

การดูดซับไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกไข่ไก่
ADSORPTION OF NITRATE IN SYNTHETIC WASTEWATER
USING EGG SHELLS



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2566
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION OF NITRATE IN SYNTHETIC WASTEWATER
USING EGG SHELLS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIROMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2023
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การดูดซับไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกไข่ไก่

Adsorption of nitrate in synthetic wastewater using Egg shells

ชื่อนักศึกษา

นางสาวธิดา สมศักดิ์ รหัสนักศึกษา 63050326

นางสาวปาริชาติ มาลัย รหัสนักศึกษา 63050334

นางสาวอรุณิชา เกษศรีรัตน์ รหัสนักศึกษา 63050364

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2566

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.กฤษณัฐ สุวรรณรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2566

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการ	
ดร.กฤษณัฐ สุวรรณรัตน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกไข่ไก่		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธิดา สมศักดิ์	รหัสนักศึกษา	63050326
	นางสาวปาริชาติ มาลัย	รหัสนักศึกษา	63050334
	นางสาวอรุณิชา เกษศรีรัตน์	รหัสนักศึกษา	63050364
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2566		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่ไก่ โดยการนำเปลือกไข่ไก่ไปเผาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเปลือกไข่ไก่ที่เตรียมไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-ray diffractometer (XRD) และศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับไนเตรท ได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับ, ปริมาณในการดูดซับ, ความเป็นกรด-ต่าง (pH) ในการดูดซับ, ความเข้มข้นในการดูดซับ และศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ การศึกษาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับไนเตรท คือ ระยะเวลาในการดูดซับ 90 นาที, ปริมาณตัวดูดซับที่ 4 กรัม, ความเป็นกรด-ต่าง (pH) ที่ 2 และพีเอชปกติ และความเข้มข้นในการดูดซับที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับไนเตรทได้ 47.05 ± 0.82 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Freundlich) ซึ่งมีสมการเส้นตรง คือ $y = 1.3943x + 0.582$ มีค่าประสิทธิสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9927 และ การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับ สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม อธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมีตัวดูดซับจะเรียงตัวหลายชั้นบนพื้นผิว

คำสำคัญ : เปลือกไข่ไก่, ไนเตรท, การดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Adsorption of nitrate in synthetic wastewater using Egg shells
Students	Miss. Thirada Somsak Student ID 63050326 Miss. Parichat Marlai Student ID 63050334 Miss. Onnicha Ketsrirat Student ID 63050364
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2023
Advisor	Dr. Glinsukol Suwannarat

Abstract

This special project was studied the removal of Nitrate in synthetic wastewater with the absorbent material from the Egg shell. The absorbent were calcined at 90 degrees Celsius for 24 hours, then led the absorbent prepared to study the morphology with a Scanning Electron Microscopy (SEM) and analyze the crystal structure with X-ray diffraction-ray diffraction (XRD). The optimum conditions for nitrate adsorption were determined adsorption time, absorption amount, pH, adsorption concentration and reusing the adsorbent. The study of the optimum conditions for nitrate adsorption was 90 minutes adsorption time, 4 g for sorbent, pH ay 2 or narmal pH and adsorption concentration at 10 mg/L. The efficiency of adsorption was $47.05 \pm 0.82\%$. The results of isotherm are consistent with the Freundlich isotherm, whose linear equation is $y = 1.3943x + 0.582$, ($R^2 = 0.9927$). The results of kinetics was found to be consistent with the pseudo second order reaction equation. indicating that it is a chemical adsorption. The adsorbent is arranged in many layer. on the absorbent surface.

Keywords : Egg shell, Nitrate, Adsorption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ อาจารย์ประจำวิชาภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการโครงการพิเศษที่ได้ช่วยตรวจทานและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดลองและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ การเบิกจ่ายสารเคมี และได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการตรวจสอบผลึกโครงสร้างด้วย X-ray diffractometer (XRD) และการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

สุดท้ายนี้กลุ่มผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รุ่นพี่และเพื่อนๆ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำโครงการพิเศษตลอดระยะเวลาการดำเนินการ

ฉัตรดา สมศักดิ์

ปาริชาติ มาลัย

อรณิชา เกษศรีรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ไนเตรท	3
2.1.1. ประโยชน์ของไนเตรท	3
2.1.2. ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม	3
2.1.3. การกำจัดไนเตรท	4
2.1.4. การบำบัดไนเตรท	5
2.2 กระบวนการดูดซับ	5
2.2.1. ประเภทของการดูดซับ	6
2.2.2. กลไกการดูดซับ	6
2.2.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5. จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics).....	10
2.3 ไซโก่.....	12
2.3.1 องค์ประกอบของไซโก่.....	13
2.3.2 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนไซโก่.....	14
2.4 เปลือกไซ้	14
2.4.1. ประโยชน์ของเปลือกไซ้.....	15
2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต	16
2.5.1. ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต	16
2.5.1.1 ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.....	16
2.5.1.2 ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	17
2.6 แคลเซียมออกไซด์.....	17
2.7 วิธีวิเคราะห์ไนเตรท.....	17
2.7.1. วิธี Colorimetric.....	17
2.7.2 วิธี Specific ion electrodes	18
2.8 ไอออนซีเลคทีฟอิเล็กโทรด (Ion-selective electrode, ISE).....	18
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1. เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	22
3.1.1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.1.2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.1.3. การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกไซ้โก่.....	23
3.1.4. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์.....	23
3.1.5. การเตรียมมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานไนเตรท	23
3.1.6. การหาปริมาณไนเตรทด้วยไอออนซีเลคทีฟอิเล็กโทรด (ISE)	23
3.1.7. ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น หากท่านใดต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากข้าพเจ้าถือว่าผิดกฎหมายและจะดำเนินการฟ้องร้องดำเนินคดีตามกฎหมายต่อไป

3.1.8. ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	24
3.2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกไข่ไก่	24
3.2.1. การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม (Equilibrium Time)	24
3.2.2. การศึกษาผลของปริมาณของเปลือกไข่ไก่ที่เหมาะสม	25
3.2.3. ศึกษาผลของ pH ในการดูดซับที่เหมาะสม	25
3.2.4. การศึกษาความเข้มข้นของการดูดซับไนเตรท.....	26
3.2.5. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับไนเตรท	26
3.2.6. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรท	27
3.2.7. ศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	30
4.1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของเปลือกไข่ไก่	30
4.1.1. ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	30
4.1.2. ผลของโครงสร้างผลึกของวัสดุดูดซับ	31
4.2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกไข่ไก่	32
4.2.1. ผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม	32
4.2.2. ผลของปริมาณเปลือกไข่ไก่ในการดูดซับที่เหมาะสม	32
4.2.3. ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการดูดซับที่เหมาะสม	33
4.2.4. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นในการดูดซับที่เหมาะสม.....	34
4.2.5. ผลของการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับไนเตรท.....	34
4.2.6. ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรท.....	36
4.2.7. ผลของการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับไนเตรท.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	39

5.1 สรุปผลการวิจัย 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แต่งขึ้นสำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 39

เอกสารอ้างอิง..... 40

ภาคผนวก 42

ภาคผนวก ก..... 43

ภาคผนวก ข..... 48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟลูนดิช	35
4.2 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และอันดับสอง	36
ก-1 มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไนเตรทกับค่าศักย์ไฟฟ้า	42
ก-2.1 ผลของความเข้มข้นการดูดซับในระยะเวลาที่เหมาะสม	43
ก-2.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับในระยะเวลาที่เหมาะสม	43
ก-3.1 ผลความเข้มข้นในปริมาณการดูดซับที่เหมาะสม	44
ก-3.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับในปริมาณที่เหมาะสม	44
ก-4.1 ผลความเข้มข้นในความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม	44
ก-4.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับในปริมาณกรด-ด่างที่เหมาะสม	45
ก-5.1 ผลของความเข้มข้นในความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับที่เหมาะสม	45
ก-5.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับในความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม	46
ก-6.1 ผลของความเข้มข้นเปลือกไข่เทียบกับเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่	47
ก-6.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับเปลือกไข่ไก่เทียบกับเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่	47
ข-1.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	48
ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้ปริมาณเปลือกไข่ไก่ที่สัมผัส	48
ข-1.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัส	49
ข-2.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	49
ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้ปริมาณเปลือกไข่ไก่	49
ข-2.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ปริมาณเปลือกไข่ไก่	50
ข-3.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	50
ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเป็นกรด-ด่าง	51
ข-3.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเป็นกรด-ด่าง	51
ข-4.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab	52

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเข้มข้น	52
ข-4.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเข้มข้น.....	52
ข-5.1 ANOVA (One-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab.....	53
ข-5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้เปลือกไข่ไก่ และเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่.....	53
ข-5.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้เปลือกไข่ไก่ และเปลือกไข่ไก่ที่นำ.....	53
กลับมาใช้ใหม่	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Freundlich adsorption isotherm	8
2.2 Langmuir adsorption isotherm.....	9
2.3 ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ.....	10
2.4 เปลือกไขไก่.....	13
2.5 โครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	16
2.6 อุปกรณ์สำหรับหาปริมาณเรทด้วยไอออนซีเล็คทีฟอิเล็กโทรด รุ่น 781	19
4.1 ลักษณะของพื้นผิวของเปลือกไข่ไก่ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	30
4.2 ลักษณะของพื้นผิวของเปลือกไข่ไก่ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	31
4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของวัสดุดูดซับ	31
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท.....	32
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท	33
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท.....	33
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท.....	34
4.8 ไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทของเปลือกหอยแครงแบบแลงเมียร์ (ก) และแบบฟลูนดิช (ข)	35
4.9 ความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ก) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ข).....	36
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปลือกไข่ปกติ และเปลือกไข่นำกลับมาใช้ใหม่.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ISE	Ion-selective electrode
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mV	มิลลิโวลต์
pH	ความเป็นกรด-ด่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งด้านคุณภาพน้ำ คุณภาพอากาศและเสียง รวมทั้งปัญหาการกักของเสีย และสารอันตรายได้ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างรวดเร็วในหลายพื้นที่ จนมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิต และสุขภาพอนามัยของประชาชน น้ำหรือแหล่งน้ำมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็น มนุษย์ สัตว์ หรือ พืช เมื่อมีความเจริญเติบโตของสังคมจนเกิดเป็นชุมชนมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและพาณิชยกรรม ทำให้ธรรมชาติไม่สามารถปรับเปลี่ยนหมุนเวียนฟื้นตัวเองได้ทัน ปัญหาน้ำเน่าเสียในแหล่งน้ำจึงเกิดขึ้นและก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาของสิ่งมีชีวิตในลุ่มน้ำ รวมทั้งการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำนั้นๆด้วย ปัญหาการปนเปื้อนของไนเตรทจากแหล่งน้ำทิ้งและน้ำเสียจากอุตสาหกรรม อาจทำให้เกิดเป็นแหล่งมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้

วิธีการกำจัดไนเตรทสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์ ระบบเยื่อเมมเบรน (Membrane technology) การกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการร่วมของไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันไนตริ (ปริญญา, 2563) การกำจัดไนเตรท ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก (สุนีย์, 2561) และ วิธีการดูดซับ (Adsorption) เนื่องจากวิธีการดูดซับเป็นทางเลือกที่น่าจึงเลือกใช้วัสดุทางธรรมชาติที่ใช้ในการดูดซับคือ เปลือกไข่ไก่ ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายเพราะเปลือกไข่ไก่มีส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตถึง 95% อุตสาหกรรมไข่ไก่ของประเทศไทยในปี 2552-2556 พบว่า ประเทศไทยสามารถผลิตไข่ไก่ได้เฉลี่ย 11,916 ฟอง การบริโภคภายในประเทศ 11,680 ล้านฟอง และอัตราการบริโภค 181 ฟองต่อคนต่อปี ปริมาณการบริโภคไข่ไก่จึงเพิ่มขึ้น (กานดา, 2558) จึงเลือกใช้เปลือกไข่ไก่ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากวัสดุทางธรรมชาติในการดูดซับสารไนเตรทในน้ำเสีย

โครงการพิเศษจึงได้ศึกษาลักษณะเฉพาะและความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพของสารดูดซับเปลือกไข่ไก่สำหรับการกำจัดไนเตรทจากน้ำที่ปนเปื้อน โดยทำการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับ ระยะเวลาในการดูดซับ ความเป็นกรด-ด่าง และศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสามารถของเปลือกไข่ไก่ ในการดูดซับไนเตรท
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับด้วยเปลือกไข่ไก่
3. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ
4. เพื่อศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การเตรียมตัวดูดซับล้างเปลือกไข่ไก่ด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อทำความสะอาดและล้างวัตถุที่ไม่ใช่เปลือกไข่ไก่ออกจนหมดและระดับพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายต้องเป็นกลาง นำเปลือกไข่ไก่ไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จนแห้ง (ไม่มีความชื้น) และนำไปอบแห้งและบดด้วยเครื่องบดให้ละเอียดแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80-100 mesh เพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำไปอบในโถดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้น
- 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของในการดูดซับ ปริมาณสารดูดซับที่ 1, 2, 4, 8 และ 16 กรัม ศึกษาระยะเวลาในการดูดซับโดยแปรค่าที่ 30, 60, 90, 120 และ 240 นาที ศึกษาความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจากการทดลองโดยแปรที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 ศึกษาความเข้มข้นโดยแปรค่าที่ 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกำหนดความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที
- 3) ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของในการดูดซับ, ศึกษาระยะเวลาในการดูดซับ, ศึกษาความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจากการทดลอง โดยแปรค่าที่ 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกำหนดความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาที เพื่อนำมาสร้างสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich)
- 4) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ใช้ข้อมูลจากการศึกษาเวลาในการดูดซับ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order โดยใช้สมการ
- 5) ศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ตัวดูดซับจากการทดลองที่ 3.1-3.4 มาล้างด้วยน้ำกลั่น โดยปราศจากไอออน จนกว่าน้ำล้างสุดท้ายจะเป็นกลาง (pH 7) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (จนไม่มีความชื้น) ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณและประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการดูดซับที่นำกลับมาใช้ใหม่
- 6) วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับเปลือกไข่ไก่ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสามารถของเปลือกไข่ไก่ในการดูดซับไนเตรท
2. สามารถนำเปลือกไข่ไก่ที่เตรียมขึ้นไปใช้ในการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนของไนเตรทและสามารถพัฒนาไปใช้ในระดับครัวเรือน และระดับอุตสาหกรรม
3. ลดปริมาณขยะจากไข่ไก่และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่เปลือกไข่ไก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไนเตรท (NO_3^-)

ไนโตรเจนที่พบในแหล่งน้ำที่สำคัญมีอยู่ 2 รูป คือ ไนเตรท (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) ไนโตรเจนในรูปไนเตรทจัดว่ามีความสำคัญมากที่สุดในน้ำ มักพบในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำค่อนข้างต่ำ ไนเตรทเป็นสารอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำทั้งหลาย และสามารถตรวจพบในน้ำได้ในปริมาณที่สูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณการรับไนเตรทจากแหล่งต่างๆ แหล่งน้ำ โดยปกติระดับของไนโตรเจนที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติจะค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 1 ppm ของไนโตรเจนในรูปของไนเตรท) เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของเสียจากสัตว์และซากพืชซากสัตว์ที่ตายแล้ว ซึ่งพืชจะนำไปใช้ได้อย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำที่มีระดับไนโตรเจนค่อนข้างสูงอาจทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชันได้ ระดับไนโตรเจนอาจจะสูงขึ้นเนื่องจากผลตามธรรมชาติหรือเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การทิ้งขยะ หรือของเสียลงแม่น้ำ หรือสารเคมีจากภาคเกษตร รวมไปถึงของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ และหารเพราะเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นต้น

2.1.1. ประโยชน์ของไนเตรท (วิกิพีเดีย, 2564)

ประโยชน์ของไนเตรทมีหลายด้าน ได้แก่

- ไนเตรท เช่น โพแทสเซียมไนเตรทและแอมโมเนียมไนเตรท (ammonium nitrate) เป็นแหล่งสำคัญของไนโตรเจนในปุ๋ย
- ไนเตรทเป็นออกซิไดซิงเอเจนต์ที่ดี เมื่อผสมกับไฮโดรคาร์บอน หรือคาร์โบไฮเดรต ไนเตรทสามารถทำให้ส่วนผสมเกิดเปลวไฟหรือระเบิดได้ ตัวอย่าง เช่น โพแทสเซียมไนเตรทเป็นออกซิไดซิงในดินปืน
- สารเติมแต่ง (Food additives) สำหรับเนื้อสัตว์ และผลผลิต เพื่อให้สดและแดงสี (ให้เป็นสีแดงแทนสีน้ำตาล) และเพื่อการถนอมอาหาร โดยไนเตรทจะทำหน้าที่เป็นสารกันบูด หรือสารกันเสีย คือไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีจำพวกออกซิเดชันที่มีผลทำให้อาหารมีกลิ่น แปลกไปจากเดิม และป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารบูดเน่าเจริญเติบโต
- ในทางการแพทย์ไนเตรทอินทรีย์ เช่น ไนโตรกลีเซอริน (nitroglycerin) ไอโซซอร์ไบด์โมโนไนเตรท (ISMN) และ ไอโซซอร์ไบด์ไดไนเตรท (ISDN) ใช้ประโยชน์เฉพาะในการป้องกัน และรักษาอาการปวดเค้นหัวใจ (angina pectoris)

2.1.2. ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ไนโตรเจนเป็นกลุ่มสารอาหารอินทรีย์ และการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในสิ่งแวดล้อมตามวัฏจักรไนโตรเจนมีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม เพราะหากมีสารประกอบไนโตรเจนที่มากเกินไปที่ผิวหน้าดินของพื้นที่การเกษตร การระบายน้ำทิ้งจากแหล่งอาศัยในเมืองน้ำโสโครก และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อาจทำให้เกิดเป็นแหล่งมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ ปริมาณไนเตรทในแหล่งน้ำเกิดจากการเน่าเปื่อยของซากพืช

ซากสัตว์ มูลสัตว์ น้ำเน่า ปุ๋ย และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีจากเกษตรกรรม เมื่อแบคทีเรียกลุ่ม Nitrifying ย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจน จากน้ำเสียจากแหล่งต่างๆข้างต้น และสารประกอบโปรตีน เปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย (NH_3) จากนั้นเป็นไนไตรท์ (NO_2^-) และสุดท้ายไปเป็นไนเตรท (NO_3^-) ซึ่งสามารถละลายได้ดีในน้ำ จึงไหลซึมผ่านการกรองของชั้นดินลงสู่ใต้ดิน และสู่แหล่งน้ำบาดาลแต่บางส่วนพืชใช้เป็นอาหาร เนื่องจากไนเตรทเป็นสารอาหารของพืชและจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์ และปุ๋ยเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนไนเตรทในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจเพิ่มความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินมากขึ้นจนถึงปริมาณที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

(ไมตรี, 2551)

การมีปริมาณไนเตรทในน้ำบริโภคสูง เป็นสาเหตุให้เด็กทารกป่วยเกี่ยวกับเมธิโมโกลบินในเลือดได้ คือทำให้ทารกมีอาการตัวเขียว เนื่องจากไนเตรทไปทำให้ฮีโมโกลบินเป็นเมธิโมโกลบิน ซึ่งทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกายได้ ดังนั้นเพื่อการเฝ้าระวังคุณภาพของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะคุณภาพน้ำจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการหาปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN), แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$), ไนเตรท (NO_3^-) หรือ ไนเตรท-ไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), ไนไตรท์ (NO_2^-) หรือไนไตรท์-ไนโตรเจน ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) โดยมาตรฐานคุณภาพน้ำของประเทศ ไทยกำหนดให้น้ำบริโภคมีปริมาณไนเตรท (NO_3^-) ไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท มีไนเตรทในรูปของไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ไม่เกิน 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคมีไนเตรท (NO_3^-) ไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน กำหนดให้มีไนเตรทในรูปของไนเตรท-ไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ แอมโมเนียในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ไมตรี, 2551)

2.1.3. การกำจัดไนเตรท

โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดไนเตรท มักทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Denitrification process) เมื่อไนโตรเจนถูกเปลี่ยนรูปของไนเตรทแล้ว จะสามารถถูกลดรูป หรือถูกกำจัดออกจากระบบได้ทั้งสองทางคือ

- 1) วิธีแอสซิมิเลชัน (assimilation) โดยวิธีนี้ไนเตรทจะถูกดีไนตริฟายด์และลดรูปไปเป็นแอมโมเนียม ด้วยเอนไซม์ไนเตรทรีดักชันเทสหลายชนิด ก่อนที่จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสังเคราะห์ หรือสร้างเซลล์ (เป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลีอิก) ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า แอสซิมิเลชัน ขั้นตอนนี้จึงเรียกว่าดีไนตริฟิเคชันแบบแอสซิมิเลชัน ซึ่งมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีที่สอง หรือวิธีดีไนตริฟิเคชันแบบดิสซิมิเลชัน
- 2) วิธีดิสซิมิเลชัน (dissimilation) โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบนี้ จุลินทรีย์ดีไนตริฟายเออร์ เป็นได้ทั้งแบบ Heterotrophs และ Autotrophs เหมือนกับในขั้นตอนไนตริฟิเคชัน แต่ไม่เหมือนกันที่ภาวะนี้ต้องเป็นแบบแอนอกซิก (anoxic) คือมีไนเตรทแต่ไม่มีออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิสระ และกลับกันตรงที่ในขั้นตอนนี้ Heterotrophs มีบทบาทมากกว่า Autotrophs อย่างมาก จุลินทรีย์แบบ Heterotrophs ต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอน และใช้ในเนตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในธรรมชาติ โดยส่วนมากปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจนก็ต่อเมื่อมีเอนไซม์ทำการรวมกลุ่มกัน โดยลำดับแรกในเนตรทจะทำการเปลี่ยนรูปที่ละขั้นตอน โดยในเนตรททำการรับอิเล็กตรอนในแต่ละครั้ง จะทำการเปลี่ยนรูปให้กลายเป็นไนตรัสออกไซด์ และสุดท้ายเปลี่ยนรูปไปเป็นไนโตรเจน (Metcalf and Eddy, 2004)

- 3) การดูดซับ เช่น การใช้สารละลายหรือพีชน้ำในการดูดซับในเนตรทการใช้ถ่านกัมมันต์ (จริยา และนเรศ, 2548)

2.1.4. การบำบัดเนตรท

การบำบัดเนตรทที่สำคัญทั้งหมดมี 3 กระบวนการหลักๆ แบ่งออกได้ดังนี้ (กฤษณะ, 2557)

- 1) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ

กระบวนการบำบัดทางกายภาพที่พบเห็นโดยส่วนมาก ได้แก่ วิธีการบำบัดแบบ Reverse Osmosis และ Electrodialysis เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ววิธีการเหล่านี้ใช้กับกระบวนการผลิตน้ำดื่ม วิธีการประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณเนตรทที่ไม่มีกระบวนการสลายของไอออน และปริมาณของเนตรทที่มีการปนเปื้อนในน้ำ ดังนั้นข้อเสียเปรียบของวิธีนี้คือ จำเป็นต้องมีการสร้างระบบบำบัดอีกขั้นตอนเพิ่มเข้าไป เพื่อทำการควบคุมปริมาณไนโตรเจนที่เกิดขึ้น และสามารถกำจัดเนตรทได้

- 2) กระบวนการบำบัดทางเคมี

กระบวนการบำบัดทางเคมีโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่สารอื่น (Reducing agent) ที่ทำการถูกนำมาใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา พลังงานที่มีความจำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเกิดการรีดักชันของเนตรท เช่น พลังงานจากแสง (Photocatalysis) และพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อน (Electrocatalysis)

- 3) กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพที่พบเห็นโดยส่วนใหญ่ คือ กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความนิยมเป็นอย่างมาก วิธีการนี้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้แบคทีเรียเป็นหลัก ความหลากหลายของระบบถึงปฏิภรณ์มีการออกแบบรวมทั้งมีเงื่อนไขของการเดินระบบมีความน่าสนใจ วิธีนี้มีความสามารถใช้น้ำที่มีการปนเปื้อนจากสิ่งปฏิกูลต่างๆ โดยมีเงื่อนไขว่าเชื้อของแบคทีเรียเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ในทางตรงกันข้าม ข้อเสียที่เกิดขึ้นของระบบนี้คือ ปัญหาตะกอนจมตัวลำบาก และปัญหาการลอยตัวของตะกอน ซึ่งจะมีผลต่อการควบคุมระบบ เนื่องมาจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละชนิดนั้นที่เกิดขึ้นในระบบ

2.2 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) หมายถึง สารที่เคลื่อนย้ายจากตัวกลางหนึ่งไปสะสม หรือเกาะยังตัวดูดซับไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับ และตัวดูดซับเป็นบริเวณที่มีตัวถูกดูดซับมาเกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับ อาจเป็นชนิดของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ (มัลลิกา, 2556) ดังนั้น การดูดซับจึงเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เช่น เกาะบนพื้นผิวระหว่าง ของเหลวกับของแข็ง ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว การดูดซับสามารถเกิดได้ โดยกระบวนการทางกายภาพ และทางเคมี การดูดซับเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าจะเลือกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งกระบวนการดูดซับ สามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การดูดซับสารอินทรีย์ และ โลหะหนักในดิน หรือตะกอนดินในแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น ทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ ส่วนกระบวนการดูดซับที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำ และอากาศด้วยถ่านกัมมันต์ (อรพิน, 2550)

2.2.1. ประเภทของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากแรงและพันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับ สามารถแบ่งการดูดซับออกเป็น ประเภท ดังนี้ (ปรารธนา และปรินทร, 2551)

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรง van der Waals ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายพลังงานความร้อนน้อย คือ >20 กิโลจูลต่อโมล ส่งผลให้กระบวนการเกิดการผันกลับได้ จึงง่ายต่อการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวดูดซับ การดูดซับประเภทนี้เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) หรือหลายชั้น (multilayer)

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมเดิม และมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ พันธะเคมีนี้มีความแข็งแรง ส่งผลให้พลังงานความร้อนในการดูดซับมีค่าสูง คือ 50–400 กิโลจูลต่อโมล การกำจัดตัวถูกดูดซับที่เกาะสะสมบนผิวตัวดูดซับให้หลุดออกจึงทำได้ยาก เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น

2.2.2. กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (อรพิน, 2550)

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับไปถึงตัวดูดซับ โดยบนตัวดูดซับจะมีของเหลวห่อหุ้มพื้นผิว ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของของเหลวเข้าไปเกาะสะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal Pore Diffusion) การแพร่ภายในเป็นขั้นตอนของตัวถูกดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **ซับ** ที่เคลื่อนที่เข้าภายในตัวดูดซับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ปฏิกิริยาที่พื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาที่พื้นผิวเป็นขั้นตอนการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดอย่างรวดเร็วมากกว่าขั้นตอนการแพร่

2.2.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ตัวอย่างปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น (มัลลิกา, 2556; อรพิน, 2550)

- 1) พื้นผิว และโครงสร้างของรูพรุน ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลตัวดูดซับมากขึ้น และเมื่อพื้นผิวตัวดูดซับมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น
- 2) ขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับ ขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับที่มีขนาดเล็กจะถูกดูดซับได้เร็วกว่าตัวถูกดูดซับที่มีขนาดใหญ่
- 3) ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวของตัวดูดซับ หมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนผิวของโมเลกุลตัวดูดซับ เป็นสมบัติที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งก่อนกระตุ้นตัวดูดซับจะไม่มีขั้ว เมื่อกระตุ้นด้วยสารเคมี บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นมีขั้ว และดูดได้ทั้งสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว
- 4) ความสามารถในการละลาย ตัวถูกดูดซับที่สามารถละลายได้ดี จะทำให้ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับได้น้อยลง
- 5) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และโมเลกุลของตัวดูดซับที่มีโครงสร้างสายยาวหรือมวลสูงๆจะดูดซับได้ดี
- 6) ความมีขั้ว (Polarity) ของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เมื่อมีขั้วเพิ่มขึ้น หรือละลายน้ำได้ดี เพราะตัวถูกดูดซับที่มีขั้วหรือละลายน้ำได้ดี จะมีแรงยึดเหนี่ยวสูงระหว่างตัวถูกดูดซับกับน้ำ ทำให้ถูกดูดซับได้ยาก
- 7) ค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของตัวถูกดูดซับเป็นไอออน หรือมีอิทธิพลต่อการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับแตกต่างกัน
- 8) อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับ แพร่ผ่านเข้าไปในยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

2.2.4. ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับ คือ สมการที่อธิบายลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของตัวถูกดูดซับที่เกาะบนผิวตัวดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมใช้ในการอธิบาย ซึ่งอาศัยรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น Freundlich adsorption isotherm และ Langmuir adsorption isotherm ซึ่งมีความสำคัญสำหรับในการทำนายความสามารถในการดูดซับ (Amel, Hassena, & Kerroum, 2012; Baek *et al.*, 2010; Hazzaa & Hussien, 2015; Moubarak *et al.*, 2014)

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) Freundlich Adsorption Isotherm

ภายใต้สมมติฐานการดูดซับว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด เนื่องจากมีความแตกต่างกันของตำแหน่งกระบวนการดูดซับ โดยมีสมการดังนี้

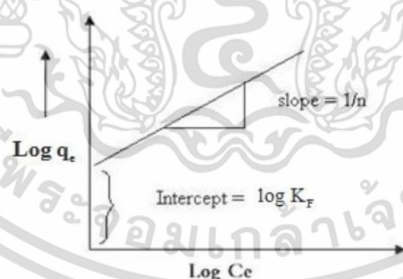
$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

โดยสมการที่ (2.1) สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$\log q_e = \log K_F + \left[\left(\frac{1}{n}\right) \log C_e\right] \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 - K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น
 - C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - n = ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)
 - $1/n$ = ปัจจัยที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity)

เมื่อ plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 2.1) ที่มีความชัน (slope) เป็น $1/n$ และมี intercept เป็น $\log K_F$



รูปที่ 2.1 Freundlich adsorption isotherm

ที่มา : ดัดแปลงจาก Xamplified (2009)

ถ้า $1/n = 1$ แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $1/n < 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยในทุกความเข้มข้น หรือมีพื้นที่ผิวจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $1/n > 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากในทุกความเข้มข้นหรือมีพื้นที่ผิวมากในการดูดซับ

อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) Langmuir Adsorption Isotherm

Langmuir adsorption isotherm เป็นสมการที่ใช้อธิบายเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด จึงทำให้มีกลไกการดูดซับที่เหมือนกัน คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีพื้นที่ผิวจำกัด เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะเกาะติดบนพื้นผิวตัวดูดซับไม่เคลื่อนย้ายไปตำแหน่งอื่น Langmuir adsorption isotherm อธิบายด้วยสมการ ดังนี้

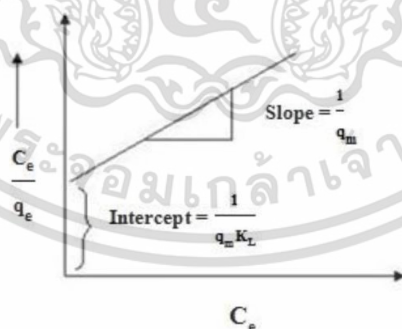
$$q_e = \frac{q_m k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (2.3)$$

โดยสมการที่ (2.3) สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m k_L} + \frac{1}{q_m} (C_e) \quad (2.4)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 q_e = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_m = ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 K_L = ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 2.2) ที่มีความชันเป็น $1/q_m$ และมีค่า intercept เป็น $1/q_m K_L$



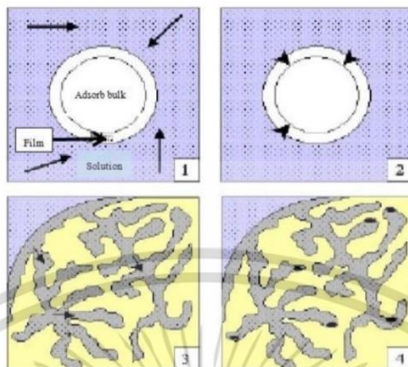
รูปที่ 2.2 Langmuir adsorption isotherm

ที่มา : ดัดแปลงจาก Xamplified (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5. จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับ เป็นกระบวนการดูดซับสารต่างๆ จากสารละลาย ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (สราวุธ, 2550)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการดูดซับของตัวดูดซับ

ที่มา : สราวุธ (2550)

- 1) ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion) ซึ่งปกติจะเกิดอย่างรวดเร็ว โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนย้ายเข้าสู่บริเวณตัวดูดซับ (boundary layer) และการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับแบบนี้ เรียกว่า bulk solution transport
- 2) ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบาง (Film Diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุล ซึ่งเวลาและระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ขึ้นกับชนิดของสารละลายที่ไหลผ่านตัวดูดซับ หรือขึ้นกับการปั่นป่วน และชั้นฟิล์มจะมีความหนาหรือบาง ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และความปั่นป่วน โดยชั้นฟิล์มจะมีความหนาลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น และมีการปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้ดีขึ้น
- 3) ขั้นตอนการแพร่ผ่านช่องว่างภายในตัวดูดซับ (Pore Diffusion) หลังจากผ่านขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบางแล้ว ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (intraparticle transport) ซึ่งอาจเกิดจากการแพร่ภายในรูพรุน หรือการแพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับ
- 4) ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption) หลังจากผ่านขั้นตอนทั้งหมดกระบวนการดูดซับจะสร้างพันธะขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งหากเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ขั้นตอนนี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นช้ากว่า ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดกระบวนการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่นิยมใช้ในการศึกษามี 2 สมการดังนี้ (Ho, 2004; Ho & McKay, 2000; Qiu *et al.*, 2009; สราวุธ, 2550)

(1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง (Pseudo First Order) Lagergren แสดงถึงสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง ซึ่งอธิบายถึงกระบวนการจลนพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับ (ของแข็ง) และสารละลาย (ของเหลว) โดยสามารถคำนวณจากสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง ดังนี้

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

เมื่อ k_1 = ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)
 Q_t = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ(นาที)

เมื่อ integrate สมการ (2.5) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $Q_t = q_t$ ได้สมการ ดังนี้

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

สมการ (2.6) สามารถจัดรูปเป็นสมการเชิงเส้นได้ ดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.7)$$

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟที่มีความชันเป็น $-k_1$ และ intercept เป็น $\log q_e$

(2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง (Pseudo Second Order) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สอง Ho (2004) ได้กล่าวว่า จลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดจากกระบวนการดูดซับทางเคมีเกี่ยวกับแรงที่แบ่งปันหรือแรงเปลี่ยนกันของอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับที่สองคำนวณจากสมการ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_2 - q_t)^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ k_2 = ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)
 Q_t = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อ integrate สมการ (2.8) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ ได้สมการ ดังนี้

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_t} - k_2 t \quad (2.9)$$

สมการ (2.9) สามารถจัดรูปเป็นสมการเชิงเส้นได้ ดังนี้

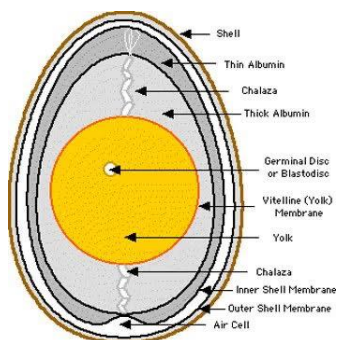
$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.10)$$

เมื่อ plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q_t}$ กับ t จะได้กราฟที่มีความชันเป็น $\frac{1}{q_e}$ และ intercept เป็น $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

2.3 ไข่ไก่

เปลือกไข่ไก่เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่ทำได้ง่ายภายในประเทศ และยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง เปลือกไข่ไก่เป็นเซรามิกคอมโพสิตทางชีวภาพ (biocomposite ceramic) โครงสร้างของเปลือกไข่ไก่มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ผลึกแคลไซต์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) และสารอินทรีย์ในปริมาณเล็กน้อยด้านในของเปลือกไข่ประกอบด้วยชั้นเมมเบรน (shell membrane) ซึ่งเป็นสารจำพวกโปรตีนสองชั้น คือ เมมเบรนชั้นนอก (outer shell membrane) และเมมเบรนชั้นใน (inner shell membrane) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ดร.ยุพาพร และดร.นิธินาถ, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบต่างๆของไข่ไก่

ที่มา : <https://www.scimath.org>

นอกจากนี้ไข่ (egg) เป็นอาหารที่มีค่าทางโภชนาการสูงมาก เป็นแหล่งของโปรตีนที่มีคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากโปรตีนไข่มีกรดอะมิโนชนิดที่จำเป็นต่อร่างกายของมนุษย์ครบถ้วน ทั้งชนิดและปริมาณ เป็นอาหารที่มีสมบูรณ์ที่สุด ราคาถูก เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ซึ่งให้ปริมาณโปรตีนทัดเทียมกันไข่สามารถบริโภคในชีวิตประจำวันได้หลายรูปแบบ และยังเป็นวัตถุดิบสำหรับการแปรรูปอาหาร และนำไปทำการถนอมอาหารเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย เช่น ไข่เค็ม ไข่เยี่ยวม้า ไข่ผง และใช้เป็นส่วนผสม ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ (bakery) ขนมไทยหลายชนิด

อุตสาหกรรมไข่ไก่ของประเทศไทยในปี 2552-2556 พบว่า ประเทศไทยสามารถผลิตไข่ไก่ได้เฉลี่ย 11,916 ฟอง การส่งออกไข่ไก่ 237 ล้านฟอง การนำเข้าไข่ไก่ 1.16 ล้านฟอง การบริโภคภายในประเทศ 11,680 ล้านฟอง และอัตราการบริโภค 181 ฟองต่อคนต่อปี ปริมาณการบริโภคไข่ไก่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากผู้บริโภคไข่ไก่มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณประโยชน์ของไข่ไก่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับไข่ไก่เป็นสินค้าที่ราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับสินค้าปศุสัตว์ชนิดอื่น ไข่ไก่เป็นอาหารที่สามารถนำมาประกอบเป็นอาหารได้หลายชนิด และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากไข่ไก่มีสารอาหารหลายชนิด ได้แก่ ไข่ขาวมีโปรตีนสูง มีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย ไข่แดงมีสารที่เป็นประโยชน์ เช่น ลูทีน ในไข่แดง 1 ฟอง มีลูทีน 186 ไมโครกรัม (กานดา, 2558)

2.3.1 องค์ประกอบของไข่ไก่

1) ช่องอากาศ (Air Cell) คือ พื้นที่ว่างระหว่างไข่ขาวกับเปลือก ซึ่งปรากฏอยู่ที่ปลายด้านป้านของไข่ เมื่อแม่ไก่ออกไข่มาใหม่ๆ ไข่จะมีความร้อน เมื่อมันเย็นลงจึงทำให้เกิดช่องอากาศขึ้น ช่องอากาศนี้จะเป็นตัวบ่งบอกอายุไข่ เพราะเมื่อไข่มีอายุมากขึ้น ความชื้น และคาร์บอนไดออกไซด์จะระเหยออกตามรูพรุนของเปลือกไข่ ทำให้มีอากาศเข้าไปแทนที่ ทำให้ช่องอากาศกว้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ไข่ขาว (Albumen) มีลักษณะเป็นวุ้นสีขาวขุ่นรอบไข่แดง เป็นของเหลวหลักของเนื้อไข่ (ประมาณ 67%) ในไข่ขาวมีองค์ประกอบเป็นโปรตีนมากกว่าครึ่งของโปรตีนรวมในไข่ มีโนอะซิน ไโรโบฟลาวิน โคลีน แมกนีเซียม โปแตสเซียม โซเดียม และซัลเฟอร์ ลักษณะของไข่ขาวก็สามารถบอกอายุไข่ได้เช่นเดียวกัน เพราะเมื่อไข่มีอายุมากขึ้น โปรตีนในไข่ขาวเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้เนื้อไข่ขาวเหลวขึ้น จึงทำให้ไข่แดงแบนราบลงด้วยเพราะไข่ขาวไม่สามารถโอบอุ้มไว้ได้

3) ไข่แดง (Yolk) เป็นส่วนที่เป็นสีเหลืองในไข่ ในไข่แดงประกอบไปด้วยวิตามินที่ละลายในไขมัน ได้แก่ เอ ดี และ อี รวมทั้ง โคลีน ลูทีน และซีแซนทีน ส่วนแร่ธาตุที่พบมากในไข่แดง ได้แก่ ฟอสฟอรัส เหล็ก และโพแทสเซียม

4) จุดเลือด หรือจุดเนื้อ (Blood Spots) บางครั้งก็สามารถพบได้ในไข่แดง คนส่วนใหญ่เข้าใจผิดว่าเป็นไข่ที่ได้รับการผสมแล้ว แต่มันเกิดอุบัติเหตุจากการที่เส้นเลือดที่ผิวไข่แดงแยกออกจากกันในกระบวนการสร้างไข่ หรือมีเลือดออกที่ผนังรังไข่ก็เป็นได้ แต่จะมีไข่ไม่ถึง 1% ที่มีจุดเลือดดังกล่าว

5) เยื่อหุ้มไข่ มีอยู่ด้วยกัน 2 ชั้น ชั้นนอกที่ติดเปลือก มีชื่อเรียกว่า shell membrane ชั้นในที่ติดกับไข่ขาว เรียกว่า egg membrane เยื่อชั้นนอก และชั้นในจะชิดกันตลอด แต่แยกกันที่ด้านป้านของไข่ ซึ่งมีโพรงอากาศ (www.nininitnitpha.wordpress.com)

2.3.2 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนไข่ไก่

โปรตีนในไข่ขาว และไข่แดง มีสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties of protein) ในอาหารต่างกัน คือ โปรตีนในไข่ขาวมีหน้าที่ทำให้เกิดฟอง ขณะที่โปรตีนในไข่แดงให้สมบัติการเกิดอิมัลชัน สมบัติเชิงหน้าที่ของการเกิดโฟม (foaming agent) โปรตีนไข่ขาว มีบทบาทสำคัญในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ (bakery) การตีไข่ขาว ทำให้โปรตีนไข่ขาวสูญเสียสภาพธรรมชาติ (protein denaturation) เพราะแรงกลทำให้โปรตีนคลายตัว และกักอากาศไว้ภายใน มีลักษณะเป็นโฟม โปร่งฟู ไข่ขาวใสได้ปริมาณมากกว่าไข่ขาวข้น การผสมครีมออฟทาร์ทาร์ (Cream of Tartar) จะช่วยให้โฟมไข่ที่ขึ้นฟูอยู่ตัวและมีปริมาณมากขึ้น (วิกิพีเดีย, 2565)

2.4 เปลือกไข่

เปลือกไข่ (shell) มีสีน้ำตาล หรือสีขาว ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์แม่ไก่ สีไข่ไม่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของไข่ เช่น ไข่ไก่พันธุ์เล็กฮอร์นมีเปลือกสีขาว ส่วนไข่ไก่พันธุ์โรดไอส์แลนด์มีเปลือกสีน้ำตาล ส่วนประกอบสำคัญของเปลือกไข่ คือ คอลลาเจน (collagen) สานเป็นตัวตาข่าย และมีหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต) ทำให้เปลือกแข็ง เปลือกไข่จะมีรูขนาดเล็กมาก มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น เมื่อไข่ออกจากแม่ไก่มาใหม่ จะมีเมือกเคลือบที่ผิวของเปลือกไข่ เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศ และน้ำผ่านเข้าไปได้ เปลือกไข่ในช่วงแรกจึงมีลักษณะเป็นนวล เมื่อเก็บไว้นานๆ เมือกเหล่านี้จะแห้งไป อากาศ และความชื้นสามารถแทรกผ่านรูเล็กๆที่ไข่

เปลือกไข่ได้ ทำให้ไข่จะเสื่อมคุณภาพ การเปลี่ยนแปลงของไข่ขาว และการเปลี่ยนของกลี้นรสตลอดเวลา เนื่องจากการสูญเสีย น้ำ การสูญเสียก๊าซ เปลือกไข่มีการป้องกันการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ เมื่อไม่มีเปลือกไข่ จะเกิดการเสื่อมเสียอย่างรวดเร็ว จึงมักเก็บไข่ทั้งเปลือก การเก็บไข่ไว้ในที่มีอากาศแห้ง ไข่อาจดูดเอากลิ่นสิ่งที่เหม็นที่อยู่รอบๆเข้าไปที่รูของเปลือก (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ และดร.นิธิยา, 2556)

2.4.1. ประโยชน์ของเปลือกไข่

1) เพิ่มสารอาหารให้แก่ต้นไม้ เปลือกไข่ไก่ที่ไข่แล้วมีประโยชน์กับต้นไม้ เปลี่ยนจากการทิ้งลงถังขยะ มาเป็นการเก็บ และนำไปแปรรูปทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่จะช่วยบำรุงต้นไม้ ในเปลือกไข่นั้นอุดมไปด้วยแร่ธาตุแคลเซียมที่เป็นประโยชน์กับต้นไม้ และเมื่อนำไปผ่านความร้อนก็จะทำให้เกิดกัมมะถันที่เป็นตัวช่วยไล่แมลงที่มารบกวนกัดกินต้นไม้ แคลเซียมเป็นธาตุรองที่มีความจำเป็นสำหรับพืช นำไปใช้เพื่อการสร้างการเจริญเติบโตในพืช มีหน้าที่เกี่ยวกับโครงสร้างของผลไม้ช่วยเสริมสร้างเซลล์ และการแบ่งเซลล์ของพืช ซึ่งพืชต้องการอย่างต่อเนื่อง และยังช่วยส่งเสริมการนำไนโตรเจนมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากขึ้นในระยะออกดอก และระยะที่สร้างเมล็ดพืชจะมีความจำเป็นมาก เพราะธาตุแคลเซียมจะมีส่วนในการเคลื่อนย้าย และเก็บรักษาคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนในพืช เพื่อนำไปใช้ในการสร้างผล และเมล็ดต่อไป (www.mini3garden.com)

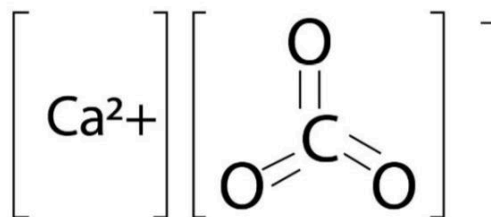
2) นวัตกรรมวัสดุหินเทียมจากเปลือกไข่เหลือทิ้ง เป็นการนำเปลือกไข่มาผสมผสาน เพื่อผลิตเป็นหินเทียมคุณภาพสูงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม แข็งแรงทนทาน ปรับสีได้หลากหลาย สามารถใช้เครื่องมือช่างทั่วไปในการตัดและประกอบชิ้นงาน สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ตามต้องการ สามารถทำเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น วัสดุกรุผนัง กระเบื้อง โมเสค และหินสังเคราะห์รูปทรงต่างๆ สำหรับงานภายในอาคาร (รศ.ดร.สิงห์, 2560)

3) การนำเปลือกไข่ไปใช้ดูดฟอสฟอรัสไฮโดรเจนจากเฟอริเจอร์ ทั้งนี้ลักษณะของตัวดูดซับจากเปลือกไข่ เป็นการนำเปลือกไข่ไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของเปลือกไข่ เพื่อได้เป็นตัวดูดซับ (ดร.เชาวนา, 2565)

4) ผลิตภัณฑ์เยื่อเปลือกไข่ไฮโดรไลเซต เป็นผลิตภัณฑ์จากเปลือกไข่ ซึ่งสามารถนำไปใช้อุตสาหกรรมอาหาร เสริมลดอาการปวดข้อกระดูก และเครื่องสำอาง เนื่องจากมีความสามารถในการกระตุ้นการสร้างคอลลาเจนในเซลล์ผิวหนังของมนุษย์ได้ (ดร.อติกร, 2564)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต

ที่มา : www.disthai.com/17261778

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอนินทรีย์สารที่เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ มีสมบัติเฉพา ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียรทางเคมี จึงนิยมนำไปใช้เป็นวัตถุเติมพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นตัวเติม (filter) ในอุตสาหกรรมพลาสติก ยาง กระดาษ และสี แคลเซียมคาร์บอเนตยังใช้เป็นสารที่ควบคุมในการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กกล้า และวัตถุที่ทำจากเหล็ก (Wang *et al.*, 2007) แคลเซียมคาร์บอเนตมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ คือ แคลไซต์ (calcite) อะราโกไนต์ (aragonite) และวาเทอร์ไรต์ (vaterite) (Nan *et al.*, 2008) ซึ่งแคลไซต์เป็นโครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุด และวาเทอร์ไรต์จะมีความเสถียรน้อยที่สุด (Nan *et al.*, 2013) เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตได้รับความร้อนสูงจนถึงจุดที่สามารถหลอมละลาย จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งจะสามารถดูดความชื้นในอากาศได้ดี และยังสามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ (Hu *et al.*, 2011) ในธรรมชาติพบวัสดุหลายชนิดที่มีส่วนประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต เช่น ปะการัง เปลือกไข่ เปลือกหอย ซึ่งมีรายงานว่าเปลือกไข่จะประกอบด้วยสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตมากถึงร้อยละ 98.20 ± 0.39 โดยน้ำหนักของเปลือกไข่ เปลือกไข่ไก่แม้จะมีแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามยังประกอบด้วยสารอินทรีย์จากชั้นเมมเบรน และเมทริกซ์โปรตีน

2.5.1. ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต

2.5.1.1 ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

มักจะนิยมใช้ในรูปของ Dietary supplement, alkali, dough conditioner, nutrient, anticaking/firming agent, yeast food โดยจะใช้ในอาหารประเภท ซีส ผักผลไม้กระป๋อง หมากฝรั่ง แยม เยลลี่ นมผง และครีมเทียม นอกจากนี้ยังนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาบริโภคในรูปการอัดเม็ดเป็นอาหารเสริมแคลเซียม เพื่อเสริมสร้างกระดูกและป้องกันโรคกระดูกพรุน เช่น Caltrate®600 ของบริษัทไวท์ฮอลล์ (ประเทศไทย) เป็นต้น

ข้อกำหนดเฉพาะ ปริมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของแคลเซียมคาร์บอเนต ภายหลังจากการทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแห่งใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี อุตสาหกรรมยางใช้เป็นส่วนผสมของแป้ง ยาสีฟัน ผงซักฟอก ยา และเวชภัณฑ์ต่างๆ รวมถึงใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า กระจก ปากกา ยางลบ ถูมือ แวนตา เป็นต้น

2.6 แคลเซียมออกไซด์

แคลเซียมออกไซด์ได้จากการใช้เทคโนโลยีการเผาเปลือกไข่ที่อุณหภูมิสูงในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เรียกว่า ระบบไพโรไลซิส (pyrolysis) ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า กระบวนการแคลซิเนชัน (calcination) ดังสมการ (2.11) (Pattaraka Corporation Co., Ltd., 2021)



แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่ มีคุณสมบัติเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาหินปูนหรือที่รู้จักกันในชื่อปูนขาว (lime) ที่มีจำหน่ายทั่วไปจึงสามารถนำไปใช้ปรับสภาพของดิน และน้ำที่เป็นกรด ใช้ในการผลิตโซดาไฟและสารฟอกขาว และเป็นส่วนผสมของปูนฉาบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารดูดความชื้น และสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในการผลิตไบโอดีเซลได้อีกด้วย

2.7 วิธีวิเคราะห์ไนเตรท

2.7.1. วิธี Colorimetric

เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมแพร่หลายในการวิเคราะห์หอนินทรีย์ไนโตรเจน เนื่องจาก sensitivity สูง สะดวก และรวดเร็ว วิธี colorimetric อาศัยการเกิดปฏิกิริยาของไนเตรทกับสารประกอบ เชิงซ้อนอื่นๆ ร่วมกับรีเอเจนท์ในสภาวะกรด เกิดเป็นสารประกอบเอโซได (azo dye) ที่สามารถดูดกลืนแสงได้ดี โดยการวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer

Nagaraja and Kumar (2002) และมะลิวรรณ (2552) ศึกษาวิธีวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทใน แหล่งน้ำ โดยใช้สารควบคู่ (coupling reagent) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่าง Dopamine (3 Hydroxytyramine) และ MBTH (3-Methyl l-2-Benzothiazolinone Hydrazone Hydrochloride) โดยทำให้เกิดสีของสารละลายที่สามารถนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรทด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร

ศิริพร (2555) ศึกษาการพัฒนาชุดทดสอบปริมาณแอมโมเนียและไนเตรทในน้ำภาคสนาม สำหรับโครงการศึกษาวิจัย และพัฒนาสิ่งแวดล้อมผักเป็ดอันเนื่องมาจากพระราชดำริ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ไนเตรท คือ ใช้น้ำตัวอย่าง 10.00 มิลลิลิตร รีเอเจนท์ C 0.5 มิลลิลิตร ผงรีเอเจนท์ D 0.1155 กรัม และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากการทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer พบว่า ปริมาณไนเตรทที่ตรวจวัดได้จากทั้ง 2 วิธี ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อกำหนดเงื่อนไขทั้งหมดแล้ว จึงต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (96RSD) น้อยกว่า 10 ดังนั้น ชุดตรวจสอบปริมาณไนเตรทในน้ำภาคสนามจึงมีประสิทธิภาพ

ประสิทธิ์ และวิริญรัชญ์ (2555) ศึกษาการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท และไนเตรทด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตมิทรีในตัวอย่างน้ำที่ทำได้ง่าย สะดวก และลดมลภาวะที่จะเกิดกับสิ่งแวดล้อม โดยการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท จะรีดิวส์ไนเตรทเป็นไนไตรท์ด้วยสังกะสี ก่อนทำการวิเคราะห์หาไนเตรทในรูปของไนไตรท์ต่อไป การวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์อาศัยปฏิกิริยาไดอะโซไทเซชันของ Suphanilic acid ได้เกลือไดอะโซเนียม จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากู้ควบกับ Methyl anthranilate เกิดสีย้อม azo dye นำไปอ่านค่าด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 538 นาโนเมตร พบว่า ความเข้มข้นของ Sulphanilic acid และ Methyl anthranilate ที่เหมาะสมคือ 0.4% (w/v) และ 0.6% (w/v) ตามลำดับน่าเชื่อถือ

2.7.2 วิธี Specific ion electrodes

เป็นวิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายด้วย ion electrode วิธีนี้มีข้อดีคือ ทำได้ง่าย รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือ NO_3^- , electrode ที่ใช้กันในปัจจุบันมักถูกรบกวนด้วย anion อื่นๆ ที่มีอยู่ในสารละลายที่สกัดได้จากพืชหรือดิน ทำให้ต้อง restandardize electrode อยู่ตลอดเวลา ให้ค่า sensitivity ค่อนข้างต่ำ ทำให้ไม่เป็นที่นิยมกันแพร่หลาย (วาสนา, 2560)

สุดา (2554) กล่าวว่า การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ISE (ion selective electrode) หรือ specific ion electrode เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หนึ่งในการวัดปริมาณไอออน กลุ่มไอออน แก๊สบางชนิดในตัวอย่างน้ำ และสารละลายตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว ประหยัด และถูกต้องแม่นยำเป็นที่ยอมรับระดับสากล โดย ISE ยอมให้ไอออนเฉพาะสำหรับ electrode ชนิดนั้นๆ ผ่านเท่านั้น โดย electrode ที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท ประกอบด้วย nitrate electrode และ reference electrode

2.8 ไอออนซีเลคทีฟอิเล็กโทรด (Ion-selective electrode, ISE)

ไอออนซีเลคทีฟอิเล็กโทรด (Ion-selective electrode, ISE) เป็นอุปกรณ์ หรือหัววัดที่สร้างขึ้น เพื่อใช้งานวิเคราะห์ โดยใช้หลักการโพเทนชิอเมตรี คือ วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วสองขั้ว ดังแสดงรูปที่ 2.6 ขั้วหนึ่งคือขั้วอ้างอิง (reference electrode) เมื่อจุ่มขั้วทั้งสองลงในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วต่อขั้วทั้งสองเข้ากับเครื่องโพเทนชิอมิเตอร์ หรือโวลต์มิเตอร์ ก็สามารถวัดค่าความต่างศักย์ได้ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอ้างอิงจะมีค่าคงที่ ส่วนศักย์ไฟฟ้าของขั้วทำงาน จะเปลี่ยนแปลงตามค่าแอกทิวิตีของไอออนที่สนใจในการทดลองนี้ จะใช้ ISE ที่ไวต่อไนเตรทไอออน (NO_3^-) ซึ่ง ISE ที่ใช้นี้เป็นขั้วเมมเบรนของเหลว (liquid membrane electrode) ซึ่งประกอบด้วยขั้วอ้างอิงภายใน (internal reference electrode) ที่จุ่มในสารละลายอ้างอิงภายใน (internal reference solution) ที่มีความเข้มข้นคงที่ที่ปลายขั้วเป็นแผ่นเมมเบรนบางๆ มีรูพรุน และอิมัลชันของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไนเตรทได้ เช่น $\text{Ni}(\text{C}_{12}\text{H}_3\text{N}_2\text{R})_3^{2+}$

(Substituted o-phenantroline) ซึ่งมีประจุบวก และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไนเตรทได้ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของเมมเบรนจะตอบสนองต่อไนเตรทในสารละลาย ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ไนเตรทได้ในช่วงความเข้มข้น 3×10^{-5} ถึง 1×10^{-4} M และถ้าใช้เทตระเดซิลแอมโมเนียไนเตรต จะวิเคราะห์หาไนเตรทที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆถึงไมโครโมลาร์ได้



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์สำหรับหาปริมาณไนเตรทด้วยไอออนซีล็คทีฟอิเล็กโทรด รุ่น 781

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสาวภา (2558) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วย CaCO จากเปลือกไข่ไก่ และ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผา ในการศึกษาการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaCO จากเปลือกไข่ไก่ และ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผา วิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสตอร์บิก พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ เมื่อใช้ CaCO, จากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับ คือ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 เวลาในการดูดซับ 180 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัมโดยประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนการใช้ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับ พบว่า พีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4-11 เวลาในการดูดซับ 30 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 0.1 และ 0.5 กรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 97 การศึกษาไอโซเทอร์มของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสามารถวิเคราะห์ และทำนายได้จากไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช และแลงเมียร์ ซึ่งในการใช้ CaCO จากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับ พบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชได้ดีกว่าแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบหลายชั้น หรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี ส่วนการใช้ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับจะสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดลิช แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก โดยการใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ พบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน โดยประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 73 และ 99 เมื่อใช้ CaCO₃ จากเปลือกไข่ไก่ และ CaO จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับ ตามลำดับ

วิมลลักษณ์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาการเตรียมผงเปลือกไข่ และการดัดแปรเปลือกไข่ด้วยความร้อนและ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างผลึก ผลการทดลองพบว่า การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผงเปลือกไข่ และเปลือกไข่ดัดแปรด้วยความร้อนโดยใช้ X-ray Diffractometer รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่สอดคล้องกับรูปแบบของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอย่างดี กล่าวคือผงเปลือกไข่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปผลึกแคลไซต์ และสารอินทรีย์ เมื่อศึกษาการดัดแปรเปลือกไข่ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ได้แก่ 650 °C (เวลา 16, 20 และ 24 ชั่วโมง) 670 °C (เวลา 12 และ 16 ชั่วโมง) 770 °C (เวลา 4 และ 6 ชั่วโมง) 800 °C (เวลา 3, 4 และ 5 ชั่วโมง) พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร จะทำให้แคลเซียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และสารอินทรีย์ถูกกำจัดออกไปได้เพิ่มมากขึ้น ช่วงเวลาสั้นที่สุดในการกำจัดสารอินทรีย์แล้วได้แคลเซียมออกไซด์ในปริมาณมาก เมื่อเปลือกไข่ถูกดัดแปรเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงเปลือกไข่ และเปลือกไข่ดัดแปรด้วยความร้อนโดยใช้ X-ray fluorescence spectrometer พบว่าเปลือกไข่ไม่มีธาตุแคลเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่ 30% โดยน้ำหนัก ส่วนเปลือกไข่ดัดแปรที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีธาตุแคลเซียมอยู่ 70% โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นเป็นองค์ประกอบอื่น ๆ ในเปลือกไข่และเปลือกไข่ดัดแปร

Jih-Hsing Chang et al. (2023) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับไบโอซอร์ แกลบ (RHB) และถ่านไบโอซอร์ Mg/Ca-LDHs@RH (MCB) ที่เตรียมไว้ (MCB) ทางโครงสร้างจุลภาคสัณฐานวิทยา และความสามารถในการดูดซับไนเตรต เนื่องจากความเข้มข้นของไนเตรตไอออนที่เพิ่มขึ้นในน้ำเสียทางอุตสาหกรรมที่นำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ร้ายแรง ในการศึกษาถ่านชีวภาพถูกเตรียมจากของเสียทางการเกษตร และบูรณาการวิธีการตกตะกอนร่วมเพื่อเตรียมไฮดรอกไซด์สองชั้นที่มี Mg/Ca (Mg/Ca-LDHs) วิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีฟิสิกส์ของถ่านไบโอซอร์ที่เตรียมไว้โดยใช้ XRD, FESEM, EDS, BET และ IC ตรวจสอบเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ไพโรไลซิส และการเคลือบ LDH ที่มีความเข้มข้นต่างกัน (Mg, Ca) การศึกษานี้ พบว่า อุณหภูมิไพโรไลซิสช่วยลดเปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านไบโอซอร์จาก 44.5 เป็น 30.2 % รูพรุนของถ่านไบโอซอร์จะแสดงเป็นรูพรวงผึ้ง และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 3–5 ไมโครเมตร นอกจากนี้รูพรุนของถ่านไบโอซอร์ที่ได้รับดูแลเหมือนจะกระจุกกระจายมากขึ้นเมื่ออัตราส่วน Mg/Ca ค่อยๆ เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวของถ่านไบโอซอร์เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน Mg/Ca ที่เพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวจำเพาะที่ 3:1 และ 4:1 Mg/Ca-LDHs เป็นอัตราส่วนสูงสุด โดยอยู่ที่ประมาณ 288–308 cm²/g ถ่านชีวภาพ LDH ที่มีอัตราส่วน 3:1 Mg/Ca-LDHs สามารถดูดซับไนเตรตไอออนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ LDH จะรักษาสถานะที่เสถียรในระหว่างกระบวนการดูดซับ

M.J. Ahmed et al. (2023) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำตัวดูดซับมาใช้เป็นเทคนิคที่ง่าย มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ตัวดูดซับที่ใช้ถ่านกัมมันต์ (AC) ยังแสดงประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตในระดับสูง เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะของรูพรุนและกลุ่มการทำงานที่ได้รับการเสริมโครงสร้างไม่วุ่นวายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความนี้นำเสนอการทบทวนที่ครอบคลุมเกี่ยวกับการผลิต การแสดงคุณลักษณะ และการใช้ตัวดูดซับที่ใช้ AC เพื่อกำจัดไนเตรตออกจากน้ำ รูปแบบทั่วไปของตัวดูดซับที่ใช้ AC เช่น ดิบ ดัดแปลง และคอมโพสิต ได้รับการพิจารณามีการอธิบายอิทธิพลของตัวแปรการเตรียมและการดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตของตัวดูดซับดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีอธิบายถึงพฤติกรรมของการดูดซับไนเตรตภายใต้แบบพีช แบบซีคิงที่ และการดำเนินการที่แข่งขันได้ตลอดจนกลไก และความสามารถในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1. เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulphate 18-hydrate, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) บริษัท KEMAUS ประเทศออสเตรเลีย
- 2) ซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate, Ag_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) บริษัท Qrec ประเทศนิวซีแลนด์
- 3) กรดซัลฟามิก (Sulphamic acid) เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) บริษัท fisher scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4) กรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3) เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) บริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส
- 5) โพแทสเซียมไนเตรท (Potassium nitrate, KNO_3) เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
- 6) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) 0.1 M เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) บริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S ประเทศฝรั่งเศส
- 7) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) 0.1 M เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) บริษัท Qrec ประเทศนิวซีแลนด์

3.1.2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Metter Toledo รุ่น MS204TS ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 2) เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Metter Toledo รุ่น MS1620S ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 3) เต้าเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง รุ่น CHAVACHOTE ประเทศเยอรมันนี
- 4) เครื่องวัด pH (pH Meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น FE20 FiveEasy pH ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 5) เครื่อง 781 pH/Ion Meter บริษัท Metrohm ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 6) เครื่องเขย่าสาร (Orbital Shaker) ยี่ห้อ WiseShake รุ่น SHO-1D ประเทศจีน
- 7) ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
- 8) ครกหินบด
- 9) โถดูดความชื้น (Desicator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น กรุณาแจ้งเจ้าของเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 10) ชุดกรองลดความดัน
- 11) อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.3. การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกไข่ไก่

- 1) ล้างเปลือกไข่ไก่เพื่อทำความสะอาดและระดับพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายต้องเป็นกลาง
- 2) นำเปลือกไข่ไก่ไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จนแห้ง (ไม่มีความชื้น) และนำไปบดด้วยเครื่องบดให้ละเอียดแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80-100 mesh เพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำไปอบในโถดูดความชื้น (Desicator) เพื่อปกป้องไม่ให้ถูกความชื้น

3.1.4. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

ละลาย $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ 5.92 กรัม, Ag_2SO_4 3.12 กรัม, H_3BO_3 1.24 กรัม และกรดซัลฟามิก 1.94 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาณ 400 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 M ให้มี pH 3 แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.1.5. การเตรียมมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานไนเตรท

- 1) ชั่งโพแทสเซียมไนเตรท 0.7218 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตร 1 ลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
- 2) ปิเปตสารละลายในข้อ 1 มา 1, 5, 10 และ 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานไนเตรทเข้มข้น 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.6. การหาปริมาณไนเตรทด้วยไอออนซีเลทีฟอิเล็กโทรด (ISE)

- 1) นำขั้ว NO_3^- -ISE แช่น้ำ 15 นาที
- 2) ต่อขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ซึ่งใช้เป็นขั้วอ้างอิงเข้ากับเครื่องอ่านค่าความต่างศักย์
- 3) เสียบปลั๊กเครื่องอ่านค่าความต่างศักย์ เปิดเครื่องทิ้งไว้ 10 นาที
- 4) ใช้กระบอกน้ำกลั่นฉีดล้างขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ให้สะอาด ซับด้วยทิชชูให้พอแห้ง
- 5) ปิเปตสารละลายมาตรฐานไนเตรทเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลาย buffer (TISAB) อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า นาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้ นาน 1 นาที อ่านค่าศักย์ไฟฟ้า และบันทึกผลการทดลอง
- 6) ใช้กระบอกน้ำกลั่นฉีดล้างขั้วทั้งสองให้สะอาด ซับด้วยทิชชู แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 5 เปลี่ยนเป็นสารละลายมาตรฐานไนเตรทเข้มข้น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- 7) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐาน และ $-\log[\text{NO}_3^-]$ โดยต้องเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของสารละลาย

มาตรฐานไนเตรท จากมิลลิกรัมต่อลิตร เป็น M ก่อน แล้วหาสมการเส้นตรงเพื่อหาค่าความ
 ชั้น

3.1.7. ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค X-ray diffratometry (XRD) โดยนำ
 เปลือกไขไก่ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการ
 เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

3.1.8. ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ทำการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา และรูปร่างลักษณะของเปลือกไขไก่ที่ผ่านการเผาที่
 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และเปลือกไขไก่ที่ไม่ผ่านการเผา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
 ส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกไขไก่

3.2.1. การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม (Equilibrium Time)

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนเตรท 10 มิลลิกรัมลิตรปริมาณ 100
 มิลลิลิตร เติมเปลือกไขไก่ปริมาณ 4 กรัม
- 2) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง
- 3) เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาสัมผัส 5 ระดับ ที่เวลา 30, 60, 90 120 และ 240 นาที
 จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าไปกรองผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน
 เพื่อแยกระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวออก
- 4) ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว และ Buffer อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวน
 แม่เหล็กไฟฟ้านาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้นาน 1 นาที
 อ่านค่าความเข้มข้น และบันทึกผลการทดลอง
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีกสองครั้ง
- 6) นำค่าศักย์ไฟฟ้ามาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณไนเตรทในหน่วยมิลลิกรัม
 ต่อลิตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับไนเตรท ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Removal (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_e = ความเข้มข้นไนเตรทที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

7) คำนวณความสามารถในการดูดซับไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล ดังสมการที่ 3.2

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \quad (3.2)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของไนเตรทเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นไนเตรทที่เหลืออยู่หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลายไนเตรท (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักของปริมาณเปลือกไข่ไก่ (กรัม)

3.2.2. การศึกษาผลของปริมาณของเปลือกไข่ไก่ที่เหมาะสม

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนเตรท 10 มิลลิกรัม/ลิตรปริมาณ 100 มิลลิลิตร เติมเปลือกไข่ไก่ปริมาณ 1, 2, 4, 8 และ 16 กรัม ตามลำดับ
- 2) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยเขย่าระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.1
- 3) จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าไปกรองผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน เพื่อแยกแหว่งส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวออก
- 4) เปิดสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว และ Buffer อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า นาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้ นาน 1 นาที อ่านค่าศักย์ไฟฟ้า และบันทึกผลการทดลอง
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีกสองครั้ง
- 6) นำค่าศักย์ไฟฟ้ามาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณไนเตรทในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับไนเตรท ดังสมการที่ 3.1
- 7) คำนวณความสามารถในการดูดซับไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

3.2.3. ศึกษาผลของ pH ในการดูดซับที่เหมาะสม

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนเตรท 10 มิลลิกรัม/ลิตรปริมาณ 100 มิลลิลิตร เติมเปลือกไข่ไก่ปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2 ปรับ ระดับพีเอชของน้ำเสีย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นต่างๆ

- 2) ปรับระดับพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 (วัดค่าพีเอชโดยพีเอชมิเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนการศึกษานานาชาติ เมื่อผู้ใดให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) นำไปเขย่าในเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเขย่าระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.1
- 4) จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน เพื่อแยกระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวออก
- 5) ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว และ Buffer อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้านาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้เวลานาน 1 นาที อ่านค่าความเข้มข้น และบันทึกผลการทดลอง
- 6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 ซ้ำอีกสองครั้ง
- 7) จากนั้นทำการทดลองซ้ำใหม่โดยปรับพีเอชให้เป็น 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ
- 8) นำค่าศักย์ไฟฟ้ามาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณไนเตรทในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับไนเตรท ดังสมการที่ 3.1
- 9) คำนวณความสามารถในการดูดซับไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

3.2.4. การศึกษาความเข้มข้นของการดูดซับไนเตรท

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนเตรท 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เติมเปลือกไข่ไก่ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.2
- 2) นำไปเขย่าในเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเขย่าระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.1
- 3) จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45ไมครอน เพื่อแยกระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลว
- 4) ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว และ Buffer อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้านาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้เวลานาน 1 นาที อ่านค่าความเข้มข้น และบันทึกผลการทดลอง
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีกสองครั้ง
- 6) นำค่าศักย์ไฟฟ้ามาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณไนเตรทในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับไนเตรท ดังสมการที่ 3.1
- 7) คำนวณความสามารถในการดูดซับไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

3.2.5. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับไนเตรท

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนเตรท 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร เติมเปลือกไข่ไก่ปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.2 ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) นำไปเขย่าในเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเขย่าระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.1
- 3) จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน เพื่อแยกระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลว
- 4) ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว และ Buffer อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้านาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้ 1 นาที อ่านค่าความเข้มข้น และบันทึกผลการทดลอง
- 5) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีกสองครั้ง
- 6) นำค่าศักย์ไฟฟ้ามาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณไนเตรทในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับไนเตรท ดังสมการที่ 3.1
- 7) คำนวณความสามารถในการดูดซับไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2
- 8) คำนวณหาไอโซเทอร์มของการดูดซับไนเตรท โดยนำค่าการดูดซับของไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล ทุกความเข้มข้นต่างๆที่ได้จากข้อที่ 7 มาพล็อตแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับแลงเมียร์ ดังสมการที่ 3.3 และแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับฟรุนดิช ดังสมการที่ 3.4

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \quad (3.3)$$

$$\log q_e = \log K_F + \left[\left(\frac{1}{n} \right) \log C_e \right] \quad (3.4)$$

เมื่อ q_e = ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น

C_e = ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

n = ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)

$1/n$ = ปัจจัยที่เกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity)

q_m = ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียวกัน
(มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L = ค่าคงที่การดูดซับที่สมดุลของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรท

- 1) ชั่งเปลือกไข่ไก่ตามปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.2
- 2) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรทที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 3) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง
- 4) เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาสัมผัส 5 ระดับ ที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 240 นาที จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าไปกรองผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน เพื่อแยกระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวออก
- 5) ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว และ Buffer อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้านาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้นาน 1 นาที อ่านค่าความเข้มข้น และบันทึกผลการทดลอง
- 6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 ซ้ำอีกสองครั้ง
- 7) นำค่าศักย์ไฟฟ้ามาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณไนเตรทในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับไนเตรท ดังสมการที่ 3.1
- 8) คำนวณความสามารถในการดูดซับไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2
- 9) คำนวณจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรท จากสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ 3.5 และสมการปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ดังสมการที่ 3.6

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.6)$$

เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับไนเตรทที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e = ค่าการดูดซับของไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)

k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7. ศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

- 1) นำตัวดูดซับเปลือกไข่ไก่จากการทดลองที่ 3.2.1-3.2.6 มาล้างด้วยน้ำจืดกว่าน้ำล้างสุดท้ายจะเป็นกลาง (pH 7)
- 2) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (จนไม่มีความชื้น)
- 3) ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับของเปลือกไข่ไก่
- 4) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนเตรท 10 มิลลิกรัมลิตรปริมาณ 100 มิลลิตร เติมเปลือกไข่ไก่ (ที่นำกลับมาใช้ใหม่) ปริมาณ 4 กรัม
- 5) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยเขย่าระยะเวลาที่ 90 นาทีที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.1
- 6) จากนั้นนำของผสมในขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าไปกรองผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน เพื่อแยกแหว่งส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวออก
- 7) ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว และ Buffer อย่างละ 10 มิลลิตร ลงในบีกเกอร์ 25 มิลลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็กขนาดเล็กลงไป 1 อัน กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้านาน 2 นาที จุ่มขั้ว NO_3^- -ISE และขั้ว Ag/AgCl ลงไป แช่ทิ้งไว้เวลานาน 1 นาที อ่านค่าศักย์ไฟฟ้า และบันทึกผลการทดลอง
- 8) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-7 ซ้ำอีกสองครั้ง
- 9) จากนั้นทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นเปลือกไข่ไก่ที่ปกติ
- 10) นำค่าศักย์ไฟฟ้ามาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณปริมาณไนเตรทในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับไนเตรท ดังสมการที่ 3.1
- 11) คำนวณความสามารถในการดูดซับไนเตรทเมื่อเข้าสู่สมดุล (q_e) ดังสมการที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในการศึกษาการดูดซับไนเตรท ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาที่สัมผัส, ปริมาณตัวดูดซับ, ความเป็นกรด-ด่าง, ความเข้มข้นในการดูดซับ, ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ, ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ และศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของเปลือกไข่ไก่

4.1.1. ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

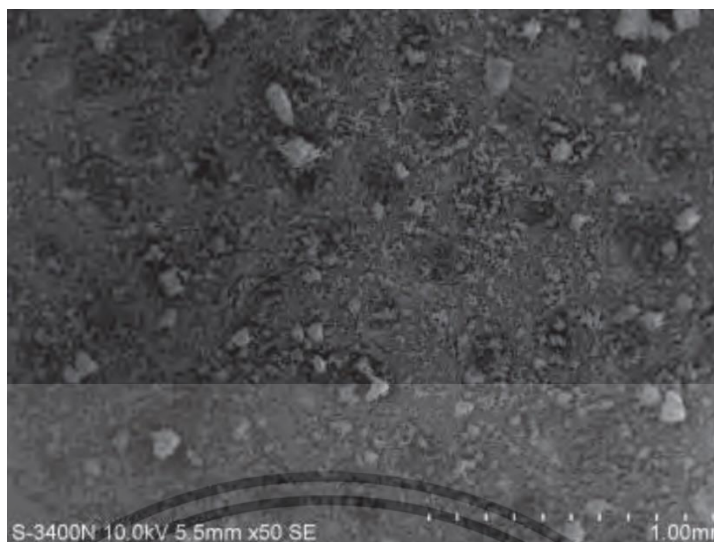
(Scanning Electron Microscopy, SEM)

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่ที่ไม่ผ่านการบด และเปลือกไข่ไก่บด เมื่อนำไปศึกษา ลักษณะสัณฐานวิทยาโดยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ 50 เท่า ตามลำดับ พบว่า รูปที่ 4.1 (ก) มีโครงสร้างมีรอยขรุขระ และมีรูพรุนบริเวณพื้นผิว และรูปที่ 4.2 (ข) โครงสร้างมีความละเอียดและมีการเปลี่ยนสีเป็นสีขาว คาดว่าเกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ (ศักดิ์ดา, 2555)



รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะของพื้นที่ผิวของเปลือกไข่ไก่ที่ไม่ผ่านการบดที่กำลังขยาย 5000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

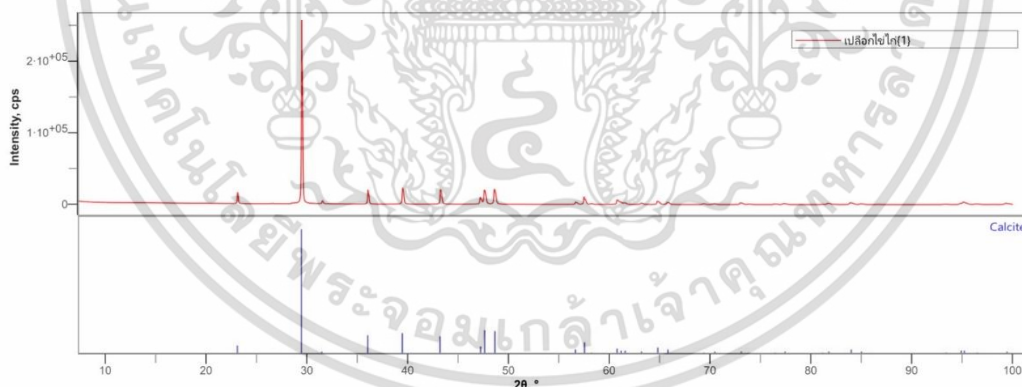


รูปที่ 4.1 (ข) ลักษณะของพื้นที่ผิวของเปลือกไข่ไก่บดที่กำลังขยาย 50 เท่า

ที่มา : <http://www.thapra.lib.su.ac.th>

4.1.2 . ผลของโครงสร้างผลึกของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์วัสดุดูดซับ โดยวิเคราะห์ศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD เพื่อวิเคราะห์วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ว่าเป็นโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือไม่



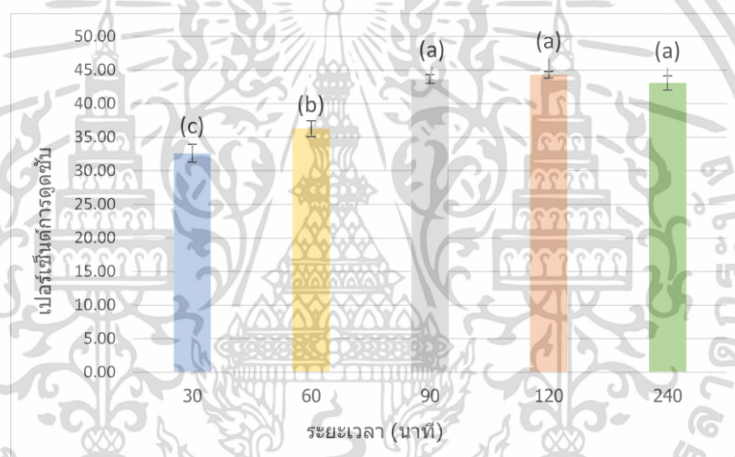
รูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของวัสดุดูดซับ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าวัสดุดูดซับที่ได้จากเปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีผลึกเป็นแบบแคลไซต์เป็นหลัก โดยสามารถตรวจพบตำแหน่งของพีคที่ 2θ (มุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) คือพีคที่ตำแหน่ง 23.13° , 26.58° , 28.73° , 29.48° , 31.52° , 36.04° , 39.49° และ 43.34° เทียบกับพีคมาตรฐานของ CaCO_3 (Calcite) ฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 72-1651 ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของธนบดีและคณะ (2564) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกไข่ไก่

4.2.1. ผลของระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลจากระยะเวลาในการดูดซับ ทำการดูดซับสารละลายไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปลือกไข่ไก่ 4 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ที่พีเอชในสภาวะปกติ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาดูดซับที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 240 นาที พบว่าเปลือกไข่ไก่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรทได้ 32.60 ± 1.35 , 36.27 ± 1.19 , 43.63 ± 0.67 , 44.27 ± 0.50 และ 43.07 ± 1.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-2.1 - 2.2 ภาคผนวก ก) เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่สัมผัสเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลา 90, 120 และ 240 นาทีที่มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1 - 1.3 ภาคผนวก ข) เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับเริ่มคงที่ จึงเลือกให้ค่าระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 90 นาทีในการทดลองต่อไป



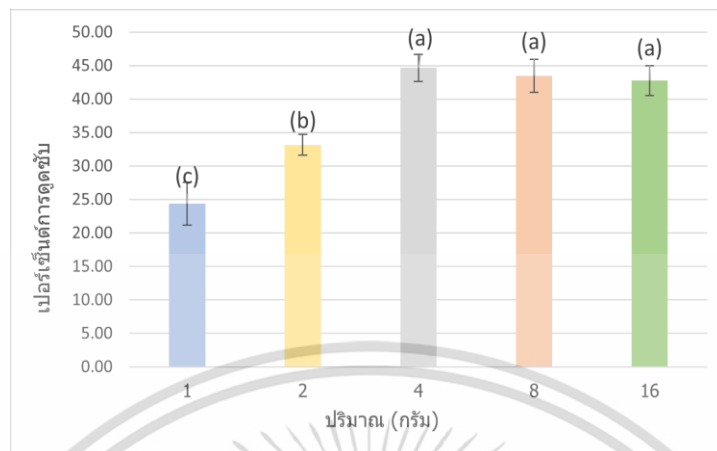
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท

4.2.2. ผลของปริมาณเปลือกไข่ไก่ในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลของปริมาณเปลือกไข่ไก่ในการดูดซับ ทำการดูดซับสารละลายไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 90 นาที ที่พีเอชในสภาวะปกติ เปลี่ยนแปลงปริมาณตัวดูดซับที่ 1, 2, 4, 8 และ 16 กรัม พบว่าเปลือกไข่ไก่มีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับได้ 24.37 ± 3.23 , 33.17 ± 1.55 , 44.67 ± 2.03 , 43.47 ± 2.44 และ 42.77 ± 2.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-3.1 - 3.2 ภาคผนวก ก) เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ปริมาณ 4, 8 และ 16 กรัม มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

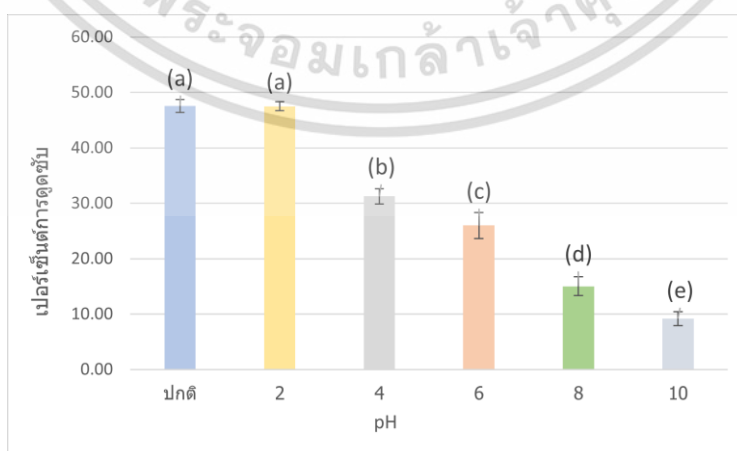
2.1 - 2.3 ภาคผนวก ข) เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับเริ่มคงที่ จึงเลือกให้ค่าปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม คือ 4 กรัม ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท

4.2.3. ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายไนเตรท ทำการดูดซับสารละลายไนเตรทที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปลือกไข่ไก่ 4 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 90 นาที ที่พีเอชปกติ และเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 พบว่าเปลือกไข่ไก่มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทได้ 47.56 ± 1.17 , 47.50 ± 0.82 , 31.23 ± 1.40 , 26.00 ± 2.35 , 15.00 ± 1.70 และ 9.17 ± 1.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-4.1 - 4.2 ภาคผนวก ก) เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรทที่พีเอชปกติ และ pH 2 มีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันมากที่สุด มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1 - 3.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกให้ค่า pH ที่เหมาะสมที่สุด คือ pH ปกติ และพีเอช 2

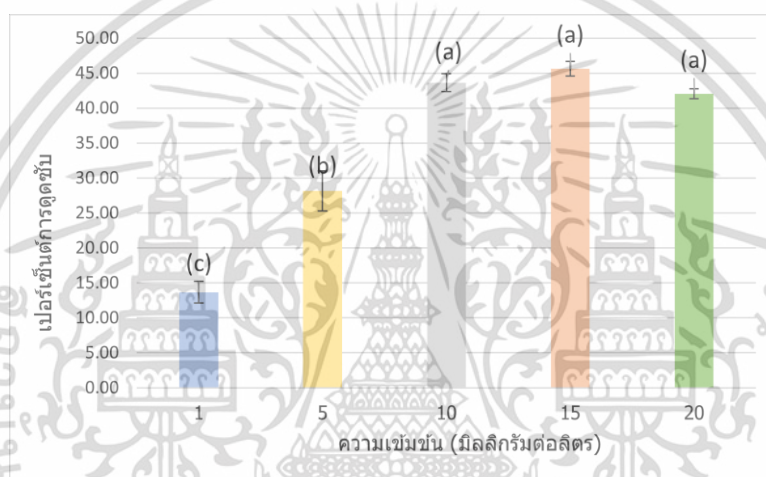


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ มีอยู่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นในการดูดซับที่เหมาะสม

ผลความเข้มข้นเริ่มต้นในการดูดซับไนเตรท โดยใช้ปริมาณเปลือกไข่ไก่ 4 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 90 นาที ที่พีเอชปกติ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไนเตรทที่ 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเปลือกไข่ไก่มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทได้ 13.67 ± 1.53 , 28.13 ± 2.87 , 43.63 ± 1.31 , 45.62 ± 1.01 และ 42.03 ± 0.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-5.1 – 5.2 ภาคผนวก ก) เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรทมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับมากที่สุด (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.1 - 4.3 ภาคผนวก ข) จึงเลือกให้ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองต่อไป

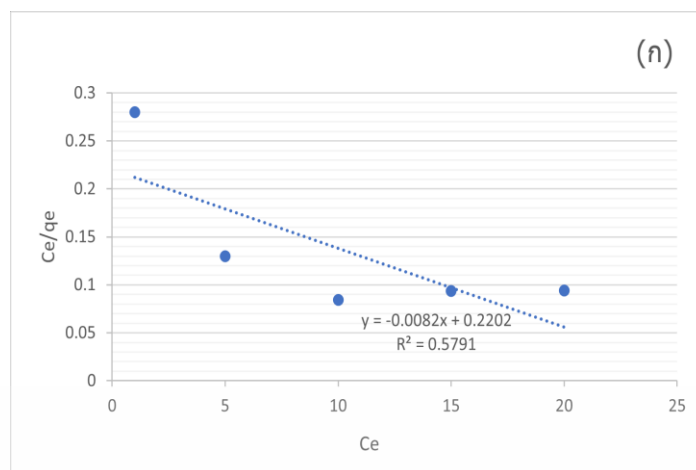


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท

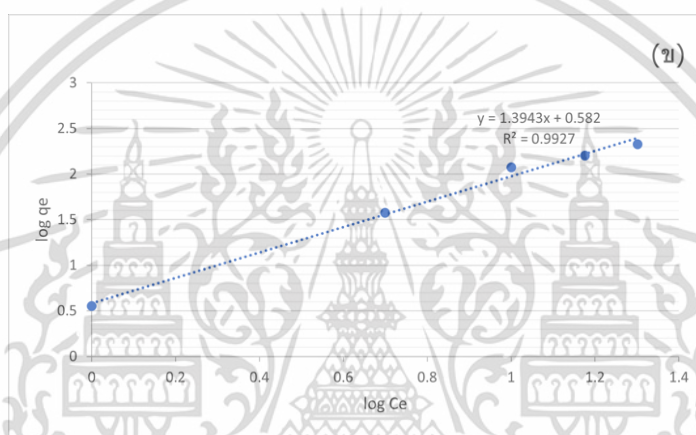
4.2.5. ผลของการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับไนเตรท

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไนเตรท ไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไนเตรทที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของเปลือกไข่ไก่กับความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลืออยู่ในสถานะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับไนเตรทของเปลือกไข่ไก่ โดยนำผลข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ตาม แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลูนดิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับไนเตรทของเปลือกไข่ไก่แบบแลงเมียร์ (ก) และแบบฟรุนดิช (ข)

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่จากสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดิช

วัสดุดูดซับ	ไอโซเทอมแลงเมียร์			ไอโซเทอมฟรุนดิช		
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (mg/g)(L/mg) ^{1/n}	1/n	R^2
เปลือกไข่ไก่	-0.0408	-0.9887	0.5791	3.8513	1.3943	0.9927

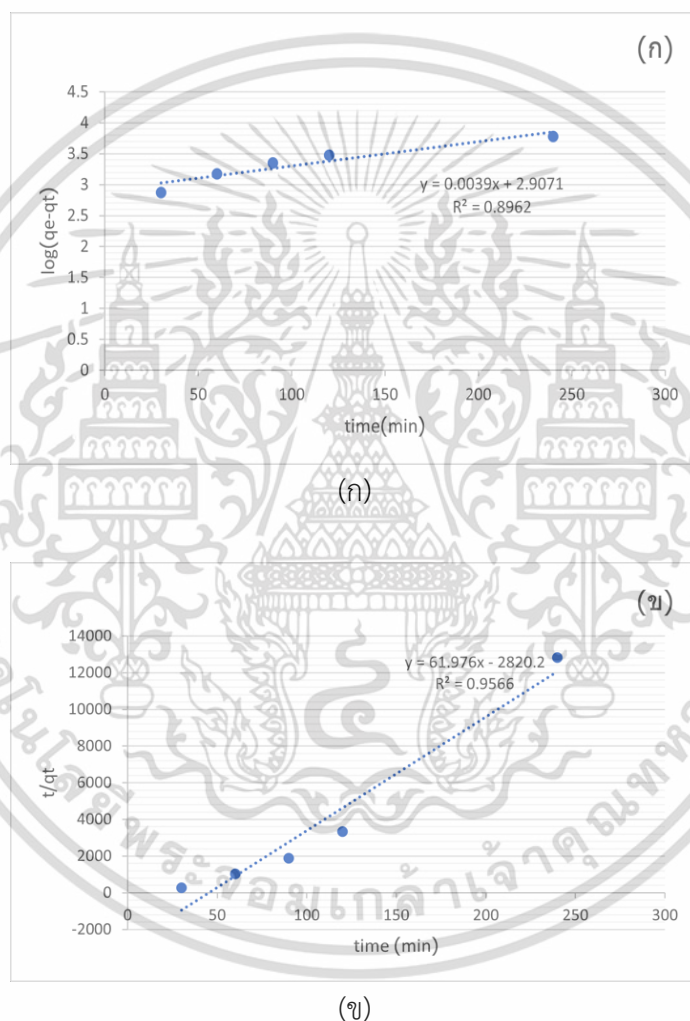
เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิช พบว่าการใช้เปลือกไข่ไก่ในการดูดซับไนเตรท เป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิช ซึ่งมีสมการเส้นตรง คือ $y = 1.3943x + 0.582$ มีค่าประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9927 ดังแสดงในรูป 4.8 (ข) ในขณะที่สมการแลงเมียร์ มีค่าสมการเส้นตรง คือ $y = -0.0082x + 0.2202$ มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.5791 สรุปได้ว่า พฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับแบบฟรุนดิช ซึ่งจากข้อสรุปดังกล่าวอธิบายได้ว่า เป็นการ

ดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งตัวดูดซับมีพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ)

4.2.6. ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับในเตรท

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับในเตรท พบว่าเมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับจะเร็วในช่วงแรก จากนั้นการดูดซับจะเริ่มช้าลงแล้วค่อยๆเริ่มคงที่

การศึกษากลไกการดูดซับของเปลือกไข่ไก่ อธิบายด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาอันดับสอง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ก) และปฏิกิริยาอันดับสอง (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและอันดับสอง

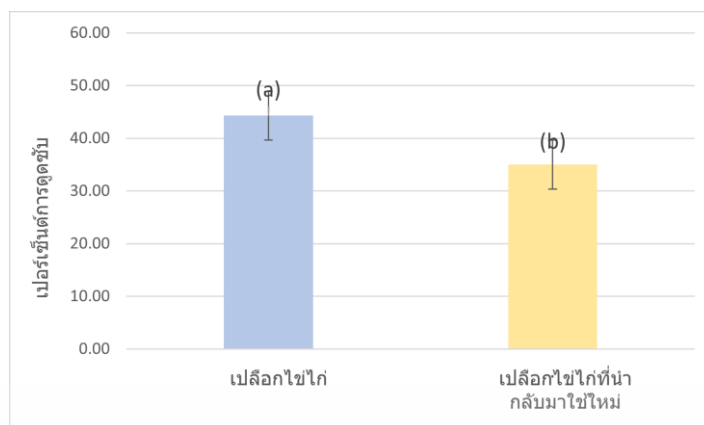
วัสดุดูดซับ	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง			ปฏิกิริยาอันดับสอง		
	q_e (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (min ⁻¹)	R^2
เปลือกไข่ไก่	807.42	0.0039	0.8962	0.0161	61.9760	0.9566

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t พบว่าเปลือกไข่ไก่มีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9566 ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า K_2 มีค่าเท่ากับ 61.9760 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที่ ซึ่งอธิบายได้ว่า สมการปฏิกิริยาอันดับสองอธิบายได้ดีสำหรับกระบวนการดูดซับที่มีขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ เป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไนเตรทเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าคงที่อัตรา K_2 จะลดลง เนื่องจากที่สารละลายไนเตรทความเข้มข้นต่ำๆ จะเกิดการแข่งขันบนพื้นผิวของตัวดูดซับในการดูดซับไนเตรทน้อยกว่าที่ไนเตรทความเข้มข้นสูงๆ

4.2.7. ผลของการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับไนเตรท

ผลของการนำเปลือกไข่ไก่มาเป็นตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ เปรียบเทียบกับเปลือกไข่ไก่ที่เตรียมขึ้นในการดูดซับไนเตรท โดยใช้ปริมาณเปลือกไข่ไก่ 4 กรัมเท่ากัน ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 90 นาที ที่พีเอชปกติ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไนเตรททั้งสอง พบว่าเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ และเปลือกไข่ไก่ที่เตรียมขึ้น มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับไนเตรทได้ 35.00 ± 2.07 และ 44.27 ± 1.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ก-6.1 – 6.2 ภาคผนวก ก) เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรทมีแนวโน้มที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-5.1 - 5.3 ภาคผนวก ข) แสดงว่าไม่เหมาะสมนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปลือกไข่ไก่ และเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่
กับประสิทธิภาพในการดูดซับไนเตรท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการดูดซับไนเตรตด้วยเปลือกไข่ไก่ จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผลึกโครงสร้างของเปลือกไข่ไก่ พบว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผา 90 องศาเซลเซียส มีผลึกโครงสร้างแบบแคลเซียมออกไซด์และมีผลึกโครงสร้างแบบแคลไซต์ ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของการดูดซับพบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดต่อการดูดซับคือ 90 นาที ปริมาณที่เหมาะสมที่สุดต่อการดูดซับคือ 4 กรัม pH ที่เหมาะสมที่สุดต่อการดูดซับคือ 2 และพีเอชปกติ และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดต่อการดูดซับ คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

การศึกษาไอโซเทอมโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich) พบว่าพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดิช โดยความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบหลายชั้นเท่ากับ 3.8513 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับผลของไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามสมการของฟรุนดิช ส่วนการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับไนเตรตด้วยเปลือกไข่ไก่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) และไม่เหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อตัวดูดซับ เช่น ศึกษาความเป็นรูพรุน (BET) และอุณหภูมิในการดูดซับ
2. ควรศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดูดซับจากเปลือกไข่ไก่ให้ดีขึ้น
3. นำน้ำเสียจริงมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ
4. ควรเพิ่มเติมการควบคุมคุณภาพของวิธีการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

อดิษฐ แซ่จิว, รุ่งนภา ก่อประดิษฐ์สกุล, ชัชวาลย์ สุทธิศรีศิลป์, ลักษณ์า เบ็ญจวรรณ, อรรถศิษฐ์ วงศ์ มณีโรจน์.

(2552). การปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำบาดาล พื้นที่ภาคตะวันตก และการ ประเมินความเสี่ยง *Nitrate in Groundwater of the Western THAILAND-Assessing the Risk.* มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณนารถ พิกุล, วรณวิบูลย์ กาญจนกฤษ, สายพิน ทานษ์ฉมาลัย. (2557). การพัฒนาโปรตีนไฮโดร-

ไลเสตจากเยื่อเปลือกไข่ *The development of eggshell membrane hydrolysate* (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร)

ปรัชญา พิงทิม. (2563). การกำจัดไนเตรทด้วยกระบวนการร่วมของไฮโดรจีโนโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน และ เฮเทอโรโทรฟิเคชันในตรีฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาลัษนเรศวร. พิษณุโลก

สุนีย์ ขวัญยืน. (2561). การกำจัดไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ปทุมธานี

สุภกร บุญยืน. (2558). การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย

เสาวภา ไวยสุศรี. (2558). การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. (2557). การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือกไข่ไก่ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

สิงห์ อินทรชูโต. (2560). EMARBLE นวัตกรรมวัสดุหินเทียมจากเปลือกไข่เหลือทิ้ง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อินทรีย์ ศรีสุข. (2560). การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอีพอกซีเรซิน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิศนีย์ ยิ่งประเสริฐ. (2565). พัฒนาเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในเฟอร์นิเจอร์และสารเคมีตกค้าง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

กานดา ล้อแก้วมณี. (2557-2558). ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพไข่ ภาควิชาเกษตรและทรัพยากร คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ

จังหวัดสกลนคร
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศักดิ์ดา ไตรปิฎก. (2555) การใช้เปลือกไข่ไก่เป็นส่วนผสมในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบา ภาควิชาวิทยา
ศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร
- วิกิพีเดีย. 2564. แคลเซียมออกไซด์
- วิกิพีเดีย. 2564. แคลเซียมคาร์บอเนต
- Pattaraka Corporation Co.Ltd. 2021. Calcium oxide
- Oswaldo Matteucci, *et al.* 2008. Two case of Methemoglobinemia caused by suspected
sodium nitrite poisoning. *Vet Ital j.* 44 (2): 447-53
- W.J gowas. 1990. Fetal methemoglobinemia in a dental nurse, a case of sodium nitrite
poisoning. *British journal of general practice*, November. 470-2.
- Amel, K., Hassena, M. A., & Kerroum, D. (2012). Isotherm and Kinetics Study of Biosorption
of Cationic Dye onto Banana Peel. *Energy Procedia*, 19, 286-295.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.208>
- Rivera, E.M., Araiza, M., Browstow, W., Castano, V.N., Daiz-Estrada, J.R. and Rodriguez, R.J.,
1999. Synthesis of hydroxyapatite from eggshells, *Mater. Lett.* 41: 128-134
- Jih-Hsing Chang , *et al.* 2023. Study on adsorption of ammonium and nitrate in
wastewater by modified biochar. February 2023
- M.J. Ahmed, *et al.* 2023. Recent advances on activated carbon-based materials for
nitrate adsorption: A review

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก- 1 ศึกษาการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานไนเตรท

- 1) ชั่งโพแทสเซียมไนเตรท 0.7563 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นในปิกรเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตร 1 ลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
- 2) ปิเปตสารละลายในข้อ 1 มา 1, 5, 10 และ 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานไนเตรทเข้มข้น 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3) นำไปวัดไนเตรทด้วยไอออนซีเล็คทีฟอิเล็กโทรด

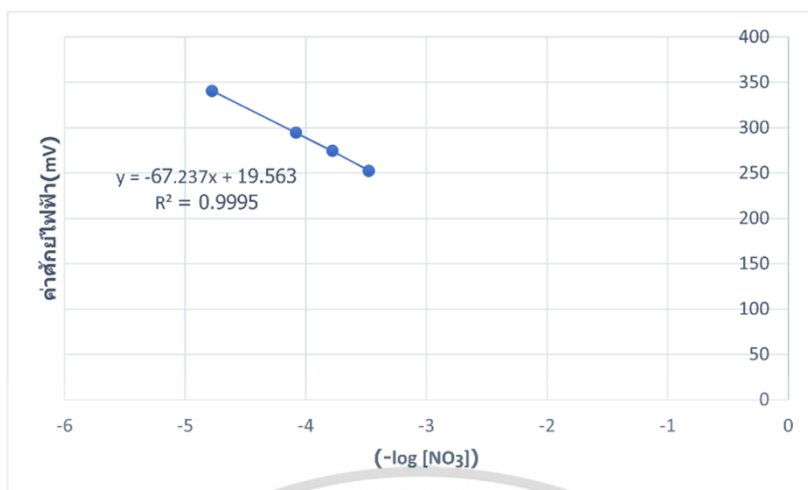
การวิเคราะห์ข้อมูล

- 1) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐาน และ $\log [\text{NO}_3^-]$ โดยต้องเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไนเตรทจาก มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น M ก่อน แล้วหาสมการเส้นตรงเพื่อหาค่าความชัน
- 2) นำศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณหาปริมาณไนเตรทในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก-1 มาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไนเตรทกับค่าศักย์ไฟฟ้า

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไนเตรท	ค่าศักย์ไฟฟ้า
1	325.8
5	287.6
10	274.6
20	246.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาร

ละลายมาตรฐานไนเตรทกับค่าศักย์ไฟฟ้า

ภาคผนวก ก- 2 ศึกษาผลของระยะเวลาในการกำจัดที่เหมาะสม

ภาคผนวก ก- 2.1 ผลของความเข้มข้นในระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสม

ระยะเวลา (นาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)
30	6.70	6.63	6.89
60	6.51	6.32	6.29
90	5.71	5.62	5.58
120	5.62	5.58	5.52
240	5.60	5.67	5.81

ภาคผนวก ก- 2.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับในระยะเวลาที่เหมาะสม

ระยะเวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30	33.00	33.70	31.10	32.60	1.35
60	34.90	36.80	37.10	36.27	1.19
90	42.90	43.80	44.20	43.63	0.67
120	43.80	44.20	44.80	44.27	0.50
240	44.00	43.30	41.90	43.07	1.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก-3 ศึกษาผลของปริมาณในการดูดซับที่เหมาะสม

ภาคผนวก ก-3.1 ผลของความเข้มข้นในปริมาณการดูดซับที่เหมาะสม

ปริมาณ (กรัม)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)
1	7.92	7.29	7.48
2	6.84	6.68	6.53
4	5.30	5.63	5.67
8	5.38	5.73	5.85
16	5.77	5.92	5.48

ตารางที่ ก-3.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เหมาะสม

ปริมาณ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	20.80	27.10	25.20	24.37	3.23
2	31.60	33.20	34.70	33.17	1.55
4	47.00	43.70	43.30	44.67	2.03
8	46.20	42.70	41.50	43.47	2.44
16	42.30	40.80	45.20	42.77	2.24

ภาคผนวก ก-4 ศึกษาผลของกรด-ด่าง (pH) การดูดซับที่เหมาะสม

ภาคผนวก ก-4.1 ผลของความเข้มข้นในความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

pH	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)
ปกติ	5.11	5.29	5.33
2	5.27	5.16	5.32
4	6.73	6.89	7.01
6	7.56	7.13	7.51
8	8.50	8.67	8.33
10	9.22	8.97	9.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับในปริมาณกรด-ด่างที่เหมาะสม

pH	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ปกติ	48.90	47.10	46.70	47.56	1.17
2	47.30	48.40	46.80	47.5	0.82
4	32.70	31.10	29.90	31.23	1.40
6	24.40	28.70	24.90	26.00	2.35
8	15.00	13.30	16.70	15.00	1.70
10	7.80	10.30	9.40	9.17	1.27

ภาคผนวก ก-5 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับที่เหมาะสม

ภาคผนวก ก-5.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับที่เหมาะสม

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)
1	0.85	0.86	0.88
5	3.70	3.43	3.65
10	5.68	5.49	5.74
15	8.02	8.13	8.32
20	11.43	11.68	11.67

ภาคผนวก ก-5.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับในความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม

ความเข้มข้น (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	15.00	14.00	12.00	13.67	1.53
5	26.00	31.40	27.00	28.13	2.87
10	43.20	45.10	42.60	43.63	1.31
15	46.53	45.80	44.53	45.62	1.01
20	42.85	41.60	41.65	42.03	0.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก-6 ศึกษาผลของการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

ภาคผนวก ก-6.1 ผลของความเข้มข้นเปลือกไข่ไก่เทียบกับเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่

วัสดุดูดซับ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)
เปลือกไข่ไก่	5.43	5.78	5.51
เปลือกไข่ไก่ ที่นำกลับมาใช้ใหม่	6.53	6.69	6.28

ภาคผนวก ก-6.2 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับเปลือกไข่ไก่เทียบกับเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่

วัสดุดูดซับ	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
เปลือกไข่ไก่	45.70	42.20	44.90	44.27	1.83
เปลือกไข่ไก่ ที่นำกลับมาใช้ใหม่	34.70	33.10	37.20	35.00	2.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab

ภาคผนวก ข-1 ผลของระยะเวลาในการดูซ้ำที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ระยะเวลาที่สัมผัสไม่มีอิทธิพลต่อการดูซ้ำในตรงอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ระยะเวลาที่สัมผัสมีอิทธิพลต่อการดูซ้ำในตรงอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05) P-Value 0.000

เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือระยะเวลาที่สัมผัสมีอิทธิพลต่อการดูซ้ำในตรงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-1.1 ANOVA (Onw-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P- Value
ระยะเวลา	4	328.51	82.127	80.94	0.000
Error	10	10.15	1.015		
Total	14	338.65			

ตารางที่ ข-1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูซ้ำในตรงที่ใช้ระยะเวลาที่สัมผัส 30 , 60 , 90 , 120 และ 240 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ระยะเวลาที่สัมผัส	N	Mean	StDev	95% CI
30	3	32.600	1.345	(31.304 , 33.896)
60	3	36.267	1.193	(34.971 , 37.562)
90	3	43.633	0.666	(42.338 , 44.929)
120	3	44.267	0.503	(44.971 , 45.562)
240	3	43.067	1.069	(41.771 , 44.362)

จากการทดสอบจากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของระยะเวลาที่สัมผัสต่อการดูซ้ำในตรงโดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ระยะเวลาที่สัมผัส 30, 60, 90, 120 และ 240 นาที

ระยะเวลาที่สัมผัส	N	Mean	Grouping
120	3	42.267	A
90	3	43.633	A
240	3	43.067	A
60	3	36.267	B
30	3	32.600	C

ภาคผนวก ข-2 ผลของปริมาณในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ปริมาณเปลือกไข่ไก่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ปริมาณเปลือกไข่ไก่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05) P-Value 0.000

เนื่องจากค่า P-Value ค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ปริมาณเปลือกไข่ไก่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-2.1 ANOVA (Onw-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P- Value
ปริมาณ	4	917.36	229.341	41.05	0.000
Error	10	55.87	5.587		
Total	14	937.24			

ตารางที่ ข-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้ปริมาณเปลือกไข่ไก่ที่ 1, 2, 4, 8 และ 16 กรัม

ปริมาณเปลือกไข่ไก่	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	24.37	3.23	(21.33, 27.41)
2	3	33.167	1.550	(30.126, 32.207)
4	3	44.67	2.03	(41.63, 47.71)
8	3	43.47	2.44	(40.43, 46.51)

16	3	42.77	2.24	(39.73 , 45.81)
----	---	-------	------	-----------------

จากการทดสอบจากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของปริมาณต่อการดูดซับไนเตรทโดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข-2.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ปริมาณเปลือกไข่ไก่ ที่ 1 , 2 , 4 , 8 และ 16 กรัม

ปริมาณเปลือกไข่ไก่	N	Mean	Grouping
4	3	44.67	A
8	3	43.47	A
16	3	42.77	A
2	3	33.167	B
1	3	24.37	C

ภาคผนวก ข-3 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ความเป็นกรด-ด่างไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05) P-Value 0.000

เนื่องจากค่า P-Value ค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-3.1 ANOVA (Onw-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P- Value
pH	5	3867.92	773.584	330.59	0.000
Error	12	28.08	2.340		
Total	17	3896.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเป็นกรด-ด่าง ที่พีเอชปกติ, 2 , 4 , 6 , 8 และ 10 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

pH	N	Mean	StDev	95% CI
ปกติ	3	47.567	1.172	(45.642 , 49.491)
2	3	47.500	0.819	(45.452 , 49.548)
4	3	31.233	1.405	(29.186 , 33.281)
6	3	26.00	2.35	(23.95 , 28.05)
8	3	15.000	1.700	(12.952 , 17.048)
10	3	9.167	1.266	(7.119 , 11.214)

จากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับไนเตรท โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข-3.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเป็นกรด-ด่างที่พีเอชปกติ, 2 , 4 , 6 , 8 และ 10

pH	N	Mean	Grouping
ปกติ	3	47.567	A
2	3	47.500	A
4	3	31.233	B
6	3	26.00	C
8	3	15.000	D
10	3	9.167	E

ภาคผนวก ข-4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นในการดูดซับที่เหมาะสม

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ความเข้มข้นไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ความเข้มข้นมีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05) P-Value 0.000

เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ความเข้มข้นมีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-4.1 ANOVA (Onw-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P- Value
ความเข้มข้น	4	2214.95	553.738	200.41	0.000
Error	10	27.63	2.763		
Total	14	2242.58			

ตารางที่ ข-4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 1 , 5 , 10 , 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ความเข้มข้น (mg/L)	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	13.667	1.528	(11.528, 15.805)
5	3	28.13	2.87	(26.00, 30.27)
10	3	43.633	1.305	(41.495,45.772)
15	3	45.620	1.012	(43.482,47.758)
20	3	42.033	0.708	(39.895,44.172)

จากการทดสอบจากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับไนเตรทโดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข-4.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 1 , 5 , 10 , 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้น (mg/L)	N	Mean	Grouping
15	3	45.620	A
10	3	43.633	A
20	3	42.033	A
5	3	28.13	B
1	3	13.677	C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข-5 ผลของความเข้มข้นของตัวดูดซับที่นำกลับมาใช้ใหม่

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ความเข้มข้นไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 : ความเข้มข้นมีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05) P-Value 0.004

เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ H_0 คือ ความเข้มข้นมีอิทธิพลต่อการดูดซับไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ข-5.1 ANOVA (Onw-way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P- Value
เปลือกไข่ไก่	1	128.81	128.807	33.75	0.004
Error	4	15.27	3.817		
Total	5	144.07			

ตารางที่ ข-5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการดูดซับไนเตรทโดยใช้เปลือกไข่ไก่ และเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตัวดูดซับ	N	Mean	StDev	95% CI
เปลือกไข่ไก่	3	44.27	1.83	(41.14 , 47.40)
เปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่	3	35.00	2.07	(31.87 , 38.13)

จากการทดสอบจากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับไนเตรทโดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ข-5.3 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการดูดซับไนเตรทโดยใช้เปลือกไข่ไก่ และเปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่

ตัวดูดซับ	N	Mean	Grouping
เปลือกไข่ไก่	3	44.27	A
เปลือกไข่ไก่ที่นำกลับมาใช้ใหม่	3	35.00	B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาวธิดา สมศักดิ์ รหัสนักศึกษา 63050326
นางสาวปาริชาติ มาลัย รหัสนักศึกษา 63050334
นางสาวอรณิชา เกษศรีรัตน์ รหัสนักศึกษา 63050364

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การดูดซับไนเตรทในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกไข่ไก่

ชื่อภาษาอังกฤษ Adsorption of nitrate in synthetic wastewater using Egg shells

ปีการศึกษา 2566

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 12.21 %

ลงชื่อ...*ธิดา สมศักดิ์*.....

(นางสาวธิดา สมศักดิ์)

นักศึกษา

ลงชื่อ...*ปาริชาติ มาลัย*.....

(นางสาวปาริชาติ มาลัย)

นักศึกษา

ลงชื่อ...*อรณิชา เกษศรีรัตน์*.....

(นางสาวอรณิชา เกษศรีรัตน์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบ โครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษา จริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....*[Signature]*.....

(ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้