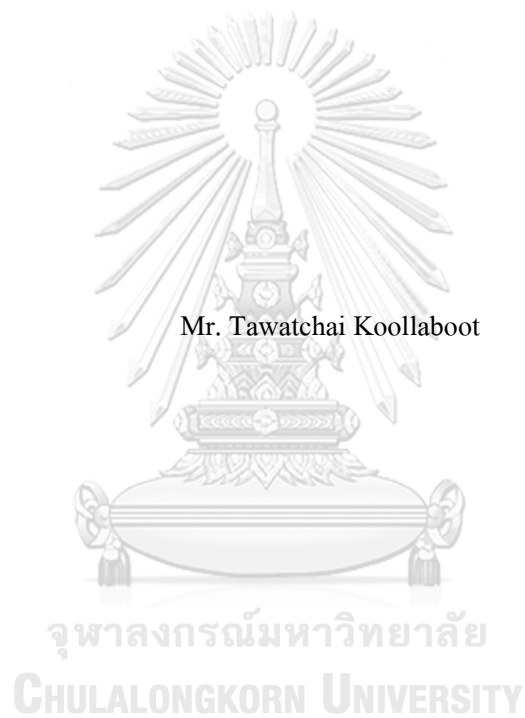


การดูดซับสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 โดยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

ADSORPTION OF REACTIVE BLACK 5 USING ACTIVATED CARBON FROM SPENT
COFFEE GROUND



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	การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 โดยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ
โดย	นายรัชชัยย์ คุลบุตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร โทณานนท์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิ ประเสริฐเจริญสุข)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชญชญา ธนชยานนท์)	

6372058821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Activated carbon, Column adsorption, Reactive black dye

Tawatchai Koolaboot : ADSORPTION OF REACTIVE BLACK
5 USING ACTIVATED CARBON FROM SPENT COFFEE GROUND. Advisor:
Asst. Prof. NATTAPORN TONANON, D.Eng.

In this research, spent coffee grounds (SCG) were used as precursors for the synthesis of activated carbon to remove reactive black 5 dye (RB5) from aqueous solutions through batch and column adsorption processes. Activated carbon is produced by wet impregnation of zinc chloride solution on SCG, followed by carbonization in N_2 atmosphere. Activated carbon from SCG from an instant coffee factory, carbonized at $600^\circ C$. Chemical activation at the weight ratio of SCG to the analytical reagent grade zinc chloride of 1:3 (Z3-IC600) supported the formation of a large number of mesopores ($V_{meso} = 1.03 \text{ cm}^3/\text{g}$) and a high specific surface area ($S_{BET} = 1260.39 \text{ m}^2/\text{g}$), while the char obtained from SCG that was not activated by zinc chloride had a total pore volume of $0.04 \text{ cm}^3/\text{g}$. The presence of mesopores in the sample (Z3-IC600) resulted in the highest adsorption capacity of RB5 based on the Langmuir model (q_m) of 120.39 mg/g . In the column adsorption process, the chosen adsorbent was activated carbon synthesized by activation with a weight ratio of SCG to commercial-grade zinc chloride of 1:3 and carbonized at $600^\circ C$. Commercial-grade zinc chloride was less costly than analytical reagent grade zinc chloride and the porosity properties of activated carbon and adsorption capacity of RB5 were similar to those activated by analytical reagent grade zinc chloride ($S_{BET} = 1225.39 \text{ m}^2/\text{g}$, $V_{meso} = 0.92 \text{ cm}^3/\text{g}$, and $q_m = 113.01 \text{ mg/g}$). The adsorbent had an adsorption capacity at the column saturation point (q_c) of 60.40 mg/g at an initial concentration of 100 mg/L , a flow rate of 10 mL/min , and a bed height of 5 cm .

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2023

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ในหัวข้อ “การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 โดยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและคำปรึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์ ซึ่งให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางรวมถึงให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการทุนสนับสนุนการตีพิมพ์ผลงานวิชาการ จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนวิจัย ในการสร้างสรรค์วิจัยนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช ที่ให้เกียรติเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิ ประเสริฐเจริญสุข และดร.ชญชญา ธนชยานนท์ ซึ่งเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่มีส่วนให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ธวัชชัย คุลบุตร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฉ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	1
บทที่ 1	5
บทนำ.....	5
1.1 แรงจูงใจ เหตุผลและที่มา.....	5
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2	9
ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 กาแฟ (coffee).....	9
2.2 สีข้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 (reactive black 5 dye).....	9
2.3 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)	10
2.4 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์	10

2.4.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)	10
2.4.2 การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)	10
2.5 กระบวนการดูดซับ (adsorption).....	11
2.6 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ (isotherm batch-adsorption models).....	11
2.7 การดูดซับแบบคอลัมน์ (column adsorption).....	12
2.7.1 กราฟเบรคทรู (breakthrough curve).....	13
2.7.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบดูดซับแบบคอลัมน์	14
2.7 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ	16
2.8 การดูดซับสีข้อมริแอกทีฟแบล็ค 5	17
บทที่ 3	21
การทดลอง.....	21
3.1 วัสดุ.....	21
3.1.1 กากกาแฟ.....	21
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	22
3.2 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี	22
3.2.1 การเตรียมกากกาแฟ.....	22
3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากกาแฟ	22
3.2.3 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี	22
3.3 การทดสอบคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี.....	23
3.3.1 Field Emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (FESEM-EDS: JEOL JSM-7610F)	23
3.3.2 Nitrogen adsorption-desorption apparatus (Micromeritics Model 3Flex)	23
3.3.3 Thermogravimetric analysis (TGA: Q50 V6.7 Build 203)	24

3.3.4 X-ray diffractometer (XRD: Bruker AXS Model D8 Discover)	24
3.4 การศึกษาการดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ (batch adsorption)	24
3.4.1 ผลของวัสดุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟ	24
3.4.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น	24
3.4.3 สมดุลการดูดซับ	25
3.5 การศึกษาการดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ (column adsorption)	25
3.5.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น	25
3.5.2 ผลของอัตราการไหล	25
3.5.3 ผลของความสูงของเบดนี้้ง	25
3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5	25
3.6.1 UV-Visible spectrophotometer	25
บทที่ 4	27
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	27
4.1 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ	27
4.1.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์	28
4.1.1.1 ผลของอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์	28
4.1.1.2 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนเซชัน	30
4.1.1.3 ผลของแหล่งที่มาของกากกาแฟ	32
4.1.1.4 ผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์	34
4.1.2 ผลขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในกากกาแฟที่มีต่อสมบัติความเป็นรูพรุน	37
4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของกากกาแฟ	39
4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและการจัดเรียงตัวของผลึก	41
4.1.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	42
4.2 การดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ (batch adsorption)	46

4.2.1 การศึกษาผลของวัสดุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟ	46
4.2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นภายใต้สภาวะการสังเคราะห์ต่าง ๆ.....	47
4.2.1.1 ผลของอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์.....	47
4.2.1.2 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน	48
4.2.1.3 ผลของแหล่งที่มาของกากกาแฟ	49
4.2.1.4 ผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์	50
4.2.3 สมดุลการดูดซับ	51
4.2.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ.....	52
4.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ วัสดุดูดซับต่าง ๆ	58
4.3 การดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ (column adsorption)	60
4.3.1 การศึกษาการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายใต้สภาวะการดูดซับต่าง ๆ	61
4.3.1.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น (initial concentration)	61
4.3.1.2 ผลของอัตราการไหล (flow rate)	62
4.3.1.3 ผลของความสูงของเบดนิ่ง (bed high)	63
4.3.2 การศึกษาการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า	64
4.3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ ของวัสดุดูดซับต่าง ๆ..	66
4.3.4 แบบจำลองการดูดซับแบบคอลัมน์ (models of column adsorption)	68
4.3.5 การออกแบบคอลัมน์การดูดซับขนาดใหญ่ (Scale-up design)	75
บทที่ 5	78
สรุปผลการทดลอง	78
5.1 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์	78
5.2 การดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ	79
5.3 การดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์	80
5.4 ข้อเสนอแนะ	81

ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก สมการที่ใช้คำนวณพารามิเตอร์ของคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุน	83
1. สมการ Brunauer-Emmett- Teller (BET) สำหรับการคำนวณพื้นที่ผิว BET	83
2. สมการของ Dubinin-Radushkevich (D-R) เพื่อคำนวณรูพรุนชนิดไมโครพอร์	84
3. สมการ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) สำหรับรูพรุนชนิดมีโซ (H ₃ hysteresis loop) และการกระจายตัวรูพรุน	84
ภาคผนวก ข คุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-AC).....	85
ภาคผนวก ค ข้อมูลพื้นฐานสารเคมีซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม	86
ภาคผนวก ง การดูดซับสี่เหลี่ยมรีแอกทีฟแบล็ค 5	87
1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน	87
2. การดูดซับสารละลายสี่เหลี่ยมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ	89
3. การดูดซับสารละลายสี่เหลี่ยมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์	94
ภาคผนวก จ ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์.....	95
บรรณานุกรม	96
ประวัติผู้เขียน	109

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แผนดำเนินงาน8

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณเนื้อที่ปลูกและผลผลิตกาแฟในประเทศไทยปี 2565.....9

ตารางที่ 3 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์17

ตารางที่ 4 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์19

ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....21

ตารางที่ 6 แสดงสภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์.....27

ตารางที่ 7 แสดงชนิดของไอโซเทอม พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์และปริมาตรรูพรุนชนิดเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์36

ตารางที่ 8 แสดงองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในกากกาแฟ38

ตารางที่ 9 แสดง %burn-off ของกากกาแฟในแต่ละแหล่งที่มา41

ตารางที่ 10 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟ43

ตารางที่ 11 แสดง %Removal และปริมาณการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ณ สภาวะสมดุล (q_{eq}) สำหรับวัสดุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟ47

ตารางที่ 12 แสดงค่าคงที่แบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich สำหรับการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 558

ตารางที่ 13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบกะ ของวัสดุดูดซับต่าง ๆ .59

ตารางที่ 14 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณของการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์65

ตารางที่ 15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ ของวัสดุดูดซับต่าง ๆ67

ตารางที่ 16 แสดงค่าคงที่ตามแบบจำลอง Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-bohart สำหรับการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์74

ตารางที่ 17 แสดงการคำนวณ Filtration rate และ Empty bed contact time ของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ	75
ตารางที่ 18 แสดงการคำนวณตัวแปรของคอลัมน์ที่ออกแบบ	76
ตารางที่ 19 แสดงตัวแปรของคอลัมน์ที่ออกแบบ	77
ตารางที่ 20 แสดงส่วนประกอบของเกรดซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม	86
ตารางที่ 21 ค่าการดูดกลืนแสงสารละลายซีอีเอ็มรีแอคทีฟแบล็ค 5 ที่ความยาวคลื่น 598 nm	87
ตารางที่ 22 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl ₂ ที่ 1:1 (Z1-IC600)	89
ตารางที่ 23 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl ₂ ที่ 1:2 (Z2-IC600)	89
ตารางที่ 24 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl ₂ ที่ 1:3 (Z3-IC600)	90
ตารางที่ 25 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500)	90
ตารางที่ 26 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 700°C (Z3-IC700)	91
ตารางที่ 27 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600)	91
ตารางที่ 28 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600)	92
ตารางที่ 29 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl ₂)	93
ตารางที่ 30 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-AC)	93
ตารางที่ 31 แสดงค่า Superficial velocity, Residence time, และ Empty bed contact time (EBCT)	94
ตารางที่ 32 แสดงผลการทดสอบจากเครื่องมือ Gas Pycnometer	95



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลสี่อ้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5.....	9
ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและเคมี.....	11
ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างกราฟเบรคทรู.....	13
ภาพที่ 4 แสดงแผนผังการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	23
ภาพที่ 5 แสดงแผนผังการทดลองการดูดซับสี่อ้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์.....	26
ภาพที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600°C (Char-SCG).....	29
ภาพที่ 7 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C.....	29
ภาพที่ 8 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C.....	30
ภาพที่ 9 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700°C (Z3-IC700).....	31
ภาพที่ 10 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700 °C (Z3-IC700).....	32

- ภาพที่ 11 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C33
- ภาพที่ 12 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C34
- ภาพที่ 13 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 (Com-ZnCl₂) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C35
- ภาพที่ 14 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 (Com-ZnCl₂) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C36
- ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %weight loss กับอุณหภูมิ (TGA) และ Deriv. Weight Change (%/°C) กับอุณหภูมิ (DTA) ของกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CC-SCG) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (LC-SCG) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (IC-SCG).....40
- ภาพที่ 16 X-ray diffraction pattern ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C42

ภาพที่ 17 แสดงสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [a, d] ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [b, e] และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป [c, f] โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C44

ภาพที่ 18 แสดงสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [a, d] ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [b, e] และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป [c, f] โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C45

ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C.....47

ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนในเซชันที่ อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700°C (Z3-IC700)48

ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C49

ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่กระตุ้นในอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 (Com-ZnCl₂) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C50

ภาพที่ 22 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (a), 1:2 (b) และ 1:3 (c) โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C	54
ภาพที่ 23 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (a), 600°C (b) และ 700°C (c)	55
ภาพที่ 24 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (a) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (b) และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (c) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C	56
ภาพที่ 25 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (a) และเกรดอุตสาหกรรม ที่ 1:3 (b) โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C	57
ภาพที่ 26 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่สังเคราะห์ได้จากกะลามะพร้าว ซึ่งมีค่า Iodine Number เท่ากับ 1000 mg/g	57
ภาพที่ 27 แสดงกราฟเบรคทรูสำหรับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 60, 80 และ 100 mg/L ภายใต้สภาวะการดูดซับที่อัตราการไหล 10 mL/min และความสูงเบดนิ่ง 5 cm.....	62
ภาพที่ 28 แสดงกราฟเบรคทรูสำหรับผลของอัตราการไหลที่ 10, 12.5 และ 15 mL/min ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และความสูงเบดนิ่ง 5 cm	63
ภาพที่ 29 แสดงกราฟเบรคทรูสำหรับผลของความสูงเบดนิ่งที่ 5, 10 และ 15 cm ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และอัตราการไหล 10 mL/min	64
ภาพที่ 30 แสดงกราฟเบรคทรูของ Com-AC ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L อัตราการไหล 10 mL/min และความสูงเบดนิ่ง 5 cm.....	65

ภาพที่ 31 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 60 mg/L ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c).....70

ภาพที่ 32 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 80 mg/L ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c).....70

ภาพที่ 33 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100 mg/L ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c).....71

ภาพที่ 34 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของอัตราการไหลที่ 12.5 mL/min ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)71

ภาพที่ 35 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของอัตราการไหลที่ 15 mL/min ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)72

ภาพที่ 36 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความสูงเบดนิ่ง 10 cm ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)72

ภาพที่ 37 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความสูงเบดนิ่ง 15 cm ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)73

ภาพที่ 38 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของ Com-AC85

ภาพที่ 39 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ของ Com-AC85

ภาพที่ 40 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายซีอีเอ็มรีแอกทีฟแบบลึค 5 ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 598 nm.....88

อักษรย่อและสัญลักษณ์

SCG	=	กากกาแฟที่ใช้แล้ว (spent coffee grounds)
P-SCG	=	กากกาแฟจากร้านกาแฟในเมืองแทจอน ประเทศเกาหลีใต้
SCG:ZnCl ₂	=	อัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์
Char-SCG	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C
AC-No-HCl	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่ผ่านกระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ 1:3 อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600°C และไม่ทำการล้างด้วย HCl ก่อนนำไปใช้งาน
CC-SCG	=	กากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
IC-SCG	=	กากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป
LC-SCG	=	กากกาแฟจากร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Z1-IC600	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่ผ่านกระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ 1:1 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600°C
Z2-IC600	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่ผ่านกระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ 1:2 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600°C
Z3-IC600	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่ผ่านกระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600°C
Z3-IC500	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่ผ่านกระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 500°C
Z3-IC700	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่ผ่านกระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 700°C

Z3-CC600	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ผ่านกระบวนการเคมีในอัตราส่วนมวลกากกาแฟ ต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600°C
Z3-LC600	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ผ่านกระบวนการเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C
Com-ZnCl ₂	=	ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่ผ่านกระบวนการเคมีในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดอุตสาหกรรม 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C
Com-AC	=	ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว (Iodine Number เท่ากับ 1000 mg/g) โดยบริษัทคาร์โบกาญจน์ จำกัด
RB5	=	สีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5
K _L	=	ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)
R _L	=	Dimensionless equilibrium parameter
K _f	=	ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (mg/g)(l/mg) ^{1/n}
S _{BET}	=	พื้นที่ผิวจำเพาะที่คำนวณได้จากแบบจำลอง BET
V _{total}	=	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด
V _{micro}	=	ปริมาตรรูพรุนในช่วงไมโครพอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง D-R
V _{meso}	=	ปริมาตรรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง BJH
d _p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)
rpm	=	รอบต่อนาที
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส (J/mol.K)
ZnCl ₂	=	ซิงค์คลอไรด์
HCl	=	ไฮโดรคลอริก
%	=	ร้อยละ
°C	=	องศาเซลเซียส
cm	=	เซนติเมตร
cm ³	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
C ₀	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น
C _e	=	ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุล

C_t	=	ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ
F	=	ความเร็วในการไหลผ่านตัวกลางอยู่กับที่
g	=	กรัม
$hr.$	=	ชั่วโมง
V_b	=	ปริมาตรน้ำสังเคราะห์ที่ถูกกำจัดสี่อ้อมรีแอกทีฟแบดส์ 5 ออกไปมากกว่า 95% ณ ขาออกของคอลัมน์
K_{AB}	=	ค่าคงที่ของ Adams-Bohart (L/mg.min)
K_{Th}	=	อัตราค่าคงที่ของ Thomas (mL/mg.min)
K_{YN}	=	คือค่าคงที่ของ Yoon และ Nelson (1/min)
n_F	=	ความเข้มของการดูดซับ (dimensionless parameter)
R^2	=	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
L	=	ลิตร
M	=	มวลของตัวดูดซับในคอลัมน์ (g)
m^2	=	ตารางเมตร
m^3	=	ลูกบาศก์เมตร
mg	=	มิลลิกรัม
kg	=	กิโลกรัม
mL	=	มิลลิลิตร
mol	=	โมล
min	=	นาที
MTZ	=	บริเวณการถ่ายเทมวล
H_{MTZ}	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ (cm)
N_0	=	ความเข้มข้นอิ่มตัว (mg/L)
nm	=	นาโนเมตร
NR	=	ไม่มีการรายงาน
N/D	=	ไม่มีการปรากฏ
pH	=	potential of hydrogen (เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรดเป็นเบส)
Q	=	อัตราการไหลของ (mL/min)
q_b	=	ความสามารถในการดูดซับ ณ จุดเบรคทู (mg/g)
q_c	=	ความสามารถในการดูดซับ ณ จุดอิ่มตัว (mg/g)

q_{eq}	=	ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล สำหรับการดูดซับแบบกะ (mg/g)
q_m	=	ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)
q_{Th}	=	ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดบนตัวดูดซับ แบบจำลอง Thomas (mg/g)
t	=	ที่เวลาใด ๆ (min)
t_b	=	เวลาเบรคทรู หรือเวลาจากเริ่มต้นจนถึง breakthrough point (min)
t_c	=	เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดอิ่มตัว (min)
τ	=	เวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับบนเส้นเบรคทรู (min)
F	=	คือความเร็วในการไหลผ่านตัวกลางอยู่กับที่ (cm/min)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (mL)
W	=	น้ำหนักของวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (mg)
H_L	=	ความสูงของตัวกลางอยู่กับที่ (cm)
FR	=	Filtration rate (cm/min)
Q_L	=	อัตราการไหลของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (cm ³ /min)
A_L	=	พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (cm ²)
$EBCT$	=	Empty bed contact time (min)
V_{BL}	=	ปริมาตรของเบดนิ่งสำหรับคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (cm ³)
A_D	=	พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm ²)
Q_D	=	อัตราการไหลของคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm ³ /min)
H_{BD}	=	ความสูงของเบดสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm)
V_{BD}	=	ปริมาตรของเบดนิ่งสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm ³)
M_D	=	มวลของตัวดูดซับที่ต้องการสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (kg)
ρ_{AC}	=	ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ (g/m ³)
t_L	=	เวลา ณ จุดเบรคทรูของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (min)
V_{BDT}	=	ปริมาตรน้ำ ณ จุดเบรคทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm ³)
M_{CR}	=	อัตราการถูกใช้ไปของตัวดูดซับสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (g)
M_{AC}	=	ปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกใช้ไปสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (kg)
q_{max}	=	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับหรือ q_m (mg/g)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แรงจูงใจ เหตุผลและที่มา

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ความต้องการใช้ยาฆ่าเชื้อและเครื่องแต่งกายของคนปัจจุบันมีความต้องการสีที่หลากหลายมากขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสสังคมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องมีการเติบโตขึ้นอย่างก้าวกระโดด [1] หนึ่งในนั้นคืออุตสาหกรรมสีย้อม กล่าวคือ โรงงานฟอกย้อมมีความต้องการใช้สีย้อมในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งเหตุการณ์นี้ส่งผลให้เกิดน้ำเสียจำนวนมากที่ปนเปื้อนด้วยสีสังเคราะห์ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยแต่ละปีมีการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมากกว่า 2 แสนตัน และในบรรดาสีย้อมทั้งหมด สีย้อมกลุ่มอะโซ คือเป็นสีย้อมที่ใช้กันมากที่สุดซึ่งคิดเป็น 60-70% ของสีย้อมทั้งหมดที่ผลิตต่อปี [2, 3] สีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 เป็นหนึ่งในสีย้อมกลุ่มอะโซที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากมีราคาถูกและความคงทนของสีที่สูง แต่ข้อเสียสำคัญของสีย้อมกลุ่มนี้คือ โครโมฟอร์ที่มีอยู่ในโครงสร้างก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งในคนและสัตว์ [4, 5] ดังนั้นการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญอย่างมาก แต่เนื่องจากสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 มีคุณสมบัติที่เสถียรต่อแสง ความร้อน ออกซิเดชัน และการย่อยสลายทางชีวภาพ [6] ส่งผลให้ที่ผ่านมาวิธีการกำจัดสีย้อม เช่น วิธีการสร้างและรวมตะกอน (coagulation-flocculation) และการเลี้ยงตะกอนเร่ง (activated sludge) [7] ไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างสมบูรณ์และนำมาซึ่งการผลิตกากตะกอนในปริมาณสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ระบบบำบัดขั้นสูง ยกตัวอย่างเช่น การกรองด้วยเมมเบรน (membrane filtration) [8, 9] การเติม โอโซน (ozonation) [10] และกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation process) [11-15] เพื่อกำจัดสีย้อมอย่างสมบูรณ์ซึ่งวิธีเหล่านี้ต้องเผชิญกับข้อจำกัดในแง่ต้นทุนสูงที่ตามมา ท่ามกลางกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งที่หลากหลายนี้ กระบวนการการดูดซับถือเป็นหนึ่งในเทคนิคการบำบัดที่โดดเด่นที่สุด เนื่องจากมีความเรียบง่าย ราคาไม่แพง ประสิทธิภาพสูง [16, 17] ซึ่งวัสดุดูดซับที่นิยมใช้ส่วนใหญ่มาจากถ่านกัมมันต์ซึ่งถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่ใช้กันทั่วไปมีคุณสมบัติเด่นคือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีรูพรุนไมโครพอร์ปริมาณมากซึ่งในการดูดซับสารโมเลกุลใหญ่และมีความซับซ้อนจะให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันทั่วไปสามารถสังเคราะห์ได้จากชีวมวลพืช ฝักไถ่และถ่านหิน โดยปัจจุบันวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมกำลังเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์เนื่องจากมีปริมาณมาก ราคาถูกและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [18, 19] ในกลุ่มวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรม กากกาแฟมีความ

น่าสนใจสำหรับใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากกากกาแฟเป็นผลพลอยได้ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกาแฟ มีต้นทุนต่ำ และปริมาณมาก ซึ่งในปัจจุบันการบริโภคกาแฟทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2565 ประชากรโลกบริโภคกาแฟสูงถึง 10 ล้านตัน [20] และสำหรับประเทศไทยก็มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยความต้องการบริโภคกาแฟของคนไทยเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 5-7 ต่อปี ส่งผลให้ประเทศไทยในช่วง 10 ที่ผ่านมามีกากกาแฟเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมากกว่า 8 หมื่นตันต่อปี [21] โดยกากกาแฟที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกาแฟจะถูกนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิง [22, 23] อย่างไรก็ตามทางอุตสาหกรรมการผลิตกาแฟสำเร็จรูปยังให้ความสนใจที่จะนำกากกาแฟจำนวนมหาศาลที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไปสร้างมูลค่าเพิ่ม นอกจากนี้ยังพบรายงานกากกาแฟที่เหลือทิ้งส่วนใหญ่ถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ [24] อย่างไรก็ตามการฝังกลบกากกาแฟส่วนใหญ่ก่อนข้างส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกากกาแฟมีองค์ประกอบ ได้แก่ คาเฟอีน แทนนิน และ กรดคลอโรจีนิก หากมีสารเหล่านี้ในปริมาณที่สูงจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อดิน จุลินทรีย์ และ พืช นอกจากนี้กากกาแฟยังอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) เช่น เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนที่สำคัญสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน [25, 26] โดยกากกาแฟในแต่ละแหล่งที่มาจะมีสัดส่วนของสารอินทรีย์ลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้แตกต่างกัน [27]

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นถึงปัญหาความเป็นพิษของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 และกากกาแฟเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟให้มีรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติเชิงรูพรุนที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 โดยการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ทำโดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี นอกจากนี้ยังศึกษาแหล่งที่มาของกากกาแฟต่างชนิดกัน เพื่อตรวจสอบความเสถียรของคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ และสุดท้ายจะนำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ผ่านวิธีการทดลองระบบดูดซับแบบคอลัมน์

1.2 วัตถุประสงค์

1. สังเคราะห์และเปรียบเทียบคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มาโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี
2. ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมี โดยวิธีการทดลองดูดซับแบบคอลัมน์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ส่วนที่ 1: การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

สังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟผ่านวิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยนำสารละลายซิงค์คลอไรด์มาตรึงรูปบนกากกาแฟจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ภายใต้อุณหภูมิในโตรเจนเป็นเวลา 2 hr. โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนที่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และอัตราการไหลของแก๊สที่ $100\text{ cm}^3/\text{min}$ ในการทดลองส่วนนี้จะทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อคุณลักษณะถ่านกัมมันต์ ดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติของกากกาแฟจำนวน 3 แหล่งที่มา ได้แก่ ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป
- อัตราส่วนโดยมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ อยู่ในช่วง 1:1 ถึง 1:3
- อุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน อยู่ในช่วง 500°C ถึง 700°C
- ความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ ได้แก่ เกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม

ส่วนที่ 2: ศึกษาการดูดซับสีข้อมริแอดทีฟแบล็ค 5

ศึกษาการดูดซับสีข้อมริแอดทีฟแบล็ค 5 จากกากกาแฟ 1 แหล่งด้วยระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ โดยทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

- ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 50 ถึง 100 mg/L
- ผลของอัตราการไหล โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 10 ถึง $15\text{ mL}/\text{min}$
- ผลของความสูงของเบดนิ่ง โดยศึกษาความสูงของเบดนิ่งในช่วง 5 ถึง 15 cm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- แนวทางในการบำบัดปนเปื้อนสีข้อมริแอดทีฟแบล็ค 5 โดยวิธีที่ไม่ซับซ้อนและต้นทุนไม่สูงด้วยการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านวิธีการกระตุ้นทางเคมี
- แนวทางในการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับกากกาแฟ

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กาแฟ (coffee)

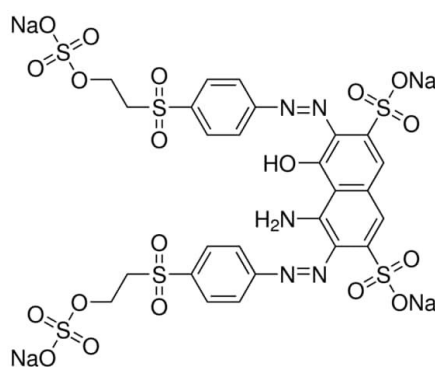
กาแฟ เป็นพืชกลุ่มไม้ยืนต้น ชื่อวิทยาศาสตร์ *Coffea spp.* อยู่ในวงศ์ Rubiaceae และสกุล *Coffea* โดยประเทศไทยปี 2565 มีเนื้อที่ปลูกกาแฟทั้งหมด 325,531 ไร่ ซึ่งได้ผลผลิตทั้งสิ้น 37,491 ตัน สถิติการปลูกกาแฟจำแนกตามภูมิภาค [28] เรียงลำดับจากมากไปน้อยแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณเนื้อที่ปลูกและผลผลิตกาแฟในประเทศไทยปี 2565

ภูมิภาค	เนื้อที่ปลูก (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)
ภาคเหนือ	74,943	7,803
ภาคใต้	246,967	29,544
ภาคกลาง	3,167	135
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	454	9

2.2 สีข้อมริแอกทีฟแบล็ค 5 (reactive black 5 dye)

สีข้อมริแอกทีฟแบล็ค 5 เป็นสีข้อมประเภทเตตระซัลโฟเนตไดอะโซที่มึประจุลบและสามารถละลายน้ำได้ดี ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติกเชิงซ้อนพันธะคู่อะโซหนึ่งพันธะ ($-N=N-$) [29] ส่งผลให้มีความเสถียรทางเคมีที่ดี สีสดใ และราคาถูก จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากหมู่พันธะคู่อะโซดังกล่าวมีอันตรายสูง ทำให้หากปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ และก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งในคนและสัตว์ [4, 5]



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลสีข้อมริแอกทีฟแบล็ค 5

2.3 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์คือวัสดุที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (ร้อยละ 87-97) และธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน กำมะถัน และไนโตรเจนรวมทั้งสารประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในวัสดุสารตั้งต้น โดยถ่านกัมมันต์สังเคราะห์จากวัสดุตั้งต้นเช่น ชีวมวล พืช ลิกไนต์และถ่านหิน ผ่านการกระตุ้นทางเคมีหรือทางกายภาพเพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์เกิดรูพรุน โดยขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์แบ่งเป็น 3 ขนาดคือรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-50 nm และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 nm ซึ่งถ่านกัมมันต์นิยมใช้เป็น ตัวดูดซับ (adsorbent) [30]

2.4 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

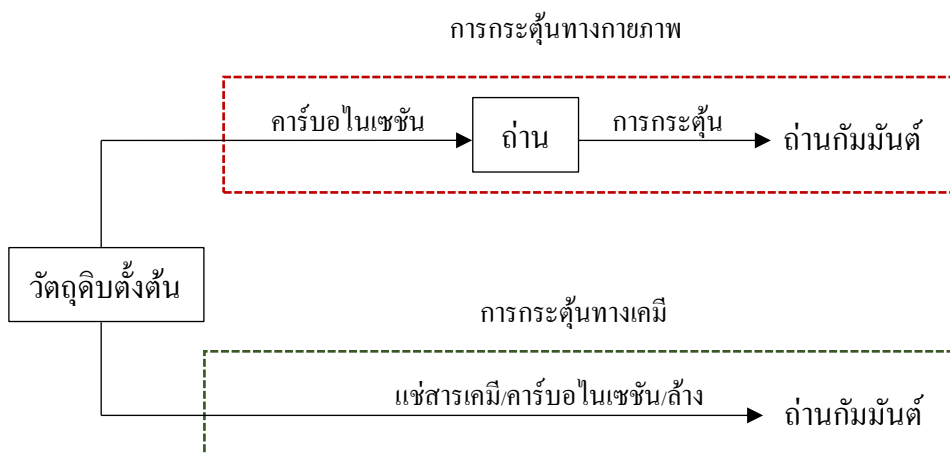
การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์มีได้หลากหลายวิธี โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก ดังนี้

2.4.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

การกระตุ้นทางกายภาพแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ เริ่มจากขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันจนกลายเป็นถ่านจากนั้นเป็นขั้นตอนการกระตุ้น (activation) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และกำจัดคราบน้ำมันดินจากขั้นตอนแรก แสดงดังภาพที่ 2 โดยแก๊สที่นิยมใช้ในขั้นตอนการกระตุ้น คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ ซึ่งวิธีนี้ต้องกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง 700°C ถึง 1000°C โดยมีข้อดีคือ ไม่มีสารเคมีตกค้างหลังการกระตุ้น แต่ข้อเสียคือต้องการอุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงและมีหลายขั้นตอนในการสังเคราะห์

2.4.2 การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

การกระตุ้นทางเคมีเป็นการกระตุ้นโดยการแช่วัตถุดิบตั้งต้นในสารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แล้วนำคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิในช่วง 500°C ถึง 700°C หลังจากนั้นล้างถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และกำจัดสารเคมีตกค้าง แสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือใช้อุณหภูมิในขั้นตอนคาร์บอนไนเซชันต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพจึงเป็นการประหยัดพลังงานมากกว่า และลดขั้นตอนการสังเคราะห์ ส่วนข้อเสียคือใช้เวลานานสำหรับการล้างสารเคมีที่ตกค้าง [30, 31]



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและเคมี

2.5 กระบวนการดูดซับ (adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นการกักเก็บตัวถูกดูดซับที่บริเวณผิวระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากสารละลายไปอยู่บนผิวของของแข็ง และการดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไปยังวัสดุดูดซับ (adsorbent) โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ความเป็นรูพรุน (porosity) การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาค (particle size) pH ของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว เป็นต้น [32]

2.6 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ (isotherm batch-adsorption models)

แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลและปริมาณการดูดซับสูงสุดในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่ โดยสมการสองตัวแปรได้แก่ แบบจำลอง Langmuir และ Freundlich [33, 34]

แบบจำลองของ Langmuir มีสมมติฐานคือเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว และแต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวเหมือนกัน อีกทั้งพลังงานในการดูดซับบนพื้นผิวมีความสม่ำเสมอ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับ [35] อธิบายโดยสมการ (1)

$$q_{eq} = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุล (mg/L)

- q_{eq} คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)
 q_m คือ ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)
 K_L คือ ค่าคงที่ของ Langmuir ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานของการดูดซับ (L/mg)

สำหรับค่า K_L ที่คำนวณได้เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาค่า R_L (dimensionless equilibrium parameter) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) ค่า R_L นิยมใช้เป็นตัวบอกลักษณะของกระบวนการดูดซับ หากค่า R_L อยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 บ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ แต่สำหรับ $R_L > 1$ แสดงถึงการดูดซับเกิดขึ้นได้น้อย

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (2)$$

- เมื่อ K_L คือ ค่าคงที่ Langmuir (L/g)
 C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L)

แบบจำลองของ Freundlich เป็นแบบจำลองการดูดซับแบบเอมพิริคัล ที่มีสมมุติฐานว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบหลายชั้น และพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างโมเลกุล และการกระจายของความร้อนที่ใช้ในการดูดซับมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแบบจำลอง Freundlich [36] ถูกอธิบายตามสมการ (3)

$$q_{eq} = K_F C_e^{1/n_F} \quad (3)$$

- เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ของ Freundlich ซึ่งเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการดูดซับ
 $(\text{mg/g})(\text{l/mg})^{1/n}$
 n_F คือ ความเข้มของการดูดซับ (dimensionless parameter)
โดยหาก $n_F > 1$ แสดงถึงการดูดซับมีแนวโน้มที่ดี

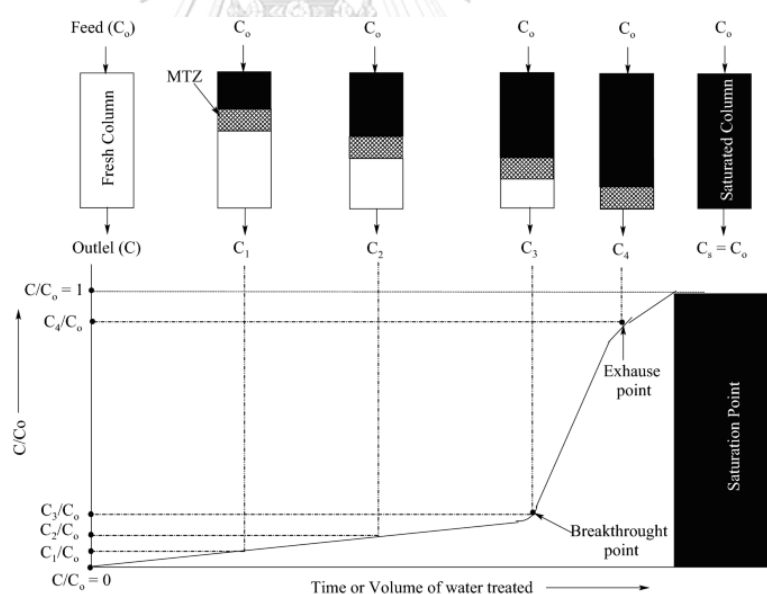
2.7 การดูดซับแบบคอลัมน์ (column adsorption)

คอลัมน์การดูดซับเป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการป้อนตัวถูกดูดซับเพื่อสัมผัสกับตัวดูดซับภายในคอลัมน์และการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่นิยมศึกษา

จลน์พลศาสตร์และประสิทธิภาพการดูดซับด้วยกราฟเบรคทวร์ซึ่งทำนายผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบดูดซับแบบคอลัมน์ [37]

2.7.1 กราฟเบรคทวร์ (breakthrough curve)

กราฟเบรคทวร์เป็นผลจากการติดตามความเข้มข้นเทียบกับเวลา ซึ่งจะได้โปรไฟล์ของความเข้มข้น (concentration profile) ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีลักษณะคล้ายตัว “S” โดยเมื่อตัวถูกดูดซับสัมผัสกับตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ตัวดูดซับเสื่อมประสิทธิภาพตามปริมาณตัวถูกดูดซับ ซึ่งเมื่อพบความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออกจะเรียกว่า จุดเบรคทวร์ (breakthrough point) และเมื่อตัวถูกดูดซับไหลผ่านคอลัมน์ทำให้เกิดการเกาะติดกับตัวดูดซับ จนถึงระยะเวลาหนึ่งที่ไม่มีการดูดซับต่อไปแล้วเรียกว่า บริเวณอิ่มตัว (saturated zone) ในขณะที่บริเวณที่ต่อจากบริเวณที่มีการอิ่มตัวจะยังเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า บริเวณการถ่ายเทมวล (mass transfer zone, MTZ) นอกจากนี้ยังสามารถนำกราฟเบรคทวร์ที่ได้ไปหาความยาวของชั้นการดูดซับ (length of mass transfer zone) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบคอลัมน์ดูดซับขนาดใหญ่ต่อไปได้ [37, 38]



ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างกราฟเบรคทวร์

กราฟเบรคทวร์สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับอธิบายประสิทธิภาพของการดูดซับแบบคอลัมน์ สักยภาพของตัวดูดซับ และการออกแบบคอลัมน์ดูดซับขนาดใหญ่ได้ [39-41] ตามสมการ (4-6)

$$q_b = \frac{C_0 Q}{M} \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) dt \quad (4)$$

- เมื่อ q_b คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ จุดเบรคทอร์ (mg/g)
 t_b คือ เวลาเบรคทอร์ หรือเวลาจากเริ่มต้นจนถึง breakthrough point (min)
 M คือ มวลของตัวดูดซับในคอลัมน์ (g)
 Q คือ อัตราการไหลของ (mL/min)
 C_t คือ ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (mg/L)

$$q_e = \frac{C_0 Q}{M} \int_0^{t_e} \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) dt \quad (5)$$

- เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ จุดอิ่มตัว (mg/g)
 t_e คือ เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดอิ่มตัว (min)

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

- เมื่อ H_{MTZ} คือ ความยาวของชั้นการดูดซับ (cm)
 H_L คือ ความสูงของตัวกลางอยู่กับที่ (cm)

2.7.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบดูดซับแบบคอลัมน์

- แบบจำลอง Thomas

แบบจำลอง Thomas เป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เป็นของแข็งและค่าคงที่อัตราการดูดซับ ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การดูดซับสอดคล้องกับจลนศาสตร์ของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับและการคายซับ และเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ (second-order reversible reaction) [42, 43] แสดงตามสมการ (7)

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{K_{Th} q_{Th} M}{Q} - K_{Th} C_0 t\right)} \quad (7)$$

เมื่อ K_{Th} คือ อัตราค่าคงที่ของ Thomas (mL/mg·min)

q_{Th} คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดบนตัวดูดซับ (mg/g)

- แบบจำลอง Adams-Bohart

แบบจำลอง Adams-Bohart เป็นแบบจำลองของการดูดซับที่เกิดขึ้นในระบบดูดซับแบบคอลัมน์ โดยมีสมมุติฐานว่าอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับที่เหลืออยู่ของตัวดูดซับและความเข้มข้นของชนิดตัวดูดซับ ซึ่งแบบจำลองนี้ใช้สำหรับอธิบายส่วนเริ่มต้นของเส้นเบรคทฤษฎี คือตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนถึงเบรคพอยต์หรือ 10–50 % ของจุดอิ่มตัว [43, 44] แสดงตามสมการ (8)

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = K_{AB}C_0t - K_{AB}N_0\frac{H_L}{F} \quad (8)$$

เมื่อ K_{AB} คือ ค่าคงที่ของ Adams-Bohart (L/mg·min)

N_0 คือ ความเข้มข้นอิ่มตัว (mg/L)

F คือ ความเร็วในการไหลผ่านตัวกลางอยู่กับที่ (cm/min)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับทั้งหมด (min)

- แบบจำลอง Yoon และ Nelson

แบบจำลอง Yoon และ Nelson เป็นแบบจำลองของการดูดซับที่เกิดภายในคอลัมน์บนพื้นฐานที่ว่าอัตราการลดลงของการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการดูดซับของตัวถูกดูดซับและบนเส้นเบรคทฤษฎีของวัสดุดูดซับ และแบบจำลองนี้ไม่ต้องการรายละเอียดของข้อมูลคุณสมบัติของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางกายภาพของการดูดซับ และชนิดของตัวถูกดูดซับ [43-45] แสดงดังสมการ (9)

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right) = K_{YN}t - \tau K_{YN} \quad (9)$$

เมื่อ K_{YN} คือ ค่าคงที่ของ Yoon และ Nelson (1/min)

τ คือ เวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับบนเส้นเบรคทฤษฎี (min)

2.7 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ พบว่ากากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์มีการสร้างรูพรุนชนิดมีโซพอร์จำนวนมาก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

คณะนักวิจัย Giraldo, Liliana และ Juan ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยใช้กากกาแฟจากแหล่งที่มาในภูมิภาค Caldas ประเทศโคลัมเบีย ซึ่งทำการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนโดยมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ 1:3 พบว่าให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงถึง $823.00 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์เท่ากับ $0.22 \text{ cm}^3/\text{g}$ [46] ต่อมาในปี 2021 ได้มีนักวิจัยชาวเกาหลี Thithai และ Vilaysit ทำการศึกษาโดยใช้กากกาแฟจากร้านกาแฟในเมืองกงวอน ประเทศเกาหลีใต้ ซึ่งผลของอัตราส่วนโดยมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ในช่วง 1:1 ถึง 1:3 พบว่าที่อัตราส่วนมวล 1:3 ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดอยู่ที่ $1074.00 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์เท่ากับ $1.31 \text{ cm}^3/\text{g}$ และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย 5.77 nm [47] และนักวิจัย Thuy Luong Thi, Huu Son Ta และ Khu Le Van ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยใช้กากกาแฟจากเมืองเซินลา ประเทศเวียดนาม พบว่าอัตราส่วนโดยมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ที่ 1:3 ให้คุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด คือพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ $1383.00 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์เท่ากับ $1.45 \text{ cm}^3/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ $1.65 \text{ cm}^3/\text{g}$ [48] จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าปริมาณของซิงค์คลอไรด์ที่ใช้ในการทดลองมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์และการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกือบทั้งหมดในงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งรูพรุนชนิดมีโซพอร์ [49] โดยล่าสุดในปี 2022 ทีมวิจัยของ Bose และ Suranjana ทำการศึกษาโดยใช้กากกาแฟจากโรงอาหารที่มหาวิทยาลัยยอร์ก ประเทศอังกฤษ ซึ่งผลของอัตราส่วนโดยมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์อยู่ที่ 1:1 พบว่าให้พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $684.00 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์เท่ากับ $0.23 \text{ cm}^3/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์เท่ากับ $0.53 \text{ cm}^3/\text{g}$ [50]

ตารางที่ 3 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์กลอไรด์

แหล่งที่มาของกากกาแฟ	อัตราส่วนมวล SCG:ZnCl ₂	S_{BET} (m ² /g)	V_{Total} (cm ³ /g)	V_{meso} (cm ³ /g)	อ้างอิง
The coffee shop in the Pyeongchang district, in the Gangwon province of South Korea	1:1	1060.00	0.61	0.32	[47]
	1:3	1074.00	1.55	1.31	
Catering outlets at the University of York	1:1	684.00	NR	0.53	[50]
The processing of the coffee pulping wet of the coffee zone Caldas (Colombia)	1:2	745.00	0.80	0.17	[46]
	1:3	823.00	0.92	0.22	
Coffee houses and households (Algeria)	1:1	810.21	0.48	0.15	[51]
Instant coffee company namely, Moccona Company (Thailand)	1:3	956.00	0.83	NR	[52]
Nestle Products (Thailand) Inc.	1:3	669.49	0.45	0.36	[53]
Local coffee-stalls (Algeria)	1:1	810.00	0.50	NR	[54]
Son La Province, Vietnam	1:1	1049.00	0.56	0.14	[48]
	1:2	1169.00	1.04	0.82	
	1:3	1383.00	1.65	1.45	

*NR = No report

2.8 การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ผ่านระบบดูดซับแบบคอลัมน์กับที่ โดยวัสดุดูดซับที่ใช้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังตารางที่ 4 โดยมีรายละเอียดดังนี้

กลุ่มที่ 1 วัสดุคาร์บอนรูพรุน นักวิจัย Ahmad และ Hameed ทำการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ไผ่เพื่อดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ผ่านระบบดูดซับแบบคอลัมน์ ซึ่งให้ความเข้มข้นอิ่มตัวจากแบบจำลอง The Adam's-Bohart 106.27 mg/L เวลาเบรคทูร 6.5 hr.

และประสิทธิภาพการดูดซับตามแบบจำลอง Thomas 37.84 mg/g สำหรับความเข้มข้นเริ่มของ สีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ 100 mg/L [55] ต่อมาคณะนักวิจัย Galán , Rodríguez, Allen และ Walker ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนรูพรุนชนิดมีโซพอร์ โดยใช้ซิลิกาเจลเชิงพาณิชย์เป็นแม่แบบและมีซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 โดยมีเวลาเบรคทรูเท่ากับ 0.9 hr. และประสิทธิภาพการดูดซับ 18 mg/g [56]

กลุ่มที่ 2 วัสดุที่ไม่ใช่คาร์บอนรูพรุน คณะนักวิจัย Lazaridis, Nikolaos และ Keenan ได้ทำการทดลองโดยใช้ไคโตซานชนิดเม็ดเป็นวัสดุดูดซับเพื่อการศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 พบว่ามีปริมาณการดูดซับเท่ากับ 65.85 mg/g ที่ความเข้มข้นเริ่มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 เพียง 30 mg/L และ pH เท่ากับ 6 [57] ต่อมาวัสดุชีวมวลบางชนิดถูกใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 โดยมีนักวิจัย García และ Litter ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กระดับนาโนลงบนชีวมวล *Macrocystis pyrifera* (Mpyr.) เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 พบว่ามีปริมาณการดูดซับเท่ากับ 39.90 mg/g [58] นอกจากนี้ นักวิจัย Vijayaraghavan และ Yeoung-Sang ศึกษาวัสดุดูดซับที่เป็นเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ *Corynebacterium glutamicum* (*C. glutamicum*), *C. glutamicum* ที่ผ่านการทำโปรโทเนต (protonation) และ *C. glutamicum* ที่ทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 เท่ากับ 100 mg/L วัสดุดูดซับทั้งสามชนิดมีปริมาณการดูดซับตามแบบจำลอง Thomas อยู่ที่ 23.70 mg/g, 37.20 mg/g และ 79.00 mg/g ตามลำดับ โดยเวลาเบรคทรูอยู่ที่ 0.8 1.8 และ 6.5 hr. ตามลำดับ [59] และต่อมา นักวิจัย De Luca และ Pierantonio ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยท่อนานคาร์บอนผนังหลายชั้น พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 55.44 mg/g [60] ยิ่งไปกว่านั้นในปี 2021 นักวิจัย Guo และ Huan ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 โดยใช้วัสดุดูดซับเป็นแร่ดินเหนียว (attapulgitite) ที่ถูกดัดแปลงด้วย Cation (CM-ATP) พบมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่สูงซึ่งเท่ากับ 144.70 mg/g ในขณะที่แร่ดินเหนียวที่ไม่มีการดัดแปลง (Natural attapulgitite) มีค่า q_e เพียง 1.80 mg/g สำหรับความเข้มข้นเริ่มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ 500 mg/L [61]

ตารางที่ 4 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 แบบคอลัมน์

วัสดุดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	pH	ประสิทธิภาพการดูดซับแบบคอลัมน์ (mg/g)		อ้างอิง
			แบบจำลอง Thomas (q_{Tn})	ที่จุดอิ่มตัวคอลัมน์ (q_c)	
กลุ่มที่ 1: วัสดุคาร์บอนรูพรุน					
Granular activated carbon from bamboo waste	100	7	37.84	39.20	[55]
Mesoporous carbon (Sucrose: carbon source)	50	7	NR	18.00	[56]
กลุ่มที่ 2: วัสดุที่ไม่ใช่คาร์บอนรูพรุน					
Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)	37	NR	NR	55.44	[60]
Corynebacterium glutamicum	100	4	23.70	23.20	[59]
Protonation of Corynebacterium glutamicum			37.20	37.00	
Decarboxylation of Corynebacterium glutamicum			79.00	78.60	
Zerovalent iron nanoparticles (nZVI) on Macrocyctis pyrifera (Mpyr)	100	3	NR	39.90	[58]
Chitosan-Coated Glass Beads	50	6	NR	65.85	[57]
Chitosan beads	30	NR	7.20	11.30	[62]
Polysulfone-immobilized Corynebacterium glutamicum	100	1	101.70	103.20	[63]
Protonation of brown seaweed Laminaria sp.	50	1	NR	41.90	[64]
Natural attapulgite	500	NR	NR	1.80	[61]

ตารางที่ 4 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์

วัสดุดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น	pH	ประสิทธิภาพการดูดซับแบบคอลัมน์ (mg/g)		อ้างอิง
The cation-modified attapulgite (CM-ATP)	500	NR	NR	144.70	[61]

*NR = No report



บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุ

3.1.1 กากกาแฟ

กากกาแฟทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองได้มาจากกากกาแฟเหลือทิ้งของร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	สูตรเคมี	มวลโมเลกุล (g/mol)	เกรด	ยี่ห้อ
Hydrochloric acid	HCl	36.46	Analytical grade	QRec
Nitrogen gas	N ₂	28.01	-	Thai industrial gas (TIG)
Reactive black 5 dye	C ₂₆ H ₂₁ N ₅ Na ₄ O ₁₉ S ₆	991.82	Analytical grade	Merck
Zinc chloride	ZnCl ₂	136.28	Analytical grade	QRec
Zinc chloride	ZnCl ₂	NR	Commercial grade	Global Chemical Co., Ltd.

* NR = No report

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Field-emission electron scanning microscope (FE-SEM)
2. Nitrogen adsorption-desorption apparatus
3. Thermogravimetric analysis (TGA)
4. X-ray diffractometer (XRD)
5. UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis)

3.2 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

3.2.1 การเตรียมกากกาแฟ

นำกากกาแฟไปอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 hr.

3.2.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากกาแฟ

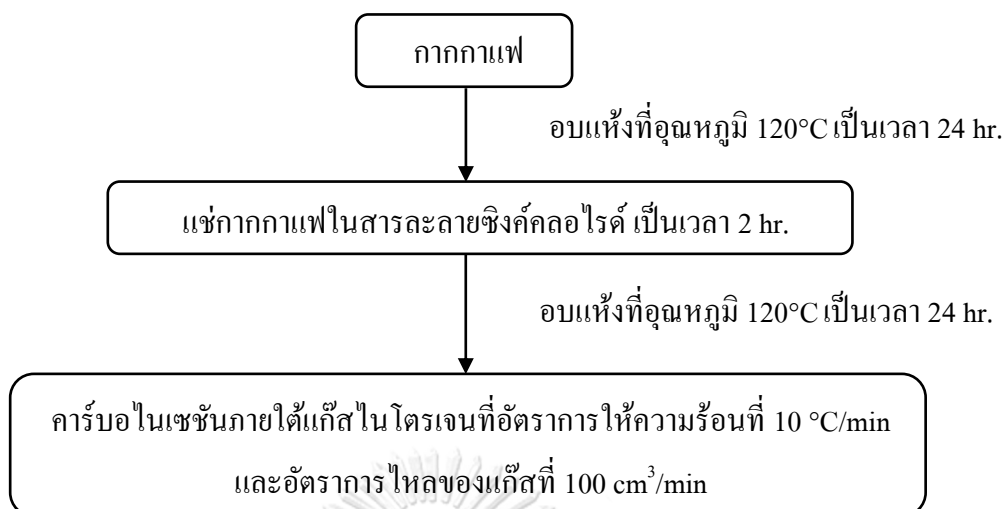
- เสมิเซลลูโลส วิเคราะห์โดยวิธี Acid chlorite ของ Browing in method of wood chemistry
- เซลลูโลส วิเคราะห์โดยมาตรฐาน TAPPI T203 om-88
- ลิกนิน วิเคราะห์โดยมาตรฐาน TAPPI T222 om-88

3.2.3 การสังเคราะห์วัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

กากกาแฟที่ผ่านการอบไล่ความชื้นจะถูกนำไปแช่สารละลายซิงค์คลอไรด์ หลังจากนั้นทำการอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 hr. จากนั้นทำการคาร์บอนไนเซชันภายใต้แก๊สไนโตรเจน โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนและอัตราการไหลของแก๊สที่ 10 °C/min และ 100 cm³/min ตามลำดับ

ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

- แหล่งที่มาของกากกาแฟ โดยศึกษาจำนวน 3 แหล่งที่มา ได้แก่ ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป
- อัตราส่วนโดยมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ 1:0 ถึง 1:3
- อุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน 500°C ถึง 700°C
- ความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ ได้แก่ เกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม



ภาพที่ 4 แสดงแผนผังการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

3.3 การทดสอบคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี

3.3.1 Field Emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (FESEM-EDS; JEOL JSM-7610F)

ศึกษาสมบัติพื้นผิวและศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟต่างแหล่งที่มา โดยใช้ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ที่กำลังขยาย 1,500x 30,000x และ 100,000x นอกจากนี้ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ยังถูกใช้เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีจำนวน 3 พื้นที่ต่อตัวอย่าง พร้อมกับตรวจสอบสารเคมีตกค้างภายในถ่านกัมมันต์

3.3.2 Nitrogen adsorption-desorption apparatus (Micromeritics Model 3Flex)

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวและคุณลักษณะเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์ผ่านข้อมูลที่ได้จากการทดลองไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K โดยนำมาคำนวณตามแบบจำลองต่าง ๆ ได้แก่ วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ คำนวณโดยใช้แบบจำลอง Brunauer-Emmett-Teller (BET) ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์คำนวณโดยใช้แบบจำลอง Dubinin-Radushkevich (D-R) ปริมาตรรูพรุนมีโซพอร์คำนวณโดยใช้แบบจำลอง Barrett-Joyner-Halenda (BJH) และความกลางเฉลี่ยของรูพรุน คำนวณโดยใช้กฎของ Gurwitsch ซึ่งในขั้นตอน Degassing ดำเนินการในสภาวะที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 24 hr.

3.3.3 Thermogravimetric analysis (TGA: Q50 V6.7 Build 203)

ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของกากกาแฟในแต่ละแหล่งที่มา ผ่านการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค TGA cure และ DTG (Derivative thermogram analysis) ในช่วงอุณหภูมิ 35°C ถึง 900°C โดยควบคุมอัตราการให้ความร้อนที่ 10°C/min ภายใต้บรรยากาศ N₂ ที่อัตราการไหลของแก๊ส 20 mL/min ซึ่งรายงานข้อมูลเป็น 2 เทอม คือ weight% (%) และ derivative weight (%/°C)

3.3.4 X-ray diffractometer (XRD: Bruker AXS Model D8 Discover)

ศึกษาโครงสร้างของผลึกและการจัดเรียงตัวของผลึก โดยอาศัยหลักการทำงานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ผ่านชั้นต่าง ๆ ของโมเลกุลภายในสารตัวอย่าง แล้วทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ณ มุมต่าง ๆ ข้อมูลที่ตรวจสอบได้เมื่อผ่านการวิเคราะห์ผลแล้ว สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ (identification) ของโครงสร้างผลึกของวัสดุดังกล่าวได้ โดยทั้งหมดดำเนินการวัดที่ 2θ ในช่วง 10 ถึง 60 องศา ด้วยคิฟแฟรคโตมิเตอร์ 40 kV และแหล่งกำเนิดรังสี Cu K α

3.4 การศึกษาการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ (batch adsorption)

ศึกษาการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ ผ่านการนำวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ ผสมกับสารละลายสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน นำไปเขย่าจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ต่อมากรองเอาส่วนของสารละลายไปวัดหาปริมาณความเข้มข้นที่เหลืออยู่โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

โดยในการศึกษาการดูดซับสารละลายสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ ได้มีการศึกษาผลของตัวแปรดังต่อไปนี้

3.4.1 ผลของวัสดุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟ

ทำการศึกษาวัสดุดูดซับ ได้แก่ กากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ ถ่านที่ได้จากกากกาแฟ โดยไม่ผ่านการกระตุ้น และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟซึ่งผ่านการกระตุ้นทางเคมี โดยควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 90 mg/L และอุณหภูมิที่ 30°C

3.4.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

ทำการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ โดยจะศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 5 ถึง 600 mg/L และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 30°C

3.4.3 สมดุลการดูดซับ

ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในกระบวนการดูดซับ ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ถึง 600 mg/L และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 30°C

3.5 การศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ (column adsorption)

ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยระบบดูดซับแบบคอลัมน์ โดยศึกษาผ่านตัวแปรดังต่อไปนี้

3.5.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ใช้ในกระบวนการดูดซับในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ถึง 100 mg/L

3.5.2 ผลของอัตราการไหล

ศึกษาความอัตราการไหลของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ใช้ในกระบวนการดูดซับในช่วงอัตราการไหล 10 ถึง 15 mL/min

3.5.3 ผลของความสูงของเบดนิ่ง

ศึกษาความสูงของเบดนิ่ง ในช่วงความสูงตัวกลางอยู่กับที่ 5 ถึง 15 cm

3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5

3.6.1 UV-Visible spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่าง ซึ่งความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล [65] ได้ดังสมการที่ [10]

$$q_{eq} = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad [10]$$

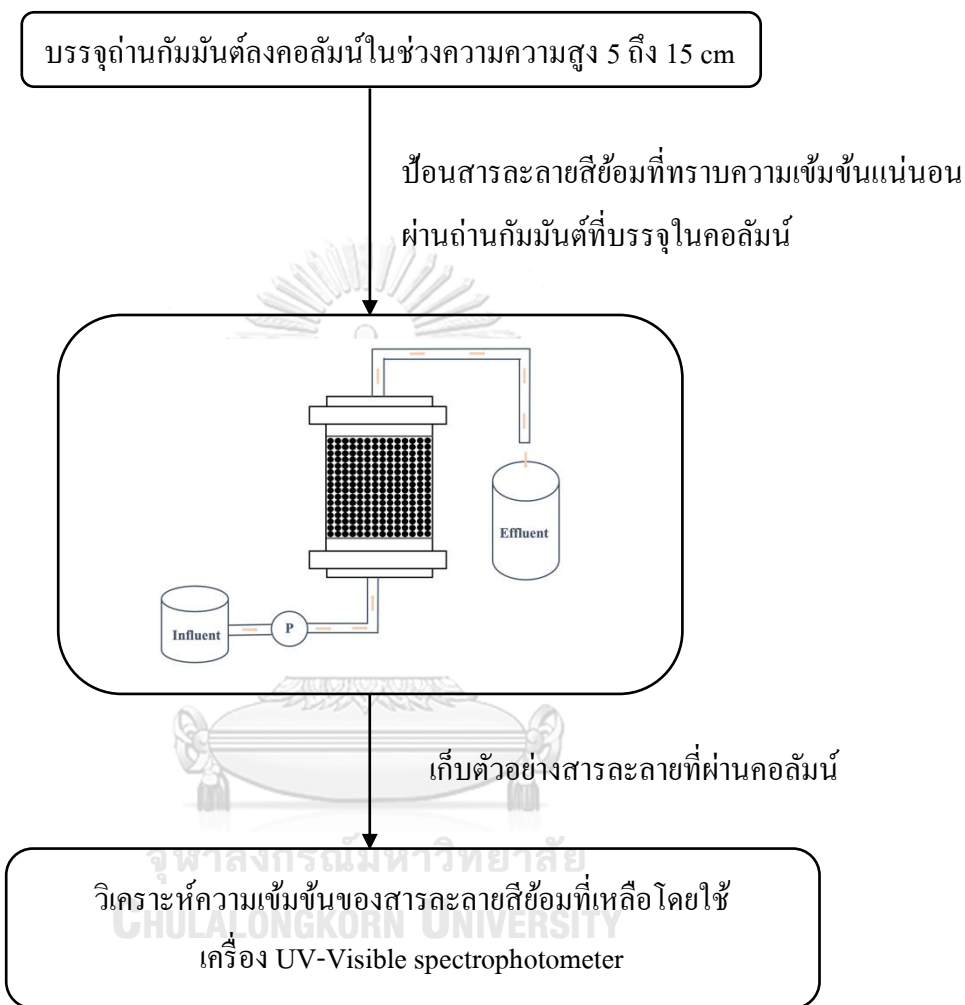
เมื่อ q_{eq} คือปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/g)

C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C_e คือความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุล (mg/L)

V คือปริมาตรของสารละลาย (mL)

W คือน้ำหนักของวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (mg)



ภาพที่ 5 แสดงแผนผังการทดลองการดูดซับสีข้อมีแอดทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

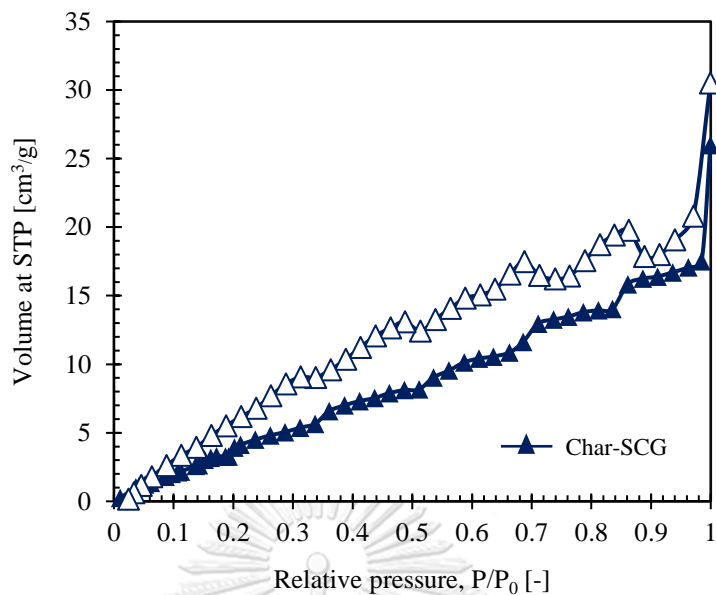
ตารางที่ 6 แสดงสภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	อัตราส่วนมวล SCG:ZnCl ₂	เกรด ZnCl ₂	แหล่งที่มาของกากกาแฟ	อุณหภูมิ คาร์บอนไอเซชัน
Z1-IC600	1:1	AR	โรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกาแฟสำเร็จรูป	600°C
Z2-IC600	1:2	AR	โรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกาแฟสำเร็จรูป	600°C
Z3-IC600	1:3	AR	โรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกาแฟสำเร็จรูป	600°C
Z3-IC500	1:3	AR	โรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกาแฟสำเร็จรูป	500°C
Z3-IC700	1:3	AR	โรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกาแฟสำเร็จรูป	700°C
Z3-CC600	1:3	AR	ร้านกาแฟ ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	600°C
Z3-LC600	1:3	AR	ร้านกาแฟ ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	600°C
Com-ZnCl ₂	1:3	Commercial	โรงงานอุตสาหกรรม ผลิตกาแฟสำเร็จรูป	600°C

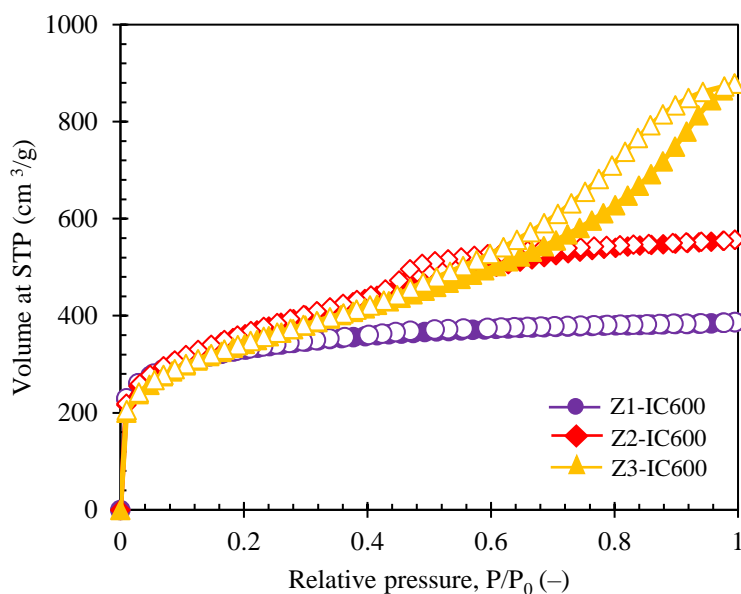
4.1.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์

4.1.1.1 ผลของอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์

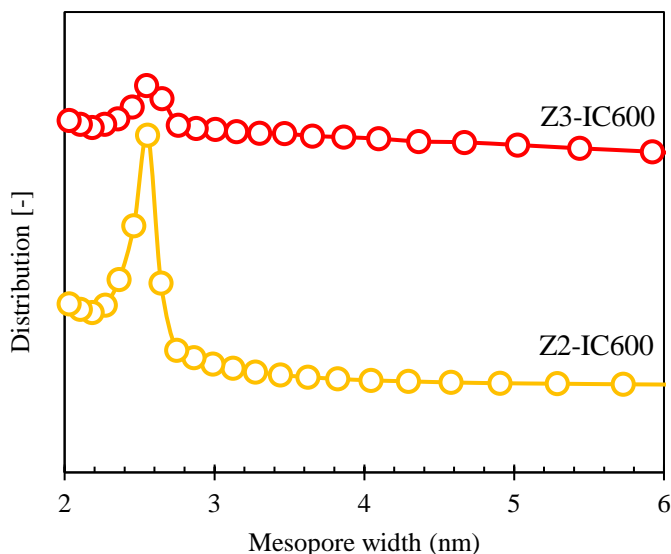
การดูดซับและคายการดูดซับในโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ทั้งผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ในช่วง 1:0 ถึง 1:3 และไม่ได้ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยทั้งหมดควบคุมอุณหภูมิการคาร์บอนในเซชันที่ 600°C แสดงดังภาพที่ 6 และ 7 พบว่าถ่านที่ไม่ได้กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (Char-SCG) แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบ type III ตามการจำแนกของ IUPAC ซึ่งแสดงถึงการดูดซับสำหรับของแข็งที่ไม่มีรูพรุนและของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ [66] โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะแค่ 31.82 m²/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพียง 0.04 cm³/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนมวล 1:1 (Z1-IC600) แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบ type I ตามการจำแนกของ IUPAC ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของรูพรุนในช่วงไมโครพอร์เท่านั้น ($V_{micro} = 0.54 \text{ cm}^3/\text{g}$) ยิ่งไปกว่านั้นการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) แสดงลักษณะของไอโซเทอมแบบ type I และ type IV ผสมกัน ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของรูพรุนที่มีขนาดในช่วงไมโครพอร์และมีเมโซพอร์ เนื่องจากลักษณะของ hysteresis loop มีลักษณะแบบ H₃ [65, 67] นอกจากนั้นพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ชนิดมีโซพอร์และไมโครพอร์ถูกคำนวณจากแบบจำลองของ BET, D-R และ BJH แสดงค่าที่ได้ดังตารางที่ 7 พบว่าอัตราส่วนมวลของซิงค์คลอไรด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์ (V_{meso}) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าเพิ่มจาก 0.42 เป็น 1.03 cm³/g สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:2 เป็น 1:3 เนื่องจากในอัตราส่วนซิงค์คลอไรด์ต่ำ ๆ ทำให้การก่อตัวของทาร์ถูกยับยั้งและสารระเหยถูกปลดปล่อยได้น้อย ส่งผลให้เกิดรูพรุนชนิดไมโครพอร์ขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนซิงค์คลอไรด์สูงขึ้น ส่งเสริมการปลดปล่อยของสารระเหยอย่างรุนแรงและเกิดการขยายตัว (Swelling) ทำให้รูพรุนกว้างขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้รูพรุนชนิดไมโครพอร์ถูกพัฒนาเป็นรูพรุนชนิดมีโซพอร์ในเวลาต่อมา [48, 68-70] นอกจากนี้การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นในอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:2 และ 1:3 แสดงดังภาพที่ 8 พบว่าอัตราส่วนมวลของซิงค์คลอไรด์ที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของรูพรุนชนิดมีโซพอร์ขยายตัว โดยเมื่ออัตราส่วนมวลของ SCG:ZnCl₂ เพิ่มสูงขึ้นจาก 1:2 เป็น 1:3 ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 2.59 เป็น 2.64 nm



ภาพที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600°C (Char-SCG)



ภาพที่ 7 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C

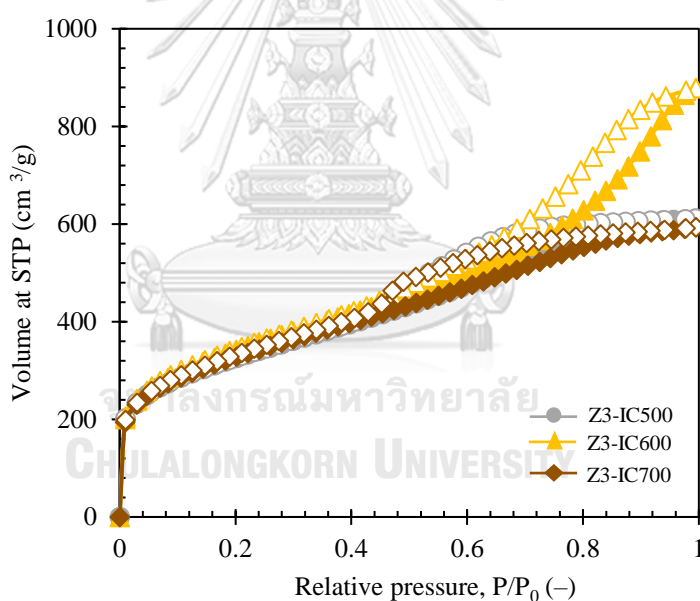


ภาพที่ 8 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C

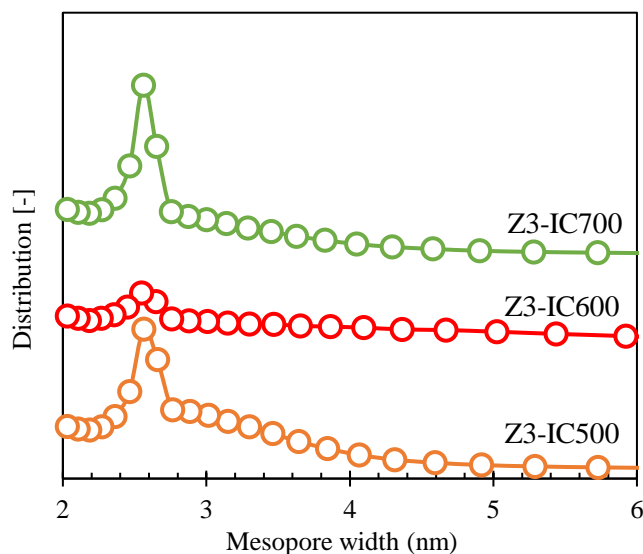
4.1.1.2 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

การดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ซึ่งผ่านการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ 1:3 และเกิดกระบวนการคาร์บอนในเซชันในช่วงอุณหภูมิ 500°C ถึง 700°C แสดงดังภาพที่ 8 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700 °C (Z3-IC700) แสดงไอโซเทอมแบบผสมระหว่าง type I และ type IV ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของรูพรุน ทั้งไมโครพอร์และมีโซพอร์ นอกจากนี้สมบัติเชิงรูพรุนคำนวณจากแบบจำลองของ BET, D-R และ BJH แสดงค่าที่ได้ดังตารางที่ 7 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนชนิดไมโครพอร์ โดยทั้งหมดมีปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์ประมาณ $0.55 \pm 0.02 \text{ cm}^3/\text{g}$ ในขณะที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชันเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญสำหรับการกำหนดปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 500°C เป็น 600°C ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.70 เป็น $1.03 \text{ cm}^3/\text{g}$ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้สารระเหยได้มากขึ้นและถูกปล่อย

ออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสร้างรูพรุนใหม่อย่างต่อเนื่องเช่นกัน [47, 48] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันสูงถึง 700°C (Z3-IC700) ทำให้ปริมาตรรูพรุนชนิดมีไซพอร์ลดลงเกือบครึ่ง ซึ่งเหลือเพียง 0.56 cm³/g เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ อาจเกิดการเผาผลึก (sintering) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัวของรูพรุนและการจัดตำแหน่งใหม่ของโครงสร้างคาร์บอน ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง [69] นอกจากนี้การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีไซพอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700°C (Z3-IC700) แสดงตามภาพที่ 9 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันส่งผลต่อความกว้างของรูพรุนมีไซพอร์เพียงเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 600°C มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (d_p) เท่ากับ 2.64 nm ในขณะที่อุณหภูมิ 500°C และ 700°C มีค่า d_p เท่ากับ 2.61 nm



ภาพที่ 9 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์กรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700°C (Z3-IC700)

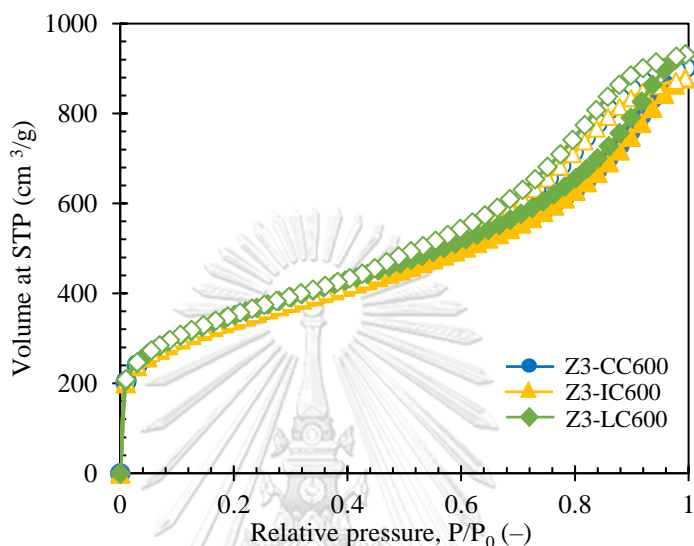


ภาพที่ 10 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700 °C (Z3-IC700)

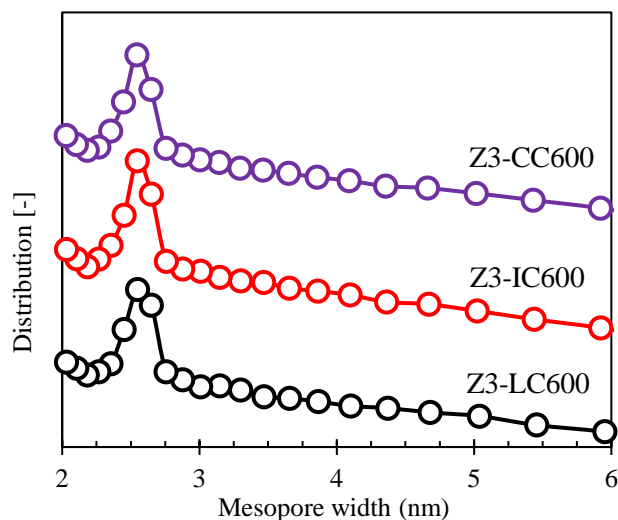
4.1.1.3 ผลของแหล่งที่มาของกากกาแฟ

การดูดซับและคายการดูดซับในโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มา ซึ่งได้แก่ ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C แสดงลักษณะของไอโซเทอมแบบ type I และ type IV ผสมกัน ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของรูพรุนที่มีขนาดในช่วงไมโครพอร์และมีโซพอร์ เนื่องจากลักษณะของ hysteresis loop มีลักษณะแบบ H_3 นอกจากนั้นพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ชนิดมีโซพอร์และไมโครพอร์คำนวณจากแบบจำลองของ BET, D-R และ BJH แสดงค่าที่ได้ดังตารางที่ 7 พบว่าแหล่งที่มาของกากกาแฟที่ต่างกันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยทั้งหมดมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $1275.00 \pm 25.00 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์ประมาณ $0.58 \pm 0.01 \text{ cm}^3/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนชนิดชนิดมีโซพอร์ประมาณ $1.06 \pm 0.05 \text{ cm}^3/\text{g}$ นอกจากนี้การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟ

ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) แสดงตามภาพที่ 11 พบว่าแหล่งที่มาของกากกาแฟไม่ส่งผลต่อความกว้างของรูพรุนชนิดมีโซพอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยทั้งหมดแสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.64 nm



ภาพที่ 11 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C

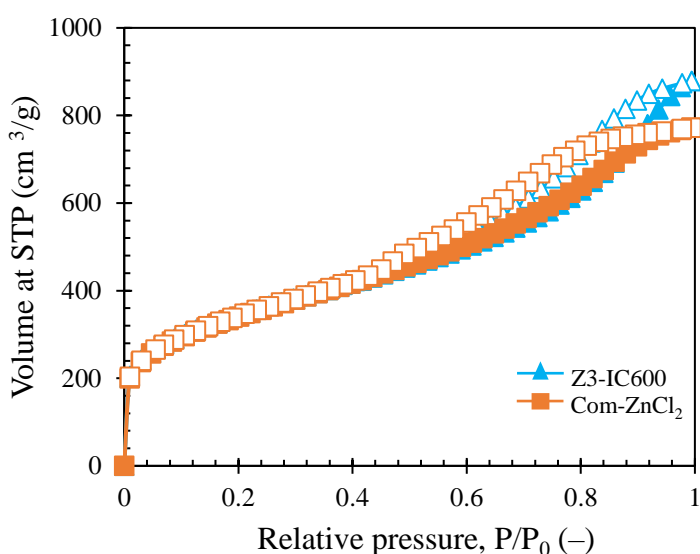


ภาพที่ 12 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C

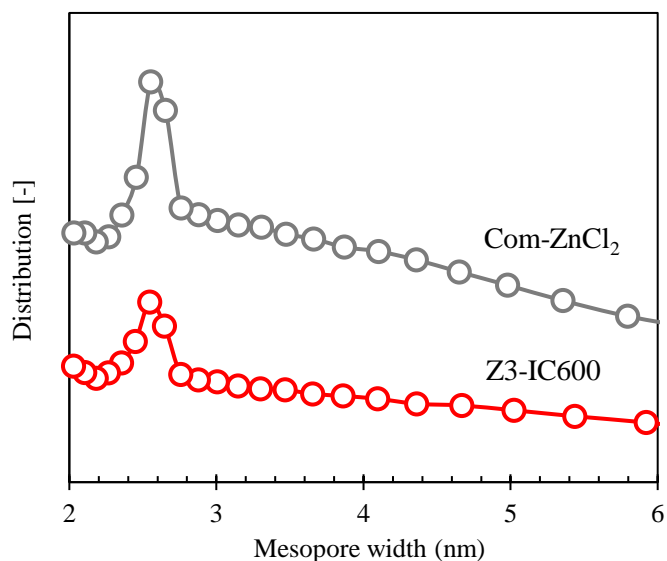
4.1.1.4 ผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์

การดูดซับและคายการดูดซับในโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป โดยคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600°C ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ (ความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์อยู่ที่ 98%) และเกรดอุตสาหกรรม (ความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์อยู่ที่ 95%) ในอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ 1:3 แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl₂) แสดงไอโซเทอมแบบผสมระหว่าง type I และ type IV ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของรูพรุนทั้งไมโครพอร์และมีโซพอร์ นอกจากนี้สมบัติเชิงรูพรุนคำนวณจากแบบจำลองของ BET, D-R และ BJH แสดงค่าที่ได้ดังตารางที่ 7 พบว่าความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อรูพรุนชนิดไมโครพอร์และพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยทั้งหมดมีปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์ประมาณ 0.57 cm³/g และพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ประมาณ 1240.00±20.00 m²/g แต่ความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์มีผลต่อปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์ (V_{meso}) โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ ($V_{meso} = 0.92$ cm³/g) มีปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์สูงกว่าการใช้ซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรม

($V_{meso} = 1.03 \text{ cm}^3/\text{g}$) เพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากจากการมีอยู่ของซิงค์คลอไรด์ กล่าวคือเกรดงานวิเคราะห์มีความบริสุทธิ์สูงถึง 98% เมื่อเทียบกับเกรดอุตสาหกรรมที่มีปริมาณความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์อยู่ที่ 95% ส่งผลให้เกิดการตรึงรูปของ ซิงค์คลอไรด์บนกากกาแฟได้มากกว่า [70, 71] นอกจากนี้การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl₂) แสดงดังภาพที่ 13 พบว่าผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรูพรุนมีโซพอร์ โดยทั้งหมดมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.64 nm



ภาพที่ 13 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 (Com-ZnCl₂) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C



ภาพที่ 14 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (Z3-IC600) และกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 (Com-ZnCl₂) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิการบอไนเซชันที่ 600°C

ตารางที่ 7 แสดงชนิดของไอโซเทอม พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์และปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์ของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	ชนิดของไอโซเทอม	S_{BET} (m ² /g)	V_{micro} (cm ³ /g)	V_{meso} (cm ³ /g)	d_p (nm)
P-SCG	NR	0.79	7E-04	NR	NR
Char-SCG	III	31.82	0.04	N/D	N/D
Z1-IC600	I	1178.12	0.54	N/D	N/D
Z2-IC600	I+IV	1232.92	0.61	0.42	2.59
Z3-IC600	I+IV	1260.29	0.57	1.03	2.64
Z3-IC500	I+IV	1208.62	0.54	0.70	2.61
Z3-IC700	I+IV	1178.53	0.55	0.56	2.64
Z3-CC600	I+IV	1300.03	0.57	1.11	2.61
Z3-LC600	I+IV	1273.59	0.59	1.06	2.64

ตารางที่ 7 แสดงชนิดของไอโซเทอม พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์และ ปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์ของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	ชนิดของไอโซเทอม	S_{BET} (m^2/g)	V_{micro} (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	d_p (nm)
Com-ZnCl ₂	I+IV	1225.59	0.57	0.92	2.64
Com-AC	I+IV	898.46	0.37	0.11	2.58

*N/D = Not determined และ NR = No report

จากการศึกษาคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุน พบว่าการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (Char-SCG) และกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ จากงานวิจัยของคุณดวงวิไล ซึ่งเป็นกากกาแฟจากร้านกาแฟในเมืองแทจอน ประเทศเกาหลีใต้ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะแค่ 0.79 m^2/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพียง $7E-04$ cm^3/g [72] โดยตัวแปรที่สำคัญต่อการกำหนดปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์อันดับที่หนึ่งคืออัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ รองลงมาคืออุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน ในทางตรงข้ามแหล่งที่มาของกากกาแฟและความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์แทบจะไม่มีผลต่อการสร้างปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์

4.1.2 ผลขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในกากกาแฟที่มีต่อสมบัติความเป็นรูพรุน

จากองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในกากกาแฟ โดยแหล่งที่มาของกากกาแฟที่ต่างกันแสดงตามตารางที่ 8 พบว่าในแต่ละแหล่งที่มาของกากกาแฟมีปริมาณขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปริมาณของเซลลูโลสตั้งแต่ร้อยละ 12.40 ไปจนถึง 47.50 โดยน้ำหนัก ปริมาณของเฮมิเซลลูโลสตั้งแต่ร้อยละ 10.61 ไปจนถึง 51.50 โดยน้ำหนัก และปริมาณของเฮมิเซลลูโลสตั้งแต่ร้อยละ 11.29 ไปจนถึง 40.67 โดยน้ำหนัก

ในงานวิจัยนี้ศึกษาองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสของกากกาแฟ 3 แหล่งที่มา ได้แก่ ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CC-SCG) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (LC-SCG) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (IC-SCG) แสดงดังตารางที่ 8 พบว่าองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสทั้ง 3 ชนิดจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มีปริมาณใกล้เคียงกัน คือมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ประมาณร้อยละ 26.00 ± 3.00 , 26.00 ± 1.50 และ 12.00 ± 2.00 โดยน้ำหนัก ซึ่งแตกต่างกับกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่มีองค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเท่ากับร้อยละ 41.94 ± 1.80 , 10.61 ± 0.22 และ 22.71 ± 2.12 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟทั้ง 3 แหล่งที่นำไปทดสอบคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุน พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งหมดมีชนิดของไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบผสมระหว่าง type I และ type IV เหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าสมบัติความเป็นรูพรุนซึ่งประกอบด้วย พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์ ปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์ และความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ ให้ผลลัพธ์ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ พบว่าสำหรับการกระตุ้นทางเคมีซึ่งใช้สารเคมีกระตุ้นชนิดเดียวกัน ผลของคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนจะขึ้นกับอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันและสัดส่วนของสารเคมีกระตุ้นเป็นหลัก [30, 73-75] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากากกาแฟที่มีแหล่งที่มาและองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ 1:3

ตารางที่ 8 แสดงองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในกากกาแฟ

แหล่งที่มาของกากกาแฟ	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			อ้างอิง
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	
ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	25.68 ± 1.18	26.06 ± 0.44	12.34 ± 1.02	This work
โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป	41.94 ± 1.80	10.61 ± 0.22	22.71 ± 2.12	This work
ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	27.71 ± 1.03	25.56 ± 0.66	11.29 ± 0.41	This work
โรงงานอุตสาหกรรมโนวาเดลต้า ในเมือง Campo Maior ประเทศโปรตุเกส	12.40	39.10	23.90	[76]
โรงอาหารของมหาวิทยาลัยโฮเอนไฮม์ ในเมืองชตุตการ์ต ประเทศเยอรมัน	19.60	32.40	22.00	[77]

ตารางที่ 8 แสดงองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในกากกาแฟ

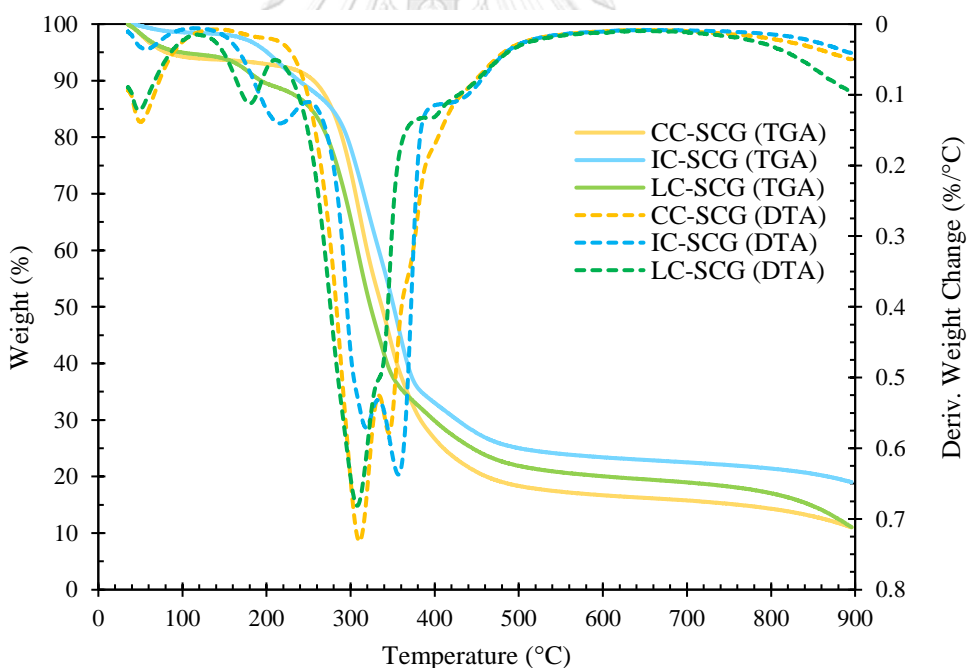
แหล่งที่มาของกากกาแฟ	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			อ้างอิง
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	
บริษัทเนชันแนลแบรนต์ ในเมือง Isando ประเทศแอฟริกาใต้	47.50	NR	NR	[78]
ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยปาดัว ประเทศอิตาลี	24.30	24.80	13.50	[79]
ร้านกาแฟท้องถิ่น ในเมือง Petaling Jaya ประเทศมาเลเซีย	16.78	48.22	34.94	[80]
ร้านแมคโดนัลด์ ในเมือง Ostrava สาธารณรัฐเช็ก	12.80	35.80	21.60	[81]
บริษัทเทคโนโลยี White Dwarf Intelligent ในเมือง Jiangsu ประเทศจีน	18.20	51.50	30.30	[82]
ร้านกาแฟทิม ฮอร์ดันส์ ในเมือง Truro ประเทศแคนาดา	16.00	25.20	26.80	[83]
ร้านกาแฟในภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเวโรนา ประเทศอิตาลี	20.60	46.50	12.30	[84]
โรงงานอุตสาหกรรมเนสท์เล่ ในเมือง Araras ประเทศบราซิล	18.45	16.88	40.67	[85]

*NR = No report

4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของกากกาแฟ

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากกาแฟเมื่อได้รับความร้อนภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนสำหรับกากกาแฟต่างแหล่งที่มาแสดงดังภาพที่ 14 พบว่ากากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CC-SCG) และร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (LC-SCG) มีน้ำหนักคงเหลือและการหายไปของน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันประมาณ 10.85 ± 0.05 และ 89.10 ± 0.05 % ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสทั้งเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กาก

กาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (IC-SCG) มีน้ำหนักคงเหลือมากที่สุดพร้อมกับการหายไปของน้ำหนักน้อยที่สุด โดยเท่ากับ 18.95 และ 81.05 % ตามลำดับ (แสดงตามตารางที่ 9) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของลิกนินที่เป็นส่วนประกอบที่มีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุด นอกจากนั้นภาพที่ 14 แสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %weight loss กับอุณหภูมิ (TGA) และ Deriv. Weight Change (%/°C) กับอุณหภูมิ (DTA) ซึ่งจะบ่งบอกการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในแต่ละอุณหภูมิ โดยเริ่มจากระยะแรกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150°C น้ำหนักที่ลดลงจะเป็นผลมาจากการระเหยของน้ำ ต่อมาระยะที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 225°C ถึง 325°C เป็นการสลายตัวทางความร้อนของเฮมิเซลลูโลส และระยะที่สามเป็นการสูญเสียน้ำหนักที่มากที่สุดคือช่วงอุณหภูมิประมาณ 325°C ถึง 425°C ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวด้วยความร้อนของเซลลูโลส ส่วนระยะสุดท้ายที่อุณหภูมิมากกว่า 450°C จะเกิดทีละน้อยทำให้ไม่มีลักษณะของพีคที่ชัดเจน เนื่องจากการย่อยของลิกนินที่เป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุด [76, 86, 87]



ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %weight loss กับอุณหภูมิ (TGA)

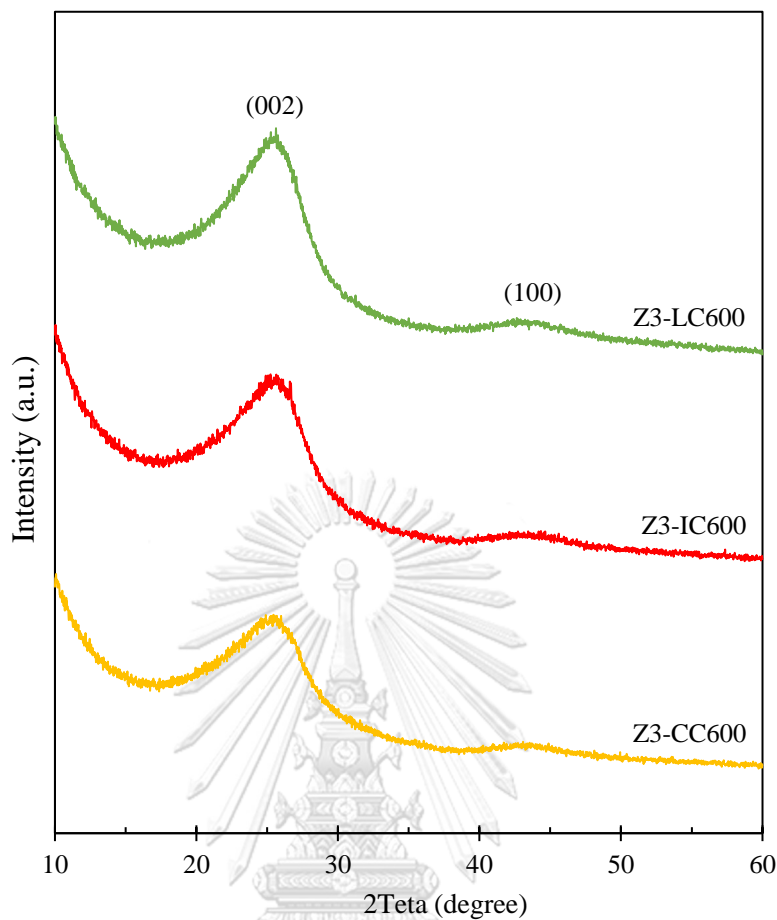
และ Deriv. Weight Change (%/°C) กับอุณหภูมิ (DTA) ของกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CC-SCG) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (LC-SCG) และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (IC-SCG)

ตารางที่ 9 แสดง %burn-off ของกากกาแฟในแต่ละแหล่งที่มา

แหล่งที่มากากกาแฟ	น้ำหนักคงเหลือ (residual mass, %)	%การหายไป (burn-off)
โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป	18.95	81.05
ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	10.85	89.15
ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	10.90	89.10

4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและการจัดเรียงตัวของผลึก

ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปทดสอบหารูปแบบโครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องมือ X-ray diffractometer แสดงดังภาพที่ 15 พบว่า XRD spectra ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มา ซึ่งได้แก่ ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) แสดง broad peak ที่บริเวณ 2θ ในช่วง 22° ถึง 26° (002) และ 42° ถึง 43° (100) ซึ่งแสดงถึงเฟสของคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) [88, 89] ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าทุกตัวอย่างเป็นคาร์บอนอสัณฐาน นอกจากนี้ยังสามารถบอกเป็นนัยได้ว่าการล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกสามารถกำจัดซิงค์คลอไรด์ออกจากถ่านกัมมันต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่มีการแสดง peak ของสารประกอบซิงค์



ภาพที่ 16 X-ray diffraction pattern ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟใน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซังค์คัลไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C

4.1.5 การศึกษาพื้นฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ศึกษาพื้นฐานวิทยาและลักษณะเชิงพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ถูกตรวจสอบโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) โดยทำการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่มีแหล่งที่มาจากกากกาแฟจากร้านกาแฟใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟใน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) แสดงดังภาพที่ 17 [a-c] พบว่าการกระจายตัวของขนาดถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟทั้ง 3 แหล่งที่มี

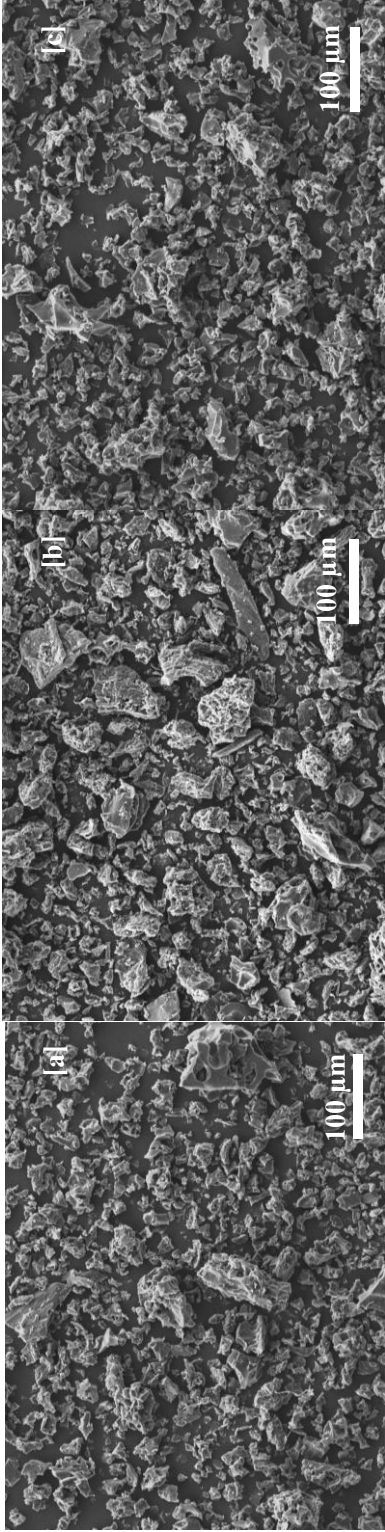
ความไม่สม่ำเสมอ โดยมีการกระจายขนาดอยู่ในช่วง 30 ถึง 80 μm และภาพที่ 17 [d-f] พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มา มีลักษณะเป็นชิ้น (flake) นอกจากนั้นภาพที่ 18 [a-f] ยังแสดงถึงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบว่าทุกตัวอย่างมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ

การศึกษา SEM-EDS เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุแสดงดังตารางที่ 10 โดยจากทั้ง 3 พื้นที่พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุ 2 ชนิด ซึ่งได้แก่คาร์บอนและออกซิเจน โดยเฉลี่ยจากทั้ง 3 บริเวณ มีร้อยละ โดยอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 93.98, 93.39 และ 95.36 สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ได้ จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) ตามลำดับ และมีร้อยละ โดยอะตอมเฉลี่ยของออกซิเจนเท่ากับ 6.02, 4.76 และ 6.79 สำหรับ Z3-CC600, Z3-IC600 และ Z3-LC600 นอกจากนั้นผลลัพธ์ยังสอดคล้องกับรูปแบบ โครงสร้างผลึก XRD spectra ของถ่านกัมมันต์ซึ่งไม่มีการแสดง peak ของสารประกอบเชิงซ้อนตาม หัวข้อ 4.1.4

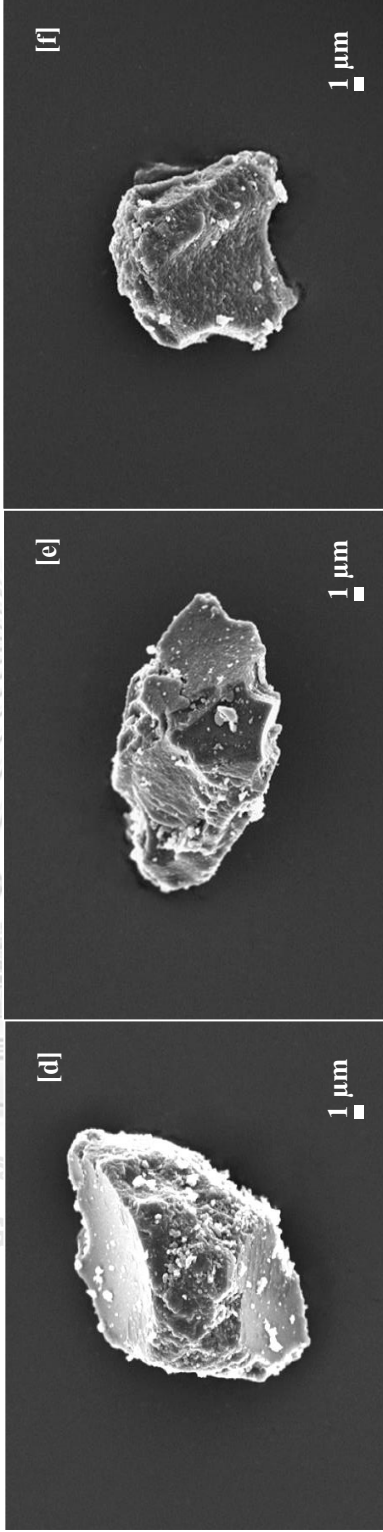
ตารางที่ 10 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟ

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี											
	บริเวณที่ 1				บริเวณที่ 3				บริเวณที่ 3			
	ร้อยละ		ร้อยละ		ร้อยละ		ร้อยละ		ร้อยละ		ร้อยละ	
	โดยอะตอม	โดยน้ำหนัก	โดยอะตอม	โดยน้ำหนัก	โดยอะตอม	โดยน้ำหนัก	โดยอะตอม	โดยน้ำหนัก	โดยอะตอม	โดยน้ำหนัก	โดยอะตอม	โดยน้ำหนัก
C	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C	O	
Z3-CC600	94.54	5.46	92.85	7.15	94.22	5.78	92.45	7.55	93.18	6.82	91.12	8.88
Z3-IC600	96.03	3.97	94.78	5.22	95.49	4.89	93.59	6.41	94.56	5.44	92.88	7.12
Z3-LC600	93.32	6.68	91.30	8.70	94.24	5.76	92.47	7.53	92.60	7.94	89.69	10.31

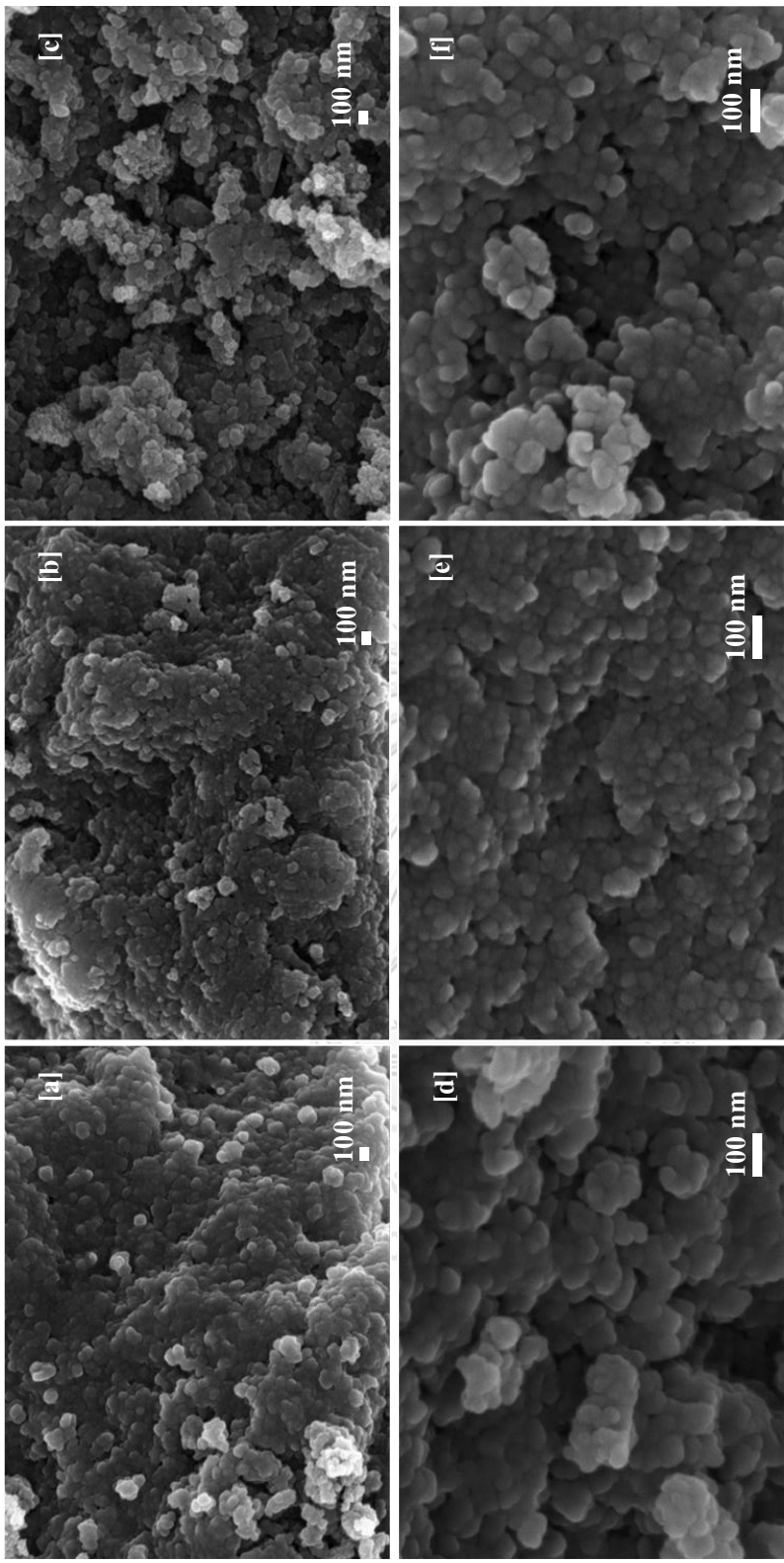
กำลังขยายที่ 200



กำลังขยายที่ 3,000



ภาพที่ 17 แสดงลักษณะและลักษณะพื้นผิวของของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [a, d] ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [b, e] และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป [c, f] โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์กรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C



กำลังขยายที่ 30,000

กำลังขยายที่ 100,000

ภาพที่ 18 แสดงต้นฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของของด้านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [a, d] รานกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [b, e] และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป [c, f] โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซึ่งคั่วที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C

4.2 การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบบลึค 5 แบบกะ (batch adsorption)

4.2.1 การศึกษาผลของวัสดุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟ

การศึกษาผลของวัสดุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟต่อการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบบลึค 5 แบบกะ โดยทำการศึกษาผ่านวัสดุดูดซับ ได้แก่ กากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรม (IC-SCG) ถ่านที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C (Char-SCG) ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 คาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C โดยไม่ทำการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนนำไปใช้งาน (AC-No-HCl) และถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 คาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C โดยทำการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนนำไปใช้งาน (Z3-IC600) ตามตารางที่ 11 พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 90 mg/L วัสดุดูดซับที่ไม่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์มี %Removal และปริมาณการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบบลึค 5 ณ สภาวะสมดุล (q_{eq}) ที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรม (IC-SCG) มีค่า %Removal เท่ากับ 2.56% และค่า q_{eq} เท่ากับ 1.93 mg/g และถ่านที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C (Char-SCG) มีค่า %Removal เท่ากับ 5.90% และค่า q_{eq} เท่ากับ 4.45 mg/g ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติความเป็นรูพรุนของทั้งสองที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพียงเล็กน้อย ในขณะที่วัสดุดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์มี %Removal และปริมาณการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบบลึค 5 ณ สภาวะสมดุล (q_{eq}) ที่สูง โดยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 คาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C โดยไม่ทำการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนนำไปใช้งาน (AC-No-HCl) มีค่า %Removal เท่ากับ 88.89% และค่า q_{eq} เท่ากับ 67.03 mg/g และเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 คาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C โดยทำการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Z3-IC600) ก่อนนำไปใช้งานพบว่า มีค่า %Removal เท่ากับ 91.02% และค่า q_{eq} เท่ากับ 69.25 mg/g ซึ่งจากผลของการดูดซับสามารถบอกได้ว่าในขั้นตอนการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนนำไปใช้งาน แทบไม่มีส่วนเกี่ยวข้องต่อการสร้างรูพรุนเพิ่มเติม โดยขั้นตอนนี้เป็นเพียงการทำความสะอาดเคมีที่อาจตกค้างบนถ่านกัมมันต์เท่านั้น ดังนั้นจึง

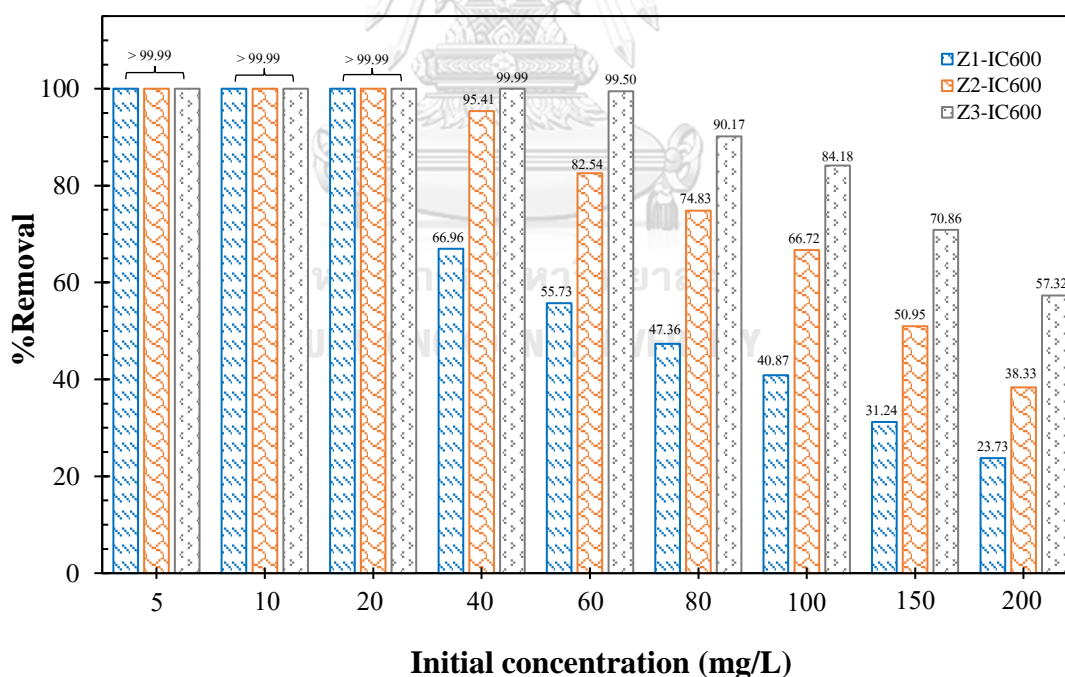
ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Z3-IC600) และไม่ผ่านการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (AC-No-HCl) มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 11 แสดง %Removal และปริมาณการดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟแบดส์ 5 ณ สภาวะสมดุล (q_{eq}) สำหรับวัสดุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/L)	%Removal	q_{eq} (mg/g)
IC-SCG	90.50	88.18	2.56	1.93
Char-SCG	90.50	85.16	5.90	4.45
AC-No-HCl	90.50	10.06	88.89	67.03
Z3-IC600	91.31	8.20	91.02	69.25

4.2.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นภายใต้สภาวะการสังเคราะห์ต่าง ๆ

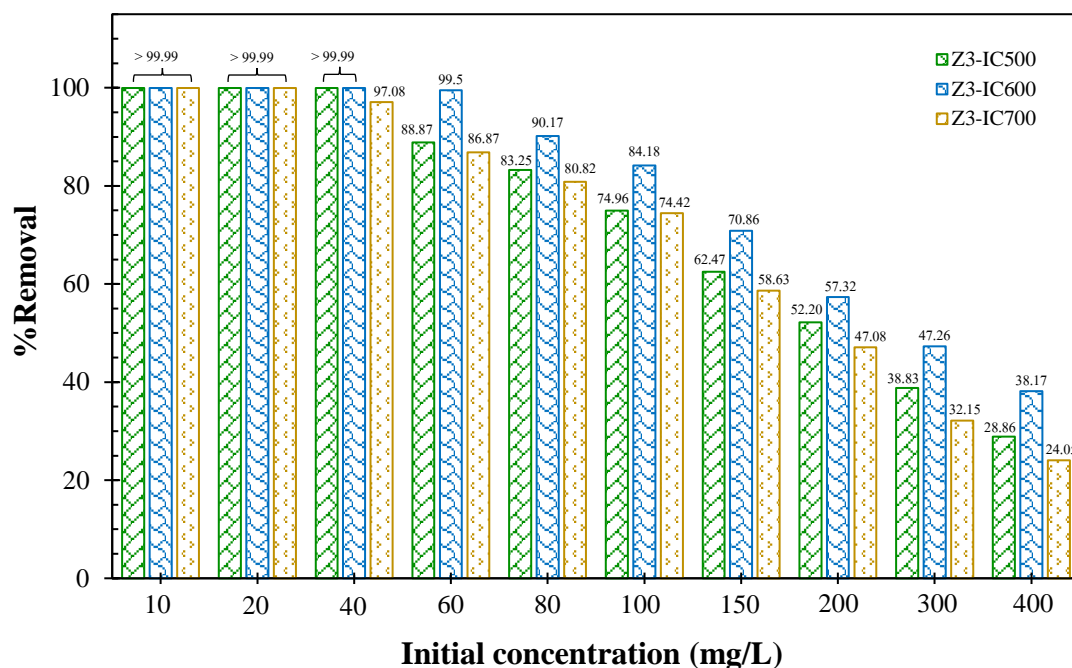
4.2.1.1 ผลของอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสี่อ้อมรีแอกทีฟแบดส์ 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับของถ่านกัมมันต์ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนมวล 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) ภายใต้สภาวะการดูดซับในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ถึง 200 mg/L, pH เท่ากับ 7 และ ปริมาณคาร์บอน 1.2 g/L โดยแสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 17 โดยค่า %removal ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 เพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวหรือตำแหน่งสำหรับการดูดซับไม่เพียงพอตามความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า %removal เพิ่มขึ้นสูงตามสัดส่วนของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ (Z3-IC600 > Z2-IC600 > Z1-IC600) เนื่องจากการมีอยู่ของรูพรุนขนาดมีโซพอร์ของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น

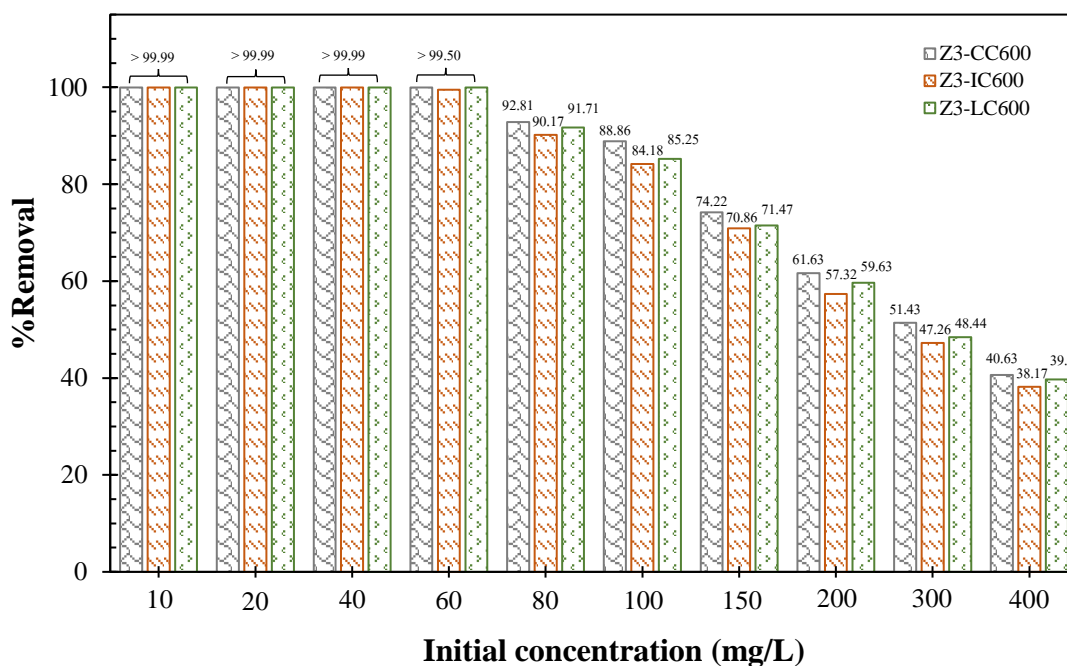
4.2.1.2 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700°C (Z3-IC700)

การศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันของถ่านกัมมันต์ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 โดยศึกษากระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700 °C (Z3-IC700) ภายใต้สภาวะการดูดซับในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ถึง 400 mg/L, pH เท่ากับ 7 และ ปริมาณคาร์บอน 1.2 g/L ซึ่งแสดงร้อยละการกำจัดสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 18 พบว่าค่า %removal เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันในช่วง 500°C ถึง 600°C จากนั้นลดต่ำลงที่อุณหภูมิ 700°C ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณรูพรุนชนิดมีโซพอร์ที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิจาก 500°C เป็น 600°C แล้วลดลงที่อุณหภูมิสูงถึง 700°C

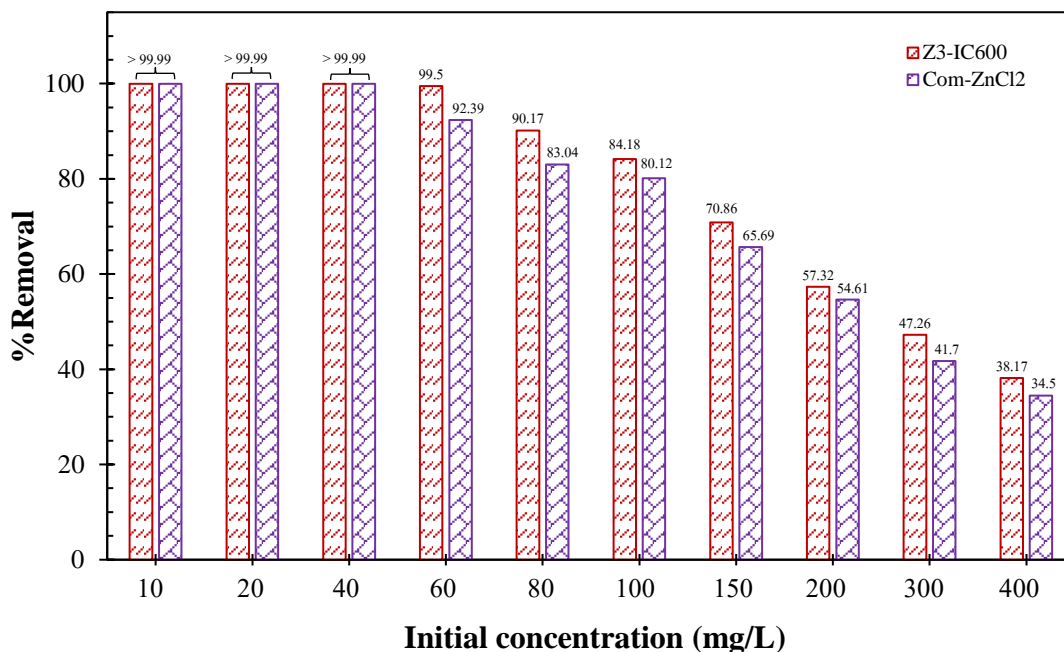
4.2.1.3 ผลของแหล่งที่มาของกากกาแฟ



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันที่ 600°C

การศึกษาผลของแหล่งที่มาของกากกาแฟที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟแบบลิค 5 โดยศึกษาแหล่งที่มาของกากกาแฟได้แก่ ร้านกาแฟที่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) ภายใต้สภาวะการดูดซับในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ถึง 400 mg/L, pH เท่ากับ 7 และปริมาณคาร์บอน 1.2 g/L แสดงร้อยละการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบบลิค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 19 ซึ่งพบว่าค่า %removal ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งชนิดไมโครพอร์และมีโซพอร์ใกล้เคียงกัน สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก 3 แหล่งที่มาของกากกาแฟ

4.2.1.4 ผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่าง %removal กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อมรีแอกทีฟแบบลิค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่กระตุ้นในอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 (Com-ZnCl₂) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C

การศึกษาผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟแบบลิค 5 ของถ่านกัมมันต์ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl₂) ภายใต้สภาวะการดูดซับในช่วงความเข้มข้น

เริ่มต้น 10 ถึง 400 mg/L, pH เท่ากับ 7 และ ปริมาณคาร์บอน 1.2 g/L แสดงร้อยละการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 20 ซึ่งพบว่าค่า %removal ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนทั้งชนิดไมโครพอร์และมีโซพอร์ใกล้เคียงกัน สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ทั้งเกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม

4.2.3 สมดุลการดูดซับ

ผลจากการศึกษาของความเข้มข้นเริ่มต้นสีข้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับที่สภาวะสมดุล ได้แก่ Langmuir และ Freundlich ซึ่งใช้การคำนวณด้วยวิธีแบบ non-linear และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสอดคล้องกันของข้อมูลจากการทดลองและแบบจำลองไอโซเทอม เพื่ออธิบายกลไกกระบวนการดูดซับระหว่างตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ดังในภาพที่ 22 และพารามิเตอร์แสดงตามตารางที่ 12

จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอม พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:2 (Z2-IC600) และถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-AC) สอดคล้องกับแบบจำลองของ Langmuir อยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) การกระจายตัวของบริเวณดูดซับสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) และพลังงานของการดูดซับคงที่ ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.93 และ 0.95 สำหรับ Z2-IC600 และ Com-AC ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:1 (Z1-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500) และ 700°C (Z3-IC700) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) และร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl₂) พบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองของ Freundlich ซึ่งเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) เกิดการดูดซับแบบพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) และพลังงานของการดูดซับไม่คงที่ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94, 0.94, 0.93, 0.90, 0.94, 0.94 และ 0.97 สำหรับ Z1-IC600, Z3-IC600, Z3-IC500, Z3-IC700, Z3-CC600, Z3-LC600 และ Com-ZnCl₂ ตามลำดับ นอกจากนี้ตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละแบบจำลองสามารถนำมาใช้อธิบายถึงกลไกต่าง ๆ ในกระบวนการดูดซับแสดงดังในตารางที่ 12

สำหรับค่า R_L เป็นตัวแปรที่ถูกใช้เพื่ออธิบายแนวโน้มของกระบวนการดูดซับ ตามแบบจำลองของ Langmuir โดยหากค่า R_L อยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 บ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับนั้นสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากค่า $R_L > 1$ แสดงว่ากระบวนการดูดซับนั้นไม่มีประสิทธิภาพ จากการคำนวณ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:2 (Z2-IC600) มีค่า R_L อยู่ในช่วง 0-0.22 และถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-AC) มีค่า R_L อยู่ในช่วง 0.05-0.62 ซึ่งนั่นบ่งบอกว่าถ่านกัมมันต์ทั้งหมดมีค่า R_L อยู่ระหว่าง 0-1 ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่าในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา ถ่านกัมมันต์ทั้งหมดมีแนวโน้มเกิดการดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับแบบจำลองของ Freundlich ค่า $1/n$ คือความเข้มของการดูดซับ ซึ่ง n เป็นตัวแปรที่ถูกใช้อธิบายแนวโน้มของกระบวนการดูดซับ โดยหากค่า $n > 1$ บ่งบอกถึงกระบวนการดูดซับนั้นสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการคำนวณพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:1 (Z1-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500) และ 700°C (Z3-IC700) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจาก ร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) และ ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl₂) มีค่า n เท่ากับ 4.69, 5.05, 5.78, 5.22, 5.04, 4.95 และ 4.45 ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกว่าถ่านกัมมันต์มีค่า $n > 1$ จึงสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ทั้งหมดมีแนวโน้มเกิดการดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพ

4.2.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

สำหรับค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_m) ถูกคำนวณมาจากแบบจำลองของ Langmuir ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว ซึ่งค่า q_m เป็นตัวแปรที่ถูกใช้สำหรับอธิบายประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยผลของค่า q_m จะแปรผันตรงตามประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับนั้น ๆ

- ผลของอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสี่อัมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายใต้ผลของอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ จากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนมวล 1:1 (Z1-IC600), 1:2 (Z2-IC600) และ 1:3 (Z3-IC600) มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 34.96, 59.86 และ 120.39 mg/g ตามลำดับ พบว่าการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนมวล 1:3 มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด ซึ่งแปรผันตามการมีอยู่พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์

- ผลของอุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอไนเซชัน

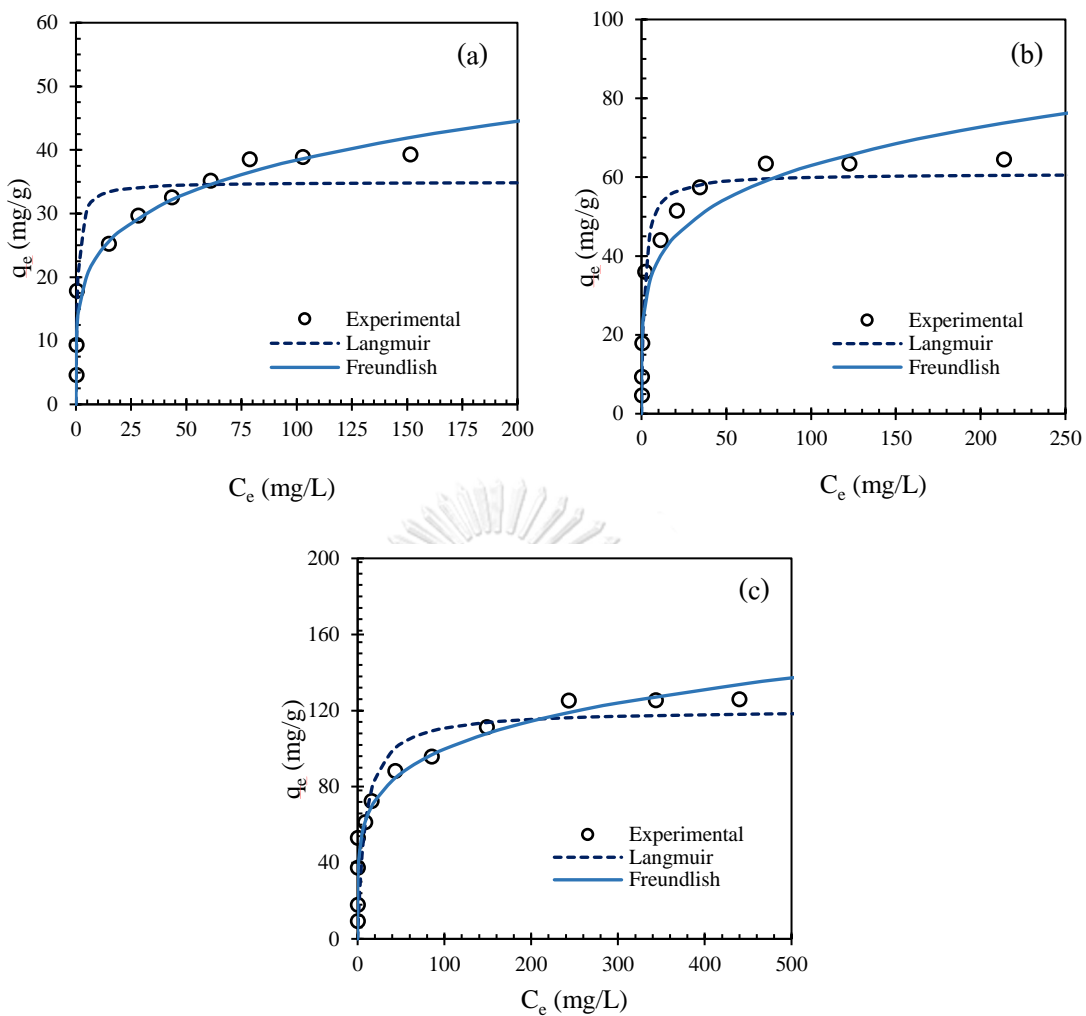
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายใต้ผลของอุณหภูมิในกระบวนการคาร์บอไนเซชัน จากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500), 600°C (Z3-IC600) และ 700°C (Z3-IC700) ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 93.79, 120.39 และ 71.00 mg/g ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิคาร์บอไนเซชันที่ 600°C มีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มของการมีอยู่ของปริมาณรูพรุนชนิดมีโซพอร์

- ผลของแหล่งที่มากากกาแฟ

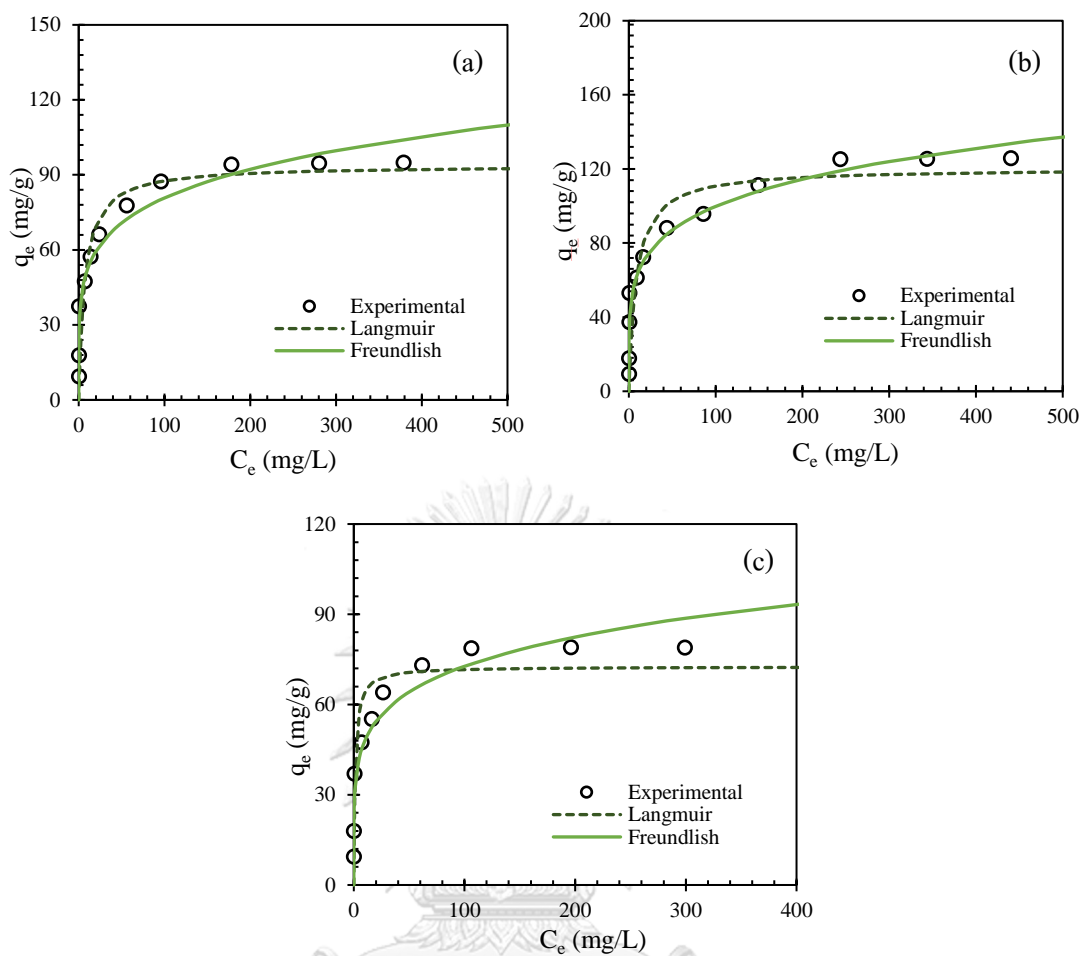
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายใต้ผลของแหล่งที่มากากกาแฟ จากถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ผ่านกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (Z3-IC600) ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 124.83, 122.05 และ 120.39 mg/g ตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มา มีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงใกล้เคียงกัน เนื่องจากการมีอยู่พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนชนิดไมโครพอร์และมีโซพอร์ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มาไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

- ผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์

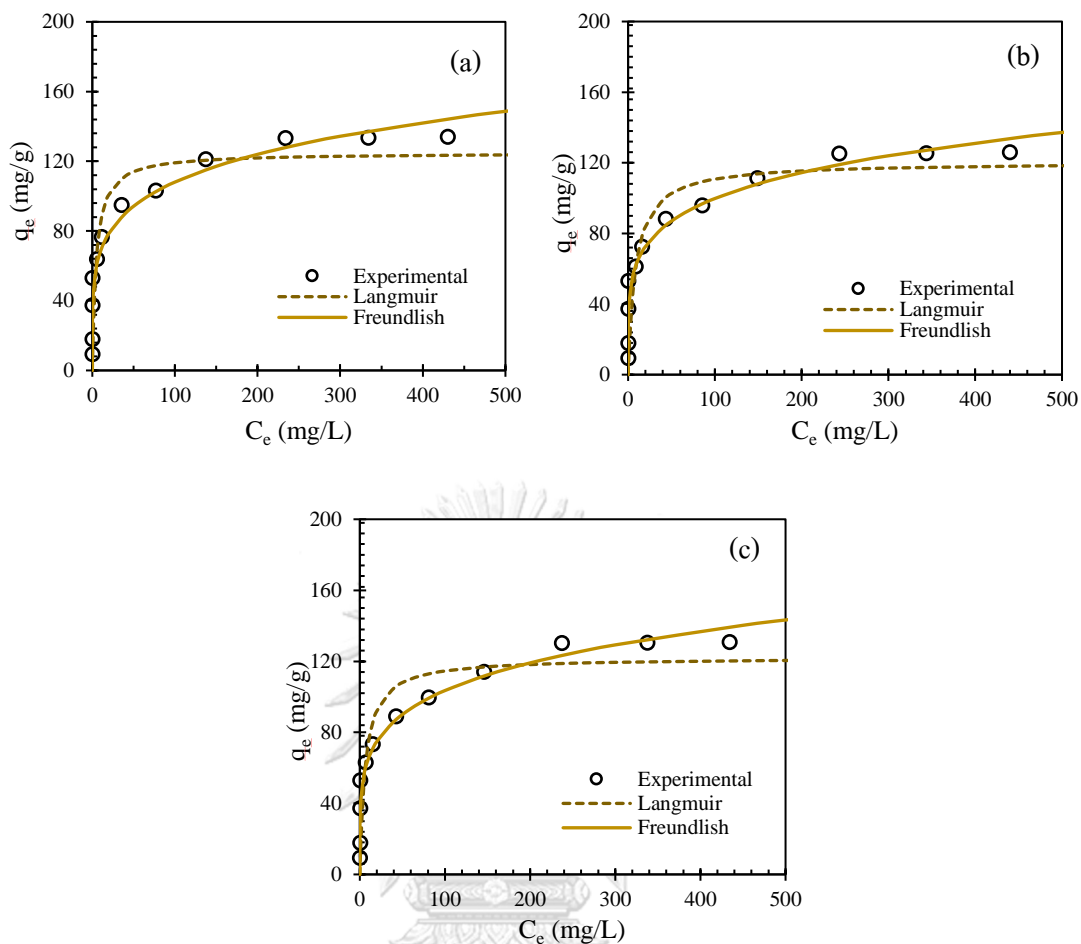
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายใต้ผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ จากถ่านกัมมันต์ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ (Z3-IC600) และเกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl_2) ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 120.39 และ 113.01 mg/g ตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ได้รับค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงสุดที่มากกว่าเกรดอุตสาหกรรมเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณรูพรุนชนิดมีโซพอร์ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



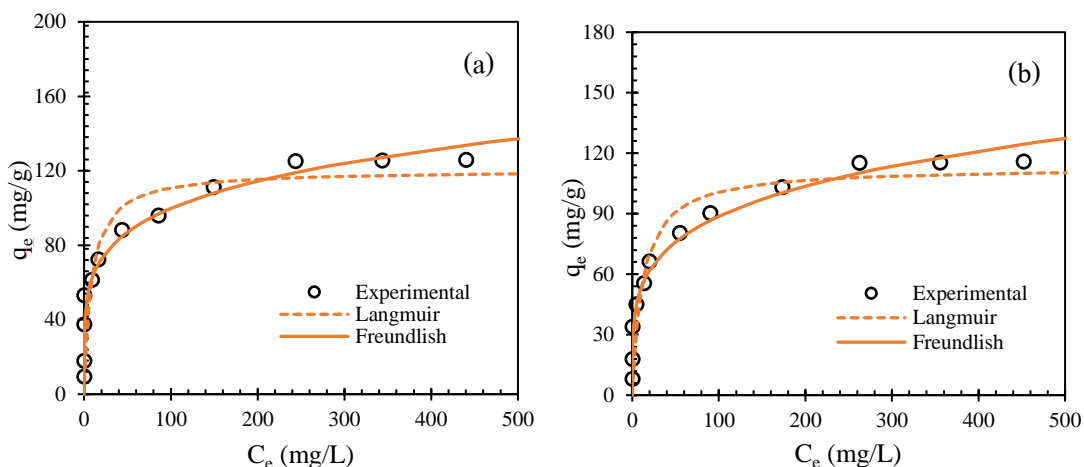
ภาพที่ 23 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:1 (a), 1:2 (b) และ 1:3 (c) โดยควบคุมอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C



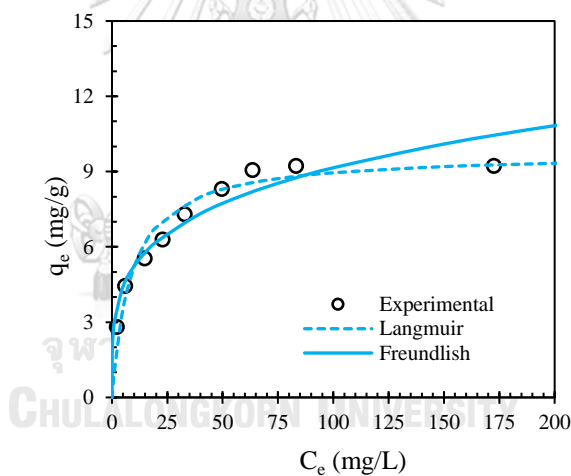
ภาพที่ 24 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลของกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 โดยทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (a), 600°C (b) และ 700°C (c)



ภาพที่ 25 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (a) ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (b) และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป (c) โดยควบคุมอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซังคั่วโคลด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C



ภาพที่ 26 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่ถูกกระตุ้นในอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 (a) และเกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 (b) โดยควบคุมอุณหภูมิ คาร์บอนไนเซชันที่ 600°C



ภาพที่ 27 แสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบกะ ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่สังเคราะห์ได้จากกะลามะพร้าว ซึ่งมีค่า Iodine Number เท่ากับ 1000 mg/g

ตารางที่ 12 แสดงค่าคงที่แบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich สำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5

ตัวอย่าง	ค่าคงที่แบบจำลองไอโซเทอมและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์						
	Langmuir				Freundlich		
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2 (-)	K_f (mg/g)(l/mg) ^{1/n}	n (-)	R^2 (-)
Z1-IC600	34.96	1.42	0-0.11	0.86	14.40	4.69	0.94
Z2-IC600	60.92	0.61	0-0.22	0.96	24.19	4.81	0.89
Z3-IC600	120.39	0.11	0.02-0.61	0.78	40.11	5.05	0.94
Z3-IC500	93.78	0.14	0.01-0.38	0.85	33.42	5.22	0.93
Z3-IC700	73.53	0.72	0-0.11	0.93	32.51	5.67	0.90
Z3-CC600	124.83	0.21	0.01-0.29	0.83	43.37	5.04	0.94
Z3-LC600	122.05	0.15	0.01-0.37	0.80	40.87	4.95	0.94
Com-ZnCl ₂	113.01	0.08	0.02-0.56	0.89	31.51	4.45	0.97
Com-AC	9.73	0.11	0.05-0.62	0.95	2.99	4.12	0.90

4.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบกะ วัสดุดูดซับต่าง ๆ

จากตารางที่ 12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ของกลุ่มวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนและกลุ่มวัสดุคาร์บอนที่ไม่มีรูพรุน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C (Z3-IC600) ทำการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ภายใต้สภาวะการทดลองที่ pH เท่ากับ 7 มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 120.39 mg/g ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าอย่างเห็นได้ชัด (9.73 และ 12.25 [90] mg/g) และสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากชีวมวลเช่น เปลือกปาล์ม [17] ต้นคารอบ [91] และอาเคเซียไนล์ [92] โดยมีค่า q_m เท่ากับ 25.12, 36.90 และ 56.00 mg/g ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับที่ไม่ใช่คาร์บอนรูพรุน พบว่ามีค่า q_m อยู่ในระดับสูง ทั้งนี้สภาวะที่ใช้ในการทดลองการดูดซับค่า pH เท่ากับ 7 ซึ่งสภาวะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงโดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่น ๆ ในการปรับสภาวะ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายได้

สำหรับในงานวิจัยที่ศึกษาการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 โดยใช้วัสดุดูดซับจากกากกาแฟ พบว่ามีเพียงงานเดียว ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในระดับปานกลาง (77.52 mg/g) [93] ดังนั้นการใช้งานถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อศึกษาการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 ในแบบคอลัมน์ ยิ่งไปกว่านั้นในการศึกษาผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ยังพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C (Com-ZnCl₂) มีประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 ($q_m = 113.01$ mg/g) ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ ซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเป็นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบราคาของสารเคมีซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่สูงกว่าซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรมมากกว่า 10 เท่า

ตารางที่ 13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 แบบกะ ของวัสดุดูดซับต่าง ๆ

วัสดุดูดซับ	แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ	pH	q_m (mg/g)	อ้างอิง
กลุ่มที่ 1: วัสดุดูดซับคาร์บอนรูพรุน				
Activated carbon from spent coffee grounds-AR grade of ZnCl ₂ (Z3-IC600)	Freundlich	7	120.39	This work
Activated carbon from spent coffee grounds-Commercial grade of ZnCl ₂ (Com-ZnCl ₂)	Freundlich	7	113.01	This work
Commercial activated carbon (Com-AC)	Langmuir	7	9.73	This work
Activated carbon from Palm shell	Freundlich	2	25.12	[17]
Activated carbon from Carob tree	Langmuir	4	36.90	[91]
Activated carbon from acacia nilotica	Langmuir	3	56.00	[92]
Modified activated carbon SPC	Langmuir	2	71.42	[94]
Biochar from coconut shell	Toth	2	98.20	[95]
Magnetic Mesoporous Carbon from Macadamia Nutshell	Langmuir	7	123.51	[90]
Commercial activated carbon	Langmuir	7	12.25	
Granular activated carbon Filtrasorb 400	Redlich–Peterson	NR	197.50	[96]

ตารางที่ 13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 แบบกะ ของวัสดุดูดซับต่าง ๆ

วัสดุดูดซับ	แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ	pH	q_m (mg/g)	อ้างอิง
Mesoporous carbon (Sucrose: carbon source)	Freundlich	7	210.00	[56]
กลุ่มที่ 2: วัสดุดูดซับที่ไม่ใช่คาร์บอนรูพรุน				
Macadamia seed husks	Freundlich	3	1.21	[97]
Sunflower seed shells	Langmuir	3	2.89	[98]
Buckwheat husks	Double Langmuir	3	4.43	[99]
Pumpkin seed hulls	Langmuir	NR	6.05	[100]
Buckwheat husks aminated with ammonia water	Double Langmuir	3	7.41	[99]
Wheat Straw Modified with Epichlorohydrin	Langmuir	3	15.28	[101]
Cotton fibers aminated with epichlorohydrin and ammonia water	Langmuir	3	36.77	[102]
Spent tea leaves modified with polyethylenimine	Temkin	NR	71.90	[103]
Coffee waste modified with polyethylenimine	Langmuir	7	77.52	[93]

*NR = No report

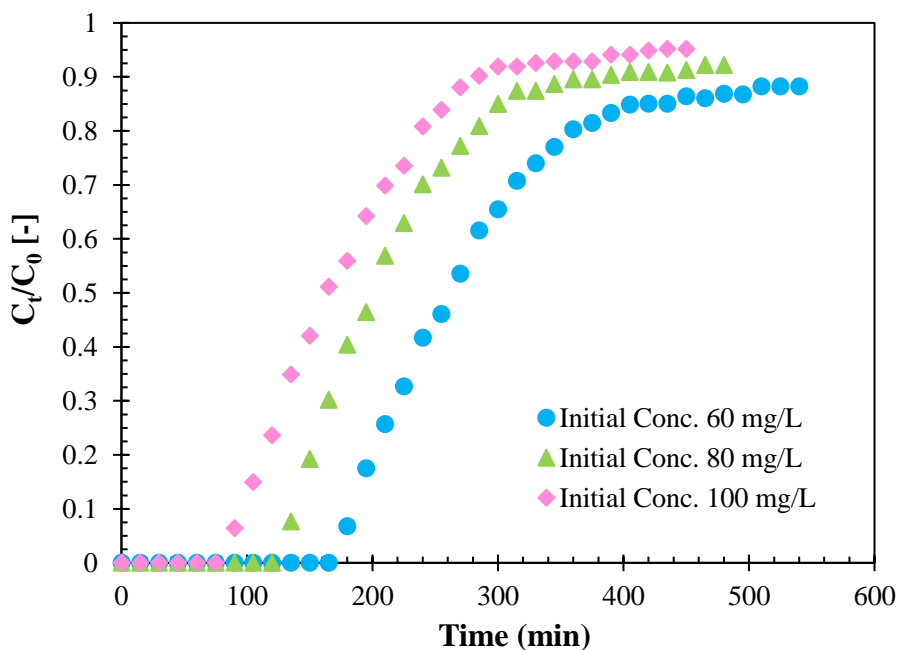
4.3 การดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 แบบคอลัมน์ (column adsorption)

สำหรับการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 แบบคอลัมน์ ดำเนินการโดยใช้วัสดุดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป ซึ่งกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl₂) และถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว (Com-AC) โดยทำการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 ภายใต้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 cm

4.3.1 การศึกษาการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายใต้สภาวะการดูดซับต่าง ๆ

4.3.1.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น (initial concentration)

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ โดยศึกษาในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ถึง 100 mg/L และกำหนดอัตราการไหลของสี้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 และความสูงของเบดนิ่งให้อยู่ที่ 10 mL/min และ 5 cm ตามลำดับ ซึ่งแสดงพฤติกรรมของการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ผ่านกราฟเบรคทรู ดังภาพที่ 22 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นรูปร่างตัว 'S' [104] และพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ แสดงตารางที่ 13 ตามลำดับ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดเบรคทรู (q_b) และจุดอิ่มตัว (q_c) เพิ่มขึ้นตาม โดยความเข้มข้นเริ่มต้นสี้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ 100 mg/L มีค่า q_b และ q_c สูงที่สุดเท่ากับ 35.82 และ 60.65 mg/g ตามลำดับ เนื่องจากแรงขับ (driving force) ขึ้นกับความแตกต่างของความเข้มข้นของสี้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 กับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้นจึงเป็นเหตุให้ driving force เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งส่งผลต่อการแพร่กระจายของรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายในอนุภาคถ่านกัมมันต์ [105, 106] ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นก็ส่งผลให้เวลา ณ จุดเบรคทรู (t_b) ลดลง ซึ่งเป็นเหตุให้ปริมาตรน้ำสังเคราะห์ที่ถูกกำจัดสี้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ออกไปมากกว่า 95% (V_b) ลดลงจาก 1.80 เป็น 0.90 L เช่นกัน เพราะการเพิ่มขึ้นของอัตราการแพร่กระจายของรีแอกทีฟแบล็ค 5 ภายในอนุภาคถ่านกัมมันต์ ทำให้ตำแหน่งยึดเกาะ (binding sites) อิ่มตัวเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นส่งผลให้ค่าความยาวของชั้นการดูดซับ (H_{MTZ}) เพิ่มขึ้น [107]

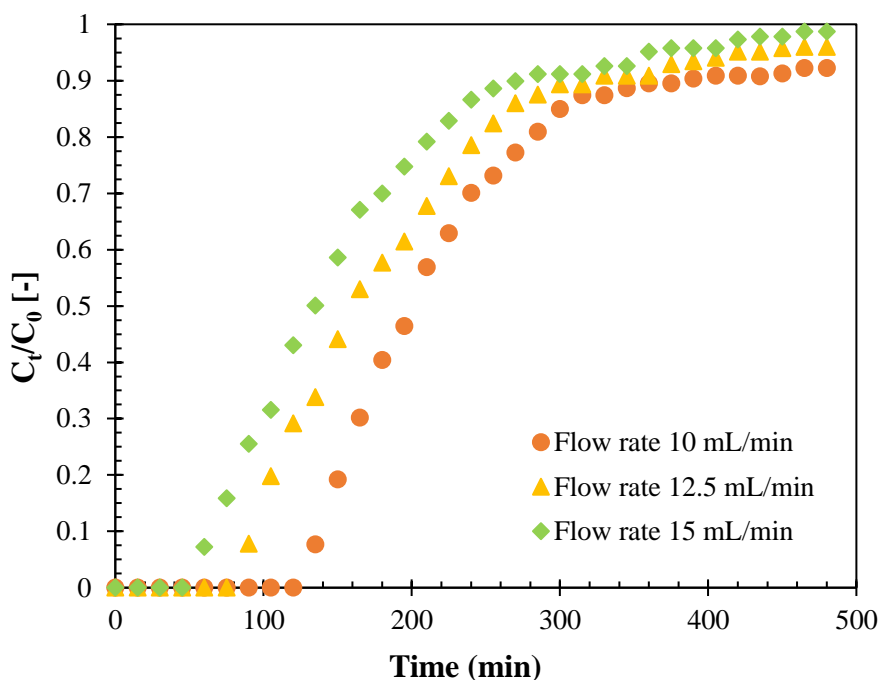


ภาพที่ 28 แสดงกราฟเบรคทรูสำหรับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 60, 80 และ 100 mg/L ภายใต้สภาวะการดูดซับที่อัตราการไหล 10 mL/min และความสูงเบดนิ่ง 5 cm

4.3.1.2 ผลของอัตราการไหล (flow rate)

การศึกษาผลของอัตราการไหล ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ โดยศึกษาในช่วงอัตราการไหล 10 ถึง 15 mL/min และกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 และความสูงของเบดนิ่งให้อยู่ที่ 80 mg/L และ 5 cm ตามลำดับ ซึ่งแสดงพฤติกรรมการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ผ่านกราฟเบรคทรูดังภาพที่ 23 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นรูปร่างตัว ‘S’ และพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ ตารางที่ 13 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลในช่วง 10 ถึง 15 mL/min ส่งผลประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดเบรคทรู (V_b) ลดลงจาก 35.06 เป็น 21.98 mg/g และเวลา ณ จุดเบรคทรู (t_b) ที่ลดลงเป็นเหตุให้ปริมาตรน้ำสังเคราะห์ที่ถูกกำจัดสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ออกไปมากกว่า 95% (V_b) ลดลงจาก 1.35 เป็น 0.90 L แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดอิ่มตัว (q_s) ซึ่งทั้งหมดมีค่าประมาณ 55.50 ± 0.50 mg/g เนื่องจากอัตราการไหลของตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับเวลาของตัวถูกดูดซับที่คงอยู่ในคอลัมน์ (residence time) [104, 106] และเมื่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า q_s อาจกล่าวได้ว่าในช่วงอัตราการไหล 10 ถึง 15 mL/min มี residence time เพียงพอสำหรับกระบวนการแพร่กระจาย

ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ นอกจากนั้นยังพบว่าความยาวของชั้นการดูดซับ (H_{MTZ}) เป็นอิสระต่อผลของอัตราการไหล [108]

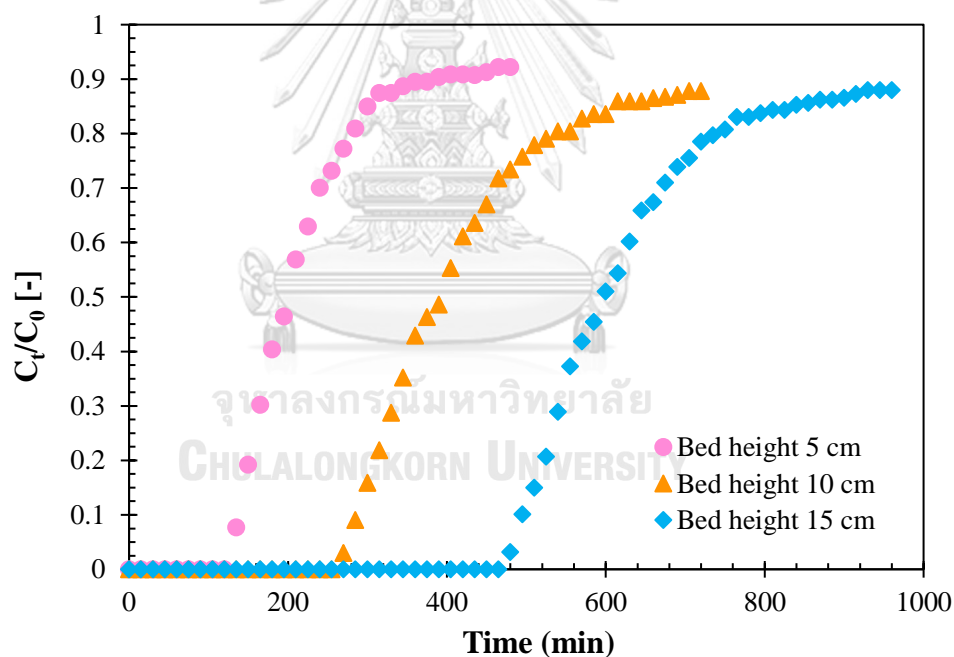


ภาพที่ 29 แสดงกราฟเบรคทรูสำหรับผลของอัตราการไหลที่ 10, 12.5 และ 15 mL/min ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และความสูงเบดนิ่ง 5 cm

4.3.1.3 ผลของความสูงของเบดนิ่ง (bed high)

การศึกษาผลของความสูงของเบดนิ่ง ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟแบดล็ค 5 แบบคอลัมน์ โดยศึกษาในช่วงความสูงของเบดนิ่ง 5 ถึง 15 cm และกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสี่อ้อมรีแอกทีฟแบดล็ค 5 และอัตราการไหลให้คงที่เท่ากับ 80 mg/L และ 10 mL/min ตามลำดับ ซึ่งแสดงพฤติกรรมการดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟแบดล็ค 5 แบบคอลัมน์ผ่านกราฟเบรคทรู ดังภาพที่ 24 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นรูปร่างตัว 'S' และพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณแสดงตามตารางที่ 13 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบดนิ่ง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดเบรคทรู (q_b) โดยเพิ่มขึ้นจาก 35.06 เป็น 43.28 mg/g และเวลา ณ จุดเบรคทรู (t_b) เพิ่มขึ้นจาก 330 เป็น 825 min เนื่องจากเมื่อมวลของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อพื้นที่ผิวและจำนวน active sites สำหรับการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งเป็นเหตุให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นและชะลอการเกิด breakthrough point [104, 109] ทำให้ปริมาตรน้ำสั่งเคราะห์ที่ถูกกำจัดสี่อ้อม

รีแอกทีฟแบล็ค 5 ออกไปมากกว่า 95% (V_b) เพิ่มขึ้นจาก 1.35 เป็น 4.80 L อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงความสูงของเบดนิ่งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดอิ่มตัว (q_e) ซึ่งทั้งหมดมีค่าประมาณ 56.00 ± 0.50 mg/g [110] นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความสูงเบดนิ่งจาก 5 cm ไปยัง 10 cm พบว่าความยาวของชั้นการดูดซับ (H_{MTZ}) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจาก 3.13 cm ไปยัง 5.71 cm แต่เมื่อเพิ่มความสูงของเบดนิ่งยาวขึ้นอีกจาก 10 cm ไปยัง 15 cm พบว่าค่า H_{MTZ} เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 5.71 cm เป็น 6.27 cm ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่า H_{MTZ} เมื่อความสูงของเบดนิ่งเพิ่มขึ้น จึงอาจเป็นผลจากความยาวที่ใช้ทดสอบไม่มากพอ [111] โดยจากงานวิจัยของคุณ โชนแมคที่ศึกษาการดูดซับสารตะกั่วแบบคอลัมน์ พบรายงานค่า H_{MTZ} เพิ่มขึ้นตามความสูงเบดนิ่งในช่วง 2 ถึง 5 cm และลดลงเมื่อเพิ่มความสูงของเบดนิ่งยาวขึ้นอีกในช่วง 5 ถึง 7 cm [40]

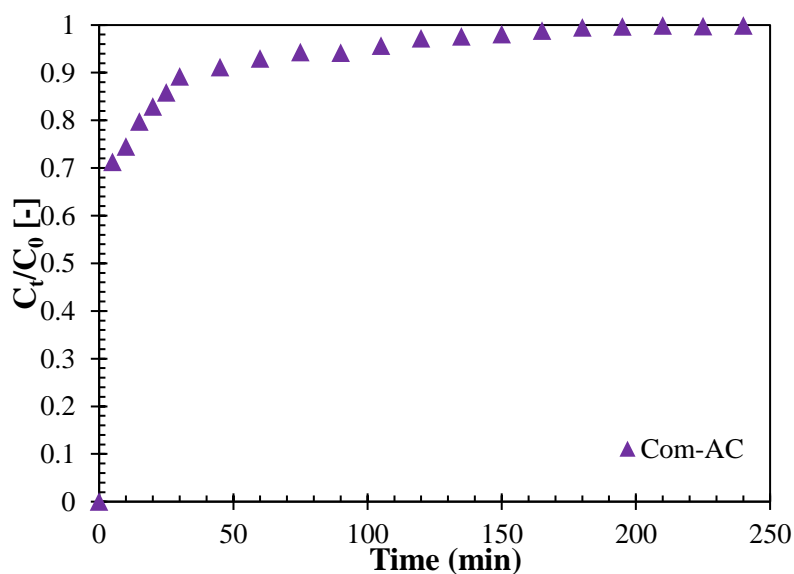


ภาพที่ 30 แสดงกราฟเบรคทรูสำหรับผลของความสูงเบดนิ่งที่ 5, 10 และ 15 cm ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และอัตราการไหล 10 mL/min

4.3.2 การศึกษาการกำจัดสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ผลของการดูดซับสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ โดยควบคุมสภาวะการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 อัตราการไหล และ

ความสูงของเบดนิ่ง ให้คงที่ ซึ่งเท่ากับ 100 mg/L, 10 mL/min และ 5 cm ตามลำดับ แสดงพฤติกรรมการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ผ่านกราฟเบรคทอรู ดังภาพที่ 25 พบว่ากราฟมีลักษณะไม่เป็นรูปร่างตัว 'S' และเนื่องจากตัวถูกดูดซับถูกปลดปล่อยออกมาทันที ทำให้ไม่มีปริมาณน้ำสังเคราะห์ที่ถูกกำจัดสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ออกไปมากกว่า 95% (V_b) โดยพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณแสดงตามตารางที่ 13 พบว่าเวลา ณ จุดอิ่มตัว (t_c) เท่ากับ 165 min และประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดอิ่มตัว (q_c) เท่ากับ 1.54 mg/g ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนชนิดมีโซพอร์น้อย ไม่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์



ภาพที่ 31 แสดงกราฟเบรคทอรูของ Com-AC ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L อัตราการไหล 10 mL/min และความสูงเบดนิ่ง 5 cm

ตารางที่ 14 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณของการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์

ตัวอย่าง	Com-ZnCl ₂							Com-AC
ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	60	80	100	80	80	80	80	80
อัตราการไหล (mL/min)	10	10	10	12.5	15	10	10	10
ความสูงของเบดนิ่ง (cm)	5	5	5	5	5	10	15	5
H_{MTZ} (cm)	3.13	3.33	3.75	3.75	4.09	5.71	6.27	-
V_b (L)	1.80	1.35	0.90	1.13	0.90	2.70	4.80	-

ตารางที่ 14 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณของการดูดซับสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลลัมน์

ตัวอย่าง	Com-ZnCl ₂						Com-AC	
ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	60	80	100	80	80	80	80	80
อัตราการไหล (mL/min)	10	10	10	12.5	15	10	10	10
ความสูงของเบตหนึ่ง (cm)	5	5	5	5	5	10	15	5
t_b (min)	180	135	90	90	60	270	480	-
q_b (mg/g)	33.00	34.06	35.82	27.93	21.98	38.44	43.28	-
t_c (min)	480	405	360	360	330	615	825	165
q_c (mg/g)	50.74	55.96	60.40	55.47	55.02	56.25	56.33	1.54

4.3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลลัมน์ ของวัสดุดูดซับต่าง ๆ

จากตารางที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลลัมน์ของกลุ่มวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนและกลุ่มวัสดุคาร์บอนที่ไม่มีรูพรุน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟซึ่งผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรมในสภาวะการทดลองที่ pH เท่ากับ 7 มีค่า q_c เท่ากับ 60.40 mg/g ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าอย่างเห็นได้ชัด (Iodine Number เท่ากับ 1000 mg/g) ซึ่งมีค่า q_c เพียง 1.54 mg/g ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถกำจัดสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ได้สูงที่สุดในกลุ่มวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนทั้งหมด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากเศษไม้ไผ่ [55] และคาร์บอนรูพรุนชนิดมีโซพอร์โดยมี ซิลิกาเจลเชิงพาณิชย์เป็นแม่แบบและมีซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน [60] โดยมีค่า q_c เท่ากับ 39.02 และ 18.00 mg/g ตามลำดับ ทั้งนี้สภาวะที่ใช้ในการทดลองการดูดซับค่า pH เท่ากับ 7 ซึ่งสภาวะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงโดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่น ๆ ในการปรับสภาวะ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบชนิดของวัสดุดูดซับที่ใช้สำหรับการกำจัดสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลลัมน์ พบว่าในงานวิจัยที่ใช้วัสดุดูดซับจากชีวมวลเพื่อกำจัดสี่อ้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลลัมน์ มีจำนวนไม่มาก โดยส่วนใหญ่ที่ผ่านวัสดุดูดซับจะเป็นการดัดแปลงของ พอลิเมอร์ธรรมชาติและเชื้อแบคทีเรีย [112, 113] ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ผลิตวัสดุคาร์บอนรูพรุนที่จากชีวมวล (กากกาแฟ) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถเข้าถึงได้ง่าย มีราคาถูกและกระบวนการสังเคราะห์ไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่น

ตารางที่ 15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีของรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ ของวัสดุดูดซับต่าง ๆ

วัสดุดูดซับ	pH	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	q _e (mg/g)	อ้างอิง
กลุ่มที่ 1 วัสดุดูดซับคาร์บอนรูพรุน				
Activated carbon from spent coffee grounds (Com-ZnCl ₂)	7.0	100	60.40	This work
Commercial activated carbon (Com-AC)	7.0	100	1.54	This work
Granular activated carbon from bamboo waste	6.5	100	39.02	[55]
Mesoporous carbon (Sucrose: carbon source)	7.0	50	18.00	[60]
กลุ่มที่ 2 วัสดุดูดซับไมโซคาร์บอนรูพรุน				
Multi-walled carbon nanotubes	NR	37	55.44	[56]
Protonation of brown seaweed Laminaria sp.	1.0	50	41.90	[64]
Zerovalent iron nanoparticles (nZVI) on <i>Macrocystis pyrifera</i> (Mpyr)	3.0	100	39.90	[58]
Natural attapulgite (ATP)	NR	500	1.80	[61]
The cation-modified attapulgite (CM-ATP)			144.70	
Chitosan-Coated Glass Beads	6.0	50	11.30	[62]
Chitosan beads	NR	30	65.85	[57]
Polysulfone-immobilized <i>Corynebacterium glutamicum</i>	1.0	100	103.20	[63]
Dried <i>Rhizopus arrhizus</i>	2.0	100	174.40	[112]
Polysulfone-immobilized esterified <i>Corynebacterium glutamicum</i>	4.0	100	78.10	[113]
Raw of <i>Corynebacterium glutamicum</i>	4.0	100	23.20	[59]
Protonation of <i>Corynebacterium glutamicum</i>			37.00	
Decarboxylation of <i>Corynebacterium glutamicum</i>			78.60	

*NR = No report

4.3.4 แบบจำลองการดูดซับแบบคอลัมน์ (models of column adsorption)

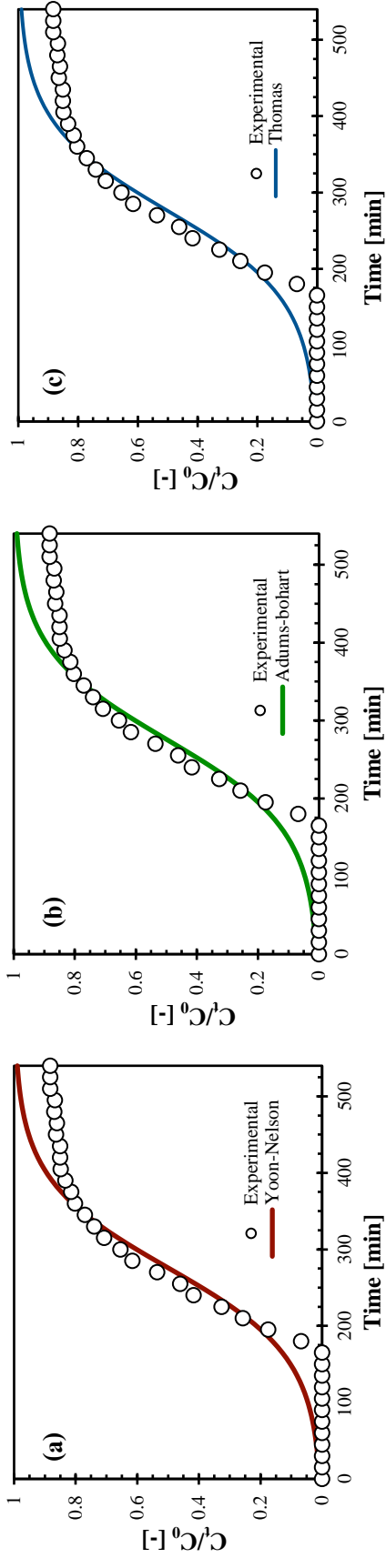
ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ ถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการดูดซับ ได้แก่ Thomas Yoon-Nelson และ Adams-boheart เพื่ออธิบายกลไกของกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์ภายใต้สภาวะต่าง ๆ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองโดยใช้การคำนวณด้วยวิธีแบบ non-linear แสดงตามภาพที่ 26 ถึง 32 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสอดคล้องกับแบบจำลอง ซึ่งแสดงดังตารางที่ 14

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในช่วง 60 ถึง 100 mg/L อัตราการไหลในช่วง 10 ถึง 15 mL/min และความสูงของเบดนิ่งในช่วง 5 ถึง 15 cm มีค่า R^2 ของทั้ง 3 แบบจำลองการดูดซับอยู่ในช่วง 0.97 ถึง 0.99 นั้นหมายถึงทุกสภาวะการดูดซับสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ที่ศึกษามีสมมุติฐานการดูดซับเป็นไปตามทั้งแบบจำลอง Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-boheart

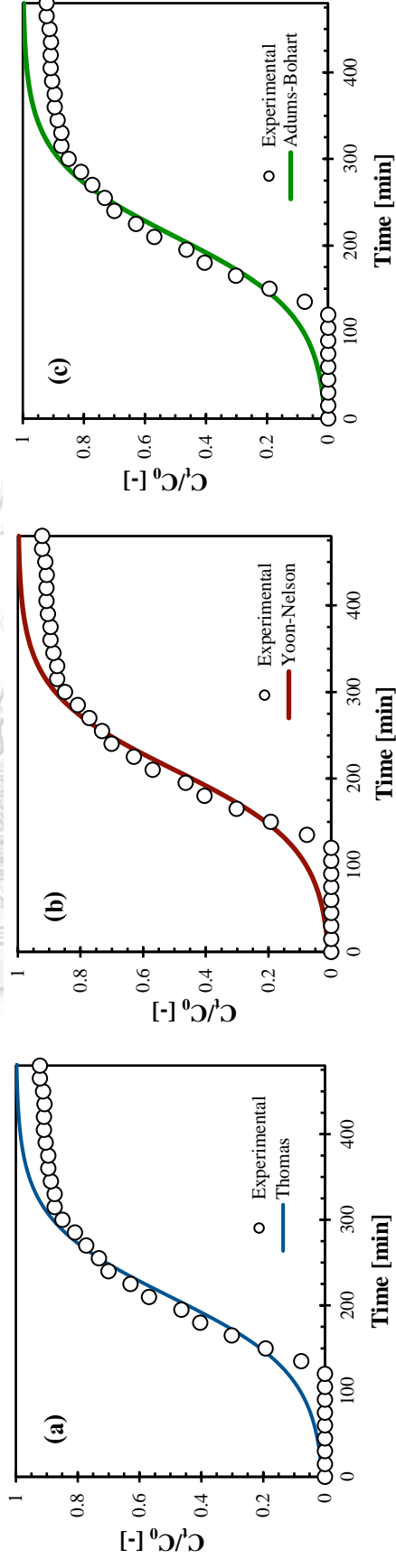
แบบจำลอง Thomas ซึ่งมีสมมุติฐานตามแบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดตามแบบจำลอง Thomas (q_{th}) โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในช่วง 60 ถึง 100 mg/L ค่า q_{th} เพิ่มขึ้นจาก 50.72 เป็น 58.66 mg/g ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในช่วง 10 ถึง 15 mL/min และความสูงของเบดนิ่งในช่วง 5 ถึง 15 cm ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดตามแบบจำลอง Thomas สำหรับแบบจำลอง Yoon-Nelson ที่อยู่บนพื้นฐานของสมมุติฐานว่าอัตราการดูดซับที่ลดลงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการดูดซับของตัวถูกดูดซับและเบรกทรูของตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในช่วง 60 ถึง 100 mg/L และอัตราการไหลในช่วง 10 ถึง 15 mL/min ส่งผลให้เวลา ณ ความเข้มข้นที่ 50 % ของกราฟเบรกทรู (T) ลดลง แต่ความสูงของเบดนิ่งที่สูงขึ้นจาก 5 เป็น 15 cm ทำให้ค่า T เพิ่มขึ้นจาก 210.07 เป็น 619.09 min และแบบจำลอง Adams-boheart ซึ่งใช้สำหรับอธิบายส่วนเริ่มต้นของกราฟเบรกทรูเท่านั้น มีสมมุติฐานว่าแรงที่เกิดจากการแพร่ภายในและแรงที่เกิดจากการต้านทานการถ่ายเทมวลจากภายนอกมีค่าน้อยมากและตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยตรง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นสีซีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 มีอิทธิพลต่อ

ความเข้มข้น ณ สภาวะอิ่มตัว (N_0) อย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นสี่ฮ่อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 สูงขึ้นจาก 60 เป็น 100 mg/L ส่งผลให้ค่า N_0 เพิ่มขึ้นจาก 8604.36 เป็น 9557.16 mg/L ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในช่วง 10 ถึง 15 mL/min และความสูงของเบดนิ่งในช่วง 5 ถึง 15 cm ส่งผลต่อค่าความเข้มข้น ณ สภาวะอิ่มตัวตามนิยามแบบจำลอง Adams-boheart เพียงเล็กน้อย [114]

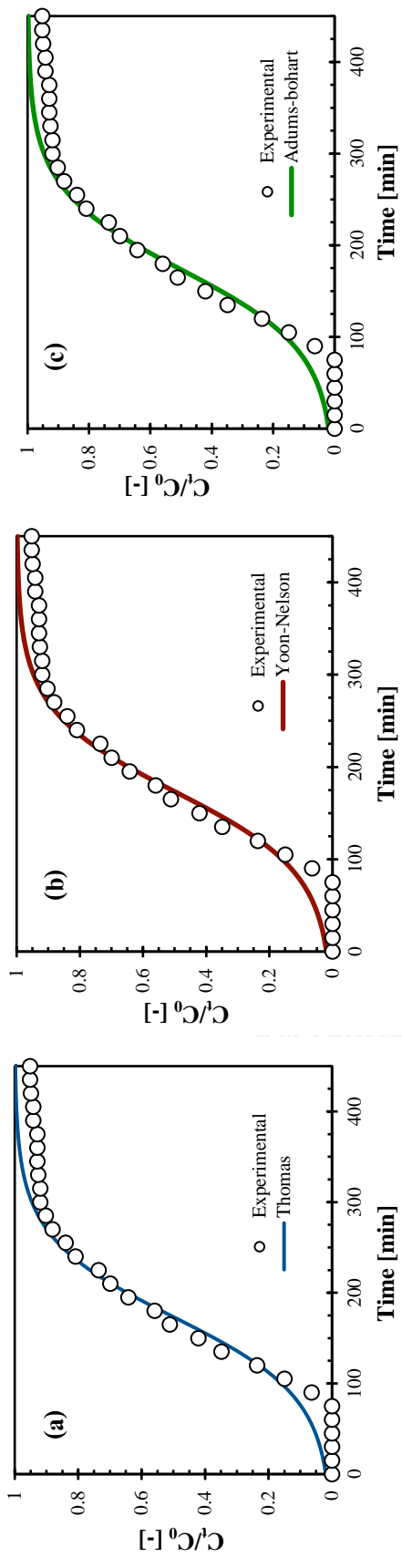




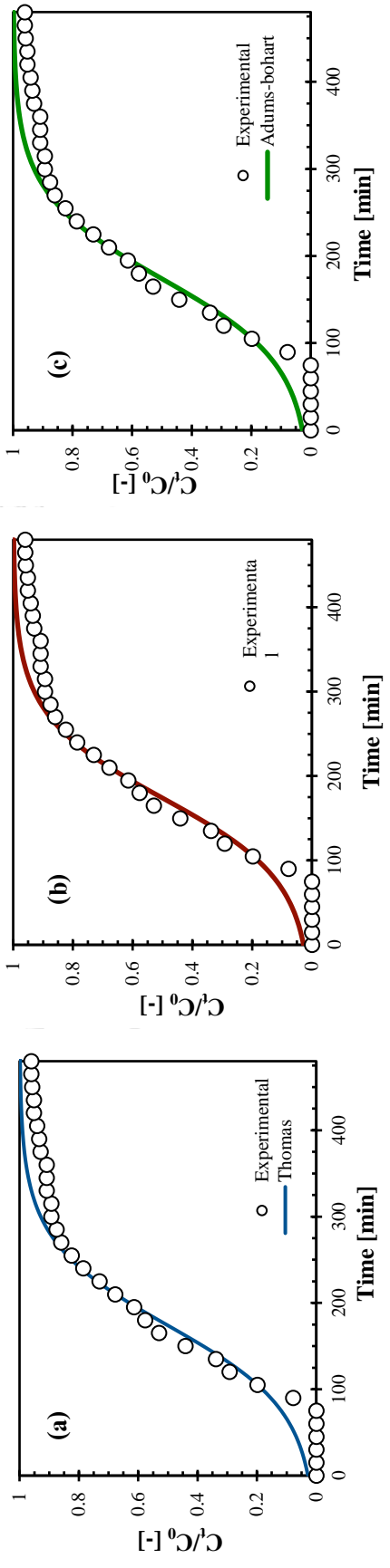
ภาพที่ 32 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความเข้มข้นที่ 60 mg/L ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)



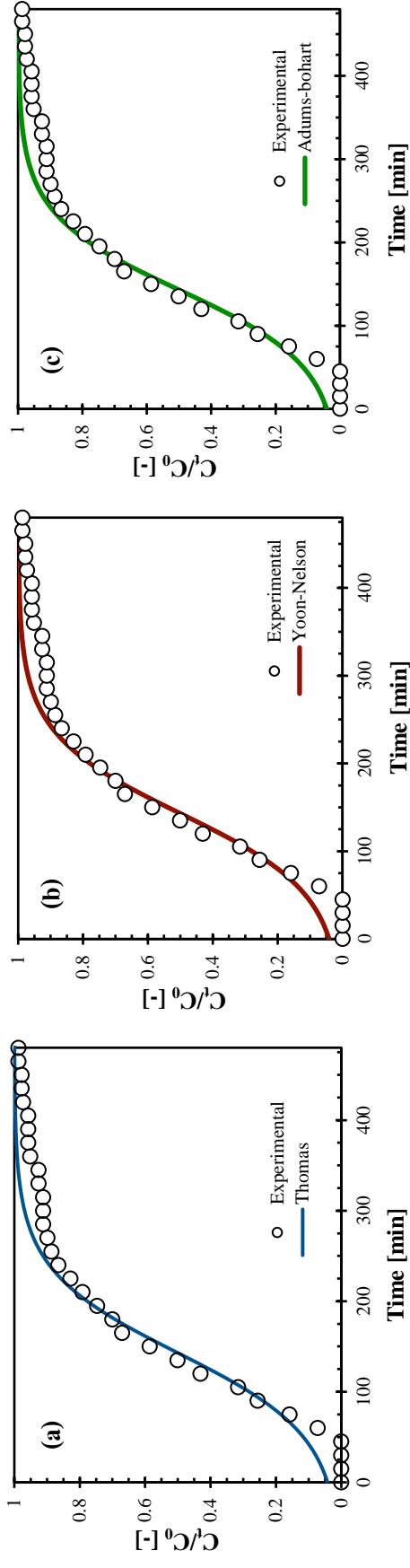
ภาพที่ 33 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความเข้มข้นที่ 80 mg/L ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)



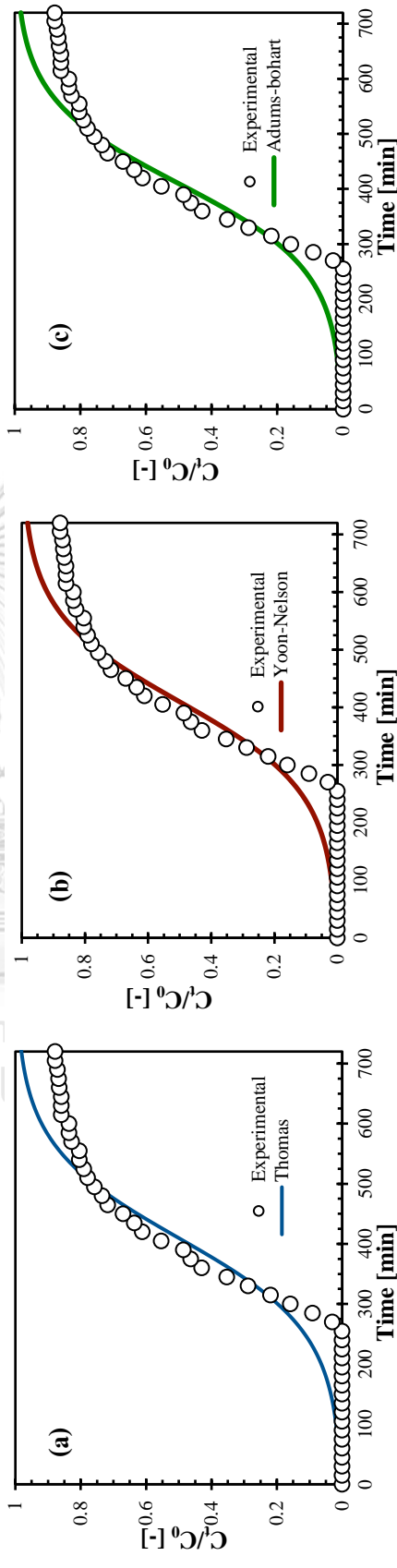
ภาพที่ 34 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความเข้มข้นที่ 100 mg/L ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)



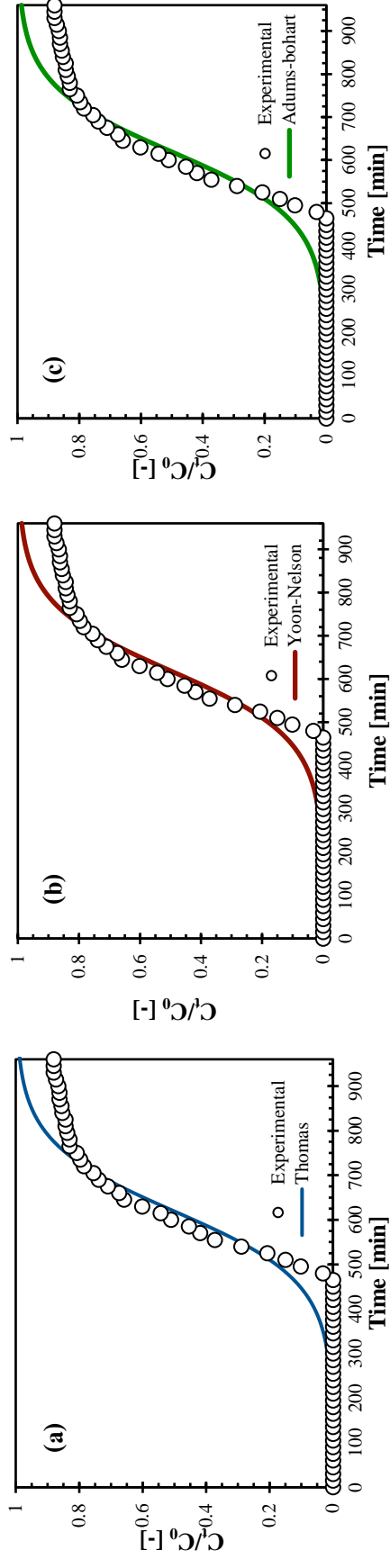
ภาพที่ 35 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของอัตราการไหลที่ 12.5 mL/min ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)



ภาพที่ 36 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของอัตราการไหลที่ 15 mL/min ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)



ภาพที่ 37 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความสูงเมตริง 10 cm ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)



ภาพที่ 38 แสดงแบบจำลองการดูดซับสำหรับผลของความสูงเบตนิ่ง 15 cm ของ Thomas (a) Yoon-Nelson (b) และ Adams-bohart (c)



ตารางที่ 16 แสดงค่าคงที่ตามแบบจำลอง Thomas, Yoon-Nelson และ Adams-bohart สำหรับการดูดซับสีเขียวมรกตที่เฟสที่ 5 แบบคอลัมน์

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	60	80	100	80	80	80	80
อัตราการไหล (mL/min)	10	10	10	12.5	15	10	10
ความสูงของเบดนิ่ง (cm)	5	5	5	5	5	10	15
แบบจำลอง Thomas							
q_{th} (mg/g)	50.72	54.79	58.66	54.31	52.83	55.46	55.85
R^2	0.97	0.98	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97
แบบจำลอง Yoon-Nelson							
τ (min)	275.85	210.07	173.43	173.89	142.98	409.60	619.09
R^2	0.97	0.98	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97
แบบจำลอง Adams-bohart							
N_0 (mg/L)	8604.36	9047.99	9557.16	8970.18	8907.28	9190.19	9202.61
R^2	0.97	0.98	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97

4.3.5 การออกแบบคอลัมน์การดูดซับขนาดใหญ่ (Scale-up design)

ข้อมูลที่ได้จากกราฟเบรคทรูในการทดลองการดูดซับลีซอมีรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (lab-scale) สามารถนำมาใช้ในการออกแบบการดูดซับแบบคอลัมน์ขนาดใหญ่ (large-scale) [115] โดยค่า Empty bed contact time (EBCT) ค่า Filtration rate (FR) ค่าจากแบบจำลอง Thomas และข้อมูลอื่น ๆ ของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ ถูกใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบคอลัมน์ขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถคำนวณตัวแปรของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการได้จากสมการที่ (11-12) เพื่อใช้สำหรับออกแบบคอลัมน์ขนาดใหญ่ตามสมการที่ (13-19)

ตารางที่ 17 แสดงการคำนวณ Filtration rate และ Empty bed contact time ของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ

ตัวแปรของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ	สมการ
Filtration rate (FR)	$FR = \frac{Q_L}{A_L} \quad (11)$
Empty bed contact time (EBCT)	$EBCT = \frac{V_{BL}}{Q_L} \quad (12)$

เมื่อ	FR	คือ	Filtration rate (cm/min)
	Q_L	คือ	อัตราการไหลของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (cm^3/min)
	A_L	คือ	พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (cm^2)
	EBCT	คือ	Empty bed contact time (min)
	V_{BL}	คือ	ปริมาตรของเบดนิ่งสำหรับคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (cm^3)

ตารางที่ 18 แสดงการคำนวณตัวแปรของคอลัมน์ที่ออกแบบ

ตัวแปรของคอลัมน์ที่ออกแบบ	สมการ
Area (cm ²)	$A_D = \frac{Q_D}{FR}$ (13)
Bed height (cm)	$H_{BD} = FR \times EBCT$ (14)
Bed volume (cm ³)	$V_{BD} = A_D \times H_{BD}$ (15)
Breakthrough volume (cm ³)	$V_{BTD} = t_L \times Q_D$ (16)
Adsorbent mass required (kg)	$M_D = BV_D \times \rho_{AC}$ (17)
Adsorbate consumption rate (g)	$M_{CR} = V_{BTD} \times C_0$ (18)
Amount of adsorbent consumed (kg)	$M_{AC} = \frac{M_{CR}}{q_{max}}$ (19)

เมื่อ	A_D	คือ	พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm ²)
	Q_D	คือ	อัตราการไหลของคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm ³ /min)
	H_{BD}	คือ	ความสูงของเบดสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm)
	V_{BD}	คือ	ปริมาตรของเบดหนึ่งสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (cm ³)
	M_D	คือ	มวลของตัวดูดซับที่ต้องการสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (kg)
	ρ_{AC}	คือ	ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ (g/m ³)
	t_L	คือ	เวลา ณ จุดเบรคทรูของคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ (min)
	V_{BTD}	คือ	ปริมาตร ณ จุดเบรคทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบ (m ³)
	M_{CR}	คือ	อัตราการถูกใช้ไปของตัวดูดซับสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (g)
	C_0	คือ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดซับ (mg/L)
	M_{AC}	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกใช้ไปสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบ (kg)
	q_{max}	คือ	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับหรือ q_m (mg/g)

จากข้อมูลรายงานผลการตรวจติดตามคุณภาพน้ำจากแหล่งกำเนิดมลพิษ ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย [116] พบการระบายน้ำทิ้งของโรงงานสิ่งทออยู่ที่ประมาณ $600 \text{ m}^3/\text{day}$ ซึ่งจากค่าอัตราการไหลของน้ำทิ้งดังกล่าวสามารถนำไปใช้ออกแบบคอลัมน์การดูดซับขนาดใหญ่ได้ โดยใช้ค่าที่ได้จากการทดลองการดูดซับแบบคอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการภายใต้สถานะความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L อัตราการไหล 10 mL/min และความสูงเบดนิ่ง 5 cm เป็นพื้นฐานการออกขยายขนาดคอลัมน์ เนื่องจากมีค่า q_{th} สูงที่สุด โดยแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณตัวแปรของคอลัมน์ที่ออกแบบตามตารางที่ 19

ตารางที่ 19 แสดงตัวแปรของคอลัมน์ที่ออกแบบ

ตัวแปรของคอลัมน์ที่ออกแบบ	หน่วย	ค่าที่ได้
Filtration rate	m^2/day	56.82
Empty bed contact time	min	1.90
Area	m^2	10.56
Diameter	m	3.67
Breakthrough volume	m^3	37.5
Amount of adsorbent consumed (kg)	kg	62.5

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

❖ ผลของคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุน

จากการศึกษาการดูดซับและคายการดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K พบว่าถ่านที่ได้จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกากาแฟสำเร็จรูปผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600°C มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดน้อยมาก เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลกากาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ที่ 1:2 และ 1:3 เกิดการสร้างรูพรุนชนิดมีโซพอร์ โดยปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์จะเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของซิงค์คลอไรด์ ส่วนผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน พบว่าสามารถเกิดรูพรุนชนิด มีโซพอร์ได้ในช่วงอุณหภูมิ 500°C ถึง 700°C โดยปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์เกิดมากที่สุดที่อุณหภูมิ 600°C สำหรับผลของแหล่งที่มากากกาแฟ พบว่าถ่านกัมมันต์สังเคราะห์จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกากาแฟสำเร็จรูป ให้ผลลัพธ์สมบัติความเป็นรูพรุน (พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์และปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์) ที่ใกล้เคียงกัน และผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ พบว่าการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ให้สมบัติความเป็นรูพรุนที่ดีกว่าเกรดอุตสาหกรรม

โดยทั้งหมดสรุปได้ว่าสถานะการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกากาแฟสำเร็จรูปที่กระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลกากาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 ภายใต้อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C มีคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุนที่ดีที่สุด โดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนชนิดไมโครพอร์ และปริมาตรรูพรุนชนิดมีโซพอร์เท่ากับ 1260.39 m²/g, 0.57 cm³/g และ 1.03 cm³/g ตามลำดับ

❖ ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและการจัดเรียงตัวของผลึก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยใช้เครื่องมือ X-ray diffractometer พบว่า XRD spectra ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มา แสดง broad peak ที่บริเวณ 2θ ในช่วง 22° ถึง 26° (002) และ 42° ถึง 43° (100) ซึ่งแสดงถึงเฟสของคาร์บอนอสัณฐาน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าทุกตัวอย่างเป็นคาร์บอนอสัณฐาน

❖ ผลของการการศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิว

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะเชิงพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มา มีการกระจายตัวขนาดอยู่ในช่วง 30 ถึง 80 μm ซึ่งมีลักษณะเป็นชิ้น (flake) และพื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระ

5.2 การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบกะ

การศึกษาวัตถุดูดซับที่ได้จากกากกาแฟที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 90 mg/L พบว่ากากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูป และถ่านที่ได้จากกากกาแฟผ่านการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600°C มี %removal อยู่ในช่วง 2.56% ถึง 5.90% และปริมาณการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ณ สภาวะสมดุล (q_{eq}) อยู่ในช่วง 1.93 ถึง 4.45 mg/g ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นในอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 โดยมีค่า %removal สูงถึง 91.02% และค่า q_{eq} เท่ากับ 69.25 mg/g

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 พบว่าที่ความเข้มข้นของเริ่มต้นสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 เท่ากับ 150 mg/L ผลของอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์มีค่า %removal มากกว่า 70% สำหรับการกระตุ้นที่อัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ 1:3 แล้วลดลงเหลือ 50.95% และ 31.24% สำหรับอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์ 1:2 และ 1:1 ตามลำดับ ส่วนผลของอุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน พบว่า %removal ที่อุณหภูมิ 600°C มีค่าสูงถึง 70.86% ในขณะที่อุณหภูมิที่ 500°C และ 700°C มีค่า %removal เพียง 62.47% และ 58.63% ตามลำดับ สำหรับผลของแหล่งที่มาของกากกาแฟ พบว่า %removal ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ 3 แหล่งที่มาใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าประมาณ $72.50 \pm 2.50\%$ และจากผลของความบริสุทธิ์ของซิงค์คลอไรด์ มีค่า %removal ประมาณ $55.50 \pm 2.00\%$ สำหรับทั้งซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าสภาวะของการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 สูงที่สุดตามแบบจำลอง Langmuir (q_m) คือสภาวะที่กระตุ้นทางเคมีในอัตราส่วนมวลกากกาแฟต่อซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ที่ 1:3 แล้วผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 120.39 mg/g แต่อย่างไรก็ตามวัสดุดูดซับที่ใช้สำหรับการศึกษาดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ คือถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแฟสำเร็จรูปที่กระตุ้นในอัตราส่วนมวลกากกาแฟ

ต่อซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรมที่ 1:3 และคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600°C เนื่องจากสารเคมีซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรมมีราคาสูงกว่าเกรดงานวิเคราะห์อย่างมาก และมีค่า q_m ที่สูงถึง 113.01 mg/g ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์

5.3 การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ พบว่าผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ศึกษา (60 ถึง 100 mg/L) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดอิ่มตัว (q_e) ซึ่งแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 50.74, 55.96 และ 60.65 mg/g สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 60, 80 และ 100 mg/L ตามลำดับ ส่วนผลของอัตราการไหลพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในช่วงจาก 10 ถึง 15 mL/min ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า q_e ซึ่งมีค่าประมาณ 55.50 ± 0.50 mg/g และผลของความสูงเบดนิ่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของเบดนิ่งในช่วง 5 ถึง 15 cm ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า q_e โดยมีค่าประมาณ 56.50 ± 0.60 mg/g นอกจากนี้กราฟเบรคทรูทั้งหมดภายใต้ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น ผลของอัตราการไหล และผลของความสูงเบดนิ่ง แสดงลักษณะมีลักษณะของกราฟเป็นรูปร่างตัว 'S'

การศึกษาแบบจำลองของการดูดซับแบบคอลัมน์ พบว่าตามแบบจำลอง Thomas สภาวะในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ที่ดีที่สุดสำหรับ Co^{2+} - Zn^{2+} คือที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 เท่ากับ 100 mg/L อัตราการไหลที่ 10 mL/min และความสูงของเบดนิ่งเท่ากับ 5 cm โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 58.66 mg/g ($R^2 = 0.99$) สำหรับแบบจำลอง Yoon-Nelson ให้เวลา ณ ความเข้มข้นที่ 50 % ของกราฟเบรคทรู (T) เท่ากับ 173.43 min ($R^2 = 0.99$) และตามแบบจำลอง Adams-borheart มีค่าความเข้มข้น ณ สภาวะอิ่มตัว (N_0) เท่ากับ 9557.16 mg/L ($R^2 = 0.99$)

การศึกษารอกแบบคอลัมน์ขนาดใหญ่ สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งปริมาตร 600 m³/day โดยอ้างอิงจากสภาวะการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ในระดับห้องปฏิบัติการที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L อัตราการไหล 10 mL/min และความสูงเบดนิ่ง 5 cm พบว่ามีปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกใช้ไปสำหรับคอลัมน์ที่ออกแบบเท่ากับ 62.5 kg พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ที่ออกแบบเท่ากับ 10.56 m² และปริมาตรน้ำทิ้ง ณ จุดเบรคทรูของคอลัมน์ที่ออกแบบเท่ากับ 37.5 m³

5.4 ข้อเสนอแนะ

ในการนำไปต่อยอดสำหรับการออกแบบการดูดซับแบบคอลัมน์ในระดับขนาดอุตสาหกรรม ควรมีศึกษาผลของขนาดถ่านกัมมันต์เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานจริงและหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพของคอลัมน์ เนื่องจากขนาดของถ่านกัมมันต์ที่ถูกตรึงอยู่ในคอลัมน์ส่งผลโดยตรงต่อความดันลด (pressure drop) ซึ่งหากความดันลดที่ได้สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการทะลักของถ่านกัมมันต์ออกจากคอลัมน์หรือเกิดแรงดันภายในคอลัมน์ที่มากพอทำให้เกิดความเสียหายต่อคอลัมน์ได้





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก สมการที่ใช้คำนวณพารามิเตอร์ของคุณลักษณะสมบัติเชิงรูพรุน

1. สมการ Brunauer-Emmett- Teller (BET) สำหรับการคำนวณพื้นที่ผิว BET

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (10)$$

- เมื่อ P คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure, atm)
 P_0 คือ ความดันอิ่มตัว (saturation pressure, atm)
 V คือ ปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับ (cm^3)
 V_m คือ ปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (cm^3)
 C คือ ค่าคงที่ BET

เพื่อคำนวณพื้นที่ผิว BET ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างแกน X (P/P_0) และแกน y ($P/(V(P/P_0))$) โดยสมการจะอยู่ในช่วง $0.05 < P/P_0 < 0.35$ ซึ่งจุดตัดแกน y คือ $[1/(V_m C)]$ และความชัน คือ $(C-1)/(V_m C)$ จากนั้นสามารถคำนวณพื้นที่ผิว BET [117, 118] ได้ตามสมการ (11-12)

$$S_{Total} = \frac{V_m N_s}{V} \quad (11)$$

$$S_{BET} = \frac{S_{Total}}{a} \quad (12)$$

- เมื่อ S_{Total} คือ พื้นที่ผิวรวมของตัวอย่าง (cm^3)
 S_{BET} คือ พื้นที่ผิว BET (cm^3/g)
 N_s คือ เลขอาโวกาโดร
 a คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (mg)

2. สมการของ Dubinin-Radushkevich (D-R) เพื่อคำนวณรูพรุนชนิดไมโครพอร์

$$\frac{w}{w_0} = \exp\left(-\frac{(RT \ln \frac{P_0}{P})^2}{(\beta E_0)^2}\right) \quad (13)$$

เมื่อ	W/W_0	คือ	ความจุของตัวดูดซับ
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ	อุณหภูมิดูดซับ (77K)
	E_0	คือ	พลังงานปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ
	β	คือ	สเกลแฟกเตอร์ [119]

3. สมการ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) สำหรับรูพรุนชนิดมีโซ (H_3 hysteresis loop)

และการกระจายตัวรูพรุน

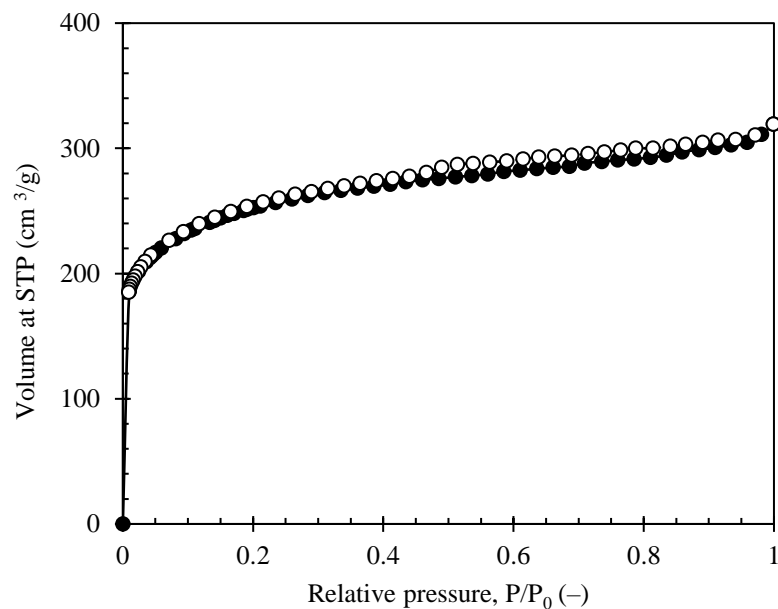
$$d_p = 2(r_k + t) \quad (14)$$

$$r_k = -\frac{0.2082}{\log\left(\frac{P}{P_0}\right)} \quad (15)$$

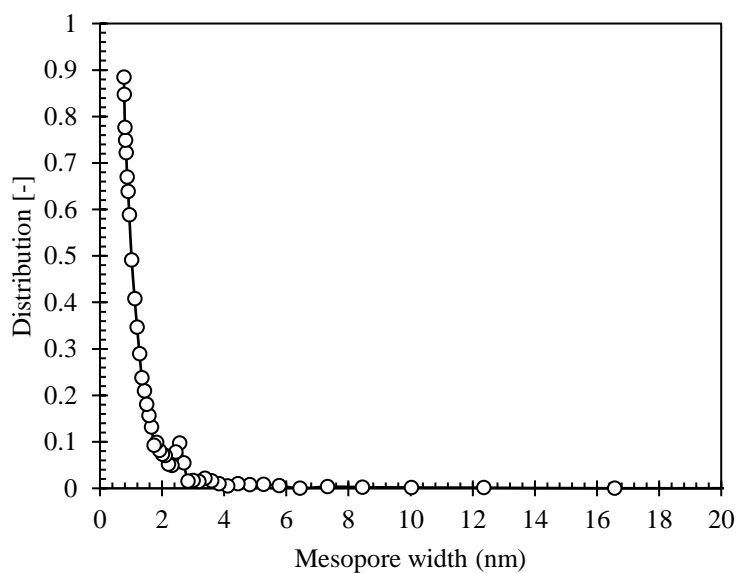
$$t = 0.354 \left(\frac{-5}{\ln\left(\frac{P}{P_0}\right)}\right)^{1/3} \quad (16)$$

เมื่อ	d_p	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูพรุน
	r_k	คือ	รัศมีของเคลวิน
	t	คือ	ความหนาของการเกาะ ซึ่งคำนวณได้จากสมการของ Halsey [119]

ภาคผนวก ข คุณสมบัติเชิงรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-AC)



ภาพที่ 39 ไอโซเทอมการดูดซับและคายการดูดซับในไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ของ Com-AC



ภาพที่ 40 การกระจายตัวของความกว้างของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ของ Com-AC

ภาคผนวก ค ข้อมูลพื้นฐานสารเคมีซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม

ตารางที่ 20 แสดงส่วนประกอบของเกรดซิงค์คลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรม

เกรดซิงค์คลอไรด์	ราคาต่อกิโลกรัม	ส่วนประกอบ	
<p>เกรดงานวิเคราะห์ (Analytical reagent grade หรือ AR grade)</p>	<p>1,300 บาท</p>	<p>Assay (complexometric) min. 98%</p> <p>Insoluble substances max. 0.005%</p> <p>Oxide chloride max. 1.2%</p> <p>(Acidimetric, as ZnO)</p> <p>pH (10%, H₂O) 4.6-5.5</p> <p>Nitrates (NO₃) max. 0.003%</p> <p>Sulfates (SO₄) max. 0.002%</p> <p>Total N max. 0.001%</p> <p>Ammonium (NH₄) max. 0.005%</p> <p>Cadmium (Cd) max. 0.0005%</p> <p>Calcium (Ca) max. 0.001%</p> <p>Copper (Cu) max. 0.001%</p>	
<p>เกรดอุตสาหกรรม (Technical grade หรือ Commercial grade)</p>	<p>105 บาท</p>	<p>ZnCl₂ min. 95%</p> <p>NH₄Cl max. 5%</p> <p>Fe²⁺ max. 0.003%</p>	

ภาคผนวก ง การดูดซับสีของมริแอกทีฟแบล็ค 5

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

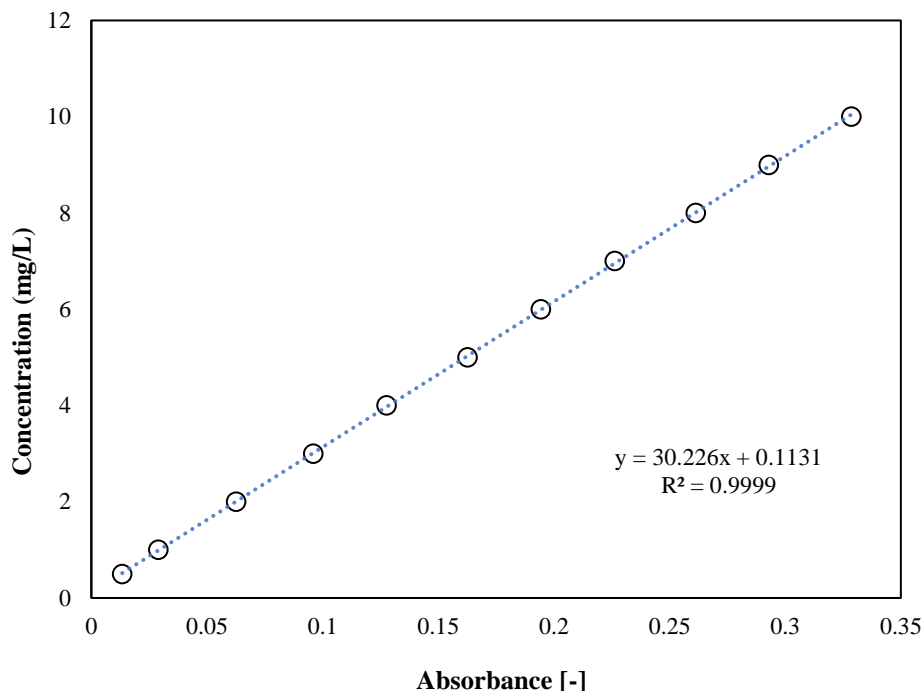
❖ การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1. ชั่งสารสีของมริแอกทีฟแบล็ค 5 เกรดมาตรฐานปริมาณ 100 mg ใส่ในขวดปรับปริมาตร 100 mL แล้วละลายด้วยน้ำ Deionized water และปรับปริมาตรให้ครบ 100 mL
2. เจือจางสารละลายมาตรฐานให้อยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.5 ถึง 10 mg/L
3. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน โดยเครื่อง UV-Visible light spectroscopy

❖ ค่าการดูดกลืนแสงและกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ 21 ค่าการดูดกลืนแสงสารละลายสีของมริแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความยาวคลื่น 598 nm

ความเข้มข้นของ สารละลาย RB5 (mg/L)	ค่าการดูดกลืน แสง (ครั้งที่ 1)	ค่าการดูดกลืน แสง (ครั้งที่ 2)	ค่าการดูดกลืน แสง (ครั้งที่ 3)	ค่าการดูดกลืน แสง (เฉลี่ย)
0.50	0.013	0.014	0.013	0.013
1	0.029	0.029	0.029	0.029
2	0.062	0.062	0.064	0.063
3	0.096	0.096	0.096	0.096
4	0.128	0.127	0.128	0.128
5	0.163	0.163	0.162	0.163
6	0.195	0.194	0.194	0.194
7	0.226	0.227	0.226	0.226
8	0.261	0.261	0.262	0.261
9	0.293	0.293	0.293	0.293
10	0.329	0.328	0.329	0.329



ภาพที่ 41 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 598 nm

❖ การคำนวณความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน

กราฟความเข้มข้นมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ไม่ทราบความเข้มข้น สามารถคำนวณผ่านสมการเชิงเส้นของกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน

สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน: $y = 30.226x + 0.1131$ (17)

ตัวอย่างเช่น: สารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ไม่ทราบความเข้มข้น ถูกนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงได้เท่ากับ 0.163 สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นได้ดังนี้

$$y = 30.226(0.163) + 0.1131$$

$$y = 5.04$$

ดังนั้น สารละลายที่มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.163 มีค่าความเข้มข้น เท่ากับ 5.04 mg/L

2. การดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบกะ

สำหรับพารามิเตอร์ R_L ตามแบบจำลองไอโซเทอม Langmuir ของถ่านกัมมันต์ศึกษาในช่วงความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ในช่วง 5 ถึง 600 mg/L ภายใต้สภาวะ pH เท่ากับ 7 และปริมาณคาร์บอน 1.2 g/L

ตารางที่ 22 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:1 (Z1-IC600)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
5.80	1.42	0.11
11.52	1.42	0.06
21.79	1.42	0.03
45.26	1.42	0.02
64.00	1.42	0.01
82.54	1.42	0.01
103.29	1.42	0.01
125.02	1.42	0.01
149.50	1.42	4.69E-03
198.73	1.42	3.53E-03

ตารางที่ 23 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:2 (Z2-IC600)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
5.80	0.61	0.22
11.52	0.61	0.06
21.79	0.61	0.03
45.26	0.61	0.02
64.00	0.61	0.01
82.54	0.61	0.01
103.29	0.61	0.01
149.50	0.61	4.69E-03

ตารางที่ 23 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:2 (Z2-IC600)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
198.73	0.61	3.53E-03
291.14	0.61	2.41E-03

ตารางที่ 24 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วนมวล SCG:ZnCl₂ ที่ 1:3 (Z3-IC600)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
5.80	0.11	0.61
11.52	0.11	0.44
21.79	0.11	0.29
45.26	0.11	0.17
64.00	0.11	0.12
82.54	0.11	0.10
103.29	0.11	0.08
149.50	0.11	0.06
200.75	0.11	0.04
282.68	0.11	0.03
393.83	0.11	0.02
494.31	0.11	0.02
591.36	0.11	0.02

ตารางที่ 25 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500°C (Z3-IC500)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
11.52	0.14	0.38
21.79	0.14	0.25
45.26	0.14	0.14

64.00	0.14	0.10
82.54	0.14	0.08
103.29	0.14	0.06
149.50	0.14	0.05
200.75	0.14	0.03
291.14	0.14	0.02
393.83	0.14	0.02
492.80	0.14	0.01

ตารางที่ 26 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 700°C (Z3-IC700)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
11.52	0.72	0.11
21.79	0.72	0.06
45.26	0.72	0.03
64.00	0.72	0.02
82.54	0.72	0.02
103.29	0.72	0.01
149.50	0.72	0.01
200.75	0.72	0.01
291.14	0.72	4.75E-03
393.83	0.72	3.51E-03

ตารางที่ 27 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Z3-CC600)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
11.52	0.21	0.29
21.79	0.21	0.18
45.26	0.21	0.10

64.00	0.21	0.07
82.54	0.21	0.05
103.29	0.21	0.04
149.50	0.21	0.03
200.75	0.21	0.02
282.68	0.21	0.02
393.83	0.21	0.01
494.31	0.21	0.01
591.36	0.21	0.01

ตารางที่ 28 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟจากร้านกาแฟในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Z3-LC600)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
11.52	0.15	0.37
21.79	0.15	0.23
45.26	0.15	0.13
64.00	0.15	0.09
82.54	0.15	0.07
103.29	0.15	0.06
149.50	0.15	0.04
200.75	0.15	0.03
282.68	0.15	0.02
393.83	0.15	0.02
494.31	0.15	0.01
591.36	0.15	0.01

ตารางที่ 29 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เกรดอุตสาหกรรม (Com-ZnCl₂)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
9.94	0.08	0.56
21.79	0.08	0.36
41.23	0.08	0.23
59.06	0.08	0.17
80.32	0.08	0.13
99.47	0.08	0.11
151.62	0.08	0.08
198.53	0.08	0.06
297.19	0.08	0.04
400.69	0.08	0.03
494.31	0.08	0.02
591.36	0.08	0.02

ตารางที่ 30 แสดงพารามิเตอร์ R_L ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Langmuir ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-AC)

ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/L]	K_L	R_L
5.56	0.11	0.62
11.38	0.11	0.44
21.38	0.11	0.30
30.45	0.11	0.23
41.63	0.11	0.18
59.57	0.11	0.13
74.48	0.11	0.11
94.23	0.11	0.09
183.62	0.11	0.05

3. การดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์

สำหรับพารามิเตอร์ Superficial velocity, Residence time, และ Empty bed contact time (EBCT) ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 แบบคอลัมน์ ภายใต้สภาวะการดูดซับต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ตามสมการ (12) และ (28-29) โดยแสดงค่าที่ได้ตามตารางที่ 30

$$\text{Superficial velocity (cm/min)} = \frac{\text{Output of flow rate (cm}^3\text{/min)}}{\text{Cross-sectional area (cm}^2\text{)}} \quad (28)$$

$$\text{Residence time (min)} = \frac{\text{Volumn of reactor (cm}^3\text{)}}{\text{Output of flow rate (cm}^3\text{/min)}} \quad (29)$$

ตารางที่ 31 แสดงค่า Superficial velocity, Residence time, และ Empty bed contact time (EBCT)

Samples	Com-ZnCl ₂						Com-AC	
	Initial concentration (mg/L)	60	80	100	80	80	80	80
Flow rate (mL/min)	10	10	10	12.5	15	10	10	10
Bed height (cm)	5	5	5	5	5	10	15	5
Superficial velocity (cm/min)	2.39	2.39	2.39	2.99	3.59	2.39	2.39	2.39
Residence time (min)	1.85	1.85	1.85	1.51	1.27	3.73	5.60	1.85
EBCT (min)	1.90	1.90	1.90	1.52	1.27	3.80	5.70	1.90

ภาคผนวก จ ความหนาแน่นจริงของถ่านกัมมันต์

❖ Gas Pycnometer

เครื่องมือ Gas Pycnometer ถูกใช้เพื่อตรวจสอบหาความหนาแน่นจริง (true density) ของถ่านกัมมันต์ภายใต้น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 4.1974 g อุณหภูมิที่ 10°C และ equilibration rate เท่ากับ 5×10^{-3} psig/min

ตารางที่ 32 แสดงผลการทดสอบจากเครื่องมือ Gas Pycnometer

ทดสอบครั้งที่	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	2.7849	1.5072
2	2.8719	1.4616
3	2.9100	1.4424
4	2.8957	1.4496
5	2.9069	1.4439

ดังนั้น ปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 2.8739 cm³ และความหนาแน่นจริงเท่ากับ 1.4609 g/cm³

บรรณานุกรม

- [1] E. Hur and T. Cassidy, "Perceptions and attitudes towards sustainable fashion design: challenges and opportunities for implementing sustainability in fashion," *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 12, no. 2, pp. 208-217, 2019.
- [2] C. J. Ogugbue and T. Sawidis, "Bioremediation and detoxification of synthetic wastewater containing triarylmethane dyes by *Aeromonas hydrophila* isolated from industrial effluent," *Biotechnology research international*, vol. 2011, 2011.
- [3] B. J. Brüscheiler and C. Merlot, "Azo dyes in clothing textiles can be cleaved into a series of mutagenic aromatic amines which are not regulated yet," *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 88, pp. 214-226, 2017.
- [4] T. Hadibarata *et al.*, "Microbial decolorization of an azo dye reactive black 5 using white-rot fungus *Pleurotus eryngii* F032," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 224, pp. 1-9, 2013.
- [5] S. Dutta, B. Gupta, S. K. Srivastava, and A. K. Gupta, "Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: A critical review," *Materials Advances*, vol. 2, no. 14, pp. 4497-4531, 2021.
- [6] S. Nethaji, A. Sivasamy, and A. Mandal, "Adsorption isotherms, kinetics and mechanism for the adsorption of cationic and anionic dyes onto carbonaceous particles prepared from *Juglans regia* shell biomass," *International journal of environmental science and technology*, vol. 10, pp. 231-242, 2013.
- [7] O. Gulnaz, A. Kaya, and S. Dincer, "The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 134, no. 1-3, pp. 190-196, 2006.
- [8] H. R. Rashidi, N. M. N. Sulaiman, N. A. Hashim, C. R. C. Hassan, and M. R. Ramli, "Synthetic reactive dye wastewater treatment by using nano-membrane filtration," *Desalination and Water Treatment*, vol. 55, no. 1, pp. 86-95, 2015.
- [9] L. Semiz, "Removal of reactive black 5 from wastewater by membrane filtration," *Polymer Bulletin*, vol. 77, no. 6, pp. 3047-3059, 2020.
- [10] P. Colindres, H. Yee-Madeira, and E. Reguera, "Removal of Reactive Black 5 from aqueous solution by ozone for water reuse in textile dyeing processes," *Desalination*, vol. 258, no. 1-3, pp. 154-158, 2010.

- [11] C. Hsueh, Y. Huang, C. Wang, and C.-Y. Chen, "Degradation of azo dyes using low iron concentration of Fenton and Fenton-like system," *Chemosphere*, vol. 58, no. 10, pp. 1409-1414, 2005.
- [12] T. Zhou, X. Lu, J. Wang, F.-S. Wong, and Y. Li, "Rapid decolorization and mineralization of simulated textile wastewater in a heterogeneous Fenton like system with/without external energy," *Journal of hazardous materials*, vol. 165, no. 1-3, pp. 193-199, 2009.
- [13] V. M. Vasconcelos *et al.*, "Electrochemical removal of Reactive Black 5 azo dye using non-commercial boron-doped diamond film anodes," *Electrochimica Acta*, vol. 178, pp. 484-493, 2015.
- [14] E. Valadez-Renteria, J. Oliva, and V. Rodriguez-Gonzalez, "Photocatalytic materials immobilized on recycled supports and their role in the degradation of water contaminants: A timely review," *Science of The Total Environment*, vol. 807, p. 150820, 2022.
- [15] M. S. Lucas and J. A. Peres, "Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation," *Dyes and Pigments*, vol. 71, no. 3, pp. 236-244, 2006.
- [16] D. T. Patabandige, S. Wadumethrige, and S. Wanniarachchi, "H 3 PO 4-activated sawdust and rice husk as effective decolorizers for textile wastewater containing Reactive Black 5," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, pp. 8375-8388, 2019.
- [17] M. W. Tze, M. K. Aroua, and M. Szlachta, "Palm shell-based activated carbon for removing reactive black 5 dye: equilibrium and kinetics studies," *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 1432-1447, 2016.
- [18] L. Wang, C. Shi, L. Pan, X. Zhang, and J.-J. Zou, "Rational design, synthesis, adsorption principles and applications of metal oxide adsorbents: a review," *Nanoscale*, vol. 12, no. 8, pp. 4790-4815, 2020.
- [19] Y. X. Gan, "Activated carbon from biomass sustainable sources," *C*, vol. 7, no. 2, p. 39, 2021.
- [20] F. B. Mustopha, K. A. Adesanya, and O. Aremu-Dele, "Production trend of coffee in Nigeria: A review," 2022.
- [21] ส. ประเทศไทย, "สถานการณ์กาแฟ," 2023.
- [22] M. Kamil *et al.*, "Comprehensive evaluation of the life cycle of liquid and solid fuels

- derived from recycled coffee waste," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 150, p. 104446, 2019.
- [23] S. Saldaña-Mendoza, J. Martínez-Hernandez, R. Rodríguez-Herrera, A. Palacios-Ponce, S. Sugathan, and C. N. Aguilar, "Use of coffee waste for the production of biofuels," *Environmental Quality Management*, vol. 32, no. 1, pp. 463-471, 2022.
- [24] Y.-G. Lee, E.-J. Cho, S. Maskey, D.-T. Nguyen, and H.-J. Bae, "Value-Added Products from Coffee Waste: A Review," *Molecules*, vol. 28, no. 8, p. 3562, 2023.
- [25] A. S. C. d. Bomfim *et al.*, "Spent coffee grounds characterization and reuse in composting and soil amendment," in *Waste*, 2022, vol. 1, no. 1: MDPI, pp. 2-20.
- [26] T. Gomes, J. A. Pereira, E. Ramalhosa, S. Casal, and P. Baptista, "Effect of fresh and composted spent coffee grounds on lettuce growth, photosynthetic pigments and mineral composition," in *VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas*, 2014: SECH e SEAgIng, pp. 1-5.
- [27] V. H. Montoya and A. Bonilla-Petriciolet, *Lignocellulosic precursors used in the synthesis of activated carbon: characterization techniques and applications in the wastewater treatment*. BoD-Books on Demand, 2012.
- [28] ส. อ. อ. A. E. ประเทศไทย, "กาแฟแยกตามพันธุ์ เนื้อที่ขึ้นต้น เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ ปีเพาะปลูก 2556 " 2023.
- [29] E. Kalkan, H. Nadaroglu, N. Celebi, and G. Tozsın, "Removal of textile dye Reactive Black 5 from aqueous solution by adsorption on laccase-modified silica fume," *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 31-33, pp. 6122-6134, 2014.
- [30] Z. Heidarinejad, M. H. Dehghani, M. Heidari, G. Javedan, I. Ali, and M. Sillanpää, "Methods for preparation and activation of activated carbon: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 18, pp. 393-415, 2020.
- [31] A. Bhatnagar, W. Hogland, M. Marques, and M. Sillanpää, "An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications," *Chemical Engineering Journal*, vol. 219, pp. 499-511, 2013.
- [32] J. Sánchez, "Characterization of activated carbon produced from coffee residues by chemical and physical activation," ed, 2011.
- [33] N. Ayawei, A. N. Ebelegi, and D. Wankasi, "Modelling and interpretation of adsorption

- isotherms," *Journal of chemistry*, vol. 2017, 2017.
- [34] J. Wang and X. Guo, "Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method," *Chemosphere*, vol. 258, p. 127279, 2020.
- [35] T. W. Weber and R. K. Chakravorti, "Pore and solid diffusion models for fixed-bed adsorbers," *AIChE Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 228-238, 1974.
- [36] M. Vigdorowitsch, A. Pchelintsev, L. Tsygankova, and E. Tanygina, "Freundlich isotherm: An adsorption model complete framework," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 17, p. 8078, 2021.
- [37] H. Patel, "Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review," *Applied Water Science*, vol. 9, no. 3, p. 45, 2019.
- [38] Z. Chowdhury, S. Zain, A. Rashid, R. 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, 2013.
- [39] M. de Farias, M. Spaolonzi, M. Silva, and M. Vieira, "Fixed-bed adsorption of bisphenol A onto organoclay: Characterisation, mathematical modelling and theoretical calculation of DFT-based chemical descriptors," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 5, p. 106103, 2021.
- [40] S. Chatterjee, S. Mondal, and S. De, "Design and scaling up of fixed bed adsorption columns for lead removal by treated laterite," *Journal of cleaner production*, vol. 177, pp. 760-774, 2018.
- [41] S. K. Maji, A. Pal, T. Pal, and A. Adak, "Modeling and fixed bed column adsorption of As (III) on laterite soil," *Separation and Purification Technology*, vol. 56, no. 3, pp. 284-290, 2007.
- [42] M. J. Amiri, M. Khozaei, and A. Gil, "Modification of the Thomas model for predicting unsymmetrical breakthrough curves using an adaptive neural-based fuzzy inference system," *Journal of Water and Health*, vol. 17, no. 1, pp. 25-36, 2019.
- [43] O. B. Omitola, M. N. Abonyi, K. G. Akpomie, and F. A. Dawodu, "Adams-Bohart, Yoon-Nelson, and Thomas modeling of the fix-bed continuous column adsorption of amoxicillin onto silver nanoparticle-maize leaf composite," *Applied Water Science*, vol. 12, no. 5, p. 94,

- 2022.
- [44] P. M. Lissya, G. Madhub, and R. M. Thomasc, "Modeling of packed bed column studies for the removal of Cu (II) using polypyrrole alumina iron oxide nanocomposite," *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, vol. 227, pp. 278-288, 2021.
- [45] B. Babu and S. Gupta, "Modeling and simulation of fixed bed adsorption column: effect of velocity variation," *J. Eng. Technol*, vol. 1, no. 60, pp. 30923-4748, 2005.
- [46] L. Giraldo and J. C. Moreno-Piraján, "Synthesis of activated carbon mesoporous from coffee waste and its application in adsorption zinc and mercury ions from aqueous solution," *Journal of Chemistry*, vol. 9, pp. 938-948, 2012.
- [47] V. Thithai, X. Jin, M. Ajaz Ahmed, and J.-W. Choi, "Physicochemical properties of activated carbons produced from coffee waste and empty fruit bunch by chemical activation method," *Energies*, vol. 14, no. 11, p. 3002, 2021.
- [48] T. Thuy Luong Thi, H. S. Ta, and K. Le Van, "Activated carbons from coffee husk: preparation, characterization, and reactive red 195 adsorption," *Journal of Chemical Research*, vol. 45, no. 5-6, pp. 380-394, 2021.
- [49] K. Kante, C. Nieto-Delgado, J. R. Rangel-Mendez, and T. J. Badosz, "Spent coffee-based activated carbon: Specific surface features and their importance for H₂S separation process," *Journal of hazardous materials*, vol. 201, pp. 141-147, 2012.
- [50] S. Bose, R. D. Kirk, H. Maslen, M. A. P. Islas, B. Smith, T. I. Dugmore, and A. S. Matharu, "Mesoporous-rich calcium and potassium-activated carbons prepared from degreased spent coffee grounds for efficient removal of MnO₄²⁻ in aqueous media," *RSC advances*, vol. 12, no. 30, pp. 19417-19423, 2022.
- [51] L. Khenniche and F. Aissani, "Preparation and characterization of carbons from coffee residue: adsorption of salicylic acid on the prepared carbons," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 55, no. 2, pp. 728-734, 2010.
- [52] K. Ngaosuwan, J. G. Goodwin Jr, and P. Prasertdham, "A green sulfonated carbon-based catalyst derived from coffee residue for esterification," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 262-269, 2016.
- [53] S. Sae-ung and V. Boonamnuyvitaya, "Adsorption of formaldehyde vapor by using activated carbon prepared from coffee residue," in *Proceedings of the 2nd Regional*

- Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment, February, 2003, pp. 12-14.*
- [54] L. Cherif and F. Aissani-Benissad, "Adsorption of phenol onto activated carbon prepared from coffee extract residue chemically activated using ZnCl₂," *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 22-32, 2016.
- [55] A. Ahmad and B. Hameed, "Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste," *Journal of hazardous materials*, vol. 175, no. 1-3, pp. 298-303, 2010.
- [56] J. Galán, A. Rodríguez, J. Gómez, S. Allen, and G. Walker, "Reactive dye adsorption onto a novel mesoporous carbon," *Chemical engineering journal*, vol. 219, pp. 62-68, 2013.
- [57] N. K. Lazaridis and H. Keenan, "Chitosan beads as barriers to the transport of azo dye in soil column," *Journal of hazardous materials*, vol. 173, no. 1-3, pp. 144-150, 2010.
- [58] F. E. García, J. Plaza-Cazón, V. N. Montesinos, E. R. Donati, and M. I. Litter, "Combined strategy for removal of Reactive Black 5 by biomass sorption on *Macrocystis pyrifera* and zerovalent iron nanoparticles," *Journal of environmental management*, vol. 207, pp. 70-79, 2018.
- [59] K. Vijayaraghavan and Y.-S. Yun, "Chemical modification and immobilization of *Corynebacterium glutamicum* for biosorption of reactive black 5 from aqueous solution," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 46, no. 2, pp. 608-617, 2007.
- [60] P. De Luca, A. Chiodo, A. Macario, C. Siciliano, and J. B. Nagy, "Semi-continuous adsorption processes with multi-walled carbon nanotubes for the treatment of water contaminated by an organic textile dye," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, p. 1687, 2021.
- [61] H. Guo, K. Xia, M. Cao, and X. Zhang, "Surface modification of attapulgite by grafting cationic polymers for treating dye wastewaters," *Materials*, vol. 14, no. 4, p. 792, 2021.
- [62] D. C. da Silva Alves, R. A. Capa Verde Pires, F. F. D. Alga, J. O. Gonçalves, G. L. Dotto, L. A. de Almeida Pinto, and C. A. S. Felipe, "Chitosan-Coated Glass Beads in a Fluidized Bed for Use in Fixed-Bed Dye Adsorption," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 44, no. 4, pp. 631-638, 2021.
- [63] K. Vijayaraghavan and Y.-S. Yun, "Polysulfone-immobilized *Corynebacterium glutamicum*: a biosorbent for Reactive black 5 from aqueous solution in an up-flow packed

- column," *Chemical Engineering Journal*, vol. 145, no. 1, pp. 44-49, 2008.
- [64] K. Vijayaraghavan and Y.-S. Yun, "Biosorption of CI Reactive Black 5 from aqueous solution using acid-treated biomass of brown seaweed *Laminaria* sp," *Dyes and Pigments*, vol. 76, no. 3, pp. 726-732, 2008.
- [65] A. Siyasukh, Y. Chimupala, and N. Tonanon, "Preparation of magnetic hierarchical porous carbon spheres with graphitic features for high methyl orange adsorption capacity," *Carbon*, vol. 134, pp. 207-221, 2018.
- [66] A. Harding, N. Foley, P. Norman, D. Francis, and K. Thomas, "Diffusion barriers in the kinetics of water vapor adsorption/desorption on activated carbons," *Langmuir*, vol. 14, no. 14, pp. 3858-3864, 1998.
- [67] K. Sing, "The use of nitrogen adsorption for the characterisation of porous materials," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 187, pp. 3-9, 2001.
- [68] K. Mohanty, D. Das, and M. Biswas, "Preparation and characterization of activated carbons from *Sterculia alata* nutshell by chemical activation with zinc chloride to remove phenol from wastewater," *Adsorption*, vol. 12, pp. 119-132, 2006.
- [69] N. Bouchemal, M. Belhachemi, Z. Merzougui, and F. Addoun, "The effect of temperature and impregnation ratio on the active carbon porosity," *Desalination and water treatment*, vol. 10, no. 1-3, pp. 115-120, 2009.
- [70] Q. Qian, M. Machida, M. Aikawa, and H. Tatsumoto, "Effect of ZnCl₂ impregnation ratio on pore structure of activated carbons prepared from cattle manure compost: application of N₂ adsorption-desorption isotherms," *Journal of material cycles and waste management*, vol. 10, pp. 53-61, 2008.
- [71] J. Gañán-Gómez, A. Macías-García, M. Díaz-Díez, C. González-García, and E. Sabio-Rey, "Preparation and characterization of activated carbons from impregnation pitch by ZnCl₂," *Applied surface science*, vol. 252, no. 17, pp. 5976-5979, 2006.
- [72] D.-W. Cho *et al.*, "Adsorption of potentially harmful elements by metal-biochar prepared via Co-pyrolysis of coffee grounds and Nano Fe (III) oxides," *Chemosphere*, vol. 319, p. 136536, 2023.
- [73] J. Yang and K. Qiu, "Development of high surface area mesoporous activated carbons from

- herb residues," *Chemical engineering journal*, vol. 167, no. 1, pp. 148-154, 2011.
- [74] M. Kılıç, E. Apaydın-Varol, and A. E. Pütün, "Preparation and surface characterization of activated carbons from *Euphorbia rigida* by chemical activation with ZnCl₂, K₂CO₃, NaOH and H₃PO₄," *Applied surface science*, vol. 261, pp. 247-254, 2012.
- [75] R. Chen *et al.*, "Preparation and characterization of activated carbons from tobacco stem by chemical activation," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 67, no. 6, pp. 713-724, 2017.
- [76] L. F. Ballesteros, J. A. Teixeira, and S. I. Mussatto, "Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin," *Food and bioprocess technology*, vol. 7, pp. 3493-3503, 2014.
- [77] P. Arauzo, M. Lucian, L. Du, M. Olszewski, L. Fiori, and A. Kruse, "Improving the recovery of phenolic compounds from spent coffee grounds by using hydrothermal delignification coupled with ultrasound assisted extraction," *Biomass and Bioenergy*, vol. 139, p. 105616, 2020.
- [78] T. Jooste, M. García-Aparicio, M. Brienzo, W. Van Zyl, and J. Görgens, "Enzymatic hydrolysis of spent coffee ground," *Applied biochemistry and biotechnology*, vol. 169, pp. 2248-2262, 2013.
- [79] F. Giroto, M. C. Lavagnolo, and A. Pivato, "Spent coffee grounds alkaline pre-treatment as biorefinery option to enhance their anaerobic digestion yield," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 9, pp. 2565-2570, 2018.
- [80] X. J. Lee, H. C. Ong, W. Gao, Y. S. Ok, W.-H. Chen, B. H. H. Goh, and C. T. Chong, "Solid biofuel production from spent coffee ground wastes: Process optimisation, characterisation and kinetic studies," *Fuel*, vol. 292, p. 120309, 2021.
- [81] M. M. Tun, H. Raclavská, D. Juchelková, J. Růžičková, M. Šafář, K. Štrbová, and P. Gikas, "Spent coffee ground as renewable energy source: Evaluation of the drying processes," *Journal of Environmental Management*, vol. 275, p. 111204, 2020.
- [82] C. Shi *et al.*, "Sustainable and superhydrophobic spent coffee ground-derived holocellulose nanofibers foam for continuous oil/water separation," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 28, p. e00277, 2021.
- [83] S. Zhang, J. Yang, S. Wang, and H. V. Rupasinghe, "Experimental exploration of processes

- for deriving multiple products from spent coffee grounds," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 128, pp. 21-29, 2021.
- [84] F. Battista, L. Zuliani, F. Rizzioli, S. Fusco, and D. Bolzonella, "Biodiesel, biogas and fermentable sugars production from Spent coffee Grounds: A cascade biorefinery approach," *Bioresource Technology*, vol. 342, p. 125952, 2021.
- [85] M. Dias *et al.*, "Anaerobic digestion of hydrothermal liquefaction wastewater from spent coffee grounds," *Biomass and Bioenergy*, vol. 148, p. 106030, 2021.
- [86] M. H. Park, Y. S. Yun, S. Y. Cho, N. R. Kim, and H.-J. Jin, "Waste coffee grounds-derived nanoporous carbon nanosheets for supercapacitors," *Carbon letters*, vol. 19, no. 1, pp. 66-71, 2016.
- [87] A. C. F. Alves, R. V. P. Antero, S. B. de Oliveira, S. A. Ojala, and P. S. Scalize, "Activated carbon produced from waste coffee grounds for an effective removal of bisphenol-A in aqueous medium," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, pp. 24850-24862, 2019.
- [88] W. Li, X. Yang, Z. Chen, T. Lv, X. Wang, and J. Qiu, "Synthesis and structure regulation of armor-wearing biomass-based porous carbon: Suppression the leakage current and self-discharge of supercapacitors," *Carbon*, vol. 196, pp. 136-145, 2022.
- [89] F. Ma, S. Ding, H. Ren, and Y. Liu, "Sakura-based activated carbon preparation and its performance in supercapacitor applications," *RSC advances*, vol. 9, no. 5, pp. 2474-2483, 2019.
- [90] 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, 2022.
- [91] F. Güzel, H. Saygılı, G. A. Saygılı, and F. Koyuncu, "New low-cost nanoporous carbonaceous adsorbent developed from carob (*Ceratonia siliqua*) processing industry waste for the adsorption of anionic textile dye: Characterization, equilibrium and kinetic modeling," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 206, pp. 244-255, 2015.
- [92] M. T. Amin and A. A. Alazba, "Comparative study of the absorptive potential of raw and activated carbon *Acacia nilotica* for Reactive Black 5 dye," *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, pp. 1-13, 2017.

- [93] S. Wong, N. A. Ghafar, N. Ngadi, F. A. Razmi, I. M. Inuwa, R. Mat, and N. A. S. Amin, "Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste," *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, p. 2928, 2020.
- [94] G. M. Nabil, N. M. El-Mallah, and M. E. Mahmoud, "Enhanced decolorization of reactive black 5 dye by active carbon sorbent-immobilized-cationic surfactant (AC-CS)," *Journal of industrial and engineering chemistry*, vol. 20, no. 3, pp. 994-1002, 2014.
- [95] R. Muralikrishnan and C. Jodhi, "Biodecolorization of reactive dyes using biochar derived from coconut shell: batch, isotherm, kinetic and desorption studies," *ChemistrySelect*, vol. 5, no. 26, pp. 7734-7742, 2020.
- [96] A. W. Ip, J. P. Barford, and G. McKay, "A comparative study on the kinetics and mechanisms of removal of Reactive Black 5 by adsorption onto activated carbons and bone char," *Chemical Engineering Journal*, vol. 157, no. 2-3, pp. 434-442, 2010.
- [97] M. M. Felista, W. C. Wanyonyi, and G. Ongera, "Adsorption of anionic dye (Reactive Black 5) using macadamia seed husks: kinetics and equilibrium studies," *Scientific African*, vol. 7, p. e00283, 2020.
- [98] T. JóŹwiak, U. Filipkowska, S. Brym, and L. Kopeć, "Use of aminated hulls of sunflower seeds for the removal of anionic dyes from aqueous solutions," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, pp. 1211-1224, 2020.
- [99] T. JóŹwiak, U. Filipkowska, A. Kowalkowska, J. Struk-Sokołowska, and D. Werbowy, "The influence of amination of sorbent based on buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) husks on the sorption effectiveness of Reactive Black 5 dye," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 105092, 2021.
- [100] H. Çelebi, "The applicability of evaluable wastes for the adsorption of Reactive Black 5," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 135-146, 2019.
- [101] T. JóŹwiak, U. Filipkowska, and P. Walczak, "The Use of Aminated Wheat Straw for Reactive Black 5 Dye Removal from Aqueous Solutions as a Potential Method of Biomass Valorization," *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6257, 2022.
- [102] T. JóŹwiak, U. Filipkowska, S. Brym, and M. Zyśk, "The use of aminated cotton fibers as an unconventional sorbent to remove anionic dyes from aqueous solutions," *Cellulose*, vol.

- 27, pp. 3957-3969, 2020.
- [103] S. Wong, H. H. Tumari, N. Ngadi, N. B. Mohamed, O. Hassan, R. Mat, and N. A. S. Amin, "Adsorption of anionic dyes on spent tea leaves modified with polyethyleneimine (PEI-STL)," *Journal of cleaner production*, vol. 206, pp. 394-406, 2019.
- [104] E. N. El Qada, S. J. Allen, and G. M. Walker, "Adsorption of basic dyes onto activated carbon using microcolumns," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 45, no. 17, pp. 6044-6049, 2006.
- [105] W. Li, Q. Yue, P. Tu, Z. Ma, B. Gao, J. Li, and X. Xu, "Adsorption characteristics of dyes in columns of activated carbon prepared from paper mill sewage sludge," *Chemical Engineering Journal*, vol. 178, pp. 197-203, 2011.
- [106] V. Makrigianni, A. Giannakas, D. Hela, M. Papadaki, and I. Konstantinou, "Adsorption of methylene blue dye by pyrolytic tire char in fixed-bed column," *Desalination and water treatment*, vol. 65, pp. 346-358, 2017.
- [107] W. Qian, Q. Song, H. Ding, and W. Xie, "Computational simulations of the mass transfer zone in GS adsorption column packed with Fe³⁺ type ion exchanger," *Chemosphere*, vol. 215, pp. 507-514, 2019.
- [108] Y. Al-Degs, M. Khraisheh, S. Allen, and M. Ahmad, "Adsorption characteristics of reactive dyes in columns of activated carbon," *Journal of Hazardous materials*, vol. 165, no. 1-3, pp. 944-949, 2009.
- [109] J. L. Sotelo, A. Rodríguez, S. Álvarez, and J. García, "Removal of caffeine and diclofenac on activated carbon in fixed bed column," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 90, no. 7, pp. 967-974, 2012.
- [110] M. A. P. Cruz, L. C. M. Guimarães, E. F. da Costa Júnior, S. D. F. Rocha, and P. d. L. Mesquita, "Adsorption of crystal violet from aqueous solution in continuous flow system using bone char," *Chemical Engineering Communications*, vol. 207, no. 3, pp. 372-381, 2020.
- [111] D. Sompornpailin, P. Mongconpattarasuk, C. Ratanatawanate, R. Apiratikul, K. H. Chu, and P. Punyapalakul, "Adsorption of nonsteroidal anti-inflammatory drugs onto composite beads of a 1D flexible framework MIL-53 (Al): Adsorption mechanisms and fixed-bed study," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 4, p. 108144, 2022.

- [112] Z. Aksu, Ş. Ş. Çağatay, and F. Gönen, "Continuous fixed bed biosorption of reactive dyes by dried *Rhizopus arrhizus*: Determination of column capacity," *Journal of hazardous materials*, vol. 143, no. 1-2, pp. 362-371, 2007.
- [113] K. Vijayaraghavan, S. W. Won, and Y.-S. Yun, "Single-and dual-component biosorption of reactive black 5 and reactive orange 16 onto polysulfone-immobilized esterified *Corynebacterium glutamicum*," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 47, no. 9, pp. 3179-3185, 2008.
- [114] H. Li, H. Zhang, K. Li, J. Zhang, M. Sun, and B. Su, "Catalytic graphitization of coke carbon by iron: Understanding the evolution of carbon Structure, morphology and lattice fringes," *Fuel*, vol. 279, p. 118531, 2020.
- [115] F. B. Hussein and B. K. Mayer, "Fixed-bed column study of phosphate adsorption using immobilized phosphate-binding protein," *Chemosphere*, vol. 295, p. 133908, 2022.
- [116] สำนักความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมทางน้ำกรมเจ้าท่ากระทรวงคมนาคม, "รายงานผลการตรวจติดตามคุณภาพน้ำจากแหล่งกำเนิดมลพิษ ประเภทโรงงานอุตสาหกรรม 16 แห่ง," 2021.
- [117] S. Brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller, "Adsorption of gases in multimolecular layers," *Journal of the American chemical society*, vol. 60, no. 2, pp. 309-319, 1938.
- [118] K. S. Sing, "Adsorption methods for the characterization of porous materials," *Advances in colloid and interface science*, vol. 76, pp. 3-11, 1998.
- [119] F. Rodriguez-Reinoso and A. Sepúlveda-Escribano, "Chapter 9. Porous Carbons in Adsorption and Catalysis," vol. 5, 2001, pp. 309-355.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายรัชชัย คุลบุตร
วัน เดือน ปี เกิด	20 ธันวาคม 2540
สถานที่เกิด	จังหวัดอำนาจเจริญ ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านยางช้า ตำบลอำนาจ อำเภอสิรินธร จังหวัดอำนาจเจริญ 37120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY