

การกำจัดโลหะโครเมียมในสารละลายโดยการดูดซับ
ด้วยเม็ดบีดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การกำจัดโลหะโครเมียมในสารละลายโดยการดูดซับ
ด้วยเม็ดบีดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution via
Adsorption of Chitosan/Coffee Residue Composite Beads



THE THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การกำจัดโลหะโครเมียมในสารละลายโดยการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิต
ของไคโตซานกับกากกาแฟ
โดย นางสาวตติกร เบญจถาวรอนันท์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิสสรณ์
ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์




..... ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิสสรณ์)


..... กรรมการ
(รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)


..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การกำจัดโลหะโครเมียมในสารละลายโดยการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิต
ของไคโตซานกับกากกาแฟ
โดย นางสาวติกร เบญจถาวรอนันท์ รหัสนักศึกษา 57011045
ปริญญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้รายงานการศึกษาความสามารถในการดูดซับของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง
ไคโตซานกับกากกาแฟ ในรูปแบบเม็ดปิด เพื่อใช้กำจัดโลหะหนักโครเมียมในสารละลาย โดยเตรียม
ไคโตซานจากการนำเปลือกกุ้ง มากำจัดแร่ธาตุ โปรตีน และหมู่อะซิทิล มีร้อยละผลได้เท่ากับ 14.91
โดยมวล ส่วนกากกาแฟนำมาบดแล้วคัดขนาดให้ผ่านตะแกรงเมช 60 ($<120 \mu\text{m}$) ล้างกากกาแฟ
แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อผสมไคโตซานกับกากกาแฟ ที่
อัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่า อัตราส่วนไคโตซานต่อกากกาแฟที่ 80/20 โดยมวล มีประสิทธิภาพใน
การดูดซับสูงสุดเท่ากับ 94.05% และทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ คือ pH เริ่มต้น
ของสารละลาย ระยะเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย จากผลการทดลอง พบว่า
เม็ดปิดคอมโพสิตมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ pH 4 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับเพื่อเข้าสู่
สภาวะสมดุล 7 ชั่วโมง พฤติกรรมดูดซับสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์มเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช
ไอโซเทอร์ม มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 1.91 mg/g

Report Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution via Adsorption of Chitosan/Coffee Residue Composite Beads

By Ratikorn Benjathawornanant ID. 57011045

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2017

Advisor Asst.Prof.Dr. Apinan Namkanisorn

ABSTRACT

This work investigated the adsorption performance of chitosan/coffee residue composite beads for the removal of chromium (VI) from aqueous solution. Chitosan was prepared from shrimp shell waste by demineralization, deproteinization and deacetylation with a yield of 14.91%. Coffee residue was washed with distilled water to remove dirt and color, dried at 110°C for 24 hours. Then the dried powder was sieved through a 60-mesh size screen (<120 μm). The mass ratio of chitosan to coffee residue of 80/20 yielded the highest adsorption efficiency at 94.05% at the initial pH of 4. The adsorption equilibrium was achieved in 7 hrs. Two adsorption isotherm models, Langmuir and Freundlich, were used to analyze the equilibrium data. The Langmuir isotherm gave a better fit to the experimental data, from which the maximum adsorption capacity of chromium (VI) adsorption onto chitosan/coffee residue composite of 1.91 mg/g was obtained.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือดูแลจากคณาจารย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิสร์ณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาในการให้คำแนะนำปรึกษาให้ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหา รวมถึงบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกคน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ และ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และให้แนวทางในการปรับปรุงงาน ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาและพัฒนางานให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ สถานที่ ความรู้ คำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ และสุดท้ายขอขอบพระคุณบิดามารดา เพื่อนๆทุกคน ที่ช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจ ให้ประสบความสำเร็จทางการศึกษา สามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคตได้

รติกร เบญจถาวรอนันท์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไคโตซาน	4
2.1.1 การผลิตไคโตซาน	5
2.1.2 คุณสมบัติของไคโตซาน	6
2.1.3 ประโยชน์ของไคโตซาน	6
2.1.4 การนำสารไคโตซานมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ	7
2.2 กากกาแฟ	8
2.3 การดูดซับ	9
2.3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	9
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ	9
2.3.3 กลไกการดูดซับ	10
2.3.4 อัตราการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ	10
2.3.5 สมดุลการดูดซับ	11
2.3.5.1 สมการแลงเมียร์	11
2.3.5.2 สมการฟรุนดลิช	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4 โลหะโครเมียม	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	17
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	18
3.3 การสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพลีเมอร์โคโตะซานกับกากกาแฟ	19
3.3.1 การสังเคราะห์โคโตะซาน	19
3.3.2 การสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพลีเมอร์ของโคโตะซานกับกากกาแฟ	20
3.4 การทดลองศึกษาความสามารถการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลายของเม็ดปิดคอมโพลีเมอร์ของโคโตะซานกับกากกาแฟ	21
3.4.1 เตรียมสารละลายโครเมียม (VI)	21
3.4.2 ศึกษาอัตราส่วนของโคโตะซานต่อกากกาแฟที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลาย	21
3.4.3 ศึกษา pH ที่ทำให้ประจุที่ผิวตัวดูดซับเป็นศูนย์	21
3.4.4 ศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	22
3.4.5 ศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลในการการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	22
3.4.6 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI)	22
3.4.7 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	23
3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของโคโตะซานและเม็ดปิดคอมโพลีเมอร์ของโคโตะซาน กับกากกาแฟ	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายการทดลอง	
4.1 วิเคราะห์ลักษณะของโคโตะซานและเม็ดปิดคอมโพลีเมอร์ของโคโตะซานกับ กากกาแฟ	25
4.1.1 การศึกษาร้อยละผลผลิตและค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติก	25
4.1.2 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของโคโตะซานที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้ง	26
4.1.3 การศึกษาพื้นที่ผิวของเม็ดปิดคอมโพลีเมอร์ของโคโตะซานกับกากกาแฟ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2 ผลการทดลองดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	28
4.2.1 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างโคโคซานกับกากกาแฟที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	28
4.2.2 ศึกษาระดับค่าพีเอชที่ทำให้พื้นผิวของเม็ดบีดคอมโพสิตมีประสิทธิภาพเป็นศูนย์หรือเป็นกลางทางไฟฟ้า (pH_{PZC})	29
4.2.3 ศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	30
4.2.4 ศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	31
4.2.5 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) ที่มีผลต่อปริมาณดูดซับจำเพาะ	32
4.2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก ก	41
ภาคผนวก ข	44
ภาคผนวก ค	46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 น้ำหนักโคตินและโคโตซานที่ได้จากการทดลอง	25
4.2 พารามิเตอร์ และ R^2 ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช	34
ก.1 น้ำหนักของโคตินและโคโตซานที่ได้จากการทดลอง	41
ก.2 ข้อมูลปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ในการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกจนถึงจุดยุติ ที่ได้จากการทดลอง	43
ข.1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานโครเมียม	44
ค.1 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 20 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟที่อัตราส่วนต่างๆ เวลา 12 ชั่วโมง	46
ค.2 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 20 mg/L ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g เวลา 12 ชั่วโมง	46
ค.3 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 10 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g	47
ค.4 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 20 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g	48
ค.5 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 30 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g	49
ค.6 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 10 15 20 30 40 50 และ 60 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g เวลา 12 ชั่วโมง	50
ค.7 ค่า pH เริ่มต้นตั้งแต่ pH 3 ถึง 12 และ pH หลังจากผ่านการดูดซับ	50
ค.8 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่ความเข้มข้นสมมูลต่างๆ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของสารละลายโครเมียม (VI) ที่ผ่านการดูดซับโดยเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20)	51
ค.9 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/Q_e$ และ $1/C_e$ ของสมการแลงเมียร์	51
ค.10 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Q_e$ และ $\log C_e$ ของสมการฟรุนดลิช	52

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน	4
2.1 (ข) โครงสร้างทางเคมีของไคติน	4
2.1 (ค) โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	5
2.2 หมู่อะมิโน (-NH ₂) บนโครงสร้างไคโตซาน ถูกโปรโตเนต	7
2.3 กลไกการดูดซับโครเมียม (VI) ที่อยู่ในรูปสารประกอบไดโครเมตของไคโตซาน	8
2.4 กราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมดูดซับของแลงเมียร์	12
2.5 กราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมดูดซับของฟรุนดลิช	13
2.6 สารประกอบโครเมียม (VI) ที่ pH และความเข้มข้นต่างๆ	14
3.1 ไคโตซานที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกกุ้ง	19
3.2 เม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ	20
4.1 กราฟ ATR-FTIR ของไคโตซานที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้ง	26
4.2 ภาพ SEM ของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน80/20) ก่อนดูดซับและหลังดูดซับ ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 70 เท่า และ500 เท่า	27
4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไคโตซานต่อกากกาแฟสำหรับการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	28
4.4 ผลของ pH ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	29
4.5 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) ที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	30
4.6 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)	31
4.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ	32
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/Q_e กับ C_e ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	33
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Q_e$ กับ $\log C_e$ ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช	33
ก.1 กราฟ ATR-FTIR ของไคโตซาน	41
ก.2 กราฟ ATR-FTIR ของเปลือกกุ้ง	42
ข.1 กราฟมาตรฐานโครเมียม	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น ชุบโลหะ เคลือบเงาโลหะ ฟอกหนัง และผลิตสี เป็นต้น โครเมียมที่พบในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ซึ่งโครเมียม (VI) มักจะอยู่ในรูปสารประกอบ CrO_4^{2-} HCrO_4^- หรือ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ โครเมียม (VI) เป็นสารอันตรายเมื่อได้รับในปริมาณมากหรือเป็นเวลานานอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิต ในปัจจุบันมีกระบวนการกำจัดโครเมียม (VI) หลายวิธี เช่น การตกตะกอนเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การแยกด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) การกรองผ่านเยื่อเมมเบรน (Membrane Filtration) และ การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็มีประสิทธิภาพและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาพบว่ากระบวนการดูดซับมีข้อได้เปรียบมากกว่ากระบวนการอื่นๆ เนื่องจาก ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไป น้ำเสียใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน ใช้สถานที่ไม่มาก สามารถเอาวัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพมาผลิตเป็นวัสดุดูดซับได้ทำให้ใช้เงินลงทุนน้อย เช่น ไคโตซาน กากกาแฟ เป็นต้น [1]

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทคาร์โบไฮเดรต ที่มีมากในธรรมชาติรองจากเซลลูโลส ได้มาจากการกำจัดหมู่อะซิทิล (Deacetylation) ของไคติน (Chitin) โดยทั่วไปพบได้ในเปลือกของสัตว์จำพวก แมลง กุ้ง ปู หอย ไคโตซานมีคุณสมบัติเด่น เช่น ไม่เป็นพิษ (Non Toxicity) มีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) สามารถย่อยสลายตัวได้เองตามชีวภาพ (Biodegradability) และมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Properties) เนื่องจากภายในโครงสร้างของไคโตซานจะมีหมู่หมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) กับไอออนของโลหะหนักแล้วเกิดเป็นพันธะเชิงซ้อน (Coordinate) กับหมู่อะมิโนได้ โดยในการนำไคโตซานมาใช้เป็นวัสดุดูดซับจะนิยมใช้ในรูปแบบของ เกล็ด เม็ดปัด เมมเบรน และเส้นใย [2]

กากกาแฟ เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสกัดเมล็ดกาแฟดิบในอุตสาหกรรมผลิตกาแฟผงสำเร็จรูป หรือร้านขายกาแฟสด เนื่องจากในปัจจุบันอัตราการดื่มกาแฟสูงขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะดื่มเองทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้กากกาแฟเหลือทิ้งสูงขึ้นตาม ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำกากกาแฟไปใช้ให้ประโยชน์ เช่น นำไปผลิตเชื้อเพลิง หรือ ผลิตเป็นวัสดุดูดซับ มีงานวิจัยรายงานว่ากากกาแฟมีความสามารถในการดูดซับได้ดี เนื่องจากโครงสร้างมีความเป็นรูพรุน ภายในโครงสร้างมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลส และ ลิกนิน อีกทั้งมีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ เช่น หมู่คาร์บอกซิล อยู่บนพื้นผิวของกากกาแฟ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกับถ่านกัมมันต์พบว่ามีความสามารถคล้ายคลึงกัน แต่กากกาแฟมีราคาถูกกว่ามาก [3]

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการนำไคโตซาน และกากกาแฟมาใช้เป็นวัสดุดูดซับกันอย่างแพร่หลาย แต่ยังไม่มียานวิจัย ที่นำไคโตซานกับกากกาแฟ มาพัฒนาให้อยู่ในรูปเม็ดปิดวสุคคอมโพสิตเพื่อใช้ดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาความสามารถในการดูดซับของเม็ดปิดวสุคคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ และปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกำจัดโลหะโครเมียม (VI) ในสารละลาย

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาเม็ดปิดวสุคคอมโพสิตไคโตซานกับกากกาแฟเพื่อใช้ดูดซับโครเมียม (VI)
2. ศึกษาอัตราส่วนระหว่างไคโตซานกับกากกาแฟที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด เพื่อนำไปศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับบนไคโตซาน และการสังเคราะห์ไคโตซาน ด้วยกรรมวิธีต่างๆ
2. สังเคราะห์ไคโตซานจากเปลือกกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*)
3. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับบนกากกาแฟ และวิธีสังเคราะห์เม็ดปิดวสุคคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ
4. ทำการสังเคราะห์เม็ดปิดวสุคคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ พร้อมทั้งทดลองหาอัตราส่วนของไคโตซานต่อกากกาแฟที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลายสูงสุด
5. ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลายของเม็ดปิดวสุคคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟในกระบวนการดำเนินงานแบบกะ (Batch) และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) จากแบบจำลองพื้นฐาน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir) และ ฟรุนดลิช (Freundlich) เพื่อนำมาใช้อธิบายผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ เพื่อใช้ดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลาย
2. ทราบอัตราส่วนระหว่างไคโตซานกับกากกาแฟ และสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลายของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ



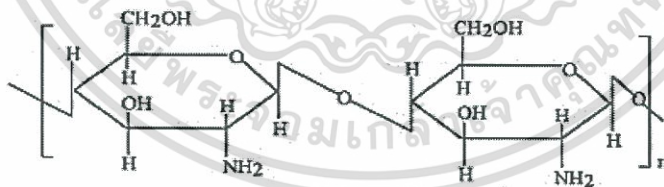
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

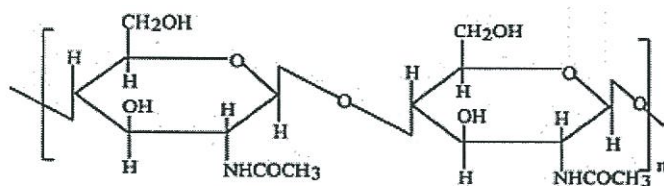
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไคโตซาน [4]

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทคาร์โบไฮเดรต ที่มีปริมาณมากรองจากเซลลูโลส นิยมสกัดจากเปลือกกุ้ง กระจงตองปู ปลาหมึก และแมลง องค์ประกอบภายในโครงสร้างของไคโตซานมีความคล้ายคลึงกับเซลลูโลส ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของไคโตซานเป็นหมู่ $-NH_2$ แต่ของเซลลูโลสเป็นหมู่ $-OH$ (รูปที่ 1 ก. และ ข.) ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ชนิดหนึ่งของไคติน (Chitin) ที่ได้จากการเอาหมู่อะซิทิล (Acetyl Group, $CO-CH_3$) ของไคตินออก ในสารละลายต่างเข้มข้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Deacetylation ทำให้โครงสร้างของไคตินที่เป็น N-acetyl glucosamine กลายเป็น Glucosamine (หมู่อะซีตามิโด $-NHCOCH_3$ เปลี่ยนไปเป็นรูปของหมู่อะมิโน $-NH_2$) (ภาพประกอบ 1 ค.) ผลที่ได้คือ สมบัติการเป็นสารที่มีประจุบวก (Polycationic Activity) เพิ่มขึ้น กลายเป็นโครงสร้างที่ Active พร้อมจะทำปฏิกิริยาได้อย่างว่องไว

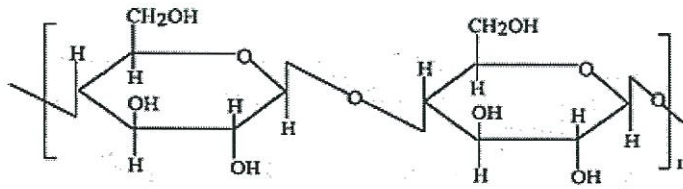


รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน



รูปที่ 2.1 (ข) โครงสร้างทางเคมีของไคติน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 (ค) โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

2.1.1 การผลิตไคโตซาน [5]

กระบวนการผลิตไคโตซานจากเปลือกของสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลัง (Crustacean Shell Waste) มีขั้นตอนพื้นฐานอยู่ 3 ขั้นตอน ดังนี้: ขั้นตอนที่ 1 การแยกโปรตีน (Deproteinization) ขั้นตอนที่ 2 การแยกแร่ธาตุ (Deminerlization) และขั้นตอนที่ 3 การกำจัดหมู่อะซิetyl (Deacetylation) ซึ่งขั้นตอนที่ 1 และ 2 สามารถสลับลำดับก่อนหลังได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการนำโปรตีนมาใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องเริ่มจากขั้นตอนการแยกโปรตีนก่อนค่อยตามด้วยขั้นตอนการแยกแร่ธาตุ เนื่องจากโปรตีนที่ได้จะมีปริมาณและคุณภาพที่ดีกว่า ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไคโตซาน ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของต่าง สภาวะในการผลิตไคติน บรรยากาศและอัตราส่วนของไคตินต่อสารละลายต่างเข้มข้น สุทธิรา ชั้นทพันธ์ และ คณะ [6] ได้ทดลองสกัดไคโตซานจากเปลือกกุ้งขาวสด โดยนำเปลือกกุ้งขาวสดมาล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วนำมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำมาผลิตไคโตซานโดยผ่านกระบวนการต่างๆตามลำดับดังนี้

1) กระบวนการแยกแร่ธาตุ โดยนำเปลือกกุ้งมาแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 2 mol/dm^3 กวนตลอดเวลา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรเป็น 1 ต่อ 20 จากนั้นนำเปลือกกุ้งมาล้างด้วยน้ำจนเป็นกลาง แล้วนำมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง

2) กระบวนการแยกโปรตีน นำเปลือกกุ้งจากข้อ (1) มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 mol/dm^3 กวนตลอดเวลา เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรเป็น 1 ต่อ 20 จากนั้นนำเปลือกกุ้งมาล้างด้วยน้ำจนเป็นกลาง แล้วนำมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ในขั้นตอนนี้จะได้ผลผลิตเป็นไคติน

3) การสกัดไคโตซาน นำไคตินมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวล/ปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรเป็น 1 ต่อ 100 กวนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนสารละลายใหม่ทุก 1 ชั่วโมง จนครบ 2 ชั่วโมง

แล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำจนปนกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ไคโตซานเป็นผลิตภัณฑ์

2.1.2 คุณสมบัติของไคโตซาน [7]

ไคโตซานไม่ละลายในน้ำ รวมทั้งด่างและตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) แต่ไคโตซานสามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่า pH น้อยกว่า 6 ซึ่งกรดที่นิยมใช้ในการละลายไคโตซาน ได้แก่ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก

สารละลายไคโตซานเป็นสารละลายหนืดที่มีความเหนียวใส ในสารละลายไคโตซานนั้น หมู่อะมิโนหรือหมู่เอมีนของไคโตซานสามารถแตกตัวได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัว (pK_a) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุพอลิเมอร์ โดยค่า pK_a ของไคโตซานอยู่ในช่วง 6.2-6.8 ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับของการกำจัดหมู่อะซิทิล น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน ความเข้มข้นของสารละลายไคโตซาน ความแรงของไอออน ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ

ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Deacetylation) เป็นสมบัติสำคัญอีกอย่างหนึ่งของไคโตซาน เนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไคตินหรือไคโตซานไคตินและไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ระหว่างสองมอนอเมอร์ของ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนที่อยู่ร่วมกันของมอนอเมอร์ N-acetyl-D-glucosamine มากกว่า คือมีระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลต่ำ พอลิเมอร์นั้นจะแสดงสมบัติเด่นของไคติน ในขณะที่หากพอลิเมอร์นั้นมีสัดส่วนของมอนอเมอร์ D-glucosamine มากกว่า คือมีระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลสูง พอลิเมอร์นั้นจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน

นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานจะบอกถึงความยาวของสายไคโตซาน ซึ่งมีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความหนืดสูง มีสายยาว และ สารละลายมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

2.1.3 ประโยชน์ของไคโตซาน

เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีลักษณะโดดเด่นคือ เป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติ ไหมไวไฟ ไม่เป็นพิษ (Non - Phytotoxic) ต่อพืชและสัตว์ ส่งผลให้มีการนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

1) ด้านการเกษตร เนื่องจากไคโตซานสามารถก่อตัวเป็นฟิล์มบาง ใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเคลือบผิวเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเมล็ดพันธุ์ และยังมี การนำไปทำสารต่อต้านเชื้อราและแบคทีเรียบางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ด้านการแพทย์และเภสัชกรรม นำไปใช้ทำไหมเย็บแผล ผิวนั่งเทียม และใช้รักษาแผลแทนพลาสติกปิดแผล

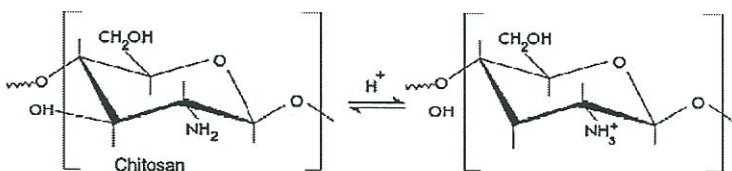
3) ด้านอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารตกตะกอนหรือเป็นตัวกรองในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

4) ด้านสิ่งแวดล้อม ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากไคโตซานมีความสามารถในการจับกับของแข็งแขวนลอยได้ดี และจับกับอะตอมของโลหะหนักได้ ซึ่งนิยมนำไคโตซานมาใช้งานในรูปแบบที่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี หรือนำมาใช้งานในรูปแบบที่เกิดการปรับเปลี่ยนทางกายภาพ เช่น เมมเบรน เม็ดปิด และ เส้นใย

2.1.4 การนำสารไคโตซานมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ [8]

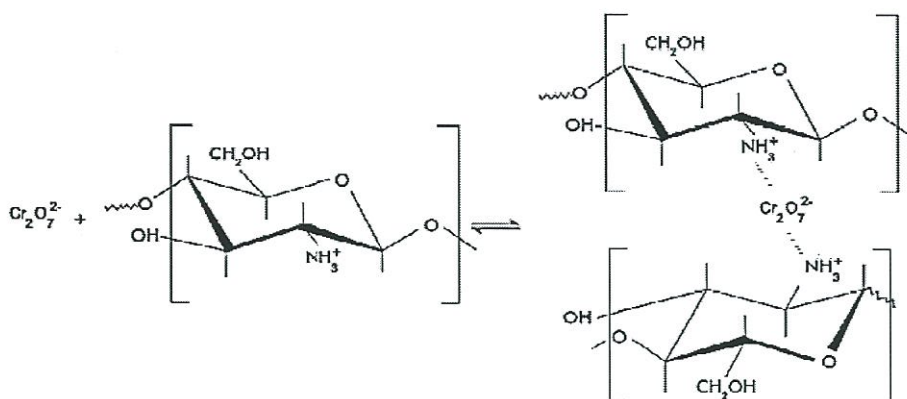
จากคุณสมบัติของไคโตซานที่กล่าวไปข้างต้น นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เช่น โลหะหนักโครเมียม ทองแดง สังกะสี เป็นต้น เนื่องจากหมู่อะมิโนจะมีระดับการสูญเสียอิเล็กตรอนหรือโปรโตเนต (Protonation) ไปเป็น $-NH_3^+$ เมื่อค่า $pK_a = 6.3$ ดังนั้นในการดูดซับสารละลายโครเมียมจึงเกิดได้ดีที่ pH ต่ำๆ เนื่องจาก หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของไคโตซานจะถูกโปรโตเนต (ความแรงของประจุบวกเพิ่มมากขึ้น) ทำให้สามารถดึงดูดกับประจุลบของสารละลายโครเมียม (VI) ซึ่งมีอยู่ในรูปสารประกอบ CrO_4^{2-} $HCrO_4^-$ หรือ $Cr_2O_7^{2-}$ ได้ดี กล่าวคือ ไนโตรเจนในหมู่อะมิโนจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ทำให้ไอออนของโลหะสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อน (Coordinate) กับหมู่อะมิโนได้ แต่ที่ pH มากกว่า 7 หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของไคโตซานจะถูกดี โปรโตเนต (ความแรงของประจุลบเพิ่มมากขึ้น) ไฮดรอกซิลที่เพิ่มขึ้นจำนวนมากจะเข้าไปแย่งจับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับกับประจุของสารละลายโครเมียม (VI) ทำให้การดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) ที่อยู่ในรูปประจุลบเกิดขึ้นได้น้อยลง

ถึงแม้ว่าไคโตซานจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆ ได้ดี แต่ไคโตซานยังมีข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ เช่น เกิดการบวม พองตัวเมื่ออยู่ในน้ำ มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ไม่ทนต่อสารละลายกรด จึงอาจจะนำมาซึ่งความไม่สะดวกในการใช้งาน เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน คุณสมบัติทางกายภาพเหล่านี้สามารถถูกปรับปรุงได้โดยการนำไคโตซานผสมกับกากกาแฟเพื่อให้อยู่ในรูปวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 2.2 หมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนโครงสร้างไคโตซาน ถูกโปรโตเนต [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับโครเมียม (VI) ที่อยู่ในรูปสารประกอบไดโครเมตของไคโตซาน [9]

2.2 กากกาแฟ (Coffee residual) [10]

กากกาแฟ เป็น กากเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตกาแฟ หรือ แม้แต่การชงกาแฟสดในครัวเรือน ในปัจจุบันนี้ผู้คนนิยมดื่มกาแฟเพิ่มขึ้นจำนวนมากส่งผลให้มีกากเหลือทิ้งเพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่เป็นจำนวนมากเช่น ลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ โพลีแซคคาไรด์ต่างๆ จึงไม่สามารถทิ้งได้โดยไม่ผ่านการบำบัดก่อน ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงมีแนวคิดที่จะนำของเสียเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ จึงมีงานวิจัยสนใจที่นำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น นำมาผลิตไบโอดีเซล ทำถ่านกัมมันต์ เป็นสารตั้งต้นในการสร้างน้ำตาล และ นำมาใช้วัสดุดูดซับ เป็นต้น มีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย เช่น แอลกอฮอล์ คีโตน และคาร์บอกซิล อีกทั้งโครงสร้างของกากกาแฟมีความเป็นรูพรุนสูง [11] รายงานว่ากากกาแฟสามารถดูดซับโครเมียม (VI) ได้ เนื่องจากเมื่อพีเอชของสารละลายต่ำกว่า pH_{pzc} (ค่าพีเอชที่ทำให้ผิวของตัวดูดซับประจุเป็นศูนย์) ของกากกาแฟมีค่าเท่ากับ 3.2 กลุ่มของลิกนินซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลากหลาย จะถูกโปรตอนแตกกลายเป็นประจุบวก แล้วสามารถจับกับโครเมียม (VI) ได้ด้วย แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) อีกทั้งยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน (Electron Donor) ให้กับโครเมียม (VI) แล้วเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เปลี่ยนไปอยู่ในรูปโครเมียม (III) แล้วจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation Reactions) และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กับออกซิเจนของหมู่คาร์บอกซิล ดังสมการที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การดูดซับ (Adsorption) [12-14]

การดูดซับ เป็น เป็นกระบวนการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดไว้บนพื้นผิวของแข็งโดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแข็งนั้นสารประกอบที่มาเกาะบนพื้นผิวของแข็งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นผิวให้สารตัวดูดซับมาเกาะบนพื้นผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ดังนั้นตัวดูดซับจึงเป็นของแข็งมีโพรงจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นผิวของตัวดูดซับให้มากขึ้นซึ่งมีผลสามารถทำให้ดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีโครงสร้าง ขนาด และการจัดเรียงตัว ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับด้วยเช่นกัน

2.3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

- 1) พื้นผิวและโครงสร้างรูพรุนของสารดูดซับ หากตัวดูดซับมีรูพรุนมากจะทำให้พื้นที่ผิวดูดซับมีมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้นและจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย
- 2) ความสามารถในการละลายของสารถูกดูดซับ สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจาก ไม่มีการทำลายพันธะระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลาย
- 3) น้ำหนักและขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ถ้าน้ำหนักและขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งจะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง
- 4) ค่า pH ของสารถูกละลาย การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ หาก pH ลดลงส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่พื้นที่ผิวสารดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับไอออนลบได้มากขึ้น
- 5) อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของสารดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับอ่อนลง แต่ก็นับว่าปัจจัยนี้มีอิทธิพลน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆ

2.3.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับโดยทั่วไปจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Interaction Forces) ที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ

- 1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) หรือแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) ส่งผลให้เกิดการคายความร้อนค่อนข้างต่ำ เกิดการผัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับ (Reversible Interaction) ของกระบวนการได้ง่าย ทำให้สามารถนำสารดูดซับที่ใช้งานจนอิ่มตัวแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อีก สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆของผิวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) โดยจำนวนชั้น จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ จึงทำให้มีค่าความจุต่อน้ำหนักของสารดูดซับที่สูงกว่า ในระบบการดูดซับสารเพื่อการ แยก และการทำบริสุทธิ์ในกระบวนการต่างๆจะใช้หลักการของการดูดซับทางกายภาพเป็นหลัก

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับสารดูดซับทำปฏิกิริยากัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับซึ่งเป็นการสร้างพันธะเคมีระหว่างสารที่ไปดูดซับกับพื้นผิวของสารดูดซับ พันธะเคมี เป็นพันธะที่แข็งแรงจึงทำให้มีความร้อนของการดูดซับสูง ทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากพื้นผิวทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดการผันกลับ (Irreversible Interaction) และการดูดซับประเภทนี้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

2.3.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกผ่านของเหลวเข้าถึงผิวหน้าตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นการแพร่กระจายของตัวถูกดูดซับให้เต็มพื้นที่ผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับติดกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

2.3.4 อัตราการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญต่อภาวะเข้าสู่สมดุล อัตราการดูดซับช้าหรือเร็วถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่ช้าที่สุดเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุดโมเลกุลตัวถูกดูดซับถูกส่งไปยังผิวหน้าสัมผัสของเหลวบางๆของตัวดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวของตัวถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับเรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่เป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้น การยึดติดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (Physical Force) หรือทางเคมี (Chemical Force) หรืออาจเกิดขึ้นทั้งสองแบบ

2.3.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ จะถูกใช้เพื่อหาปริมาณของตัวถูกดูดซับที่สารดูดซับสามารถดูดซับได้ที่สภาวะสมดุลและอุณหภูมิคงที่ จากการทดลองที่มีความแตกต่างกันไปตามปริมาณของตัวดูดซับ หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเริ่มต้น โดยสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในช่วงเวลาที่สมดุลได้และสามารถสร้างความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของของเหลวในเฟสที่สมดุลได้ ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะอยู่ในรูปของไอโซเทอมและช่วยให้สามารถคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) ของตัวดูดซับได้ที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับใดๆ ความสามารถในการดูดซับสามารถคำนวณได้โดยทำการคูณมวล ดังสมการที่ 2.2

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} V \quad (2.2)$$

เมื่อ Q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/g) ที่สภาวะสมดุล หรือเรียกว่า ค่าการดูดซับที่สมดุล

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

m คือ มวลของตัวดูดซับ (g)

โดยทั่วไปสมการไอโซเทอม ที่ใช้ศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ที่นิยมนำมาใช้คือ ได้แก่ สมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation) และ สมการฟรุนดลิช (Freundlich Equation)

2.3.5.1 สมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation)

เป็นสมการการดูดซับที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีรูปแบบของสมการที่ง่าย และสามารถใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับของระบบดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี ตลอดจนระบบดูดซับแก๊สและของเหลวได้ค่อนข้างดี โดยมีสมมติฐานของกระบวนการดูดซับว่า

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถเขียนสมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการที่ 2.3

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.3)$$

เมื่อ Q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/g) ที่สภาวะสมดุล

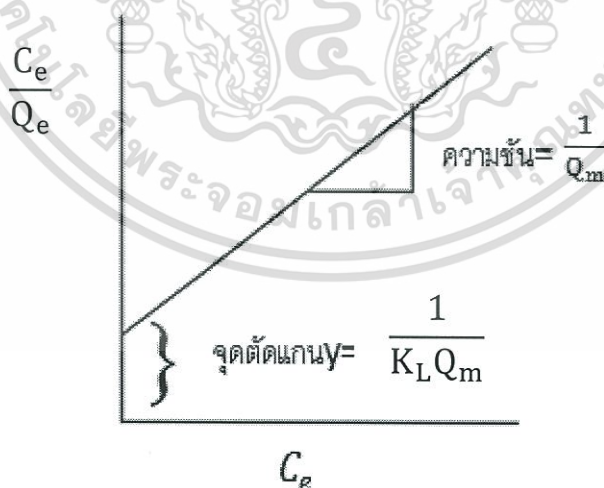
Q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (Monolayer)

K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

และสามารถนำมาเขียนในรูปสมการเชิงเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{K_L Q_m} + \frac{C_e}{Q_m} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.4 กราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมดูดซับของแลงเมียร์

2.3.5.2 สมการฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

เป็นสมการการดูดซับที่ใช้อธิบายการดูดซับบนตัวดูดซับที่มีพื้นผิวของการดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) โดยพัฒนาจากไอโซเทอร์มแบบแลงก์เมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) สมการการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช เขียนได้ดังสมการที่ 2.5

$$Q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.5)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

Q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/g) ที่สภาวะสมดุล

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

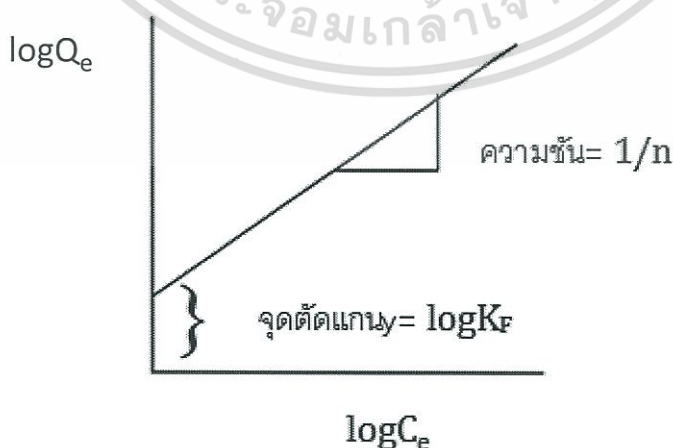
และสามารถนำมาเขียนในรูปสมการเชิงเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.6

$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.6)$$

เมื่อ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

$1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 หมายถึง ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดสำหรับการดูดซับ

$1/n$ มีค่ามากกว่า 1 หมายถึง ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณมากสำหรับการดูดซับ

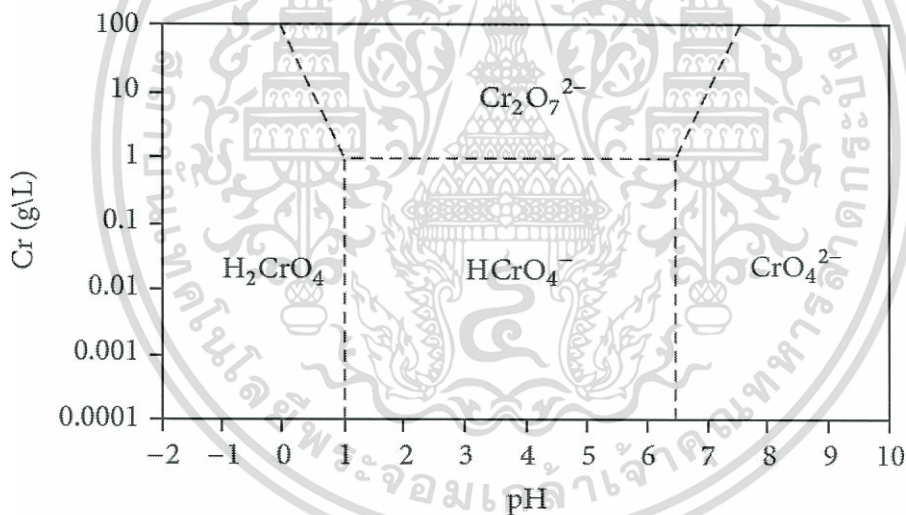


รูปที่ 2.5 กราฟสมการเส้นตรงไอโซเทอมดูดซับของฟรอนด์ลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โลหะโครเมียม [15]

โครเมียมและสารประกอบโครเมียมนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การชุบโลหะ การพอกหนังสัตว์ ผลิตภัณฑ์ส่วนรถยนต์ เป็นองค์ประกอบการผลิตเม็ดสีของอุตสาหกรรมสีทา และอื่นๆ โลหะโครเมียมส่วนใหญ่มักพบในกลุ่มของ โครเมียมไตรวาเลน (Cr^{3+}) และโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Cr^{6+}) โดยโครเมียม (VI) จะมีอันตรายมากกว่าโครเมียม (III) เมื่อโครเมียม (VI) แตกตัวมักอยู่ในรูป CrO_4^{2-} HCrO_4^- หรือ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ขึ้นกับค่า pH และความเข้มข้นของสารละลาย ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและมนุษย์ คือมีฤทธิ์กัดกร่อน เมื่อสัมผัสจะทำให้เกิดความระคายเคืองต่อผิวหนัง สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยทางเดินอาหาร ผิวหนัง และทางเดินหายใจ ถ้าได้รับในปริมาณสูงจะทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตได้ จากอันตรายดังกล่าวกระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไม่ให้มีโครเมียมเกิน 0.25 mg/L [16] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โรงงานอุตสาหกรรมจะต้องมีการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ



รูปที่ 2.6 สารประกอบโครเมียม (VI) ที่ pH และความเข้มข้นต่างๆ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Walaikorn Nitayaphat (2017) [18] ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับของเม็ดปิดโคโตซานหลังจากผสมกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อม Reactive Red 152 จากการศึกษาพบว่าเม็ดปิดคอมโพสิตที่อัตราส่วนโคโตซานต่อกากกาแฟ 60/40 โดยมวล ที่ pH 4 สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุด โดยการดูดซับเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 6 ชั่วโมง พฤติกรรมของการดูดซับเข้ากับสมมติฐานของแลงเมียร์ และฟรุนดิช แต่ ใกล้เคียงกับของแลงเมียร์มากกว่า แสดงได้จากค่า R^2 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 4.274 mg/g และเมื่อศึกษาพื้นผิวของตัวดูดซับโดยภาพ SEM พบว่าพื้นผิวของตัวดูดซับก่อนดูดซับมีลักษณะขรุขระ แต่หลังจากนำมาใช้ดูดซับพื้นผิวมีลักษณะขรุขระน้อยลง ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับสีย้อมเกิดขึ้นบนพื้นผิวของเม็ดปิดโคโตซานกับกากกาแฟ

George Z. Kyzas (2012) [19] ในงานนี้ได้ศึกษาการกำจัดทองแดง (II) และโครเมียม (VI) ในสารละลาย โดยใช้กากกาแฟที่ไม่ได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติก่อนนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ จากข้อมูลการทดลองพบว่า พฤติกรรมของการดูดซับเข้ากับสมมติฐานของแลงเมียร์และฟรุนดิชมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดของทองแดงเท่ากับ 70 mg/g และของ โครเมียมเท่ากับ 45 mg/g เมื่อได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับ สมการ pseudo-first -second และ third order จะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของ pH สำหรับการดูดซับและการคายซับ อิทธิพลของรอบการกวน พบว่าที่ pH 5 จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีสุด ส่วนการคายซับจะดีที่สุดที่ pH 2 ซึ่งรอบการกวนที่เหมาะสมคือ 10 รอบ

Suhaib S. Salih และคณะ (2017) [20] ในงานนี้ได้ศึกษาการเตรียมเม็ดปิดโคโตซานโดยใช้วิธีหดยาสารละลายโคโตซานลงในสารละลายเบส เพื่อนำมาใช้ดูดซับ โครเมียม (VI) และ สังกะสี (II) จากสารละลาย และนำเม็ดปิดโคโตซานมาวิเคราะห์ลักษณะด้วยวิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Thermal Gravimetric Analysis (TGA) Brunauer Emmett Teller (BET) Measurements Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) อีกทั้งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นของสารละลาย เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และ อุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ทดสอบ จากผลการทดลองพบว่า จลนศาสตร์ของการดูดซับสำหรับโลหะโครเมียม (VI) และ สังกะสี (II) เหมาะสมกับ อัตราอันดับ 2 มากกว่าอัตราอันดับ 1 ลักษณะของการดูดซับของโลหะ โครเมียม (VI) และ สังกะสี (II) สอดคล้องกับโมเดลของแลงเมียร์ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของโลหะ โครเมียม (VI) และ สังกะสี (II) ได้เท่ากับ 79.56 mg/g และ 109.18 mg/g ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1,000 mg/L ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Shajahan Siraj และคณะ (2012) [21] ได้ศึกษาวัสดุคอมโพสิตไคโตซานกับชาร์โคลเพื่อใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกหนัง โดยเตรียมวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธี Simple Solution-Evaporation และทำการตรวจสอบลักษณะด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) กับ X-ray Powder Diffraction (XRD) ในการดูดซับโครเมียมจะทำการศึกษาอิทธิพลของ เวลาสัมผัส pH ของสารละลาย และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้เริ่มต้น ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอพซอพชั่น (AAS) จากผลการทดลองพบว่าโครเมียมจะถูกดูดซับได้สูงสุดมากกว่าร้อยละ 90 ที่ pH 4 ปริมาณตัวดูดซับ 40 g/L และ เวลาที่เข้าสู่สมดุลเท่ากับ 250 นาที ตามลำดับ ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตไคโตซานกับชาร์โคลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะใช้สำหรับการกำจัดโลหะหนักโครเมียมในน้ำเสียของโรงงานฟอกหนัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาความสามารถการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) ของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ โดยในขั้นแรกจะทำการสังเคราะห์ไคโตซาน จากนั้นนำไคโตซานที่ได้มาผสมกับกากกาแฟแล้วสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ แล้วทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างไคโตซานต่อกากกาแฟ ที่ใช้ในการสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพสิต และนำอัตราส่วนที่เหมาะสมมาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) ต่อไป

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เปลือกกุ้งขาวสด
- 2) กากกาแฟพันธุ์อาราบิก้า จากร้าน Starbucks
- 3) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl)
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)
- 3) น้ำกลั่น (Distilled water)
- 4) น้ำ De-ionized
- 5) กรดอะซิติก (Acetic acid; CH_3COOH)
- 6) เอทานอล (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- 7) โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
- 8) เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange; $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$)
- 9) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

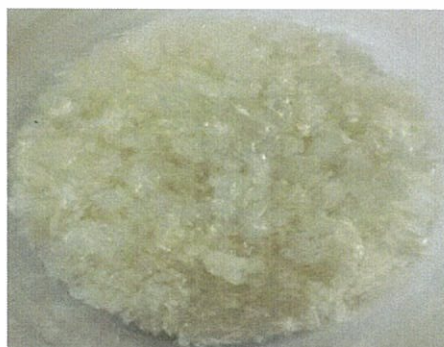
- 1) ตู้อบ (Oven)
- 2) เครื่องชั่ง (Analytical Balance)
- 3) เครื่องบด
- 4) กระดาษกรอง (Filter Paper)
- 5) ปิเปต (Pipette)
- 6) กรวยกรองแก้ว (Funnel)
- 7) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 8) ขวดฉีดน้ำ (Wash Bottle)
- 9) ลูกยางดูด (Rubber Bulb)
- 10) แท่งแก้ว (Stirring Rod)
- 11) กระบอกตวง (Graduated Cylinder)
- 12) ขวดรูปชมพู่ (Flask)
- 13) เครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน (Hotplate Stirrer)
- 14) เครื่องเครื่องเขย่าคัดแยกอนุภาคด้วยตะแกรงร้อน (Sieve Shaker)
- 15) เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Pump)
- 16) กรวยบุชเนอร์ (Buchner Funnel)
- 17) ขวดลดความดัน (Suction Flask)
- 18) บิวเรต (Burette)
- 19) เครื่องวัดค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพสิตไคโตซานกับกากกาแฟ

3.3.1 การสังเคราะห์ไคโตซาน [22]

- 1) นำเปลือกกุ้งขาวสดมาล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆครั้ง แล้วจึงนำไปอบไล่ความชื้นด้วยเครื่องอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการบดจนได้ขนาด 0.5-5.0 mm.
- 2) ทำการกำจัดแร่ธาตุ โดยแช่เปลือกกุ้งที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 น้ำหนัก 20 g ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 mol/dm^3 ปริมาตร 300 ml กวนให้เข้ากันตลอดเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลา กรองเอาแต่เปลือกกุ้งแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง จนน้ำที่ผ่านการชะล้างมี pH เป็นกลาง
- 3) ทำการกำจัดโปรตีน โดยแช่เปลือกกุ้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 mol/dm^3 ปริมาตร 300 ml กวนให้เข้ากันตลอดเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลา ให้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที กรองเอาแต่เปลือกกุ้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง จนน้ำที่ผ่านการชะล้างมี pH เป็นกลาง ในขั้นตอนนี้เปลือกกุ้งที่ได้ จะเรียกว่า ไคติน
- 4) ทำการกำจัดหมู่อะซิทิล โดยแช่ไคตินในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50%โดยมวล จำนวน 100 ml กวนให้เข้ากันตลอดเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลา กรองเอาแต่เปลือกกุ้งแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง จนน้ำที่ผ่านการชะล้างมี pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ไคโตซาน เป็นผลิตภัณฑ์
- 5) นำไคโตซานที่ได้ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย เครื่องมือวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR) และหาร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation; %DD) (แสดงไว้ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.1 ไคโตซานที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกกุ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ [19]

- 1) เตรียมกากกาแฟ โดยนำกากกาแฟมาล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด แล้วอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการบดจนได้ขนาด เล็กกว่าหรือเท่ากับ 120 μm
- 2) เตรียมสารละลายโคโตซาน โดยละลายเกล็ดโคโตซานในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 2% โดยปริมาตร ในอัตราส่วนเกล็ดโคโตซาน 1 g ต่อ สารละลายกรดอะซิติก 100 ml
- 3) นำกากกาแฟที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 มาใส่ในสารละลายโคโตซาน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างโคโตซานต่อกากกาแฟ ที่ 100/0 80/20 60/40 40/60 20/80 และ 0/100 %โดยมวล แล้วทำการกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) นำสารละลายผสมมาหยดในสารละลายต่างที่มี โซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อ แอลกอฮอล์ ต่อ น้ำ เป็น 10:60:30 %โดยมวล เพื่อขึ้นรูปให้กลายเป็นเม็ดปิด
- 5) ล้างเม็ดปิดในน้ำกลั่นหลายครั้ง จนน้ำที่ผ่านการชะล้างมีพีเอช เป็นกลาง 6) เก็บเม็ดปิดในน้ำกลั่น
- 7) ศึกษาลักษณะพื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)



รูปที่ 3.2 เม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ

3.4 การทดลองศึกษาความสามารถการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลายของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ

3.4.1 เตรียมสารละลายโครเมียม (VI)

- 1) ชั่งโพแทสเซียมไดโครเมต 2.848 g ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 L จะได้สารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 1000 mg/L
- 2) ปรับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 1000 mg/L ให้เป็น 100 mg/L แล้วค่อยปรับให้ได้ความเข้มข้น 10 20 30 40 50 และ 60 mg/L

3.4.2 ศึกษาอัตราส่วนของไคโตซานต่อกากกาแฟที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลาย

- 1) นำเม็ดปิดคอมโพสิตที่อัตราส่วนต่างๆ ไปบดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) ปรับ pH สารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 20 mg/L ด้วย กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 mol/dm³ ให้ได้ pH 4
- 3) แช่เม็ดปิดคอมโพสิตที่อัตราส่วนไคโตซานต่อกากกาแฟ 80/20 โดยมวล ปริมาณ 1 g ในสารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 20 mg/L ที่ปรับ pH แล้ว เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 4) เมื่อครบ 24 ชั่วโมง กรองเอาตัวดูดซับออก แล้วนำสารละลายไปตรวจหาปริมาณโครเมียม (VI) ที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอสซอร์ปชัน (Atomic Absorption Spectrometer)
- 5) ทำซ้ำข้อ 3, 4 โดยเปลี่ยนเป็นที่อัตราส่วน 100/0 60/40 40/60 20/80 และ 0/100 โดยมวลตามลำดับ
- 6) วิเคราะห์อัตราส่วนของไคโตซานต่อกากกาแฟที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่น

3.4.3 ศึกษา pH ที่ทำให้ประจุที่ผิวตัวดูดซับเป็นศูนย์ (ดำเนินการโดยวิธี pH-drift method) [23]

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 mol/dm³ ปริมาตร 50 cm³ จำนวน 10 ชุดการทดลอง
- 2) ปรับ pH ของสารละลายให้ได้อยู่ในช่วง 3-12 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 mol/dm³ หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 mol/dm³ วัดความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย ด้วยพีเอชมิเตอร์
- 3) นำตัวดูดซับ ปริมาณ 1 g ไปแช่ในสารละลาย เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) กรองตัวดูดซับออกไป พร้อมวัดความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ด้วยพีเอชมิเตอร์
- 5) เขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย ตัดกับเส้นทแยงมุม

3.4.4 ศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

- 1) นำเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ ที่ได้จากข้อ 3.4.2 มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) ปรับ pH สารละลายโครเมียม (VI) 20 mg/L ด้วย กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 mol/dm³ และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.01 mol/dm³ ให้ได้ pH เท่ากับ 3 4 5 6 และ 7
- 3) แช่เม็ดปิดคอมโพสิต ปริมาณ 1 g ในสารละลายโครเมียม (VI) 20 mg/L ที่ปรับ pH แล้ว เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) เมื่อครบ 24 ชั่วโมง กรองเอาตัวดูดซับออก แล้วนำสารละลายไปตรวจหาปริมาณโครเมียม (VI) ที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอซอร์พชัน (Atomic Absorption Spectroscopy) แล้วคำนวณหาปริมาณดูดซับจำเพาะ (แสดงไว้ในภาคผนวก ค.)
- 5) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดูดซับจำเพาะ กับ pH

3.4.5 ศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลในการการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

- 1) นำเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ ที่ได้จากข้อ 3.4.2 มาอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) ปรับ pH สารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 20 mg/L ให้ได้ตามข้อมูลที่ได้จากข้อ 3.4.4
- 3) แช่เม็ดปิดคอมโพสิต ปริมาณ 1 g ในสารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 20 mg/L ที่ปรับ pH แล้ว เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยเก็บสารละลายทุกๆ 1 ชั่วโมง
- 4) นำสารละลายในข้อ 3 ไปตรวจหาปริมาณโครเมียม (VI) ที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องอะตอมมิก-แอซอร์พชัน (Atomic Absorption Spectrometer) แล้วคำนวณหาปริมาณดูดซับจำเพาะ (แสดงไว้ในภาคผนวก ค.)
- 5) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดูดซับจำเพาะกับเวลา

3.4.6 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI)

- 1) นำเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ ที่ได้จากข้อ 3.4.2 มาอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) ปรับ pH สารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 20 mg/L ให้ได้ตามข้อมูลที่ได้จากข้อ 3.4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) แชนด์เปิดคอมโพสิต ปริมาณ 1 กรัม ในสารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) 20 mg/L ที่ปรับ pH แล้ว เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 4) ทำซ้ำเหมือนกับข้อ 1 2 และ 3 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโครเมียม (VI) ให้เป็น 10 30 40 50 และ 60 mg/L
- 5) นำสารละลายในข้อ 4 ไปตรวจหาปริมาณโครเมียม (VI) ที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องอะตอมมิก แอปซอร์พชัน (Atomic Absorption Spectrometer) แล้วคำนวณหาปริมาณดูดซับจำเพาะ (แสดงไว้ในภาคผนวก ค.)
- 6) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดูดซับจำเพาะ กับความเข้มข้นสารละลายที่เหลือ ที่ สภาวะสมดุล

3.4.7 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

- 1) นำค่าการทดลองจากข้อ 3.4.6 มาสร้างกราฟตามทฤษฎีของแลงเมียร์และฟรุนดลิช เพื่อวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)



3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไคโตซานและเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ

การวิเคราะห์สมบัติและลักษณะของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ มีรายละเอียดเครื่องมือวิเคราะห์ดังนี้

1) เครื่องมือวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของไคโตซานด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR) [24]

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) โดยการวัดค่าดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ซึ่งจะปรากฏออกมาที่ความถี่ต่างกัน หรือใช้วิเคราะห์หาปริมาณสารทางคุณภาพ (Qualitative Analysis)

2) เครื่องมือวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS) [25]

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Metal Element) ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยจะอาศัยหลักการจากอะตอมอิสระของธาตุ ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งโดยเฉพาะ (Spectroscopic Line) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละธาตุ

3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [26]

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค มีความสามารถในการแยกชัด เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะศึกษาสัณฐานวิทยา เช่น ลักษณะรูปร่างลวดลายบนผิวตัวอย่าง ตลอดจนขนาดของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ สามารถศึกษาได้ทั้งตัวอย่างทางชีวภาพและวัสดุศาสตร์ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายการทดลอง

4.1 วิเคราะห์ลักษณะของโคโตซาน

4.1.1 การศึกษาร้อยละผลผลิตและค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation; %DD) ของโคโตซาน

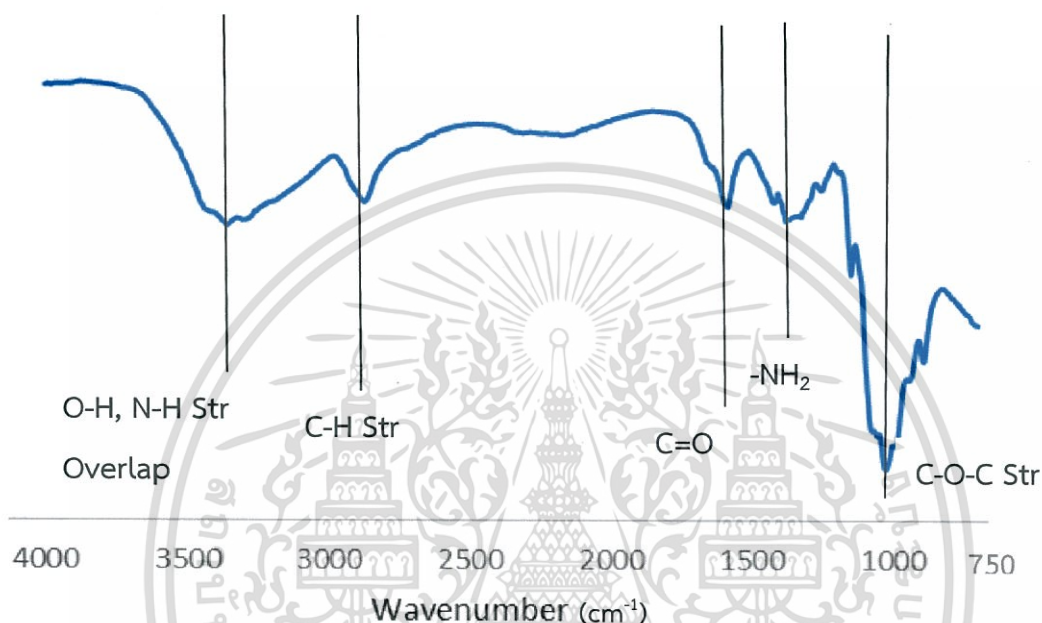
จากการทดลอง หลังจากนำเปลือกกุ้งอบแห้งมากำจัดแร่ธาตุ และโปรตีน จะได้โคตินออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่ามีร้อยละผลผลิต เท่ากับ 22.37 โดยมวล ในขั้นสุดท้ายหลังจากกำจัดหมู่อะซิทิล ในโคติน จะได้โคโตซานออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ พบว่ามีร้อยละผลผลิต เท่ากับ 14.91 โดยมวล และจากการหาร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation; %DD) ของโคโตซาน พบว่ามีค่าเท่ากับ 87.58%

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักเฉลี่ยโคตินและโคโตซานที่ได้จากการทดลอง

ตัวอย่าง (Sample)	น้ำหนักเฉลี่ย (g) (Average Weight)	SD (Standard Deviation)
เปลือกกุ้งอบแห้ง	20.1193	0.07
โคติน	4.5012	0.53
โคโตซาน	3.0011	0.45

4.1.2 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของโคโตซานที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้ง

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโคโตซานที่ได้จากการสังเคราะห์ สามารถวัดได้โดยวิธีวัดการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (ATR-FTIR) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างทางเคมีของโคโตซาน

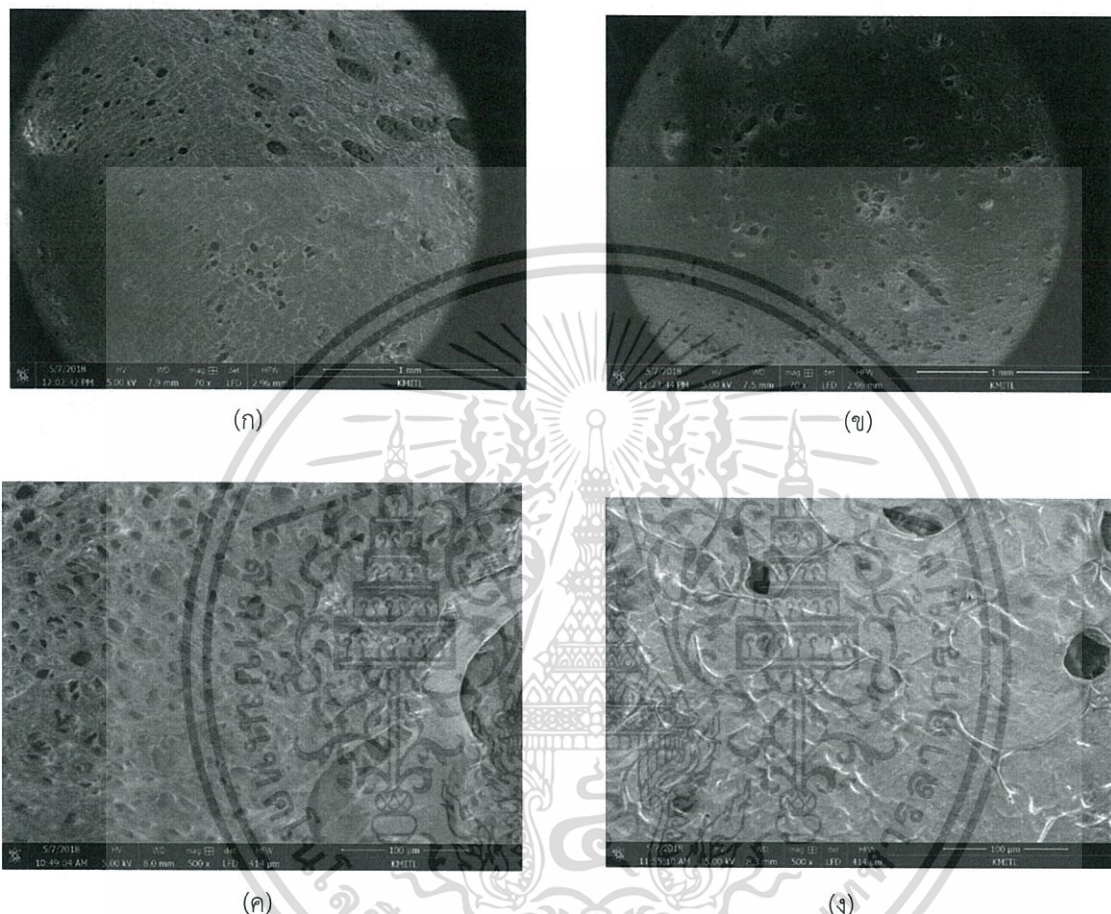


รูปที่ 4.1 กราฟ ATR-FTIR ของโคโตซานที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้ง

จากกราฟ ATR-FTIR ในรูปที่ 4.1 พบพีคที่บ่งบอกถึงหมู่อะมิโน (-NH₂) ในโครงสร้างโมเลกุลของโคโตซาน ซึ่งปรากฏที่ความยาวคลื่น 1381 cm⁻¹ เป็นพีคที่แสดงถึง N-H bending และพีคที่ความยาวคลื่น 3350 cm⁻¹ เป็นพีคที่แสดงถึง N-H stretching ส่วนพีคที่ 1010 cm⁻¹ เป็นพีคที่แสดงถึง -C-O-C stretching ของวง glucosamine ในโครงสร้างโมเลกุลของโคโตซาน อีกทั้งยังพบพีคที่แสดงถึง O-H stretching C=O stretching C-H stretching ที่ความยาวคลื่น 3294 cm⁻¹ 1654 cm⁻¹ และ 2873 cm⁻¹ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างทางเคมีของโคโตซานในรูปที่ 2.1 (ก) กับหมู่ฟังก์ชันของโคโตซานที่วิเคราะห์ได้จากกราฟ ATR-FTIR พบว่ามีความสอดคล้องกัน

4.1.3 การศึกษาพื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ

การวิเคราะห์พื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟเพื่อดูลักษณะของพื้นผิวก่อนการดูดซับ และหลังการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) สามารถวัดได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)



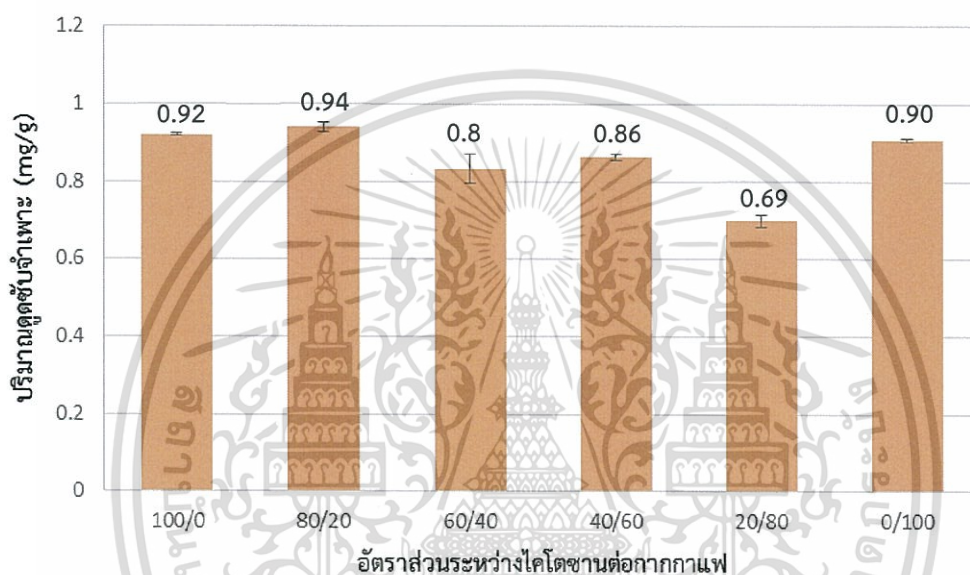
รูปที่ 4.2 ภาพ SEM ของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) (ก) และ (ข) ก่อนดูดซับและหลังดูดซับ ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 70 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ก่อนดูดซับและหลังดูดซับ ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพ SEM ในรูปที่ 4.2 และ พบว่าพื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ ก่อนการดูดซับมีลักษณะขรุขระ รูพรุน ส่วนหลังดูดซับจะมีลักษณะเรียบขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ

4.2 ผลการทดลองดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

4.2.1 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างไคโตซานกับกากกาแฟที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

จากผลการทดลองที่ทำการสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟที่อัตราส่วน 100/0 80/20 60/40 40/60 20/80 และ 0/100 โดยมวล ปริมาณ 1 g โดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) เท่ากับ 20 mg/L ปริมาตร 50 ml ระยะเวลาในการดูดซับ 12 ชั่วโมง ที่ pH 4

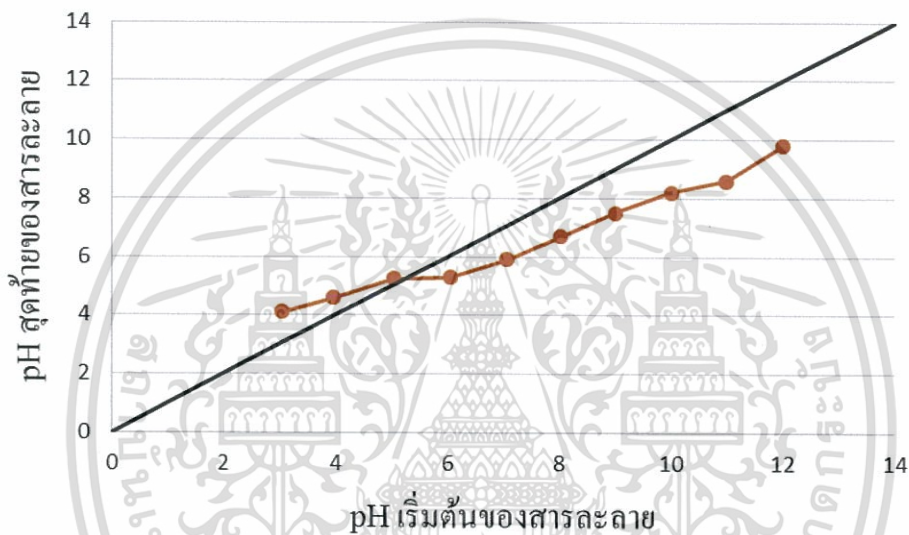


รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไคโตซานต่อกากกาแฟสำหรับการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

พบว่า ที่ 80/20 โดยมวล มีประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายโครเมียม (VI) ได้สูงสุดประมาณร้อยละ 94.05 เมื่อดูจากประสิทธิภาพการดูดซับของไคโตซาน เปรียบเทียบกับกากกาแฟ พบว่าไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) ที่ดีกว่ากากกาแฟ ดังนั้นถ้าเติมกากกาแฟในปริมาณมากเกินไป จะทำให้พื้นที่สำหรับการดูดซับของไคโตซานลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายโครเมียม (VI) ลดลงตาม

4.2.2 ศึกษาระดับค่าพีเอชที่ทำให้พื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพลีมีประจุเป็นศูนย์หรือเป็นกลางทางไฟฟ้า (pH_{PZC})

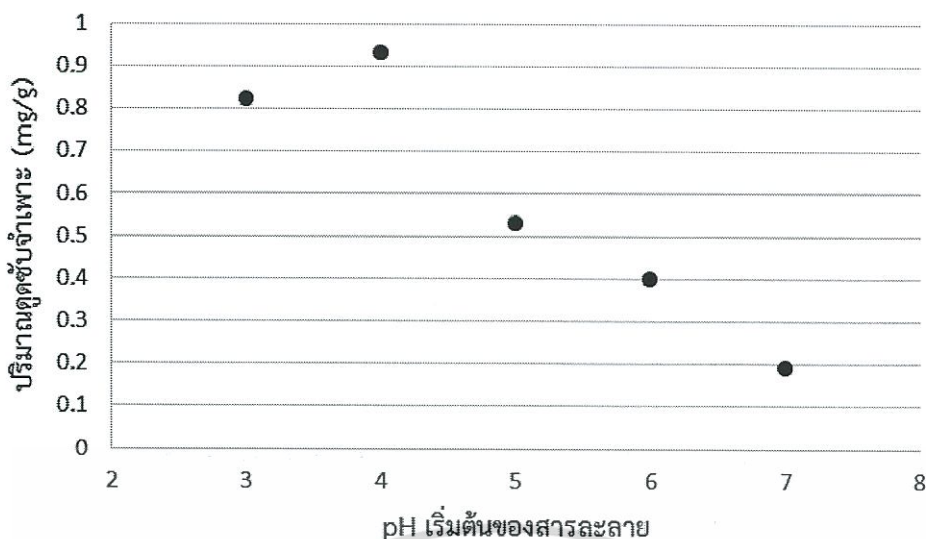
เมื่อนำเม็ดปิดคอมโพลีของโคโคซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) จำนวน 1 g มาหาค่า pH_{PZC} เพื่อให้รู้ถึงกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ พบว่ามีค่า pH_{PZC} เท่ากับ 5.3 ดังนั้น ถ้าสารละลายมี pH ต่ำกว่า 5.3 ตัวดูดซับจะกลายเป็นประจุบวก จะสามารถดูดซับได้ดีเมื่อสารละลายอยู่ในรูปประจุลบ ในทางตรงกันข้าม ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 5.3 ตัวดูดซับจะกลายเป็นประจุลบ จะสามารถดูดซับได้ดีเมื่อสารละลายอยู่ในรูปประจุบวก



รูปที่ 4.4 ผลของ pH ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

4.2.3 ศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

การศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของเม็ดปิดคอมโพลีของโคโคซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (VI) ในสารละลายเท่ากับ 20 mg/L ปริมาตร 50 ml ระยะเวลาในการดูดซับ 12 ชั่วโมง จากงานวิจัย เช่น Walaikorn Nitayaphat [18] ใช้ตัวดูดซับเป็นเม็ดปิดคอมโพลีโคโคซานกับกากกาแฟนำมาดูดซับสีย้อม ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นประจุลบ พบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 4 ถึง 7 และสามารถดูดซับได้ดีที่สุดที่ pH 4 Ruihua Huang,a และคณะ [27] ใช้ตัวดูดซับเป็นเม็ดปิดคอมโพลีโคโคซานกับถ่านกัมมันต์นำมาดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) พบว่าพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 2 ถึง 5 และสามารถดูดซับได้ดีที่สุดที่ pH 2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาที่ pH 3 ถึง

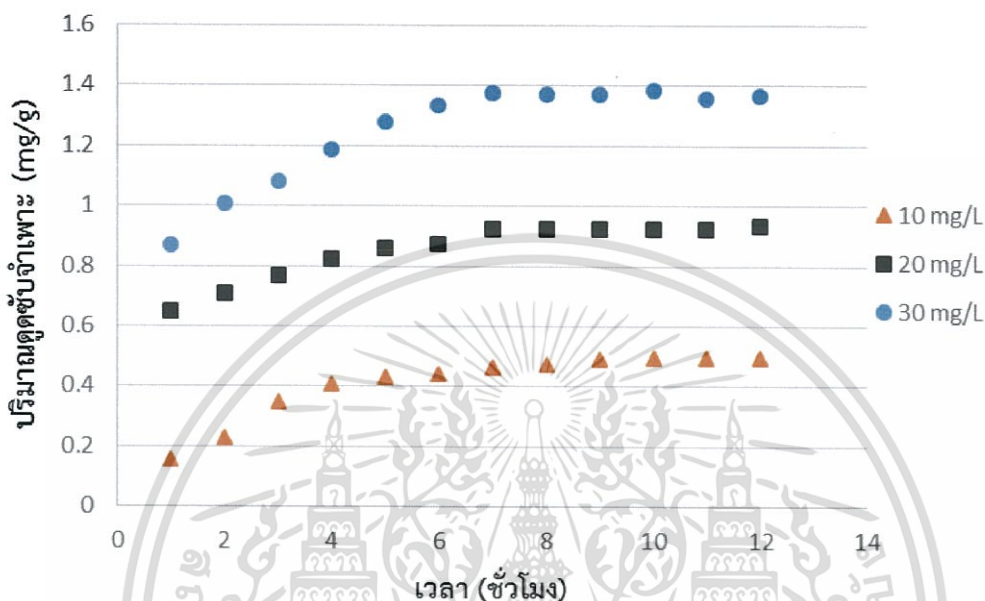


รูปที่ 4.5 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ที่ pH 4 มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (VI) ในสารละลายสูงสุด ร้อยละ 93.16 และประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายโครเมียม (VI) จะลดลง เมื่อ pH ของสารละลาย เพิ่มขึ้น เนื่องจาก pH ของสารละลายมีอิทธิพลต่อรูปแบบของโครเมียม (VI) ในสารละลาย รวมถึง ประจุที่ผิวของตัวดูดซับ จากรูปที่ 2.6 พบว่าที่ pH 4 ความเข้มข้นโครเมียม (VI) ในสารละลาย 20 mg/L โครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปของ HCrO_4^- และสารละลายมี pH ต่ำกว่า pH_{pzc} ($\text{pH}_{\text{pzc}} = 5.3$) ดังนั้นที่ผิวของตัวดูดซับจึงถูกโปรโตเนตกลายเป็นประจุบวก จึงมี Electrostatic Attraction เกิดขึ้น

4.2.4 ศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

การศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) เท่ากับ 10 20 และ 30 mg/L ปริมาตร 50 ml ที่ pH 4 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 1 ถึง 12 ชั่วโมง

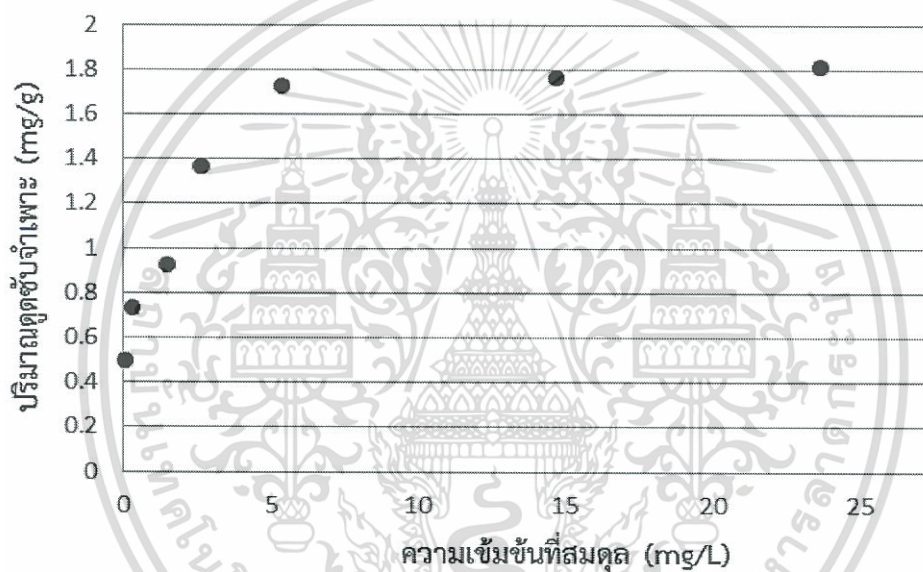


รูปที่ 4.6 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI)

จากรูปที่ 4.6 พบว่าในช่วงแรกความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (VI) จะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วจะเริ่มค่อยๆ ลดลงที่ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (VI) คงที่ (เข้าสู่สมดุล) ที่เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง เนื่องจากในช่วงแรกตัวดูดซับมีตำแหน่งว่างสำหรับดูดซับ (Adsorption Site) อยู่สูง แล้วจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป จนถึงจุดที่ไม่มีตำแหน่งว่างสำหรับการดูดซับ หรือเรียกว่า การดูดซับเข้าสู่สมดุล และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) จะส่งผลต่อแรงขับ (Driving Force) ของการดูดซับและส่งผลต่อพฤติกรรมของการดูดซับ คือเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) ระหว่างสารละลายกับพื้นที่สำหรับการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้เกิดการแพร่ (Diffusion) สูงขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นตาม ส่วนพฤติกรรมของการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์ม

4.2.5 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) ที่มีผลต่อปริมาณดูดซับจำเพาะ

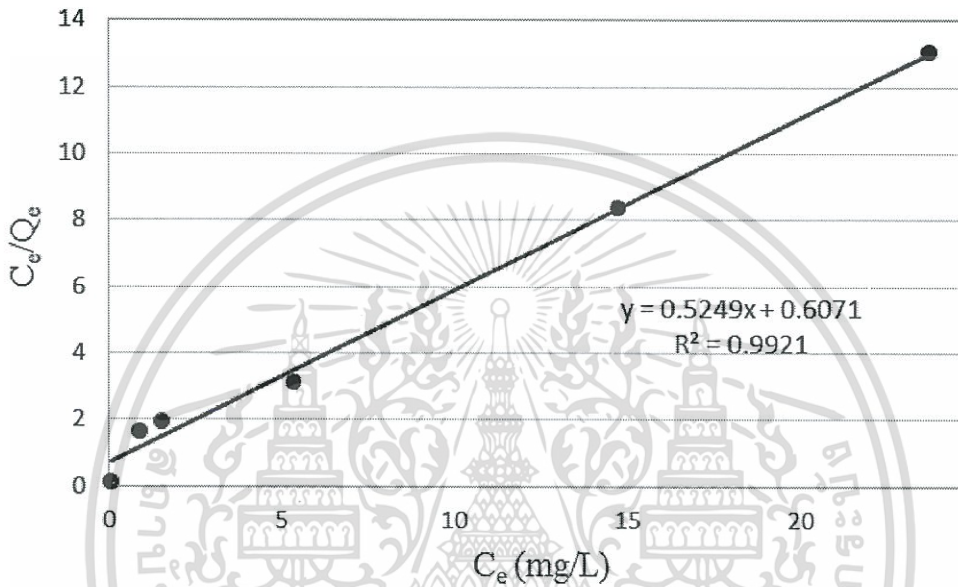
การศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับของเม็ดปิดคอมโพสิตเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) จำนวน 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (VI) ในสารละลายเท่ากับ 10 20 30 40 50 และ 60 mg/L ปริมาตร 50 ml ที่ pH 4 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 12 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (VI) ในสารละลาย ตัวดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (VI) ในสารละลายเท่ากับ 40 mg/L ปริมาณการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) เริ่มคงที่ เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัว



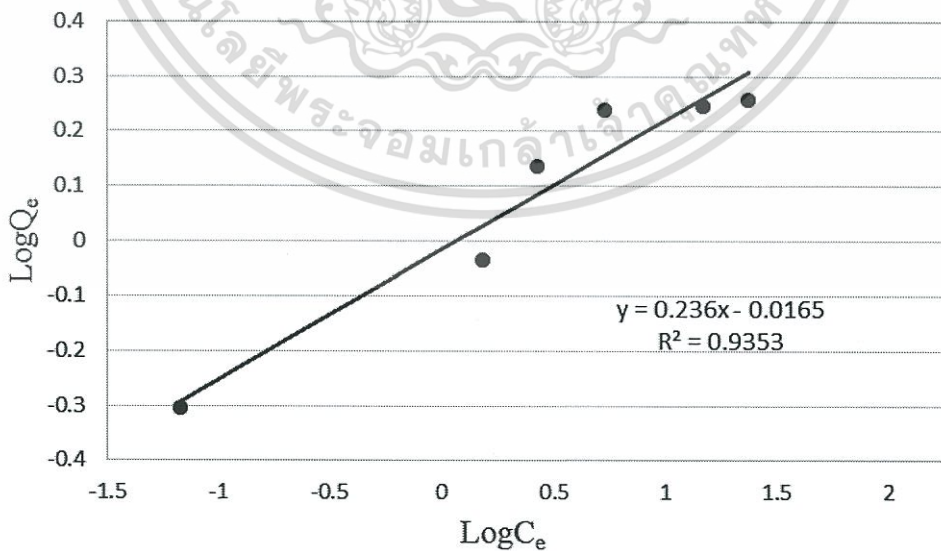
รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (VI) ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ

4.2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีความสำคัญต่อการใช้อธิบายลักษณะการดูดซับ นิยมใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์กับพรุนดลิสมาใช้อธิบาย โดยไอโซเทอร์มของแลงเมียร์เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุดซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว ส่วนไอโซเทอร์มของพรุนดลิสจะใช้สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/Q_e กับ C_e ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Q_e$ กับ $\log C_e$ ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพรุนดลิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง พบว่าการดูดซับของเม็ดบีดคอมโพสิตไคโตซานกับกากกาแฟมีลักษณะใกล้เคียงกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์กับฟรุนดลิช เมื่อพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่าง $1/Q_e$ และ $1/C_e$ ของสมการแลงเมียร์สามารถปริมาณดูดซับสูงสุด (Q_{max}) และค่าคงที่แลงเมียร์ (K_L) จากสมการเส้นตรง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Q_e$ และ $\log C_e$ ของสมการฟรุนดลิช สามารถหาค่าคงที่ฟรุนดลิช (K_F) และค่าคงที่ ($1/n$) จากสมการเส้นตรงแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ และ R^2 ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

ตัวดูดซับ	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
	K_L	Q_{max}	R^2	$1/n$	K_F	R^2
Chitosan/coffee 80/20	0.864	1.91	0.992	0.237	0.959	0.935

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 พบว่า สมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มีความสอดคล้องมากกว่าสมการของฟรุนดลิช ดังนั้นสามารถอธิบายแบบจำลองการดูดซับได้ตามสมมติฐานของแลงเมียร์ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) มีตำแหน่งการดูดซับบนตัวดูดซับที่แน่นอน ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ruihua Huang และคณะ [27] ใช้ตัวดูดซับเป็นเม็ดบีดคอมโพสิตไคโตซานกับถ่านกัมมันต์นำไปทดลองดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) ซึ่งถ่านกัมมันต์มีลักษณะพื้นผิวและปริมาตรรูพรุนคล้ายคลึงกับกากกาแฟ ผลการทดลองพบไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาและพัฒนาเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟเพื่อใช้ดูดซับโครเมียม (VI) ในสารละลาย ขั้นตอนแรกเป็นการสังเคราะห์ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง พบว่า ไคโตซานที่ได้มีร้อยละผลผลิต เท่ากับ 14.91 โดยมวล ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation; %DD) เท่ากับ 87.58% และเมื่อนำไปตรวจสอบองค์ประกอบด้านเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่าตำแหน่งการเกิดพีคของกราฟ ATR-FTIR สอดคล้องกับสูตรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน ขั้นตอนที่สองเป็นการสังเคราะห์เม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายโครเมียม (VI) พบว่า ที่อัตราส่วนไคโตซานต่อกากกาแฟ 80/20 โดยมวล มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด และเมื่อนำอัตราส่วนนี้มาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า ที่ pH 4 มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด เนื่องจาก ที่สภาวะนี้ pH ของสารละลายมีค่าน้อยกว่า pH_{pzc} ส่งผลให้ประจุที่พื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟมีสภาพเป็นบวก ส่วนสารละลายโครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปสารประกอบที่เป็นประจุลบ และ เม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟจะเข้าสู่สมดุลประมาณ 7 ชั่วโมง ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับทั้งแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์มและแบบจำลองฟรุนดลิชแต่สอดคล้องกับแบบจำลองแลงเมียร์มากกว่า และจากสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟแบบจำลองแลงเมียร์ พบว่า ปริมาณดูดซับสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1.91 mg/g เมื่อนำเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟก่อนและหลังดูดซับไปตรวจสอบพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟก่อนการดูดซับจะมีลักษณะมีรูพรุนค่อนข้างสูง แต่หลังการดูดซับจะพื้นผิวจะมีลักษณะเรียบมากขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ ดังนั้นการพัฒนาเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เพิ่มการดูดซับในสภาวะกรดของไคโตซาน และช่วยให้สามารถกำจัดกากกาแฟหลังจากการดูดซับได้ง่ายขึ้นเนื่องจากอยู่ในรูปแบบเม็ดปิดกับไคโตซาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาขนาดรูพรุนของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตะซานกับกากกาแฟ
- 2) ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่นๆ
- 3) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตะซานกับกากกาแฟ
- 4) ศึกษาความสามารถในการคายซับ (Desorption) ของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตะซานกับกากกาแฟ
- 5) ศึกษาความสามารถในการดูดซับกับน้ำเสียที่มาจากโรงงานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศศิพา ฉิมพลี¹, เบ็ญจมาศ ไพบูลย์กิจกุล², วิทวัส แจ่มเอี่ยม³ และ ชลี ไพบูลย์กิจกุล. 2017. “การกำจัดโครเมียม (VI) จากสารละลายในน้ำโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกทุเรียน.” หน้า332-334. ในการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ราชธานีวิชาการ ครั้งที่ 2. อุบลราชธานี
- [2] Marguerite Rinaudo, “Chitin and chitosan: Properties and applications,” *Process in polymer science*, vol.31, 2006, pp 603–604
- [3] Emanuele F. Lessa, Matheus L. Nunes, André R.Fajardo, “Chitosan/waste coffee-grounds composite: An efficient and eco-friendly adsorbent for removal of pharmaceutical contaminants from water,” *Carbohydrate Polymers*, Vol 189, 2018, pp 2-4
- [4] Marguerite Rinaudo, “Chitin and chitosan: Properties and applications,” *Process in polymer science*, Vol 31, 2006, pp 603-632
- [5] นายพัฒน์นันทน์ วงศ์วิวัฒน์, “การสกัดไคติน-ไคโตซานจากเปลือกหอย” (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545), หน้า 1-3
- [6] สุธีรา ชันทพันธ์* และสุธิดา อัครชนียากร. “การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของไคโตซานจากเปลือกกุ้งดิบและเปลือกกุ้งสุก และการใช้เป็นสารตกตะกอนน้ำแอมเปิล.” *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*. 2017(16) : 76-77
- [7] ภาวดี เมธะคานนท์, อิศรา เฟื่องฟูชาติ และก้องเกียรติ คงสุวรรณ. (2543) “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-ไคโตซาน.” MTEC เทคโนโลยีวัสดุ ฉบับที่ 19 (เมษายน-มิถุนายน): 69-75.
- [8] Sayan Kaewboonruang. (2016), “Comparative Studies on The Extraction of Chitin Chitosan From Golden Apple Snail Shells At The Control Field,” Faculty of Science Burapha University. Thailand
- [9] Mrinal Kanti Kabiraz Ismet Ara Jahan¹, Shah Md. Masum², Md. Monarul Islam¹, S. M. Mahmudul Hassan¹, Badhan Saha and Husna Purvin Nur, “Effective Removal of Chromium (VI) Ions from Tannery Effluent using Chitosan-Alumina Composite”, *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*, Vol 10, 2016, pp10
- [10] D. Pujola, C. Liua, J. Gominhoc, M.À. Olivellab, N. Fiola, I. Villaescusa*, H.Pereiraca,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“The chemical composition of exhausted coffee waste,” *Industrial Crops and Products*, Vol50, 2013, pp423– 427

- [11] Chang Liu. “Metal ions removal from polluted waters by sorption onto exhausted coffee waste.Application to metal finishing industries wastewater treatment,” PhD Program:Experimental Sciences and Sustainability. University of Girona, 2014, pp83-87
- [12] ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. 2554. “กระบวนการดูดซับสาร”. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [13] ศศิกร แสงพงษ์ชัย. “การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.
- [14] นิ่มนวล มานพ.”การดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดินสังเคราะห์บนเขม่า:เปรียบเทียบระหว่างเขม่าจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวมวล” (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552, 16-24
- [15] จิระฉัตร ศรีแสน, “ผลกระทบของโครเมียม และสารประกอบโครเมียมต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม,” วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ปีที่ 60 ฉบับที่ 189
- [16] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, “หลักการปฏิบัติเพื่อการป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีที่สะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขาขุบโลหะ” กรกฎาคม 2558
- [17] KhudbudinMulani, Siona Daniels, Kishor Rajdeo, Sanjeev Tambe, and Nayaku Chavan, “Adsorption of Chromium (VI) from Aqueous Solutions by Coffee Polyphenol-Formaldehyde/Acetaldehyde Resins,” *Journal of Polymers*, 2013, pp5
- [18] Walaikorn Nitayaphat, “Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye” *Materials Today*, Vol 4, 2017, pp6274-6282
- [19] George Z. Kyzas, “Commercial Coffee Wastes as Materials for Adsorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions,” *Materials*, Vol5, 2012, pp1826-1838
- [20] Suhaib S. Salih and Tushar K. Ghosh, “Preparation and characterization of bioadsorbent beads for chromium and zinc ions adsorption,” *Cogent Environmental Scienc*, Vol3, 2017, pp2-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] Shajahan Siraj, Md. Monarul Islam, Prokash Chandra Das, Shah Md. Masum, Ismet Ara Jahan, Md. Aminul Ahsan And Md. Shajahan, "Removal of Chromium From Tannery Effluent Using Chitosan-Charcoal Composite", *Journal of Bangladesh Chemical Society*, Vol. 25(1), 2012, pp53-61
- [22] Thipwimon KERD-IM, "Removal of heavy metals from waste water by adsorption on various forms of chitosan," *Environmental and hazardous waste management*, 2004, pp1
- [23] ยุพดี กุศลรัตน์กิตติวงศ์ อุษณีย์ รักษาไชยวรรณ และ โกวิทย์ ปิยะมังคลา. "จลนศาสตร์และกลไกการดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานดัดแปรเรซิน: ผลความเป็นกรด-เบสของสารละลาย" *วิศวกรรมสาร มก.* ปีที่ : 28 ฉบับที่ : 94 เลขหน้า : 63-72 ปีพ.ศ. : 2558
- [24] คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. "เครื่องมือวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของ เมมเบรนด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)". [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.sc.chula.ac.th/department/Chemical_Technology/Analytical_unit/FTIR.html. : (สืบค้นข้อมูลวันที่ 30 พฤศจิกายน 2560)
- [25] "อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (atomic absorption spectroscopy)" [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://glasswarechemical.com/tag/atomic-absorption/>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 30 พฤศจิกายน 2560)
- [26] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. "กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)". [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-enu/item/96-scanning-electron-microscope.html>. (สืบค้นข้อมูลวันที่: 30 พฤศจิกายน 2560)
- [27] Ruihua Huang, a Bingchao Yang, b Qian Liu, a and Yanping Liua, "Multifunctional Activated Carbon/Chitosan Composite Preparation and Its Simultaneous Adsorption of Phenol and Cr(VI) From Aqueous Solutions", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2013, pp5-7
- [28] Youling Yuan *, Betsy M. Chesnutt, Warren O. Haggard and Joel D. Bumgardner, "Deacetylation of Chitosan: Material Characterization and in vitro Evaluation via Albumin Adsorption and Pre-Osteoblastic Cell Cultures," *Materials*, Vol 4, 2011, pp1403

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

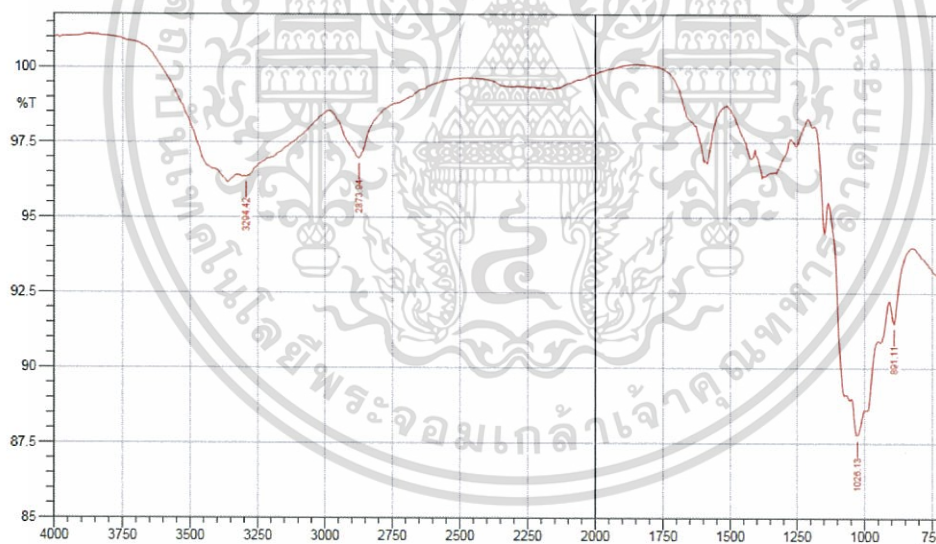
การวิเคราะห์ลักษณะโคโตซานและข้อมูลดิบ

ก.1 โคโตซาน

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักโคตินและโคโตซานที่ได้จากการทดลอง

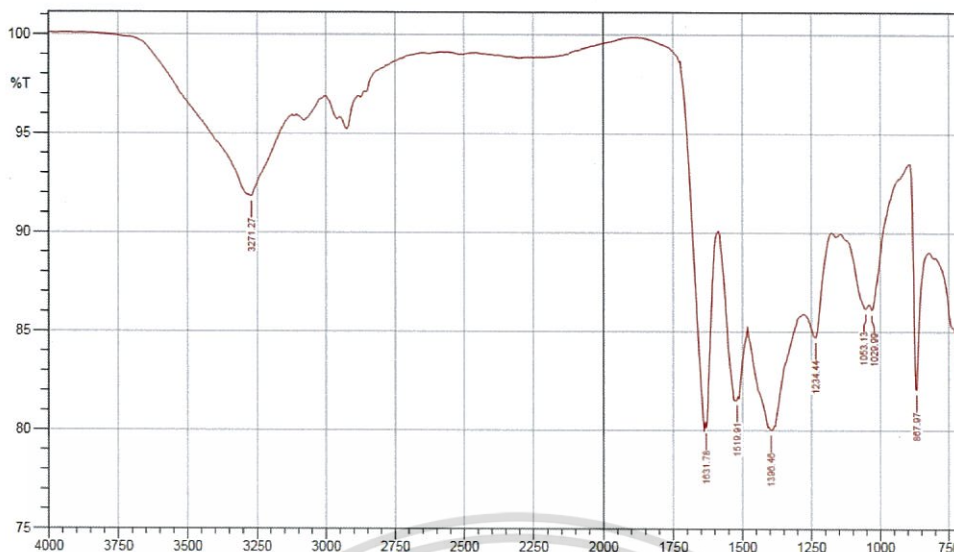
ตัวอย่าง	น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (g)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
เปลือกกุ้งที่อบแห้ง	20.0581	20.1942	20.1056
โคติน	4.6975	4.9034	4.1027
โคโตซาน	3.1348	3.3671	3.0015

ก.1 กราฟ ATR-FTIR



รูปที่ ก.1 กราฟ ATR-FTIR ของโคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 กราฟ ATR-FTIR ของเปลือกกุ้ง

ก.2 การวิเคราะห์ค่าระดับการกำจัดอะซิทิลเลชัน (Degree of Deacetylation, %DD) (ดำเนินการตามวิธี Acid-Base Titration) [28]

นำเกล็ดไคโตซานประมาณ 0.5 กรัม ใส่ขวดแก้วรูปกรวยขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร เต็มสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 mol/dm^3 ปริมาตร 30 cm^3 คนให้ละลายเข้ากัน ที่อุณหภูมิ 20 ± 0.2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หยดสารละลายเมทิลออ-เรนจ์ อินดิเคเตอร์ 2 ถึง 3 หยด แล้วไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 mol/dm^3 จนกระทั่งถึงจุดยุติ เมื่อสารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีเหลือง จากนั้นคำนวณหาระดับอะซิทิลเลชัน ได้จากสมการ ก.1

$$\%DD = \frac{A}{A + \frac{m - A}{203}} \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

$$A = \frac{(V_1 C_1) - (V_2 C_2)}{161} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก เป็น ml

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น ml

C_1 คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เป็น mol/dm^3 , M

C_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น mol/dm^3 , M

m คือ น้ำหนักเกล็ดไคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ในการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกจนถึงจุดยุติ ที่ได้จากการทดลอง

	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไทเทรต (cm ³)
ครั้งที่1	3.1
ครั้งที่2	2.8
ครั้งที่3	3.0

ตัวอย่างการคำนวณระดับดีอะซีทิลเลชัน โดยใช้เกลือโคโคซาน 0.5 g ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (C₁) เท่ากับ 0.1 M ปริมาตร (V₁) เท่ากับ 30 cm³ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (C₂) เท่ากับ 0.1 M ดังสมการที่ ก.2

$$A = \frac{(30 \times 0.1) - (2.9 \times 0.1)}{161} = 0.0168 \quad (\text{ก.2})$$

$$\%DD = \frac{0.0168}{0.0168 + \frac{0.5 - 0.0168}{203}} \times 100 = 87.58 \quad (\text{ก.1})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

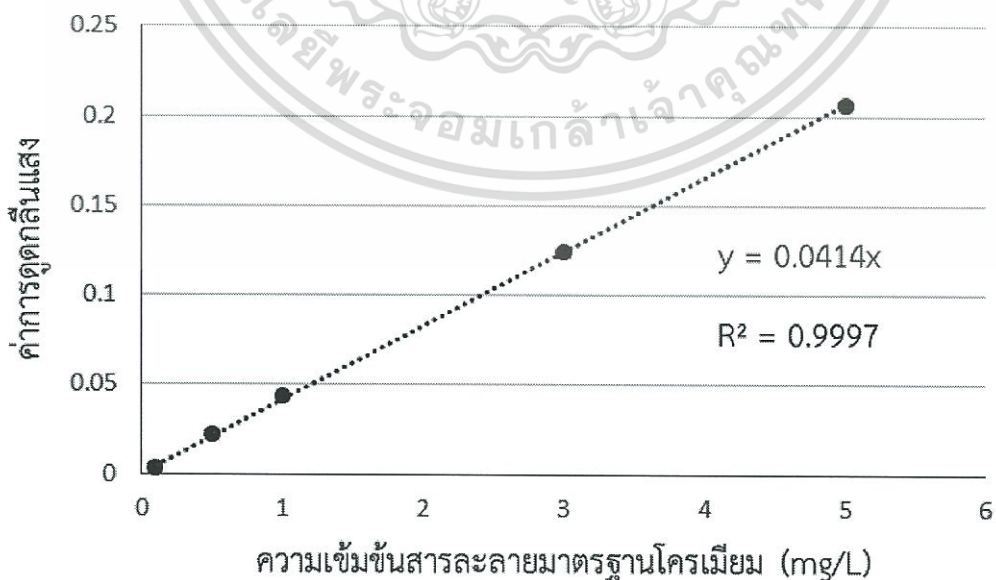
กราฟมาตรฐาน และการคำนวณการดูดซับ

ข.1 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสารละลายโครเมียม

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานโครเมียม

ความเข้มข้นสารละลายโครเมียม (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.1	0.0032
0.5	0.0226
1	0.0436
2	0.0849
3	0.1245
4	0.1679
5	0.2064

ใช้ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่ 0.1 0.5 1 3 และ 5 mg/L สร้างเป็นกราฟมาตรฐานโครเมียม ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานโครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุล

ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ข.1

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} V \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ Q_e คือ ปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/g)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุล (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

m คือ น้ำหนักของเม็ดปิดคอมโพลีเมอร์ของโคโตซานกับกากกาแฟ (g)

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับสารละลายโครเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ด้วยเม็ดปิดคอมโพลีเมอร์ของโคโตซานกับกากกาแฟอัตราส่วน 80/20 โดยมวล เวลา 12 ชั่วโมง น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0.99 g และปริมาตรของสารละลายโครเมียม (VI) เท่ากับ 0.050 L วัดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นได้เท่ากับ 20.526 mg/L เมื่อเวลาดูดซับผ่านไป 12 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายวัดได้เท่ากับ 1.534 mg/L จึงคำนวณปริมาณการดูดซับจำเพาะสารละลายโครเมียม (VI) ที่เวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง ดังสมการที่ ข.1

$$Q_e = \frac{(20.526 - 1.534)}{0.99} (0.050)$$

$$Q_e = 0.9484 \text{ mg/g}$$

ภาคผนวก ค.

ค.1 ข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมศึกษาที่อิทธิพลต่างๆ

ตารางที่ ค.1 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 20 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟที่อัตราส่วนต่างๆ เวลา 12 ชั่วโมง

อัตราส่วนระหว่าง ไคโตซานกับกาก กาแฟ (%โดยมวล)	น้ำหนักที่แท้จริงของ เม็ดปิดคอมโพสิตของ ไคโตซานกับกาก กาแฟ (g)	ความเข้มข้น ของสารละลาย โครเมียม (VI) ที่ เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของสารละลาย โครเมียม (VI) ที่เหลือ (mg/L)		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
100/0	1.01	20.46	1.811	1.682	1.809
80/20	0.98		1.368	1.472	1.382
60/40	0.99		2.809	2.72	2.754
40/60	1.02		2.825	2.79	2.801
20/80	0.98		5.37	5.228	5.381
0/100	1.00		1.636	1.644	1.639

ตารางที่ ค.2 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 20 mg/L ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g เวลา 12 ชั่วโมง

pH เริ่มต้นของ สารละลาย	น้ำหนักที่แท้จริงของ เม็ดปิดคอมโพสิตของ ไคโตซานกับกากกาแฟ (g)	ความเข้มข้นของ สารละลายโครเมียม ที่เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของ สารละลายโครเมียม ที่เหลือ (mg/L)
3	1.03	20.526	3.53
4	1.01		1.368
5	0.98		9.36
6	1.02		11.99
7	0.99		16.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 10 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วย เม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักที่แท้จริงของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (g)	ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เหลือ(mg/L)
1	0.98	10.27	6.86
2	1.03		5.45
3	1.01		3.06
4	0.98		1.852
5	1.02		1.33
6	0.99		1.169
7	1.01		0.7
8	1.00		0.503
9	0.98		0.124
10	1.02		0.113
11	1.00		0.067
12	1.01		0.066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 20 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วย เม็ดบีดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักที่แท้จริงของเม็ดบีดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (g)	ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เหลือ(mg/L)
1	0.98	20.163	7.03
2	1.03		5.88
3	1.01		4.64
4	0.98		3.56
5	1.02		2.82
6	0.99		2.49
7	1.01		1.54
8	1.00		1.49
9	0.98		1.52
10	1.02		1.51
11	1.00		1.515
12	1.01		1.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 30 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วย เม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักที่ซั่งจริงของเม็ดปิดคอมโพสิตของโคโตซานกับกากกาแฟ (g)	ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เหลือ (mg/L)
1	1.01	31.475	12.65
2	0.98		9.86
3	0.99		8.38
4	1.02		6.26
5	1.00		4.45
6	1.03		3.34
7	0.98		2.491
8	1.00		2.607
9	0.99		2.532
10	1.01		2.295
11	0.98		2.882
12	1.01		2.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 10 15 20 30 40 50 และ 60 mg/L pH 4 ที่ผ่านการดูดซับด้วยเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) ปริมาณ 1 g เวลา 12 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เริ่มต้น (mg/L)	น้ำหนักที่ซึ่งจริงของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (g)	ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่เหลือ (mg/L)
10	1.01	0.067
15	0.98	0.34
20	0.99	1.534
30	1.02	2.65
40	1.00	5.39
50	1.01	14.75
60	0.98	23.7

ตารางที่ ค.7 ค่า pH เริ่มต้นของสารละลายตั้งแต่ pH 3 ถึง 12 และ pH หลังจาก que ผ่านการดูดซับ

pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย
3.06	4.1
3.98	4.6
5.04	5.25
6.05	5.3
7.07	5.9
8.03	6.7
9	7.5
10.01	8.2
11.01	8.6
12	9.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3 ไอโซเทอมการดูดซับของเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (อัตราส่วน 80/20) เวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ ค.8 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่ความเข้มข้นสมมูลต่างๆ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ของสารละลายโครเมียม (VI) ที่ผ่านการดูดซับโดยเม็ดปิดคอมโพสิตของไคโตซานกับกากกาแฟ (ที่อัตราส่วน 80/20)

ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (mg/L)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/L)	ความเข้มข้นสมมูล (mg/L)
10	0.49665	0.067
15	0.733	0.34
20	0.9233	1.534
30	1.3675	2.65
40	1.7305	5.39
50	1.7625	14.75
60	1.815	23.7

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/Q_e$ และ $1/C_e$ ของสมการแลงเมียร์

ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (mg/L)	C_e/Q_e	C_e
10	0.1349	0.067
15	0.4638	0.34
20	1.6614	0.876
30	1.9378	1.534
40	3.1147	5.39
50	8.3688	14.75
60	13.0578	23.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Q_e$ และ $\log C_e$ ของสมการฟรุนดลิช

ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (mg/L)	$\log Q_e$	$\log C_e$
10	-0.3039	-1.1739
15	-0.1349	-0.4685
20	-0.0346	0.1858
30	0.1359	0.4232
40	0.2381	0.7315
50	0.2461	1.1688
60	0.2588	1.3747

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้