

การดูดซับสารไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนโดยไบโอชาร์ที่ได้จากเศษแผ่นเยื่อไม้อัดแข็งในระบบการดูดซับแบบ
ตรึงในคอลัมน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

ADSORPTION OF CIPROFLOXACIN BY BIOCHAR FROM HARDBOARD WASTE IN FIXED
BED COLUMN



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

Department of Chemical Engineering

Faculty Of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2023

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การดูดซับสารไซโปรฟลอกซาซินโดยไบโอชาร์ที่ได้จากเศษ |
| | แผ่นเยื่อไม้อัดแข็งในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ |
| โดย | นายศุภณัฐ ตันทวนิชย์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

| | |
|--|---------------------------------|
| | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล) | |
| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | |
| | ประธานกรรมการ |
| (ศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพิทักษ์) | |
| | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์) | |
| | กรรมการ |
| (ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร) | |
| | กรรมการ |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล) | |
| | กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย |
| (ดร.ชัยชญา ธนชยานนท์) | |

ศุภณัฐ ดันทวนิชย์ : การดูดซับสารไซโปรฟลอกซาซินโดยไบโอชาร์ที่ได้จากเศษแผ่นเยื่อไม้อัดแข็งในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์. (ADSORPTION OF CIPROFLOXACIN BY BIOCHAR FROM HARDBOARD WASTE IN FIXED BED COLUMN) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ณัฐพร โทณานนท์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากำหนดนำแผ่นเยื่อไม้อัดแข็งที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์ไบโอชาร์ เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดยาปฏิชีวนะไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยวัสดุดูดซับที่ใช้ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ เป็นตัวกระตุ้นนั้นจะถูกทดสอบด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การดูดซับและการคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ซึ่งการมีอยู่ของสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ นั้นส่งเสริมให้เกิดรูพรุนขนาดมีโซ โดยแผ่นเยื่อไม้อัดแข็งที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนไนเซชันภายใต้ N_2 ที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) มีปริมาตรรูพรุนมีโซเท่ากับ 0.34 cm^3/g และพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 530 m^2/g โดยจากนั้นไบโอชาร์จะถูกนำไปใช้ในการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินด้วยกระบวนการดูดซับแบบกะและกระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยเมื่อทำการศึกษาแบบจำลองการดูดซับพบว่ามีคุณสมบัติคล้ายกับแบบจำลองของ Langmuir และยังสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์แบบ PSO และในการศึกษากระบวนการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินแบบตรึงในคอลัมน์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_{TH}) เท่ากับ 59.20 mg/g ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 80 mg/L อัตราการไหล 10 mL/min และความสูงของคอลัมน์ 15 cm และเมื่อทำการศึกษาแบบจำลองการดูดซับในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ พบว่ามีคุณสมบัติคล้ายกับแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370283221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Fixed-bed column, Hardboard waste, Adsorption ciprofloxacin

Suppanat Tantavanich : ADSORPTION OF CIPROFLOXACIN BY BIOCHAR FROM HARDBOARD WASTE IN FIXED BED COLUMN. Advisor: Asst. Prof. NATTAPORN TONANON, D.Eng.

The utilization of hardboard as a precursor for the synthesis of biochar to remove ciprofloxacin in fixed-bed adsorption columns was investigated in this research. The adsorbents were characterized by nitrogen adsorption-desorption at 77 K, scanning electron microscope and thermogravimetric analysis. The presence of $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ served as a mesoporous activating agent. Biochar materials were prepared by impregnation of 0.10 M $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ onto hardboard and followed by carbonization under nitrogen atmosphere at 800°C (HC-BI-800), resulting in a biochar with mesopore volume and specific surface area of 0.34 cm^3/g and 530 m^2/g respectively. Biochar was used for ciprofloxacin adsorption in both batch and fixed-bed column processes. Adsorption equilibrium data correlated with Langmuir and the Pseudo second-order (PSO) kinetics model. In fixed-bed column adsorption, the maximum adsorption capacity (q_{TH}) of 59.20 mg/g was achieved at an initial concentration of 80 mg/L, flow rate of 10 mL/min, and bed height of 15 cm. The adsorption modeling in the fixed-bed column correlated with the Thomas and Yoon-Nelson models.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2023

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ในหัวเรื่อง การดูดซับสารไซโปรฟลอกซาซินโดยไบโอชาร์ที่ได้จากแผ่นเยื่อไม้อัดแข็งในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. ณ์ัฐพร โทณานนท์ ผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ PTEM LAB, ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วง อีกทั้งยังขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. อติศักดิ์ ไสยสุข และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร. โยธิน ฉิมอุปละ ผู้ควบคุมห้องปฏิบัติการ PTEM ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการทุนสนับสนุนการตีพิมพ์ผลงานวิชาการ จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนวิจัยนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณศาสตราจารย์. ดร. อาทิวรรณ โชติพิฤกษ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานในการคุมสอบวิทยานิพนธ์รวมถึงศาสตราจารย์. ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ,รองศาสตราจารย์. ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และดร. ชัญชนา ธนชยานนท์ คณะกรรมการในการคุมสอบวิทยานิพนธ์ที่มีส่วนให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ศุภณัฐ ตันทวนิชย์

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| | ค |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1..... | 13 |
| บทนำ..... | 13 |
| 1.1 แรงจูงใจ เหตุผล และที่มา..... | 13 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 14 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... | 14 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 15 |
| 1.5 ตารางการดำเนินแผนงาน..... | 16 |
| บทที่ 2..... | 17 |
| ทฤษฎีและเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 17 |
| 2.1 แผ่นเยื่อไม้อัดแข็ง (Hardboard)..... | 17 |
| 2.2 ชีวมวล (Biomass)..... | 17 |
| 2.2 ไบโอชาร์ (Biochar)..... | 18 |
| 2.3 กระบวนการคาร์บอไนเซชัน (Carbonization process)..... | 19 |

| | |
|---|----|
| 2.4 ไซโพรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin) | 19 |
| 2.4 แบบจำลองไอโซเทอมที่สภาวะสมดุล (Equilibrium isotherm models)..... | 20 |
| 2.5 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์การดูดซับ | 21 |
| 2.5 การดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ (Fixed-bed column)..... | 22 |
| 2.6 แบบจำลองการดูดซับสำหรับระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ | 25 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไซโพรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ .. | 27 |
| บทที่ 3 | 30 |
| การทดลอง..... | 30 |
| 3.1 วัสดุ | 30 |
| 3.1.1 แผ่นเยื่อไม้อัดแข็ง (Hardboard)..... | 30 |
| 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 30 |
| 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ | 31 |
| 3.2 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ด | 31 |
| 3.2.1 การเตรียมฮาร์ดบอร์ด..... | 31 |
| 3.2.2 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับไบโอชาร์..... | 32 |
| 3.2.3 การทดสอบคุณลักษณะของไบโอชาร์..... | 32 |
| 3.3 ศึกษาการดูดซับสารไซโพรฟลอกซาซิน | 33 |
| 3.3.1 ศึกษาการดูดซับไซโพรฟลอกซาซินจากการทดลองแบบกะ (Batch adsorption) | 33 |
| 3.3.2 ศึกษาการดูดซับไซโพรฟลอกซาซินในกระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ (Fixed-bed column)..... | 33 |
| บทที่ 4 | 36 |
| ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... | 36 |
| 4.1 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต | 36 |

| | |
|--|----|
| 4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติรูปพจน์ด้วยการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K | 36 |
| 4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับ | 39 |
| 4.1.3 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฮาร์ดบอร์ดและฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $Fe(NO_3)_3$ | 40 |
| 4.2 การศึกษาการดูดซับยาปฏิชีวนะไซโปรฟลอกซาซิน | 41 |
| 4.2.1 การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในกระบวนการดูดซับแบบกะ | 41 |
| 4.2.1.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับไซโปรฟลอกซาซิน | 41 |
| 4.2.1.2 การศึกษาสมมูลการดูดซับและจลน์พลศาสตร์การดูดซับ | 42 |
| 4.2.2 การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ | 46 |
| 4.2.2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น | 48 |
| 4.2.2.2 ผลของความสูงคอลัมน์ | 48 |
| 4.2.2.3 ผลของอัตราการไหล | 49 |
| 4.2.3 แบบจำลองการดูดซับสำหรับระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ | 49 |
| 4.2.3.1 แบบจำลองของ Thomas | 51 |
| 4.2.3.2 แบบจำลองของ Yoon-Nelson | 53 |
| 4.2.3.3 แบบจำลองของ Adams-Bohart | 55 |
| บทที่ 5 | 59 |
| สรุปผลการทดลอง | 59 |
| 5.1 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับ | 59 |
| 5.2 การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในกระบวนการดูดซับแบบกะ | 59 |
| 5.3 การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ | 59 |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ | 60 |
| ภาคผนวก | 61 |

บรรณานุกรม..... 64

ประวัติผู้เขียน..... 72



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 แสดงแผนการดำเนินงาน | 16 |
| ตารางที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ | 29 |
| ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย | 30 |
| ตารางที่ 4 สภาวะการเตรียมวัสดุดูดซับ | 36 |
| ตารางที่ 5 ชนิดของไอโซเทอม พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครและมิโซจากการดูดซับ- คายการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ 77 K ของวัสดุดูดซับ..... | 38 |
| ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของฮาร์ดบอร์ดและไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ด | 40 |
| ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freudlich ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น | 43 |
| ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ Pseudo-first-order และ Pseudo-second-order ด้วย วิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น..... | 45 |
| ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากกราฟเบรคทรูสำหรับการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของ ไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $Fe(NO_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเฮกซ์เซนที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความ เข้มข้นเริ่มต้น , ความสูงคอลัมน์ และอัตราการไหลที่แตกต่างกัน | 47 |
| ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Thomas, Yoon-Nelson และ Adams- Bohart..... | 50 |
| ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงใน คอลัมน์บนวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ | 58 |
| ตารางที่ 12 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไซโปรฟลอกซาซินมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 274 nm | 62 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1 โครงสร้างเซลลูโลส | 18 |
| รูปที่ 2 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส | 18 |
| รูปที่ 3 โครงสร้างลิกนิน | 18 |
| รูปที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลไซโปรฟลอกซาซิน | 19 |
| รูปที่ 5 กราฟเบรคทรู | 23 |
| รูปที่ 6 แสดงแผนผังการเตรียมฮาร์ดบอร์ด | 31 |
| รูปที่ 7 แสดงแผนผังการเตรียมไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ด | 32 |
| รูปที่ 8 การดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ | 35 |
| รูปที่ 9 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C (HC-BI-600), 700°C (HC-BI-700), 800°C (HC-BI-800), 900°C (HC-BI-900) และที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 900°C (HC-900) | 37 |
| รูปที่ 10 การกระจายตัวความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700°C (HC-BI-700), 800°C (HC-BI-800) และ 900°C (HC-BI-900) | 38 |
| รูปที่ 11 สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของฮาร์ดบอร์ด RAW (a-b) และของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800)(c-d) วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) | 39 |
| รูปที่ 12 TGA curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %weight loss กับอุณหภูมิและ DTG กับอุณหภูมิของฮาร์ดบอร์ด (RAW) และฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (HC-BI) | 40 |
| รูปที่ 13 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีผลต่อการกำจัดไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) | 41 |

รูปที่ 14 ผลไอโซเทอมการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ช่วงความเข้มข้น 5-300 mg/L (a) และ 1-10 mg/L (b) 43

รูปที่ 15 ผลจลนพลศาสตร์การดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้น 70 mg/L (a) และ 7 mg/L (b)..... 44

รูปที่ 16 กราฟเบรททรูการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน 47

รูปที่ 17 กราฟเบรททรูจากการคาดการณ์โดยใช้แบบจำลองของ Thomas ในการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน..... 53

รูปที่ 18 กราฟเบรททรูจากการคาดการณ์โดยใช้แบบจำลองของ Yoon-Nelson ในการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน .. 55

รูปที่ 19 กราฟเบรททรูจากการคาดการณ์โดยใช้แบบจำลองของ Adams-Bohart ในการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน .. 57

รูปที่ 20 กราฟมาตรฐานของสารละลายไซโปรฟลอกซาซินที่ความยาวคลื่น 274 nm 63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แรงจูงใจ เหตุผล และที่มา

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้มีความต้องการในการใช้ยาปฏิชีวนะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งในส่วนของครัวเรือนและปศุสัตว์ [1] โดยยาปฏิชีวนะไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin; CIP) เป็นยาที่อยู่ในกลุ่มฟลูออโรควิโนโลน (Fluoroquinolones) ซึ่งเป็นยาที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์และสัตวแพทย์ [2] โดยไซโปรฟลอกซาซินนั้นมีความเสถียรสูงและไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติ [3, 4] ดังนั้นเมื่อไซโปรฟลอกซาซินปนเปื้อนลงในระบบนิเวศแล้วไปสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่อาจทำให้เกิดการเป็นพิษเฉียบพลันและเรื้อรังตลอดจนทำให้เกิดการดื้อยาของเชื้อแบคทีเรีย โดยสาเหตุของการปนเปื้อนเกิดจากการจัดการยาเหลือใช้และยาที่หมดอายุด้วยวิธีการที่ไม่เหมาะสม เช่น การทิ้งลงถังขยะทั่วไป การทิ้งในป่า แหล่งน้ำ และการฝังกลบลงในดิน อีกทั้งยังเกิดจากสิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถเผาผลาญไซโปรฟลอกซาซินในร่างกายได้หมด ดังนั้นเมื่อรับประทานไซโปรฟลอกซาซินเข้าไปจะถูกเผาผลาญในร่างกายเพียง 25 % ซึ่งส่วนที่เหลือจะถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ [5, 6]

โดยอีกสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำก็คือระบบบำบัดน้ำในปัจจุบันไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดยาปฏิชีวนะเนื่องจากเทคโนโลยีในระบบบำบัดน้ำเสียไม่ได้ถูกออกแบบเพื่อการนี้ [7] จากการศึกษาน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากโรงพยาบาลในปี 2022 จำนวน 60 แห่งในประเทศไทย พบว่าน้ำเสียมีการปนเปื้อนของไซโปรฟลอกซาซิน โดยมีความเข้มข้นในช่วง 514-767 ng/L [8] ซึ่งมีความเข้มข้นเกินกว่าค่า PNEC-ENV (environmental predicted no-effect concentration) ที่ 640 ng/L โดยค่า PNEC-ENV นั้นจะบอกถึงความเข้มข้นสูงสุดที่ไซโปรฟลอกซาซินจะไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม [9] โดยจะเห็นได้ว่าระบบการบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลไม่สามารถกำจัดไซโปรฟลอกซาซินได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไซโปรฟลอกซาซินที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยในปัจจุบันมีหลากหลายวิธีในการกำจัดไซโปรฟลอกซาซินได้แก่ การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation), กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation) ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดไซโปรฟลอกซาซิน แต่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ต่ำ แต่มีข้อเสียคือจะเกิดกากตะกอนของเสียขึ้นในกระบวนการซึ่งต้องนำไปกำจัดในภายหลัง การใช้โอโซน (Ozonation) มักก่อให้เกิดสารพิษจากการย่อยสลายของยาปฏิชีวนะ และอีกวิธีหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการกำจัดไซโปรฟลอกซาซินนั้นคือ

กระบวนการดูดซับ (Adsorption) เนื่องจากเป็นวิธีที่ดำเนินการง่าย ราคาถูก และไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายหลังการดูดซับ [10]

แผ่นเยื่อไม้อัดแข็งหรือฮาร์ดบอร์ด (Hard board) นั้นเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากในปี 2018 ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกฮาร์ดบอร์ดเป็นอันดับ 2 ของทวีปเอเชีย โดยมีประมาณมากถึง 70,000 m³/year [11] ซึ่งทำให้เกิดของเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยในแต่ละปี ฮาร์ดบอร์ดที่เป็นของเสียทางอุตสาหกรรมนั้นถูกนำไปกำจัดโดยวิธีต่างๆ เช่น การฝังกลบ การเผา ฯลฯ เนื่องจากของเสียเหล่านี้ไม่มีมูลค่าทางด้านเศรษฐกิจและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาทำเป็นวัสดุดูดซับ อีกทั้งตัวของฮาร์ดบอร์ดนั้นเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose), และลิกนิน (Lignin) ที่เป็นแหล่งคาร์บอนที่สำคัญในการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซิน ความสูงของคอลัมน์ และอัตราการไหล โดยนำผลที่ได้ไปศึกษาตามแบบจำลองการดูดซับเพื่อทำนายเส้นโค้งการดูดซับ (Breakthrough curve) บนวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. สังเคราะห์และศึกษาคูณลักษณะของไบโอชาร์ที่ได้จากแผ่นเยื่อไม้อัดแข็งที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับยาปฏิชีวนะไซโปรฟลอกซาซินโดยไบโอชาร์ที่ได้จากแผ่นเยื่อไม้อัดแข็งเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ส่วนที่ 1: การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต
ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดจะถูกสังเคราะห์โดยนำสารละลายเหล็กไนเตรตที่ความเข้มข้น 0.1 M มาตรึงรูปบนฮาร์ดบอร์ดที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.125-0.250 mm โดยใช้อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 hr. จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 2 hr. โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนที่ 10°C/min และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 100 cm³/min โดยจะทำการศึกษาคู่แปรที่มีผลต่อคุณลักษณะของไบโอชาร์ดังนี้

- อุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันโดยจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 600°C – 900°C

ส่วนที่ 2: ศึกษาการดูดซับยาปฏิชีวนะไซโพรฟลอกซาซิน

ศึกษาการดูดซับไซโพรฟลอกซาซินจากการทดลองแบบกะ (batch adsorption) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- สมดุลการดูดซับ โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 1-200 mg/L โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C
- จลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยศึกษาการดูดซับอยู่ในช่วง 0-48 hr. ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1-100 mg/L

ศึกษาการดูดซับไซโพรฟลอกซาซินในกระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ (Fixed-bed column) โดยปัจจัยที่จะศึกษามีดังต่อไปนี้

- ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 20-80 mg/L
- ผลของความสูงของคอลัมน์ โดยศึกษาความสูงของคอลัมน์ในช่วง 5-15 cm
- ผลของอัตราการไหล โดยศึกษาอัตราการไหลในช่วง 5-15 cm³/min

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนยาปฏิชีวนะโดยใช้ไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากฮาร์ดบอร์ด ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดบอร์ดและยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดบอร์ด อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนยาปฏิชีวนะไซโพรฟลอกซาซินที่มีในปัจจุบัน

1.5 ตารางการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 แสดงแผนการดำเนินงาน

| แผนงานวิจัย | เดือนที่ | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|----------|---|----|----|---|---|---|----|---|----|----|----|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 1. ทบทวนเอกสารวิชาการ | ←→ | | | | | | | | | | | | |
| 2. สังเคราะห์ใบโอชาร์จากเศษฮาร์ดบอร์ด | | | ←→ | | | | | | | | | | |
| 3. ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น | | | | ←→ | | | | | | | | | |
| 4. ศึกษาผลของความสูงของคอลัมน์ | | | | | | | | ←→ | | | | | |
| 5. ศึกษาผลของอัตราการไหล | | | | | | | | | | ←→ | | | |
| 6. รวบรวมข้อมูลและเขียนวิทยานิพนธ์ | | | | | | | | | | | ←→ | | |

บทที่ 2

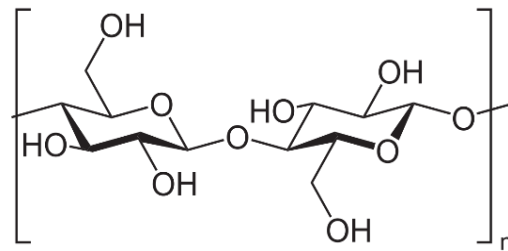
ทฤษฎีและเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผ่นเยื่อไม้อัดแข็ง (Hardboard)

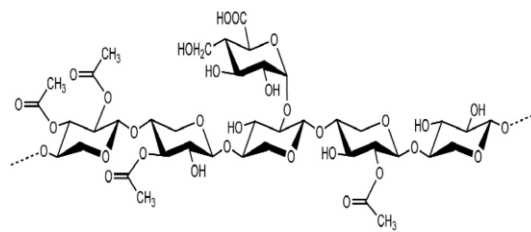
เป็นผลิตภัณฑ์จากไม้ โดยการนำเส้นใยไม้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยผ่านกระบวนการอัดด้วยแรงดัน โดยจะเทคนิคการขึ้นรูปอยู่ 3 วิธี ได้แก่ wet-wet ,wet-dry และ dry-dry ซึ่งในกระบวนการผลิตแบบ wet-wet คือการนำเยื่อไม้มาผสมกับน้ำจากนั้นนำไปขึ้นรูปบนเครื่องทำแผ่น โดยน้ำบางส่วนจะถูกบีบออกมาจากกระบวนการทำแผ่น แล้วจึงนำไปผ่านเครื่องรีดที่มีอุณหภูมิและแรงอัดสูง ทำให้ได้แผ่นไม้ที่มีความหนาแน่นสูง แต่เนื่องจากแผ่นเยื่อไม้ก่อนเข้าเครื่องรีดนั้นเปียกทำให้จึงต้องรีดกับตะแกรงเพื่อที่จะได้ระบายไอน้ำออกได้ จึงทำให้ด้านหนึ่งของผลิตภัณฑ์มีรอยตะแกรงเรียกว่า แผ่นเรียบด้านเดียว (smooth-one-side;S1S) ต่อมาเป็นการผลิตแบบ wet-dry โดยจะทำการขึ้นรูปแบบเปียก แต่จะทำให้แห้งก่อนที่จะนำไปรีดด้วยความร้อนโดยจะถูกรีดลงบนแผ่นโลหะเรียบ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแผ่นเรียบทั้ง 2 ด้าน (smooth-two-sides;S2S) และสุดท้ายเป็นกระบวนการผลิตแบบ dry-dry นั้นเป็นกระบวนการที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นและรีดด้วยอุณหภูมิกับแรงอัดสูงแบบแห้ง โดยจะมีการเติม phenol-formaldehyde เพื่อช่วยในการยึดเกาะ [12]

2.2 ชีวมวล (Biomass)

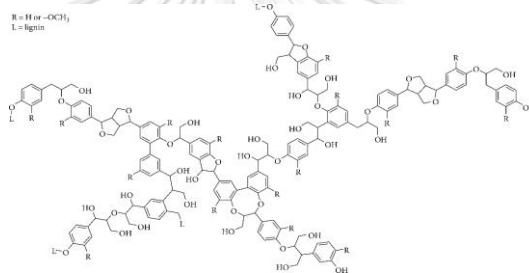
ชีวมวลเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มาจากพืช ซึ่งชีวมวลนั้นประกอบด้วยสารประกอบโพลีเมอร์ชีวภาพหลักๆสามชนิดได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยทั้ง 3 ชนิดนี้มีองค์ประกอบของ คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบในโครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลส แต่มีการจัดเรียงโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยเซลลูโลสนั้นเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพสายตรงซึ่งเป็นเส้นใยหลักที่ทำหน้าที่สร้างผนังเซลล์ของเซลล์พืช เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพแบบกิ่งทำหน้าที่ให้ผนังเซลล์ตรงขึ้นโดยการจับกับเซลลูโลส และลิกนินทำหน้าที่เหมือนกาวระหว่างเส้นใยทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงในรูปที่ 1-3 ตามลำดับ



รูปที่ 1 โครงสร้างเซลลูโลส



รูปที่ 2 โครงสร้างเอมิเซลลูโลส



รูปที่ 3 โครงสร้างลิกนิน

2.2 ไบโอชาร์ (Biochar)

ไบโอชาร์เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน (Porous carbonaceous material) ซึ่งได้จากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่มีจำกัด โดยมีวัสดุชีวมวลหลากหลายชนิดถูกนำมาใช้เพื่อการผลิตไบโอชาร์ ได้แก่ ของเหลือทิ้งจากการเกษตร ของเสียจากอาหารและการทำสวน ของเสียจากการทำปศุสัตว์ เป็นต้น ซึ่งไบโอชาร์นั้นมีสมบัติที่โดดเด่น เช่น ราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีช่วงการใช้งานที่กว้างขวางในการเป็นวัสดุตั้งต้น (Feed stock) รวมทั้งมีเสถียรภาพทางกลและทางความร้อนที่ดี ซึ่งนิยมนำไปประยุกต์ใช้ด้านสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น ใช้บำบัดน้ำเสียและฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง มีรูพรุนสูง ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนดี และมีความสามารถในการเป็น pH บัฟเฟอร์ [13]

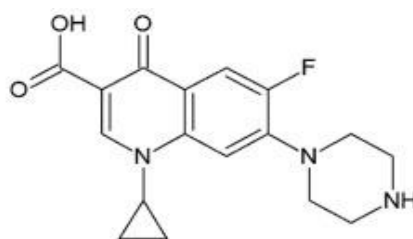
2.3 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization process)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชันคือการเปลี่ยนสารชีวมวลให้เป็นเป็นวัสดุคาร์บอนโดยกระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่าไพโรไลซิส โดยในระหว่างกระบวนการนั้นชีวมวลที่ได้รับความร้อนภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนจำกัดจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอินทรีย์ในเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ ก๊าซ น้ำมันดิน (ของเหลว) และถ่าน (ของแข็ง) [14]



2.4 ไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin)

ไซโปรฟลอกซาซินเป็นยาปฏิชีวนะรุ่นที่ 2 จัดอยู่ในกลุ่มยาฟลูออโรควิโนโลน โดยถูกพัฒนามาจาก กรดนาลิดิซิก (Nalidixic acid) ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะตัวแรกในกลุ่มควิโนโลน เนื่องจากยาปฏิชีวนะในรุ่นแรกนั้นก่อให้เกิดดื้อยาของเชื้อได้ง่าย จึงทำให้มีการดัดแปลงสูตรโครงสร้างของยาในรุ่นแรกโดยการเติม ฟลูออรีน 1 อะตอมและวงแหวนไพเพอราซีน (Piperazine) เข้าไปในโครงสร้างของกรดนาลิดิซิก โดยไซโปรฟลอกซาซินนั้นเป็นยาปฏิชีวนะที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการรักษาหรือป้องกันการติดเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและลบ ซึ่งโดยทั่วไปใช้รักษาการติดเชื้อในทางเดินปัสสาวะและอุจจาระร่วงในมนุษย์และสัตว์ โดยยาในกลุ่มนี้ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถสร้างดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและแบ่งตัว ทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จากสถิติในปี 2017 พบว่าทุกๆ 1000 คนของประชากรไทยจะมีคนใช้ยาปฏิชีวนะ 52.96 g ซึ่งมีการใช้ยาปฏิชีวนะในกลุ่มฟลูออโรควิโนโลน 4.18 g หรือคิดเป็น 7.9% ของยาปฏิชีวนะที่ใช้ [15]



รูปที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลไซโปรฟลอกซาซิน

2.4 แบบจำลองไอโซเทอมที่สภาวะสมดุล (Equilibrium isotherm models)

แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ที่ถูกอธิบายโดยสมการสองตัวแปรได้แก่ Langmuir และ Freundlich

2.4.1) แบบจำลองของ Langmuir (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุดโดยมีสมมติฐานคือ

- 1) ใช้สำหรับกลไกการดูดซับแบบโมนอลเยอร์ (monolayer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของตัวดูดซับที่แน่นอน
- 3) ในแต่ละตำแหน่งของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ซึ่งในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่โดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันพลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆพื้นที่ของตัวดูดซับ
- 4) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถย้ายข้ามพื้นผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ [16-18]

โดยสมการการดูดซับแบบ Langmuir เป็นไปดังสมการ (1)

$$q_e = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

Q_0 คือ ประสิทธิภาพการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของ Langmuir (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

2.4.2 แบบจำลองของ Freundlich (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดและเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยมีการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพ [19-21]

โดยสมการการดูดซับแบบ Freundlich เขียนได้ดังสมการ (2)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงของ Freundlich ซึ่งเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการดูดซับ $[(\text{mg/g})/(\text{mg/L})]^{1/n}$

n คือ heterogeneity factor

2.5 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์การดูดซับ

เป็นการศึกษาอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราเร็วในกระบวนการดูดซับยา ปฏิชีวนะบนวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ แบบจำลอง Pseudo-first order (PFO) และ Pseudo-second order (PSO)

แบบจำลอง Pseudo-first order เป็นแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งเกี่ยวกับการดูดซับบนพื้นผิวที่เป็นของแข็ง [22] โดยแบบจำลองนี้ถูกอธิบายดังสมการที่ (3)

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่ของสมการ PFO (min^{-1})

แบบจำลอง Pseudo-second order สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองเทียม (PSO rate constant; k_2) และยังสามารถหาอัตราเร็วของการดูดซับเริ่มต้น (initial rate constant; h_2) ของปฏิกิริยาได้ บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ [23] โดยอธิบายได้ดังสมการ (4-5)

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (4)$$

$$h_2 = k_2 q_e^2 \quad (5)$$

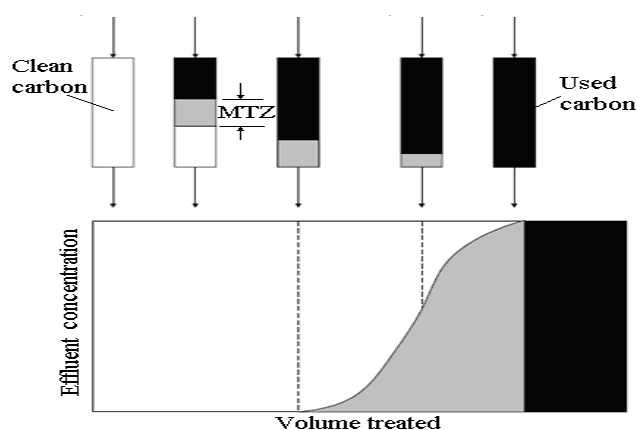
โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่ของสมการ PSO (g/mg·min)

h_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับเริ่มต้น (mg/g·min)

2.5 การดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ (Fixed-bed column)

ระบบดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกสารซึ่งสามารถแยกได้ทั้งแก๊สและของเหลว โดยบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์ในสภาพตรึงรูป (Fixed bed) แล้วป้อนของไหลผ่านตัวดูดซับที่ถูกตรึงรูปโดยเป็นของแข็งในคอลัมน์ในทิศทางไหลขึ้น (Up-flow) หรือไหลลง (Down-flow) อย่างต่อเนื่อง เมื่อของเหลวไหลผ่านคอลัมน์สารที่สามารถถูกดูดซับได้จะถูกดูดซับและเกาะติดกับตัวดูดซับ จนถึงระยะเวลาหนึ่งตรงบริเวณทางเข้าของคอลัมน์จะอิ่มตัวจนทำให้เกิดเป็นเขตที่มีการอิ่มตัวในการดูดซับเรียกว่าบริเวณอิ่มตัว (Saturated zone) ซึ่งจะเป็นชั้นที่ไม่มีการดูดซับเกิดขึ้นอีกแล้วในขณะที่บริเวณที่ต่อกับบริเวณที่มีการอิ่มตัวยังมีการดูดซับอยู่อย่างต่อเนื่องบริเวณของการดูดซับนี้เรียกว่าบริเวณการถ่ายเทมวล (Mass transfer zone, MTZ) และเมื่อตรวจพบความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออกจะเรียกสภาวะนี้ว่าจุดเบรกทรู (Breakthrough point) จากนั้นเมื่อติดตามความเข้มข้นเทียบกับเวลาจะได้โปรไฟล์ของความเข้มข้น (Concentration profile) ที่มี

ลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีลักษณะคล้ายตัว “S” ซึ่งเรียกว่ากราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) โดยสามารถนำกราฟเบรคทรูที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าต่างๆได้แก่ ความยาวของชั้นการดูดซับ (Length of mass transfer zone), ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e), ค่า Empty Bed Contact Time (EBCT) และค่าร้อยละการกำจัดไซโปรฟลอกซาซิน (%R) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบคอลัมน์ดูดซับขนาดใหญ่ต่อไปได้ [24, 25] โดยจะแสดงดังสมการ (6-9)



รูปที่ 5 กราฟเบรคทรู

$$L_{MTZ} = L_{ab} \left(1 - \frac{t_b}{t_e} \right) \quad (6)$$

โดย L_{MTZ} คือ ความยาวของชั้นการดูดซับ (cm)

L_{ab} คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นตัวดูดซับ (cm)

t_b คือ เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึงจุด Breakthrough (min)

t_e คือ เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดอิ่มตัวของตัวดูดซับ (min)

$$q_e = \frac{QC_0}{m} \int_0^{t_e} \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) dt \quad (7)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (mg)

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (mL/min)

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาใดๆ (mg/L)

t_e คือ เวลาของการดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (min)

$$EBCT = \frac{V}{Q} \quad (8)$$

โดย V คือ ปริมาตรของคอลัมน์ (mL)

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (mL/min)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\%R = 100 \left(\frac{q_e m}{C_0 Q t_e} \right) \quad (9)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (mg)

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (mL/min)

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

t_e คือ เวลาของการดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (min)

2.6 แบบจำลองการดูดซับสำหรับระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์

ระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์เป็นกระบวนการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำนายระยะเวลาที่สารที่ต้องการจะดูดซับเริ่มออกจากคอลัมน์หรือจุดเบรคทฤษฎีซึ่งสามารถใช้แบบจำลองอย่างง่ายมาใช้ในการทำนายจุดเบรคทฤษฎีของคอลัมน์ ได้แก่ แบบจำลองของ Thomas, แบบจำลองของ Yoon-Nelson และแบบจำลองของ Adams-Bohart

2.6.1 แบบจำลองของ Thomas

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางโดยแบบจำลองของ Thomas นั้นตั้งอยู่บนสมมติฐานของแบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสอง [26, 27] โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองของ Thomas คือความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{Th}) และค่าคงที่อัตราการดูดซับ (K_{Th}) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (10)

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{k_{Th}q_{Th}m}{Q} - k_{Th}C_0t\right]} \quad (10)$$

โดยที่ K_{Th} คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับของ Thomas (L/min·g)

q_{Th} คือ ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (mg/g)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับในคอลัมน์ (mg)

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (mL/min)

C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาใดๆ (mg/L)

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

t คือ เวลาของการดูดซับที่เวลาใดๆ (min)

2.6.2 แบบจำลองของ Yoon-Nelson

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ โดยอยู่บนพื้นฐานของสมมุติฐานที่ว่าอัตราการดูดซับที่ลดลงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการดูดซับของตัวถูกดูดซับ และ เบรกทรูของตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ ซึ่งโมเดลนี้มีความซับซ้อนที่น้อยกว่าโมเดลอื่นๆ เพราะในโมเดลนี้ไม่ต้องการรายละเอียดของข้อมูลคุณสมบัติของตัวดูดซับ ชนิดของตัวถูกดูดซับ และ คุณสมบัติทางกายภาพของการดูดซับ [28] ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกอธิบายดังสมการที่ (11)

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{\exp(k_Y t - k_Y \tau)}{1 + \exp(k_Y t - k_Y \tau)} \quad (11)$$

โดยที่ k_Y คือ ค่าคงที่อัตราของ Yoon-Nelson (1/min)

τ คือ เวลา ณ ความเข้มข้นที่ 50 % ของกราฟเบรกทรู (min)

C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาใดๆ (mg/L)

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

t คือ เวลาของการดูดซับที่เวลาใดๆ (min)

2.6.3 แบบจำลองของ Adams-Bohart

เป็นแบบจำลองที่ใช้สมมุติฐานที่ว่าแรงที่เกิดจากการแพร่ภายในและแรงที่เกิดจากการต้านทานการถ่ายเทมวลจากภายนอกมีค่าน้อยมากและตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยตรง แต่แบบจำลองนี้ใช้สำหรับอธิบายส่วนเริ่มต้นของกราฟเบรกทรูเท่านั้น คือตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนถึงเบรกพอยต์หรือ 10–50 % ของจุดอิ่มตัว [29, 30] ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกอธิบายดังสมการที่ (12)

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp\left(k_A C_0 t - k_A N_0 \left(\frac{H}{u}\right)\right) \quad (12)$$

โดยที่ k_A คือ ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของ Adams-Bohart (L/min·g)

N_0 คือ ความเข้มข้น ณ สภาวะอิ่มตัว (mg/L)

H คือ ความสูงของคอลัมน์ (cm)

u คือ ความเร็วเชิงเส้น (cm/min)

C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาใดๆ (mg/L)

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

t คือ เวลาของการดูดซับที่เวลาใดๆ (min)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรงในคอลัมน์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรงในคอลัมน์ พบว่าตัวดูดซับยาปฏิชีวนะที่ใช้ในระบบการดูดซับแบบแบบตรงในคอลัมน์นั้นมีความหลากหลาย โดยสามารถแบ่งกลุ่มของตัวดูดซับที่ใช้ได้เป็นหลักๆ 2 กลุ่ม ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มที่ใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบจากธรรมชาติหรือวัตถุดิบที่มีต้นทุนต่ำ โดยมีนักวิจัย Darweesh และ Ahmed [31] ที่ได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับจากเมล็ดอินทผลัม โดยแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ ซึ่งบอกได้ว่าการดูดซับตามแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสอง และอัตราการดูดซับที่ลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการดูดซับของตัวถูกดูดซับและBreakthrough ของตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับที่อัตราการไหลที่ 0.5 mL/min ความสูงของคอลัมน์ที่ 25 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 150 mg/L มีประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ที่ 2.09 mg/g และค่าคงที่อัตราเท่ากับ 45.8×10^{-5} L/min·mg โดยจากการทดลองผลของความเข้มข้น

เริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่าผลของความสูง และผลของอัตราการไหล ต่อมา Das, Barui, Adak [32] ได้มีการนำแรมอนต์มอร์ริสโกลไนด์มาปรับปรุงพื้นผิวด้วยการนำเส้นใยเซลลูโลสอะซีเตทมาตรึงรูป โดยใช้การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ในการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 mg/L ความสูงของคอลัมน์ 20 cm และอัตราการไหลที่ 1.6 mL/min โดยแบบจำลองของ BDST นั้นค่าอัตราการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.01 L/mg·h และความเข้มข้น ณ สภาวะอิ่มตัว (N_0) เท่ากับ 3,570 mg/L นอกจากนี้ Antonelli และคณะ [33] ได้ทำการศึกษากระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยใช้ดินเบนโทไนท์เป็นตัวดูดซับ โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.05 mmol/L อัตราการไหล 0.4 mL/min และความสูงของคอลัมน์ 7 cm ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 72.2 mg/g และลักษณะการดูดซับใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Yan และ DualSD ต่อมา Gupta และ Garg [34] ได้สังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากแอกทิเวเตดสลัดจ์มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 17.67 mg/g ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซินเท่ากับ 50 mg/L อัตราการไหล 1.5 mL/min และความสูงของคอลัมน์ 4 cm ต่อมา Dhiman และ Sharma [35] สังเคราะห์ไบโอชาร์จากเปลือกถั่วลิสง ในแบบจำลองของ Thomas ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 5.84 mg/g

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มของวัสดุสังเคราะห์ โดย Gonzalez และคณะ [36] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างนาโนที่ได้จากการผสมระหว่าง ไคลินกับแกรไฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 3:1 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 91 mg/g ที่ pH เท่ากับ 6.3 ในแบบจำลองของ Thomas นอกจากนี้ Feizi, Samah และ Rangsivek [37] ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากยางที่ใช้แล้ว โดยที่อัตราการไหลที่ 3 mL/min ความสูงของคอลัมน์ที่ 20 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2 mg/L โดยประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 4.34 mg/g ต่อมา Dhiman และ Sharma [35] ใช้วัสดุดูดซับเป็นซิงค์ออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดนาโนในการดูดซับไซโปรฟลอกซาซิน ในแบบจำลองของ Thomas ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 5.08 mg/g ต่อมา Wang และคณะ [38] ได้สังเคราะห์วัสดุดูดซับนาโนคอมโพสิตระหว่างกรดฮิวมิกและเซลลูโลส ในการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/L ความสูงของคอลัมน์ 13 cm และอัตราการไหลที่ 2 mL/min ใน pH เท่ากับ 6.3 โดยแบบจำลองของ Thomas ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 5.02 mg/g

โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ พบว่าตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดนั้นคือตัวซัพที่ทำมาจากไคลินกับแกรไฟีนออกไซด์ เท่ากับ 91 mg/g และตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับรองลงมานั้นคือตัวดูด

ซับจากดินเบนโทไนท์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 72.2 mg/g นอกจากนี้จะพบว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆที่เหลือนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินที่ค่อนข้างต่ำ โดยจะมีประสิทธิภาพการดูดซับในช่วง 2.09-17.67 mg/g

ตารางที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์

| วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับ | แบบจำลองที่เหมาะสม | ตัวแปร | | | ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (mg/g) | ค่าคงที่อัตรา (L/min·mg) | อ้างอิง |
|--|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------|
| | | ความสูงคอลัมน์ (cm) | อัตราการไหล (mL/min) | ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | | | |
| กลุ่มที่ 1 วัสดุติดจากธรรมชาติ | | | | | | | |
| Date stones | Thomas, Yoon-Nelson | 25 | 0.5 | 150 | 2.09 | 45.8×10^{-5} | [31] |
| Montmorillonite-cellulose acetate | Logit | 20 | 0.083 | 5 | NR | 0.01 | [32] |
| Bentonite Clay | Yan, DualSD | 7 | 0.4 | 16.6 | 72.2 | 2.15×10^{-3} | [33] |
| Activated sludge | Thomas, Yoon-Nelson | 4 | 1.5 | 50 | 17.67 | 10.4×10^{-5} | [34] |
| Groundnut shell | Thomas, Yoon-Nelson | 4 | 5 | 80 | 5.84 | 3.94×10^{-4} | [35] |
| กลุ่มที่ 2 วัสดุติดสังเคราะห์ | | | | | | | |
| Chitin/graphene oxide | Thomas, Yoon-Nelson | 1.5 | 1 | NR | 91 | 5.1×10^{-4} | [36] |
| ZnO nanoparticles | Thomas, Yoon-Nelson | 4 | 5 | 80 | 5.08 | 4.65×10^{-4} | [35] |
| Humic acid/cellulose | NR | 13 | 2 | 10 | 5.02 | NR | [38] |
| Tyre | Thomas, Yoon-Nelson | 20 | 3 | 2 | 4.3 | NR | [37] |

** NR = no report

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุ

3.1.1 แผ่นเยื่อไม้อัดแข็ง (Hardboard)

แผ่นเยื่อไม้อัดแข็งที่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดบอร์ด ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้มาจาก บริษัท Thai Cane Board จำกัด ซึ่งผลิตแผ่นเยื่อไม้อัดแข็ง ที่ตั้งอยู่ใน ตำบล วังศาลา อำเภอ ท่าเรือ จังหวัด กาญจนบุรี

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

| สารเคมี | สูตรเคมี | มวลโมเลกุล (g/mol) | เกรด | ยี่ห้อ |
|-----------------------------|---|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| Ferric Nitrate | $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ | 241.86 | Analytical reagent | QReC |
| Deionized water | H_2O | 18.00 | - | - |
| Nitrogen gas | N_2 | 28.01 | - | Thailand industrial gas |
| Ciprofloxacin | $\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{FN}_3\text{O}_3$ | 331.35 | Analytical standard | Sigma - Aldrich |
| Ciprofloxacin hydrochloride | $\text{C}_{17}\text{H}_{19}\text{ClFN}_3\text{O}_3$ | 367.80 | Commercial grade | Medic pharma |

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

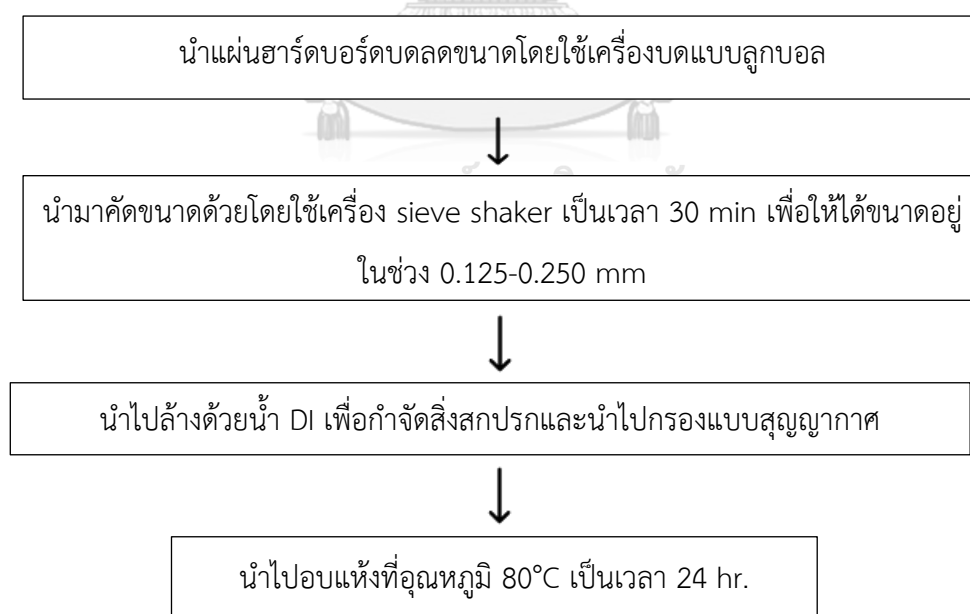
เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดประกอบด้วย

1. Scanning electron microscope (SEM)
2. Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)
3. Nitrogen adsorption-desorption apparatus
4. Thermogravimetric Analysis (TGA)
5. UV-Visible Spectrophotometer
6. Gas pycnometer

3.2 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ด

3.2.1 การเตรียมฮาร์ดบอร์ด

นำแผ่นฮาร์ดบอร์ดเหลือทิ้งมาบดลดขนาดโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill) จากนั้นนำมาคัดขนาดด้วยโดยใช้เครื่อง Sieve shaker เป็นเวลา 30 min โดยให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.125-0.250 mm และนำไปล้างด้วยน้ำ DI เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและนำไปกรองแบบสุญญากาศ จากนั้นนำไปอบแห้ง



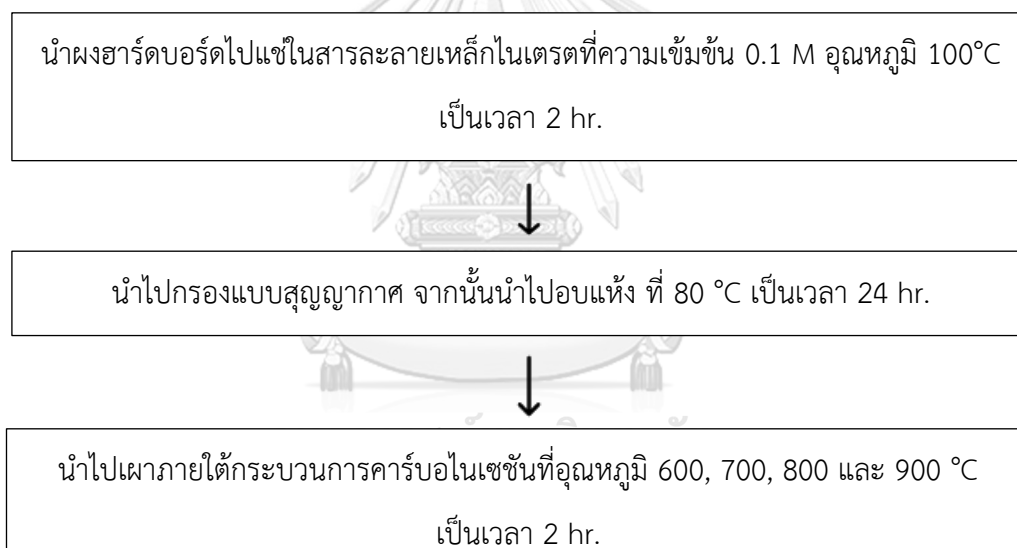
รูปที่ 6 แสดงแผนผังการเตรียมฮาร์ดบอร์ด

3.2.2 การสังเคราะห์วัสดุคูดซ์ไบโอซาร์

ฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการทำความสะอาดและอบแห้งแล้วจะถูกนำไปตรึงรูปในสารละลายเหล็กไนเตรต $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3]$ ที่ความเข้มข้น 0.1 M อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 hr. จากนั้นนำไปกรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 hr. และทำการเผาโดยใช้กระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนที่ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ $100 \text{ cm}^3/\text{min}$

ในกระบวนการสังเคราะห์ตัวคูดซ์ไบโอซาร์ได้มีการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

อุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนเซชัน : ศึกษาในช่วง $600^\circ\text{C} - 900^\circ\text{C}$



รูปที่ 7 แสดงแผนผังการเตรียมไบโอซาร์จากฮาร์ดบอร์ด

3.2.3 การทดสอบคุณลักษณะของไบโอซาร์

3.2.3.1 Scanning electron microscope

ศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของไบโอซาร์

3.2.3.2 Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX)

ใช้สำหรับศึกษาการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ

3.2.3.3 Nitrogen adsorption-desorption apparatus

ศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน การกระจายขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนทั้งมีโซพอร์และไมโครพอร์ โดยใช้หลักการดูดซับทางกายภาพ

3.2.3.4 Thermogravimetric Analysis

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง โดยใช้เครื่องชั่งวัดน้ำหนักและใช้เทอร์โมคัพเปลววัดอุณหภูมิของตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิของสาร

3.2.3.5 Gas pycnometer

ศึกษาหาปริมาตรและความหนาแน่นของตัวอย่างด้วยหลักการแทนที่ด้วยแก๊ส

3.3 ศึกษาการดูดซับสารไซโปรฟลอกซาซิน

3.3.1 ศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินจากการทดลองแบบกะ (Batch adsorption)

การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินจากการทดลองแบบกะ ทำได้โดยการนำไบโอชาร์ที่สังเคราะห์ได้ผสมกับไซโปรฟลอกซาซินที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน นำไปเขย่าจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล จากนั้นกรองเอาส่วนของสารละลาย ไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นไซโปรฟลอกซาซินที่เหลืออยู่โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

โดยในการศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินแบบกะได้มีการศึกษาผลของตัวแปรดังต่อไปนี้

- สมดุลการดูดซับ โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 1-200 mg/L โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C
- จลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยศึกษาการดูดซับอยู่ในช่วง 0-48 hr. ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1-100 mg/L ที่ 30 °C

3.3.2 ศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในกระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ (Fixed-bed column)

การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินแบบตรึงในคอลัมน์ทำได้โดยการป้อนสารละลายไซโปรฟลอกซาซินผ่านตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในคอลัมน์ในลักษณะไหลขึ้นและเก็บสารละลายที่ไหลออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ เพื่อหาความเข้มข้นของสารไซโปรฟลอกซาซิน โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

โดยในการศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินแบบตรึงในคอลัมน์ได้มีการศึกษาผลของตัวแปรดังต่อไปนี้

3.3.2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

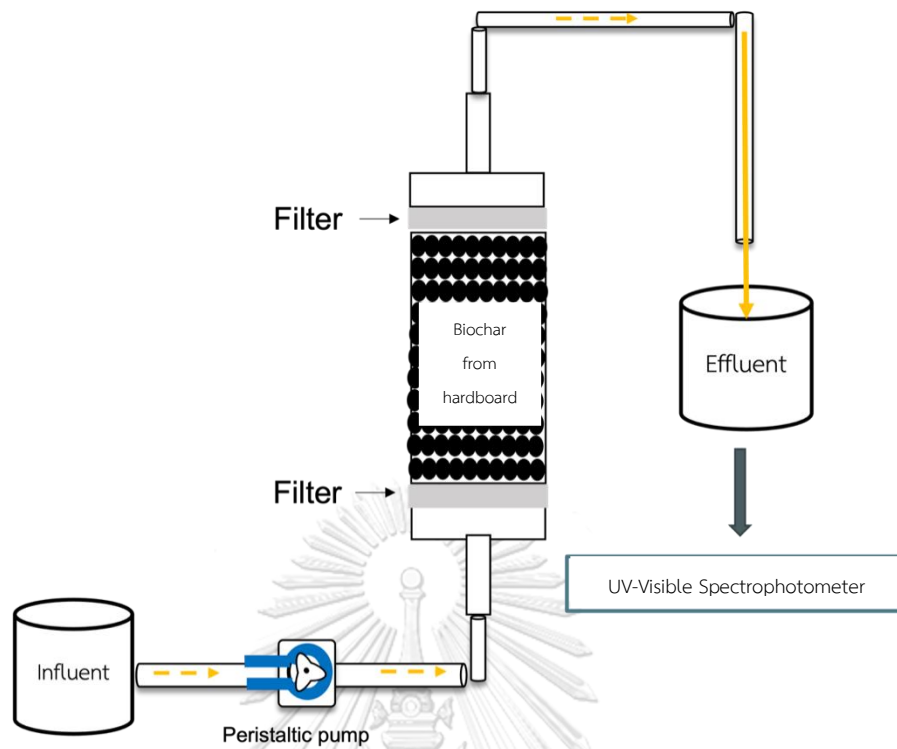
โดยทำการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซินที่ใช้ในกระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยศึกษาความเข้มข้นในช่วง 20-80 mg/L ที่อุณหภูมิ 30°C ความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 5 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 10 cm³/min

3.3.2.2 ผลของอัตราการไหล

โดยทำการศึกษาอัตราการไหลของไซโปรฟลอกซาซินที่ใช้ในกระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยศึกษาอัตราการไหลในช่วง 5-15 cm³/min ที่อุณหภูมิ 30°C ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 80 mg/L และความสูงคอลัมน์เท่ากับ 5 cm

3.3.2.3 ผลของความสูงคอลัมน์

โดยทำการศึกษาความสูงของคอลัมน์ที่ใช้ในกระบวนการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยศึกษาความสูงในช่วง 5-15 cm ที่อุณหภูมิ 30°C ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 80 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 10 cm³/min



รูปที่ 8 การดูดซับแบบตรงในคอลัมน์

3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไซโปรฟลอกซาซิน

3.3.3.1 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน ของตัวอย่าง โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติรูพรุนด้วยการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K

ไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตนั้นถูกนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดนั้นจะถูกสังเคราะห์โดยการนำสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ มาตรึงรูปบนฮาร์ดบอร์ดและนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยมีสถานะการเตรียมแสดงไว้ดังตารางที่ 4

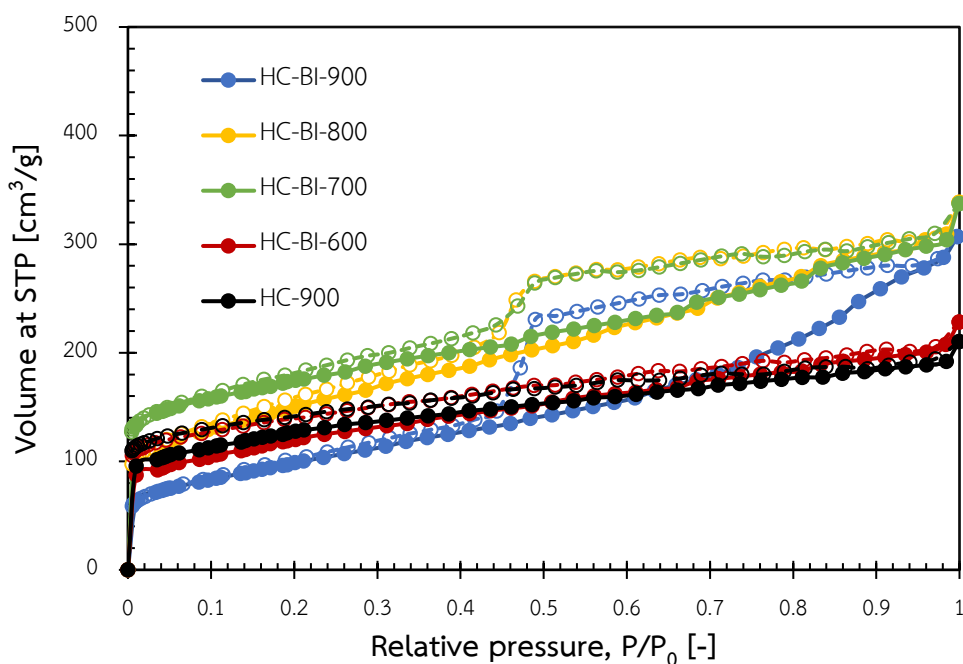
ตารางที่ 4 สถานะการเตรียมวัสดุดูดซับ

| ตัวอย่าง | วิธีการผลิตเป็นวัสดุคาร์บอน |
|-----------|---|
| HC-BI-900 | ฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนไนเซชันภายใต้ N_2 ที่อุณหภูมิ 900 °C |
| HC-BI-800 | ฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนไนเซชันภายใต้ N_2 ที่อุณหภูมิ 800 °C |
| HC-BI-700 | ฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนไนเซชันภายใต้ N_2 ที่อุณหภูมิ 700 °C |
| HC-BI-600 | ฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนไนเซชันภายใต้ N_2 ที่อุณหภูมิ 600 °C |
| HC-900 | ฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันภายใต้ N_2 ที่อุณหภูมิ 900 °C |

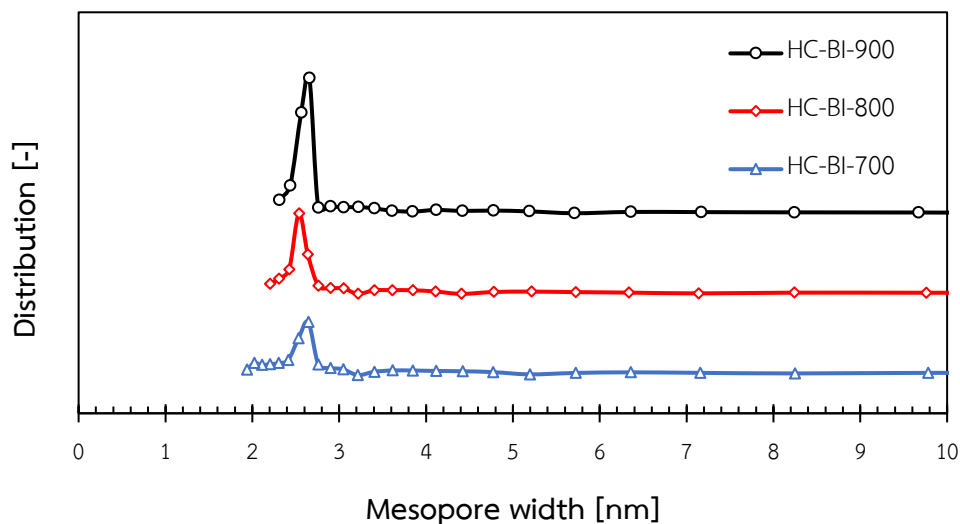
ไบโอชาร์ที่ได้จากการเตรียมดังตารางที่ 4 จะถูกนำไปศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยการนำไปวิเคราะห์การดูดซับ-คายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ดังแสดงในรูปที่ 9 เป็นผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเชิงรูพรุนของวัสดุดูดซับ โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 600-900°C ซึ่งควบคุมความเข้มข้นสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ เท่ากับ 0.10 M ในขั้นตอนการตรึงรูป พบว่า ตัวอย่าง HC-BI-900, HC-BI-800 และ HC-BI-700 มีลักษณะไอโซเทอมการดูดซับ-คายการดูดซับผสมระหว่าง Type-I และ Type-IV ตามการจำแนกของ IUPAC ซึ่งลักษณะไอโซเทอมแบบ Type-I บ่งบอกว่าวัสดุดังกล่าวมีโครงสร้างรูพรุนในช่วงไมโคร ในขณะที่ Type-IV บ่งบอกว่ามีโครงสร้างรูพรุนในช่วงมีโซ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไบโอชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C จะทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนที่ผสมกันระหว่างไมโครและมีโซ ในขณะที่ตัวอย่าง HC-900 ที่ไม่ผ่านการตรึงรูปด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ นั้นมีลักษณะไอโซเทอมแบบ Type-I ซึ่งหมายความว่ามีความมีเพียงโครงสร้างรูพรุนในช่วงไมโครเท่านั้น ถึงแม้ว่าจะผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C โดยจากผลการวิเคราะห์จะสรุป

ได้ว่า การมีอยู่ของ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ และผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C ก่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ [39]

โดยเมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนในช่วงไมโคร และปริมาตรรูพรุนในช่วงมีโซ ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยจากผลการวิเคราะห์พบว่าไบโอชาร์ HC-BI-900, HC-BI-800 และ HC-BI-700 มีปริมาตรรูพรุนในช่วงมีโซเท่ากับ 0.42, 0.34, 0.28 cm^3/g ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้นปริมาตรรูพรุนในช่วงมีโซมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 900°C (HC-BI-900) จะให้ปริมาตรรูพรุนในช่วงมีโซที่มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.42 cm^3/g ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 700°C เป็น 900°C ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในช่วงไมโครและพื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ $700-900^\circ\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 10 พบว่า HC-BI-900, HC-BI-800 และ HC-BI-700 มีความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซเท่ากับ 2.7, 2.5, 2.8 nm ตามลำดับ



รูปที่ 9 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C (HC-BI-600), 700°C (HC-BI-700), 800°C (HC-BI-800), 900°C (HC-BI-900) และที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 900°C (HC-900)



รูปที่ 10 การกระจายตัวความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 700°C (HC-BI-700), 800°C (HC-BI-800) และ 900°C (HC-BI-900)

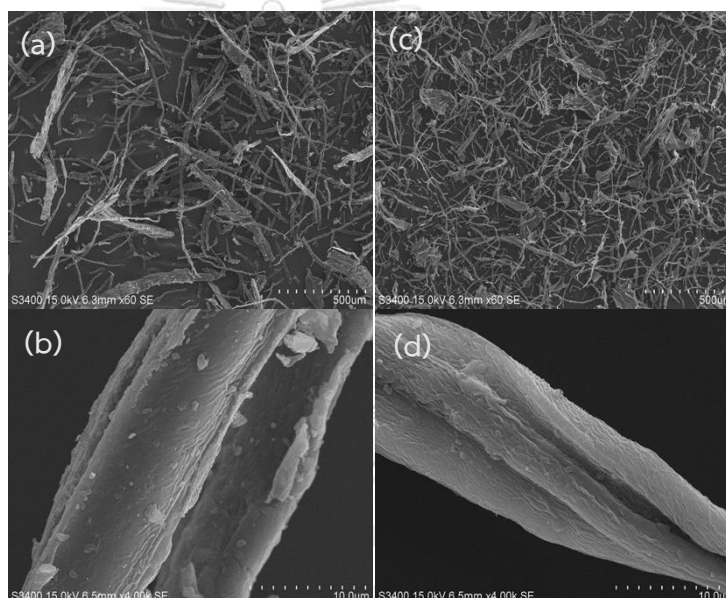
ตารางที่ 5 ชนิดของไอโซเทอม พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนขนาดไมโครและมีโซจากการดูดซับ-คายการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ 77 K ของวัสดุดูดซับ

| Samples | Type of isotherm | S_{BET} [m ² /g] | V_{micro} [cm ³ /g] | V_{meso} [cm ³ /g] | Average pore diameter [nm] |
|-----------|------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| HC-BI-900 | I+IV | 347 | 0.10 | 0.42 | 2.7 |
| HC-BI-800 | I+IV | 530 | 0.13 | 0.34 | 2.5 |
| HC-BI-700 | I+IV | 618 | 0.16 | 0.28 | 2.8 |
| HC-BI-600 | I | 421 | 0.12 | N/D* | N/D* |
| HC-900 | I | 450 | 0.11 | N/D* | N/D* |

Remark: *N/D = not determined

4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับ

สัณฐานวิทยาและลักษณะเชิงพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่ได้ถูกศึกษาโดยใช้ SEM โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างฮาร์ทบอร์ด (RAW) และไบโอชาร์จากฮาร์ทบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) แสดงในรูปที่ 11 (a) และ (c) ตามลำดับ พบว่าสัณฐานวิทยาของตัวอย่างมีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber) และรูปที่ 11 (b) และ (d) ลักษณะพื้นผิวของ RAW และ HC-BI-800 โดยพบว่าพื้นผิวของ HC-BI-800 นั้นมีลักษณะที่ขรุขระกว่าพื้นผิวของ RAW นอกจากนี้ยังมีการศึกษา SEM-EDS เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุตั้งตารางที่ 6 ซึ่ง RAW มี %atomic ของคาร์บอนเท่ากับ 57.57 และของออกซิเจนเท่ากับ 42.43 และ HC-BI-800 มี %atomic ของคาร์บอนเท่ากับ 94.92 และของออกซิเจนเท่ากับ 5.36 และเหล็กเท่ากับ 1.70



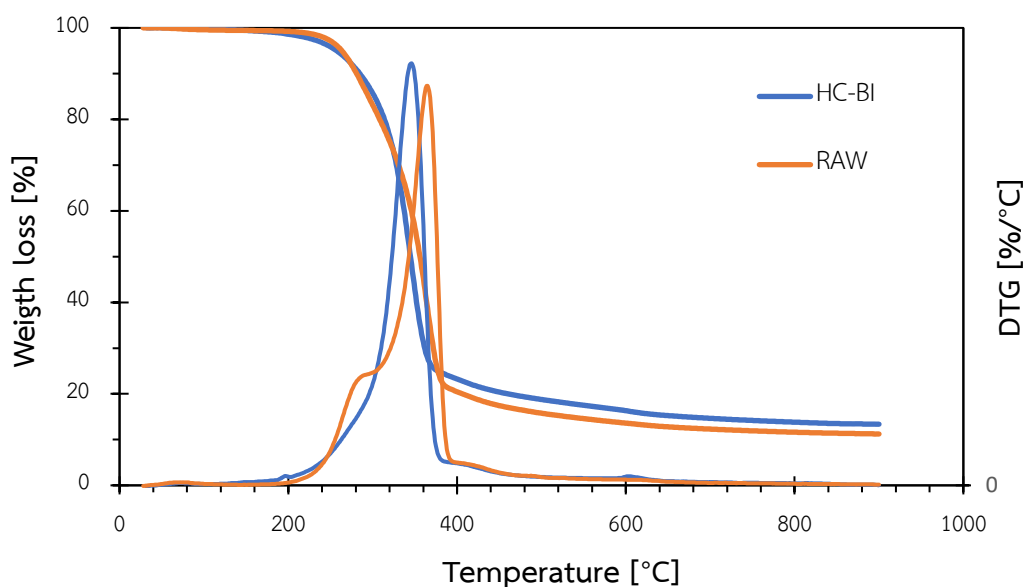
รูปที่ 11 สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของฮาร์ทบอร์ด RAW (a-b) และของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800)(c-d) วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของฮาร์ดบอร์ดและไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ด

| Samples | Chemical composition | | | | | |
|-----------|----------------------|-------|------|----------|-------|------|
| | Atomic % | | | Weight % | | |
| | C | O | Fe | C | O | Fe |
| HC-BI-800 | 92.94 | 5.36 | 1.70 | 86.06 | 6.61 | 7.33 |
| RAW | 57.57 | 42.43 | N/D | 50.46 | 49.54 | N/D* |

Remark: *N/D = not determined

4.1.3 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฮาร์ดบอร์ดและฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$



รูปที่ 12 TGA curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %weight loss กับอุณหภูมิและ DTG กับ อุณหภูมิของฮาร์ดบอร์ด (RAW) และฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (HC-BI)

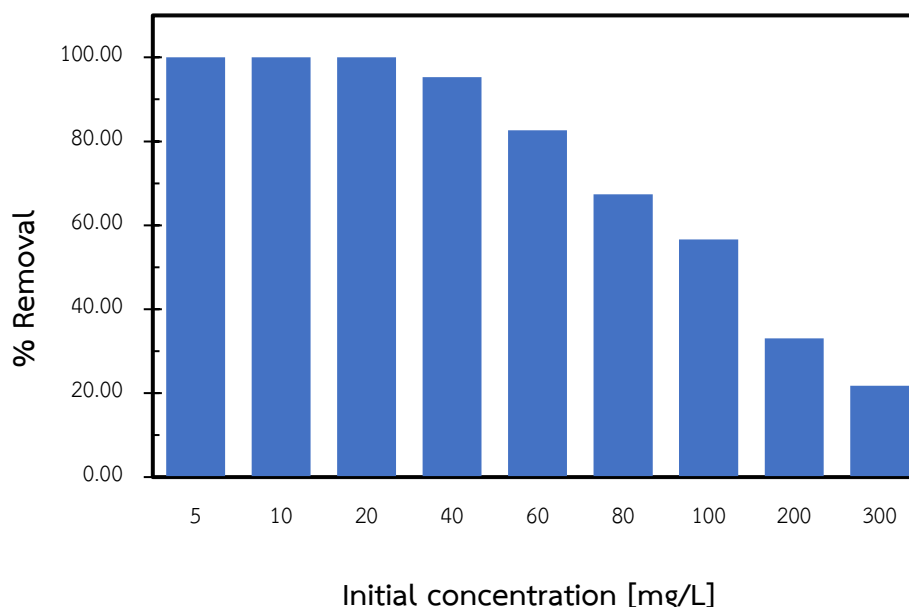
โดยการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฮาร์ดบอร์ดนั้นจะดูจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ ตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของฮาร์ดบอร์ด (RAW) และฮาร์ดบอร์ดที่ ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ที่ความเข้มข้น 0.10 M โดยจะแสดงดังรูปที่ 12 จากรูปพบว่าฮาร์ด บอร์ดมีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมากกว่าฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ โดยร้อยละ ของน้ำหนักที่หายไปของฮาร์ดบอร์ดและฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ นั้นมีค่าเท่ากับ

88.77% และ 86.63% ตามลำดับ ซึ่งฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ มีน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าเพราะเกิดจาก $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ในฮาร์ดบอร์ดได้เปลี่ยนไปเป็นสารประกอบเหล็กจึงไม่ถูกสลายโดยความร้อน นอกจากนี้รูปที่ 12 ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง differential thermogravimetric (DTG) กับอุณหภูมิ ซึ่งจะเป็นการบ่งบอกถึงการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในแต่ละอุณหภูมิ โดยเกิดด้วยกัน 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 220-325°C นั้นจะเป็นการสลายตัวทางความร้อนของเฮมิเซลลูโลส โดยเฮมิเซลลูโลสจะมีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่อุณหภูมิ 285°C ต่อมาขั้นตอนที่สองที่อุณหภูมิ 315-400°C เป็นอุณหภูมิที่เซลลูโลสสลายตัวทางความร้อน ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้เซลลูโลสมีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดคืออุณหภูมิที่ 346°C และขั้นตอนสุดท้ายคือการสลายตัวทางความร้อนของลิกนินที่อุณหภูมิมากกว่า 450°C โดยลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุดทำให้การสลายตัวทางความร้อนเกิดขึ้นอย่างช้าๆทำให้ไม่ปรากฏลักษณะของพีค [40]

4.2 การศึกษาการดูดซับยาปฏิชีวนะไซโปรฟลอกซาซิน

4.2.1 การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในกระบวนการดูดซับแบบกะ

4.2.1.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับไซโปรฟลอกซาซิน



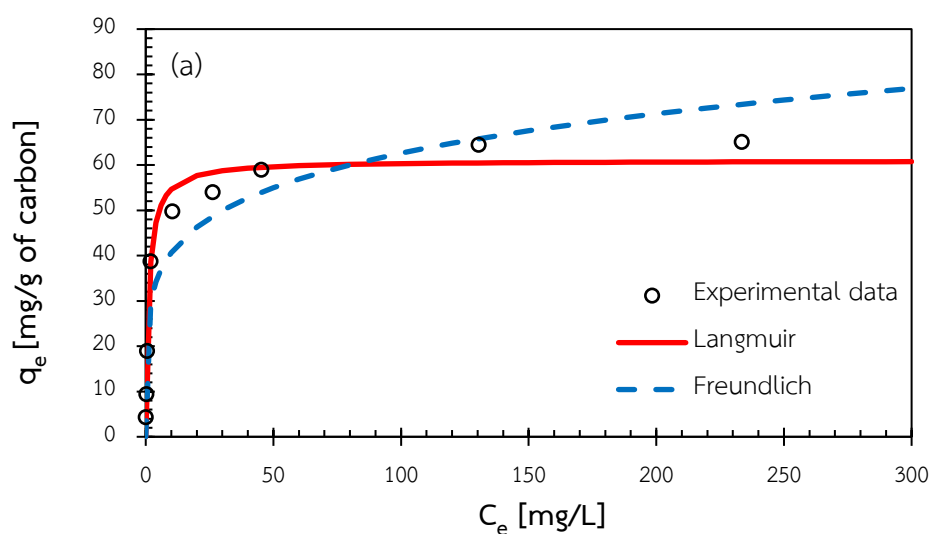
รูปที่ 13 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีผลต่อการกำจัดไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800)

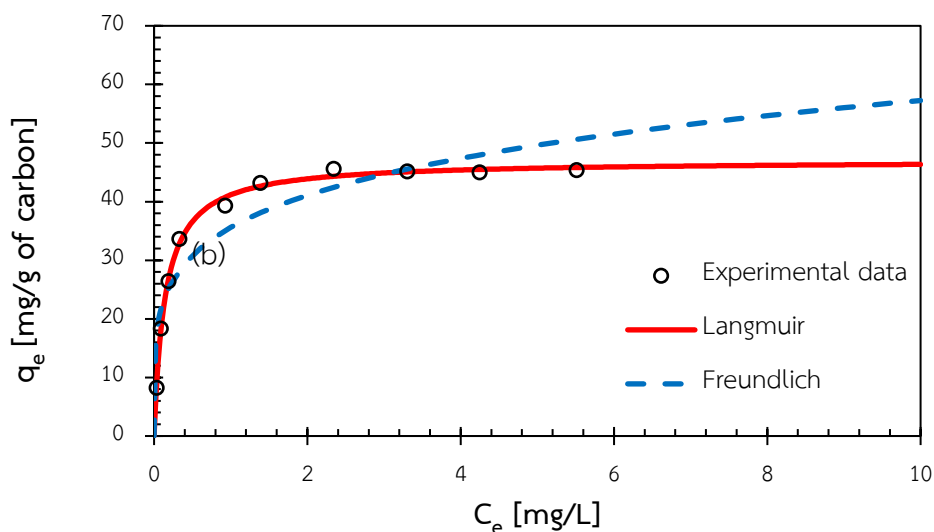
การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับไซโปรฟลอกซาซิน จะทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซโปรฟลอกซาซิน ซึ่งจะทำให้การควบคุมอัตราส่วน

น้ำหนักของวัสดุดูดซับต่อปริมาตรของไซโปรฟลอกซาซินไว้ที่ 1 g/L ปริมาตรไซโปรฟลอกซาซิน 100 mL ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 hr. โดยผลการทดลองจากรูปที่ 13 พบว่า %removal ลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซินเพิ่มขึ้นโดย %removal ลดลงจาก 99.99% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 mg/L เหลือ 21.80% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 300 mg/L เนื่องจากปริมาตรของตำแหน่งการดูดซับของตัวดูดซับไม่เพียงพอ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซินเพิ่มสูงขึ้น

4.2.1.2 การศึกษาสมดุลการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาสมดุลการดูดซับเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวที่ถูกดูดซับ โดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับที่สภาวะสมดุลแบบ Langmuir และ Freundlich ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 14 โดยมีการศึกษาสมดุลการดูดซับอยู่ 2 ช่วงความเข้มข้นได้แก่ช่วงความเข้มข้นสูง (5-300 mg/L) และช่วงความเข้มข้นต่ำ (1-10 mg/L) โดยแสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 7





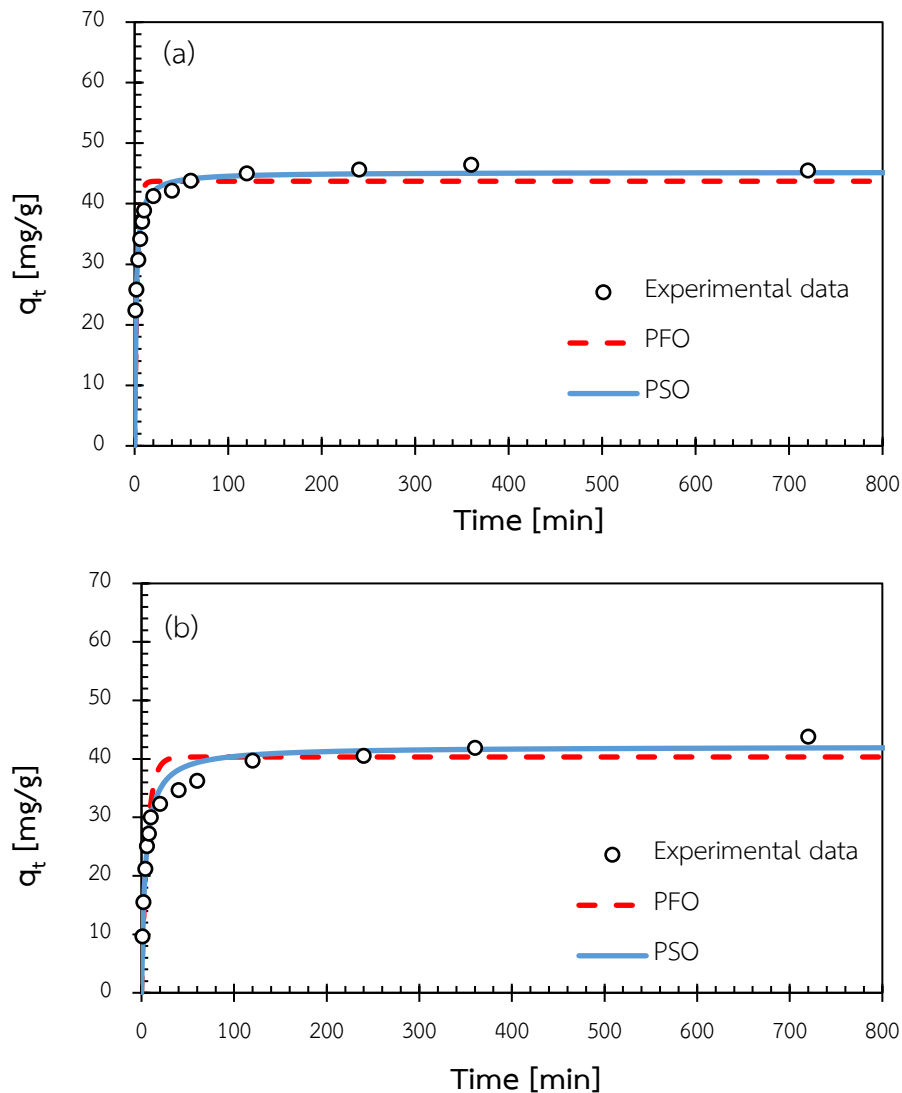
รูปที่ 14 ผลไอโซเทอมการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ช่วงความเข้มข้น 5-300 mg/L (a) และ 1-10 mg/L (b)

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

| Sample | CIP concentration (mg/L) | Langmuir | | | Freundlich | | |
|-----------|--------------------------|--------------|------------|-----------|------------------------------------|---------|-----------|
| | | Q_0 (mg/g) | b (L/mg) | R^2 (-) | K_f (mg/g) $(\text{L/mg})^{1/n}$ | n (-) | R^2 (-) |
| HC-BI-800 | Low conc. (1-10) | 47.01 | 7.03 | 0.9961 | 35.58 | 4.84 | 0.8602 |
| | High conc. (5-300) | 60.99 | 0.86 | 0.9804 | 26.41 | 1.34 | 0.8856 |

จากผลการวิเคราะห์การดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ HC-BI-800 พบว่าทั้งช่วงความเข้มข้นสูงและช่วงความเข้มข้นต่ำนั้นมีพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9804 และ 0.9961 ตามลำดับโดยไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir นั้นอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าเป็นการดูดซับแบบ monolayer ซึ่งบ่งบอกได้ว่าตัวถูกดูดซับมีความชอบพื้นผิวของตัวดูดซับมากกว่า จึงทำให้ตัวถูกดูดซับเลือกที่จะจับกับตัวดูดซับและเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (Q_0) ที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลอง Langmuir พบว่าที่ช่วงความเข้มข้นสูงนั้นมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงกว่าช่วงความเข้มข้นต่ำ

เท่ากับ 60.99 และ 47.01 mg/g ตามลำดับ เพราะว่าที่ความเข้มข้นสูงนั้นทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทมวลในกระบวนการดูดซับที่สูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำโดยแรงขับเคลื่อนในการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นภายในตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายไฮโปรฟลอกซาซิน [41]



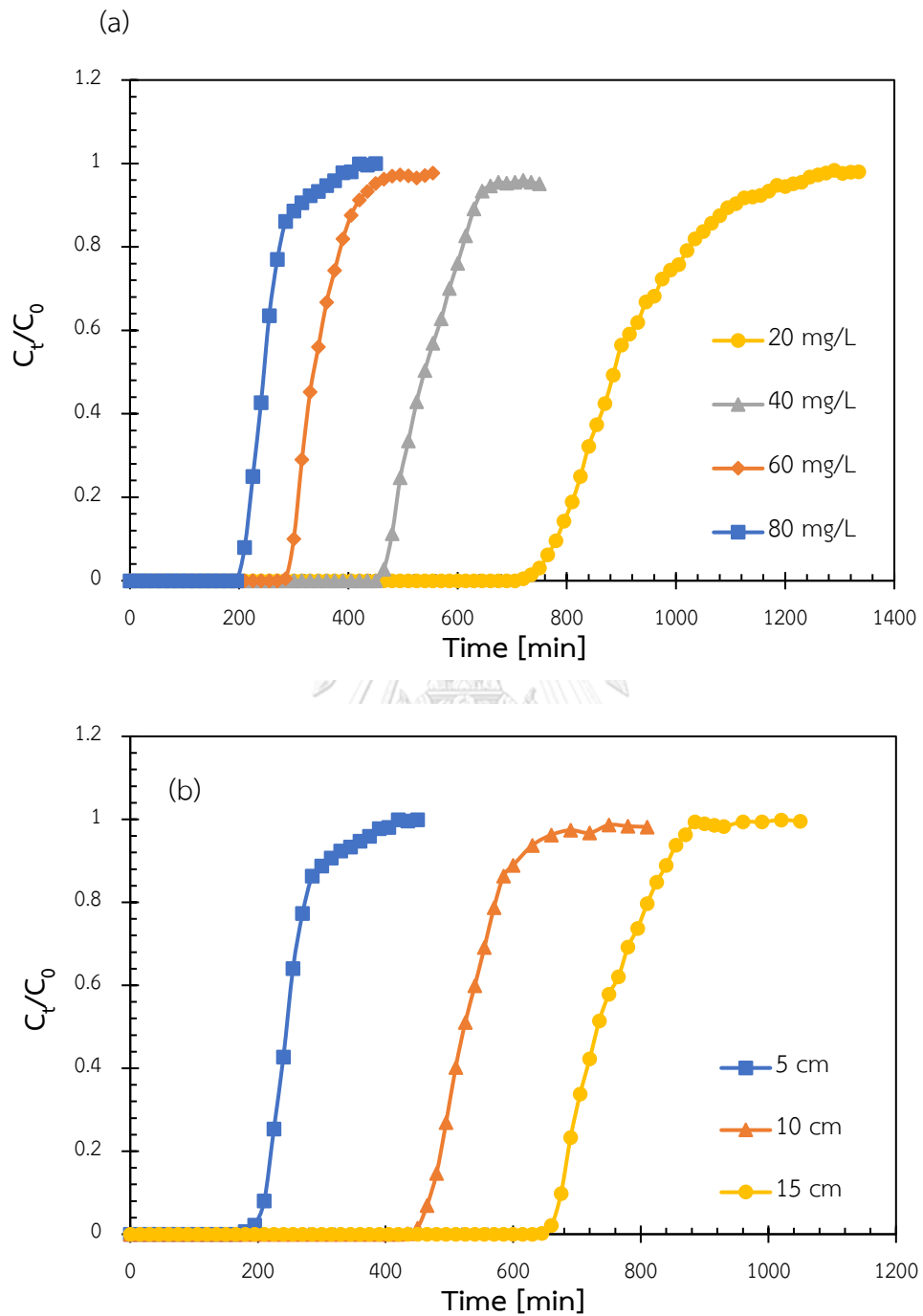
รูปที่ 15 ผลจลนพลศาสตร์การดูดซับไฮโปรฟลอกซาซินของ ไบโอสชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเฮกซันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้น 70 mg/L (a) และ 7 mg/L (b)

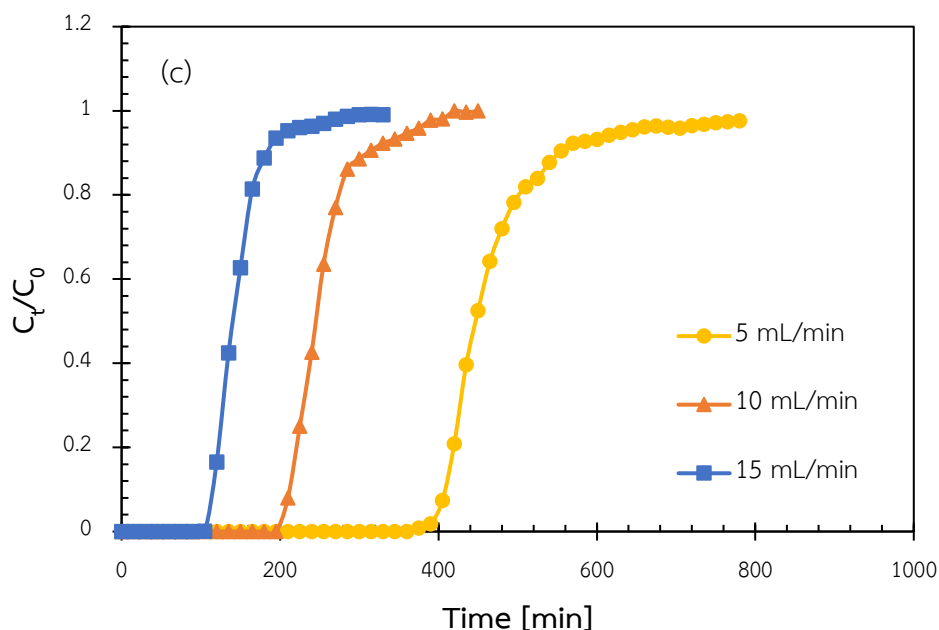
ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ Pseudo-first-order และ Pseudo-second-order ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

| Sample | CIP concentration (mg/L) | Pseudo-first-order (PFO) | | | Pseudo-second-order (PSO) | | | |
|-----------|--------------------------|----------------------------|-----------------|-----------|---|-----------------|---|-----------|
| | | k_1 (min ⁻¹) | q_{e1} (mg/g) | R^2 (-) | k_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹) | q_{e2} (mg/g) | h_2 (mg g ⁻¹ min ⁻¹) | R^2 (-) |
| HC-BI-800 | 7 | 0.1608 | 40.32 | 0.8911 | 0.0057 | 42.11 | 10.06 | 0.9699 |
| | 70 | 0.3723 | 43.47 | 0.7850 | 0.0147 | 45.21 | 30.06 | 0.9597 |

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันได้แก่ที่ 7 และ 70 mg/L โดยใช้แบบจำลอง Pseudo first order (PFO) และ Pseudo second order (PSO) โดยกำหนดเวลาในการดูดซับที่ 72 hr. ที่อุณหภูมิ 30°C โดยใช้ปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 1.0 g/L ที่ความเข้มข้น 70 mg/L และ 0.1 g/L ที่ความเข้มข้น 7 mg/L ซึ่งจะได้ผลแสดงดังรูปที่ 15 และตารางที่ 8 โดยจากผลดังกล่าวพบว่า HC-BI-800 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 และ 70 mg/L มีความสอดคล้องกับแบบจำลอง PSO มากกว่า PFO โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9699 และ 0.9597 และมีค่าอัตราเร็วเริ่มต้น (h_2) เท่ากับ 10.06 และ 30.06 mg/g·min ซึ่งค่า h_2 ที่แตกต่างกันนั้นเกิดจากแรงขับเคลื่อนในการดูดซับ โดยทั้งสองความเข้มข้นนั้นใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ 120 min ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซินที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (Q_0) และค่าอัตราเร็วเริ่มต้น (h_2) เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผลของแรงขับเคลื่อนในการดูดซับ

4.2.2 การศึกษาการดูดซับไอโซโพรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์





รูปที่ 16 กราฟเบรกทรูการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากกราฟเบรกทรูสำหรับการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ,ความสูงคอลัมน์ และอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

| Condition | | | Parameters | | | | | | |
|--------------------------|---------------|-----------|----------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------|
| C_0 (mg/L) | Q (mL/min) | H (cm) | t_b (min) | t_e (min) | τ (min) | EBCT (min) | q_e (mg/g) | L_{MTZ} (cm) | %R (%) |
| ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น | | | | | | | | | |
| 20 | 10 | 5 | 735 | 1200 | 871 | 1.90 | 53.30 | 1.45 | 80.93 |
| 40 | 10 | 5 | 465 | 675 | 535 | 1.90 | 53.43 | 1.59 | 78.87 |
| 60 | 10 | 5 | 285 | 450 | 335 | 1.90 | 54.85 | 1.94 | 76.83 |
| 80 | 10 | 5 | 195 | 375 | 245 | 1.90 | 56.84 | 2.40 | 67.54 |
| ผลของความสูงคอลัมน์ | | | | | | | | | |
| 80 | 10 | 5 | 195 | 375 | 245 | 1.90 | 56.84 | 2.40 | 67.54 |
| 80 | 10 | 10 | 465 | 660 | 523 | 3.80 | 58.60 | 2.95 | 80.70 |
| 80 | 10 | 15 | 675 | 870 | 733 | 5.70 | 59.53 | 3.36 | 85.81 |
| ผลของอัตราการไหล | | | | | | | | | |

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากกราฟเบรกทรูสำหรับการดูดซับไฮโปฟล็อกซาซินของ ไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ ความเข้มข้นเริ่มต้น , ความสูงคอลัมน์ และอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

| Condition | | | Parameters | | | | | | |
|-----------------|---------------|-----------|----------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------|
| C_0 (mg/L) | Q (mL/min) | H (cm) | t_b (min) | t_e (min) | τ (min) | EBCT (min) | q_e (mg/g) | L_{MTZ} (cm) | %R (%) |
| 80 | 5 | 5 | 375 | 645 | 447 | 3.80 | 58.82 | 1.98 | 72.27 |
| 80 | 10 | 5 | 195 | 375 | 245 | 1.90 | 56.85 | 2.40 | 67.54 |
| 80 | 15 | 5 | 105 | 210 | 141 | 1.27 | 52.45 | 2.50 | 64.76 |

4.2.2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโปฟล็อกซาซิน (20–80 mg/L) ต่อกราฟเบรกทรู ที่ อุณหภูมิ 30°C ความสูงของคอลัมน์ 5 cm และ อัตราการไหลที่ 10 mL/min เป็นไปดังรูปที่ 16 (a) และตารางที่ 9 จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้นทำให้เวลา ณ จุดเบรกทรู (t_b) และเวลา ณ จุดอิ่มตัว (t_e) มีค่าลดลง โดยเวลา ณ จุดเบรกทรู (t_b) ลดลงจาก 735 min เหลือ 195 min และเวลา ณ จุดอิ่มตัว (t_e) ลดลงจาก 1200 min เหลือ 375 min เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 20 mg/L เป็น 80 mg/L และค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (q_e) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 53.30 mg/g ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L เป็น 56.84 mg/g ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 80 mg/L เนื่องจากที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้นนั้นทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทมวลในกระบวนการดูดซับที่เพิ่มขึ้น [42]

4.2.2.2 ผลของความสูงคอลัมน์

ผลของความสูงคอลัมน์ที่แตกต่างกัน (5, 10, และ 15 cm) ที่มีผลต่อกราฟเบรกทรู ที่ อุณหภูมิ 30°C ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 80 mg/L และ อัตราการไหลที่ 10 mL/min จากรูปที่ 16 (b) และข้อมูลในตารางที่ 9 พบว่าเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้นจาก 5 cm เป็น 15 cm ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ ค่า t_b จาก 195 min เป็น 675 min และ t_e จาก 375 min เป็น 870 min เนื่องจากเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้นปริมาณของตัวดูดซับในคอลัมน์ก็จะมากขึ้นส่งผลให้มีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น [43] อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่า q_e โดยเพิ่มขึ้นจาก 56.14 mg/g เป็น 59.53 mg/g ซึ่งความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นนั้นยังช่วยทำให้ไฮโปฟล็อกซาซินมีเวลาในการสัมผัสกับตัวดูดซับได้นานขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความสูงของคอลัมน์จาก 5 cm เป็น 15 cm ค่า Empty Bed Contact Time (EBCT)

เพิ่มขึ้นจาก 1.90 min เป็น 5.70 min ส่งผลให้ร้อยละการกำจัด (%removal) เพิ่มขึ้นจาก 67.54% เป็น 85.81% [44]

4.2.2.3 ผลของอัตราการไหล

ผลของอัตราการไหลที่แตกต่างกัน (5, 10, และ 15 cm³/min) ที่มีผลต่อกราฟเบรกทรู ที่ อุณหภูมิ 30 °C ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 80 mg/L และ ความสูงของคอลัมน์ที่ 5 cm โดยจากรูปที่ 16 (c) และข้อมูลในตารางที่ 9 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจาก 5 cm³/min เป็น 15 cm³/min ส่งผลให้ เวลา ณ จุดเบรกทรู (t_b) และ เวลา ณ จุดอิ่มตัว (t_e) ลดลง โดย t_b ลดลงจาก 375 min เหลือ 105 min และ t_e ลดลงจาก 645 min เหลือ 210 min เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ใช้สัมผัสระหว่างไซโปรฟลอกซาซินกับตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแพร่กระจายของไซโปรฟลอกซาซินเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยดูจากค่า EBCT มีค่าลดลงจาก 3.80 min เป็น 1.27 min ดังนั้นไซโปรฟลอกซาซินจึงออกจากคอลัมน์ก่อนที่สมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้น [45] ซึ่งทำให้ค่า q_e ลดลงจาก 58.82 เหลือ 52.45 mg/g

4.2.3 แบบจำลองการดูดซับสำหรับระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์

ข้อมูลที่ได้จากจากเส้นกราฟเบรกทรูที่สภาวะต่างๆจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อที่จะใช้ในการทำนายเส้นกราฟเบรกทรูของการดูดซับ โดยใช้แบบจำลองการดูดซับสำหรับระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ได้แก่ แบบจำลองของ Thomas, แบบจำลองของ Yoon-Nelson และแบบจำลองของ Adams-Bohart ซึ่งผลของการวิเคราะห์ของแบบจำลองต่างๆโดยใช้การคำนวณด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นนั้นจะถูกนำมาเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองนั้นจะแสดงดังตารางที่10

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-Bohart

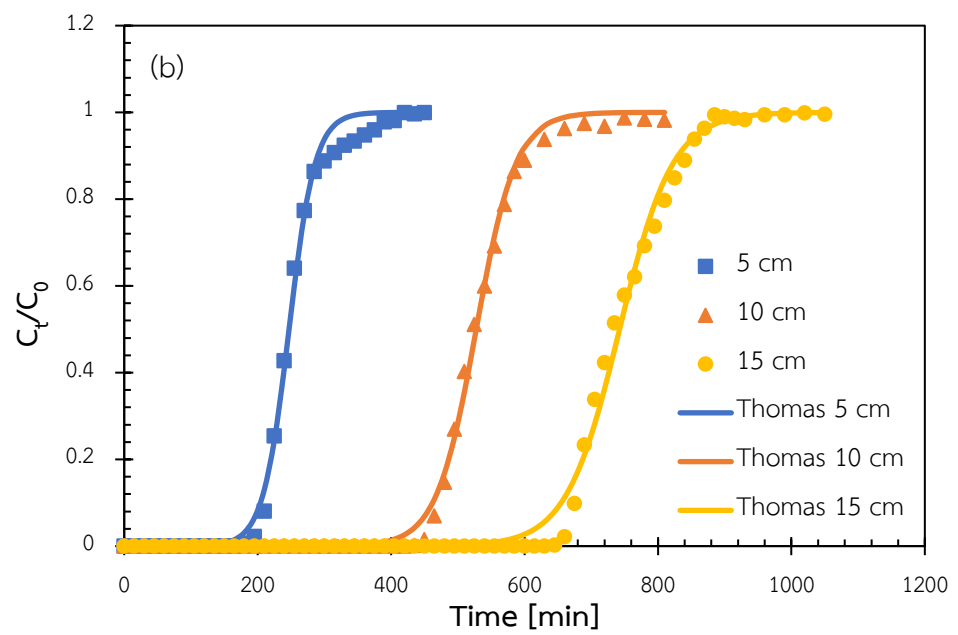
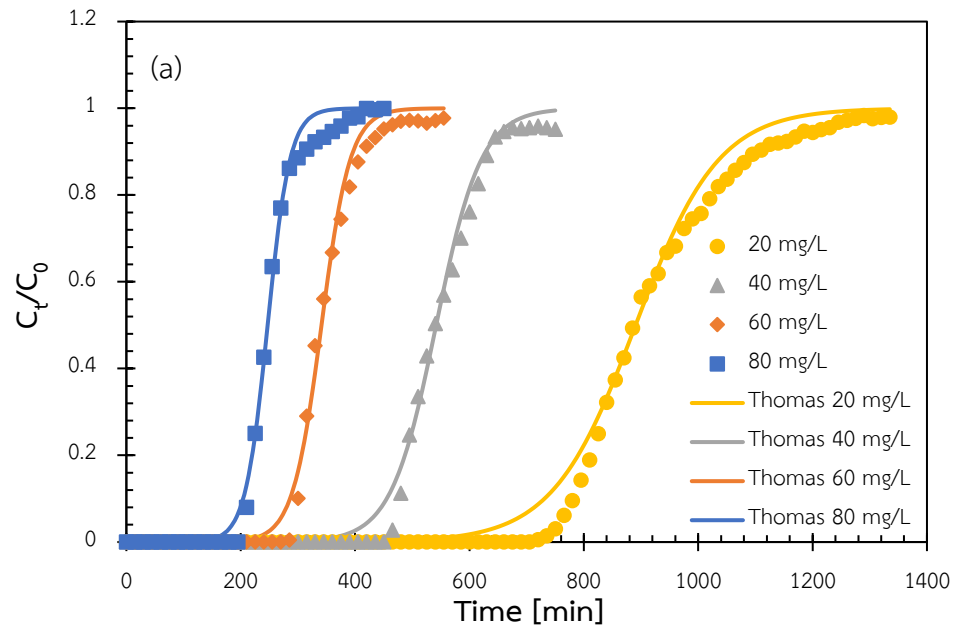
| Condition | | Thomas model | | | | Yoon-Nelson model | | | | Adams-Bohart model | | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|--------------------|------------------------|--------|-------------------|------------------|--------------|--------|--------------------|---------------------|-----------------|-------|-----------|
| C_0 (mg/L) | Q (mL/min) | H (cm) | q_{TH} (mg/g) | k_{TH} (mL/min·g) | SSE | R^2 (-) | k_Y (1/min) | τ (min) | SSE | R^2 (-) | k_A (mL/min·g) | N_0 (mg/L) | SSE | R^2 (-) |
| ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 10 | 5 | 52.82 | 0.6627 | 0.0841 | 0.9943 | 0.0138 | 890.4 | 0.0841 | 0.9943 | 0.1310 | 13518 | 2.205 | 0.8512 |
| 40 | 10 | 5 | 53.18 | 0.6775 | 0.0384 | 0.9952 | 0.0275 | 541.7 | 0.0345 | 0.9957 | 0.1529 | 13874 | 1.033 | 0.8705 |
| 60 | 10 | 5 | 54.14 | 0.6629 | 0.0384 | 0.9952 | 0.0379 | 358.2 | 0.0384 | 0.9957 | 0.0935 | 15978 | 1.395 | 0.8079 |
| 80 | 10 | 5 | 55.44 | 0.6514 | 0.0261 | 0.9957 | 0.0513 | 247.0 | 0.0261 | 0.9957 | 0.0742 | 16698 | 1.365 | 0.7771 |
| ผลของความสูงคอลัมน์ | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | 10 | 5 | 55.44 | 0.6514 | 0.0261 | 0.9957 | 0.0513 | 247.0 | 0.0261 | 0.9957 | 0.0742 | 16698 | 1.365 | 0.7771 |
| 80 | 10 | 10 | 58.04 | 0.4363 | 0.0158 | 0.9978 | 0.0336 | 527.6 | 0.0158 | 0.9978 | 0.0597 | 15071 | 1.547 | 0.7830 |
| 80 | 10 | 15 | 59.20 | 0.3244 | 0.0443 | 0.9956 | 0.0251 | 742.4 | 0.0443 | 0.9956 | 0.0538 | 13055 | 1.770 | 0.8245 |
| ผลของอัตราการไหล | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | 5 | 5 | 59.33 | 0.4268 | 0.0751 | 0.9925 | 0.0335 | 470.2 | 0.0751 | 0.9925 | 0.0498 | 14662 | 2.151 | 0.7860 |
| 80 | 10 | 5 | 55.44 | 0.6514 | 0.0261 | 0.9957 | 0.0513 | 247.0 | 0.0261 | 0.9957 | 0.0742 | 16698 | 1.365 | 0.7771 |
| 80 | 15 | 5 | 51.33 | 0.8564 | 0.0173 | 0.9962 | 0.0672 | 142.6 | 0.0173 | 0.9962 | 0.0753 | 17729 | 1.352 | 0.7033 |

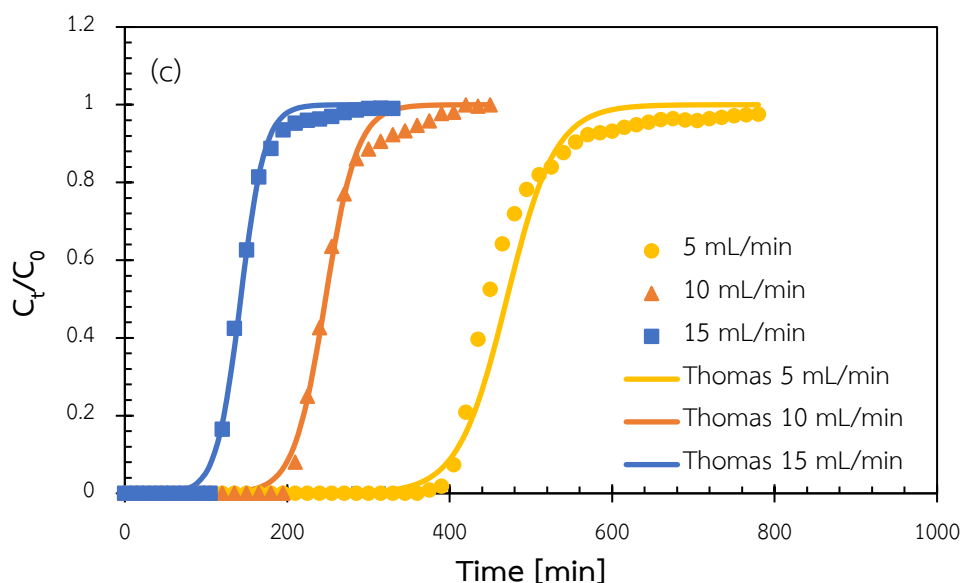
4.2.3.1 แบบจำลองของ Thomas

พารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองของ Thomas นั้นคือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับของ Thomas (k_{TH}) และประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_{TH}) โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเข้ากันกับแบบจำลองของ Thomas ดังรูปที่ 17 และจากตารางที่ 10 พบว่าแบบจำลองของ Thomas มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในช่วง 0.9978–0.9943 ซึ่งจากข้อมูลในตารางพบว่าเมื่อความสูงคอลัมน์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า q_{TH} มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 55.44 mg/g ที่ความสูงคอลัมน์ 5 cm เป็น 59.2 mg/g ที่ความสูงคอลัมน์ 15 cm แต่ค่า k_{TH} ลดลงจาก 0.6514 เป็น 0.3244 mL/min·mg เนื่องจากความยาวของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ไฮโดรฟลอกซาซินมีเวลาในการสัมผัสกับตัวดูดซับได้นานขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลลดลงและประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_{TH}) เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า k_{TH} เพิ่มขึ้น และ q_{TH} มีค่าลดลง โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 5 เป็น 15 cm³/min ทำให้ค่า k_{TH} เพิ่มขึ้นจาก 0.4268 เป็น 0.8564 mL/min·mg และ ค่า q_{TH} มีค่าลดลงจาก 59.33 เป็น 51.33 mg/g เนื่องจากอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้เวลาของไฮโดรฟลอกซาซินคงอยู่ในคอลัมน์ลดลง ซึ่งการแพร่ภายในรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราทำให้มีเวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดสมดุลของการดูดซับส่งผลให้ q_0 ลดลง

ค่า q_{TH} เพิ่มขึ้นแต่ k_{TH} ลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรฟลอกซาซินสูงขึ้น โดยค่า q_{TH} เพิ่มจาก 52.82 เป็น 55.44 mg/g และค่า k_{TH} ลดลงจาก 0.6627 เหลือ 0.6514 mL/min·mg เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรฟลอกซาซินเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 80 mg/L เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นทำให้แรงขับเคลื่อนสำหรับการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ q_{TH} เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นนั้นจะทำให้เกิดการต้านทานการถ่ายเทมวลส่งผลให้ k_{TH} ลดลง [46]





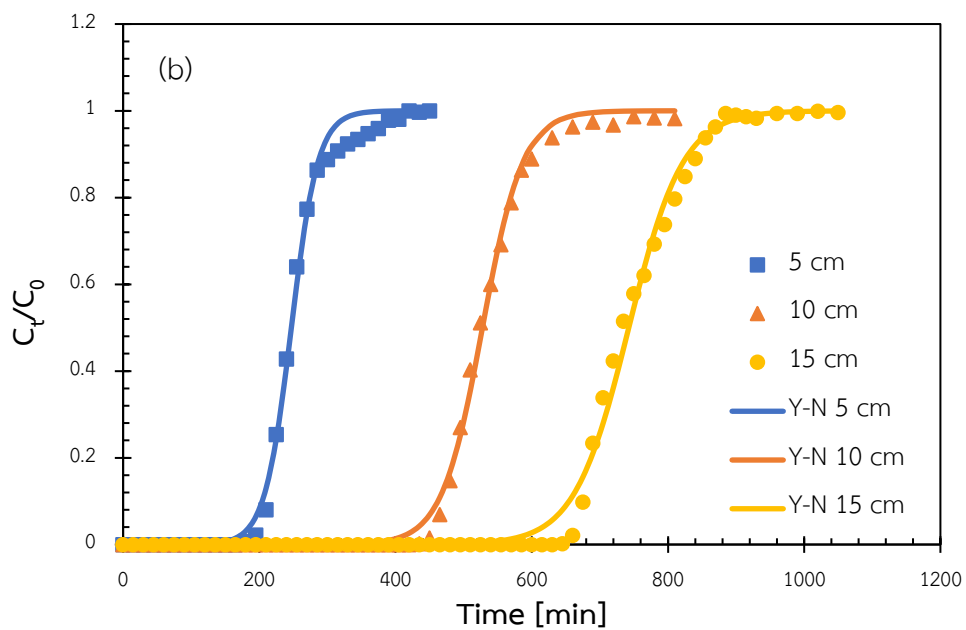
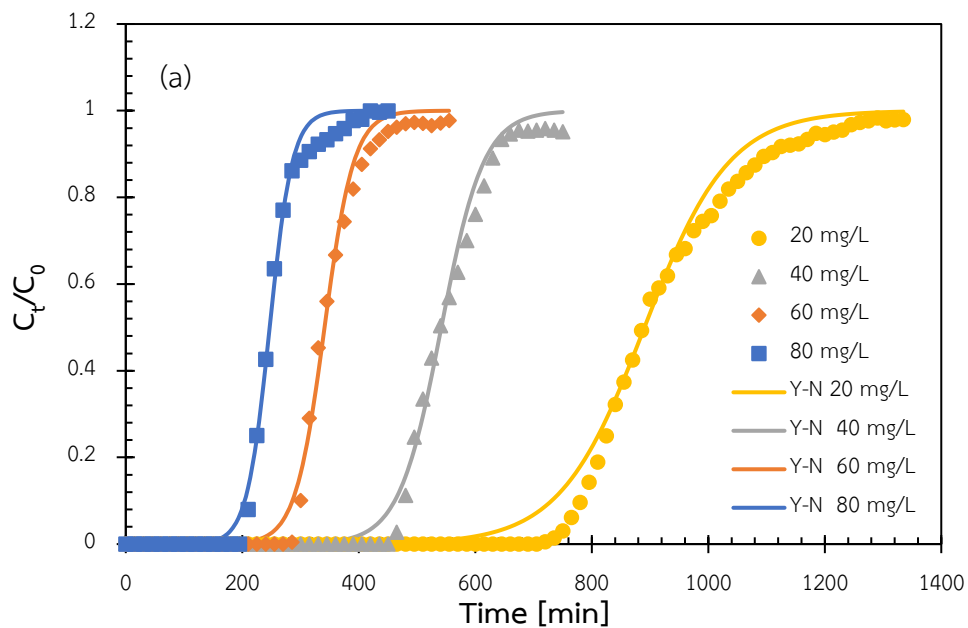
รูปที่ 17 กราฟเบรคทูรจากการคาดการณ์โดยใช้ แบบจำลองของ Thomas ในการดูดซับ ไอโซโพรพอลกอฮอล์ ของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน

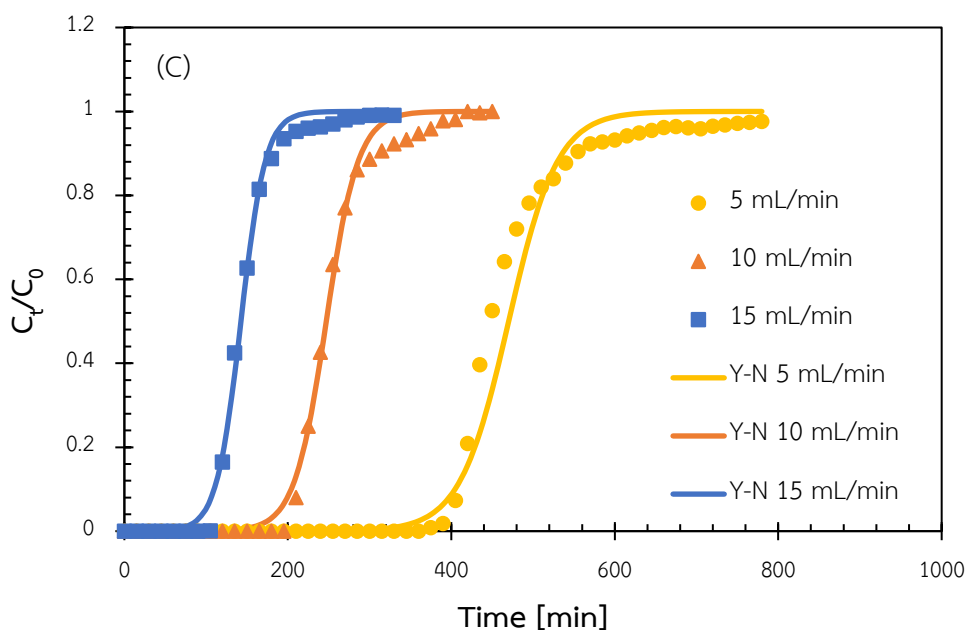
4.2.3.2 แบบจำลองของ Yoon-Nelson

พารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองของ Yoon-Nelson นั้นคือ ค่าคงที่อัตราของ Yoon-Nelson (k_Y) และ เวลา ณ ความเข้มข้นที่ 50 % ของกราฟเบรคทูร (T) โดยค่า k_Y และ T จะแสดงในตารางที่ 10 และรูปที่ 18 จากข้อมูลในตารางพบว่าค่าคงที่อัตราของ Yoon-Nelson (k_Y) ลดลงจาก 0.0513 เหลือ 0.0251 min^{-1} และเวลา ณ ความเข้มข้นที่ 50 % ของกราฟเบรคทูร (T) เพิ่มขึ้นจาก 247.0 เป็น 742.6 min เมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มจาก 5 เป็น 15 cm เนื่องจากมีปริมาณของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการสัมผัสกับตัวดูดซับที่นานขึ้น

อีกทั้งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นและอัตราการไหลของไอโซโพรพอลกอฮอล์ พบว่าค่า k_Y มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0138 เป็น 0.0513 min^{-1} เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 20 mg/L เป็น 80 mg/L และจาก 0.0335 เป็น 0.0672 min^{-1} เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 5 เป็น $15 \text{ cm}^3/\text{min}$ ในทางกลับกันค่า T ลดลงอย่างมากจาก 890.4 min เหลือ 247.0 min เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 20 mg/L เป็น 80 mg/L และเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจาก 5 เป็น $15 \text{ cm}^3/\text{min}$ ค่า T มีค่าลดลงจาก 470.2 min เหลือ 142.6 min เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นและอัตราการไหลส่งผลให้มีปริมาณของไอโซโพรพอลกอฮอล์ถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์ในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้เกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วของตัวดูดซับ

โดยแบบจำลองของ Yoon-Nelson นั้นมีความเข้ากันอย่างมากกับกราฟเบรกทรู โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในช่วง 0.9978–0.9943 และเมื่อเปรียบเทียบ τ ที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 9 เทียบกับ τ ที่ได้จากแบบจำลองของ Yoon-Nelson ในตารางที่ 10 พบว่าค่า τ ที่ได้จากแบบจำลองของ Yoon-Nelson นั้นมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 7% เมื่อเทียบกับค่า τ ที่ได้จากการทดลอง



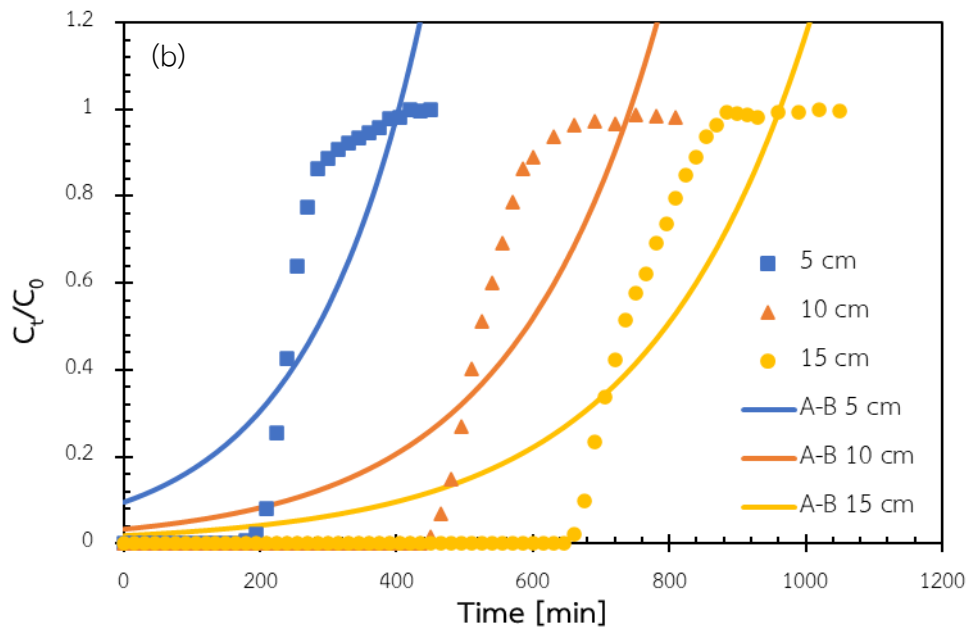
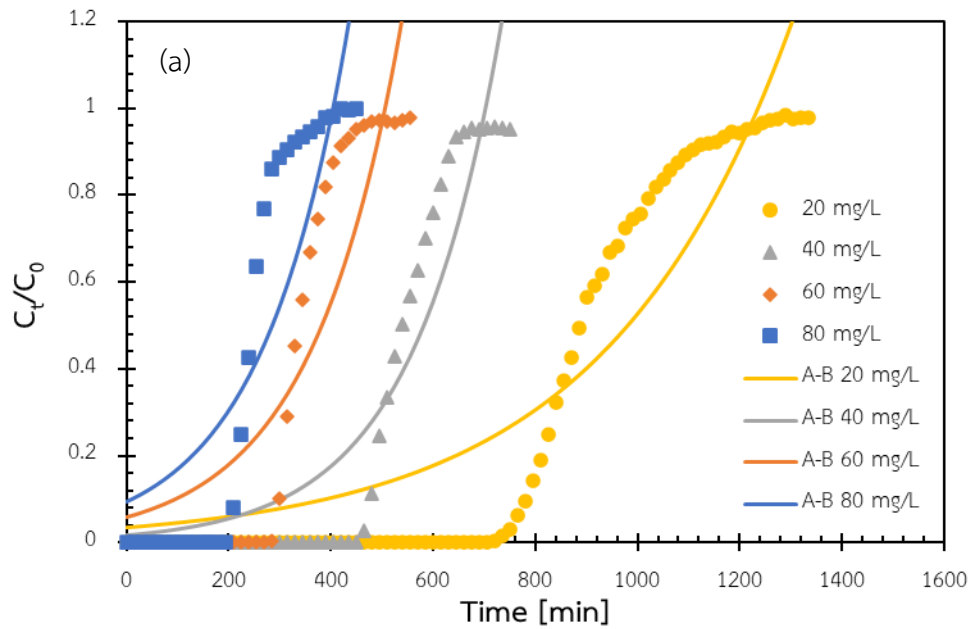


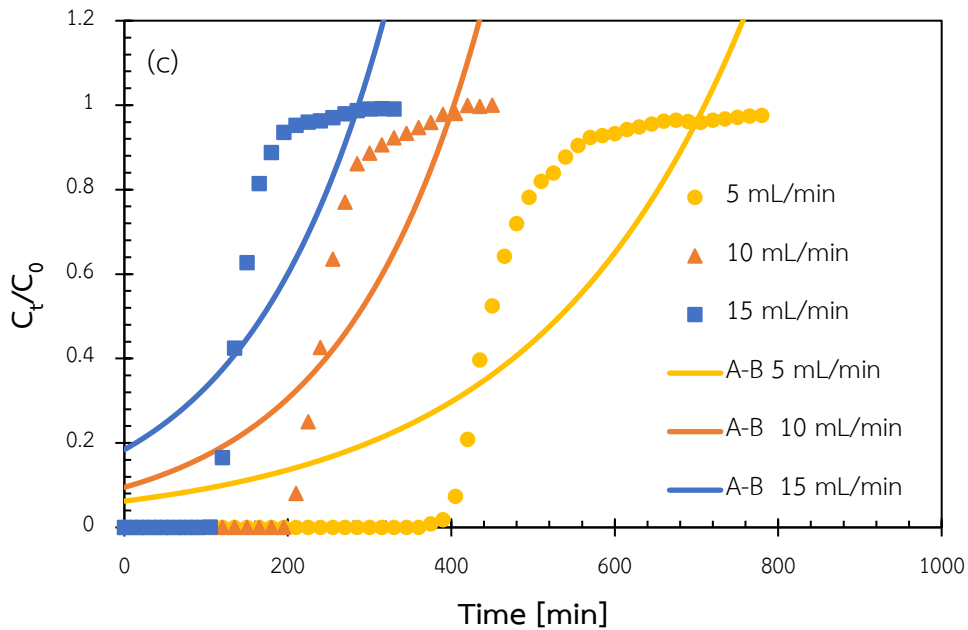
รูปที่ 18 กราฟเบรคทูรจากการคาดการณ์โดยใช้ แบบจำลองของ Yoon-Nelson ในการดูดซับ ไฮโปรฟลอกซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน

4.2.3.3 แบบจำลองของ Adams-Bohart

จากรูปที่ 19 จะแสดงการวิเคราะห์ผลโดยใช้แบบจำลองของ Adams-Bohart ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองคือ ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของ Adams-Bohart (k_A) และความเข้มข้น ณ สภาวะอิ่มตัว (N_0) ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 10 จากตารางพบว่าค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของ Adams-Bohart (k_A) มีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไฮโปรฟลอกซาซินและความสูงของคอลัมน์ โดยลดลงจาก 0.1310 เหลือ 0.0742 $\text{mL}/\text{min}\cdot\text{g}$ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 20 เป็น 80 mg/L และเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มจาก 5 เป็น 15 cm ค่า k_A มีค่าลดลงจาก 0.0742 เหลือ 0.0538 $\text{mL}/\text{min}\cdot\text{g}$ ในทางกลับกันค่า k_A มีค่าเพิ่มขึ้น 0.0498 เป็น 0.0753 $\text{mL}/\text{min}\cdot\text{g}$ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 15 cm^3/min ในขณะเดียวกันค่าความเข้มข้น ณ สภาวะอิ่มตัว (N_0) มีค่าลดลงเมื่อความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น เนื่องจากความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีเพิ่มขึ้นของตัวดูดซับที่มากขึ้นในการดูดซับไฮโปรฟลอกซาซิน ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไฮโปรฟลอกซาซินและอัตราการไหลนั้นส่งผลให้ N_0 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นและอัตราการไหลส่งผลให้มีปริมาณของไฮโปรฟลอกซาซินถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการบรรจุไฮโปรฟลอกซาซินในชั้นดูดซับเพิ่มขึ้น [47] โดยแบบจำลองของ Adams-Bohart นั้นมี

ความสัมพันธ์กับกราฟเบรคทอรัที่ค่อนข้างต่ำเมื่อดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) นั้นอยู่ในช่วง 0.8705-0.7033





รูปที่ 19 กราฟเบรคทูรจากการคาดการณ์โดยใช้ แบบจำลองของ Adams-Bohart ในการดูดซับ โคลโรฟลอคซาซินของไบโอชาร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ตามด้วยคาร์บอนเฮกเซนที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (a) ,ความสูงคอลัมน์ (b) และอัตราการไหล (c) ที่แตกต่างกัน

4.2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโคลโรฟลอคซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโคลโรฟลอคซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์พบว่า มีหลากหลายงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาดูดซับโคลโรฟลอคซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยใช้ตัวดูดซับที่มีความแตกต่างกันทั้งที่เป็นตัวดูดซับที่ได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติและจากวัตถุดิบสังเคราะห์ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับไบโอชาร์จากฮาร์ดบอร์ดที่สังเคราะห์ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 59.20 mg/g ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่ได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติ แต่น้อยกว่าตัวดูดซับจากคอมโพสิตของแกรไฟต์และไคติน (91.00 mg/g) และวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์จากอลูมิเนียม (101.70 mg/g) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มาจากวัตถุดิบสังเคราะห์ โดยข้อดีของการวิจัยนี้คือวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตตัวดูดซับนั้นมาจากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม ซึ่งมีราคาถูกและมีกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์บนวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

| วัสดุติดตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับ | S_{BET} (m^2/g) | V_T (cm^3/g) | ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm) | ความสูงคอลัมน์ (cm) | อัตราการไหล (mL/min) | ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (mg/g) | อ้างอิง |
|---|--------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------|---|-----------|
| กลุ่มที่ 1 วัสดุติดจากธรรมชาติ | | | | | | | | |
| Hardboard | 530 | NR | 2.50 | 15.0 | 10.0 | 80 | 59.20 | This work |
| Date stones | 852 | 0.67 | 3.15 | 25.0 | 0.5 | 150 | 2.09 | [31] |
| Sandy Silt Soil | 321 | NR | NR | 30.0 | 2.9 | 50 | 4.67 | [48] |
| Bentonite Clay | 88 | NR | NR | 7.0 | 0.4 | 17 | 72.20 | [33] |
| Activated sludge | 332 | 0.18 | 3.52 | 4.0 | 1.5 | 50 | 17.67 | [34] |
| Commercial granular activated carbon | 359 | 0.2 | 3.65 | 4.0 | 1.5 | 50 | 19.46 | [34] |
| Groundnut shell | NR | NR | NR | 4.0 | 5.0 | 80 | 5.84 | [35] |
| Sugarcane bagasse | 3 | 0.01 | 10.19 | 4 | 3.0 | 10 | 14.08 | [2] |
| กลุ่มที่ 2 วัสดุติดสังเคราะห์ | | | | | | | | |
| Chitin/graphene oxide | NR | NR | NR | 1.5 | 1.0 | NR | 91.00 | [36] |
| ZnO nanoparticles | 123 | 0.19 | 6.17 | 4.0 | 5.0 | 80 | 5.08 | [35] |
| Humic acid/cellulose | NR | 7.94 | NR | 13.0 | 2.0 | 10 | 5.02 | [38] |
| Al-based metal organic framework | 2 | 0.01 | 21.41 | 2.0 | 0.8 | 5 | 101.70 | [49] |
| Mesoporous silica | 496 | 0.50 | 2.50 | NR | 3.9 | 5 | 18.32 | [50] |

** NR = no report

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับ

จากการศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการดูดซับและการคาย การดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอนเซชันมากกว่า 700°C และผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ สามารถสร้างรูพรุนในช่วงมีโซได้ โดยเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนเซชันสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนในช่วงมีโซเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนเซชันที่ภายใต้ N_2 อุณหภูมิ 900°C (HC-BI-900) ให้ปริมาตรรูพรุนในช่วงมีโซสูงที่สุดเท่ากับ 0.42 cm^3/g

5.2 การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในกระบวนการดูดซับแบบกะ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับพบว่าฮาร์ดบอร์ดที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.1 M แล้วคาร์บอนเซชันภายใต้ N_2 ที่อุณหภูมิ 800°C (HC-BI-800) ในสองช่วงความเข้มข้นได้แก่ ช่วงความเข้มข้นสูง (5-300 mg/L) และช่วงความเข้มข้นต่ำ (1-10 mg/L) พบว่าทั้งสองช่วงความเข้มข้นมีพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9804 และ 0.9961 ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับเป็นกลไกแบบชั้นเดียว (monolayer) และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 60.99 และ 47.01 mg/g ตามลำดับ อีกทั้งในการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์พบว่าทั้งที่ความเข้มข้นสูง (70 mg/L) และที่ความเข้มข้นต่ำ (7 mg/L) มีความสอดคล้องกับแบบจำลอง PSO โดยมีค่าอัตราเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 30.06 และ 10.06 $\text{mg g}^{-1}\text{min}^{-1}$ ตามลำดับ

5.3 การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์

การศึกษาการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซิน, ความสูงคอลัมน์ และอัตราการ

ไหลโดยพบว่าเวลาของการดูดซับ ณ จุดเบรกทรู (t_b) , เวลาของการดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (t_e) และ %removal (%R) เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มความสูงคอลัมน์ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นส่งผลให้ t_b , t_e และ %R ลดลง โดยที่ความสูงของคอลัมน์ 15 cm อัตราการไหล 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 80 mg/L ให้ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_{TH}) สูงที่สุดที่ 59.20 mg/g

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ พบว่าแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson เหมาะสมสำหรับการอธิบายผลของของความเข้มข้นเริ่มต้นของไซโปรฟลอกซาซิน, ความสูงคอลัมน์ และอัตราการไหล เนื่องจากมีค่า R^2 ที่สูงเมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Adams-Bohart

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1.ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูไบโอชาร์ที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบการดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์
- 2.ควรมีการนำไบโอชาร์ที่ผ่านการดูดซับไซโปรฟลอกซาซินไปทำการวิเคราะห์ขั้นสูงเพื่อศึกษากลไกการดูดซับ
- 3.ควรมีการศึกษาที่ความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียที่ปนเปื้อนในน้ำจริงเช่น น้ำเสียจากโรงพยาบาล, ชุมชน และแม่น้ำ



การสร้างกราฟมาตรฐาน การดูดซับไซโปรฟลอกซาซิน และการคำนวณ

1. การสร้างกราฟมาตรฐาน

1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

- ชั่งสารไซโปรฟลอกซาซินมาตรฐานน้ำหนัก 1 g ใส่ขวดปรับปริมาตร 1 L ละลายด้วยน้ำ DI และปรับปริมาตรให้ครบ 1 L

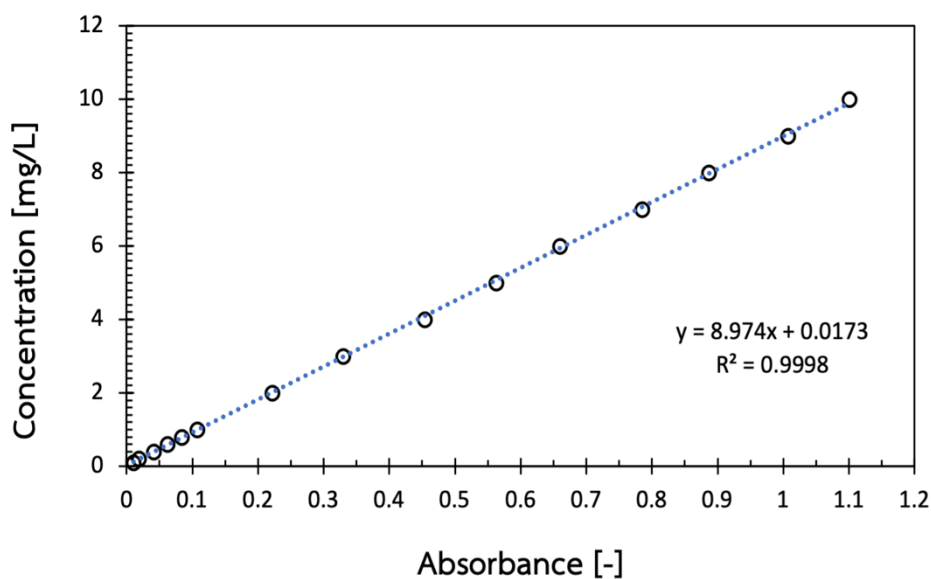
- เจือจางสารละลายมาตรฐานให้มีความเข้มข้นในช่วง 0.1-10 mg/L

- วัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

1.2 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสง

ตารางที่ 12 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไซโปรฟลอกซาซินมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 274 nm

| Concentration (mg/L) | Absorbance (ครั้งที่ 1) | Absorbance (ครั้งที่ 1) | Absorbance (ครั้งที่ 1) | Absorbance (เฉลี่ย) |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 0.1 | 0.011 | 0.010 | 0.012 | 0.011 |
| 0.2 | 0.018 | 0.019 | 0.019 | 0.019 |
| 0.4 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 |
| 0.6 | 0.063 | 0.062 | 0.061 | 0.062 |
| 0.8 | 0.084 | 0.084 | 0.085 | 0.084 |
| 1 | 0.106 | 0.110 | 0.108 | 0.108 |
| 2 | 0.222 | 0.223 | 0.222 | 0.222 |
| 3 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.330 |
| 4 | 0.454 | 0.455 | 0.454 | 0.454 |
| 5 | 0.563 | 0.563 | 0.562 | 0.563 |
| 6 | 0.662 | 0.660 | 0.658 | 0.660 |
| 7 | 0.785 | 0.785 | 0.784 | 0.785 |
| 8 | 0.887 | 0.887 | 0.887 | 0.887 |
| 9 | 1.006 | 1.007 | 1.008 | 1.007 |
| 10 | 1.101 | 1.101 | 1.100 | 1.101 |



รูปที่ 20 กราฟมาตรฐานของสารละลายไซโปรฟลอกซาซินที่ความยาวคลื่น 274 nm

1.3 การคำนวณความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน

กราฟความเข้มข้นมาตรฐานจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายไซโปรฟลอกซาซินที่ไม่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนโดยสามารถนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและทำการคำนวณผ่านสมการเชิงเส้นของกราฟความเข้มข้นของไซโปรฟลอกซาซินที่มาตรฐานเพื่อคำนวณกลับเป็นความเข้มข้น

สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน: $y = 8.974x + 0.0173$

โดยเมื่อนำสารละลายไซโปรฟลอกซาซินที่ไม่ทราบความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 274 nm ได้เท่ากับ 0.675 สามารถคำนวณหาความเข้มข้นได้ดังนี้

$$y = 8.974 (0.675) + 0.0173$$

$$y = 6.075$$

ดังนั้นสารละลายไซโปรฟลอกซาซินที่มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.675 มีความเข้มข้นเท่ากับ 6.075 mg/L

บรรณานุกรม

- [1] P. Krasucka, B. Pan, Y. Sik Ok, D. Mohan, B. Sarkar, and P. Oleszczuk, "Engineered biochar – A sustainable solution for the removal of antibiotics from water," *Chemical Engineering Journal*, vol. 405, p. 126926, 2021/02/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126926>.
- [2] M. E. Peñafiel, J. M. Matesanz, E. Vanegas, D. Bermejo, R. Mosteo, and M. P. Ormad, "Comparative adsorption of ciprofloxacin on sugarcane bagasse from Ecuador and on commercial powdered activated carbon," *Science of The Total Environment*, vol. 750, p. 141498, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141498>.
- [3] Y. Yan, X. Xu, C. Shi, W. Yan, L. Zhang, and G. Wang, "Ecotoxicological effects and accumulation of ciprofloxacin in Eichhornia crassipes under hydroponic conditions," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 29, pp. 30348-30355, 2019/10/01 2019, doi: 10.1007/s11356-019-06232-5.
- [4] J.-R. Li, Y.-X. Wang, X. Wang, B. Yuan, and M.-L. Fu, "Intercalation and adsorption of ciprofloxacin by layered chalcogenides and kinetics study," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 453, pp. 69-78, 2015/09/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.03.067>.
- [5] M. Bizi and F. E. El Bachra, "Evaluation of the ciprofloxacin adsorption capacity of common industrial minerals and application to tap water treatment," *Powder Technology*, vol. 362, pp. 323-333, 2020/02/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.047>.
- [6] M. Chiarello, L. Minetto, S. V. D. Giustina, L. L. Beal, and S. Moura, "Popular pharmaceutical residues in hospital wastewater: quantification and qualification of degradation products by mass spectroscopy after treatment with membrane bioreactor," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, no. 16, pp. 16079-16089, 2016/08/01 2016, doi: 10.1007/s11356-016-6766-2.
- [7] H. Bagheri, A. Roostaie, and M. Y. Baktash, "A chitosan–polypyrrole magnetic nanocomposite as μ -sorbent for isolation of naproxen," *Analytica Chimica Acta*,

- vol. 816, pp. 1-7, 2014/03/13/ 2014, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.01.028>.
- [8] W. Chiemchaisri, C. Chiemchaisri, N. S. Hamjinda, C. Jeensalute, P. Buranapakdee, and V. Thamlikitkul, "Field investigation of antibiotic removal efficacies in different hospital wastewater treatment processes in Thailand," *Emerging Contaminants*, vol. 8, pp. 329-339, 2022/01/01/ 2022, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.emcon.2022.07.002>.
- [9] A. Booth, D. S. Aga, and A. L. Wester, "Retrospective analysis of the global antibiotic residues that exceed the predicted no effect concentration for antimicrobial resistance in various environmental matrices," *Environment International*, vol. 141, p. 105796, 2020/08/01/ 2020, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105796>.
- [10] J. R. d. Andrade, M. F. Oliveira, M. C. d. Silva, and M. G. A. Vieira, "Adsorption of Pharmaceuticals from Water and Wastewater Using Nonconventional Low-Cost Materials: A Review," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 57, pp. 3103-3127, 2018.
- [11] T. Poshyananda, "รายงานประจำปี 2561," 2018.
- [12] F. A. Kamke, "Wood: Nonstructural Panel Processes," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veysière Eds. Oxford: Elsevier, 2001, pp. 9673-9678.
- [13] D. Pattnaik, S. Kumar, S. Bhuyan, and S. Mishra, "Effect of carbonization temperatures on biochar formation of bamboo leaves," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 338, p. 012054, 03/01 2018, doi:
10.1088/1757-899X/338/1/012054.
- [14] J. G. Speight, "Chapter 3 - Industrial Organic Chemistry," in *Environmental Organic Chemistry for Engineers*, J. G. Speight Ed.: Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 87-151.
- [15] X. Peng, F. Hu, T. Zhang, F. Qiu, and H. Dai, "Amine-functionalized magnetic bamboo-based activated carbon adsorptive removal of ciprofloxacin and norfloxacin: A batch and fixed-bed column study," *Bioresource Technology*, vol.

249, pp. 924-934, 2018/02/01/ 2018, doi:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.095>.

- [16] I. Langmuir, "THE CONSTITUTION AND FUNDAMENTAL PROPERTIES OF SOLIDS AND LIQUIDS. PART I. SOLIDS," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 38, no. 11, pp. 2221-2295, 1916/11/01 1916, doi: 10.1021/ja02268a002.
- [17] P. S. Ghosal and A. K. Gupta, "Determination of thermodynamic parameters from Langmuir isotherm constant-revisited," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 225, pp. 137-146, 2017/01/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.11.058>.
- [18] A. A. Inyinbor, F. A. Adekola, and G. A. Olatunji, "Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of Rhodamine B dye onto *Raphia hookeri* fruit epicarp," *Water Resources and Industry*, vol. 15, pp. 14-27, 2016/09/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.06.001>.
- [19] N. Ayawei, A. N. Ebelegi, and D. Wankasi, "Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms," *Journal of Chemistry*, vol. 2017, p. 3039817, 2017/09/05 2017, doi: 10.1155/2017/3039817.
- [20] H. Freundlich, "Über die Adsorption in Lösungen," vol. 57U, no. 1, pp. 385-470, 1907, doi: doi:10.1515/zpch-1907-5723.
- [21] P. Nanta, K. Kasemwong, and W. Skolpap, "Isotherm and Kinetic Modeling on Superparamagnetic Nanoparticles Adsorption of Polysaccharide," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, 12/01 2017, doi: 10.1016/j.jece.2017.12.063.
- [22] H. Yuh-Shan, "Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions," *Scientometrics*, vol. 59, no. 1, pp. 171-177, 2004/01/01 2004, doi: 10.1023/B:SCIE.0000013305.99473.cf.
- [23] Y.-S. Ho, "Review of second-order models for adsorption systems," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 136, no. 3, pp. 681-689, 2006/08/25/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>.
- [24] Z. Z. Chowdhury, S. M. Zain, A. K. Rashid, R. F. Rafique, and K. Khalid, "Breakthrough Curve Analysis for Column Dynamics Sorption of Mn(II) Ions from Wastewater by Using *Mangostana garcinia* Peel-Based Granular-Activated Carbon," *Journal of Chemistry*, vol. 2013, p. 959761, 2012/06/14 2013, doi:

- 10.1155/2013/959761.
- [25] M. S. Shafeeyan, W. M. A. Wan Daud, and A. Shamiri, "A review of mathematical modeling of fixed-bed columns for carbon dioxide adsorption," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 5, pp. 961-988, 2014/05/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.08.018>.
- [26] M. Ghasemi, A. R. Keshtkar, R. Dabbagh, and S. Jaber Safdari, "Biosorption of uranium(VI) from aqueous solutions by Ca-pretreated *Cystoseira indica* alga: Breakthrough curves studies and modeling," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, no. 1, pp. 141-149, 2011/05/15/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.011>.
- [27] R. Han, D. Ding, Y. Xu, W. Zou, Y. Wang, Y. Li, and L. Zou, "Use of rice husk for the adsorption of congo red from aqueous solution in column mode," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 8, pp. 2938-2946, 2008/05/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.027>.
- [28] Y. H. Yoon and J. H. Nelson, "Application of Gas Adsorption Kinetics I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life," *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 45, no. 8, pp. 509-516, 1984/08/01 1984, doi: 10.1080/15298668491400197.
- [29] A. D. Dorado, X. Gamisans, C. Valderama, M. Solé, and C. Lao, "Cr(III) removal from aqueous solutions: A straightforward model approaching of the adsorption in a fixed-bed column," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 49, no. 2, pp. 179-186, 2014/01/28 2014, doi: 10.1080/10934529.2013.838855.
- [30] K. H. Chu, "Fixed bed sorption: Setting the record straight on the Bohart–Adams and Thomas models," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 177, no. 1, pp. 1006-1012, 2010/05/15/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.019>.
- [31] T. M. Darweesh and M. J. Ahmed, "Adsorption of ciprofloxacin and norfloxacin from aqueous solution onto granular activated carbon in fixed bed column," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 138, pp. 139-145, 2017/04/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.12.032>.
- [32] S. Das, A. Barui, and A. Adak, "Montmorillonite impregnated electrospun

- cellulose acetate nanofiber sorptive membrane for ciprofloxacin removal from wastewater," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 37, p. 101497, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101497>.
- [33] R. Antonelli, G. R. P. Malpass, M. G. C. da Silva, and M. G. A. Vieira, "Fixed-Bed Adsorption of Ciprofloxacin onto Bentonite Clay: Characterization, Mathematical Modeling, and DFT-Based Calculations," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 60, no. 10, pp. 4030-4040, 2021/03/17 2021, doi: 10.1021/acs.iecr.0c05700.
- [34] A. Gupta and A. Garg, "Adsorption and oxidation of ciprofloxacin in a fixed bed column using activated sludge derived activated carbon," *Journal of Environmental Management*, vol. 250, p. 109474, 2019/11/15/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109474>.
- [35] N. Dhiman and N. Sharma, "Removal of ciprofloxacin hydrochloride from aqueous solution using vertical bed and sequential bed columns," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 4391-4398, 2018/08/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.064>.
- [36] J. A. González, J. G. Bafico, M. E. Villanueva, S. A. Giorgieri, and G. J. Copello, "Continuous flow adsorption of ciprofloxacin by using a nanostructured chitin/graphene oxide hybrid material," *Carbohydrate Polymers*, vol. 188, pp. 213-220, 2018/05/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.021>.
- [37] F. Feizi, A. K. Sarmah, and R. Rangsvivek, "Adsorption of pharmaceuticals in a fixed-bed column using tyre-based activated carbon: Experimental investigations and numerical modelling," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 417, p. 126010, 2021/09/05/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126010>.
- [38] L. Wang, C. Yang, A. Lu, S. Liu, Y. Pei, and X. Luo, "An easy and unique design strategy for insoluble humic acid/cellulose nanocomposite beads with highly enhanced adsorption performance of low concentration ciprofloxacin in water," *Bioresource Technology*, vol. 302, p. 122812, 2020/04/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122812>.
- [39] S. Damdib, N. Vanichsetakul, P. Pimpapoat, S. Mikhalovsky, R. Busquets, A. Siyasukh, and N. Tonanon, "Removal of Reactive Black Dye in Water by Magnetic

- Mesoporous Carbon from Macadamia Nutshell," *Adsorption Science & Technology*, vol. 2022, p. 9884474, 2022/12/06 2022, doi: 10.1155/2022/9884474.
- [40] J. Escalante, W.-H. Chen, M. Tabatabaei, A. T. Hoang, E. E. Kwon, K.-Y. Andrew Lin, and A. Saravanakumar, "Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112914, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112914>.
- [41] V. H. Nguyen, H. T. Van, V. Q. Nguyen, X. V. Dam, L. P. Hoang, and L. T. Ha, "Magnetic Fe₃O₄ Nanoparticle Biochar Derived from Pomelo Peel for Reactive Red 21 Adsorption from Aqueous Solution," *Journal of Chemistry*, vol. 2020, p. 3080612, 2020/06/13 2020, doi: 10.1155/2020/3080612.
- [42] D. Balarak, A. H. Mahvi, M. J. Shim, and S. Leec, "Adsorption of ciprofloxacin from aqueous solution onto synthesized NiO: isotherm, kinetic and thermodynamic studies," 2021.
- [43] K.-W. Jung, T.-U. Jeong, J.-W. Choi, K.-H. Ahn, and S.-H. Lee, "Adsorption of phosphate from aqueous solution using electrochemically modified biochar calcium-alginate beads: Batch and fixed-bed column performance," *Bioresource Technology*, vol. 244, pp. 23-32, 2017/11/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.133>.
- [44] U. Kumari, A. Mishra, H. Siddiqi, and B. C. Meikap, "Effective defluoridation of industrial wastewater by using acid modified alumina in fixed-bed adsorption column: Experimental and breakthrough curves analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, p. 123645, 2021/01/10/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123645>.
- [45] T. M. Darweesh and M. J. Ahmed, "Batch and fixed bed adsorption of levofloxacin on granular activated carbon from date (Phoenix dactylifera L.) stones by KOH chemical activation," *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 50, pp. 159-166, 2017/03/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.02.005>.

- [46] R. G. Mavinkattimath, V. Shetty Kodialbail, and G. Srinikethan, "Continuous fixed-bed adsorption of reactive azo dye on activated red mud for wastewater treatment-Evaluation of column dynamics and design parameters," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 19, pp. 57058-57075, 2023/04/01 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26210-2.
- [47] N. Fallah and M. Taghizadeh, "Continuous fixed-bed adsorption of Mo(VI) from aqueous solutions by Mo(VI)-IIP: Breakthrough curves analysis and mathematical modeling," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, no. 5, p. 104079, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104079>.
- [48] P. Zhao, Y. Wu, and F. Yu, "Experimental Data and Modeling the Adsorption-Desorption and Mobility Behavior of Ciprofloxacin in Sandy Silt Soil," *Water*, vol. 14, no. 11, doi: 10.3390/w14111728.
- [49] N. Kim, B. Cha, Y. Yea, L. K. Njaramba, S. Vigneshwaran, S. S. Elanchezhian, and C. M. Park, "Effective sequestration of tetracycline and ciprofloxacin from aqueous solutions by Al-based metal organic framework and reduced graphene oxide immobilized alginate biosorbents," *Chemical Engineering Journal*, vol. 450, p. 138068, 2022/12/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138068>.
- [50] D. Lu, S. Xu, W. Qiu, Y. Sun, X. Liu, J. Yang, and J. Ma, "Adsorption and desorption behaviors of antibiotic ciprofloxacin on functionalized spherical MCM-41 for water treatment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 264, p. 121644, 2020/08/10/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121644>.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | ศุภณัฐ ตันทวนิชย์ |
| วัน เดือน ปี เกิด | 5 มีนาคม 2541 |
| สถานที่เกิด | เชียงใหม่ |
| วุฒิการศึกษา | วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 6 หมู่ 16 ถ.พระเจ้าทันใจ ต.ป่อแฮ้ว อ.เมือง จ.ลำปาง 52100 |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY