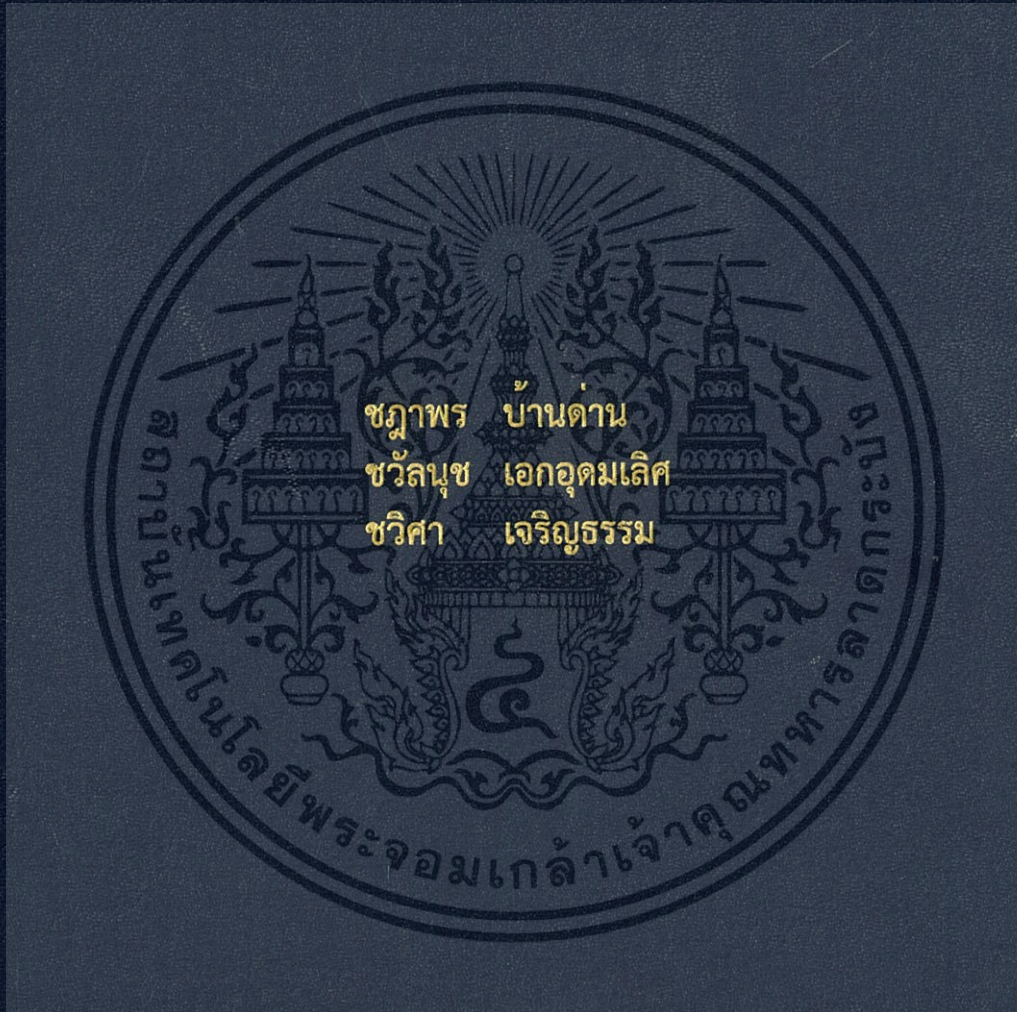


ความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียโดยเปลือกสับประรดที่  
ดัดแปรด้วยเฟอร์ริกไอออน  
CAPABILITY FOR NITRATE REMOVAL FROM WASTEWATER  
BY FERRIC ION-MODIFIED PINEAPPLE PEELS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

ความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียโดยเปลือกสับปรดที่  
ดัดแปรผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน  
CAPABILITY FOR NITRATE REMOVAL FROM WASTEWATER  
BY FERRIC ION-MODIFIED PINEAPPLE PEELS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศศกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควศชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศศกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAPABILITY FOR NITRATE REMOVAL FROM WASTEWATER  
BY FERRIC ION-MODIFIED PINEAPPLE PEELS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ**

ความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียโดยเปลือกสับประรดที่  
ดัดแปรผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน

Capability for Nitrate Removal From

Wastewater by Ferric Ion-Modified Pineapple Peels

**ชื่อนักศึกษา**

นางสาวชฎาพร บ้านด่าน รหัสนักศึกษา 57050579

นางสาวชวัลนุช เอกอุดมเลิศ รหัสนักศึกษา 57050585

นางสาวชวิตา เจริญธรรม รหัสนักศึกษา 57050586

**ปริญญา**

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

**ภาควิชา**

เคมี

**ปีการศึกษา**

2560

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี  
สิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการ	
ดร.สามารถ คงทวีเลิศ กรรมการ	
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียโดยเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชญาพร บ้านด่าน รหัสนักศึกษา 57050579 นางสาวชวัลนุช เอกอุดมเลิศ รหัสนักศึกษา 57050585 นางสาวชวิศา เจริญธรรม รหัสนักศึกษา 57050586
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียโดยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน เปลือกสับปะรดที่เตรียมขึ้นถูกนำไปปรับสภาพด้วย NaOH 2.0 % (w/v) ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเคลือบผิวด้วยไอออนของเหล็ก ( $Fe^{3+}$ ) ตามสถานะที่ระบุในงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) จากการศึกษาพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุที่เตรียมขึ้นมีค่า  $144 \pm 47.42$  มิลลิกรัมต่อกรัม (หลังปรับสภาพด้วย NaOH) เหลือ  $75.1 \pm 21.10$  มิลลิกรัมต่อกรัม (ภายหลังการเคลือบเหล็กจำพวกเฟอร์ริกบนเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยต่าง) วัสดุที่เตรียมขึ้นมีความสามารถในการดูดซับเฟอร์ริกไอออนได้สูงสุด 12 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการทดสอบการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำ พบว่าวัสดุที่เตรียมขึ้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตสูงกว่าเปลือกสับปะรดก่อนปรับสภาพ โดยวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 93.37% เมื่อใช้ปริมาณวัสดุเท่ากับ 16 กรัมต่อลิตร ในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นาน 10 ชั่วโมง ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำ พบว่าเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยเฟอร์ริกมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเท่ากับ 94.25% เมื่อใช้ปริมาณวัสดุเท่ากับ 80 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไนเตรท 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 2 ชั่วโมง

คำสำคัญ : การกำจัดฟอสเฟต การกำจัดไนเตรท การดัดแปรพื้นผิววัสดุ การปรับสภาพเบื้องต้น เปลือกสับปะรด

Title	Capability for Nitrate Removal From Wastewater by Ferric Ion-Modified Pineapple Peels	
Students	Miss Chadaporn Bandan	Student ID 57050579
	Miss Chawannuch Ekudomlert	Student ID 57050585
	Miss Chawisa Charoentham	Student ID 57050586
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Asst.Prof.Dr. Usarat Thawornchaisit	

### Abstract

This special project studied capability for nitrate removal from wastewater by NaOH-pretreated and ferric ion-modified pineapple peels. The pineapple peels were prepared by treatment with 2.0% NaOH at 50°C for 24 hours, followed by surface coating with ferric ion. According to the procedure reported by Kantapat (2558). Results showed that M.B.N. values decreased from 144±47.72 mg/g (after NaOH-treatment) to 75.1±21.10 mg/g. When ferric ion was sorped to the NaOH-pretreated pineapple peels. The sorption capacity of the prepared materials for ferric ion was highest at 12 mg/g. Results from the orthophosphate removal study showed that the prepared materials had higher phosphate removal efficiency than the untreated pineapple peels. Phosphate removal efficiency of 93.37% was achieved when the pineapple peels of 16 g/L were in contact with an aqueous solution of 2.5 mg/L orthophosphate for 10 hours. Results from nitrate removal study showed that efficiency for nitrate removal of the ferric-modified pineapple peels was 94.25% when the materials of 80 g/L was in contact with an aqueous solution of 2 mg-N/L for 2 hours.

Keywords : removal of phosphate, removal of nitrate, surface modification, pretreatment, pineapple peels

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นตามแผนการศึกษาของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง และให้ความอนุเคราะห์กับงานวิจัยนี้ ดังนี้ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาสละเวลาให้ความรู้และคำแนะนำตลอดทำการวิจัย รวมถึงคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และดร.สามารถ คงทวีเลิศ ที่ให้คำแนะนำทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณพี่ๆนักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาเคมีและชีววิทยาที่ช่วยจัดหาสารเคมี และสอนการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ต่างๆ ขอขอบคุณคุณกานตพัฒน์ และคุณณัฐชาติให้คำปรึกษางานวิจัย รวมถึงร้านขายผลไม้ที่ซอยเก็กงาม 2 ที่เอื้อเพื่อเปลือกสับปะรดที่ใช้เป็นวัสดุหลักของงานวิจัยนี้ และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้เป็นที่รัก ผู้ให้กำลังใจงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษนี้จะ เป็นประโยชน์ต่อผู้ทำการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้อง หากมีข้อเสนอแนะประการใดเพื่อปรับปรุงให้ดีขึ้น ทางผู้จัดทำขอน้อมรับข้อเสนอและคำติชมด้วยความยินดี ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

ชฎาพร บ้านด่าน  
ชวัลนุช เอกอุดมเลิศ  
ชวิศา เจริญธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 อุตสาหกรรมสับปรดในประเทศไทย.....	4
2.2 วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส.....	5
2.2.1 เซลลูโลส.....	6
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส.....	6
2.2.3 ลิกนิน.....	7
2.3 กระบวนการปรับสภาพ.....	8
2.4 การตัดแปรรูปผิวของวัสดุ.....	9
2.5 การดูดซับ .....	10
2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	12
2.6.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์.....	13
2.6.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช.....	14
2.7 ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ .....	15
2.7.1 แหล่งที่มาของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ.....	16
2.7.2 ผลกระทบฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ.....	16
2.8 สารประกอบไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	17
2.9 ผลกระทบจากสารประกอบไนโตรเจน .....	19
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	22
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	26
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	36
เอกสารอ้างอิง .....	37
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับปะรด.....	5
2.2 ลำดับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	12
2.3 ความแตกต่างในการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	12
2.4 การจำแนกประเภทของฟอสฟอรัส.....	16
3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ.....	23
4.1 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู.....	27
4.2 ผลการศึกษาการเติมเฟอร์ริกบนเปลือกสับปะรด.....	29
4.3 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และพรุนดลิกของการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย $Fe^{3+}$ .....	34
ก.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตสำหรับทำกราฟมาตรฐาน.....	46
ก.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรทสำหรับทำกราฟมาตรฐาน.....	48
ข.1 ผลการวิเคราะห์ Methylene Blue Number ของเปลือกสับปะรดชนิดต่างๆ.....	53
ข.2 ผลการศึกษาปริมาณเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) และความจุในการดูดซับเหล็กในการเคลือบผิวสับปะรด.....	58
ข.3 ผลการทดสอบการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต เข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	59
ข.4 ผลการทดสอบการกำจัดไนเตรท ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรที่ระยะเวลาเวลาสัมผัสต่างกัน.....	60
ข.5 ผลการทดสอบการกำจัดไนเตรท ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรที่ปริมาณวัสดุดูดซับต่างกัน.....	62
ข.6 ผลการทดสอบการกำจัดไนเตรทที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	63
ข.7 ผลของค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และพรุนดลิกของการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย $Fe^{3+}$ .....	64

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋อง .....	4
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส	6
2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส .....	6
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน .....	7
2.5 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน .....	7
2.6 การปรับปรุงเซลลูโลสตัวอย่าง .....	9
2.7 การเพิ่มประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน .....	10
2.8 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น .....	11
2.9 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ .....	14
2.10 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช .....	15
2.11 วัฏจักรไนโตรเจน .....	19
4.1 ลักษณะของวัสดุทั้ง 3 ชนิด .....	26
4.2 สเปกตรัม FT-IR ของเปลือกสับปะรดชนิดต่างๆ .....	28
4.3 ความสามารถในการกำจัดไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรพื้นผิววัสดุด้วย $Fe^{3+}$ ที่เวลา สัมผัสแตกต่างกัน .....	30
4.4 ความสามารถในการกำจัดไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรพื้นผิววัสดุด้วย $Fe^{3+}$ ที่ ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน .....	32
4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในการดูดซับไนเตรท .....	33
4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชในการดูดซับไนเตรท .....	33
4.7 ความสามารถในการกำจัดไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรพื้นผิววัสดุด้วย $Fe^{3+}$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน .....	35
ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทธิลีนบลู .....	43
ก.2 กราฟมาตรฐานของเฟอร์ริกไอออน .....	44
ก.3 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต .....	46
ก.4 กราฟมาตรฐานไนเตรท .....	49
ก.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพ ด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย $Fe^{3+}$ .....	50
ก.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพ ด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย $Fe^{3+}$ .....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือน้ำเสียจากกิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนิยมใช้วิธีการเพิ่มอากาศให้กับน้ำเสียให้มากที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่จะทำโดยการตีน้ำหรือพ่นน้ำเพื่อให้น้ำสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยมีเป้าหมายสำคัญคือบำบัดสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำเสียรวมทั้งกำจัดแอมโมเนียที่เป็นผลผลิตจากการย่อยสลาย (สายพิณและคณะ, 2550) ภายใต้สภาวะดังกล่าวไม่เพียงทำให้จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ทำงานได้ดี จุลินทรีย์จำพวกหนึ่งสามารถทำให้แอมโมเนียที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีนกลายเป็นไนเตรท ถึงแม้ว่าไนเตรทที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนียไม่นับว่าเป็นพิษโดยตรงต่อสัตว์น้ำ แต่การสะสมไนเตรทในน้ำในปริมาณมากสามารถก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำอันเนื่องมาจากความสามารถของไนเตรทในการเป็นสารอาหารของพืชน้ำ เช่น เกิดภาวะยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) กระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชน้ำแพลงก์ตอนและสาหร่าย ลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเกิดผลเสียต่อสัตว์น้ำ และคุณภาพน้ำโดยรวม (พรภักและปิยาภรณ์, 2552) ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบไนโตรเจนไม่ว่าจะเป็นการบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือจากกิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จึงจำเป็นเพื่อลดปริมาณไนโตรเจน โดยเฉพาะไนเตรทให้มีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

วิธีการดูดซับจัดเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการควบคุมและบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย เงินลงทุนน้อย และใช้สถานที่จำกัด (รวินทร์และโกวิทย์, 2554) ถ่านกัมมันต์จัดเป็นวัสดุดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับและกำจัดสารเจือปนในน้ำได้หลายชนิด ที่สำคัญได้แก่ สารอินทรีย์และโลหะหนักในน้ำ (สุภาวดีและสมสกุล, 2559) การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาได้นำวัสดุต่างๆ ได้แก่ ถ่านลอย และวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ มาทดสอบเป็นตัวดูดซับเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ แต่เนื่องจากมีราคาแพง อีกทั้งการรายงานถึงความสามารถในการกำจัดไอออนลบในน้ำ เช่น ฟอสเฟตหรือไนเตรทมีอยู่อย่างจำกัด ปัจจุบันจึงได้มีงานวิจัยที่ศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวดูดซับในการกำจัดไอออนลบในน้ำด้วยการใช้ความร้อนหรือสารเคมีในการปรับปรุงโครงสร้างหรือสมบัติของวัสดุดูดซับ (รัตนาภรและคณะ, 2554) ประกอบกับงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยการแทนที่ไอออนบวกของเหล็กหรืออะลูมิเนียมสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำให้กับวัสดุดังกล่าวได้ Kim(2008) กันตพัฒน์(2558) ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่างและเคลือบผิวด้วยเหล็กจำพวกเฟอร์ริกเพื่อใช้กำจัดไอออนลบในน้ำและพบว่าวัสดุดังกล่าวสามารถกำจัดฟอสเฟตในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ขาดการศึกษาถึงความสามารถของวัสดุดังกล่าวในการกำจัดไนเตรทในน้ำ (กันตพัฒน์, 2558) โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่างและเคลือบผิวด้วยเหล็กจำพวกเฟอร์ริกในการกำจัดไนเตรทในน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วยต่างและเคลือบผิวด้วยโอออนของเหล็กในการกำจัดไนเตรทในน้ำ
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับจากเปลือกสับปะรดในการกำจัดไนเตรทในน้ำ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เปลือกสับปะรดที่ใช้ในการศึกษา คือ เปลือกสับปะรดพันธุ์ *ศรีราชา* ซึ่งเตรียมตัวอย่างอ้างอิงวิธีการตามงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558)

2. การเตรียมเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้สภาวะดังนี้ ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.0% w/v และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

3. การเคลือบผิวเปลือกสับปะรดด้วยเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ใช้สภาวะดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ พีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 2 และแช่ในน้ำ 30 นาที ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy เปลือกสับปะรดที่ผ่านการเคลือบผิวจะถูกนำไปแช่ในสารละลาย  $NH_4OH$  เข้มข้น 1.0 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที นำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้แก่ ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

4. การยืนยันความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของเปลือกสับปะรดที่พัฒนาขึ้น ทำโดยนำวัสดุที่เตรียมได้ไปทำการดูดซับฟอสเฟต สภาวะที่ใช้ทดสอบคือ ปริมาณวัสดุ 0.8 กรัม สารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ คือ 10 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือด้วยวิธีแอสคอร์บิกแอซิด

5. การทดสอบความสามารถในการกำจัดสารละลายไนเตรท

*ตัวแปรต้นที่ศึกษา* ได้แก่

-ระยะเวลาสัมผัส : 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง

-ปริมาณวัสดุดูดซับ : 0.25, 0.50, 1.0, 1.5, 2.0, และ 3.0 กรัม

-ความเข้มข้นของไนเตรท : 1, 2, และ 4 mg-N/L

*ตัวแปรตาม* คือ ความเข้มข้นที่เหลือของไนเตรทในน้ำ

6. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับไนเตรทในน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับไนเตรทกับความเข้มข้นสารละลายไนเตรท ณ สภาวะสมดุล จะถูกนำมาหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับโดยไอโซเทอร์มที่ใช้ ได้แก่ แลงเมียร์ และฟรุนดลิช

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วัสดุดูดซับที่สามารถกำจัดไนเตรทในน้ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการลดภาวะมลพิษทางน้ำ และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมได้
2. เป็นแนวทางในการจัดการและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร



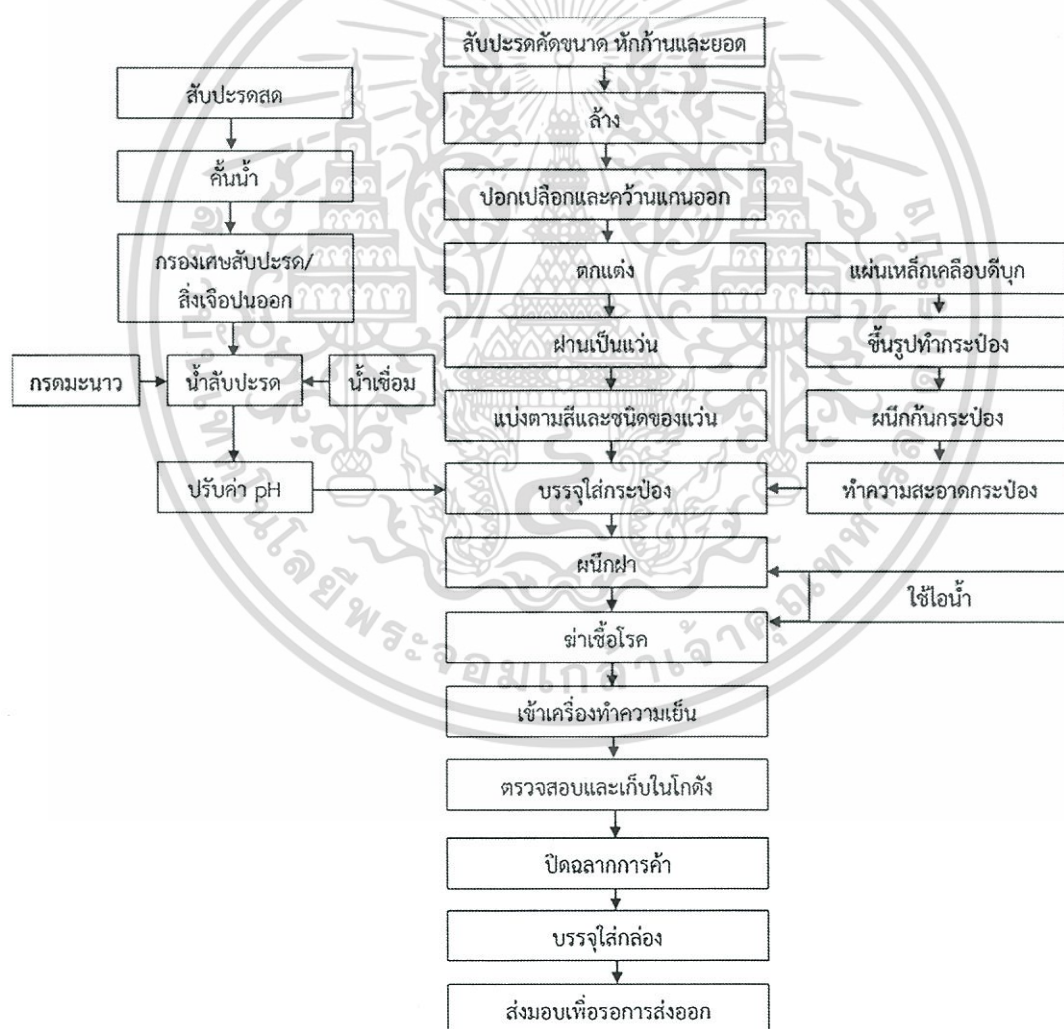
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย

สับปะรดเป็นผลไม้อุตสาหกรรมและบริโภคผลสดที่สำคัญของประเทศไทย นิยมปลูกกันมากในภาคตะวันตก และภาคตะวันออกของไทย และเป็นแหล่งปลูกสับปะรดที่สำคัญ รวมไปถึงเป็นพืชที่ขยายพันธุ์ได้ง่าย สามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า ปัจจุบันประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งออกสับปะรดกระป๋องในรูปผลิตภัณฑ์เป็นอันดับต้นๆ ของโลก ผลิตภัณฑ์หลักจากสับปะรดที่ประเทศไทยส่งออก ได้แก่ สับปะรดกระป๋อง น้ำสับปะรด สับปะรดแช่แข็ง สับปะรดแห้ง และเงาะสอดไส้สับปะรด ซึ่งก่อนจะนำสับปะรดมาแปรรูปในแบบต่างๆ จะต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น ตัดยอด ลำต้น รวมถึงการปอกเปลือกก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตสับปะรดกระป๋อง  
ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกระบวนการดังกล่าวมีส่วนที่เป็นเศษเหลือจากสับประรดในโรงงานอุตสาหกรรมสับประรดมากที่สุด คือเศษเปลือกกล้วยละ 29-34 ของผล (สุมน, 2547 อ้างอิงในกันตพัฒน์, 2558) ซึ่งเปลือกสับประรดมีองค์ประกอบทางเคมี แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับประรด

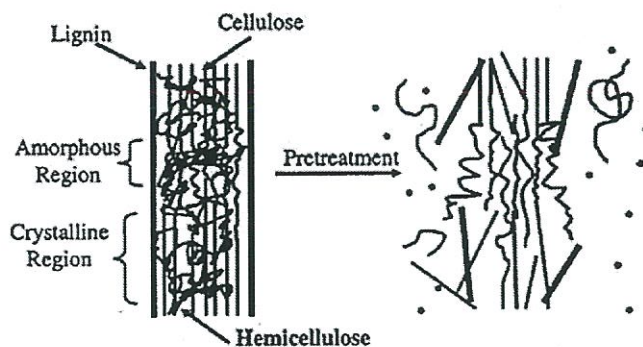
องค์ประกอบของเปลือกสับประรด	%น้ำหนักแห้ง
Dry Matter	21.95
Moisture	78.05
Crude Fiber	27.35
Ash	3.46
NDF (Neutral Detergent Fiber)	84.60
ADF (Acid Detergent Fiber)	40.11
ADL	6.86
Cellulose	40.11
Hemicellulose	37.36
Lignin	6.86

ที่มา : อาทิตย์ และศรเทพ (2556) อ้างอิงในกันตพัฒน์ (2558)

ในปัจจุบันได้มีการนำเปลือกสับประรดมาทำเป็นอาหารให้สัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น โคเนื้อ โคนม เป็นต้น รวมไปถึงเป็นอาหารหยาบหลักแทนหญ้า เสริมอาหารชั้นเลี้ยงโคนมพันธุ์ผสมเพศผู้ (จินดา และคณะ, 2530) หรือการใช้เปลือกสับประรดแห้งระดับต่างๆ ในสูตรอาหารชั้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของฟางข้าวสำหรับโคนม (จินดาและคณะ, 2528) จะเห็นได้ว่าเปลือกสับประรดนำไปแปรรูปไปเป็นอาหารสัตว์ต่างๆ แต่ยังสามารถนำส่วนประกอบทางเคมีของเปลือกสับประรด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน มาพัฒนาเป็นตัวดูดซับ และเป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้วัตถุดิบที่มีในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์ และไม่เกิดการสูญเสียทรัพยากรธรรมชาติ ลดการเกิดมลภาวะ รวมไปถึงเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุได้

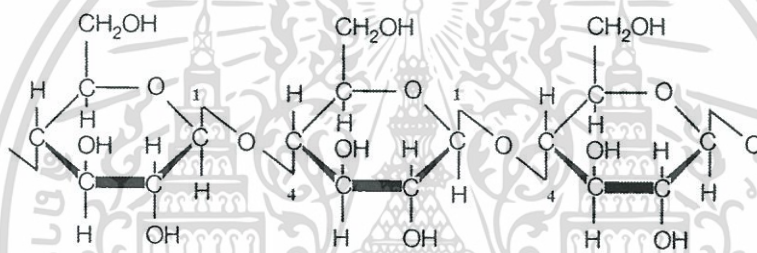
## 2.2 วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose material)

วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (รูปที่ 2.2) โดยทั่วไปพบเซลลูโลสร้อยละ 40-60 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20-30 และ ลิกนินร้อยละ 15-30 (Lee et al., 2008) โดยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกส้ม รวมถึงเปลือกสับประรดจะประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักแห้ง โดยจะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมากที่สุด (พิชามญช์และคณะ, 2556 อ้างอิงในกันตพัฒน์, 2558)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส  
ที่มา : Lee et al. (2008)

2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ของพืชอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ปริมาณที่พบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช (Eriksson, 1990 ; Goshadrou et al., 2011)

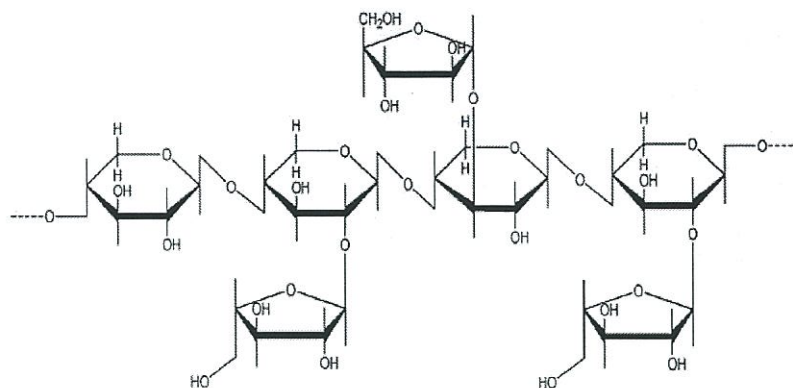


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา : ชัยนันท์ และเฉลิม (2555) อ้างอิงในกันตพัฒน์ (2558)

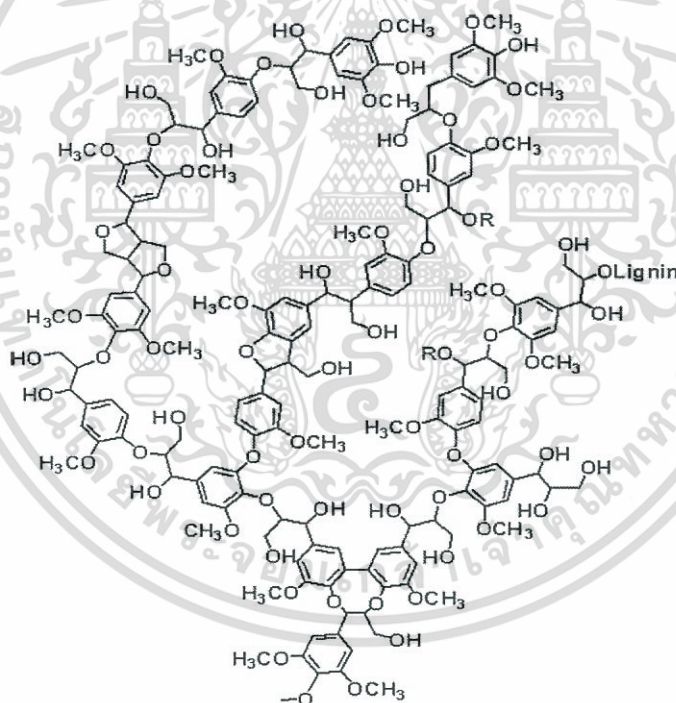
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ของน้ำตาลชนิดต่างๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไสโลส และอะราบิโนส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนนกาแลคแตน และอะราบิแนน (Bastawde, 1992) มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย โดยในพอลิเมอร์ไซแลน ดี-ไซโลสมีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 85-93 ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น กลูโคส กรดกลูควิโรนิก กรดกาแลคตุโรนิก จะพบปริมาณน้อย (Browing, 1963) โดยไซโลสที่พบจะเชื่อมด้วยพันธะเบตา 1,4 ไกลโคซิดิก (Browing, 1963; Bastawde, 1992; Altintas et al., 2002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน  
ที่มา : Bastawde, (1992)

2.2.3 ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช พบในปริมาณที่แตกต่างไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลล์ลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ (Cheng et al., 2008) ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน  
ที่มา : Eriksson, 1990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 กระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment)

ในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบจะกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนคุณสมบัติทางด้านกายภาพคือ ทำให้ชั้นเมทริกซ์ของวัสดุลิกโนเซลลูโลสถูกทำลาย ซึ่งมีผลทำให้เอนไซม์สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำงานได้ง่ายขึ้น จุดประสงค์ของการปรับสภาพวัตถุดิบ คือ เป็นการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มความพรุนของวัสดุ สามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีดังนี้

### 1. วิธีทางกายภาพ (Physical pretreatment)

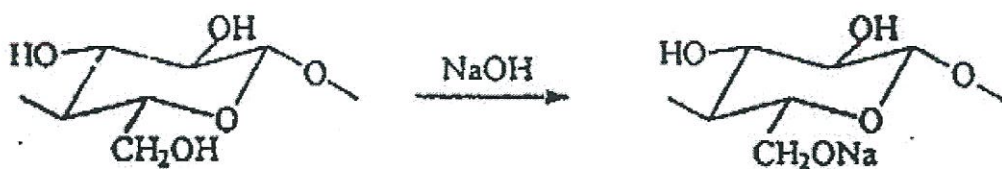
1.1 การใช้แรงทางกล (Mechanical comminution) วิธีนี้ทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กกลงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทุบ การบด การโม่ การเขย่าวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดผลึก (cellulose crystallinity) และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ความสามารถในการลดขนาดจะขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุนั้น (Sun and Cheng, 2002)

1.2 การไพโรไลซิส (Pyrolysis) วิธีการอบที่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้วัตถุดิบกลายเป็นแก๊สหรือของแข็ง กระบวนการจะทำได้ช้า และการระเหยจะต่ำถ้าใช้อุณหภูมิต่ำ

1.3 การใช้ความร้อน (Thermal heat treatment) เป็นการปรับสภาพของวัตถุดิบเพื่อทำลายเนื้อเยื่อของเซลลูโลส ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะใช้อุณหภูมิมากกว่า 150-180 องศาเซลเซียส แต่ต้องทำให้วัสดุมีขนาดที่เล็กลงก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยวัตถุดิบทางความร้อน

2. วิธีการทางชีวภาพ (Biological pretreatment) วิธีนี้จุลินทรีย์สามารถใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส และยังเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพในย่อยวัตถุดิบด้วยเอนไซม์ ในการใช้จุลินทรีย์ในการปรับสภาพจะย่อยลิกนิน รวมทั้งย่อยเฮมิเซลลูโลสด้วย ส่วนเซลลูโลสถูกย่อยได้น้อยมาก เนื่องจากเซลลูโลสมีความต้านทานในการถูกจุลินทรีย์ย่อยได้มากกว่าส่วนอื่นๆของลิกโนเซลลูโลส (Kumar et al., 2010 อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์, 2558 ; Sreenath et al.,2001 ; Slininger et al., 1982)

3. วิธีการทางเคมี (Chemical pretreatment) การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้ด่าง (Alkali pretreatment) การใช้ด่างในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบมีผลต่อวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส และผลของด่างที่ใช้ในกระบวนการปรับสภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของลิกนินที่มีอยู่ในวัสดุนั้นด้วย (McMillan, 1994) กลไกการทำงานของด่างนั้นจะไปเพิ่มการพองตัวภายในโมเลกุล และสายพันธะภายในของไซแลนในเฮมิเซลลูโลส ซึ่งความพรุนของวัสดุจะเพิ่มขึ้นได้เมื่อทำการกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกภายในพันธะ การใช้ด่างเจือจางในวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีผลทำให้ภายในพันธะเกิดการบวมและเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้วัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้น และลดความเป็นโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ รวมไปถึงสามารถแยกสายโครงสร้างระหว่างลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต อย่างไรก็ตามการใช้ด่างเพื่อปรับสภาพมักจะไม่ค่อยมีผลต่อวัสดุพวกไม้เนื้ออ่อนเท่าไม้เนื้อแข็ง ด่างที่นิยมใช้ในการแยกลิกนินได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ จากงานวิจัย Kim (2008) อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์ (2558) ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพข้าวบาร์เลย์ด้วยแอมโมเนียพบว่าแอมโมเนียที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 24-72 ชั่วโมง สามารถสกัดแยกเอาส่วนของลิกนินออกร้อยละ 50-66

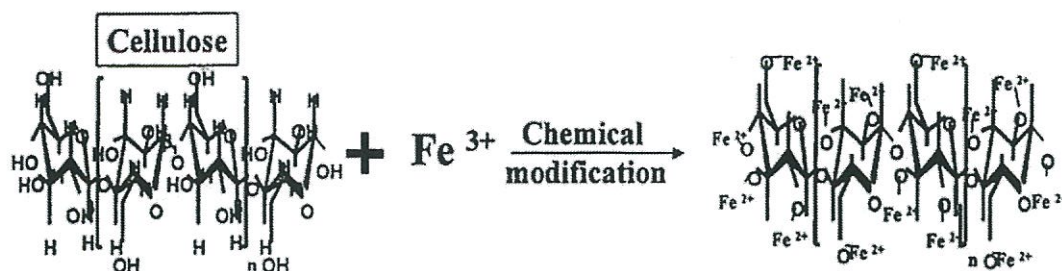


รูปที่ 2.6 การปรับปรุงเซลลูโลสตัวอย่าง  
ที่มา : พอตตา (2547) อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์ (2558)

4. การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี (Physicochemical pretreatment) เป็นวิธีการที่ใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี เช่น การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) วิธีการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (McMillan, 1994) การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (Ammonia fiber explosion, AFEX) วิธีการนี้ใช้แอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิระหว่าง 60-100 องศาเซลเซียส (Alvira et al., 2010)

#### 2.4 การตัดแปรพื้นผิวของวัสดุ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เปลือกสับประดเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส องค์ประกอบที่พบมากที่สุดคือ เซลลูโลส (พิชามญช์ และคณะ, 2556 อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์, 2558) ซึ่งเซลลูโลสมีสมบัติเป็นเส้นใยที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างหลวมๆยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน จากโครงสร้างของเซลลูโลสพบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่ง 2, 3 และ 6 มีความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ดีเป็นส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยามากที่สุด จึงสามารถปรับปรุงลักษณะโครงสร้างทำได้โดยกระบวนการทางเคมี ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของเซลลูโลสให้สูงขึ้น (พอตตา, 2547 อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์, 2558) แต่เนื่องจากสารที่ต้องการกำจัดในงานวิจัยนี้คือ ไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) เป็นประจุลบ ดังนั้นจึงต้องมีการตัดแปรพื้นผิวของวัสดุก่อน เพื่อให้วัสดุมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ โดยขั้นตอนการตัดแปรนั้น เป็นการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันที่เป็นโครงสร้างของวัสดุให้มีความเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการกำจัด (กัณฑ์พัฒน์, 2558) จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาการพัฒนาตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทางการเกษตร โดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลในเซลลูโลสกับไอออนของโลหะหนักเช่น เพอร์ริคไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) เพอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และอะลูมิเนียมไอออน ( $\text{Al}^{3+}$ ) สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกันบนพื้นผิวของวัสดุ ทำให้วัสดุมีประจุบวกเกิดขึ้นที่ผิวดังรูป 2.7 โดยวัสดุนั้นสามารถกำจัดไอออนลบของฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) และสารหนูในน้ำได้ ( $\text{AsO}_4^{3-}$ )



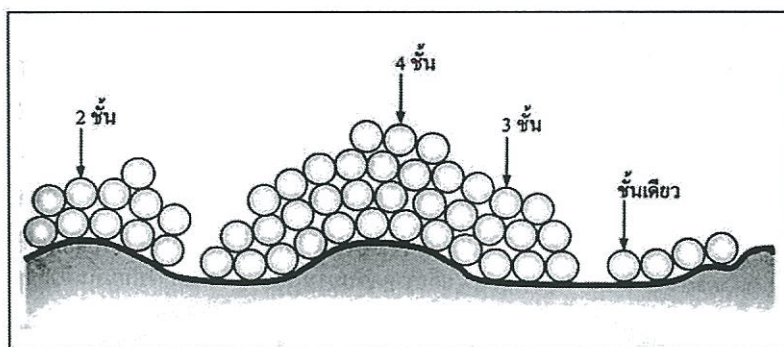
รูปที่ 2.7 การเพิ่มประจุบนพื้นผิวดูดซับโดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน  
ที่มา : Kim (2008) อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์ (2558)

## 2.5 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งการดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับ และติดบนผิวของของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยที่โมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมา เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า Adsorbent คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน โครงสร้างการจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ในการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมจะทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่ต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่ออกโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่นอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

สามารถแบ่งพฤติกรรมดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ได้ 4 แบบ ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physic sorption or Physical Adsorption or Van Der Waals Adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของทั้งตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันหลายชั้น (Multilayered) และจำนวนชั้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ คือการจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงและเสถียรมากขึ้น



รูปที่ 2.8 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น  
ที่มา : นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) มีลักษณะเหมือนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ และมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวสูง มีผลทำให้การดูดซับทางเคมี โดยส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับได้ภายใน สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ที่เกาะอยู่บนตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง

3. การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) เป็นการดูดซับเมื่อตัวถูกดูดซับเป็น ไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับตัวดูดซับ หรืออาจเกิดการแทนที่ของประจุที่ผิวตัวดูดซับกับไอออนของตัว ถูกดูดซับ สามารถใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังตารางที่ 2.2

4. การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนพื้นผิว โดยตัวดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การดูดซับในลักษณะนี้จะมีพลังงานของการดูดซับอยู่ระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี (ลลิตา, 2554 อังอิงในกันตพัฒน์, 2558)

ตารางที่ 2.2 ลำดับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความชอบ
Fe <sup>+3</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	มากที่สุด ↑ น้อยที่สุด
Al <sup>+3</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	
Pb <sup>+2</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	
Ba <sup>+2</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	
Sr <sup>+2</sup>	CNS <sup>-</sup>	
Cd <sup>+2</sup>	CNO <sup>-</sup>	
Zn <sup>+2</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Cu <sup>+2</sup>	Br <sup>-</sup>	
Fe <sup>+2</sup>	Cl <sup>-</sup>	
Mn <sup>+2</sup>	CN <sup>-</sup>	
Ca <sup>+2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Mg <sup>+2</sup>	HSiO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
K <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	F <sup>-</sup>	
Ba <sup>+</sup>		
H <sup>+</sup>		
Li <sup>+</sup>		

ที่มา : พอตตา (2547) อ้างอิงในกัณฑ์พัฒนา (2558)

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างในการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ multilayer	monolayer

ที่มา : Pradthana (2008)

## 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ในปี ค.ศ.1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐาน คือ

1. ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
3. ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆพื้นที่ของตัวดูดซับ
4. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์ และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (วรวิทย์, 2558) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล หรือ เรียกว่า หรือค่าการดูดซับที่สมดุล

$q_m$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

$b$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

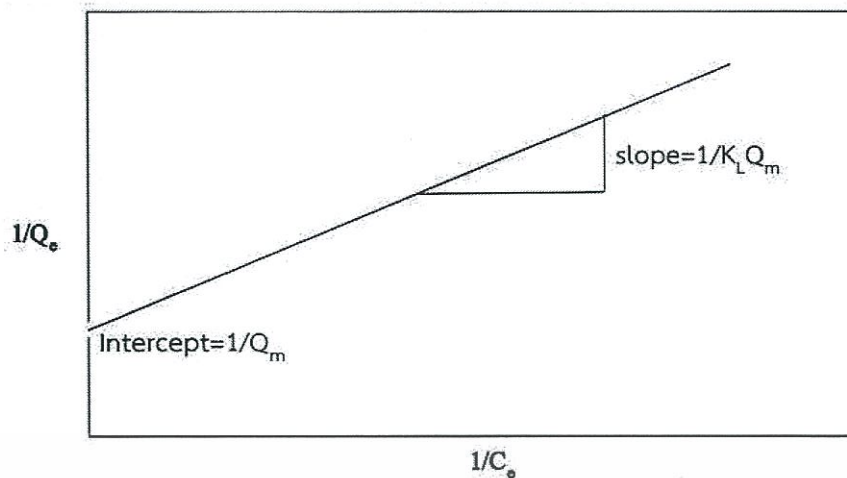
จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ  $\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m}$

สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ค่า  $q_m$  และ  $b$  หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ ) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0}$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่ดี (unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับ เป็นเส้นตรง (linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับดี (favorable) และ  $R_L = 0$  การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

### 2.6.2. ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) สมการแบบฟรุนดลิชดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

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

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

$q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

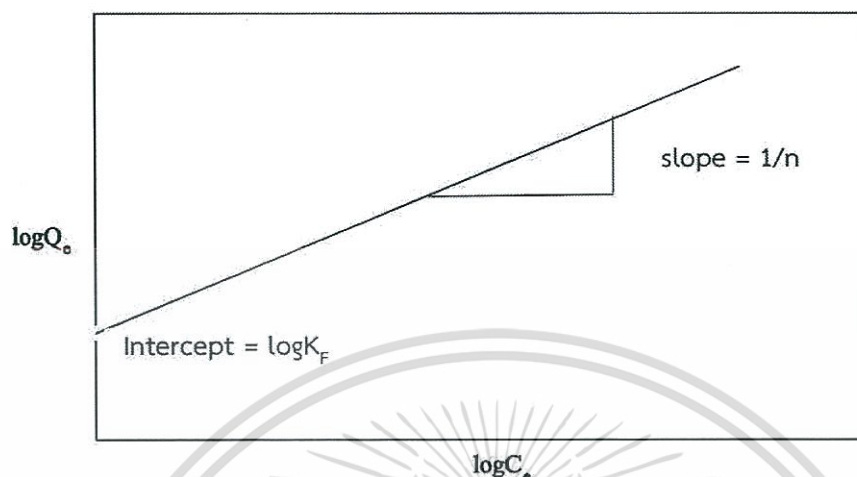
$K_F$  คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

$n$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\log C_e$  กับ  $\log q_e$  โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า  $n$  น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า  $1/n$  อธิบายถึงไอโซเทอร์มของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ (วรวิทย์, 2558)



รูปที่ 2.10 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช

## 2.7 ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ

ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติ และน้ำเสียจะอยู่ในรูปของฟอสเฟต และโมเลกุลของฟอสเฟต ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ซึ่งแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ได้แก่  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  และ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  เป็นต้น

2. โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำทิ้งที่มาจากบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาดเมื่อแตกตัวจะกลายเป็นออร์โธฟอสเฟตซึ่งสารโพลีฟอสเฟตจะประกอบด้วยโมเลกุลของฟอสเฟตมากกว่าหนึ่งหมู่ เช่น  $\text{Na}_3(\text{PO}_4)$ ,  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  และ  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  เป็นต้น

3. สารอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) สารฟอสฟอรัสประเภทนี้จะพบได้ในสารละลาย สารแขวนลอย หรืออินทรีย์วัตถุที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น Nucleic acid, Phospholipids และ Sugar phosphate ยาโก๊ะ (2553) อ้างอิงในกันตพัฒน์ (2558) โดยทั่วไปมักพบออร์โธฟอสเฟต และโพลีฟอสเฟต รวมกันอยู่ในแหล่งน้ำเรียกว่า ฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble reactive phosphorus) (กรมทรัพยากรธรณี, 2553 อ้างอิงในกันตพัฒน์, 2558)

ตารางที่ 2.4 การจำแนกประเภทของฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัส	สูตรทางเคมี
Orthophosphate	$H_2PO_4^{3-}$ , $HPO_4^{2-}$ , $PO_4^{3-}$ , $CaHPO_4$
Inorganic Condensed Phosphates	
– Pyrophosphate	$HP_2O_7^{3-}$ , $P_2O_4^{4-}$ , $CaP_2O_7^{2-}$ , $MnP_2O_7^{2-}$
– TriPolyphosphate	$HP_3O_{10}^{4-}$ , $P_3O_{10}^{3-}$ , $CaP_3O_{10}^{2-}$
– Trimeta Phosphate	$HP_3O_9^{2-}$ , $P_3O_9^{3-}$ , $CaP_3O_9^-$
Organic Orthophosphates	
– Sugar Phosphate	Glucosel-Phosphate, Adenosine
– Inositol Phosphates	Monophosphate
– Phospholipids	Inositol Mono and Hexaphosphate
– Phosphoproteins	Glycerophosphate, Phosphatidic Acids, Phosphocreatine

ที่มา : พรทวิ (2557) อ้างอิงในก้นดพัฒน์ (2558)

### 2.7.1 แหล่งที่มาของฟอสเฟต

ฟอสเฟตส่วนใหญ่จะมีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่งใหญ่ๆ คือ

1. จากธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ผงฝุ่นฟอสฟอรัสในอากาศ ซึ่งถูกพัดพาให้ตกลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งฝนที่ตกลงมาสู่พื้นดินพัดพาเศษดินและหินที่มีฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังอาจมาจากมูลของนกบางชนิด เศษซากพืชซากสัตว์ ที่ตายทับถมกันบริเวณแหล่งน้ำ

2. จากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่

2.1 จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานปุ๋ย โรงงานยาฆ่าแมลง โรงงานผงซักฟอก ซึ่งโรงงานเหล่านี้จะมีน้ำทิ้งที่มีฟอสเฟตในปริมาณที่สูง

2.2 จากการเกษตรกรรมเนื่องจากเกษตรกรใช้ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และยาปราบศัตรูพืชมากขึ้นตามลำดับ ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และยาปราบศัตรูพืชรวมทั้งมูลสัตว์ จะถูกชะไหลลงสู่แหล่งน้ำ จึงเกิดการสะสมสารดังกล่าวในแหล่งน้ำมากขึ้น

2.3 จากแหล่งชุมชน ได้แก่ บ้านเรือน อาคารพาณิชย์ โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน สำนักงาน ซึ่งน้ำทิ้งจากสถานที่ดังกล่าวจะมีการปนเปื้อนของฟอสเฟตที่เกิดจากกิจกรรมการซักล้าง ทำความสะอาด ซึ่งกิจกรรมต่างๆเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักในการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น (ธงชัย, 2539 อ้างอิงในก้นดพัฒน์, 2558)

### 2.7.2 ผลกระทบฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ

ฟอสฟอรัสจัดเป็น Growth Limiting Nutrient ของพืชน้ำ หรือแพลงก์ตอนพืชมักพบสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของชุมชนจากการใช้สารซักล้าง หรือสารทำความสะอาดต่างๆ ซึ่งมีสารประกอบของฟอสฟอรัสลงไปในน้ำ สารประกอบฟอสฟอรัสจะกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำหรือแพลงก์ตอนพืชอย่างรวดเร็ว เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และสาหร่ายสีเขียว ทำให้แหล่งน้ำมีสีเขียวขุ่น และแหล่งน้ำมีออกซิเจนน้อยในเวลาที่ไม่มีแสงแดด ทำให้สัตว์น้ำขาดออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหายใจ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ยูโทรฟิเคชัน” (Eutrophication) ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันมีสาเหตุมาจากสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen;  $N_2$ ) ร่วมด้วยถ้าปริมาณฟอสฟอรัสในรูปสารประกอบฟอสเฟตในน้ำมากกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไนโตรเจนในรูปสารประกอบไนเตรต (Nitrate;  $NO_3^-$ ) มากกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากฟอสฟอรัสและไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ แพลงก์ตอนพืช และสาหร่าย ดังนั้นช่วงแรกจะมีผลดีเนื่องจากมีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) ทำให้ปลดปล่อยออกซิเจนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัตว์น้ำมีอาหารจากพืชน้ำ สาหร่าย และแพลงก์ตอนพืชแพร่ขยายพันธุ์เพิ่มจำนวนมากขึ้นด้วย แต่ในช่วงต่อมาเมื่อจำนวนสิ่งมีชีวิตในน้ำมากขึ้นในบริเวณแหล่งน้ำเดิม จึงจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในการหายใจเพื่อการดำรงชีวิตมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ในน้ำขาดออกซิเจน และสิ่งมีชีวิตในน้ำลดลงเกิดการตายในที่สุด ทำนองเดียวกันถ้าแหล่งน้ำมีสัตว์เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนของสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช การที่สาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชเพิ่มจำนวนมากขึ้นจะทำให้ความต้องการออกซิเจนในการหายใจมากขึ้น ประกอบกับแหล่งน้ำเกิดการทึบแสง ทำให้สาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชตายลง ท้ายที่สุดจึงเกิดน้ำเน่าเสียขึ้น (พรทวิ, 2557 อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์, 2558)

## 2.8 สารประกอบไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ไนโตรเจนเป็นหนึ่งในสามของสารอาหารสำคัญที่พืชต้องการ พืชส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปที่เป็นโมเลกุล ( $N_2$ ) ได้ในระบบนิเวศที่เป็นน้ำ พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถเปลี่ยนแก๊สไนโตรเจนให้กลายเป็นแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และไนเตรต ซึ่งพืชน้ำสามารถนำไปใช้ได้ สัตว์ที่กินพืชน้ำเหล่านี้นำไนโตรเจนที่ได้ไปสร้างโปรตีน เมื่อพืชและสัตว์ตายลง โมเลกุลของโปรตีนจะถูกย่อยให้เล็กลงโดยแบคทีเรียกลายเป็นแอมโมเนีย จากนั้นแบคทีเรียชนิดอื่นๆจะออกซิไดซ์แอมโมเนียให้กลายเป็นไนไตรท์ และไนเตรต แต่ในสถานะที่ขาดออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณน้อย พบว่าไนเตรตจะเปลี่ยนรูปโดยแบคทีเรียชนิดอื่นๆกลายเป็นแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และนำมาสู่การเริ่มต้นวัฏจักรของไนโตรเจนอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นไนโตรเจนที่พบในแหล่งน้ำที่สำคัญมีอยู่ 2 รูป คือไนเตรต ( $NO_3^-$ ) และไนไตรต์ ( $NO_2^-$ ) ไนโตรเจนในรูปไนเตรตจัดว่ามีความสำคัญมากที่สุดในน้ำ

### 2.8.1 แอมโมเนีย (Ammonia, $NH_3$ )

ปริมาณแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำ สามารถสะท้อนถึงประสิทธิภาพระบบกรองชีวภาพว่าทำงานได้ดีเพียงใด แอมโมเนียเกิดขึ้นจากการหายใจออกมาทางเหงือกปลา อีกทั้งยังเกิดจากการที่แบคทีเรียย่อยสลายของเสียต่างๆในตู้ปลา เช่น เศษอาหาร และขี้ปลา ค่าแอมโมเนียที่เราสามารถวัดได้ เรียกว่า แอมโมเนียรวม ซึ่งในค่าแอมโมเนียรวมจะประกอบไปด้วยแอมโมเนีย 2 ชนิด คือ อีออนไนซ์แอมโมเนีย ( $NH_4^+$ ) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และอันอีออนไนซ์แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ สัดส่วนของแอมโมเนียทั้งสองชนิดนั้นจะขึ้นกับปัจจัยหลักคือค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ (pH) และรองลงมาคือ อุณหภูมิ (pH สูง แอมโมเนียประเภท  $NH_3$  จะมีสัดส่วนมากขึ้น ซึ่งจะทำให้แอมโมเนียมีพิษมากขึ้น)

### 2.8.2 ไนไตรต์ (Nitrite, $NO_2^-$ )

ไนไตรต์เกิดจากการย่อยสลายแอมโมเนียโดยแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซออกซิเจน ในบางครั้งสาเหตุการเพิ่มระดับไนไตรต์ ยังอาจเกิดจากการเพิ่มจำนวนปลาเข้ามาเลี้ยงในบ่อจำนวนมาก ขณะที่แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายไปเป็นไนเตรตได้ทัน ปริมาณที่จัดว่าปกติควรให้ไม่มี หรือมีค่าเป็นศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

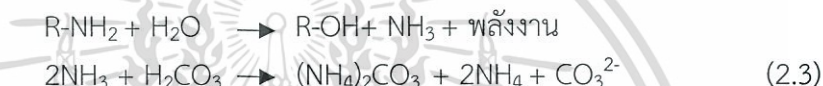
หากตรวจพบแสดงว่าแบคทีเรียยังทำงานได้ไม่สมบูรณ์ จากผลการเก็บข้อมูลจากศูนย์วิจัยและพัฒนา ประมงชายฝั่งจันทบุรี ระบุว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติ มักจะพบค่าไนโตรเจน อยู่ที่ 0.000x, 0.0xxx มิลลิกรัมต่อลิตร

### 2.8.3 ไนเตรท (Nitrate, $\text{NO}_3^-$ )

ไนเตรทเป็นสารเคมีตัวสุดท้ายในวัฏจักรไนโตรเจน เกิดจากการที่แบคทีเรียย่อยสลาย ไนไตรท์ โดยใช้ออกซิเจน ซึ่งในธรรมชาติส่วนหนึ่งของไนเตรทจะถูกพืชน้ำ สาหร่ายน้ำไปใช้สร้างความเจริญเติบโต และอีกส่วนจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน ปริมาณที่จัดว่าปกติค่าไนเตรทได้ควรมีค่าเท่ากับ 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจน ที่พบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดได้ 3 กระบวนการ

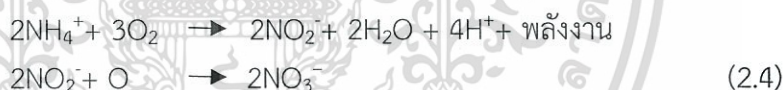
#### 1. แอมโมนิฟิเคชัน (ammonification)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน แบคทีเรียที่มีในน้ำจะย่อยสลายอาหารที่มีในน้ำให้ ได้พลังงานในการเจริญเติบโต โดยการย่อยโปรตีนที่มีในอาหารแบคทีเรียจะปล่อยแอมโมเนียออกมา ผลที่ได้ คือมีการสะสมของแอมโมเนีย ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง และแอมโมเนียเป็นพิษกับ สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ยกเว้น แพลงก์ตอนพืชและแบคทีเรียที่ใช้แอมโมเนียเป็นอาหาร ดังสมการที่ 2.3



#### 2. กระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification)

เกิดในสภาวะที่มีออกซิเจน ซึ่งแบคทีเรียสกุล Nitrosomonas จะออกซิไดซ์แอมโมเนียที่ในน้ำ และปล่อยไนไตรต์ออกมา ส่วนแบคทีเรียสกุล Nitrobactor จะย่อยไนไตรต์ที่ในน้ำ และปล่อย ไนเตรทออกมา กระบวนการนี้ทำให้ปริมาณแอมโมเนียลดลง แต่มีการใช้ออกซิเจน ส่งผลให้ออกซิเจน ในน้ำมีปริมาณลดลง และได้ไนเตรทเป็นผลผลิต (by product) ดังสมการที่ 2.4



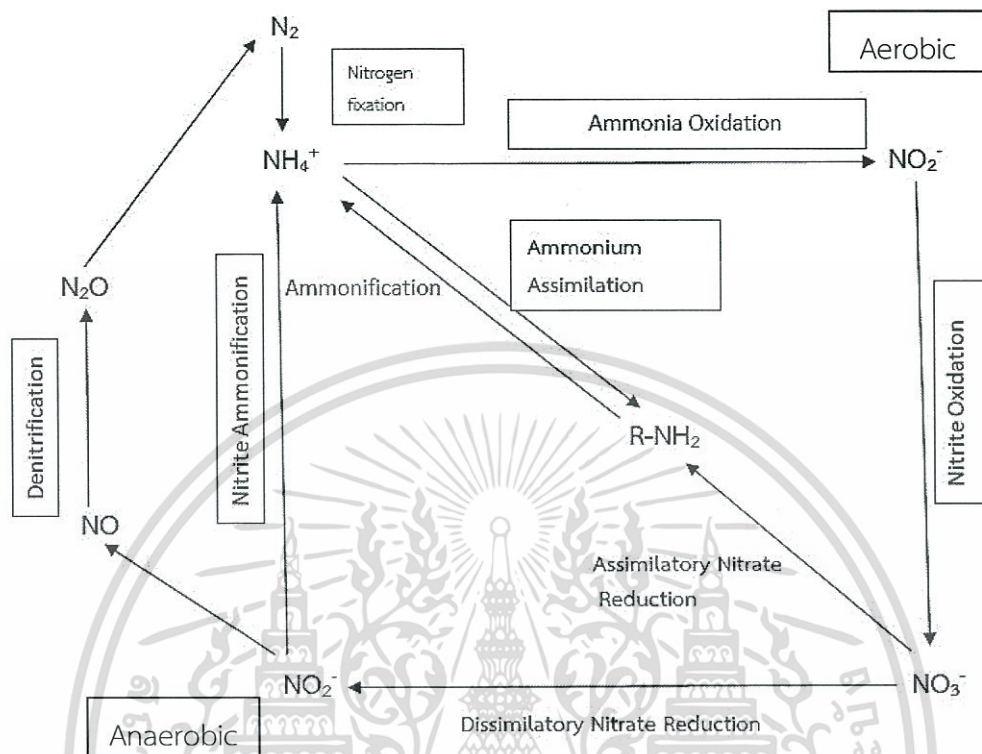
#### 3. กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยทั่วไปบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่นจะพบ ที่พื้นก้นบ่อ หรือเลนก้นบ่อระยะ 0-5 เซนติเมตรแรกที่มีการสะสมของตะกอนอาหาร ขี้ปลาและ สารอินทรีย์ต่างๆ ส่งผลให้ชั้นดินบริเวณนี้แบคทีเรียใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายจนหมด ก่อให้เกิด สภาวะการขาดออกซิเจน จุลินทรีย์สกุล Pseudomonas ที่จะเจริญได้ดีจะเปลี่ยนไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ไป เป็นไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) และเปลี่ยนไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ไปเป็นไนโตรปรัสซายด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) และไนโตรเจนแก๊ส ( $\text{N}_2$ ) ตามลำดับ ส่วนแอมโมเนียที่มีไม่ได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการดังกล่าว จะก่อให้เกิดการสะสมของ แอมโมเนียในน้ำ ดังสมการที่ 2.5



ไนโตรเจนมีความสำคัญต่อระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำมาก เพราะเป็นส่วนประกอบของอินทรีย์ สารหลายชนิดที่มีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของพืชและสัตว์ เช่น เป็นส่วนประกอบของโปรตีน และ ไขมันบางชนิด ดังนั้นสารประกอบไนโตรเจนจึงเป็นสิ่งจำกัดอย่างหนึ่งของความอุดมสมบูรณ์ของ แหล่งน้ำ โดยไนโตรเจนพบได้ในแหล่งน้ำ หรือในอากาศ จากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูป สารประกอบหลายรูป ที่พบในบ่อเลี้ยงเพาะสัตว์น้ำจะพบอยู่ในรูปแอมโมเนีย (ammonia,  $\text{NH}_3$ )

แอมโมเนียมไอออน (ammonium ion,  $\text{NH}_4^+$ ) ไนไตรท์ (nitrite,  $\text{NO}_2^-$ ) ไนเตรท (nitrate,  $\text{NO}_3^-$ ) และก๊าซไนโตรเจน (nitrogen gas,  $\text{N}_2$ ) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วัฏจักรไนโตรเจน (Atlas and Bartha, 1993)

### 2.9 ผลกระทบจากไนเตรท

ปริมาณไนเตรทในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อาจเพิ่มจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของสารประกอบไนโตรเจน โดยปกติไนเตรทจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยมาก แต่ถ้าในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน ไนเตรทจะเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรท์ผ่านทางปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ไนเตรทในรูปแบบไนเตรท มักพบในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำค่อนข้างต่ำ ไนเตรทจัดเป็นสารอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำ และสามารถตรวจพบในน้ำได้ในปริมาณที่สูง หรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณการรับไนเตรทจากแหล่งต่างๆสู่แหล่งน้ำ โดยปกติระดับของไนเตรทที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติจะค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 1 ppm ของไนเตรทในรูปแบบของไนเตรท) เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของเสียจากสัตว์ และซากพืชซากสัตว์ที่ตายแล้ว ซึ่งพืชจะนำไปใช้ได้อย่างรวดเร็ว ในแหล่งน้ำที่มีระดับไนเตรทค่อนข้างสูงอาจทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชันได้ ทั้งนี้ระดับไนเตรทอาจจะสูงขึ้น เนื่องจากผลตามธรรมชาติหรือเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ และสัตว์น้ำทำให้ปริมาณไนเตรทในแหล่งน้ำที่อาศัยอยู่มีปริมาณสูงขึ้นจากการถ่ายมูลลงน้ำ ส่วนไนเตรทที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การทิ้งขยะหรือของเสียลงแม่น้ำ ปุ๋ยเคมีที่ถูกชะล้างลงสู่ลำน้ำต่างๆ ซึ่งอาจปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ ตลอดจนน้ำไหลชะจากการเลี้ยงสัตว์บางชนิด และคอกสัตว์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุทธิรัตน์ (2555) ทำการศึกษาการกำจัดไนเตรท โดยใช้กะลาปาล์มแบบผงมาผ่านกระบวนการทำถ่าน และร่อนผ่านตะแกรง 425 ไมครอน ผลการศึกษาพบว่าถ่านกะลาปาล์มแบบผงและกะลาปาล์มแบบสด สามารถดูดซับไนเตรทได้ร้อยละ 89.91% และ 35.93% ตามลำดับ

ปริญทร (2551) ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ โดยใช้วิธีกระตุ้นทางเคมีด้วย  $H_3PO_4$  KOH และ  $HNO_3$  พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH สามารถดูดซับแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ได้มากที่สุดคือ 0.19 mg/g และเมื่อมาดูดซับเมทธิลีนบลู สามารถดูดซับได้สูงถึง 333.33 mg/g ซึ่งการกระตุ้นดังกล่าวทำให้ปริมาตรช่องว่างของรูพรุนขนาดเล็ก และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

Diola and Orozco (2014) ทำการปรับสภาพขุยมะพร้าวด้วยสารละลาย NaOH โดยนำขุยมะพร้าวมาแช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างและทำการอบแห้ง ซึ่งพบว่าขุยมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สามารถใช้กำจัด  $Cu^{2+}$  ได้มากที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงสุดเท่ากับ 94%

Mandina et al. (2013) ทำการดัดแปรพื้นผิวของเปลือกส้มโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อใช้กำจัด  $Cr^{6+}$  ในน้ำเสีย โดยนำเปลือกส้มมาปรับสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 0.10 โมลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากผล FT-IR พบว่าเปลือกส้มที่ปรับสภาพด้วย NaOH จะมีลักษณะสเปกตรัมคล้ายกับเปลือกส้มที่ไม่ปรับสภาพ แต่จะมีการลดลงของความเข้มพีกที่ประมาณ  $1740\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชันของ Ester ที่คาดว่าถูกไฮโดรไลซ์ด้วย NaOH โดยเปลือกส้มที่ผ่านการปรับสภาพจะมีความจุในการดูดซับ  $Cr^{6+}$  เพิ่มขึ้นจาก 97.07 mg/g เป็น 139.0 mg/g

Liu et al. (2012) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนู ( $AsO_4^{3-}$ ) ในสารละลาย โดยนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากต้นไผ่มาแช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.01 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้าง และแช่ลงในสารละลาย  $FeCl_3$  เข้มข้น 0.10 โมลาร์ นาน 24 ชั่วโมง ทำการล้างและอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว พบว่าวัสดุถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวลดลงจาก  $58.67\text{ m}^2/\text{g}$  เหลือ  $13.07\text{ m}^2/\text{g}$  แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะของ  $Fe^{3+}$  บนผิววัสดุ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$  จะมีความจุสูงสุดในการดูดซับสารหนูเท่ากับ 19.77 mg/g

Ning-chuan and Xue-yi (2012) ทำการเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกส้มเพื่อใช้กำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  ซึ่งทำการปรับสภาพเปลือกส้มด้วย NaOH โดยนำเปลือกส้มที่มีขนาด 0.45 มิลลิเมตร มาแช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.8 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองและนำเปลือกส้มไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยพบว่าเปลือกส้มที่ปรับสภาพด้วย NaOH มีความจุสูงสุดในการดูดซับ  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  เท่ากับ 70.73, 209.8 และ 56.18 mg/g ตามลำดับ

Ofomaja et al. (2009) ทำการศึกษาการปรับสภาพพื้นผิวลูกสนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อนำมาดูดซับ  $Cu^{2+}$  ในสารละลาย โดยนำลูกสนมาบั่นจนมีขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร แล้วทำการปรับสภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01, 0.05, 0.10 และ 0.15 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนระหว่างลูกสนต่อสารละลายเป็น 1:10 แช่ไว้ 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และนำมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน พบว่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของลูกสนจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปรับสภาพ และเมื่อทำการทดสอบการดูดซับ  $Cu^{2+}$  พบว่าลูกสนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.15 M สามารถดูดซับ  $Cu^{2+}$  ได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhao et al. (2009) ศึกษาการกำจัดสารหนูด้วยตัวดูดซับ ทำได้โดยการสังเคราะห์ใยฝ้ายที่ผ่านการดัดแปรด้วย  $Fe^{3+}$  ใยฝ้ายจะนำถูกมาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 0.60 โมลาร์ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของใยฝ้ายที่ผ่านการดัดแปร พบว่าเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการดัดแปรมีรูพรุนขนาดใหญ่ (5-30 ไมโครเมตร) มีพื้นที่ผิวที่ขรุขระ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ  $2.23 \text{ m}^2/\text{g}$  โดยเส้นใยฝ้ายดังกล่าวสามารถกำจัดสารหนูได้มากกว่า 98%

Kim (2008) ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ใยกระดาษ เมล็ดข้าวโพด และเส้นใยฝ้ายเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟต และสารหนูในน้ำ วัสดุที่ได้จะถูกนำมาดัดแปรพื้นผิวด้วยสารละลาย  $FeCl_3$  เข้มข้น 0.01 ถึง 0.3 โมลาร์ เป็นเวลา 0.1 ถึง 2.0 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบให้แห้ง และแช่ในสารละลาย  $NH_4OH$  เข้มข้น 0.1 ถึง 1.0 โมลาร์ เป็นเวลา 0.1 ถึง 10 นาที เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต และสารหนู พบว่าวัสดุที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวมีความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต และสารหนูในน้ำได้มากกว่า 90%



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. ตู้อบ (Oven) รุ่น UN 55 บริษัท Memmert
2. เครื่องกรองสูญญากาศ (Vacuum filter set) รุ่น A-35 บริษัท Aspirator, Japan
3. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น 205A บริษัท Precisa
4. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น Analyst-200 บริษัท PerkinElmer
5. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น UH5300 บริษัท Hitachi
6. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) รุ่น IRTracer-100 บริษัท SHIMADZU
7. เครื่องบดหยาบ (Grinder) บริษัท BOSCO
8. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 200 เมช บริษัท Restech
9. เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal Shaker) บริษัท GALLENKAMP
10. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
11. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve Shaker)
12. โถดูดความชื้น (Desiccator)
13. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
14. กระดาษวัดพีเอช (pH paper)
15. ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 100-1000  $\mu\text{L}$
16. บริษัทเครื่องแก้ว

##### 3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade, Global Chemie
2. เพอร์ริคคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) AR Grade, Fisher Scientific
3. กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) AR Grade, Carlo Erba
4. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) AR Grade, Carlo Erba
5. เมทิลีนบลู ( $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) AR Grade, Global Chemie
6. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) AR Grade, Carlo Erba
7. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) AR Grade, Carlo Erba
8. แอนไฮดรัสโพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) AR Grade, Carlo Erba
9. บรูซีนซัลเฟต (Brucine Sulfate) AR Grade, Carlo Erba
10. กรดซัลฟานิลิก (Sulfanilic acid solution) AR Grade, Carlo Erba
11. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade, Carlo Erba

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade, Carlo Erba
13. กรดแอสคอร์บิก ( $C_6H_8O_6$ ) AR Grade, Fisher Scientific
14. แอมโมเนียมโมลิบเดต ( $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ ) AR Grade, Carlo Erba
15. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรท ( $(K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 1/2H_2O)$ ) AR Grade, (Ajax Finechem)
16. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

### 3.2 การเตรียมเปลือกสับปะรด

นำเปลือกสับปะรดพันธุ์ *ศรีราชา* มาล้างให้สะอาด ผึ่งตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 5-7 วัน นำไปอบที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}C$  จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำมาปั่นและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ

สมบัติ	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
1. องค์ประกอบตัวดูดซับ	FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
2. พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.) (ปริญทร, 2551)

### 3.3 การเตรียมเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วยด่าง

วิธีการเตรียมและสถานะที่ใช้ เป็นสถานะที่เหมาะสมอ้างอิงจากงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) โดยมีรายละเอียดของวิธีการ ดังนี้ คือ นำเปลือกสับปะรดจากข้อ 3.2 แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0% (w/v) ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเปลือกสับปะรดต่อ NaOH เท่ากับ 1:10 เมื่อครบเวลาที่กำหนด กรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 ล้างเปลือกสับปะรดที่ผ่านการแช่ต่างด้วยน้ำกลั่น จนน้ำที่ล้างมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1

### 3.4 การเคลือบผิวเปลือกสับปะรดด้วยเฟอร์ริกไอออน

วิธีการและสถานะที่ใช้อ้างอิงจากงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) ซึ่งเป็นสถานะที่เปลือกสับปะรดมีเฟอร์ริกดูดติดผิวได้ดีที่สุด โดยมีรายละเอียดวิธีการดังนี้ แช่เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) เป็นเวลา 30 นาที กำหนดความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  เท่ากับ 0.1 โมลาร์ และพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเปลือกสับปะรดต่อสารละลาย  $FeCl_3$  เท่ากับ 1:5 เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำไปปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 2,500 รอบ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเปิดส่วนที่เป็นสารละลายไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กที่เหลือนด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy พร้อมกับคำนวณค่าความจุในการดูดซับเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(รายละเอียดในภาคผนวก ก.2) นำส่วนที่เป็นของแข็งไปแช่ในสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  เข้มข้น 1.0 โมลาร์ จนท่วมของแข็ง เมื่อครบเวลาที่กำหนดกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำส่วนที่เป็นของแข็งไปอบที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1

### 3.5 การยืนยันความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตของเปลือกสับประรดที่พัฒนาขึ้น

#### 3.5.1 การเตรียมสารละลายออร์โธฟอสเฟต

ละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  219.5 mg ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (50 mg-P/L) จากนั้นปิเปตมา 50 มิลลิลิตร ปรับสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร (2.5 mg-P/L)

#### 3.5.2 การศึกษาความสามารถในการกำจัดฟอสเฟต

1. ชั่งเปลือกสับประรดจากข้อ 3.2 และ 3.4 มา 0.8 กรัม เติมสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่เตรียมขึ้นในข้อ 3.5.1 ลงไป 50 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
3. กรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42
4. นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลือด้วยวิธีทำให้เกิดสีด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิกแอสซิด
5. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลอง ข้อ 1-4 ข้าง แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับลงในสารละลายออร์โธฟอสเฟต

### 3.6 การศึกษาความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำ

#### 3.6.1 การเตรียมสารละลายไนเตรท

ชั่งโพแทสเซียมไนเตรท ( $\text{KNO}_3$ ) 0.7218 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร (100 mg-N/L) จากนั้นปิเปตสารละลายมา 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร (2.0 mg-N/L)

#### 3.6.2 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1. ชั่งเปลือกสับประรดที่เตรียมได้จากข้อ 3.4 ปริมาณ 0.25 กรัม เติมสารละลายไนเตรท เข้มข้น 2.0 mg-N/L จำนวน 25 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. กรองสารละลายแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42
4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่เหลือในสารละลาย ด้วยวิธีบรูซึน (กรองแก้วและพิสมัย, 2558)
5. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 ขี้ แต่ไม่ใส่เปลือกสับปรดที่เตรียมได้  
ในข้อ 3.4 ลงในในสารละลายไนเตรท

7. ทำแบลงค์ โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 ขี้ แต่ใช้น้ำกลั่นแทนสารละลายไนเตรท

### 3.6.3 การศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับ

1. ชั่งเปลือกสับปรดที่เตรียมได้จากข้อ 3.4 ปริมาณ 0.25 กรัม เติมสารละลายไนเตรท  
เข้มข้น 2.0 mg-N/L จำนวน 25 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าที่เครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามเวลาที่  
เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาผลของระยะเวลาตามวิธีในข้อ 3.6.2

3. กรองสารละลายแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่เหลือในสารละลายด้วยวิธีบรูซัน (กรองแก้วและ  
พิสมัย, 2558)

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับจาก 0.25 กรัม เป็น 0.5, 1.0,  
1.5, 2.0 และ 3.0 กรัม ตามลำดับ

6. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 ขี้ แต่ไม่ใส่เปลือกสับปรดที่เตรียมได้  
ในข้อ 3.4 ลงในในสารละลายไนเตรท

7. ทำแบลงค์ โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 ขี้ แต่ใช้น้ำกลั่นแทนสารละลายไนเตรท

### 3.6.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายไนเตรท

1. ชั่งเปลือกสับปรดที่เตรียมได้จากข้อ 3.4 ปริมาณ 2.0 กรัม เติมสารละลายไนเตรท  
เข้มข้น 1.0 mg-N/L จำนวน 25 มิลลิลิตร

2. นำไปเขย่าที่เครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามเวลาที่  
เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาผลของระยะเวลาตามวิธีในข้อ 3.6.2

3. กรองสารละลายแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่เหลือในสารละลายด้วยวิธีบรูซัน (กรองแก้วและ  
พิสมัย, 2558)

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของไนเตรทเป็น 2.0 mg-N/L และ 4.0  
mg-N/L

6. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 ขี้ แต่ไม่ใส่เปลือกสับปรดที่เตรียมได้  
ในข้อ 3.4 ลงในในสารละลายไนเตรท

7. ทำแบลงค์ โดยทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 ขี้ แต่ใช้น้ำกลั่นแทนสารละลายไนเตรท

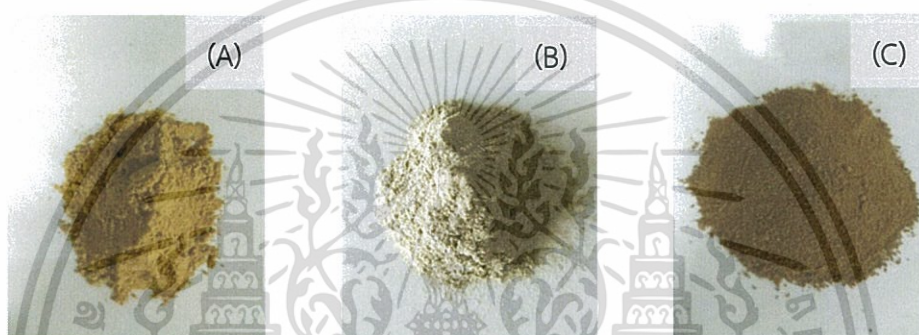
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่างและเคลือบติดผิวด้วยไอออนของเหล็กในการกำจัดไนเตรทในน้ำ ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ

วัสดุทั้งสามชนิด ซึ่งเตรียมขึ้นโดยอ้างอิงสภาวะที่เหมาะสมตามงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) เมื่อนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะของวัสดุทั้ง 3 ชนิด เมื่อ (A) คือ เปลือกสับปะรดไม่ปรับสภาพ (B) คือ เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และ (C) คือ เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพและดัดแปรผิวด้วยเฟอร์ริก

เปลือกสับปะรดที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างดังอธิบายในหัวข้อ 3.1 มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1 (A) เมื่อนำมาปรับสภาพด้วยการแช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 2% w/v นาน 24 ชั่วโมง พบว่าสีของวัสดุที่เตรียมได้จะมีสีอ่อนกว่ารูปที่ 4.1 (B) เมื่อเทียบกับไม่ปรับสภาพ เมื่อนำไปผ่านกระบวนการดัดแปรผิวด้วยเฟอร์ริกไอออน เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าวัสดุที่ได้มีสีเข้มขึ้นดังรูปที่ 4.1 (C)

##### 4.1.1 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงกลไกการดูดซับที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของเมทิลีนบลูกับไอออนของไฮโดรเจนที่หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของเซลลูโลส (Kaewprasit et al., 1998) ของเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรผิวด้วยเฟอร์ริกไอออนเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับสภาพ และเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

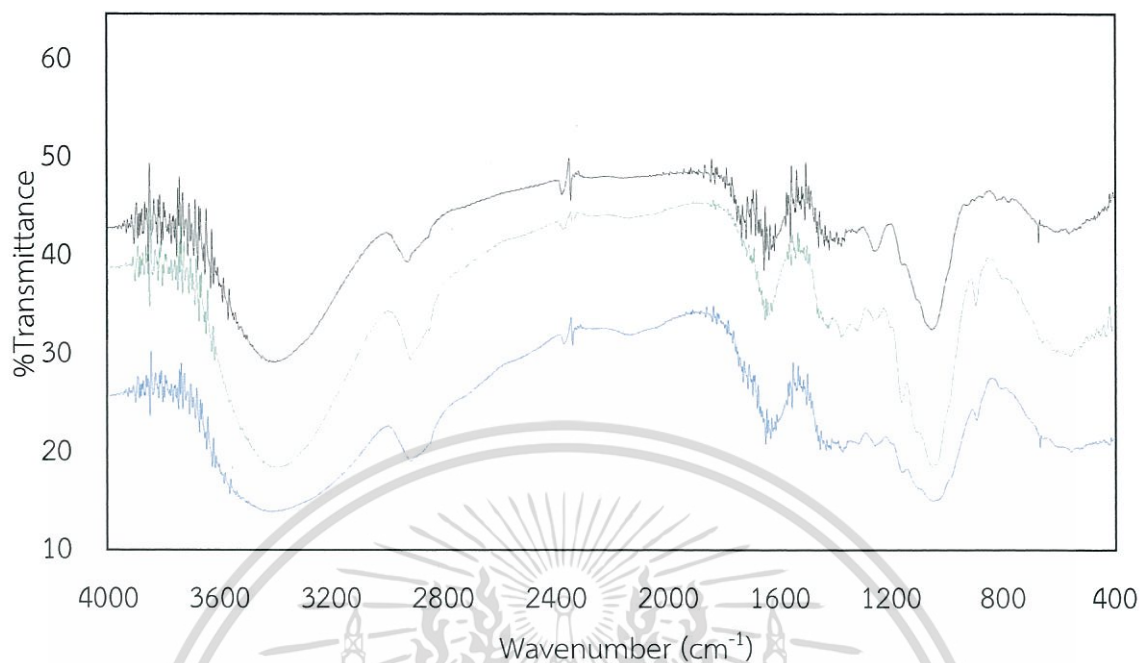
ชนิดของวัสดุ	ค่าการดูดซับ (mg/g)	ค่าการดูดซับ <sup>1/</sup> (mg/g)	ค่าการดูดซับ <sup>2/</sup> (mg/g)
เปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับสภาพ	71.65±18.16	125.34±11.72	81.97±0.67
เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH	144.00±47.42	512.00±6.58	357.45±12.77
เปลือกสับปะรดที่ดัดแปรผิววัสดุด้วย Fe <sup>3+</sup>	75.10±21.10	96.06±4.34	92.87±0.99

<sup>1/</sup>กัณฑ์พัฒน์ (2558)<sup>2/</sup>กรรณิกรณ์และคณะ (2559)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยการแช่ในสารละลายต่าง ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของการดูดซับ ดังจะเห็นได้จากค่า M.B.N. ของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน NaOH มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 144±47.42 mg/g เมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดก่อนปรับสภาพ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 71.65±18.10 mg/g ผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่รายงานไว้ในงานวิจัยของกัณฑ์พัฒน์ (2558) ซึ่งได้สันนิษฐานว่า M.B.N. ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากความสามารถของ NaOH ซึ่งมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนทำให้เกิดการย่อยสลายลิกนินบนพื้นผิวของวัสดุ ส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นหลังแช่ใน NaOH (Ofomaja et al., 2009 อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์, 2558) ส่วนเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรผิวด้วย Fe<sup>3+</sup> พบว่ามีค่า M.B.N. ลดลงเมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ซึ่งผลดังกล่าวได้ยืนยันว่ามีการเกาะติดของ Fe<sup>3+</sup> บนพื้นผิวของเปลือกสับปะรด ทำให้ผลให้วัสดุดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูลดลง ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในลักษณะเดียวกับที่พบในงานวิจัยของกัณฑ์พัฒน์ (2558) แต่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวของเปลือกสับปะรดที่แช่ใน NaOH มีค่าน้อยกว่าทำให้ NaOH ไม่สามารถเข้ากัดกร่อนและย่อยสลายลิกนินบนผิวของวัสดุได้หมด ส่งผลให้ค่า M.B.N. ที่ได้มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของกัณฑ์พัฒน์ (2558)

#### 4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุทั้งสามชนิดด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในตัวอย่าง ทำได้โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด เพื่อใช้ในการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลในรูปแบบต่างๆของตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้เลขคลื่นในช่วง 400 ถึง 4000 cm<sup>-1</sup> ได้ผลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FT-IR ของเปลือกสับปะรดชนิดต่างๆ โดย (—) คือ เปลือกที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (—) คือ เปลือกที่ปรับสภาพด้วย NaOH (—) คือ เปลือกสับปะรดที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยเพอร์ริคไอออน

จากรูปที่ 4.2 พบว่าลักษณะหมู่ฟังก์ชันของเปลือกสับปะรดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพสามารถจำแนกช่วงการวิเคราะห์ได้ 5 ช่วง ตามหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (1) ในช่วงเลขคลื่นที่ 3200 ถึง 3500  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของหมู่ -OH (2) ช่วงเลขคลื่นที่ 2800 ถึง 3000  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ C-H aliphatic ในเซลลูโลส (Areeprasert et al., 2014) (3) ในช่วงเลขคลื่น 1600 ถึง 1733  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ C=O ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส (Shah et al., 2008) (4) ในช่วงเลขคลื่นที่ 1200 ถึง 1250  $\text{cm}^{-1}$  แสดงหมู่ C-O-C ใน Arty-alkyl ether ของลิกนิน (Cheng et al., 2013) และ (5) ที่ช่วงเลขคลื่นที่ 1000 ถึง 1100  $\text{cm}^{-1}$  เป็นช่วงที่แสดงให้เห็นการโค้งงอของหมู่ฟังก์ชัน C-OH ในเฮมิเซลลูโลส (Adpa et al., 2011) เมื่อนำมาปรับสภาพด้วย NaOH พบว่าลักษณะหมู่ฟังก์ชันจะมีความเข้มที่พีคตำแหน่งต่างๆลดลงกว่าใน 5 ช่วงแรกที่กล่าวมา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -OH ของโมเลกุลเซลลูโลสที่เกิดจากปฏิกิริยาไอออนเซชันของหมู่ -OH ในโมเลกุลเซลลูโลสกับ NaOH นอกจากนี้หมู่ฟังก์ชันอื่นๆที่ไม่ใช่เซลลูโลส และสารเคลือบตัวเส้นใยต่างๆถูกกำจัดออกไปด้วย เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และแว็กซ์ ซึ่งสังเกตได้จากหมู่ C=O หายไปที่เลขคลื่น 1600-1733  $\text{cm}^{-1}$  นอกจากนี้พบว่าลักษณะหมู่ฟังก์ชันของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยเพอร์ริคไอออนให้ลักษณะสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH เพียงอย่างเดียวที่สเปกตรัมเลขคลื่นประมาณ 3200 ถึง 3500  $\text{cm}^{-1}$  และช่วงเลขคลื่นประมาณ 1600 ถึง 1650  $\text{cm}^{-1}$  ที่เป็นแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และคาร์บอนิล แสดงให้เห็นถึงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะหนักกับหมู่ -OH ของโมเลกุลเซลลูโลส (Ning-Chuan และ Xue-yi, 2012 อ้างอิงในกัณฑ์พัฒนา, 2558) รวมถึงมีการปรากฏสเปกตรัม FT-IR ที่เลขคลื่น 420.48  $\text{cm}^{-1}$  และ 559.35  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นแถบการยึดของพันธะ Fe-O ดังงานวิจัยของ Garcia et.al., (2013) อ้างอิงในกัณฑ์พัฒนา (2558) ที่พบแถบ FT-IR สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่นประมาณ 445  $\text{cm}^{-1}$  และ 540  $\text{cm}^{-1}$

#### 4.1.3 ค่าการดูดซับเฟอร์ริกไอออน

เปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH จะถูกนำมาเติมเฟอร์ริกไอออน เพื่อให้วัสดุที่ผ่านการปรับปรุงมีความสามารถในการดูดซับไอออนลบ เช่น ฟอสเฟต หรือไนเตรทในน้ำ ผลการแช่เปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มี  $\text{Fe}^{3+}$  เข้มข้น 0.1 โมลาร์ นาน 30 นาที อ้างอิงวิธีการตามงานวิจัยของกัณฑ์พัฒนา (2558) ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาการเติมเฟอร์ริกบนเปลือกสับปะรด

ที่มาของข้อมูล	ตัวอย่าง	ปริมาณ $\text{Fe}^{3+}$ ในสารละลาย (mol/L)		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	ความจุในการดูดซับ (mg/g)
		เริ่มต้น	หลังแช่ 30 นาที		
งานวิจัยครั้งนี้	ชุดควบคุม	0.09	0.09	N/A	N/A
	ชุดทดลอง	0.09	0.05	44.44	12
กัณฑ์พัฒนา (2558)	ชุดควบคุม	0.10	0.10	N/A	N/A
	ชุดทดลอง	0.11	0.02	81.82	14

หมายเหตุ: N/A ไม่คำนวณเนื่องจากความเข้มข้นของเหล็กเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณ  $\text{Fe}^{3+}$  หลังแช่สับปะรด (ชุดทดลอง) นาน 30 นาที มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณ  $\text{Fe}^{3+}$  เริ่มต้น คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{Fe}^{3+}$  เท่ากับ 44.44% และเมื่อคำนวณความจุในการดูดซับได้เท่ากับ 12 มิลลิกรัมต่อกรัม ประกอบกับปริมาณ  $\text{Fe}^{3+}$  ในชุดควบคุมมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าการลดลงของ  $\text{Fe}^{3+}$  ในชุดทดลองเกิดจากดูดติดของเฟอร์ริกไอออนบนผิวของเปลือกสับปะรด นอกจากนี้การลดลงของค่า M.B.N. ในเปลือกสับปะรดที่ตัดแปรพื้นผิวด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  เทียบกับเปลือกสับปะรดที่แช่ใน NaOH ดังตารางที่ 4.1 สามารถยืนยันถึงการดูดซับเฟอร์ริกบนเปลือกสับปะรดในชุดทดลอง และเมื่อเทียบผลการศึกษารั้งนี้กับผลที่ได้ในงานวิจัยของกัณฑ์พัฒนา (2558) พบว่าปริมาณ  $\text{Fe}^{3+}$  หลังแช่สับปะรดในชุดทดลองมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบที่ปริมาณ  $\text{Fe}^{3+}$  เริ่มต้นมีค่าเท่ากันคือ 0.1 โมลาร์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณ  $\text{Fe}^{3+}$  ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด และความจุในการดูดซับ (ตารางที่ 4.2) มีค่าลดลง และผลการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (ตารางที่ 4.1)

#### 4.1.4 ความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต

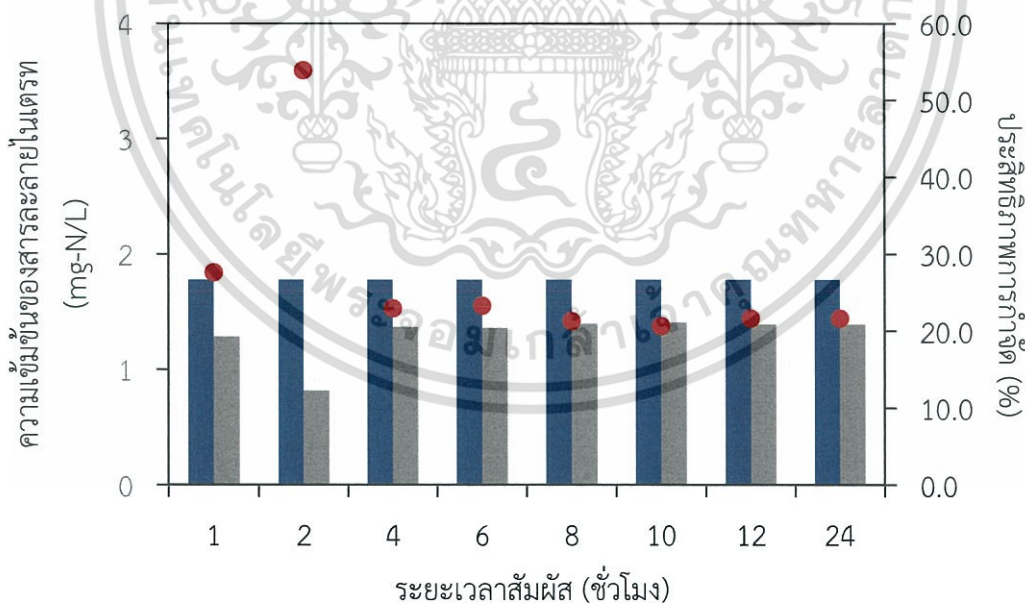
ผลการศึกษาเพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำได้โดยแช่เปลือกสับปะรดที่ไม่ปรับสภาพ, เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพและเติมเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 16 กรัมต่อลิตร ในสารละลายออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาสัมผัสนาน 10 ชั่วโมง พบว่าวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต ได้ 65.19 % และ 93.37% ตามลำดับ (รายละเอียดในภาคผนวก ข.3) ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับผลที่รายงานไว้ในงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) คือ 71.75% และ 98.21% ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่เตรียมขึ้นจากการศึกษาครั้งนี้ มีพื้นที่ผิว และรูพรุนน้อยกว่างานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558)

## 4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำ

การศึกษาความสามารถในการกำจัดไนเตรทของเปลือกสับปะรดที่เตรียมขึ้น โดยทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของไนเตรท ได้ผลการทดลองดังนี้

### 4.2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายไนเตรทของเปลือกสับปะรด ทำได้โดยการแช่เปลือกสับปะรดที่เตรียมขึ้น 0.25 กรัม ในสารละลายไนเตรทเข้มข้น 2.0 mg-N/L ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที และแปรค่าระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



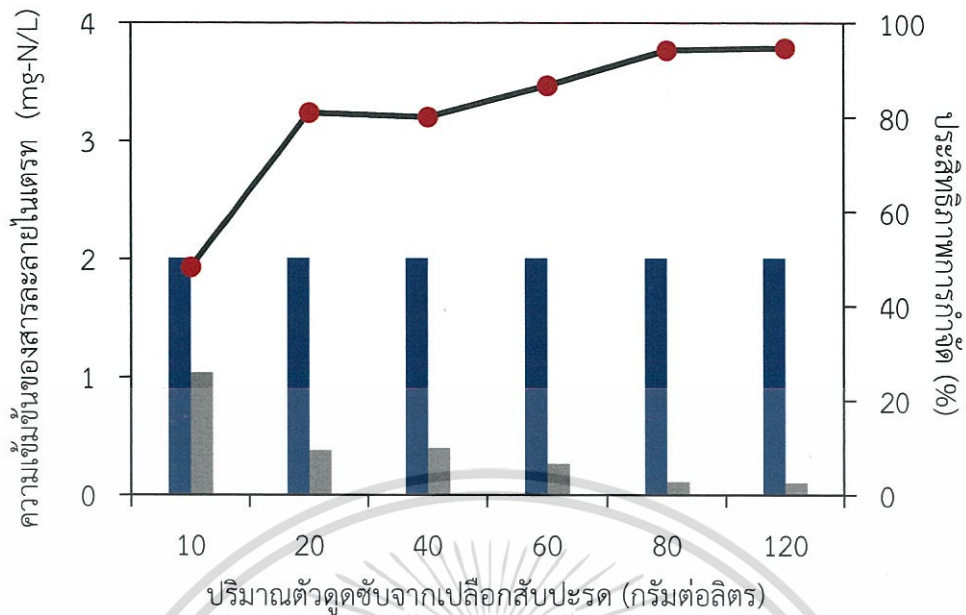
**รูปที่ 4.3** ความสามารถในการกำจัดไนเตรทด้วยเปลือกสับปะรดที่ดัดแปรพื้นผิววัสดุด้วย  $Fe^{3+}$  ที่เวลาสัมผัสแตกต่างกัน โดย (■) คือ ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทเริ่มต้น (mg-N/L) (■) คือ ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือ (mg-N/L) และ (●) คือประสิทธิภาพการกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทเริ่มต้นเท่ากันในทุกระดับประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก ดูได้จากประสิทธิภาพการกำจัดที่ 1 ชั่วโมง เท่ากับ  $27.67 \pm 7.23\%$  เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเป็น 2 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น  $54.00 \pm 2.00\%$  และเมื่อเพิ่มระยะเวลานานขึ้นเป็น 4, 6, 8, 10, 12, และ 24 ชั่วโมง วัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง มีค่าเท่ากับ  $23 \pm 6.24\%$ ,  $23.33 \pm 4.16\%$ ,  $21.33 \pm 2.52\%$  และ  $20.67 \pm 11.59\%$  ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือในน้ำลดลงจาก 1.29 เหลือ 0.82 มิลลิกรัม ไนโตรเจนต่อลิตรจาก 1 ชั่วโมงแรก เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเป็น 4 ชั่วโมง พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจากที่ 2 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.37 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ 4 ชั่วโมงเป็นต้นไป และมีค่าเท่ากับ 1.39, 1.36, 1.35, 1.41 และ 1.39 มิลลิกรัม ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือหลัง 4 ชั่วโมง มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงถึงระบบได้เข้าสู่สมดุล และผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุทธิรัตน์ (2555) ที่พบว่าร้อยละการดูดซับไนเตรทโดยกะลาปาล์มแบบผง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 87.01% เป็น 90.93% เมื่อระยะเวลาจาก 30 ถึง 150 นาที และเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 180 นาที พบว่าร้อยละการดูดซับมีค่าลดลงเหลือ 77.29% จึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 2 ชั่วโมง ในการศึกษาต่อไป

#### 4.4.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

จากการศึกษาผลของปริมาณเปลือกสับปะรดในการกำจัดสารละลายไนเตรท ทำได้โดยแช่เปลือกสับปะรดในสารละลายไนเตรทเข้มข้น 2.0 mg-N/L ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง และแปรค่าปริมาณวัสดุดูดซับตั้งแต่ 10, 20, 40, 60, 80, และ 120 กรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสามารถในการกำจัดไนเตรทด้วยเปลือกสับประรดที่ตัดแปรพื้นผิวด้วย  $Fe^{3+}$  ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน โดย (■) คือ ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทเริ่มต้น (mg-N/L) (■) คือ ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือ (mg-N/L) และ (●) คือประสิทธิภาพการกำจัด

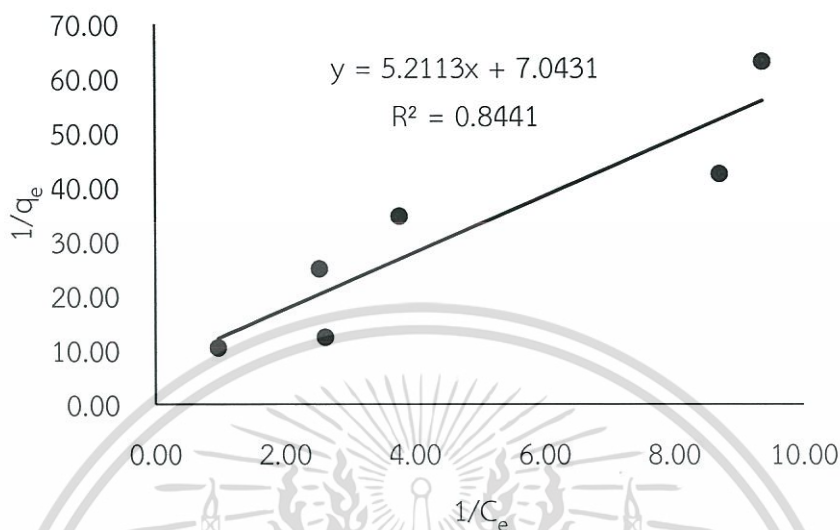
จากรูปที่ 4.4 ที่ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทเริ่มต้นเท่ากันในทุกระดับ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณตัวดูดซับที่ใช้แก่คือ 10, 20, 40, 60, 80 และ 120 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่สภาวะดังกล่าว มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทคือ  $48.23 \pm 2.50\%$ ,  $80.97 \pm 0.63\%$ ,  $80.09 \pm 3.13\%$ ,  $86.73 \pm 1.25\%$ ,  $94.25 \pm 0.63\%$  และ  $94.69\%$  ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ปริมาณวัสดุ 80 กรัมต่อลิตรเป็นต้นไป เนื่องมาจากสัดส่วนของไนเตรทในน้ำเสียเมื่อเทียบกับตัวดูดซับมีน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ (Kumar et al., 2010) และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือ พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.04, 0.38, 0.40, 0.27, 0.12 และ 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pillai et al., (2013) อ้างอิงในกัณฑ์พัฒน์ (2558) ที่ว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับตัวดูดซับ เมื่อทำการทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการ ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เมื่อใช้ปริมาณเปลือกสับประรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$  ตั้งแต่ 80 กรัมต่อลิตรเป็นต้นไป จึงเลือกใช้ปริมาณวัสดุดูดซับที่ 80 กรัมต่อลิตรสำหรับการศึกษาต่อไป

#### 4.4.2.1 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และพหุนิยมของการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับประรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย $Fe^{3+}$

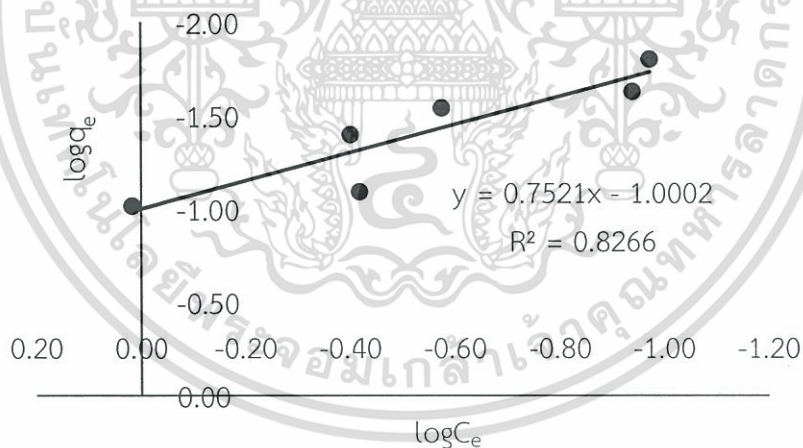
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรทที่ดูดซับไว้โดยเปลือกสับประรด (q) กับความเข้มข้นของไนเตรทที่เหลือในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ( $C_e$ ) โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 4.4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาหาไอโซเทอร์มการดูดซับที่เหมาะสม เปรียบเทียบระหว่างแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.6 และตารางที่ 4.3-4.4 (รายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก.5)



รูปที่ 4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับประรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชในการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับประรดที่ปรับสภาพ ด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับประรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$

ชนิดตัวดูดซับ	แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม			
	สมการเส้นตรง	$K_L$	$Q_m$	$R^2$
-เปลือกสับประรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย $Fe^{3+}$	$y=5.2113x+7.0431$	1.3513	0.1420	0.8441

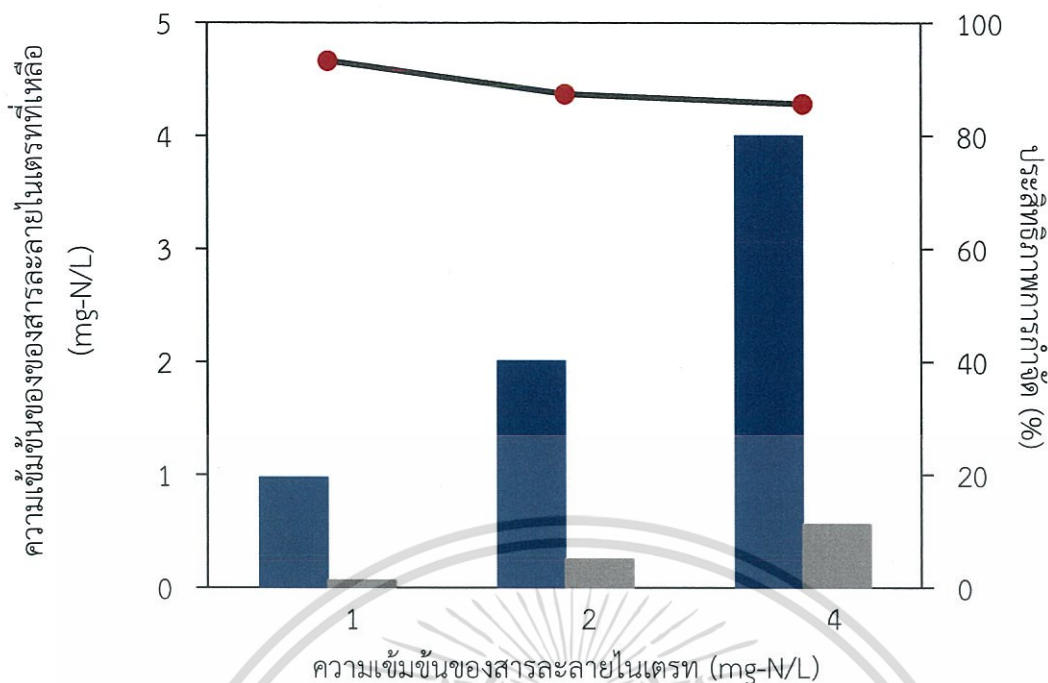
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับไนเตรทด้วยเปลือกสับประรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$

ชนิดตัวดูดซับ	ฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม			
	สมการเส้นตรง	$K_F$	$n$	$R^2$
-เปลือกสับประรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย $Fe^{3+}$	$y=0.7521x-1.0002$	10.0046	1.3296	0.8266

จากตารางที่ 4.3-4.4 พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมสำหรับใช้อธิบายรูปแบบการดูดซับไนเตรทโดยเปลือกสับประรดที่พัฒนาขึ้นมากกว่าไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient,  $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับบนพื้นผิววัสดุที่มีลักษณะแบบชั้นเดียว และมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน (โกวิทย์และคณะ, 2551) โดยเปลือกสับประรดที่ปรับปรุงด้วย NaOH และตัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$  มีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ ( $q_m$ ) เท่ากับ 0.1420 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ ( $K_L$ ) เท่ากับ 1.3513 ตามลำดับ

#### 4.4.3 ผลของความเข้มข้นไนเตรท

จากผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายไนเตรท ทำได้โดยแช่เปลือกสับประรดที่เตรียมขึ้นปริมาณ 2 กรัม ในสารละลายไนเตรทเข้มข้น 1, 2 และ 4 mg-N/L ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสามารถในการกำจัดไนเตรทด้วยเปลือกสับประดที่ดัดแปรพื้นผิวด้วย  $\text{Fe}^{3+}$  ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดย (■) คือ ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทเริ่มต้น (mg-N/L) (■) คือ ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือ (mg-N/L) และ (●) คือประสิทธิภาพการกำจัด

จากรูปที่ 4.7 พบว่าความเข้มข้นที่เหลือมีค่าต่ำกว่าในทุกระดับความเข้มข้นเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น คือ 1.0, 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดูได้จากความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทที่เหลือลดลงเหลือ 0.08, 0.25 และ 0.64 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทในน้ำ พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไนเตรทที่เพิ่มขึ้น จาก  $91.34 \pm 0.64\%$  เหลือ  $87.39 \pm 0.31$  และ  $85.40 \pm 0.16\%$  ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นสูงจะมีจำนวนโมเลกุลมาก ในขณะที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าลดลง (นิพนธ์และคณิตา, 2550)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำ โดยเลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$  สามารถสรุปผลได้ดังนี้ คือ

1. เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$  ซึ่งเตรียมขึ้นตามสภาวะที่ระบุตามงานวิจัยของกันตพัฒน์ (2558) มีความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู (M.B.N.) ลดลงจาก  $144 \pm 47.42$  เหลือ  $75.10 \pm 21.10$  มิลลิกรัมต่อกรัม โดยที่สเปกตรัม FT-IR ของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีลักษณะคล้ายกับเปลือกสับปะรดก่อนปรับสภาพ แต่มีการลดลงของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล เมื่อนำมาดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$  จึงมีการปรากฏพีคที่เลขคลื่นประมาณ  $440$  ถึง  $450 \text{ cm}^{-1}$  และ  $550 \text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงให้เห็นถึงการดูดติดผิวของเฟอร์ริคบนพื้นที่ผิวของเปลือกสับปะรด

2. เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพและดัดแปรพื้นผิวด้วย  $Fe^{3+}$  มีความสามารถในการกำจัดสารละลายออร์โทฟอสเฟตในน้ำได้ดีกว่าเปลือกสับปะรดก่อนปรับสภาพ มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 93.77% และ 65.19% เมื่อแข่ววัสดุดังกล่าวในปริมาณที่เท่ากัน คือ 16 กรัมต่อลิตร ในสารละลายออร์โทฟอสเฟตเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นาน 10 ชั่วโมง

3. เปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพและดัดแปรพื้นผิวด้วย  $Fe^{3+}$  มีความสามารถในการกำจัดไนเตรทได้  $54.00 \pm 2.00\%$  เมื่อแข่วปริมาณวัสดุ 10 กรัมต่อลิตร นาน 2 ชั่วโมง ในสารละลายไนเตรทเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณวัสดุเป็น 80 กรัมต่อลิตร จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 94.25%

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาความสามารถของเปลือกสับปะรดดัดแปรพื้นผิวด้วย  $Fe^{3+}$  ในการกำจัดไอออนลบที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ลำดับสูงขึ้นไป เช่น  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$
2. ควรศึกษาสารที่ใช้เคลือบติดผิวที่เป็นไอออนของโลหะหนักตัวอื่นๆ เช่น  $Al^{3+}$
3. ควรเพิ่มการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่ 2-4 ชั่วโมง เพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำ
4. ควรศึกษาความสามารถในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสียจริง เช่น น้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้ง

## เอกสารอ้างอิง

กรรณิกรณ์ แสงฉาย, ณัฐชา ชินวงศ์ และปาริฉัตร นาครักษา. 2559. “การใช้เปลือกสับประรดตัดแปรรวมด้วยเฟอร์ริกไอออนในการกำจัดไอออนลบในน้ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และพิสมัย ชัยรัตน์อุทัย. 2558. เอกสารประกอบการสอนวิชา ปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กันตพัฒน์ กสิบุตร. 2558. “การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกสับประรดเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา, จารุวรรณ ตาพัวฒัน, ปิยวัฒน์ โพธิมงคลกุล และฉัฐรส คงสมภักดิ์. 2551.

“จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม(VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้โคโตซานเรซิน”.

*วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 18(1) : 68-79.

จินดา สนิทวงศ์, สุทิน ภูขวัญเมือง, วัชรินทร์ บุญภักดิ์, ประเทศ บัญพันธวงศ์, อุดร เสนากัสป์ และชาญชัย มณีดุลย์. 2528. “การใช้เปลือกสับประรดเป็นอาหารเสริมสำหรับเลี้ยงโคในฤดูแล้ง” รายงานผลงานวิจัยสาขาผลิตปศุสัตว์. 213-233.

จินดา สนิทวงศ์, จีระวัชร เข็มสวัสดิ์, ปรัชญา ปรัชญลักษณ์ และชาญชัย มณีดุลย์. 2530. “การใช้วัสดุพลอยได้การเกษตรเลี้ยงโค.” รายงานประจำปี 2530. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. 272-284.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปรินทร์ เต็มถาวรศิลป์. 2551. “การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตง และไม้พม่าจู้.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรภัก ณะเศวท และปิยาภรณ์ สมสมศรี. 2552. “การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสียด้วยกระบวนการชีวภาพผ่านไนตริฟิเคชันบางส่วน.” *วารสารรายงานการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*. 48 : 80-88.

รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมั่งคลา. 2554. “จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมี การดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบตัดแปร.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 21(2) : 337-348.

รัตนกร ยวงสวัสดิ์, วลัยรัตน์ จันทอัมพร, และดวงกมล ณ ระนอง. 2554. “การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย.” *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 28(4) : 31-37.

รววิทย์ จันทรสุวรรณ. 2558. “ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ.” รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

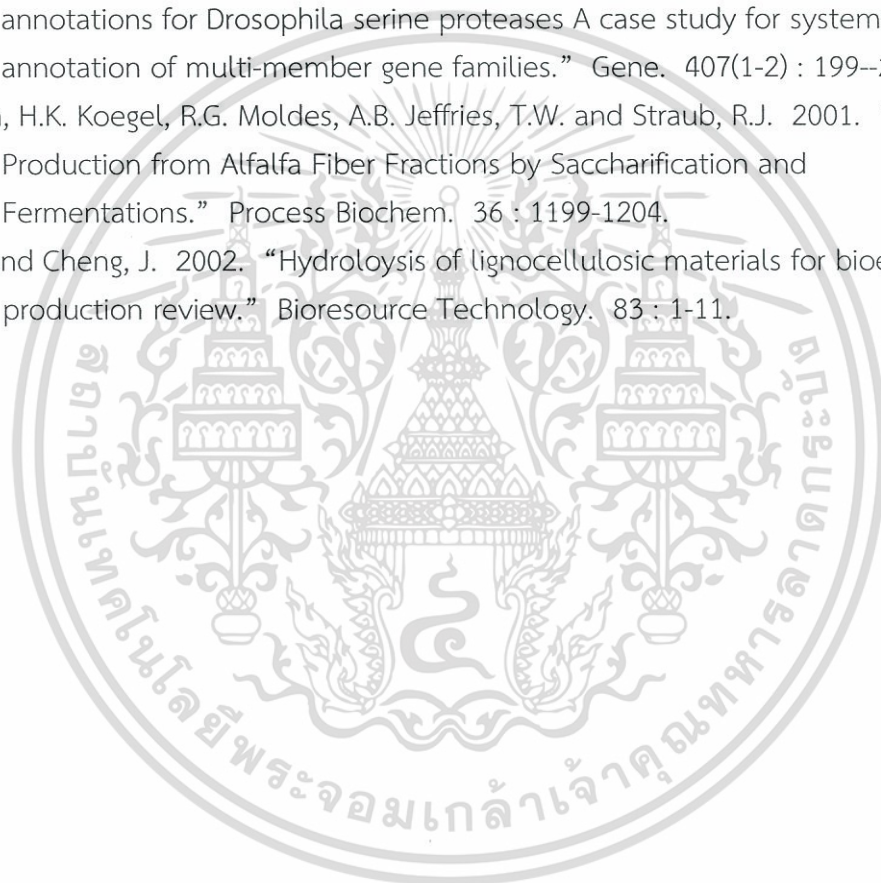
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายพิน ไซยพันธ์ สุรเชษฐ์ ชุตินา และวิมลศิริ พรทวีวัฒน์. 2550. ตัวกรองชีวภาพจากวัสดุธรรมชาติเพื่อกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนและไนเตรทร่วมกับระบบเติมอากาศในระบบบำบัดน้ำในสระหรือบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ระยะที่ 1-2). [online]. Available : <https://www.kmutt.ac.th/rippc/biofil2.htm>.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2560. สถานการณ์เศรษฐกิจที่สำคัญและแนวโน้มปี 2560. [Online]. Available : [http://www.oae.go.th/download/document\\_tendency/agri\\_situation2560.pdf](http://www.oae.go.th/download/document_tendency/agri_situation2560.pdf)
- สุทธิรัตน์ ศรีณย์ภัทรานนท์. 2555. “การบำบัดน้ำเสียจากน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นด้ายยางยืด โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมาชะพร้าว ร่วมกับ ระบบหญ้ากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภาวดี น้อยน้ำใส และสมสกุล รัตนกฤษกร. 2559. “การปรับปรุงตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา.” *วารสารวิทยาศาสตร์ มช.* 44(3) : 542-552.
- Adapa, P.K. Tabil, L.G. Schoenau, G.J. Canam, T. and Dumonceaux, T. 2011. “Quantitative Analysis of Lignocellulosic Components of Non-Treated and Steam Exploded Barley, Canola, Oat and Wheat Straw Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy.” *Journal of Agricultural Science and Technology B1.* : 177-188.
- Altıntaş, M.M. Ülgen, K.O. Kirdar, B. Onsan, I.Z. and Oliver, S.G. 2002. “Improvement of Ethanol Production from Starch by Recombinant Yeast.” *Through Manipulation of Environmental Factors Enzyme and Microbial Technology.* 31 : 640-647.
- Alvira, P.E. Tomas-Pejo, M. Ballesteros. and Nergro, M.J. 2010. “Pretreatment technology for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis.” *Bioresource Technology.* 101 : 4851-4861.
- Areprasert, C. Zhao, P. Ma, D. Shen, Y. and Yoshikawa, K. 2014. “Alternative Solid Fuel Production from Paper Sludge Employing Hydrothermal Treatment.” *Energ Fuel.* 28 : 1198-1206.
- Atlas, R.M. and Bartha, R. 1993. “Microbial Ecology: Fundamentals and Application.” California. : The Benjamin Cumming Publishing Company.
- Bastawde, K.B. 1992. “Xylan structure, microbial xylanases and their mode of action.” *World J. of Microbiology. and Biotechnology.* 8 : 355-368.
- Browing, B.L. 1963. “Method in wood chemistry, pp.389-407. Interscience.” Publishers, New York, London.
- Cheng, K.K. Zhang, J.A. Ping, W.X. Ge, J.P. Zhou, Y.J. Ling, H.Z. and Xu, J.M. 2008. “Sugarcane Bagasse Mild Alkaline/Oxidative Pretreatment for Ethanol Production by Alkaline Recycle Process.” *Biochem Biotechnology.* 151 : 43-50.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cheng, W. Ip, Y.T. Xu, Z. 2013. "Gudu an Armadillo repeat-containing protein is required for spermatogenesis in *Drosophila*." *Gene*. 531(2) : 294-300.
- Diola, D.M. and Orozco, R.C. 2014. "Improved removal of copper ions from aqueous solution using NaOH-pretreated coco peat." *ASEAN Engineering Journal*. 4(1) : 86-97.
- Eriksson, K.E.L. 1990. "Biotechnology in the pulp and paper industry. *Wood Science and Technology*." 24 : 79-101.
- Goshadrour, A. Karimi, k. and Taherzadeh, M.J. 2011. "Bioethanol Production from Sweet Sorghum Bagasse by *Mucor hiemalis*." *Industrial Crops and Products*. 34 : 1219-1225.
- Kaewprasit, C.E. Hequet, N. Abidi, J.M. and Douillard. 1998. "Cotton specific surface area measurement by adsorption of methylene blue." Beltwide Cotton Conference, Sandiego, USA.
- Kim, J. 2008. "Lignocellulose based anion adsorption medium and process for marking and using same for the selective removal of phosphate and arsenic anionic contaminations from aqueous solution." Patent application publication. 11 : 906-954.
- Kumar, V. Makkar, H.P.S. Amselgruber, W. and Becker, K. 2010. "Physiological haematological and histopathological responses in common carp (*Cyprinus carpio L.*) fingerlings fed with differently detoxified *Jatropha curcas* kernel meal. *Food Chemistry Toxicology*. 48 (8-9) : 2063-2072.
- Lee, J.S. Parameswaran, B. Lee, J.P. and Park, P.C. 2008. "Recent Developments of Key Technologies on Cellulosic Ethanol Production." *Journal of Scientific & Industrial Research*. 67 : 865-873.
- Liu, X. Ao, H. Xiong, X. Xiao, J. and Liu, J. 2012. "Arsenic Removal from Water by Iron-Modified Bamboo Charcoal." *Water Air Soil Pollut.* 223 : 1033-1044.
- Mandina, S., Chigondo, F., Shumba, M., Nyamunda, B.C. and Sebata, E. 2013. "Removal of chromium (VI) from aqueous solution using chemically modified orange (*Citrus cinensis*) peel." *Journal of Applied Chemistry*. 6(2) : 66-75.
- McMillan, J.D. 1994. "Pretreatment of lignocellulosic biomass In Enzymatic conversion of biomass for fuels production." American Chemical Society Washington DC. 292-324.
- Ning-chuan, F. and Xue-yi, G. 2012. "Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel." *Trans Nonferrous Met. Soc. China*. 22 : 1224-1231.

- Ofomaja AE, Naidoo EB, Modise SJ. 2009. "Removal of copper(II) from aqueous solution by pine and base modified pine cone powder as biosorbent." *J Hazard Mater.* 168 : 909–917.
- Pradthana. 2008. กระบวนการดูดซับ(Adsorption Process). [Online]. Available : <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>.
- Slininger, P.J. Bothast, R.J. Van Cauwenberge, J.E. and Kurtzman, C.P. 1982. "Conversion of D-xylose to ethanol by the yeast *Pachysolen tannophilus*." *Biotechnology Bioengland.* 24 : 371–384.
- Shah, P.K. Tripathi, L.P. Jensen, L.J. Gahnim, M. Mason, C. Furlong, E.E. Rodrigues, V. White, K.P. Bork, P. and Sowdhamini, R. 2008. "Enhanced function annotations for *Drosophila* serine proteases A case study for systematic annotation of multi-member gene families." *Gene.* 407(1-2) : 199--215.
- Sreenath, H.K. Koegel, R.G. Moldes, A.B. Jeffries, T.W. and Straub, R.J. 2001. "Ethanol Production from Alfalfa Fiber Fractions by Saccharification and Fermentations." *Process Biochem.* 36 : 1199-1204.
- Sun, Y. and Cheng, J. 2002. "Hydrolysis of lignocellulosic materials for bioethanol production review." *Bioresource Technology.* 83 : 1-11.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

#### ก.1 การทดสอบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue Number, M.B.N.)

เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ 1 กรัม ตามวิธีของปรินทร (2551) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

##### 1. การเตรียมสารเคมี

##### 1.1 สารละลายบัฟเฟอร์พีเอชเท่ากับ 7.0

อบสาร (A) คือ โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) และสาร (B) คือ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) ที่อุณหภูมิ  $120\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งสาร (A) มา 9.08 กรัม และสาร (B) 23.88 กรัม ตามลำดับ และละลายด้วยน้ำกลั่น ปริมาตรเป็น 1 ลิตร นำสารละลาย (A) มา 400 มิลลิลิตร และสารละลาย (B) มา 600 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจะได้สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช เท่ากับ 7.0

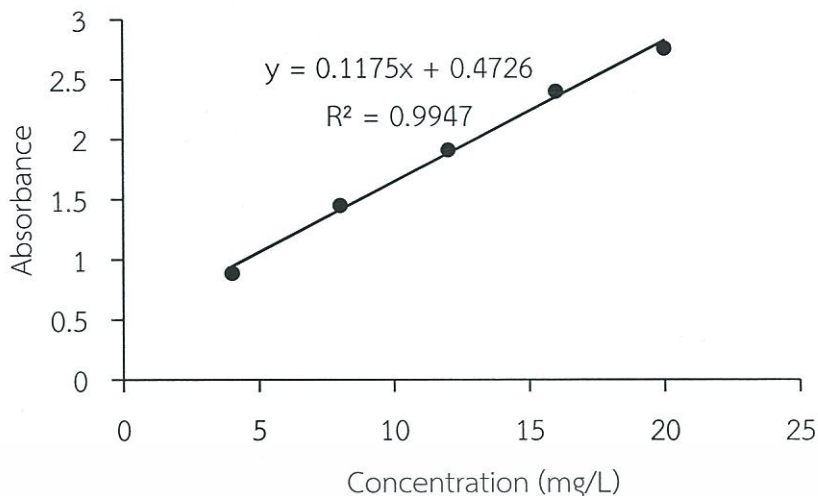
##### 1.2 สต็อกสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (พีเอช 7.0)

ชั่งเมทิลีนบลูหนัก 0.500 กรัม ละลายในสารละลายบัฟเฟอร์ พีเอช 7.0 และเทลงในขวดปรับปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดวัดด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.0

##### 2. วิธีทำ

##### 2.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 4, 8, 12, 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 80, 160, 240, 320 และ 400 ไมโครลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.0 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) นำค่า Absorbance ที่ได้สร้างกราฟมาตรฐาน โดยที่แกน x คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (mg/L) และแกน y คือ Absorbance จากนั้นทำการหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลูดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทธิลีนบลู

## 2.2. การศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู

วิธีการศึกษามีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารละลายเมทธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 25, 50, 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทธิลีนบลูความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 5, 10, 20 และ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดวัดด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอชเท่ากับ 7.0

2) ชั่งตัวดูดซับมาอย่างละ 0.01 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายเมทธิลีนบลูเข้มข้น 25, 50, 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการห่อฟอยล์ และเขย่าบนวอร์นด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

4) นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดความเข้มข้นเมทธิลีนบลูที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตร-โฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร

5) คำนวณค่าความจุในการดูดซับเมทธิลีนบลู ( $q_e$ ) ในแต่ละขวด โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M}$$

เมื่อ  $q_e$  = ความจุในการดูดซับ (mg/g)

$C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทธิลีนบลู (mg/L)

$C_e$  = ความเข้มข้นที่เหลือของเมทธิลีนบลูที่เวลาสมดุล (mg/L)

$V$  = ปริมาตรสารละลายเมทธิลีนบลู (L)

$M$  = จำนวนตัวดูดซับที่ใช้ (g)

6) ทำการพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่างค่า  $\frac{1}{C_e}$  คือ แกน x และค่า  $\frac{1}{Q_e}$  คือ แกน y จะได้

กราฟที่มีฟังก์ชันสมการเส้นตรง โดยส่วนกลับของจุดตัดแกน y ของกราฟจะเป็นค่าความจุสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทธิลีนบลู ( $q_m$ ) หรือเป็นค่า Methylene Blue Number หน่วยคือ mg/g เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก และการคำนวณความจุในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ในการเคลือบผิวสับประรด  
วิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามกัณฑ์พัฒนา (2558)

### 1. การเตรียมสารเคมี

1.1 สต็อกเหล็ก ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

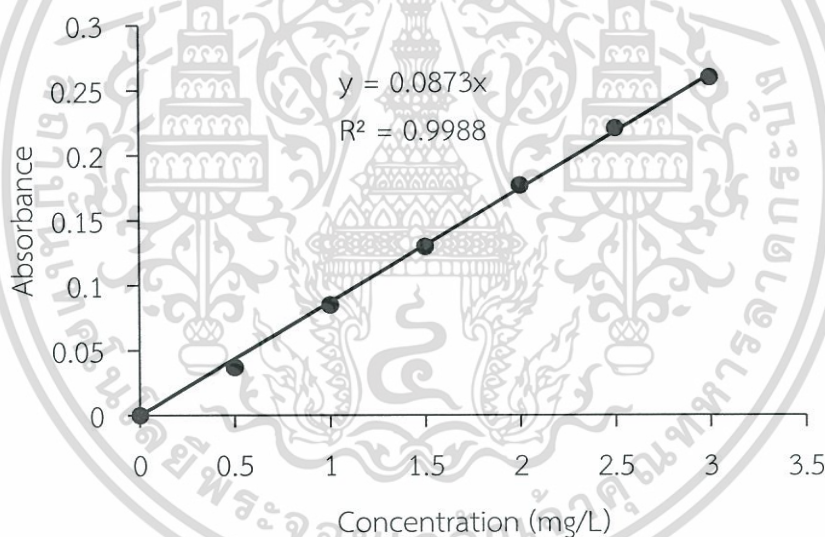
1.2 สารละลายเหล็กความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  0.1 โมลาร์

ซึ่ง  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  27.0295 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

### 2. วิธีการ

#### 2.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานเหล็ก

ปิเปตสต็อกเหล็ก ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 และ 15 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  คือ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 283 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) นำค่า Absorbance ที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน โดยที่แกน x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานของเฟอร์ริกไอออน (mg/L) และแกน y คือ Absorbance จากนั้นทำการหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของเฟอร์ริกไอออน ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของเฟอร์ริกไอออน

#### 2.2 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายตัวอย่าง

วิธีการวิเคราะห์ที่มีขั้นตอนดังนี้

1) ปิเปตสารละลายข้อ 1.2 มา 50 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดพลาสติก จำนวน 3 ขวด และนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนเริ่มต้น โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 283 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ค่า Absorbance ที่ได้แทนลงใน (y) ของฟังก์ชันสมการเส้นตรงในรูปที่ ก.2 จะได้ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนเริ่มต้น

2) ชั่งตัวดูดซับอย่างละ 20 กรัม ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายเฟอร์ริก 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และแช่ตัวดูดซับไว้นาน 30 นาที จากนั้นปิเปตส่วนใส่ของสารละลายมา 50 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดพลาสติกที่เตรียมไว้จำนวน 3 ขวด และนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นเฟอร์ริกไอออนที่เหลือ เหมือนกับข้อ 1)

2.3 การคำนวณค่าความจุในการดูดซับเหล็ก ( $Fe^{3+}$ ) ของวัสดุดูดซับ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{M}$$

เมื่อ  $q_e$  = ค่าความจุในการดูดซับ  $Fe^{3+}$  ของเปลือกสับปะรด (mg/g)

$C_0$  = ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  ก่อนใช้แช่เปลือกสับปะรด (mg/L)

$C_e$  = ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  หลังใช้แช่เปลือกสับปะรด (mg/L)

$V$  = ปริมาตรของสารละลาย  $FeCl_3$  (L)

$M$  = จำนวนตัวดูดซับที่ใช้ (g)

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณออร์โทฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอร์บิกแอซิด (Ascorbic Acid) วิธีการอ้างอิงตามกรองแก้วและพิสมัย (2558) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

#### 1. การเตรียมสารเคมี

##### 1.1 กรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล

เติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 70 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร

##### 1.2 สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต ( $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 1/2H_2O$ )

ละลาย  $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 1/2H_2O$  1.3715 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 500 มิลลิลิตร

##### 1.3 สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ( $NH_4Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ )

ละลาย  $NH_4Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$  จำนวน 20 กรัมในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร

##### 1.4 สารละลายแอสคอร์บิก 0.1 โมลาร์ (เก็บสารละลายนี้ในตู้เย็น และสารนี้คงตัวอยู่ได้นาน

1 สัปดาห์)

ละลายกรดแอสคอร์บิก 1.76 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

##### 1.5 น้ำยารวม (Combined reagent)

การเตรียมน้ำยารวมโดยผสมสารละลาย ดังนี้

กรดซัลฟิวริก 5.0 นอร์มอล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ปริมาตร 15 มิลลิลิตร

สารละลายแอมโมเนียโพแทสเซียมทาเทรต ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

กรดแอสคอร์บิก ปริมาตร 30 มิลลิลิตร

##### 1.6 สารละลายสต็อกฟอสเฟต ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ละลาย  $KH_2PO_4$  219.5 mg ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

##### 1.7 สารละลายออร์โทฟอสเฟต ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

นำสารละลายจากข้อ 1.6 มา 50 มิลลิลิตร ปรับสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร สารละลายนี้จะนำไปเตรียมกราฟมาตรฐานในข้อ 2.1 และเป็นสารละลายออร์โทฟอสเฟตในข้อ

2.2 ตามลำดับ

#### 2. วิธีทำ

##### 2.1. การเตรียมกราฟมาตรฐานฟอสเฟต ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขั้นตอนดังนี้

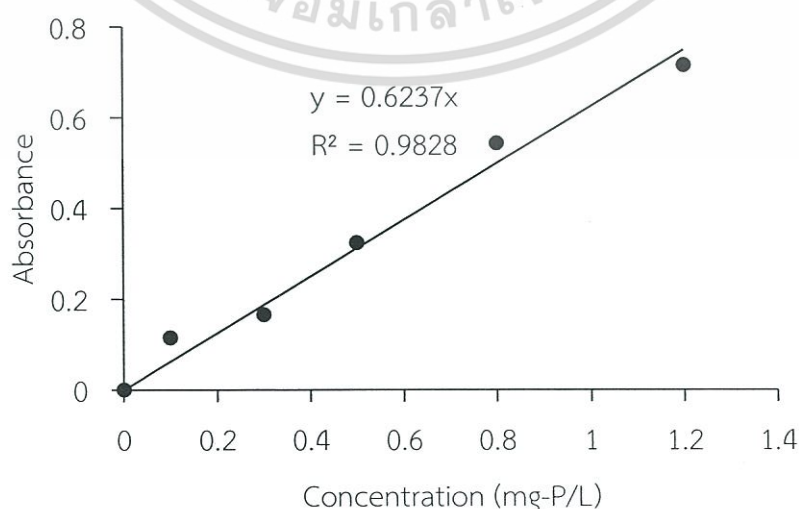
1) ปิเปตสารละลายจากข้อ 1.7 ลงในขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ตามตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตสำหรับทำกราฟมาตรฐาน

สารละลาย มาตรฐานฟอสเฟต (มิลลิลิตร)	น้ำยารวม (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	8	42	50	0
2	8	40	50	0.1
6	8	36	50	0.3
10	8	32	50	0.5
16	8	26	50	0.8
24	8	18	50	1.2

2) เมื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตสำหรับทำกราฟมาตรฐานตามตารางที่ ก.1 แล้ว นำทิ้ง 6 ขวดตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีแต่ต้องไม่เกิน 30 นาที

3) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง *ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์* (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร นำค่า Absorbance ที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน โดยที่แกน x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต (mg-P/L) และแกน y คือ Absorbance จากนั้นทำการหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานและตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

1) ปิเปตสารละลายออร์โธฟอสเฟต ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด (ถ้าเกิดสีแดงให้เติมกรดซัลฟิวริก 5 N ที่ละลายจนสีแดงหายไป) ทำให้เกิดสีโดยเติมน้ำยารวม 8.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัด ตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีแต่ต้องไม่เกิน 30 นาที

2) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ค่า Absorbance ที่ได้แทนลงใน (y) ของฟังก์ชันสมการเส้นตรงในรูปที่ ก.3 จะได้ความเข้มข้นสารละลายออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้น

3) ชั่งตัวดูดซับ 0.80 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายออร์โธฟอสเฟต ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดจุกดำ และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

4) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดกรองแบบลดความดัน และกรองด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

5) ปิเปตสารละลายที่กรองได้ มา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการทดลองเหมือนกับข้อ 1) และ 2) จะได้ความเข้มข้นสารละลายออร์โธฟอสเฟตที่เหลือหลังเขย่า 10 ชั่วโมง นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 2) และ 5) มาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดได้ (%)

## ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท ด้วยวิธีบรูซิน วิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามกรองแก้วและพิสมัย (2558) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการโดยสรุปดังนี้

### 1. การเตรียมสารเคมี

#### 1.1 สารละลายบรูซิน-กรดซัลฟานิลิก (Brucine-Sulfanilic Acid Solution)

ชั่งบรูซินซัลเฟต 1.0 กรัมผสมกับกรดซัลฟานิลิก 0.1 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 °C ปริมาตร 60 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

#### 1.2. สารละลายกรดซัลฟูริก (4+1)

นำกรดซัลฟูริกเข้มข้น 500 มิลลิลิตรเติมลงในน้ำกลั่น 125 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นและเก็บใส่ขวดสีชา

#### 1.3 สารละลายโซเดียมคลอไรด์

ละลาย NaCl 75 กรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร

#### 1.4 สารละลายมาตรฐานไนเตรท (Stock nitrate Solution) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ชั่งโพแทสเซียมไนเตรท ( $\text{KNO}_3$ ) 0.7218 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร 1 ลิตร

#### 1.5 สารละลายมาตรฐานไนเตรท (Standard Nitrate Solution) ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานไนเตรทในข้อที่ 1.4 มา 20 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้จะนำไปเตรียมกราฟมาตรฐาน ในข้อ 2.1 และเป็นสารละลายไนเตรท ในข้อ 2.6

## 2. วิธีทำ

### 2.1 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ปิเปตสารละลายจากข้อ 1.5 ลงในหลอดทดลองที่เตรียมไว้ ตามตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรทสำหรับทำกราฟมาตรฐาน

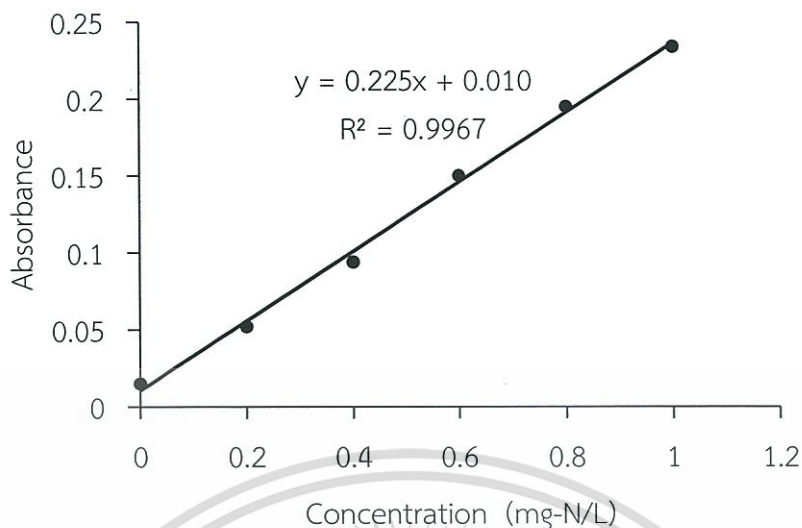
สารละลายมาตรฐานไนเตรท (มิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของสารละลายไนเตรท (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)
0	10	10	0
1	9	10	0.2
2	8	10	0.4
3	7	10	0.6
4	6	10	0.8
5	50	10	1.0

- 2) เมื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรทสำหรับทำกราฟมาตรฐาน ตามตารางที่ ก.2 แล้ว นำทั้ง 6 หลอดทำให้เกิดสีโดยเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันและนำมาแช่ในน้ำเย็นจัด เติมกรดซัลฟูริก 4+1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

- 3) นำมาเติมสารละลายบรูซอิน-ซัลฟานิลิก 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและนำหลอดไปแช่ในเครื่องอังน้ำอุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำหลอดมาแช่ในอ่างน้ำเย็นจนอุณหภูมิหลอดเท่ากับอุณหภูมิห้อง

- 4) วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร นำค่า Absorbance ที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน โดยที่แกน x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไนเตรท (mg-N/L) และแกน y คือ Absorbance จากนั้นทำการหาฟังก์ชันสมการเส้นตรง จะได้กราฟมาตรฐานของสารละลายไนเตรทดังแสดงในรูปที่ ก.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานไนเตรท

## 2.2 การวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานและตัวอย่าง

มีขั้นตอนดังนี้

1) ปิเปตสายละลายในข้อ 1.5 มา 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง มาทำให้เกิดสีเหมือนกับข้อ 2) ค่า Absorbance ที่ได้แทนลงใน (y) ของฟังก์ชันสมการเส้นตรงในรูปที่ ก.4 จะได้ความเข้มข้นสารละลายไนเตรทเริ่มต้น

2) ทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัส โดยชั่งตัวดูดซับมา 0.25 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายไนเตรทเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปิดจุกดำ และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนเป็นเวลา 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง

3) ทำการแปรผันปริมาณตัวดูดซับ โดยชั่งตัวดูดซับมา 0.25, 0.50, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายไนเตรทเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปิดจุกดำ และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4) การแปรผันความเข้มข้นของของสารละลายไนเตรท โดยชั่งตัวดูดซับมา 2.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายไนเตรทเข้มข้น 1.0, 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปิดจุกดำ และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

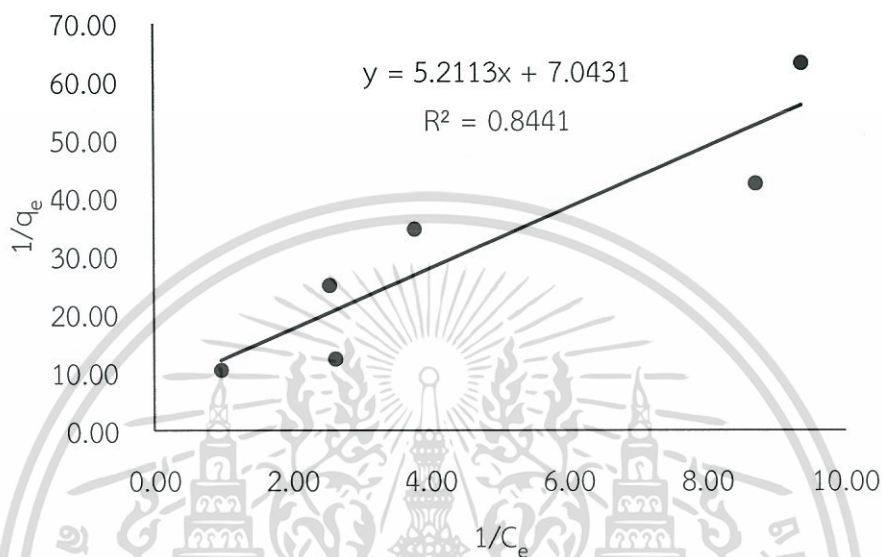
5) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดกรองแบบลดความดัน และกรองด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 42

6) ปิเปตสารละลายที่กรองได้ มา 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง และนำมาทำให้เกิดสีเหมือนกับเตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรท ค่า Absorbance ที่ได้แทนลงใน (y) ของฟังก์ชันสมการเส้นตรงในรูปที่ ก.4 จะได้ความเข้มข้นสารละลายไนเตรทที่เหลือ นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1) และ 5) มาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดได้ (%)

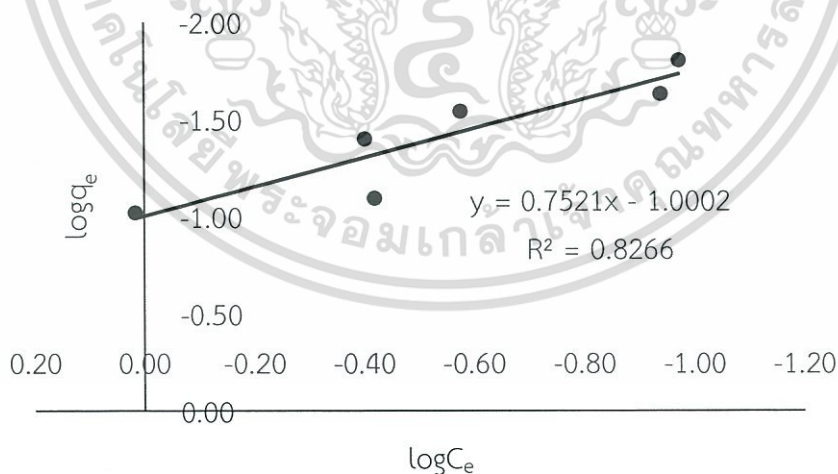
ก.5 การหาค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และพรุนดลิชของการดูดซับไนเตรตด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$  วิธีการคำนวณอ้างอิงตามสูตรที่ (2555)

มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

1) นำ ค่า  $1/C_e$  และ  $1/q_e$  มาพล็อตกราฟเส้นตรง จากนั้นหาฟังก์ชันของสมการเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ ก.5 นำค่า  $\log C_e$  และ  $\log q_e$  มาพล็อตกราฟเส้นตรงดังแสดงรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ในการดูดซับไนเตรตด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$



รูปที่ ก.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพรุนดลิชในการดูดซับไนเตรตด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพ ด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย  $Fe^{3+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) คำนวณหาค่า  $K_L$  และค่า  $q_m$  ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$q = q_m KC / 1 + KC$$

$$1/q = 1/q_m + 1/Kq_m C$$

แทนค่าสมการที่ได้จากรูปที่ ก.5 จะได้

$$1/q = 1/kq_m(1/C) + 1/q_m$$

$$1/q = 5.2113(1/C) + 7.0431$$

จากรูปที่ ก.5 สมการเส้นตรงที่ได้มีความชันเท่ากับ 5.2113 และจุดตัดบนแกนคือ 7.0431 แทนค่าได้

$$1/Kq_m = 5.2113 \quad , \quad k_L = 1.3513$$

$$1/q_m = 7.0431 \quad , \quad q_m = 0.1420 \text{ mg/g}$$

3) คำนวณหาค่า  $K_F$  และค่า  $n$  ของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$q = K_F C^{1/n}$$

$$\log q = \log K_F + 1/n \log C$$

แทนค่าสมการที่ได้จากรูปที่ ก.6 จะได้

$$\log q = -1.0002 + 0.7521 \log C$$

จากรูปที่ ก.6 สมการเส้นตรงที่ได้มีความชันเท่ากับ 0.7521 และจุดตัดบนแกนคือ -1.0002 แทนค่าได้

$$\log K_F = -1.0002 \quad , \quad K_F = 10.0046 \text{ L/g}$$

$$1/n = 0.7521 \quad , \quad n = 1.3296$$



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ Methylene Blue Number ของเปลือกสับประรดชนิดต่างๆ

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ครั้งที่	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	Absorbance		ความเข้มข้น* (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าการเจือจาง (เท่า)		ความเข้มข้น เมทิลีนบลู เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น เมทิลีนบลู ที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
			เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ		
เปลือกก่อน ปรับสภาพ	1	0.0113	1.464	0.793	8.46	2.73	2.5	-	21.15	2.73
		0.0105	1.591	0.912	9.52	2.73	5	2.5	47.59	9.35
		0.0110	1.629	1.584	9.84	3.74	10	5	98.42	47.29
		0.0112	1.316	1.201	7.18	6.97	40	25	287.11	174.13
		0.0112	1.100	2.633	5.34	18.39	95	25	507.26	459.66
	2	0.0102	1.464	0.798	8.44	2.77	2.5	-	21.09	2.78
		0.0119	1.591	0.916	9.52	3.77	5	2.5	47.59	9.43
		0.0124	1.629	1.590	9.84	9.51	10	5	98.41	47.54
		0.0109	1.316	1.29	7.18	6.96	40	25	287.11	173.91
		0.0104	1.100	2.64	5.34	18.45	95	25	507.26	461.15

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ครั้งที่	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	Absorbance		ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าการเจือจาง (เท่า)		ความเข้มข้น เมทิลีนบลู เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น เมทิลีนบลู ที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
			เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ		
เปลือกก่อน ปรับสภาพ	3	0.0103	1.581	1.288	9.43	6.40	2.5	-	23.58	6.40
		0.0121	1.589	1.220	9.52	6.36	5	2.5	47.51	15.90
		0.0133	1.618	1.649	9.84	10.39	10	5	97.48	51.97
		0.0100	1.204	0.643	7.18	1.45	40	50	249.67	72.51
		0.0105	0.905	1.258	5.34	6.68	95	50	507.62	333.23
ปรับสภาพ ด้วย NaOH	1	0.0129	1.637	1.366	9.91	7.55	2.5	-	24.77	7.55
		0.0119	1.584	1.326	9.46	7.22	5	2.5	47.29	18.05
		0.0124	1.591	1.376	9.51	7.69	10	5	95.18	38.43
		0.0109	1.316	1.007	7.18	4.55	40	25	287.11	113.43
		0.0104	1.102	1.878	5.36	11.09	95	25	507.88	299.02

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ครั้งที่	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	Absorbance		ความเข้มข้น* (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าการเจือจาง (เท่า)		ความเข้มข้น เมทิลีนบลู เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น เมทิลีนบลู ที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
			เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ		
ปรับสภาพ ด้วย NaOH	2	0.0164	1.637	0.721	9.91	2.11	2.5	2	24.78	4.22
		0.0107	1.584	1.343	9.46	7.41	5	2.5	47.29	18.52
		0.0123	1.591	1.340	9.51	7.38	10	5	95.18	36.91
		0.0105	1.316	1.019	7.18	4.66	40	25	287.11	116.26
		0.0140	1.102	1.081	5.36	5.18	95	50	508.88	258.90
	3	0.0123	1.523	1.54	9.01	9.08	2.5	-	22.52	9.08
		0.0119	1.531	1.807	9.48	11.36	5	2	47.42	22.71
		0.0130	1.587	1.047	9.17	4.89	10	10	91.69	48.89
		0.0134	1.550	0.817	6.21	2.93	40	50	248.31	146.56
		0.0145	1.100	0.753	5.34	2.39	95	50	507.27	119.32

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ครั้งที่	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	Absorbance		ความเข้มข้น* (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าการเจือจาง (เท่า)		ความเข้มข้น เมทิลีนบลู เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น เมทิลีนบลู ที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
			เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ		
ปรับสภาพด้วย NaOH และตัด แปรมิวเปลือก สับประรดด้วย Fe <sup>3+</sup>	1	0.0121	1.554	1.538	9.20	9.07	2.5	-	23.01	9.68
		0.0128	1.502	1.636	8.76	9.90	5	2.5	43.80	24.75
		0.0101	1.596	1.587	9.56	9.48	10	5	95.61	47.42
		0.0109	2.059	1.134	13.50	5.63	20	25	270.03	140.72
		0.0109	1.119	2.238	5.50	15.02	95	25	522.62	375.62
	2	0.0112	1.554	1.687	9.20	10.34	2.5	-	23.01	10.34
		0.0110	1.502	1.776	8.76	11.09	5	2.5	43.80	27.73
		0.0100	1.596	1.837	9.56	11.61	10	5	95.61	58.06
		0.0111	2.059	1.297	13.50	7.02	20	25	270.03	175.41
		0.0107	1.119	2.172	5.50	144.46	95	25	522.62	361.58

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ชนิดของ ตัวดูดซับ	ครั้งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	Absorbance		ความเข้มข้น* (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ค่าการเจือจาง (เท่า)		ความเข้มข้น เมทิลีนบลู เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น เมทิลีนบลู ที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
			เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ	เริ่มต้น	ที่เหลือ		
ปรับสภาพด้วย NaOH และตัด แปรมิวเปลือก สับปรดด้วย Fe <sup>3+</sup>	3	0.0115	1.554	0.755	9.20	2.40	2.5	-	23.01	2.40
		0.0102	1.502	1.651	8.76	10.03	5	2.5	43.80	25.07
		0.0112	1.596	1.92	9.56	12.32	10	5	95.61	61.59
		0.0105	2.059	1.285	13.50	6.91	20	25	270.03	172.85
		0.0142	1.119	2.17	5.50	14.45	95	25	522.62	361.15

หมายเหตุ: \* ใช้สมการ  $Y = 0.1175X + 0.4726$  ในการคำนวณ

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาปริมาณเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) และความจุในการดูดซับเหล็กในการเคลือบผิวสับประรด

ชนิดของตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	Abs	ค่าการเจือจาง ( $\times 10^3$ เท่า)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ $Fe^{3+}$ $\times 10^4$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ $Fe^{3+}$ (โมลต่อลิตร)	Abs	ค่าการเจือจาง ( $\times 10^3$ เท่า)	ความเข้มข้น* หลังแช่ 30 นาที ของ $Fe^{3+}$ $\times 10^4$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น หลังแช่ 30 นาที ของ $Fe^{3+}$ (โมลต่อลิตร)	$Q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ชุดควบคุม	1	-	0.240	2	0.54	0.09	0.240	2	0.54	0.09	N/A
	2	-	0.243	2	0.55	0.09	0.243	2	0.55	0.09	N/A
	3	-	0.243	2	0.55	0.09	0.243	2	0.55	0.09	N/A
เปลือกปรับสภาพและตัดแปรรูปเปลือกสับประรดด้วย $Fe^{3+}$	1	20	0.220	2	0.50	0.09	0.255	1	0.29	0.05	10.50
	2	20	0.240	2	0.55	0.09	0.257	1	0.29	0.06	13.00
	3	20	0.244	2	0.56	0.09	0.269	1	0.30	0.05	13.00

หมายเหตุ: \* ใช้สมการ  $Y=0.0873X$  ในการคำนวณ และ N/A : ไม่คำนวณเนื่องจากความเข้มข้นของเหล็กเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต เข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร

ชนิดของตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นเริ่มต้นออร์โธฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นออร์โธฟอสเฟต หลังเขย่า 10 ชั่วโมง* (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เปลือกไม่ปรับสภาพ	1	0.8023	0.618	2.5	2.47	0.537	-	0.86
	2	0.8058	0.615	2.5	2.47	0.539	-	0.86
	3	0.8010	0.621	2.5	2.50	0.545	-	0.87
เปลือกปรับสภาพ และตัดแปรผิวเปลือก สัมผัสด้วย Fe <sup>3+</sup>	1	0.8270	0.618	2.5	2.47	0.086	-	0.14
	2	0.8150	0.615	2.5	2.47	0.105	-	0.17
	3	0.8025	0.612	2.5	2.45	0.115	-	0.18

หมายเหตุ: \* ใช้สมการ  $Y=0.6237X$  ในการคำนวณ

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบการกำจัดไนเตรท ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ที่ระยะเวลาเวลาสัมผัสต่างกัน

ชนิดของตัวอย่าง	ระยะเวลาสัมผัส	ครั้งที่	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นเริ่มต้นไนเตรท* (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นไนเตรทหลังเขย่าที่ระยะเวลาต่างกัน* (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)
เปลือกปรับสภาพและตัดแปรมิวเปลือกสับประรดด้วย Fe <sup>3+</sup>	1	1	0.101	4	1.62	0.086	4	1.35
		2	0.119	4	1.93	0.087	4	1.36
		3	-	-	-	0.074	4	1.14
	2	1	0.101	4	1.62	0.054	4	0.78
		2	0.119	4	1.93	0.058	4	0.85
		3	-	-	-	0.056	4	0.81
		4	0.119	4	1.94	0.065	4	0.98
		5	0.127	4	2.08	0.062	4	0.92
	4	1	0.101	4	1.62	0.080	4	1.24
		2	0.119	4	1.93	0.092	4	1.46
		3	-	-	-	0.089	4	1.40
	6	1	0.101	4	1.62	0.082	4	1.28
		2	0.119	4	1.93	0.090	4	1.42
		3	-	-	-	0.088	4	1.39

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

ชนิดของตัวอย่าง	ระยะเวลาสัมผัส	ครั้งที่	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นเริ่มต้นไนเตรท* (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นไนเตรทหลังเขย่าที่ระยะเวลาต่างกัน* (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)
เปลี่ยนปรับสภาพและแปรผิวเปลือกสับปรดด้วย Fe <sup>3+</sup>	8	1	0.101	4	1.62	0.089	4	1.40
		2	0.119	4	1.93	0.091	4	1.44
		3	-	-	-	0.086	4	1.35
	10	1	0.101	4	1.62	0.077	4	1.19
		2	0.119	4	1.93	0.091	4	1.44
		3	-	-	-	0.100	4	1.60
	12	1	0.101	4	1.62	0.088	4	1.39
		2	0.119	4	1.93	0.092	4	1.46
		3	-	-	-	0.085	4	1.33
	24	1	0.101	4	1.62	0.090	4	1.42
		2	0.119	4	1.93	0.087	4	1.36
		3	-	-	-	0.088	4	1.39

หมายเหตุ: \* ใช้สมการ  $Y=0.225X+0.010$  ในการคำนวณ

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบการกำจัดไนเตรท ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ที่ปริมาณวัสดุชุดซ้ำต่างกัน

ชนิดของตัวอย่าง	ปริมาณวัสดุชุดซ้ำ (กรัมต่อลิตร)	ครั้งที่	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นเริ่มต้นไนเตรท* (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	Abs	ค่าการเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นไนเตรทหลังเขย่าที่ปริมาณวัสดุชุดซ้ำต่างกัน* (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)
เปลือกปรับสภาพและดัดแปรผิวเปลือกสับปรดด้วย Fe <sup>3+</sup>	10	1	0.119	4	1.94	0.123	2	1.00
		2	0.127	4	2.08	0.131	2	1.07
	20	1	0.119	4	1.94	0.031	4	0.37
		2	0.127	4	2.08	0.032	4	0.39
	40	1	0.119	4	1.94	0.030	4	0.36
		2	0.127	4	2.08	0.035	4	0.44
	60	1	0.119	4	1.94	0.024	4	0.25
		2	0.127	4	2.08	0.026	4	0.28
	80	1	0.119	4	1.94	0.017	4	0.12
		2	0.127	4	2.08	0.016	4	0.11
	120	1	0.119	4	1.94	0.016	4	0.11
		2	0.127	4	2.08	0.016	4	0.11

หมายเหตุ: \*ใช้สมการ  $Y=0.225X+0.010$  ในการคำนวณ

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบการกำจัดไนเตรทที่ความเข้มข้นต่างกัน

ชนิดของตัวอย่าง	ความเข้มข้นไนเตรท (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	ครั้งที่	Abs	ค่าการ เจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นเริ่มต้น ไนเตรท (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	Abs	ค่าการ เจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นไนเตรท หลังเขย่าที่ความเข้มข้น ต่างกัน (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)
เปลือกปรับ สภาพและตัด แปรรูปเปลือก สับปะรดด้วย Fe <sup>3+</sup>	1.0	1	0.234	-	1.00	0.028	-	0.08
		2	0.225	-	0.96	0.030	-	0.09
	2.0	1	0.119	4	1.94	0.038	2	0.25
		2	0.127	4	2.08	0.039	2	0.26
	4.0	1	0.228	4	3.88	0.081	2	0.63
		2	0.227	4	3.86	0.082	2	0.64

หมายเหตุ: \* ใช้สมการ  $Y=0.225X+0.010$  ในการคำนวณ

ตารางที่ ข.7 ผลของค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และพารามิเตอร์ของการดูดซับไนเตรตด้วยเปลือกสับปะรดที่ปรับสภาพด้วย NaOH และดัดแปรผิวด้วย Fe<sup>3+</sup>

น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	ครั้งที่	ความเข้มข้นของสารละลาย ไนเตรตเริ่มต้น (C <sub>0</sub> ) (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสารละลาย ไนเตรตที่เหลือ (C <sub>e</sub> ) (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	1/C <sub>e</sub>	q <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>
0.2515	1	2.01	1.00	1.00	0.10	10.01
0.5041	1	2.01	0.37	2.68	0.08	12.33
1.0041	1	2.01	0.36	2.81	0.04	24.29
1.5057	1	2.01	0.25	4.01	0.02	34.22
2.0035	1	2.01	0.12	8.03	0.03	42.52
3.0040	1	2.01	0.11	9.37	0.02	63.17
0.2521	2	2.01	1.08	0.92	0.10	10.80
0.5002	2	2.01	0.39	2.55	0.08	12.37
1.0017	2	2.01	0.44	2.25	0.39	25.62
1.5097	2	2.01	0.28	3.51	0.03	35.01
2.0158	2	2.01	0.11	9.37	0.02	42.39
3.003	2	2.01	0.11	9.37	0.02	63.15

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	ครั้งที่	ความเข้มข้นของสารละลาย ไนเตรทเริ่มต้น ( $C_0$ ) (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสารละลาย ไนเตรทที่เหลือ ( $C_e$ ) (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	$\log C_e$	$q_e$	$\log q_e$
0.2515	1	2.01	1.00	0.00	0.10	-1.00
0.5041	1	2.01	0.37	-0.43	0.08	-1.09
1.0041	1	2.01	0.36	-0.45	0.04	-1.38
1.5050	1	2.01	0.25	-0.60	0.03	-1.53
2.0035	1	2.01	0.12	-0.91	0.02	-1.63
3.0040	1	2.01	0.11	-0.97	0.02	-1.80
0.2521	2	2.01	1.08	0.03	0.09	-1.03
0.5002	2	2.01	0.39	-0.42	0.08	-1.09
1.0017	2	2.01	0.44	-0.35	0.04	-1.40
1.5097	2	2.01	0.28	-0.55	0.03	-1.54
2.0158	2	2.01	0.11	-0.97	0.02	-1.63
3.003	2	2.01	0.11	-0.97	0.02	-1.80