ก๊าซไนโตรเจน ทำให้เกิดรูพรุนขนาดไมโครพอร์บนพื้นผิวของคาร์บอนโมโนลิทเท่านั้น

จากรูปที่ 4.4(ข) จากกราฟพบว่าที่ตำแหน่งความยาวคลื่น เท่ากับ 1566 และ 810 ซม.$^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชันซึ่งแสดงพันธะของ C=C และ C-H ตามลำดับ ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 1114 ซม.$^{-1}$แสดงหมู่ฟังก์ชันของ C-O และที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 3420 ซม.$^{-1}$แสดงตำแหน่งแถบการยืด O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นทางกายภาพโดยการเผาโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากจะทำให้เกิดรูพรุนไมโครพอร์แล้ว ยังทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันบนผิวของคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพอีกด้วย ซึ่งอาจจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแตกต่างจากคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันถึงแม้ว่าพื้นที่ผิวจะมีปริมาณใกล้เคียงกันก็ตาม

จากรูปที่ 4.4(ค) จากกราฟพบว่าที่ตำแหน่งความยาวคลื่น เท่ากับ 1581, 1400 และ 880 ซม.$^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชันซึ่งแสดงพันธะของ C=C, C=C-H และ C-H ตามลำดับ ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 1110 ซม.$^{-1}$แสดงหมู่ฟังก์ชันของ C-O และที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 3362 ซม.$^{-1}$แสดงหมู่ฟังก์ชันของพันธะไฮโดรเจน O-H จะเห็นได้ว่าการกระตุ้นทางเคมีโดยการใช้แคลเซียมไนเตรทและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวคล้ายกับการกระตุ้นทางกายภาพแต่คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีจะมีรูพรุนขนาดไมไครพอร์และเมโซพอร์ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น

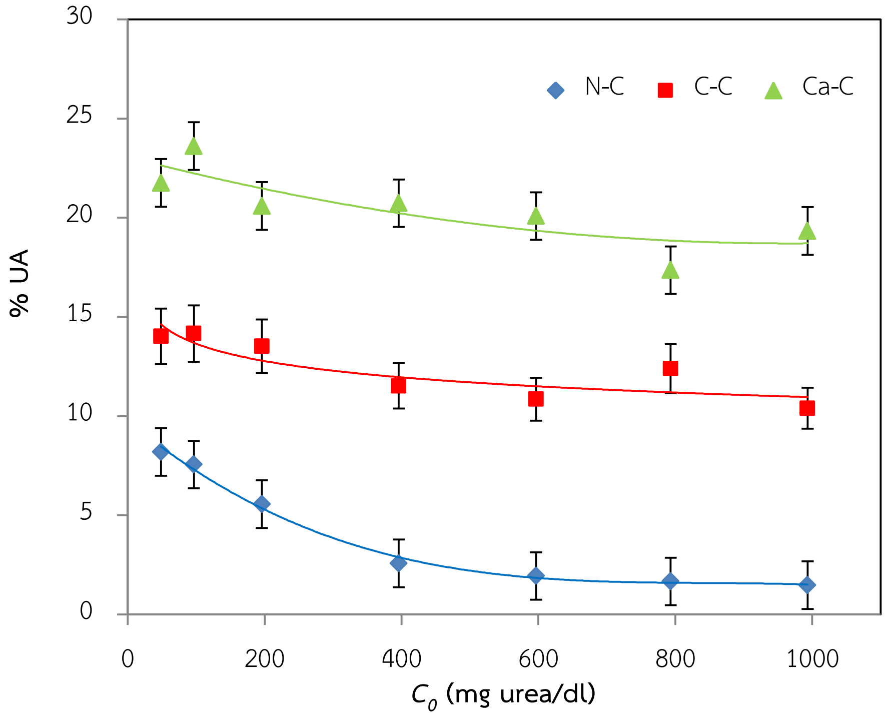
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับยูเรีย

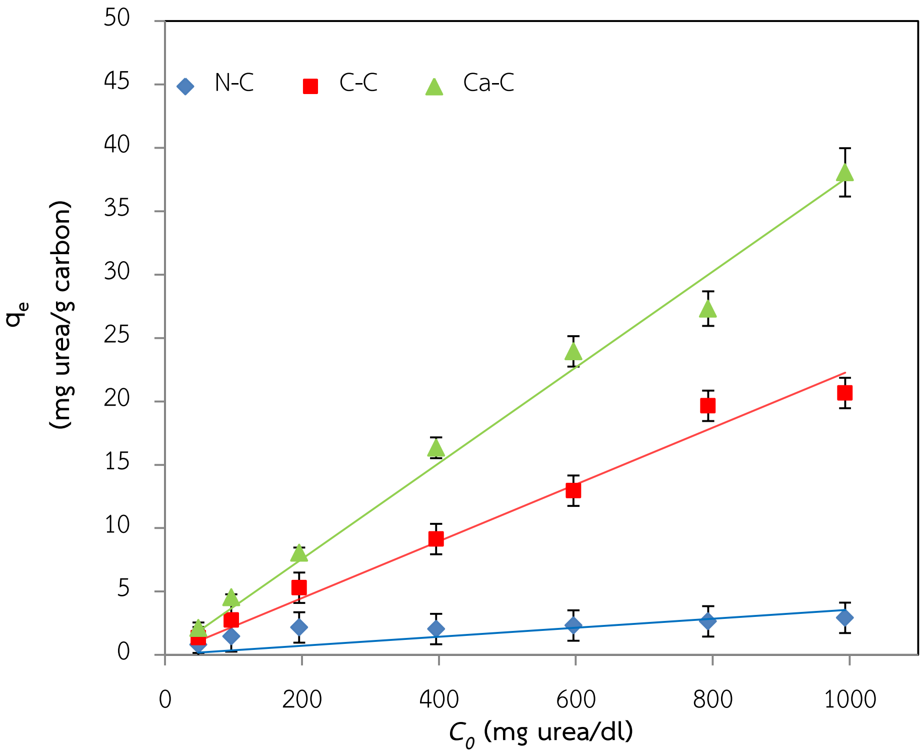
4.2.1 อิทธิพลของชนิดคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้ในการดูดซับยูเรีย

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับยูเรียในสารละลาย โดยคาร์บอนโมโนลิทที่ใช้จะมีลักษณะต่างกันซึ่งมาจากการกระตุ้น 3 วิธี คือ การคาร์บอไนเซชัน การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี ดังนั้นอิทธิพลของชนิดของคาร์บอนโมโนลิทซึ่งมีรูพรุนและพื้นผิวที่เกิดจากการกระตุ้นที่ต่างกันจึงส่งผลต่อการดูดซับด้วย

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายยูเรียเริ่มต้นที่เท่ากัน คาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิดจะมีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับที่ต่างกัน โดยคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีจะมีความสามารถในการดูดซับยูเรียสูงที่สุด และรองลงมาเป็นคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันมีความสามารถในการดูดซับยูเรียน้อยที่สุด ตามลำดับ เนื่องขนาดของรูพรุนและเคมีบนพื้นผิวที่ต่างกัน



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นกับประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นกับความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ

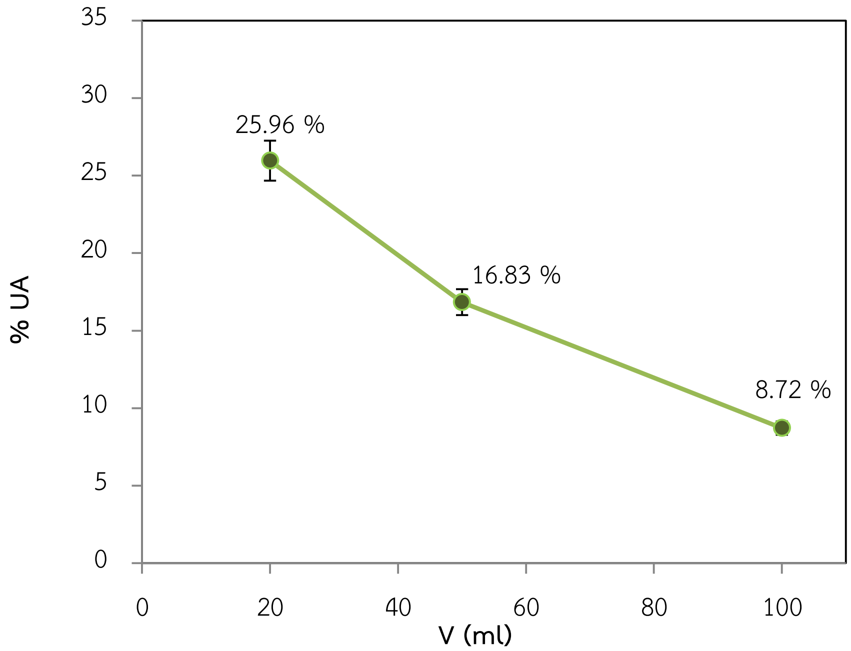
4.2.2 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น

จากการทดลองในการคาร์บอนโมโนลิทมาใช้ในการดูดซับยูเรียที่ความเข้มข้นของสารละลายยูเรียเริ่มต้นต่างๆกัน จากรูปที่ 4.5 พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้นเรื่อยๆจาก 50 ไปจนถึง 1000 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน มีค่าลดลงจาก 8.19 ไปจนถึง 1.47 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายของคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่ กระตุ้นทางกายภาพ ลดลงจาก 14.02 ไปจนถึง 10.40 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ลดลงจาก 21.75 ไปจนถึง 19.33 เปอร์เซ็นต์จะเห็นได้ว่าคาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายมีค่าลดลงเรื่อยๆ เป็นผลอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่มีจำกัด ซึ่งมีแนวโน้มตรงข้ามกับความสามารถในการดูดซับซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 [33]

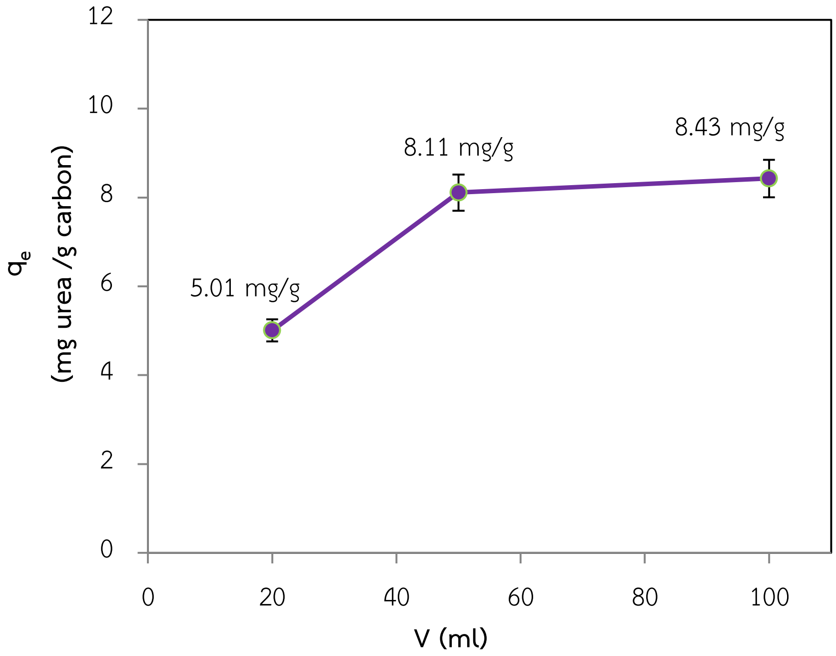
จากรูปที่ 4.6 พบว่าความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน เพิ่มขึ้นจากจาก 0.80 ไปจนถึง 2.92 มิลลิกรัม/กรัม ความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลของคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ เพิ่มขึ้นจากจาก 1.36 ไปจนถึง 20.65 มิลลิกรัม/กรัม และความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี เพิ่มขึ้นจากจาก 2.11 ไปจนถึง 38.07 มิลลิกรัม/กรัม แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายมวลสารชนิดหนึ่ง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่จากความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำโดยอาศัยแรงผลักดัน (Driving force) ดังนั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายยูเรีย ความเข้มข้นในสารละลายกับความเข้มข้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเกิดความแตกต่างกันมากขึ้น แรงผลักดันก็จะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณของยูเรียเกาะอยู่บนคาร์บอนได้มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลสูงขึ้น [33, 71]

4.2.3 อิทธิพลของอัตราส่วนปริมาตรสารละลายกับปริมาณตัวดูดซับ

จากการทดลองในการคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีมาใช้ในการดูดซับยูเรียที่อัตราส่วนตัวดูดซับกับปริมาตรสารละลาย โดยเพิ่มปริมาตรสารละลายตั้งแต่ 20 ถึง 100 มิลลิลิตร ในขณะที่ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นสารละลายยูเรียคงที่ โดยแสดงผลจากการทดลองในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลายกับประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลาย และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลายกับความสามารถในการดูดซับยูเรีย ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลายกับประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ ที่สารละลายเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร

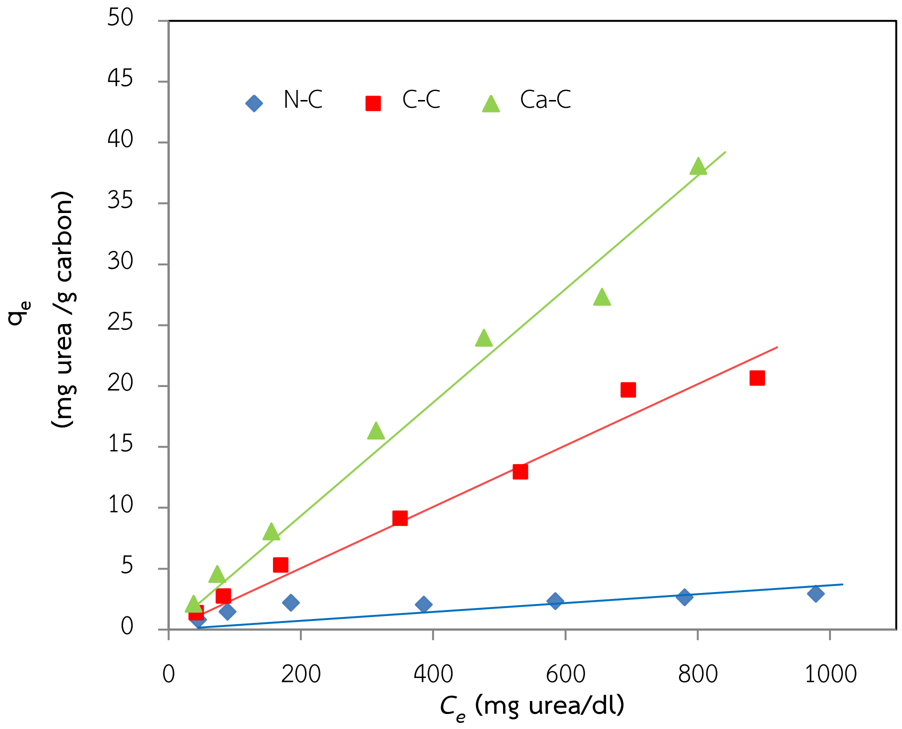


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลายกับความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ ที่สารละลายเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร

จากรูปที่ 4.7 ในการใช้คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีเป็นตัวดูดซับยูเรีย เมื่อเพิ่มปริมาตรสารละลายตั้งแต่ 20 ถึง 100 มิลลิลิตร พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับยูเรียออกจากสารละลายมีค่าจาก 25.97 ลดลงไปถึง 8.72 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาตรของสารละลาย ทำให้สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีค่าลดลง แต่จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรสารละลายทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลสูงขึ้นจาก 5.01 เพิ่มขึ้นถึง 8.43 มิลลิกรัม/กรัม เนื่องจากปริมาณของยูเรียในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแรงผลักดันสูงขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ทำให้ความสามารถดูดซับยูเรียที่สมดุลสูงขึ้น [33]

4.2.4 ไอโซเทอมการดูดซับ

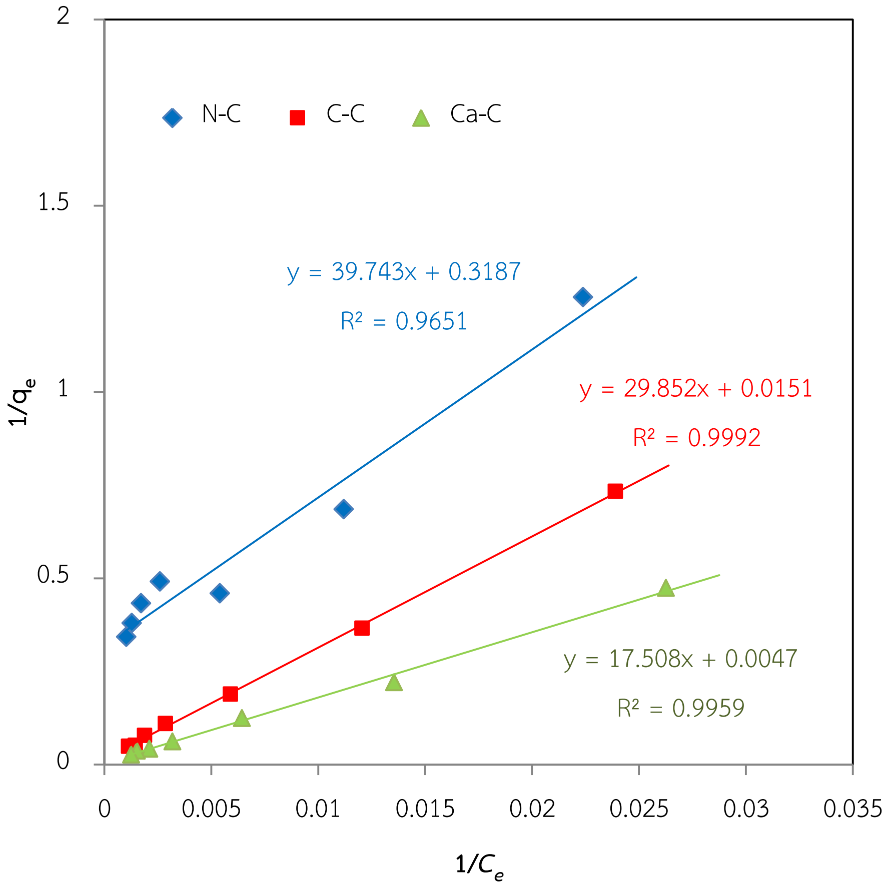
การทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิด สามารถนำมาสร้างแบบจำลองสมดุลการดูดซับหรือกราฟไอโซเทอม เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมและประสิทธิภาพในการดูดซับซึ่งมักอธิบายโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (C_e) กับความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (q_e) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยส่วนใหญ่การดูดซับในของเหลวจะมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรุนดิช โดยเกณฑ์การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายผลการทดลอง คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งแบบจำลองมีค่าเหมาะสมที่สุดเมื่อค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ใกล้เคียง 1.0 มากที่สุด



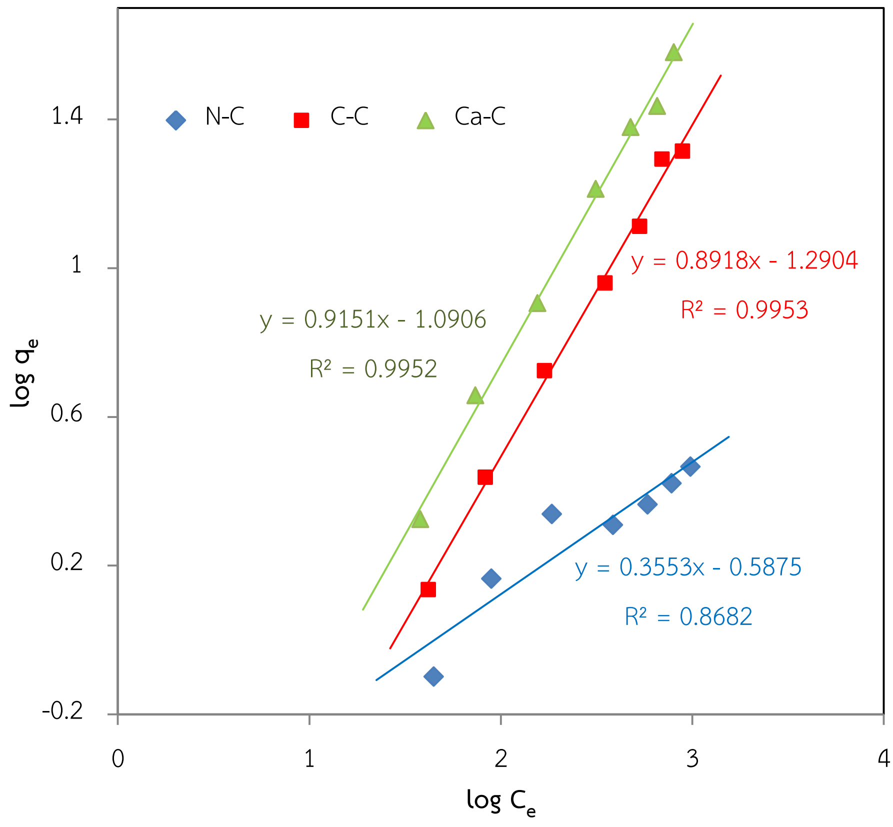
รูปที่ 4.9 กราฟไอโซเทอมแสดงการดูดซับยูเรียโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ

เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9651, 0.9651 และ 0.9651 ตามลำดับ มีค่าความสามารถในการดูดซับยูเรียสูงสุด เท่ากับ 3.14, 66.23 และ 212.77 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ และค่า K_L เท่ากับ 8.02×10^{-3}, 5.06×10^{-4} และ 2.68×10^{-4} ลิตร·มิลลิกรัม$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิช ดังแสดงในรูปที่ 4.11 คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.7532, 0.9953และ 0.9952 ตามลำดับ ค่า 1/n เท่ากับ 0.3553, 0.8918 และ 0.9151 ตามลำดับ และค่า K_F เท่ากับ 0.258, 0.051 และ 0.081 (มิลลิกรัม·กรัม$^{-1}$)·(ลิตร·กรัม$^{-1}$)^n ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.10 แบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์



รูปที่ 4.11 แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดิช

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับยูเรียของไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรุนดิช

Samples	Langmuir model			Freundlich model		
	q_m(mg/g)	K_L(l·mg^{-1})	R^2	1/n	K_F(mg·g^{-1})·(l·g^{-1})^n	R^2
N-C	3.14	8.02×10^{-3}	0.9651	0.3553	0.258	0.7532
C-C	66.23	5.06×10^{-4}	0.9992	0.8918	0.051	0.9953
Ca-C	212.77	2.68×10^{-4}	0.9959	0.9151	0.081	0.9952

เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งสองแบบจำลอง พบว่าคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันจะสอดคล้องกับแบบจำลองแบบแลงก์เมียร์อย่างชัดเจน แต่คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองทั้งสองแบบที่สูงและใกล้เคียงกัน จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นการดูดซับได้ทั้งแบบจำลองแบบแลงก์เมียร์และแบบฟรุนดิช

โดยถ้าการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแบบแลงก์เมียร์มากกว่าแบบฟรุนดิช เช่น การดูดซับยูเรียโดยใช้คาร์บอนจะสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดทางกายภาพ การดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการดูดซับยูเรีย [18] ได้ดังนี้

(1) โมเลกุลยูเรียเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลวสู่ผิวภายนอกตัวดูดซับคาร์บอนโมโนลิท

(2) โมเลกุลยูเรียแพร่เข้าภายในโพรงรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนโมโนลิท

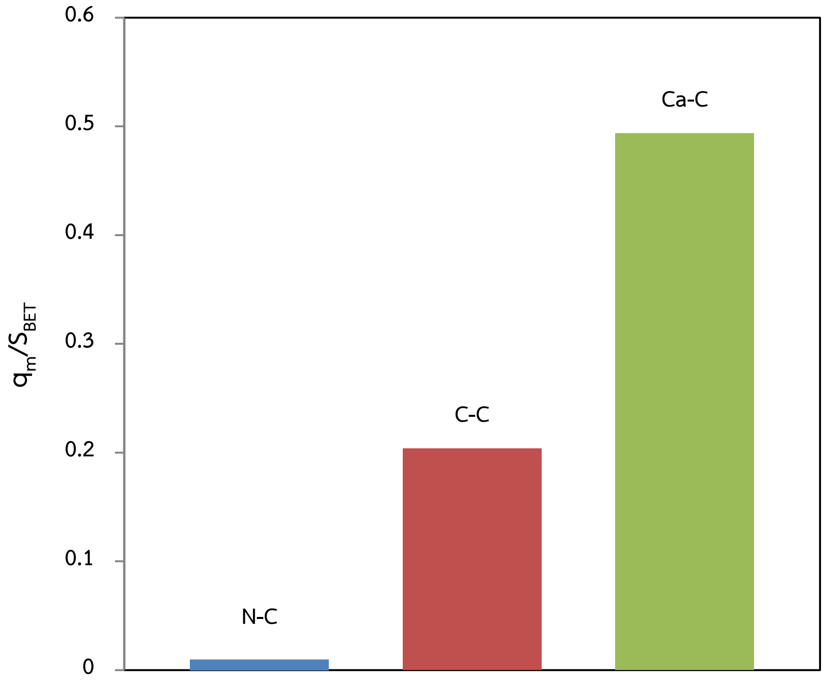
(3) เกิดการดูดซับของโมเลกุลยูเรียภายในโพรงและพื้นผิวของรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนโมโนลิท

โดยกลไกการดูดซับแบบแลงก์เมียร์จะแตกต่างจากแบบจำลองแบบฟรุนดิชซึ่งเป็นการดูดซับที่มีโอกาสดูดซับซ้อนกันเป็นแบบหลายชั้นและไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในขั้นตอนการดูดซับยูเรียนอกจากจะดูดซับเกาะอยู่บนผิวคาร์บอนโมโนลิทแล้วจะเกาะบนโมเลกุลยูเรียซ้อนกันเป็นชั้นอีกด้วย ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นพื้นที่ผิวให้มีลักษณะเปลี่ยนไปทำให้มีพื้นผิวที่ว่องไวและกระจายตัวไม่เท่ากันในแต่ละพื้นที่ จึงทำให้คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพและคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่มีการกระตุ้นบนพื้นผิวและมีหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะมีความสอดคล้องกับแบบจำลองฟรุนดิชด้วย

ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (q_m) เป็นค่าคงที่ซึ่งแสดงถึงสมบัติเฉพาะของตัวดูดซับชนิดต่างๆ เมื่อนำค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีที่ในได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่ามีคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับยูเรียที่สูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับยูเรียของงานวิจัยอื่นๆ

Researcher	Adsorbent	q_m (mg/g)	Ref.
Shi et al. (1999)	β-cyclodextrin polymer	90	[12]
Liang et al. (2005)	Chitosan coated cellulose	50	[14]
Pillai et al. (2013)	Microwave activated carbonized coconut shells	256	[17]



รูปที่ 4.12 แสดงความสามารถการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณพื้นที่ผิวของคาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นแบบต่างๆ

เพื่ออธิบายความแตกต่างของการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิด จึงนำข้อมูลมาสร้างกราฟแสดงความสามารถการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณพื้นที่ผิวของคาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นแบบต่างๆ ดังรูปที่ 4.12 จะพบว่า ลักษณะรูพรุนส่งผลความสามารถในการดูดซับ คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีซึ่งมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์และเมโซพอร์ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพและคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันที่มีเพียงรูพรุนขนาดไมโครพอร์ เนื่องจากรูพรุนเมโซพอร์ทำให้ยูเรียเข้าไปในรูพรุนมากขึ้น ทำให้ยูเรียยึดเกาะบนผิวคาร์บอนได้มากขึ้น จึงสรุปได้ว่ารูพรุนขนาดเมโซพอร์มีอิทธิพลต่อการดูดซับ [38, 68] และเมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชัน โดยเปรียบเทียบกับคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพและคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน ซึ่งมีขนาดรูพรุนแบบไมโครพอร์เหมือนกัน แต่คาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นทางกายภาพ C-C จะมีความสามารถในการดูดซับยูเรียที่มากกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากพื้นที่ผิว มีความว่องไวจากหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้น ทำให้สามารถรองรับให้ยูเรียมาเกาะได้มากกว่า [69, 70] ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ว่าคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีซึ่งมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์และเมโซพอร์ อีกทั้งยังมีหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิว จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด

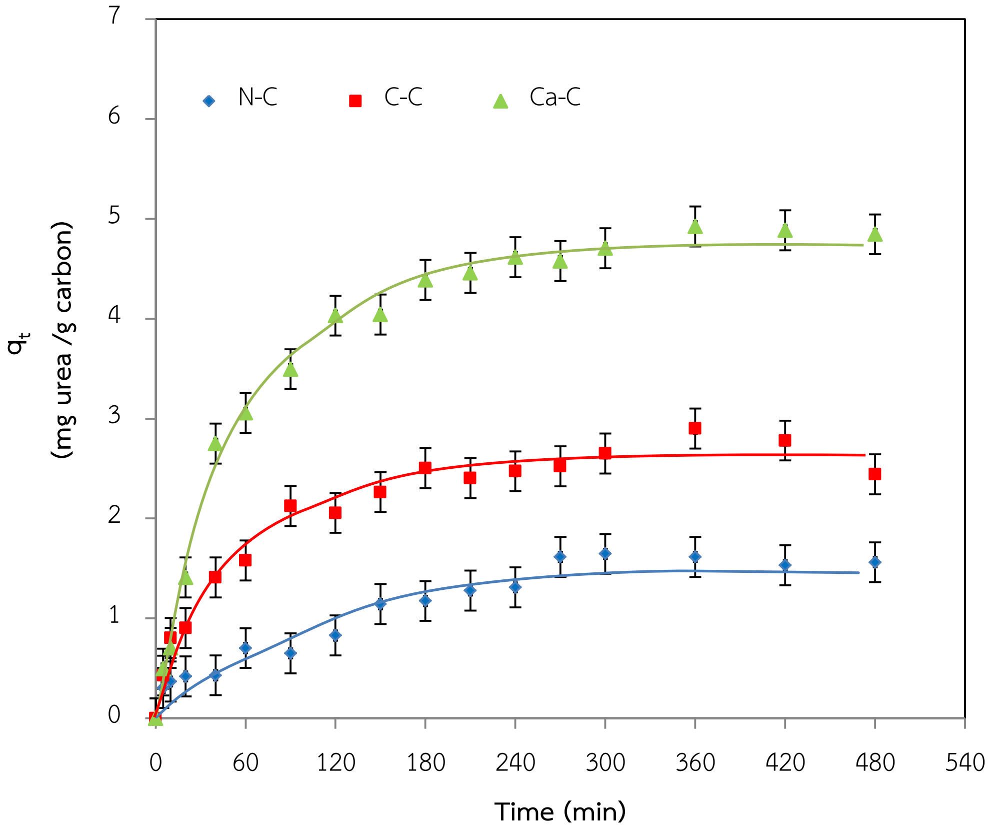
4.3 จลนศาสตร์การดูดซับยูเรีย

จลนศาสตร์การดูดซับ เป็นการศึกษาอัตราการดูดซับบนตัวดูดซับในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ จนกระทั่งการดูดซับเข้าใกล้จุดสมดุล งานวิจัยนี้จะศึกษาอัตราการดูดซับยูเรียด้วยวิธีการไหลวนสารละลายยูเรียผ่านคาร์บอนโมโนลิทที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ ในช่วงระยะเริ่มต้นจนกระทั่งถึงจุดที่เข้าสู่สมดุลของระบบ

4.3.1 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล

จากการทดลองการดูดซับโดยใช้สารละลายยูเรียที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ไหลวนผ่านแต่ละคอลัมน์ที่บรรจุคาร์บอนโมโนลิทที่เตรียมไว้ทั้ง 3 ชนิด โดยใช้อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที และทำการเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากการนำข้อมูลการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับเวลาสัมผัสของยูเรียโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าในช่วง 60 นาทีแรกในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับยูเรียจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแรงขับดันที่มากจากความแตกต่างความเข้มข้นในสารละลายกับความเข้มข้นที่ผิวตัวดูดซับ หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีค่าคงที่เนื่องจากระบบเข้าสภาวะสมดุล โดยจุดที่เริ่มเข้าสมดุลจะสังเกตที่จุดเปลี่ยนโค้ง ซึ่งจะพบว่าคาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิดเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 120 นาที ภายหลังจากเข้าสู่สมดุลแล้ว ระยะเวลาจะไม่มีผลกระทบใดๆกับระบบ ซึ่งความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สมดุลของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มีค่าเท่ากับ 1.59, 2.69 และ 4.84 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ [7]

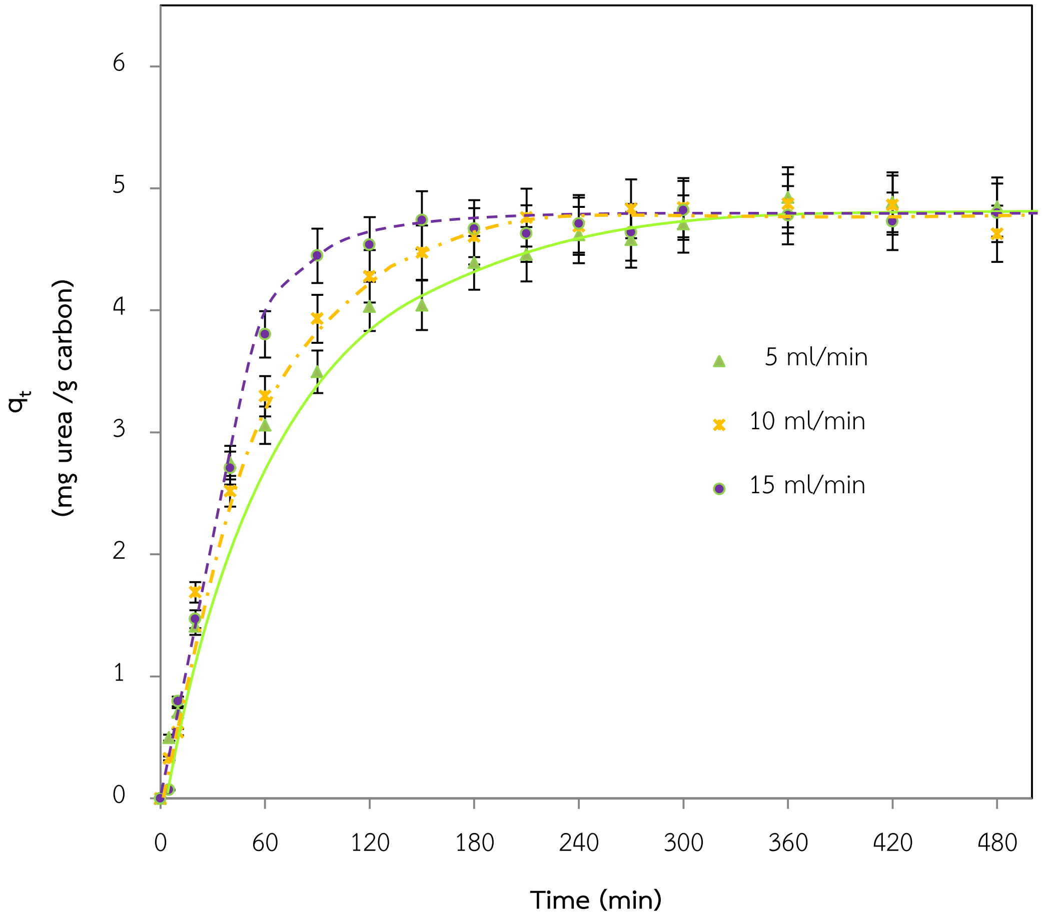
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาสัมผัสของยูเรียโดยใช้คาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ

4.3.2 อิทธิพลของอัตราไหลต่อการดูดซับ

จากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราการดูดซับยูเรียด้วยวิธีการไหลวนสารละลายยูเรียผ่านคาร์บอนโมโนลิทที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ อัตราการไหลที่เปลี่ยนไปจึงอาจส่งผลต่อการดูดซับ งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของอัตราไหลต่อการดูดซับโดยใช้สารละลายยูเรียความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/เดซิลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยเลือกคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ซึ่งเป็นคาร์บอนโมโนลิทที่มีความสามารถดูดซับสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโมโนลิทตัวอื่นๆมาบรรจุภายในคอลัมน์ จากนั้นนำมาศึกษาการดูดซับโดยป้อนสารละลายยูเรียให้ไหลวนผ่านคอลัมน์ โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลวนของสารละลายยูเรียจาก 5 เป็น 10 และ 15 มิลลิลิตร/นาที นำข้อมูลไปสร้างเป็นกราฟความสามารถในการดูดซับยูเรียของคาร์บอนโมโนลิทที่อัตราการไหลที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 4.14



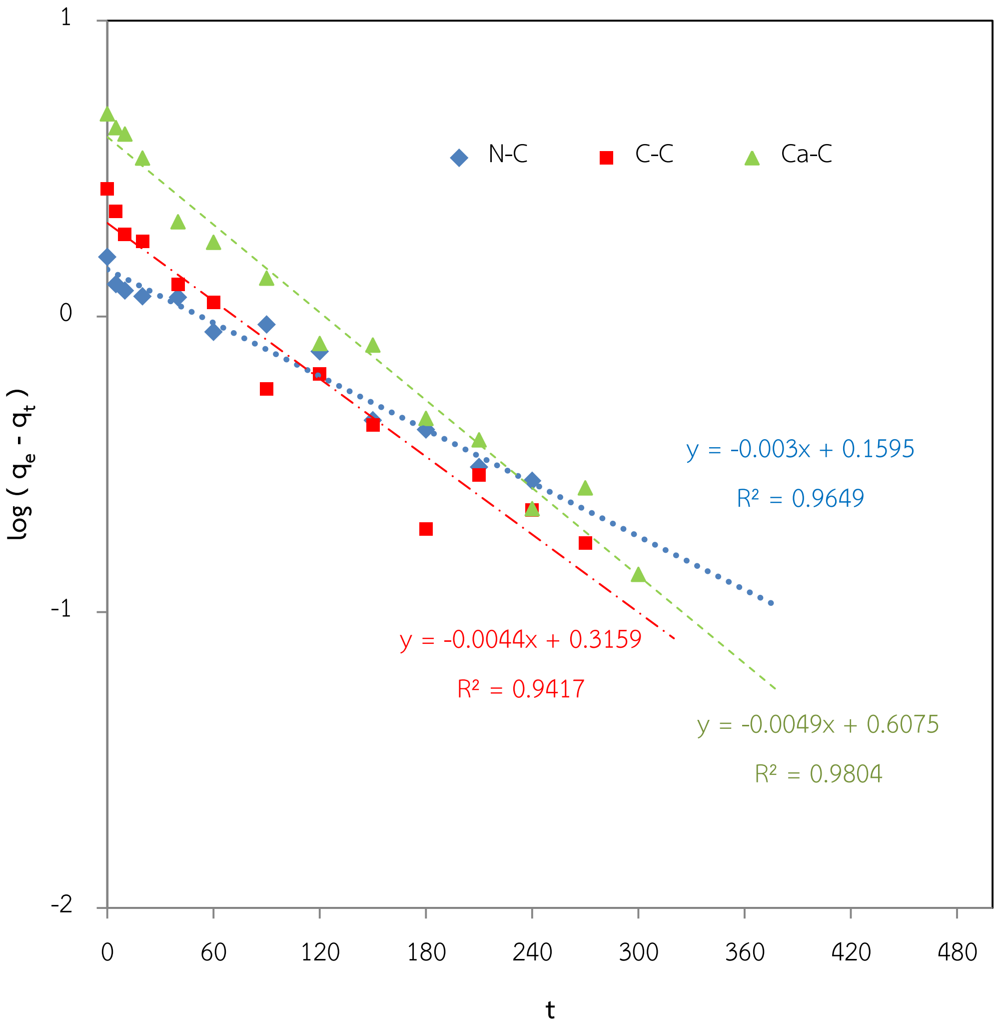
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับยูเรียกับเวลาสัมผัสสารละลายที่อัตราการไหลที่เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.14 พบว่าคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีที่ไหลวนสารละลายยูเรียที่อัตราไหล 5, 10 และ 15 มิลลิลิตร/นาที เข้าสู่สมดุลที่เวลา 120, 90 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยค่าความสามารถในการดูดซับสุดท้ายที่สมดุลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับอัตราการไหลที่เปลี่ยนไป แต่จะสังเกตได้ว่าอัตราไหลส่งผลต่อระยะเวลาที่เข้าสมดุลของระบบ เนื่องจากอัตราไหลที่เร็วกว่า ทำให้มีระยะเวลาที่สารละลายไหลวนกลับไปสัมผัสคาร์บอนมากกว่าอัตราไหลที่ช้า ทำให้ยูเรียสามารถยึดเกาะบนผิวของคาร์บอนได้มากขึ้นจึงทำให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วขึ้น

4.3.3 จลนศาสตร์การดูดซับ

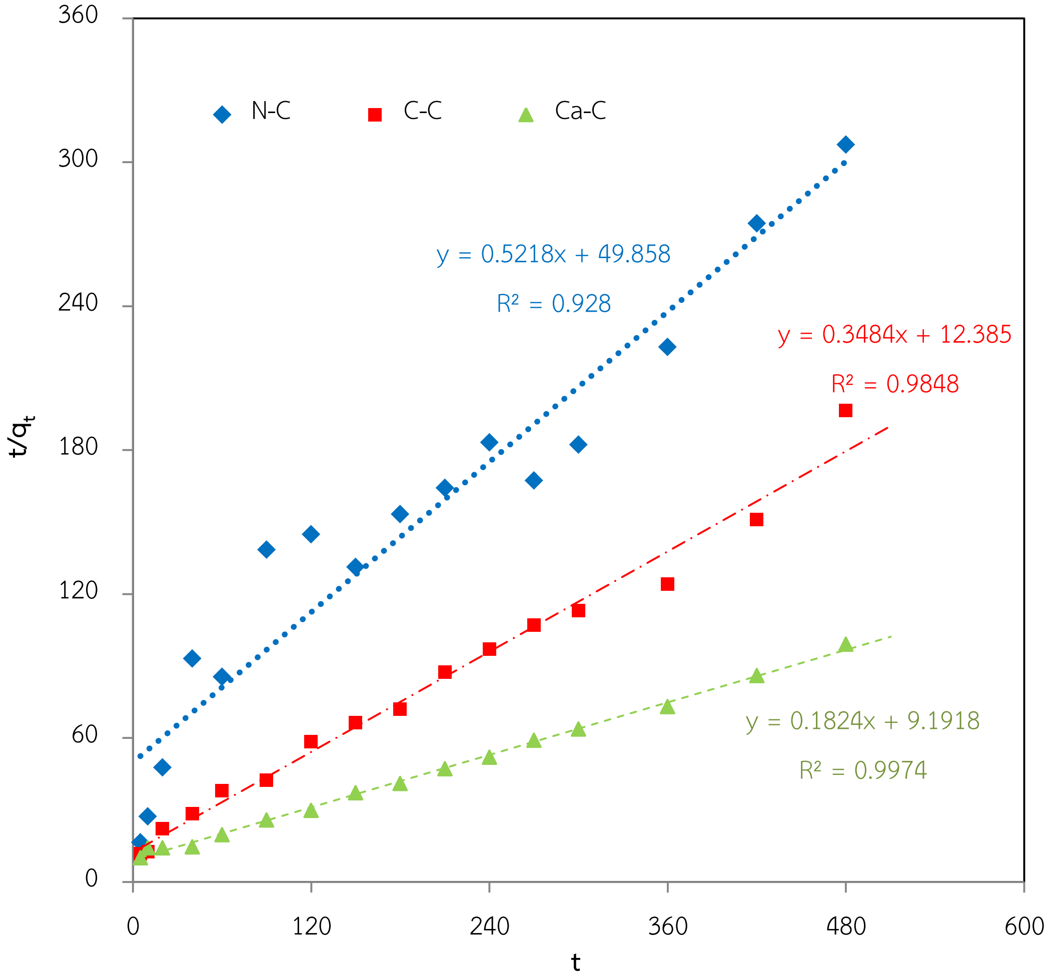
เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับ แบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ จลนศาสตร์

การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first order kinetics) และจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน (Pseudo-second order kinetics) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือนของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มีค่าประสิทธิสัมพันธ์เท่ากับ 0.9804, 0.9417 และ 0.9804 ตามลำดับ และมีค่าคงที่ k_1 เท่ากับ $6.91x10^{-3}$, $1.01x10^{-3}$และ $1.13x10^{-2}$ นาที$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.16 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน

จากรูปที่ 4.16 พบว่าจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือนของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.9280, 0.9848 และ 0.9974 ตามลำดับ และมีค่าคงที่ k_2 เท่ากับ 5.46 $\times10^{-3}$, 9.80 $\times10^{-3}$ และ 3.62 $\times10^{-3}$ กรัม·มิลลิกรัม$^{-1}$นาที$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดซับยูเรียของจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือนและจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน

Samples	Pseudo-first order		Pseudo-second order	
	k_1 (min^{-1})	R^2	k_2 (g mg^{-1}min^{-1})	R^2
N-C	6.91×10^{-3}	0.9804	5.46×10^{-3}	0.9280
C-C	1.01×10^{-3}	0.9417	9.80×10^{-3}	0.9848
Ca-C	1.13×10^{-2}	0.9804	3.62×10^{-3}	0.9974

เมื่อพิจารณาจลนศาสตร์การดูดซับยูเรียในสารละลายโดยคาร์บอนโมโนลิทเป็นตัวดูดซับ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่า คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันจะสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน จึงอธิบายได้ว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลบนพื้นผิว ความเข้มข้นเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับเพราะไม่มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่พื้นผิว ซึ่งต่างจากคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่จะสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน เนื่องจากแรงดึงดูดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวคาร์บอนเสมือนเป็นการดูดซับทางเคมีเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับก่อนเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับ [34, 36, 72]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยการดูดซับยูเรียในสารละลายด้วยคาร์บอนโมโนลิทที่สังเคราะห์จากริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ สามารถทำการดูดซับยูเรียได้และจะสามารถดูดซับได้ดีขึ้นเมื่อเลือกใช้วิธีการกระตุ้นที่เหมาะสม ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ศึกษาสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนโมโนลิท

- คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คือ คาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นด้วยก๊าซไนโตรเจน จะมีรูพรุนส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดไมโครพอร์ในโครงสร้างรูพรุนขนาดแมคโครพอร์และจะไม่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเลย

- คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ คือ คาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะมีรูพรุนส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดไมโครพอร์ในโครงสร้างรูพรุนขนาดแมคโครพอร์แต่จะมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซึ่งเกิดจากการกระตุ้น

- คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี คือ คาร์บอนโมโนลิทที่กระตุ้นด้วยแคลเซียมไนเตรทและคาร์บอนไดออกไซด์จะมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์และเมโซพอร์ในโครงสร้างรูพรุนขนาดแมคโครพอร์ อีกทั้งยังมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.2 ศึกษาการดูดซับยูเรีย

- คาร์บอนโมโนลิทมีความสามารถในการดูดซับยูเรีย โดยคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนไมโครพอร์และเมโซพอร์ในโครงสร้างรูพรุนแมคโครพอร์และพื้นที่ผิวที่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจะส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับยูเรียที่สูงที่สุด รองลงมาคือคาร์บอนโมโนลิทที่มีรูพรุนไมโครพอร์ในโครงสร้างรูพรุนแมคโครพอร์และมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และต่ำที่สุดคือคาร์บอนโมโนลิทที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเลยแต่มีเพียงรูพรุนไมโครพอร์ในโครงสร้างรูพรุนแมคโครพอร์

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายยูเรียและสัดส่วนของตัวดูดซับกับปริมาตรของสารละลายส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยความความสามารถในการดูดซับแปรผันตรงกับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น แต่แปรผกผันกับปริมาตรของสารที่มากขึ้น

- การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับยูเรีย คาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันจะมีความสอดคล้องกับจำลองไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์ แต่คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพและ

คาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีจะมีความสอดคล้องกับทั้งแบบจำลองไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์และฟรุนดิช

- ความสามารถในการดูดซับยูเรียสูงสุด (q_m) ของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ และคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี มีค่าเท่ากับ 3.14, 66.23 และ 212.77 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

- ในการดูดซับยูเรียโดยวิธีแบบไหลวนสารละลายผ่านคอลัมน์ ที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที คาร์บอนโมโนลิททั้ง 3 ชนิด เข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 120 นาที

- อัตราไหลที่เพิ่มขึ้นในการดูดซับแบบไหลวน ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับ แต่ส่งผลให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วขึ้น

- จลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชันสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเสมือน แต่คาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพและคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมีจะสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- นำค่าคงที่และแบบจำลองการดูดซับทั้งจากสมดุลการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับมาออกแบบดูดซับยูเรียในระบบจริงที่ขนาดใหญ่ขึ้น เช่น การดูดซับยูเรียในน้ำยาฟอกไตที่ใช้แล้ว เป็นต้น

- ควรศึกษาแบบจำลองการดูดซับอื่นๆด้วย เพื่อจะสามารถนำทฤษฎีและค่าคงที่จากแบบจำลองมาเลือกใช้อธิบายได้อย่างชัดเจนและเหมาะสมมากขึ้น

- ควรศึกษาระบบการล้างตัวดูดซับเพื่อนำมาใช้ใหม่ (Regeneration system) ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตตัวดูดซับ

รายการอ้างอิง

1. Praditpornsilpa, K., *Thailand renal replacement therapy year 2009*. 2009, Nephrology Society of Thailand.
2. Hendrick, S.B., *The crystal structure of urea and the molecular symmetry of thiourea.* Crystal Structure of Urea, 1928. **50**: p. 1455-1464.
3. Stumpe, M.C. and H. Grubmuller, *Aqueous Urea Solutions: Structure, Energetics, and Urea Aggregation.* J. Phys. Chem. B, 2007. **111**: p. 6220-6228.
4. Kurzer, F. and P.M. Sanderson, *Urea in the history of organic chemistry: Isolation from natural sources.* Journal of Chemical Education 1956. **33**(9): p. 452–459.
5. Gotch, F.A., *Urea is the best molecule to target adequacy of peritoneal dialysis.* Peritoneal Dialysis International, 2000. **20**: p. 58-64.
6. Baumgartner, M., et al., *Evaluation of flow injection analysis for determination of urea in sheep's and cow's milk.* Acta Veterinaria Hungarica, 2005. **50**(3): p. 263–271.
7. Yoshida, F. and M. Okazaki, *Treatment of artificial kidney dialysate with cycling adsorber-desorbers.* Annals of Biomedical Engineering, 1974. **2**: p. 327-334.
8. McKellar, S., *Gordon Murray and the artificial kidney in Canada.* Nephrology, dialysis, transplantation, 1999. **14**(11): p. 2766-2770.
9. Constantin, B., et al., *Inquiry into Biology*. 2007: McGraw-Hill Ryerson.
10. Bakheit, M., *Adsorption of urea by some Sudan soils.* Plant and Soil, 1972. **36**: p. 239-242.
11. Grynpas, R.S.O., D. Rosen, and L.E. Sutton, *The adsorption of urea on clays.* International Journal of Pharmaceutics, 1984. **22**: p. 357-362.
12. Shi, L., Y. Zhang, and B. He, *Novel composite adsobent for adsorption of urea.* Polym. Adv. Technol., 1999. **10**: p. 69-73.
13. Climent, V., et al., *Urea adsorption at rhodium single-crystal electrodes.* Langmuir, 2000. **16**: p. 10376-10384.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

14. Liang, Z.P., et al., *Adsorption of urea nitrogen onto chitosan coated dialdehyde cellulose under biocatalysis of immobilized urease: Equilibrium and kinetic.* Biochemical Engineering Journal, 2005. **24**: p. 65–72.
15. Wernert, V., et al., *Adsorption properties of zeolites for artificial kidney applications.* Microporous and Mesoporous Materials, 2005. **83**: p. 101–113.
16. Kim, J.H., et al., *Development of a cold dialysate regeneration system for home hemodialysis.* Blood Purif, 2009. **28**: p. 84–92.
17. Pillai, M.G., P. Simha, and A. Gugalia, *Recovering urea from human urine by bio-sorption onto microwave activated carbonized coconut shells: Equilibrium, kinetics, optimization and field studies.* Journal of Environmental Chemical Engineering, 2014. **2**: p. 46–55.
18. F.Rwquerol, l. Rouquerol, and K. Sing, *Adsorption by powders and porous solids*. 1999: Academic Press.
19. Lowell, S. and J.E. Shields, *Powder Surface Area and Porosity*, ed. r. Ed. 1991, New York: Chapman & Hall.
20. Alley, E.R., *Water quality control handbook*. 2000, New York: Magraw-Hill.
21. Moreno-Castilla, C., *Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials.* Carbon, 2004. **42**: p. 83–94.
22. Ho, Y.S., *Selection of optimum sorption isotherm.* Carbon, 2113–2130. **42**: p. 2004.
23. Foo, K.Y. and B.H. Hameed, *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems.* Chemical Engineering Journal, 2010. **156**: p. 2–10.
24. Langmuir, I., *The constitution and fundamental properties of solids and liquids.* J. Am. Chem. Soc. , 1916. **38**: p. 2221-2295.
25. Freundlich, H.M.F., *Uber die adsorption in losungen.* Z. Phys. Chem. , 1906. **57**: p. 385-470.
26. Lagergren, S., *About the Theory of So- Called Adsorption of Soluble Substances.* Handlingar, Band, 1898. **24**(4): p. 1-39.
27. Ho, Y.S. and G. McKay, *Pseudo-second order model for sorption processes.* Process Biochemistry, 1999. **34**: p. 451–465.

Chulalongkorn University

28. Xin, H., G. Nai-yun, and Z. Qiao-li, *Thermodynamics and kinetics of cadmium adsorption onto oxidized granular activated carbon.* Journal of Environmental Sciences 2007. **19**: p. 1287-1292.

29. Hameed, B.H., I.A.W. Tan, and A.L. Ahmad, *Adsorption isotherm, kinetic modeling and mechanism of 2,4,6-trichlorophenol on coconut husk-based activated carbon.* Chemical Engineering Journal 2008. **144**: p. 235-244.

30. Hameed, B.H., J.M. Salman, and A.L. Ahmad, *Adsorption isotherm and kinetic modeling of 2,4-D pesticide on activated carbon derived fromdate stones.* Journal of Hazardous Materials 2009. **163**: p. 121-126.

31. Sreejalekshmi, K.G., K.A. Krishnan, and T.S. Anirudhan, *Adsorption of Pb(II) and Pb(II)-citric acid on sawdust activated carbon Kinetic and equilibrium isotherm studies.* Journal of Hazardous Materials 2009. **161**: p. 1506-1513.

32. Palanisamy, P.N. and P. Sivakumar, *Kinetic and isotherm studies of the adsorption of Acid Blue 92 using a low-cost non-conventional activated carbon.* Desalination 2009. **249** p. 388-397.

33. Kumar, P.S. and K. Kirthika, *Equilibrium and kinetic study of adsorption of nickel from aqueous solution onto bael tree leaf powder.* Journal of Engineering Science and Technology, 2009. **4**(4): p. 351 - 363.

34. Doke, K.M. and E.M. Khan, *Equilibrium, kinetic and diffusion mechanism of Cr(VI) adsorption onto activated carbon derived from wood apple shell.* Arabian Journal of Chemistry 2012(xxx): p. xxx-xxx.

35. Xin-hui, D., et al., *Regeneration of microwave assisted spent activated carbon Process optimization, adsorption isotherms and kinetics.* Chemical Engineering and Processing 2012. **53**: p. 53- 62.

36. Luna, M.D.G., et al., *Adsorption of Eriochrome Black T (EBT) dye using activated carbon prepared fromwaste rice hulls-Optimization, isotherm and kinetic studies.* Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 2013. **44**: p. 646-653.

37. El-Bindary, A.A., et al., *Adsorption of Acid Yellow 99 by polyacrylonitrile/activated carbon composite: Kinetics, thermodynamics and isothermstudies.* Journal of Molecular Liquids, 2014. **197**: p. 236–242.

38. Huang, Y., et al., *Adsorption of Pb(II) on mesoporous activated carbons fabricated from water hyacinth using H3PO4 activation: Adsorption capacity, kinetic and isotherm studies.* Applied Surface Science, 2014. **293**: p. 160– 168.
39. Arrua, R.D., M.C. Strumia, and C.I.A. Igarzabal, *Macroporous Monolithic Polymers: Preparation and Applications.* Materials, 2009. **2**: p. 2429-2466.
40. Manocha, S.M., *Porous carbons.* Sadhan, 2003. **28**: p. 335–348.
41. Williams, J.L., *Monolith structures, materials, properties and uses.* Catalysis Today, 2001. **69**: p. 3–9.
42. Tripp, J.A., et al., *High-pressure electroosmotic pumps based on porous polymer monoliths.* Sensors and Actuators 2004. **99**: p. 66–73.
43. Eichhorn, T., et al., *Macroporous composite cryogels with embedded polystyrene divinylbenzene microparticles for the adsorption of toxicmetabolites from blood.* Journal of Chemistry, 2013: p. 1-8.
44. Svec, F., *Porous polymer monoliths: Amazingly wide variety of techniques enabling their preparation.* Journal of Chromatography A,, 2010. **1217**: p. 902–924.
45. Pekala, R.W., *Organic aerogels from the polycondensation of resorcinol with formaldehyde.* Journal of materials 1989. **24**: p. 3221-3227.
46. Morales-Torres, S., et al., *Structural characterization of carbon xerogels: From film to monolith.* Microporous and Mesoporous Materials, 2012. **153**: p. 24-29.
47. Al-Muhtaseb, S.A. and J.A. Ritter, *Preparation and properties of Resorcinal-Formaldehyde organic and carbon gels.* Adv. Mater., 2003. **15**(2).
48. Yamamoto, T., et al., *Dynamic and static light scattering study on the sol-gel transition of a resorcinol-formaldehyde aqueous solution.* Journal of Colloid and Interface Science, 2002. **245**: p. 391-396.
49. Yamamoto, T., et al., *Interpretation of structure formation during the so-gel transition of a resorcinol-formaldehyde solution by population balance.* Journal of Colloid and Interface Science, 2003. **264**: p. 532-537.
50. Siyasukh, A., *Preparation of hierarchical porous carbon monolith without using templates*, in *Chemical Engineering*. 2008, Chulalongkorn University.

51. Job, N., et al., *Synthesis of transition metal-doped carbon xerogels by solubilization of metal salts in resorcinol–formaldehyde aqueous solution.* Carbon 2004. **42** p. 3217-3227.

52. Fuertes, A.B., G. Marban, and D.M. Nevskaia, *Adsorption of volatile organic compounds by means of activated carbon fibre-based monoliths.* Carbon, 2003. **41**: p. 87–96.

53. Solis, T.V., et al., *Adsorption and breakthrough performance of carbon-coated ceramic monoliths at low concentration of n-butane.* Chemical Engineering Science, 2004. **59**: p. 2791–2800.

54. Hodar, F.J.M., et al., *Reversible toluene adsorption on monolithic carbon aerogels.* Journal of Hazardous Materials, 2007. **148**: p. 548–552.

55. Wu, X., D. Wu, and R. Fu, *Studies on the adsorption of reactive brilliant red X-3B dye on organic and carbon aerogels.* Journal of Hazardous Materials, 2007. **147**: p. 1028–1036.

56. Beneyto, M.J., et al., *Advanced activated carbon monoliths and activated carbons for hydrogen storage.* Microporous and Mesoporous Materials, 2008. **112**: p. 235–242.

57. Liu, H., et al., *Adsorption kinetics of an organic dye by wet hybrid gel monoliths.* J Sol-Gel Sci Technol, 2008. **45**: p. 279-290.

58. Marin, F.C., D.F. Jimenez, and C.M. Castilla, *Carbon aerogels from gallic acid–resorcinol mixtures as adsorbents of benzene, toluene and xylenes from dry and wet air under dynamic conditions.* Carbon, 2009. **47**: p. 463–469.

59. Delgadillo, D.P.V., L. Giraldo, and J.C.M. Pirajan, *Preparation and characterization of activated carbon monoliths with potential application as phenol adsorbents.* E-Journal of Chemistry, 2010. **7**(2): p. 531-539.

60. Banciu, C., et al., *Carbon monoliths for CO2 adsorption.* Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications, 2011. **5**(12): p. 1341 - 1345.

61. Giraldo, L. and J.C.M. Piraján, *Novel activated carbon monoliths for methane adsorption obtained from coffee husks.* Materials Sciences and Applications, 2011. **2**: p. 331-339.

62. Luangon, B., et al., *Flow-through immobilization of Candida rugosa lipase on hierarchical micro-/macroporous carbon monolith.* Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 2012. **75**: p. 80- 85.

63. Muhammad, et al., *β-carotene adsorption onto mesoporous carbon-coated monolith column: Dynamic studies.* Chem. Eng. Comm., 2013. **200**: p. 1322–1333.

64. Nandi, M., et al., *Adsorption Over Polyacrylonitrile Based Carbon Monoliths.* AIP Conf. Proc., 2013. **1512**: p. 298.

65. Siyasukh, A., et al., *Preparation of a carbon monolith with hierarchical porous structure by ultrasonic irradiation followed by carbonization, physical and chemical activation.* Carbon, 2008. **46**: p. 1309–1315.

66. Arrua, R.D., M.C. Strumia, and C.I.A. Igarzabal, *Macroporous monolithic polymers: Preparation and applications.* Materials 2009. **2**: p. 2429-2466.

67. Lei, S., et al., *Enhancement of the methylene blue adsorption rate for ultramicroporous carbon fiber by addition of mesopores.* Carbon, 2006. **44**: p. 1884–1890.

68. Hsieh, C. and H. Teng, *Influence of mesopore volume and adsorbate size on adsorption capacities of activated carbons in aqueous solutions.* Carbon, 2000. **38**: p. 863–869.

69. Pendleton, P., S.H. Wu, and A. Badalyan, *Activated carbon oxygen content influence on water and surfactant adsorption.* Journal of Colloid and Interface Science, 2002. **246**: p. 235–240.

70. Franz, M., H.A. Arafat, and N.G. Pinto, *Effect of chemical surface heterogeneity on the adsorption mechanism of dissolved aromatics on activated carbon.* Carbon, 2000. **38**: p. 1807–1819.

71. Oladoja, N.A., C.O. Aboluwoye, and Y.B. Oladimeji, *Kinetics and isotherm studies on methylene blue adsorption onto ground palm kernel coat.* Turkish J. Eng. Env. Sci., 2008. **32**: p. 303 – 312.

72. Ho, Y.S. and G. McKay, *Sorption of dye from aqueous solution by peat.* Chemical Engineering Journal, 1998. **70**: p. 11.5-124.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ข้อมูลวิเคราะห์สมดุลและไอโซเทอม

ตารางที่ ก.1 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน

W (g)	C_0	$C_{e,avg}$	q_e	%UA	Langmuir		Freundlich		SD
					$1/q_e$	$1/C_e$	$Log(q_e)$	$Log(C_e)$	
1.0001	48.67	44.68	0.80	8.19	1.2544	0.0223	-0.0985	1.6501	0.00
1.0005	96.67	89.36	1.46	7.55	0.6845	0.0112	0.1646	1.9512	0.71
1.0002	196.00	185.11	2.18	5.56	0.4590	0.0054	0.3382	2.2674	1.42
1.0001	396.00	385.82	2.04	2.57	0.4909	0.0026	0.3090	2.5864	1.24
1.0000	596.67	585.11	2.31	1.93	0.4325	0.0017	0.3640	2.7672	0.00
1.0001	793.33	780.14	2.64	1.66	0.3790	0.0013	0.4213	2.8922	4.73
1.0003	993.33	978.72	2.92	1.47	0.3422	0.0010	0.4657	2.9907	1.4

ตารางที่ ก.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ

W (g)	C_0	$C_{e,avg}$	q_e	%UA	Langmuir		Freundlich		SD
					$1/q_e$	$1/C_e$	$Log(q_e)$	$Log(C_e)$	
1.0002	48.67	41.84	1.36	14.02	0.7328	0.0239	0.13450	1.6216	0.95
1.0002	96.67	82.98	2.74	14.16	0.3652	0.0120	0.4374	1.9190	0.00
1.0003	196.00	169.50	5.30	13.52	0.1887	0.0059	0.7242	2.2292	0.95
1.0001	396.00	350.35	9.13	11.53	0.1095	0.0029	0.9604	2.5445	1.891
1.0000	596.67	531.91	12.95	10.85	0.0772	0.0019	1.1123	2.7258	14.18
1.0004	793.33	695.04	19.66	12.39	0.0509	0.0014	1.2936	2.8420	18.91
1.0003	993.33	890.07	20.65	10.40	0.0484	0.0011	1.3150	2.9494	9.47

ตารางที่ ก.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี

W (g)	C_0	$C_{e,avg}$	q_e	%UA	Langmuir		Freundlich		SD
					$1/q_e$	$1/C_e$	$Log(q_e)$	$Log(C_e)$	
1.0033	48.67	38.08	2.11	21.75	0.4738	0.0263	0.3244	1.5807	5.52
1.0030	96.67	73.84	4.55	23.61	0.2197	0.0135	0.6582	1.8683	1.10
1.0020	196.00	155.63	8.06	20.60	0.1241	0.0064	0.9062	2.1921	2.21
1.0046	396.00	313.91	16.34	20.73	0.0612	0.0032	1.2133	2.4968	5.30
1.0010	596.67	476.82	23.95	20.09	0.0418	0.0021	1.3792	2.6784	13.25
1.0082	793.33	655.63	27.32	17.36	0.0366	0.0015	1.4364	2.8167	6.62
1.0087	993.33	801.32	38.07	19.33	0.0263	0.0012	1.5806	2.9038	8.83

ตารางที่ ก.4 สมดุลการดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่อัตราส่วนตัวดูดซับกับปริมาตรสารละลายต่างๆ

W (g)	V(ml)	ratio	$C_{0,avg}$	$C_{e,avg}$	%UA	q_e	SD
1.0001	20	0.05	96.67	71.59	25.96	5.01	1..23
1.0001	50	0.02	96.67	80.39	16.84	8.11	0.94
1.0003	100	0.01	96.67	88.24	8.72	8.43	2..51

ข้อมูลวิเคราะห์จลนศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทดลองทางจลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท N-C ที่คาร์บอไนเซชัน ที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที

W	t	$C_{t,avg}$	q_t	%UA	q_e	$\log(q_e)$	$\log(q_e-q_t)$	t/q_t	SD
1.0241	0	100.00	0.00	0.00	1.59	0.2009	0.2009	0.0000	1.87
	5	98.48	0.30	1.52	1.59	0.2009	0.1086	16.4483	1.00
	10	98.14	0.37	1.83	1.59	0.2009	0.0868	27.2571	0.79
	20	97.90	0.42	2.10	1.59	0.2009	0.0677	47.7000	0.63
	40	97.85	0.43	2.15	1.59	0.2009	0.0638	93.0732	1.10
	60	96.49	0.70	3.51	1.59	0.2009	-0.0527	85.4328	0.26
	90	96.75	0.65	3.25	1.59	0.2009	-0.0277	138.484	0.31
	120	95.86	0.83	4.14	1.59	0.2009	-0.1192	144.9114	0.16
	150	94.29	1.14	5.71	1.59	0.2009	-0.3512	131.2844	0.91
	180	94.13	1.17	5.87	1.59	0.2009	-0.3823	153.3214	0.52
	210	93.61	1.28	6.39	1.59	0.2009	-0.5097	164.2131	0.21
	240	93.45	1.31	6.55	1.59	0.2009	-0.5563	183.1680	0.37
	270	91.93	1.61	8.07	1.59	0.2009	N/A	167.2597	1.10
	300	91.77	1.65	8.23	1.59	0.2009	N/A	182.2930	0.26
	360	91.93	1.61	8.07	1.59	0.2009	N/A	223.0130	0.42
	420	92.35	1.53	7.65	1.59	0.2009	-1.2392	274.4384	0.52
	480	92.19	1.56	7.81	1.59	0.2009	-1.5816	307.3289	0.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการทดลองทางจลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท C-C ที่กระตุ้นทางกายภาพ ที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที

W	t	$C_{t,avg}$	q_t	%UA	q_e	$\log(q_e)$	$\log(q_e-q_t)$	t/q_t	SD
0.9951	0	99.90	0.00	0.00	2.69	0.4304	0.4304	0.0000	0.79
	5	97.78	0.43	2.13	2.69	0.4304	0.3554	11.7086	0.64
	10	95.90	0.80	4.01	2.69	0.4304	0.2763	12.4314	0.25
	20	95.41	0.90	4.50	2.69	0.4304	0.2529	22.1306	0.35
	40	92.89	1.41	7.02	2.69	0.4304	0.1084	28.3645	0.30
	60	92.05	1.58	7.86	2.69	0.4304	0.0472	37.9977	0.25
	90	89.33	2.13	10.58	2.69	0.4304	-0.2452	42.3479	0.30
	120	89.67	2.06	10.24	2.69	0.4304	-0.1951	58.3733	0.15
	150	88.64	2.26	11.28	2.69	0.4304	-0.3670	66.2461	0.82
	180	87.46	2.50	12.46	2.69	0.4304	-0.7186	71.9243	0.50
	210	87.94	2.40	11.975	2.69	0.4304	-0.5369	87.3791	0.20
	240	87.60	2.47	12.31	2.69	0.4304	-0.657	97.0545	0.74
	270	87.35	2.52	12.56	2.69	0.4304	-0.7662	107.0369	0.30
	300	86.71	2.65	13.20	2.69	0.4304	-1.3746	113.1393	0.25
	360	85.47	2.90	14.44	2.69	0.4304	N/A	124.1433	0.20
	420	86.07	2.78	13.85	2.69	0.4304	N/A	151.0410	0.40
	480	87.75	2.44	12.17	2.69	0.4304	-0.6007	196.4761	0.20

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการทดลองทางจลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่อัตราไหล 5 มิลลิลิตร/นาที

W	t	$C_{t,avg}$	q_t	%UA	q_e	$\log(q_e)$	$\log(q_e-q_t)$	t/q_t	SD
0.9953	0	99.70	0.00	0.00	4.84	0.6850	0.6850	0.0000	0.59
	5	97.23	0.50	2.48	4.84	0.6850	0.6380	10.0694	0.10
	10	96.20	0.71	3.52	4.84	0.6850	0.6166	14.1823	0.64
	20	92.69	1.41	7.04	4.84	0.6850	0.5354	14.1823	0.10
	40	86.02	2.75	13.73	4.84	0.6850	0.3202	14.5407	0.84
	60	84.49	3.06	15.27	4.84	0.6850	0.2511	19.6157	0.40
	90	82.31	3.50	17.44	4.84	0.6850	0.1289	25.7456	0.30
	120	79.64	4.03	20.12	4.84	0.6850	-0.0919	29.7618	0.30
	150	79.59	4.04	20.17	4.84	0.6850	-0.0972	37.1108	1.08
	180	77.87	4.39	21.90	4.84	0.6850	-0.3450	41.0066	0.20
	210	77.52	4.46	22.25	4.84	0.6850	-0.4175	47.0952	0.25
	240	76.73	4.62	23.04	4.84	0.6850	-0.6508	51.9711	0.44
	270	76.93	4.58	22.84	4.84	0.6850	-0.5798	58.9748	0.84
	300	76.28	4.71	23.49	4.84	0.6850	-0.8727	63.7303	0.10
	360	75.20	4.93	24.58	4.84	0.6850	N/A	73.0844	0.40
	420	75.40	4.89	24.38	4.84	0.6850	N/A	85.9583	0.30
	480	75.60	4.85	24.18	4.84	0.6850	N/A	99.0433	0.20

ตารางที่ ก.8 จลนศาสตร์การดูดซับของคาร์บอนโมโนลิท Ca-C ที่กระตุ้นทางเคมี ที่อัตราไหลต่างๆ

t (min)	Flow rate 5 ml/min W = 0.9953 g			Flow rate 10 ml/min W = 1.0052 g			Flow rate 15 ml/min W = 1.0125 g		
	$C_{t,avg}$	q_t	SD	$C_{t,avg}$	q_t	SD	$C_{t,avg}$	q_t	SD
0	99.70	0.00	0.59	101.65	0.000	1.23	99.29	0.00	0.10
5	97.23	0.50	0.10	100.00	0.33	0.72	98.93	0.07	0.66
10	96.20	0.71	0.64	98.92	0.54	0.05	95.26	0.79	1.17
20	92.70	1.41	0.10	93.16	1.69	0.36	91.85	1.47	0.61
40	86.02	2.75	0.83	89.00	2.52	2.37	85.59	2.71	0.76
60	84.49	3.06	0.40	85.08	3.30	0.62	80.04	3.80	0.31
90	82.31	3.50	0.30	81.89	3.93	0.21	76.78	4.45	0.31
120	79.64	4.03	0.30	80.14	4.28	1.852	76.32	4.54	1.27
150	79.59	4.04	1.08	79.17	4.47	0.67	75.31	4.74	0.45
180	77.87	4.39	0.20	78.50	4.61	0.31	75.66	4.67	0.61
210	77.526	4.46	0.25	77.73	4.76	0.05	75.87	4.63	1.02
240	76.73	4.62	0.44	78.09	4.69	0.72	75.46	4.71	0.10
270	76.93	4.58	0.84	77.37	4.83	2.37	75.81	4.64	0.76
300	76.28	4.71	0.10	77.31	4.84	0.46	74.90	4.82	0.05
360	75.20	4.93	0.40	77.16	4.87	0.72	75.10	4.78	0.36
420	75.40	4.89	0.30	77.21	4.86	0.77	75.36	4.73	0.10
480	75.60	4.85	0.20	78.40	4.63	1.13	75.00	4.80	0.05

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพล นิลประดับแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University