

การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต

จากฝุ่นหินปูน

ADSORPTION OF PHOSPHATE FROM SYNTHETIC  
WASTEWATER USING CALCIUM CARBONATE FROM  
LIMESTONE DUST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2565

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION OF PHOSPHATE FROM SYNTHETIC  
WASTEWATER USING CALCIUM CARBONATE FROM  
LIMESTONE DUST



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ACADEMIC YEAR 2022

**หัวข้อโครงการพิเศษ**

การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต  
จากฝุ่นหินปูน

Adsorption of Phosphate from Synthetic Wastewater using  
Calcium Carbonate from Limestone Dust

**ชื่อนักศึกษา**

นางสาวนพมาศ	จันทะคาม	รหัสนักศึกษา	62050396
นายรัฐธรรมนุญ	เหมือนแดง	รหัสนักศึกษา	62050434
นางสาวศิริพร	ไทยภักดี	รหัสนักศึกษา	62050450
นางสาวอัจฉิมา	เครือหงษ์	รหัสนักศึกษา	62050465

**ปริญญา**

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

**ภาควิชา**

เคมี




**ปีการศึกษา**

2565

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)  
อนุมัติให้โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
(เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

**ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากฝุ่นหินปูน			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนพมาศ	จันทะคาม	รหัสนักศึกษา	62050396
	นายรัฐธรรมนุญ	เหมือนแดง	รหัสนักศึกษา	62050434
	นางสาวศิริพร	ไทยภักดี	รหัสนักศึกษา	62050450
	นางสาวอัจจิมา	เครือหงษ์	รหัสนักศึกษา	62050465
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2565			
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน			

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากฝุ่นหินปูน โดยใช้ฝุ่นหินปูนขนาด 50 เมชเป็นวัสดุดูดซับ เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แปรค่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับ (5, 10, 20, 30, 40 และ 60 นาที) พีเอชเริ่มต้น (3, 5, 7, 9 และไม่ปรับพีเอช) ปริมาณตัวดูดซับ (0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 9 กรัม) และความเข้มข้นเริ่มต้น (5, 10, 20, 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) วิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก จากผลการทดลองพบว่า สภาวะเหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟต คือ ระยะเวลาดูดซับ 20 นาที พีเอชเริ่มต้น 7 ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นออร์โธฟอสเฟต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้ 64.70% จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยฝุ่นหินปูนพบว่า มีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ( $R^2 = 0.9856$ ) โดยมีค่า  $q_{max}$  เท่ากับ 0.10 และจลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตพบว่าสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง ( $R^2 = 0.9061$ )

**คำสำคัญ :** กระบวนการดูดซับ การกำจัดฟอสเฟต แคลเซียมคาร์บอเนต ฝุ่นหินปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Adsorption of Phosphate from Synthetic Wastewater using Calcium Carbonate from Limestone Dust		
<b>Students</b>	Miss Noppamas Juntakam	Student ID	62050396
	Mr. Rattatamnoon Mueandaeng	Student ID	62050434
	Miss Siriphon Thaipugdee	Student ID	62050450
	Miss Auchima Krueahong	Student ID	62050465
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>School</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2022		
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon		

### Abstract

This special project studied removal efficiency of phosphate in synthetic wastewater by adsorption onto calcium carbonate from limestone dust. 50 mesh of limestone dust was used as adsorbent. 10 mg/L of phosphate was prepared as synthetic wastewater. Factors affected on adsorption efficiency were examined including contact time (5, 10, 20, 30, 40 and 60 mins), initial pH (3, 5, 7, 9 and not adjust pH), adsorbent dosage (0.5, 1, 2, 3, 5, 7 and 9 g) and initial of phosphate concentration (5, 10, 20, 30 and 50 mg/l). Orthophosphate concentration in synthetic wastewater was analyzed by ascorbic acid method. The experimental results showed that the optimum conditions of phosphate removal were contact time of 20 minutes, initial pH of 7, adsorbent dosage of 5 g and initial phosphate concentration of 10 mg/L. Under these conditions, 64.70% orthophosphate was removed. The adsorption isotherm of phosphate onto limestone dust was best fit to the Langmuir isotherm model with  $q_{\max}$  of 0.10 ( $R^2 = 0.9856$ ). The chemical kinetic reaction was best fitted to second-order kinetic model ( $R^2 = 0.9061$ ).

**Keywords:** Adsorption, Phosphate removal, Calcium carbonate, Limestone dust

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากความอนุเคราะห์และช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อเสนอแนะ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษนี้ และขอขอบคุณ ดร.กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความถูกต้อง สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ ให้การช่วยเหลือด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี เป็นอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณบุคลากรประจำห้องธุรการภาคเคมี ที่ให้การช่วยเหลือด้านเอกสารทางการเงินต่างๆ จนผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา และคณะผู้วิจัย ที่ให้คำปรึกษา สนับสนุน และช่วยกันแก้ปัญหาต่างๆ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากโครงการพิเศษนี้ผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้เพื่อปรับปรุงแก้ไขต่อไป

นพมาศ	จันทคาม
รัฐธรรมนุญ	เหมือนแดง
ศิริพร	ไทยภักดี
อัจจิมา	เครือหงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ฟอสฟอรัสและฟอสเฟต	3
2.1.1 ประเภทของสารประกอบฟอสฟอรัส	3
2.1.2 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โทฟอสเฟต	4
2.1.3 ผลกระทบของฟอสเฟตในน้ำ	5
2.1.4 วิธีการกำจัดสารประกอบฟอสเฟตในน้ำเสีย	5
2.2 หินปูน	6
2.2.1 ฝุ่นหินปูน	7
2.2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต	7
2.3 กระบวนการดูดซับ	8
2.3.1 ประเภทการดูดซับ	8
2.3.2 วัสดุดูดซับ	8
2.3.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.3.4 จลนพลศาสตร์เคมี	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>18</b>
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	18
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์	18
3.1.2 สารเคมี	18
3.1.3 วัสดุดูดซับ	19
3.2 วิธีการทดลอง	19
3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ	19
3.2.2 การเตรียมสตัวอย่างมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต	20
3.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	20
3.2.3.1 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม	20
3.2.3.2 ศึกษา pH เริ่มต้นที่เหมาะสม	21
3.2.3.3 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม	21
3.2.3.4 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม	22
3.2.3.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตของฝุ่นหินปูน	22
3.2.3.6 ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีการดูดซับฟอสเฟตของฝุ่นหินปูน	22
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>24</b>
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ	24
4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนด้วยเทคนิค BET Surface area	24
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX	24
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	25
4.2.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม	25
4.2.2 ผลการศึกษา pH เริ่มต้นที่เหมาะสม	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.3 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม	27
4.2.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม	28
4.2.5 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ	29
4.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี	30
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>32</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก	37
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟต	38
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง	40
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ทางสถิติ	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 สภาวะในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET	19
ตารางที่ 3.2 สภาวะในการวิเคราะห์ SEM-EDX	20
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนด้วยเทคนิค BET	24
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไอโซเทอร์มการดูดซับ	29
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพัทธ์และค่าคงที่ต่างๆ ของจลนพลศาสตร์	30
ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร ของสารละลาย มาตรฐานออร์โธฟอสเฟต	39
ตารางที่ ข.1 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย	40
ตารางที่ ข.2 ผลของพีเอชเริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลา 20 นาที	40
ตารางที่ ข.3 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลา 20 นาที พีเอชเริ่มต้น 7	41
ตารางที่ ข.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลา 20 นาที พีเอชเริ่มต้น 7 ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม	41
ตารางที่ ข.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์ม	42
ตารางที่ ข.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์	42
ตารางที่ ค.1 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลาต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA	43
ตารางที่ ค.2 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA	44
ตารางที่ ค.3 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียที่ปริมาณตัวดูดซับต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA	45
ตารางที่ ค.4 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 อิทธิพลของพีเอชต่อปริมาณของออร์โธฟอสเฟตในรูปต่าง ๆ	4
รูปที่ 2.2 ผุ่นหินปูน	7
รูปที่ 2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์	9
รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	10
รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	10
รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช	11
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ [A] และ t ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์	13
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ log [A] และ t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	14
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ 1/[A] และ t ของปฏิกิริยาอันดับสอง	15
รูปที่ 4.1 (ก) ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)กำลังขยาย 100X	25
รูปที่ 4.1 (ข) ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 3000X	25
รูปที่ 4.1 (ค) ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)กำลังขยาย 5000X	25
รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย สังเคราะห์	26
รูปที่ 4.3 ผลของ pH เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย สังเคราะห์	27
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย สังเคราะห์	28
รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัด ฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์	29
รูปที่ 4.6 (ก) ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) จากผุ่นหินปูน แบบLangmuir Isotherm	29
รูปที่ 4.6 (ข) ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) จากผุ่นหินปูน แบบFreundlich Isotherm	29
รูปที่ 4.7 (ก) จลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียม คาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) จากผุ่นหินปูน ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์	30
รูปที่ 4.7 (ข) จลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียม คาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) จากผุ่นหินปูน ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.7 (ค) จลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน ของปฏิกิริยาอันดับสอง	31
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหามลพิษทางน้ำถือเป็นปัญหาสำคัญของประเทศไทย โดยมีการปนเปื้อนของสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เช่น แหล่งชุมชน อุตสาหกรรม เกษตรกรรม เป็นต้น ซึ่งน้ำทั้งแต่ละแหล่งมีปริมาณและคุณลักษณะที่แตกต่างกัน เมื่อน้ำทั้งหมดเหล่านี้มีการระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือแหล่งรองรับน้ำเสียส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ เป็นแหล่งแพร่ระบาดของเชื้อโรค รวมถึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพและอนามัยของมนุษย์ โดยสาเหตุหลักของปัญหามลพิษทางน้ำส่วนใหญ่เกิดจากน้ำเสียจากแหล่งชุมชนจากกิจกรรมการใช้น้ำในการดำรงชีวิตประจำวัน ได้แก่ น้ำทิ้งจากการอุปโภคบริโภค น้ำทิ้งจากเกษตรกรรมและปศุสัตว์ เป็นต้น ซึ่งปัญหาการปนเปื้อนสารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่เกิดจากผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีการเติมสารจำพวกฟอสเฟต ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูง ปัจจุบันพบระดับการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชนอยู่ระหว่าง 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร (มันสิน และมันรัช, 2545) หากน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนฟอสฟอรัสสูงถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือแหล่งรองรับน้ำเสียโดยไม่ได้รับการบำบัดที่ดี อาจส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น โดยเฉพาะปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีปริมาณธาตุอาหารสูงเกินไปกระตุ้นให้พืชน้ำและสาหร่ายสีเขียวมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในน้ำขาดออกซิเจนจนกระทั่งไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้

การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น การกำจัดฟอสเฟตด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Treatment Processes) ทำได้โดยการตกตะกอนด้วยสารเคมีที่นิยมใช้ คือ สารส้มและเพอริกคลอไรด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ 70-95% (จารุรัตน์ และคณะ, 2536) แต่มีข้อเสีย คือ ราคาแพง การกำจัดฟอสเฟตด้วยกระบวนการดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม สามารถออกแบบได้ง่าย และมีต้นทุนต่ำ เป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับจับอยู่บนพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) ของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อจำกัดคือ ราคาสูง และประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำเมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ (Shakoor and Nasar, 2018) ฝุ่นหินปูนมีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก เกิดจากการกรองฝุ่นออกจากอากาศในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถใช้เป็นตัวดูดซับฟอสเฟตได้

โครงการพิเศษนี้มุ่งศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน รวมทั้งศึกษาหาสภาวะเหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟต ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟต ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีเหตุแห่งสงวนสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สารละลายฟอสเฟตความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) เตรียมตัวดูดซับฝุ่นหินปูน โดยคัดแยกขนาด 50 เมช ด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 50 เมช
- 3) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน ได้แก่
  - ระยะเวลาในการดูดซับฟอสเฟต (5, 10, 20, 30, 40 และ 60 นาที)
  - pH เริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟตที่ใช้ในการดูดซับ (3, 5, 7, 9 และไม่ปรับพีเอช)
  - ปริมาณตัวดูดซับ (0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 9 กรัม)
  - ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอสเฟต (5, 10, 20, 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- 4) วิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส ด้วยเทคนิคกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid Method) โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
- 5) ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์เคมีในการดูดซับฟอสเฟต

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้วัสดุดูดซับฟอสเฟตที่มีราคาถูก
- 2) เป็นการใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้ง
- 3) ลดปัญหามลพิษในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ฟอสฟอรัสและฟอสเฟต (Phosphorus and Phosphate)

ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและน้ำเสีย จะอยู่ในรูปของฟอสเฟตและโมเลกุลของฟอสเฟต ซึ่งอาจพบฟอสเฟตในรูปของสารละลาย สารแขวนลอยในน้ำตะกอนดินก้นบ่อ ตลอดจนในตัวของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ฟอสฟอรัสมีที่มาจาก 2 แหล่งใหญ่ด้วยกัน ได้แก่ (อุบลวรรณ, 2536)

1) จากธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟตผุ่นฟอสฟอรัสในอากาศ จะถูกฝนพัดพาให้ตกลงสู่แหล่งน้ำ รวมถึงฝนที่ตกมายังพื้นดินจะพัดพาเศษซากดินและหินที่มีฟอสเฟตลงสู่ในแหล่งน้ำเช่นกัน นอกจากนี้ยังอาจมาจากมูลของสัตว์ปีก เช่น นกบางชนิด หรือเศษซากพืชซากสัตว์ที่ตายแล้วทับถมในแหล่งน้ำ ฯลฯ

2) จากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม โรงงานอุตสาหกรรมที่น้ำทิ้งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง ได้แก่ โรงงานผลิตแป้ง มันสำปะหลัง โรงงานปุ๋ย ฯลฯ

#### 2.1.1 ประเภทของสารประกอบฟอสฟอรัส

สามารถจำแนกฟอสฟอรัสในน้ำออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ (อุษา และคณะ, 2558)

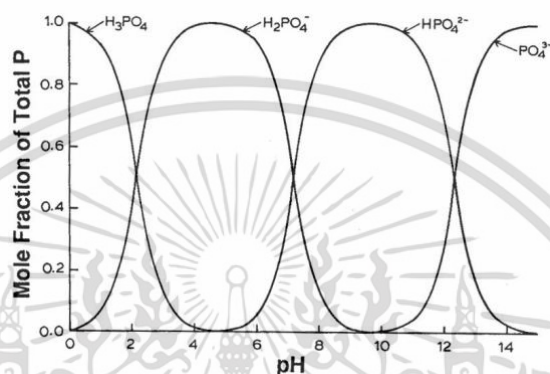
1) ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) หรือเรียกว่าฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble Reactive Phosphorus) สารกลุ่มนี้ละลายน้ำได้ดีแหล่งที่ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโต ได้แก่ Trisodium Phosphate ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ), Disodium Phosphate ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ), Monosodium Phosphate ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ), Diammonium Phosphate ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ )

2) โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารที่พบมากในน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาดเมื่อแตกตัวจะให้ออร์โธฟอสเฟต ได้แก่ Sodium hexametaphosphate ( $\text{Na}_5(\text{PO}_4)_6$ ), Sodium triphosphate ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ), Tetrasodium pyrophosphate ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) สารกลุ่มนี้ เป็น Dehydrated phosphate ซึ่งจะถูกไฮโดรไลซิสในน้ำกลับไปเป็นสารออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) การย่อยสลายจะเกิดขึ้นเร็วถ้าเป็นน้ำเสียที่ 20 ชั่วโมง แต่จะเกิดได้ช้าถ้าเป็นน้ำสะอาดที่ 4-50 วัน

3) อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphates) สารประกอบฟอสเฟตชนิดนี้เกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ พบได้ในรูปสารละลาย สารแขวนลอย สารอินทรีย์วัตถุที่กำลังเน่าสลาย หรือเป็นองค์ประกอบในสิ่งมีชีวิต ได้แก่ Nucleic acid, Phospholipids, Sugar phosphate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป สารละลายที่มีค่าพีเอชในช่วง 3-10 จะพบฟอสเฟตส่วนใหญ่ในรูป  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  และ  $\text{HPO}_4^{2-}$  พีเอชประมาณ 5 จะพบฟอสเฟตส่วนใหญ่ในรูป  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ที่พีเอชประมาณ 7.7 จะพบฟอสเฟตในรูป  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  และ  $\text{HPO}_4^{2-}$  ในปริมาณเท่าๆ กัน และที่พีเอชประมาณ 9 จะพบฟอสเฟตในรูป  $\text{HPO}_4^{2-}$  ในปริมาณมาก (Krishnan and Haridas, 2008) นั่นคือ ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ลดลงเมื่อ สารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดย  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  จะจับตัวกับพื้นผิวตัวดูดซับได้ง่ายกว่า เพราะมีค่าพลังงานอิสระในการดูดซับ (adsorption free energy) ต่ำกว่า  $\text{HPO}_4^{2-}$  (Krishnan and Haridas, 2008)



รูปที่ 2.1 อิทธิพลของพีเอชต่อปริมาณของออร์โธฟอสเฟตในรูปต่าง ๆ (Kim *at al.*, 2007)

### 2.1.2 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต

การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมที่สุด คือ วิธีการเทียบสี (Colormetric Method) โดยมีทั้งหมด 3 วิธี (APHA, 1992)

#### 1) วานาโดมอลิบดิก แอซิด (Vanadomolybdic acid)

ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตระหว่าง 1-20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยออร์โธฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมโมลิบเดตภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเกิดเป็นแอมโมเนียมฟอส-โพลิมอลิบเดทซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลือง ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ความเข้มของสีเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของฟอสเฟต ถ้าฟอสเฟตในตัวอย่างมีค่าน้อยกว่า 10 mg/L สีเหลืองจะไม่ปรากฏชัด



#### 2) สแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride)

ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตระหว่าง 0.01-6 มิลลิกรัมต่อลิตร โมลิบดินัมในแอมโมเนียมฟอสโพลิมอลิบเดทถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนโมลิบดินัมบลู (complex molybdenum blue) ให้สารละลายสีเข้มเหลือง ซึ่งสีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยากับปริมาณฟอสเฟตในน้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่ใช้รีดิวซ์โมลิบดีนัมบลู คือ แอมมิโนแนบรอลซัลโฟนิกแอซิด หรือสแตนนัสคลอไรด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.2



### 3) แอสคอร์บิกแอซิด (Ascorbic acid)

ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต ระหว่าง 0.01-6 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนียโมลิบเดตและโพแทสเซียมแอนติโมนิแทร์เทรตทำปฏิกิริยากับสารละลายออร์โธฟอสเฟต เจือจางในสถานะที่เป็นกรดโดยที่ปริมาณแอมโมเนียโมลิบเดตที่มากพอจะไม่ถูกรีดิวซ์ สารที่มีสีที่เกิดขึ้นยังแยกไม่ได้ จึงไม่ทราบสูตรที่แน่นอน เรียกว่า Molybdenum Blue หรือ Heteropoly Blue จากนั้น จะถูกรีดิวซ์ด้วยกรดแอสคอร์บิกได้เป็นสารละลายสีน้ำเงิน โดยความเข้มของสีน้ำเงินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต

#### 2.1.3 ผลกระทบของฟอสเฟตในน้ำ

ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เกิดจากแหล่งน้ำมีปริมาณธาตุอาหารประเภทสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากเกินไป นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ เวลา ความเข้มแสง และอุณหภูมิ ในปัจจุบันยูโทรฟิเคชันเป็นปัญหาของแหล่งน้ำทั่วโลก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การขยายตัวของชุมชนเมือง การการพัฒนาด้านเกษตรกรรม พฤติกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้ผลิตภัณฑ์ ทำความสะอาดเครื่องใช้ในครัวเรือนที่มีส่วนผสมของฟอสเฟต การใช้ปุ๋ยการเกษตร และการปล่อยน้ำทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากแหล่งชุมชนต่างๆ ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำเป็นอย่างมาก อาจทำให้สิ่งมีชีวิต ในแหล่งน้ำตายเป็นจำนวนมากเนื่องจากการขาดแคลนออกซิเจน (hypoxia/anoxia) นอกจากนี้ ยังทำให้สภาพแวดล้อมอื่น ๆ ของแหล่งน้ำเปลี่ยนไป เช่น ทำให้น้ำขุ่น น้ำมีสีเขียว แดง น้ำตาล หรือเหลือง ตามเม็ดสีของแพลงก์ตอนและสาหร่าย มีกลิ่นเปลี่ยนไปจากปกติ ส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์แหล่งน้ำ (นิคม และยงยุทธ, 2548)

#### 2.1.4 วิธีการกำจัดสารประกอบฟอสเฟตในน้ำเสีย (ชีระวิทย์, 2548)

##### 2.1.4.1 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ

ในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ จุลินทรีย์ใช้พลังงานจากสารประกอบพอลิฟอสเฟตในสถานะไร้อากาศเพื่อปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมา โดยใช้สารอินทรีย์เป็นตัวช่วย จุลินทรีย์จะสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์ในปริมาณมากกว่าปกติ และการเคลื่อนที่ของเซลล์จุลินทรีย์จะช่วยให้ระบบทำงานต่อเนื่องได้ ระบบการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพจะลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสียให้

เหลือระดับความเข้มข้น 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารอินทรีย์และองค์ประกอบอื่น ๆ ในระบบ และความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้ง การลดฟอสฟอรัสในน้ำเสียขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ

สารอินทรีย์ต่อฟอสฟอรัสในน้ำเสีย และต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่น ๆ ในระบบ และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (COD) ต่อฟอสฟอรัสในน้ำเสีย

#### 2.1.4.2 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารละลายให้เกาะตัวกันเป็นรูปของตะกอนเพื่อแยกสารละลายออกจากน้ำ วิธีการตกตะกอนทางเคมีขึ้นอยู่กับสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อความละลายของสารนั้น ๆ มีขั้นตอนหลายวิธีที่ใช้ร่วมกันได้ดังนี้:

- 1) ใช้สารเคมีเพื่อเปลี่ยนสารละลายในน้ำให้ตกตะกอนและละลายน้อยลง
- 2) ปรับสมดุลการละลายน้ำโดยใช้สารที่เปลี่ยนแปลงความละลายของสาร
- 3) ปรับอุณหภูมิเพื่อเปลี่ยนสารละลายให้อยู่ในสภาวะแข็ง โดยความละลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) คือกระบวนการที่เพิ่มสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายและเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ที่ตกตะกอนใหญ่และหนัก โดยส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำ ในขณะที่กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีเพื่อรวมสิ่งสกปรกเล็กๆ เข้ากันเป็นก้อนใหญ่ ในการปฏิบัติงานนั้น กระบวนการตกตะกอนทางเคมีและโคแอกกูเลชันอาจถูกใช้ร่วมกันเพื่อการกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้กำจัดฟอสฟอรัส ได้แก่

- 1) เบนโทไนท์ เป็นดินเหนียวที่จับกับน้ำขุ่นและมีความสามารถในการดูดซับประจุบวก
- 2) ปูนขาว เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สร้างตะกอนได้ดี แต่มีปัญหาในการเกิดตะกอนมาก
- 3) อลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม มีราคาถูกและละลายน้ำได้เป็นอัตราส่วนสูง
- 4) เฟอร์รัสซัลเฟต หรือ copperus มีความสามารถในการตกตะกอนได้กว้างและเร็ว ราคาประหยัด แต่อาจมีกลิ่นและกร่อนได้ในรูปแบบเหล็กและไม่เหมาะสมสำหรับสถานที่ที่ต้องการสีชัดเจน

#### 2.1.4.3 การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยวิธีทางกายภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพในน้ำเสียสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการดูดซับ โดยใช้สารดูดซับ เช่น activated aluminum หรือสารดูดซับอื่น ๆ เพื่อลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำเสียให้ถึงระดับที่ปลอดภัย วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 99% และเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียที่มีปัญหาเกี่ยวกับฟอสฟอรัส การกำจัดฟอสฟอรัสทางกายภาพเป็นทางเลือกที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสีย

## 2.2 หินปูน (Limestone)

เป็นหินตะกอนที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) เป็นเอกสารนี้ส่วนใหญ่ มักอยู่ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) หรืออะราโกไนต์ (Aragonite) อาจมีแมกนีเซียมไม่มากนักคาร์บอเนต (Dolomite) ในปริมาณมากเช่นกัน หินปูนส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด อนุภาคมี

ขนาดตั้งแต่ 0.001 มิลลิเมตรขึ้นไป จนถึงอนุภาคที่มองเห็นได้ แหล่งกำเนิดหินปูนมี 2 แหล่ง ได้แก่ (Adam, 2023)

- 1) การตกตะกอนทางชีวภาพจากน้ำทะเล
- 2) การถูกพัดพาและการทับถมของหินปูนที่มีอยู่ก่อน จนก่อตัวเป็นคราบหินปูน

เมื่อหินปูนได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1,000 °C แคลเซียมคาร์บอเนตจะแยกออกจากหินปูน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และปูนขาว ซึ่งนำไปใช้งานในการผลิตแก้วและใช้ในการเกษตร หินปูนบางชนิดยังทำหน้าที่เป็นหินก่อสร้างใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับปูพื้น ภายนอกและภายในอาคาร

### 2.2.1 ฝุ่นหินปูน (Limestone Dust)

ฝุ่นหินปูนมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก (รูปที่ 2.2) เป็นผลพลอยได้จากโรงโม่หินในกระบวนการย่อยหินที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา ฝุ่นที่ได้จากกระบวนการนี้มีขนาดเล็กและไม่สามารถผ่านตะแกรงได้แต่จะถูกเป่าออกและตกลงมาที่พื้นโรงโม่แทน โดยปกติจะถูกนำไปทิ้งเนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เพราะฝุ่นมีขนาดเล็กเฉียดกว่าเม็ดทรายมักมีขนาดเป็นฝุ่นผงที่เล็กกว่า 10 เมช ประมาณร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนักมีขนาดเฉลี่ยระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จึงเป็นขนาดที่ก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม (พันธุ์ลพ, 2563)



รูปที่ 2.2 ฝุ่นหินปูน  
(ถ่ายภาพโดยศิริพร ไทยภักดี)

### 2.2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{CaCO}_3$  เป็นหนึ่งในธาตุที่พบมากที่สุดในเปลือกโลก และก่อตัวเป็นหินประเภทต่างๆ เช่น หินปูนและชอล์ค มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (C) แคลเซียม (Ca) และออกซิเจน (O) แคลเซียมคาร์บอเนตที่พบในธรรมชาติแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ หินคาร์บอเนตและแร่แคลไซต์ หากแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นผงละเอียดจะมีความเสถียรทางเคมี ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในวงวนที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพิษและยังมีคุณสมบัติพิเศษอื่น ๆ โดยเฉพาะความขาวสูง (Brightness) และการดูดซับน้ำมันต่ำ (Oil Adsorption) ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตถูกนำไปใช้ในวงการอุตสาหกรรมได้อย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสี และอุตสาหกรรมยาง

## 2.3 กระบวนการดูดซับ

เป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลโมเลกุลของสารดูดซับและคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวไปยังพื้นผิวที่เป็นของแข็ง โดยผิวจะเป็นที่เกาะจับเรียกส่วนนี้ว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) คอลลอยด์จะเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) การดูดซับเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติเนื่องจากแรงทางกายภาพหรือจากพันธะเคมี (เสาวภา, 2558)

### 2.3.1 ประเภทการดูดซับ

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Physical Adsorption หรือ Van Der Waals Adsorption) เกิดจากการทำงานร่วมกันของแรงระหว่างโมเลกุล (เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์) โดยทั่วไป การดูดซับทางกายภาพจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและอัตราการดูดซับที่รวดเร็ว ความร้อนในการดูดซับต่ำเนื่องจากผลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอ่อนแอ โครงสร้างของโมเลกุลตัวดูดซับแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานในการดูดซับจึงน้อยและสารที่ถูกดูดซับจะถูกแยกออกอย่างง่ายตายตัวอย่างเช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์สำหรับก๊าซ

2) การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) คือ กระบวนการดูดซับทางเคมีรวมถึงการก่อตัวและการทำลายพันธะเคมี ซึ่งการทำลายพันธะเคมี คือ การปลดปล่อยความร้อนในการดูดซับนั้นให้ยิ่งใหญ่อขึ้น และพลังงานกระตุ้นที่ต้องใช้ก็มากขึ้นเช่นกัน

การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีไม่ได้แยกจากกัน มักเกิดขึ้นพร้อมกันในเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสีย การดูดซับส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการดูดซับหลายประเภท เนื่องจากอิทธิพลของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และปัจจัยอื่น ๆ

### 2.3.2 วัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับสามารถจำแนกตามความสามารถในการดูดซับได้ดังนี้ (เสาวภา, 2558)

1) ตัวดูดซับแบบอนินทรีย์ มีข้อจำกัดในการดูดซับ คือ ดูดซับโมเลกุลของสารได้ไม่กี่ชนิด เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะอย่างจำกัด เช่น ดินเหนียวประเภทต่าง ๆ เคาโอไลน์ต์ ถ่านจากกระดูก

2) สารอินทรีย์จากการสังเคราะห์ ได้แก่ เรซินที่ผลิตขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ซึ่งเรซินมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ถ่านกัมมันต์ เป็นตัวดูดซับที่นิยมนำไปใช้ในหลายด้าน เช่น ดูดซับกลิ่น ดูดซับสี ใช้เป็นเอกสารนี้ สารกรอง ใช้สกัดโลหะ เป็นต้น ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่จำเพาะสูงถึง 1400 ตารางเมตรต่อกรัม ไม่ว่ากรต่อกรัม ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) วัสดุทางชีวภาพ เช่น แกลบ ชังข้าวโพด ชานอ้อย กาบมะพร้าว เปลือกผลไม้บางชนิด เป็นต้น ส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ผ่านการใช้งานทางการเกษตรนำมาประยุกต์ใช้
- 5) สารดูดซับชีวภาพ เช่น แแบคทีเรีย ราหรือยีสต์ จุลินทรีย์ เป็นต้น

### 2.3.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่สมดุลกับอุณหภูมิคงที่ สมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายซับเท่ากันที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น (อัญรินทร์, 2560)

#### 2.3.3.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ถูกพัฒนาขึ้นโดย Irving Langmuir นักเคมีชาวอเมริกา เป็นไอโซเทอร์ม การดูดซับที่ง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

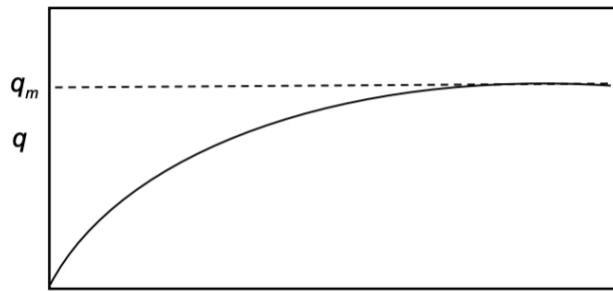
- การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวเสมอ (monolayer adsorption)
- โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่จำกัดของผิวสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ
- ตัวดูดซับแต่ละตัวมีพลังงานต่างกัน แต่พลังงานภายในตัวดูดซับจะเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ตำแหน่งใกล้กัน โมเลกุลที่ถูกดูดซับจึงไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวได้

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล (รูปที่ 2.3) แสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับ ได้ดังสมการที่ 2.3

$$q = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- $q$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ (mg/g)
  - $q_m$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับสูงสุด (mg/g)
  - $K_L$  คือ ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (L/mg)
  - $C$  คือ ความเข้มข้นของตัวที่ถูกดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

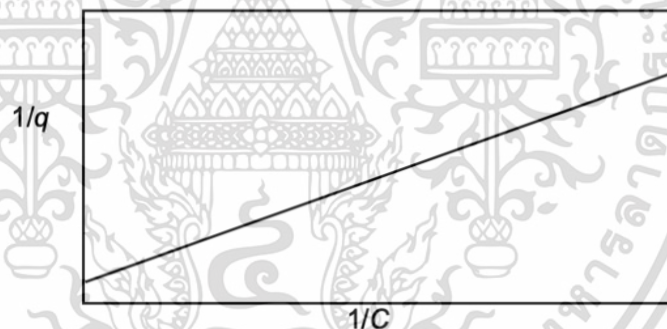


รูปที่ 2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์ (อดิศักดิ์, 2561)

สมการที่ 2.3 จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้สมการที่ 2.4

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_L} \left( \frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (2.4)$$

จากสมการเชิงเส้นของแลงเมียร์ เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/q$  และ  $1/C$  สามารถหาความชันได้จาก  $\frac{1}{q_m K_L}$  และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ (อดิศักดิ์, 2561)

### 2.3.3.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

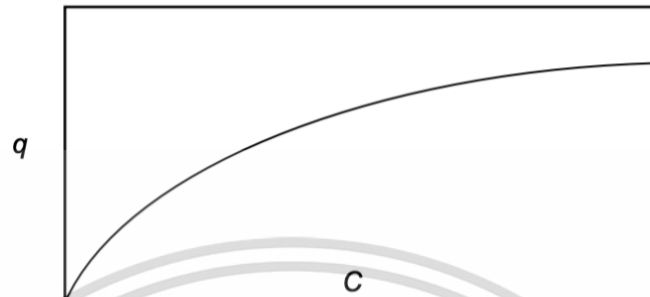
พัฒนาขึ้นโดย Herbert Max Finlay Freundlich นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยมีสมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Heterogeneous Adsorption Surface) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สมการไม่เชิงเส้นเป็นดังสมการที่ 2.5

$$q = K_F C^{\frac{1}{n}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $K_F$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิช  $(\text{mg/g}) / (\text{L/mg})^{1/n}$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามในชื่อของโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n$  คือ ค่าคงที่ของฟรอนดิชแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลองและ  $n$  ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ

$C$  คือ ความเข้มข้นที่เหลือของตัวถูกดูดซับ

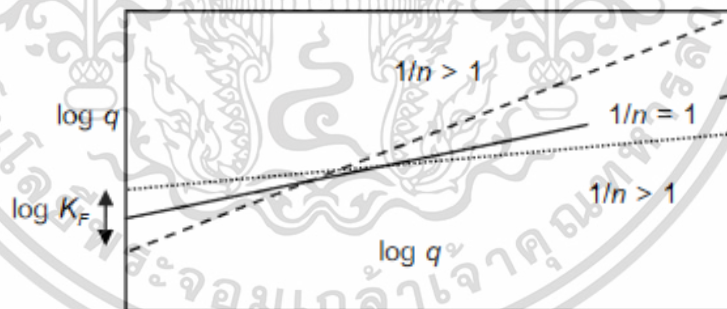


รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช (อดิศักดิ์, 2561)

จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้ดังสมการที่ 2.6

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad (2.6)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง  $\log C$  และ  $\log q$  ได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรอนดิช (อดิศักดิ์, 2561)

### 2.3.3.3 การดูดซับของ BET

ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น เรียกว่า สมการของ BET ดังสมการที่ 2.7 สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนี้ คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สอง และชั้นต่อ ๆ ไป ดังนั้นโมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับ ไม่ใช่พื้นผิวของสารดูดซับ จึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนอยู่ในภาวะอิ่มตัวของของเหลว แตกต่างจากในขั้นแรกที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับ โดยตรง (วรวิทย์, 2558)

$$\frac{1}{W\left(\frac{P_0}{P}\right)-1} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1\left(\frac{P_0}{P}\right)}{W_m C} \quad (2.7)$$

- เมื่อ P คือ ความดันของการดูดซับ (mmHg)  
 $P_0$  คือ ความดันอิ่มตัว (mmHg)  
 W คือ น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ  
 $W_m$  คือ น้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง  
 C คือ ค่าคงที่

ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้นคูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ

### 2.3.4 จลนพลศาสตร์เคมี

#### 2.3.4.1 กฎอัตรา (rate law)

กฎอัตรา คือ ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะแปรผันตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.8 (วรวิทย์, 2565)

$$r = k[A]^x[B]^y \quad (2.8)$$

- เมื่อ k คือ ค่าคงที่เฉพาะอัตราที่อุณหภูมิที่กำหนด (Specific reaction rate constant)  
 X คือ ลำดับของปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสาร A  
 Y คือ ลำดับของปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสาร B  
 โดยที่ x+y คือ อันดับรวมของปฏิกิริยาเคมี  
 x+y = 0 คือ ปฏิกิริยาอันดับศูนย์  
 x+y = 1 คือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง  
 x+y = 2 คือ ปฏิกิริยาอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4.2 ลำดับของปฏิกิริยา (Order of Reaction)

ลำดับของปฏิกิริยา คือ ค่าที่แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นจะมีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงหรือไม่

**ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero order reaction)** คืออัตราของปฏิกิริยาจะคงที่เสมอทั้งในสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นน้อยและความเข้มข้นมาก เพราะอัตราของปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังสมการที่ 2.9

$$r = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]_0 = k \quad (2.9)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการจาก  $t=0$  ถึง  $t=t$  จะได้ว่า

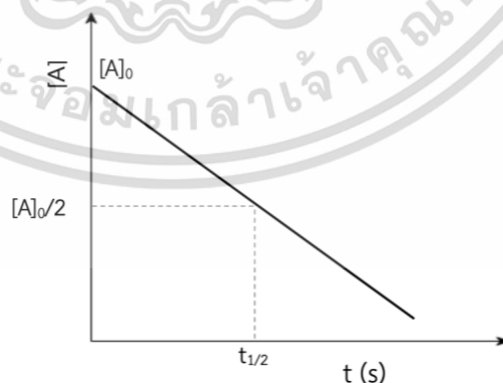
$$-\int_{[A]_0}^{[A]} d[A] = k \int_0^t dt$$

$$\text{เท่ากับ } [A]_0 - [A] = kt$$

สมการที่อินทิเกรตแล้วจะแสดงความเข้มข้น ณ เวลาต่าง ๆ ดังสมการที่ 2.10

$$[A] = [A]_0 - kt \quad (2.10)$$

นำค่า  $[A]$  และ  $t$  มาสร้างกราฟเส้นตรงจะได้ค่าความชัน คือ  $-k$  (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์  $[A]$  และ  $t$  ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (วรวิทย์, 2565)

**ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order reaction)** คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 แปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 2.11  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]_0 \quad (2.11)$$

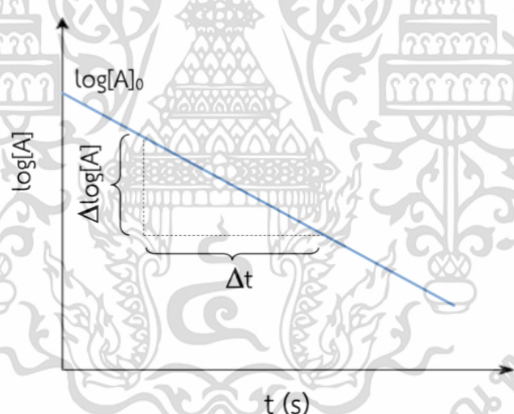
เมื่อ อินทิเกรตสมการจาก  $t=0$  ถึง  $t=t$  จะได้ว่า

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = -k \int_0^t dt$$

$$\text{เท่ากับ} \quad \ln[A] - \ln[A]_0 = -kt \quad (2.12)$$

$$\text{หรือ} \quad 2.303 \log \frac{[A]}{[A]_0} = -kt \quad (2.13)$$

นำค่า  $[A]$  และ  $t$  มาสร้างกราฟเส้นตรงจะได้ค่าความชัน คือ  $-k/2.303$  และจุดตัดแกน  $y = \log [A]_0$  (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์  $\log [A]$  และ  $t$  ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (วรวิทย์, 2565)

ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง มี 2 แบบ ดังสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$r = [A][B] \quad (2.14)$$

$$r = [A]^2 \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.14 เมื่ออินทิเกรตสมการจาก  $t=0$  ถึง  $t=t$  จะได้ว่า

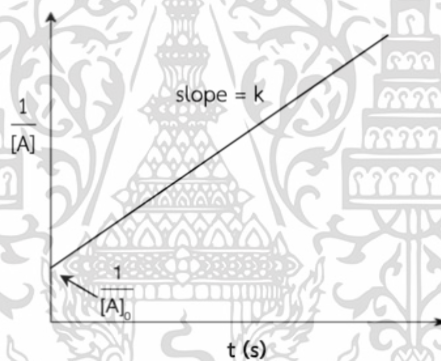
$$r = -\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2$$

จะได้ 
$$-\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]^2} = k \int_0^t dt$$

เท่ากับ 
$$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt$$

$$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt \quad (2.16)$$

นำค่า  $1/[A]$  และ  $t$  มาสร้างกราฟเส้นตรงจะได้ค่าความชัน คือ  $k$  และจุดตัดแกน  $y = 1/[A]_0$  (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์  $1/[A]$  และ  $t$  ของปฏิกิริยาอันดับสอง (วรวิทย์, 2565)

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสาวภา (2558) ศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วย แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ที่เผา โดยใช้วิธีการแอสคอร์บิกพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมมากกว่าเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผา มีพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 ในเวลา 180 นาที และปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2.0 กรัม โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมีค่ามากกว่า 80% ส่วนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับที่มีพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4-11 ในเวลา 30 นาที และปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.1 และ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่เห็นแต่โดยเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดลิชมากกว่าไอโซเทอร์มแลงเมียร์ สรุปได้ว่าลักษณะการดูดซับเป็นแบบหลายชั้นหรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน โดยประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า 73% และ 99% เมื่อดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เผาตามลำดับ

**เจนาจิรา และคณะ (2562)** ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งของกระบวนการซักผ้าด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตจากเปลือกไข่ไก่และเปลือกหอยแมลงภู่ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับคือ การปรับค่าพีเอชเป็น 10 ใช้เวลาในการดูดซับ 15 นาที และเติมปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม สามารถลดปริมาณฟอสเฟตได้ถึงร้อยละ 25 ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นแคลเซียมออกไซด์ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตคือ การปรับค่าพีเอชเป็น 7 ใช้เวลาในการดูดซับ 15 นาที และเติมปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม สามารถลดปริมาณฟอสเฟตได้ถึงร้อยละ 24 สำหรับสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับในกรณีที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่คือ การปรับค่า pH เป็น 10 ใช้เวลาในการดูดซับ 45 นาที และเติมปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม สามารถลดปริมาณฟอสเฟตได้ถึงร้อยละ 25 ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นแคลเซียมออกไซด์ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟต คือ การปรับค่าพีเอชเป็น 10 ใช้เวลาในการดูดซับ 15 นาที และเติมปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม เมื่อศึกษาการดูดซับความสกปรกของน้ำทิ้งพบว่าตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดคือ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความขุ่น ค่าซีโอดี และค่าบีโอดี โดยการลดลงของพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยลดค่าความสกปรกในน้ำได้ โดยมีอัตราส่วนเฉลี่ยดังนี้ ค่าการนำไฟฟ้าลดลงร้อยละ 19.32 ค่าความขุ่นลดลงร้อยละ 2.60 ค่าซีโอดีลดลงร้อยละ 54.77 และค่าบีโอดีลดลงร้อยละ 16.67 โดยการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตจากเปลือกไข่ไก่ และเปลือกหอยแมลงภู่เป็นวิธีการดูดซับความสกปรกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถนำมาใช้ในการดูดซับ ความสกปรกในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้อย่างปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Ramakrishnaiah และ Vismitha (2012)** ศึกษากระบวนการดูดซับฟอสฟอรัส ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ตัวดูดซับที่ต่างกัน ได้แก่ ตะกอนสารส้ม เถ้าถ่านหิน เถ้าลอยเกรด C และตระกรันเตาหลอมเหล็ก พบว่าตะกอน สารส้ม เถ้าลอยเกรด C และตระกรันเตาหลอมเหล็ก สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีเมื่อพี เอชของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 5 และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 10 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร สำหรับ เถ้าถ่านหินพบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 และปริมาณตัวดูดซับ 7.5 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาคอลัมน์เพื่อหาเวลาอิมตัวสำหรับน้ำ เสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิลิตรต่อลิตร และพบว่าระยะเวลาถึงจุด อิมตัวเท่ากับ 62, 38, 34 และ 32 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อใช้ตัวดูดซับเป็นตะกอนสารส้ม เถ้าถ่านหิน เถ้าลอยเกรด C และตระกรันเตาหลอมเหล็ก ตามลำดับ

**Liu et al. (2012)** ศึกษาการใช้เปลือกของ *Argopecten irradians* (SAI) และ *Macra veneri-formis* (SMW) เป็นตัวดูดซับฟอสเฟตออกจากสารละลายในน้ำ โดยมี การตรวจสอบจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยการสำรวจและอภิปราย พฤติกรรมดูดซับฟอสเฟตของเปลือกหอยทั้งสองชนิด พบว่ากระบวนการดูดซับเป็นไป ตามสมการลำดับที่หนึ่งเทียมของ Lageren และไอโซเทอร์มของการดูดซับเข้ากันได้ดีกับ ทั้งสมการการดูดซับแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยสมการแรกมีความเหมาะสมมากกว่า ปริมาณการดูดซับแบบอิมตัวชั้นเดียวของ SAI และ SWM ที่ 25°C คือ 3.07 และ 3.32 มิลลิโมล/กรัม ตามลำดับ การดูดซับฟอสเฟตของเปลือกหอยเหล่านี้เป็นแบบดูดความร้อน โดยธรรมชาติโดยความสามารถในการดูดซับของเปลือกหอยดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิ ดังนั้น ปรากฏว่าเปลือกหอย SAI และ SMW เหมาะสมและมีประสิทธิภาพใน การดูดซับฟอสเฟตในน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุณหภูมิที่สูงขึ้น

**Hussain et al. (2011)** ศึกษาการใช้หินปูนและถ่านกัมมันต์แบบเม็ดเพื่อดูดซับ ออร์โธฟอสเฟตจากน้ำเสียในครัวเรือน ศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตระหว่าง 9 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และศึกษาแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์ใน การทดลองแบบแบทช์ และการศึกษาการทดลองในคอลัมน์ศึกษาผลกระทบของอัตราการ ไหล พีเอช และความเข้มข้นเริ่มต้น จากผลการทดลองพบว่าการใช้หินปูนเป็นตัวดูดซับ เพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 90 โดยค่าพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอชของสารละลายและปริมาณสารดูดซับมีผลต่อการกำจัดออร์โธฟอสเฟต ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำสุดที่ใช้คือ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตรกำจัดได้มากถึงร้อยละ 94 และเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดที่ใช้คือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กำจัดได้ร้อยละ 80 ในการทดลองพบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มทั้งฟรุนดิชและแลงเมียร์ ( $R^2 > 0.94$ ) และผลการศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ( $R^2 > 0.98$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ยี่ห้อ Lab Tech Model รุ่น BlueStar B บริษัท Conquer Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy ; SEM-EDX) รุ่น EVO MA 10 บริษัท Zeiss ประเทศเยอรมนี
3. เครื่อง Surface Area and Pore Size Analyzer (BET) ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb iQ-C-XR-XR-XR บริษัท Anton Paar ประเทศออสเตรเลีย
4. เครื่องชั่งไฟฟ้า ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ML204/01 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
5. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
6. เครื่องกรองลดความดัน ยี่ห้อ Eyla รุ่น A-3S บริษัท Tokyo Rikakikai ประเทศญี่ปุ่น
7. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ Medspin รุ่น XZ-6G บริษัท โปรวิชั่น ไสแอนติฟิค จำกัด ประเทศไทย
8. เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Sterrier) ยี่ห้อ WiseStir รุ่น MS-MP8 บริษัท Witeg Labortechnik ประเทศเยอรมันนี
9. ตะแกรงร่อนมาตรฐาน 50 mesh (300  $\mu\text{m}$ ) รุ่น ASTM :E11 บริษัท endecotts ประเทศอังกฤษ
10. Micropipette ยี่ห้อ Witopet บริษัท Witeg Labortechnik ประเทศเยอรมนี
11. กระดาษกรองเบอร์ 42 (Whatman) บริษัท Merck ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. เครื่องแก้วต่าง ๆ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96% (Conc. Sulfuric Acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศฝรั่งเศส

2. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. Hydrochloric, HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท VWR  
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
Chemicals ประเทศฝรั่งเศส  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid,  $C_6H_8O_6$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Chem Supply ประเทศออสเตรเลีย

4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

5. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium Dihydrogen Phosphate,  $KH_2PO_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ

6. โพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เตรต (Potassium Antimony Tartrate ( $SbO$ ) $C_4H_4O_6$   $0.5H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

7. แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium Molybdate,  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ

8. กรดไนตริกเข้มข้น 68% (Nitric acid,  $HNO_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

### 3.1.3 วัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับที่ใช้ศึกษา คือ ฝุ่นหินปูนที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ตำบลบ้านป่า อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี คัดแยกขนาดฝุ่นหินปูนโดยร่อนด้วยตะแกรง ให้มีขนาด 50 เมช

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ

1. วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและรูพรุนของฝุ่นหินปูน ด้วยเทคนิค BET ใช้เครื่อง Surface Area and Pore Size Analyzer สภาวะในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

แก๊ส	ไนโตรเจน
Adsorption	20 จุด
Desorption	20 จุด
BET (Surface area)	11 จุด
Out Gas	300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิเคราะห์หาสัญญาณวิทยาและโครงสร้างของพื้นผิวและองค์ประกอบของธาตุของตัวดูดซับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; SEM-EDX) สภาวะในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะในการวิเคราะห์ SEM-EDX

ชนิดตัวรับสัญญาณ (Detector)	อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector)
สัญญาณภาพ	สัญญาณภาพแบบ 2 มิติ (Secondary Electron Image: SEI)
การนำไฟฟ้า	สารไม่นำไฟฟ้า ทำการเคลือบแร่ทองคำก่อนวิเคราะห์
กำลังอิเล็กตรอน	20.00 kV
ระยะห่างระหว่างวัตถุ	7 mm

### 3.2.2 การเตรียมสติกสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 0.4394 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร

2. เก็บไว้ในตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานและตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ต่อไป

### 3.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.2.3.1 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ไม่ปรับพีเอช มีค่าพีเอชที่ 3.96)

2. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในปิเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

3. เติมนุ่นหินปูนขนาด 50 เมช จำนวน 2 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์

4. ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที แปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่เวลา 5, 10, 20, 30, 40 และ 60 นาที

5. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

6. นำไปกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 (Whatman No. 42)

7. ปิเปิดสารละลายที่กรองแล้วจากข้อ 7 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำ Combine Reagent ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 อีก 2 ซ้ำ
9. ตัวควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ไม่ใส่ฟุนหินปูน
10. วัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างเริ่มต้นและน้ำตัวอย่างหลังผ่านการดูดซับ ที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer
11. คำนวณความเข้มข้นออร์โธฟอสเฟตจากสมการที่ 3.1 และประสิทธิภาพการกำจัดจากสมการที่ 3.2

$$\text{ออร์โธฟอสเฟต (mg - P/L)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากกราฟ (\mu g)}}{\text{ปริมาตรสารละลายฟอสเฟต (ml)}} \quad (3.1)$$

$$\% \text{Removal} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L) และ  $C_t$  คือ ความเข้มข้นฟอสเฟตหลังจากถูกดูดซับ (mg/L)

### 3.2.3.2 ศึกษา pH เริ่มต้นเหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แปรค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ 3, 5, 7, 9 และไม่ปรับพีเอช
2. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เติมฟุนหินปูน จำนวน 2 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์
4. ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.1
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในการทดลอง 3.2.3.1

### 3.2.3.3 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.2
2. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เติมฟุนหินปูน โดยแปรค่าที่ 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 9 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์
4. ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.1
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในการทดลอง 3.2.3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.4 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยแปรค่าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 5, 10, 20, 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.2
2. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิตร
3. เติมฟุนหินปูนลงในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.3
4. ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.1
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในการทดลอง 3.2.3.1

### 3.2.3.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตของฟุนหินปูน

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตในช่วง 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.2
2. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิตร
3. เติมฟุนหินปูนลงในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.3
4. ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย (magnetic sterrier) ที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.3.1
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในการทดลอง 3.2.3.1
6. คำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ไอโซเทอร์มและฟรุนดริชไอโซเทอร์ม

### 3.2.3.6 ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีการดูดซับฟอสเฟตของฟุนหินปูน

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3.96
2. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 50 มิลลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิตร
3. เติมฟุนหินปูน จำนวน 2 กรัม ลงในน้ำเสียสังเคราะห์
4. ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย (magnetic sterrier) ที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที แปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่เวลา 5, 10, 20, 30, 40 และ 60 นาที
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5-11 ในการทดลอง 3.2.3.1
6. คำนวณหาจลนพลศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ดังสมการที่ 3.3

$$q W = V (C_0 - C_t) \quad (3.3)$$

เมื่อ	q	คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (mg/g)
	W	คือ น้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> ) (g)
	C <sub>0</sub>	คือ ความเข้มข้นออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้น (mg/L)
	C <sub>t</sub>	คือ ความเข้มข้นออร์โธฟอสเฟตหลังจากถูกดูดซับ (mg/L)
	V	คือ ปริมาตรฟอสเฟต (L)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากฝุ่นหินปูน โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลา ค่าพีเอชเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์เคมี ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนด้วยเทคนิค BET Surface area

จากการวิเคราะห์ฝุ่นหินปูนด้วยเทคนิค BET เพื่อหาค่าพื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนด้วยเทคนิค BET

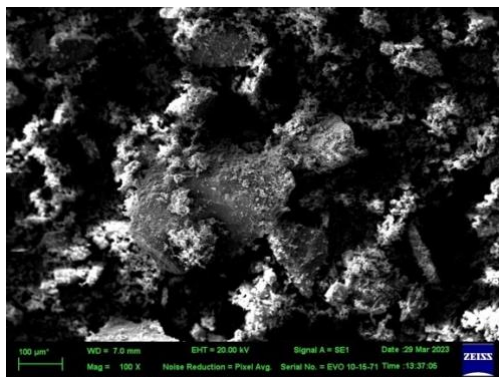
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET	CaCO <sub>3</sub> ของฝุ่นหินปูน	CaCO <sub>3</sub> สังเคราะห์
พื้นที่ผิว (surface area)	36.078 m <sup>2</sup> /g	40.6 m <sup>2</sup> /g
ปริมาตรรูพรุน (pore volume)	6.6496 cm <sup>3</sup> /g	0.127 cm <sup>3</sup> /g
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter)	9.5890 nm	12.7 nm

หมายเหตุ : อ้างอิงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์เป็นทรงกลม จากงานวิจัยของ Bahrom *et al.*

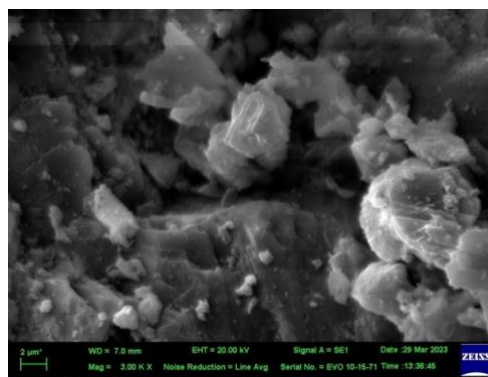
##### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะสัณฐานของพื้นผิวฝุ่นหินปูนที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (SEM-EDX) กำลังขยายต่าง ๆ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ พบว่า ฝุ่นหินปูนมีองค์ประกอบธาตุหลักๆ คือ C 36.77%, O 38.52%, และ Ca 21.48% และธาตุอื่นๆคือ Mg 2.16%, Al 0.69% และ Fe 0.38%

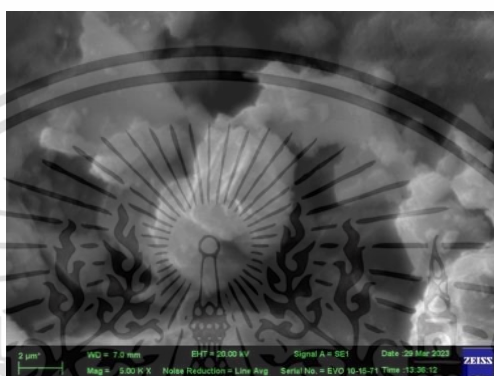
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

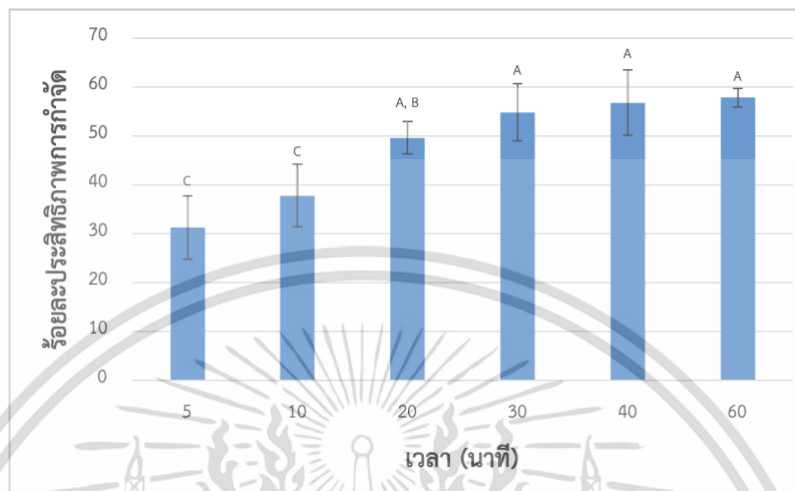
รูปที่ 4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฝุ่นหินปูนวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ก) กำลังขยาย 100X (ข) กำลังขยาย 3,000X (ค) กำลังขยาย 5,000X

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

### 4.2.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ไม่ได้ปรับค่าพีเอช (pH 3.96) เติมฝุ่นหินปูนจำนวน 2 กรัม ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที แปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 5, 10, 20, 30, 40 และ 60 นาที จากนั้น นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 5, 10, 20, 30, 40 และ 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 31.27%, 37.81%, 49.66%, 54.86%, 56.82% และ 57.84% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการดูดซับ และประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลา 20 นาที แสดงดังรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.1 ในภาคผนวก ข) จากผลการทดสอบค่าสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ อยู่ที่ 20 นาที เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตที่ 20 นาที มีความแตกต่างกันอย่างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีนัยสำคัญ กับระยะเวลา 30, 40 และ 60 นาที (ดูรายละเอียดในตาราง ค.1 ในภาคผนวก ค) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเสาวภา (2558) ที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่ม แต่เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สมดุลแล้วประสิทธิภาพการกำจัดจะคงที่



รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 4.2.2 ผลการศึกษา pH เริ่มต้นที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแปรค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 3, 5, 7, 9 และไม่ปรับพีเอช (pH 3.96) เติมฟุนหินปูนจำนวน 2 กรัม ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการปั่นกวน 20 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต พบว่า ที่พีเอชเริ่มต้น 3, 3.96, 5, 7 และ 9 มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 31.89%, 55.03%, 60.79%, 59.70% และ 44.30% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงค่าพีเอชเป็นกลาง จากนั้นมีแนวโน้มการกำจัดฟอสเฟตลดลงเมื่อพีเอชเป็นด่าง แสดงดังรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.2 ในภาคผนวก ข) ทั้งนี้อาจเนื่องจากในช่วงพีเอชเป็นกรดจะพบฟอสเฟตส่วนใหญ่ในรูป  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ส่วนในรูปพีเอชเป็นด่างจะพบฟอสเฟตส่วนใหญ่ในรูป  $\text{HPO}_4^{2-}$  ซึ่ง  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  จะจับตัวกับพื้นผิวตัวดูดซับได้ง่ายกว่า  $\text{HPO}_4^{2-}$  เพราะมีค่าพลังงานอิสระในการดูดซับ (adsorption free energy) ต่ำกว่า (Krishnan and Haridas, 2008).

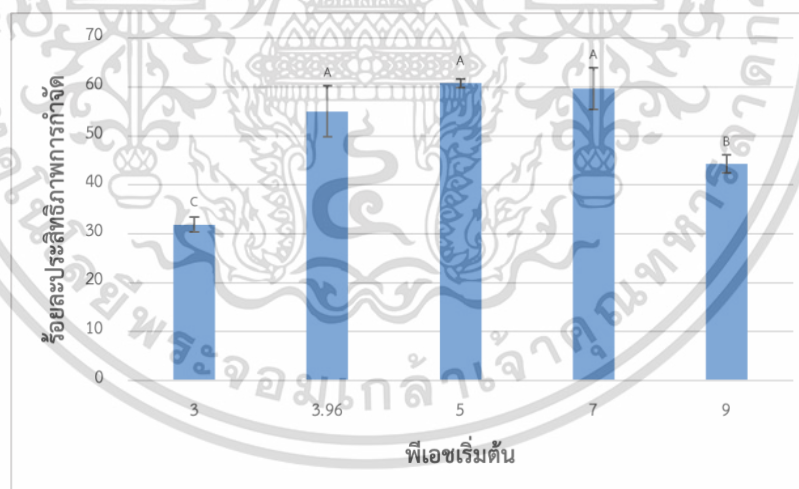
จากค่า Zero point charge (pHzpc) ของฟอสเฟตมีค่า 9.14 (Arslanoglu, 2021) ถ้า pH ในน้ำเสียมีค่าต่ำกว่าค่า pHzpc จะทำให้มีประจุบวกบนพื้นผิวตัวดูดซับมาก ส่งผลให้สามารถจับกับประจุลบของฟอสเฟตได้ดี นอกจากนี้ ที่พีเอชเป็นกรดฟอสเฟตบางส่วนอาจจับกับแคลเซียมไอออน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Ca<sup>2+</sup>) และไฮโดรเนียมไอออน (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (CaHPO<sub>4</sub>) ที่ไม่ละลายน้ำตกตะกอนออกมา ดังสมการที่ 4.1



จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตต่ำกว่าที่พีเอช 5 ทั้งนี้ อาจเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตในฝุ่นหินปูนที่พีเอช 3 จะแตกตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าที่พีเอช 5 ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง ส่งผลให้การดูดซับฟอสเฟตลดลง

ในขณะที่ที่ pH สูงกว่า ค่า pHzpc จะเกิดประจุลบบนพื้นผิวตัวดูดซับมาก ส่งผลให้เกิดการผลักกันกับประจุลบของฟอสเฟต นอกจากนี้ OH<sup>-</sup> ในสภาวะต่าง ยังทำให้การดูดซับของฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบลดลง (Yang *et al.*, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเสาวภา (2558) ที่พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชให้เป็นกรดจนถึงกลางจะสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ดี แต่ถ้าค่าพีเอชเริ่มเข้าสู่ความเป็นด่างประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง จากการทดสอบค่าสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่า พีเอชเริ่มต้นที่ไม่ปรับพีเอช (pH 3.96) pH 5 และ pH 7 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดในตาราง ค.2 ในภาคผนวก ค) จึงเลือกใช้ pH 7 ในการศึกษาขั้นต่อไป



รูปที่ 4.3 ผลของ pH เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

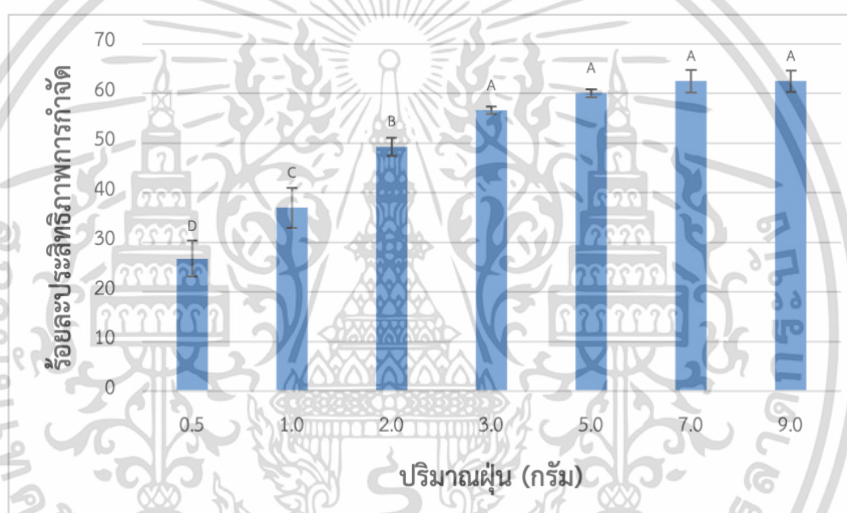
#### 4.2.3 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีพีเอชเท่ากับ 7 โดย

แปรค่าปริมาณฝุ่นหินปูนที่ 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 9 กรัม ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลา 10 นาที และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต พบว่า ที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.5, 1, 2, 3, 5, 7 และ 9 กรัม มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 26.72%, 37.00%, 49.23%, 56.60%, 60.05%, 62.48% และ 62.49% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณฟຸ່ນหินปูนเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตเริ่มเข้าสู่สมดุล เมื่อใช้ปริมาณฟຸ່ນหินปูน 5 กรัม แสดงดังรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.3 ในภาคผนวก ข) จากการทดสอบค่าสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่า ปริมาณฟຸ່ນหินปูนที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียอยู่ที่ 5 กรัม เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับปริมาณฟຸ່ນหินปูนที่ 7 กรัม และ 9 กรัม (ดูรายละเอียดในตาราง ค.3 ในภาคผนวก ค) สอดคล้องกับงานวิจัยของดร.ณิ และคณะ (2564) ได้อธิบายว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักตัวดูดซับ



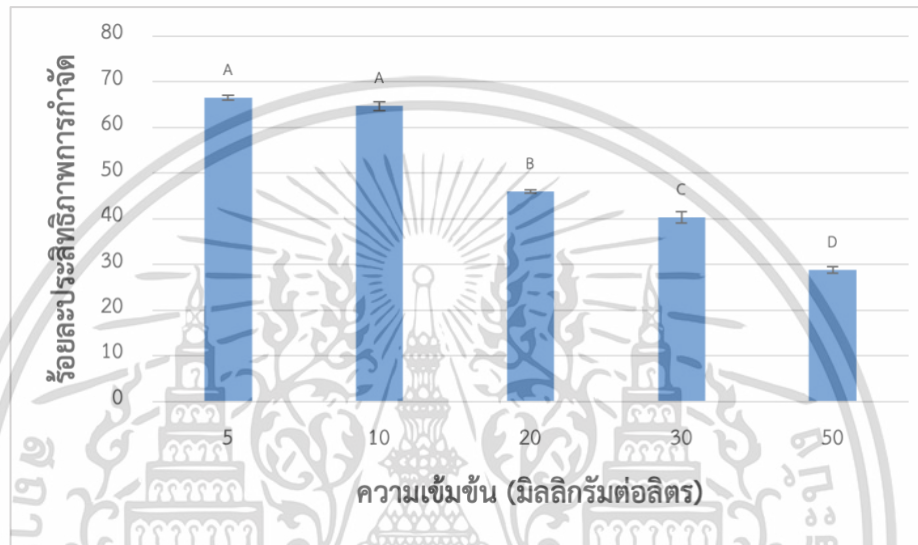
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 4.2.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช เท่ากับ 7 แปรค่าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ 5, 10, 20, 30, 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมฟຸ່ນหินปูนจำนวน 5 กรัม ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต พบว่าที่ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 5, 10, 20, 30, 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 66.55%, 64.70%, 46.03%, 40.37% และ 28.85% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตมีแนวโน้มลดลง เมื่อความ

เข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตาราง ข.4 ในภาคผนวก ข) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นโมเลกุลแต่ละโมเลกุลอาจจะสร้างพันธะเพื่อ

ยึดเหนี่ยวกันทำให้กลายเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และไม่สามารถดูดซับเข้าสู่รูพรุนได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอรุณ และคณะ (2558) จากการทดสอบค่าสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่า ปริมาณฝุ่นหินปูน 5 กรัม มีความเหมาะสมในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ 64.70% เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในตาราง ค.4 ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 4.2.5 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

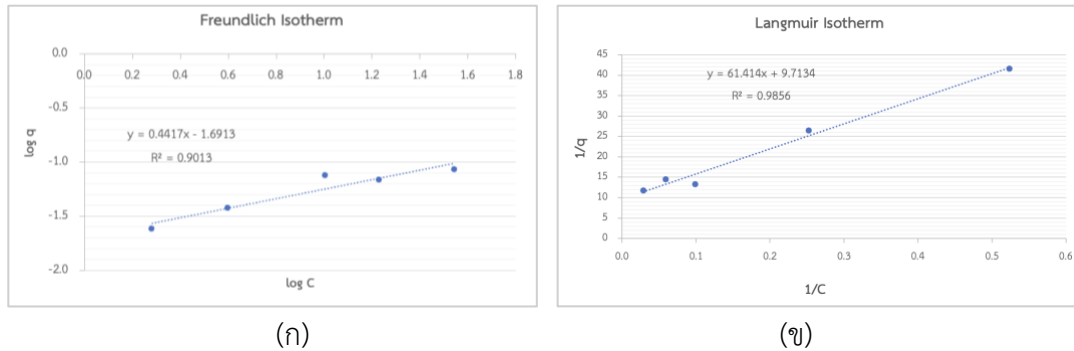
จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฝุ่นหินปูน 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์พีเอช 7 ระยะเวลาสัมผัส 20 นาที แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟตที่ช่วง 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับ ได้ค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับตามสมการของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ 4.6 (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไอโซเทอร์มการดูดซับ

Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$	$1/n$	$K_F$ ((mg/g) (L/mg) $^{1/n}$ )	$R^2$
0.10	0.16	0.9856	0.4417	0.02	0.9013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน (ก) Langmuir Isotherm (ข) Freundlich Isotherm

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) พบว่าการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ( $R^2 = 0.9856$ ) มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ( $R^2 = 0.9013$ ) โดยค่า  $1/q$  จากสมการของไอโซเทอร์มฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.4417 อธิบายได้ว่า การดูดซับฟอสเฟตด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากฝุ่นหินปูนเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่การดูดซับแน่นอน ไม่มีการซ้อนทับกันและเป็นการดูดซับทางกายภาพที่มีตัวถูกดูดซับจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับที่มีปริมาณจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพลากร และเกรียงไกร (2558) ที่พบว่าเกิดการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับได้โดยมีการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว

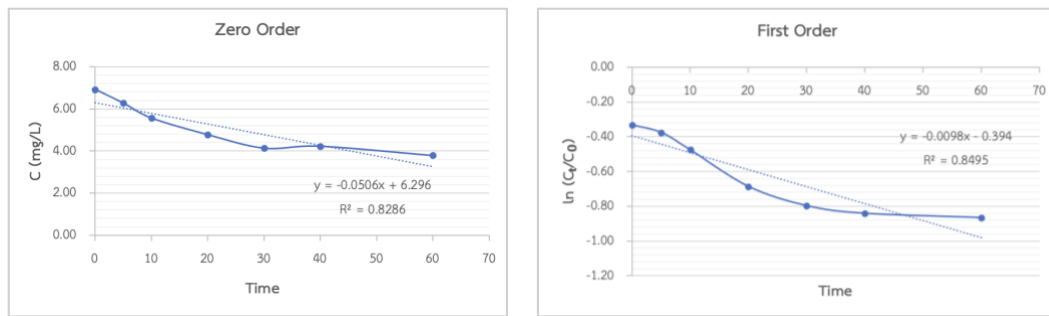
#### 4.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากฝุ่นหินปูน 5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 3.96 ความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟตที่ช่วง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แปรค่าระยะเวลาสัมผัสต่างๆ เมื่อนำมาคำนวณจลนพลศาสตร์เคมี โดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และค่าคงที่ต่าง ๆ ของจลนพลศาสตร์ แสดงดังตารางที่ 4.3 และกราฟจลนพลศาสตร์เคมีตามสมการปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก) - 4.7 (ค)

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และค่าคงที่ต่างๆ ของจลนพลศาสตร์

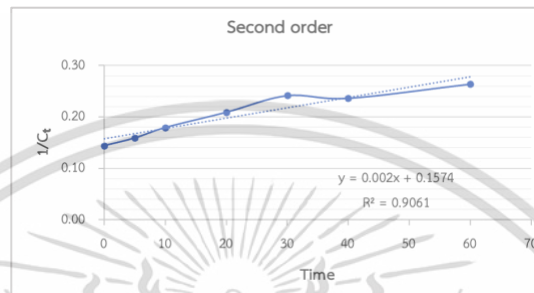
ปฏิกิริยาอันดับศูนย์		ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง		ปฏิกิริยาอันดับสอง	
K	$R^2$	K	$R^2$	K	$R^2$
-0.051	0.8286	-0.020	0.8495	0.002	0.9061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังระบบออนไลน์ที่นอกเหนือจากนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)



(ค)

**รูปที่ 4.7** จลนพลศาสตร์การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน (ก) ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (ข) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ค) ปฏิกิริยาอันดับสอง

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากฝุ่นหินปูน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) พบว่า ปฏิกิริยาอันดับสองมีความสอดคล้องมากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2 = 0.9061$ ) มีค่าเข้าใกล้ 1 และค่าคงที่จลนพลศาสตร์อันดับสอง ( $K^2$ ) เท่ากับ 0.002 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที อธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียเริ่มต้นเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่นานขึ้นความเข้มข้นของฟอสเฟตหลังดูดซับลดลง ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่า เป็นแบบจลนพลศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพัชรินทร์ และคณะ (2563) ที่พบว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากฝุ่นหินปูน ได้ผลสรุปดังนี้

1. ฝุ่นหินปูนที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ฝุ่นหินปูนขนาด 50 เมช มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 36.078 ตารางเมตรต่อกรัม และมีองค์ประกอบธาตุหลักที่วิเคราะห์ คือ C 36.77%, O 38.52% และ Ca 21.48%
2. สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฝุ่นหินปูนคือ ใช้ฝุ่นหินปูน จำนวน 5 กรัม ดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟต 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 และใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่ 20 นาที สามารถกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ 64.70%
3. ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย มีความสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม ( $R^2 = 0.9856$ ) มากกว่าฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม ( $R^2 = 0.9013$ ) โดยมีค่าความชัน  $1/n$  เท่ากับ 0.4417 แสดงว่า เป็นการดูดซับทางกายภาพแบบชั้นเดียว
4. จลนพลศาสตร์มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง ( $R^2 = 0.9061$ ) ค่าคงที่จลนพลศาสตร์อันดับสอง ( $K_2$ ) เท่ากับ 0.002 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับ เช่น การกระตุ้นกับกรด การเผาเพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น
3. ศึกษาโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

เจนจิรา รักเจริญ, เนตรนภา เสือโนนม่วง และนิลวรรณ มาแจ้ง. 2562. การลดฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากกระบวนการซักผ้าโดยใช้เปลือกไข่ไก่และเปลือกหอยแมลงภู่. ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

ชัชฎาภา เกตุวงศ์, ภาณุวัฒน์ เกตุวงศ์, รัตติยาภรณ์ ไปนา และมนทการ รังเพ็ญ. 2562. การดูดซับทองแดง (II) ในน้ำเสียด้วยไคโตซานที่สกัดจากเปลือกปูม้า. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์. 3(2): 71.82.

ชีระวิทย์ รัตนพันธ์. 2548. การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะมูลฝอย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ดรุณี สุขจิต, ปนัดดา ศรีแก้ว, จุฑามาศ นาทองท่อ, สายสมร ลำลอง, มาลี ประจวบสุข, สมจินตนา ทวีพานิชย์, ดวงดาว สัตยากุล, จิตรลดา เดชาติวงศ์, พงษ์ธิ คำศรี, ปาจารย์ ถาวรนิติ, บรรเจิด จงสมจิตร และพรพรรณ พิงโพธิ์. 2565. การดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่เตรียมจากเถ้าขานอ้อย. การประชุมวิชาการระดับชาติ มอบ. วิจัย ครั้งที่ 16. ภาควิชาเคมี, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

นครินทร์ แพรชชา. 2549. การกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำล้างสีย้อมผ้าโดยการใช้แกลบที่ปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นิคม ละอองศิริวงศ์ และยงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร. สภาวะยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลา. เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43: สาขาประมง สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ. 2548. หน้า 473-480.

นิรวัฒน์ นิรวัฒน์ และมงคล ดำรงศรี. การบำบัดไนโตรเจนซีเตมออนอเมอร์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. เรื่องเต็มการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13. กรุงเทพฯ. 2557. หน้า 1-9

พลากร บุญใส และเกรียงไกร บรรจงเมือง. 2558. ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลโดยซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 18(3): 64-71. สืบค้นเมื่อ 28 เมษายน 2566, จาก <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal/article/download/55402/46014>

พัชรินทร์ ราโช. (2563). การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอัลตราฟิลเตรชันในการกำจัดโลหะหนักด้วยแป้งโมดิฟายด์. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- พันธุ์ลพ หัตถโกศล. 2563. **ประสบการณ์ใช้หินปูนฝุ่นบำบัดคุณภาพน้ำเพื่อฟื้นฟูสภาพบ่อเหมือง.** วารสารอินทานิยา. (1). สืบค้นเมื่อ 28 เมษายน 2566, จาก <https://www.intania-magazine.com/limestone-dust-reclamation-mining/>
- พุทธิชัย แพร่ออน. 2553. **การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมในกลุ่มคาร์บอนेटสำหรับยางโดยวิธีการแอตไมเซลลาร์พอลิเมอไรเซชัน.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- รณกร เศรษฐบุญ, พฤกษ์ ตัญจรัยรัตน์ และฤทธิรงค์ จังโกฏี. 2563. **ปัจจัยและประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากกิจกรรมซักล้างโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม.** วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 13(4): 23-30.
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2558. **ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วันทิศา ปาลีเอกวุฒิ. 2563. **การดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมด้วยถ้ำแกลบ.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี.
- สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2563. **น้ำเสียชุมชน.** วารสารการอาชีวศึกษามัธยมศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 1-10.
- สุภาพร รัตนพันธ์ และพินิตา กังซุ่น. 2561. **การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด.** วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 21(2): 51-59. สืบค้นเมื่อ 22 เมษายน 2566, จาก <https://ph02.tcithaijo.org/index.php/tsujournal/article/download/75531/116089/445414>.
- สุนันท์ ทันสมัย. 2565. **การกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากการผลิตน้ำประปา.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เสาวภา ไวยสุศรี. 2558. **การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอนेटและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผา.** มหาลัยธุรกิจบัณฑิตย.
- อดิศักดิ์ ศิริรักษ์. 2561. **การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีคริสตัลไวโอเลต.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- อรุณ เกิดสวัสดิ์, จีระวุฒิ เฟ็งลอย, เอกราชนัย ไชยชนะ และ กัญจน์รัตน์ สุขรัตน์. 2558. การศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ 2-พีโคลีนบนถ่านกัมมันต์. หน้า 1654-1660. ในการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 7. นครปฐม. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- อัษฎรินทร์ พิธาภักดีสถิต. 2560. การดูดซับธาตุอาหารจากน้ำคลองด้วยซีโอไลต์ร่วมกับถ่านกัมมันต์: กรณีศึกษาคลองชวดหมั่น จังหวัดสมุทรปราการ. ดุษฎีนิพนธ์. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- อุบลวรรณ กมลศิริประเสริฐ. 2536. การกำจัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบแอร์เรเตทลากันโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- อุษา อันทอง, เบ็ญจวรรณ บัวขวัญ, ยะไธยะ ชาติเริ่มดาเบะ และศิริลักษณ์ ช่วยพั่ง. 2558. การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักล้างและการประยุกต์ใช้ปุ๋ยซีโอไลต์ธรรมชาติเพื่อสนับสนุนการเติบโตของกล้าปาล์มน้ำมัน. มหาวิทยาลัยทักษิณ
- ฮาซัน ดอปอ, อัชมาน อาแด และรอมลี เจะดอเลา. 2561. การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในกากบุดูจากโรงงานบุดูยี่เซ็ง ตำบลปะเสยาวอ อำเภอสายบุรี จังหวัดปัตตานี. มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- Adam Augustyn. 2023. **Limestone**. Retrieved 23 May 2023, from <https://www.britannica.com/science/limestone>.
- American Public Health Association. 1992. **4500-P Phosphorus**. *Standard method for the examination of water and wastewater*: 146-162.
- C.R.Ramakrishnaiah and Vismitha. 2012. **Removal Of Phosphate From Wastewater Using Low-Cost Adsorbents**. *International Journal of Engineering Inventions*. 1(7): 44-50.
- H. J. Kim, J. W. Hummel, K. A. Sudduth and S. J. Birrell. 2007. **Evaluation of Phosphate Ion-Selective Membranes and Cobalt-Based Electrodes for Soil Nutrient Sensing**. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(2): 415-425.
- Hasan Arslanoglu. 2021. **Production of low-cost adsorbent with small particle size from calcium carbonate rich residue carbonatation cake and their high performance phosphate adsorption applications**. *Journal of Materials Research and Technology*. 11 : 428-447.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Hani Bahrom, Alexander A. Goncharenko, Landysh I. Fatkhutdinova, Oleksii O. Peltek, Albert R. Muslimov, Olga Yu. Koval, Igor E. Eliseev, Andrey Manchev, Dmitry Gorin, Ivan I. Shishkin, Roman E. Noskov, Alexander S. Timin, Pavel Ginzburg and Mikhail V. Zyuzin. 2019. **Controllable Synthesis of Calcium Carbonate with Different Geometry: Comprehensive Analysis of Particles Formation, Their Cellular Uptake And Biocompatibility.** *ACS Sustainable Chem. Eng.* 7: 19142–19156.
- Krishnan K.A. and Haridas A. (2008). **Removal of Phosphate from Aqueous Solutions and Sewage Using Natural and Surface Modified Coir Pith.** *J. Hazard. Mater.* 152: 527-535.
- Nagam Moafaq Abood, Ebtihal Kh. Flayh, Layla S. Saeed and Mustafa A. Abdulkareem. 2023. **Removal of Iron(III) and Manganese(II) from polluted solutions using natural limestone (cost effective adsorbent).** *Research and Development Division Department of Central Laboratories. Iraq.*
- Qiang Liu, Lijing Guo, Yingmei Zhou, Yingchun Dai, Linlin Feng, Jizhi Zhou, Jun Zhao, Jianyong Liu and Guangren Qian. 2012. **Phosphate Adsorption on Biogenetic Calcium Carbonate Minerals: Effect of A Crystalline Phase.** *Desalination and Water Treatment.* 47: 78-85.
- Sabir Hussain, Hamidi Abdul Aziz, Mohamed Hasnain Isa, Anees Ahmad, John Van Leeuwen, Linda Zou, Simon Beecham and Muhammad Umar. 2011. **Orthophosphate Removal from Domestic Wastewater Using Limestone and Granular Activated Carbon.** *Desalination.* 271: 265-272.
- Yaning Yang, Yuan Chun, Guangyao Sheng, and Minsheng Huang. 2004. **pH-dependence of pesticide adsorption by wheat-residue-derived black carbon.** *Langmuir.* 20: 6736-6741.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟต

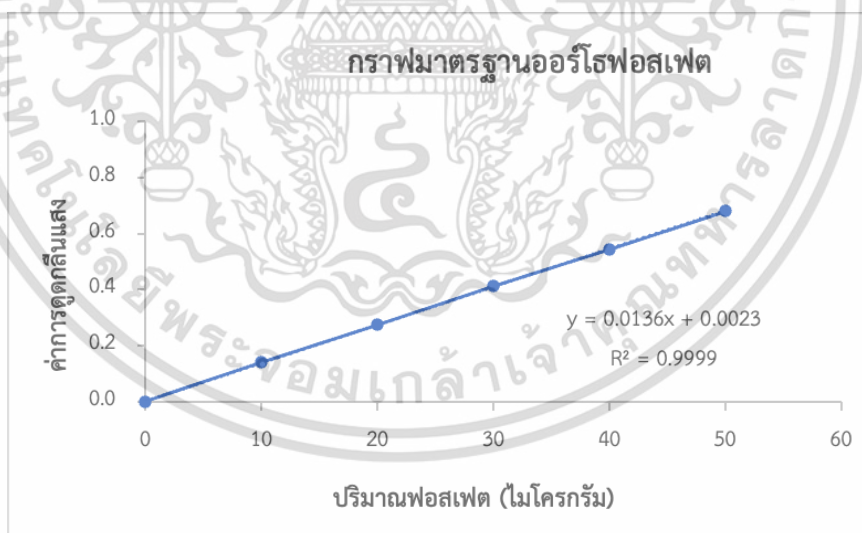
#### ก.1 สร้างกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 0.4394 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร

2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ไมโครลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้มีปริมาณฟอสเฟต 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ไมโครกรัม เขย่าให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ 20 นาที

3. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

ผลการวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงของกราฟมาตรฐานสารละลายออร์โธฟอสเฟตดังแสดงในตารางที่ ก.1 และกราฟมาตรฐานสารละลายออร์โธฟอสเฟต แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร ของสารละลายมาตรฐาน ออร์โทฟอสเฟต

ปริมาณฟอสเฟต (ไมโครกรัม)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร				SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
10	0.1287	0.1490	0.1430	0.1402	0.0104
20	0.2654	0.2882	0.2697	0.2744	0.0121
30	0.4068	0.4148	0.4186	0.4134	0.0060
40	0.5279	0.5667	0.5415	0.5454	0.0197
50	0.6584	0.6978	0.6889	0.6817	0.0207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/L)						ร้อยละการกำจัด
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.	
5	9.14	5.64	6.42	6.79	6.28	0.3484	31.27
10	8.96	5.06	6.19	5.47	5.57	0.5889	37.81
20	9.49	4.95	4.42	4.97	4.78	0.5714	49.66
30	9.18	4.73	4.01	3.69	4.14	0.3106	54.86
40	9.80	4.36	3.52	4.81	4.23	0.5340	56.82
60	9.00	3.59	3.88	3.91	3.79	0.6550	57.84

ตารางที่ ข.2 ผลของพีเอชเริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลา 20 นาที

พีเอช เริ่มต้น	ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/L)						ร้อยละการกำจัด
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.	
3	6.37	4.40	4.40	4.22	4.34	0.1006	31.89
3.96	9.46	3.78	4.23	4.76	4.26	0.4916	55.03
5	9.47	3.76	3.61	3.77	3.71	0.0864	60.79
7	9.22	3.27	4.02	3.86	3.72	0.3937	59.70
9	8.86	4.79	4.92	5.11	4.94	0.1626	44.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลา 20 นาที พีเอชเริ่มต้น 7

ปริมาณ ตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/L)						ร้อยละ การกำจัด
	ก่อนการ ดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.	
0.5	9.09	6.72	6.30	6.95	6.66	0.3302	26.72
1.0	9.97	6.05	6.05	6.75	6.28	0.4046	37.00
2.0	9.42	4.88	4.59	4.88	4.78	0.1677	49.23
3.0	9.36	4.03	4.01	4.14	4.06	0.0718	56.60
5.0	8.71	3.52	3.53	3.40	3.48	0.0710	60.05
7.0	9.48	3.76	3.33	3.59	3.56	0.2134	62.48
9.0	9.51	3.75	3.60	3.35	3.57	0.2030	62.49

ตารางที่ ข.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลา 20 นาที พีเอชเริ่มต้น 7 ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/L)						ร้อยละ การกำจัด
	ก่อนการ ดูดซับ	หลังการดูดซับ					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S.D.	
5	5.92	1.84	1.94	1.95	1.91	0.0610	67.73
10	10.25	3.99	4.11	3.77	3.96	0.1714	61.38
20	22.63	10.35	9.89	10.14	10.13	0.2305	55.23
30	28.39	16.60	17.29	16.89	16.93	0.3431	40.37
50	49.22	34.96	34.69	35.42	35.02	0.3715	28.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์ม

น้ำหนัก CaCO <sub>3</sub> (g)	ปริมาตร ฟอสเฟต (L)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C (mg/L)	q (mg/g)	1/C	1/q	log c	log q
5	0.03	5.92	1.91	0.0241	0.524	41.563	0.281	-1.619
5	0.03	10.25	3.96	0.0377	0.253	26.497	0.598	-1.423
5	0.03	22.63	10.13	0.0750	0.099	13.333	1.006	-1.125
5	0.03	28.39	16.93	0.0688	0.059	14.543	1.229	-1.163
5	0.03	49.22	35.02	0.0852	0.029	11.737	1.544	-1.070

ตารางที่ ข.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์

เวลา (นาท)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>t</sub> (mg/L)	ln C <sub>0</sub>	ln C <sub>t</sub>	1/C <sub>t</sub>	1/C <sub>0</sub>	C <sub>t</sub> /C <sub>0</sub>	ln(C <sub>t</sub> /C <sub>0</sub> )
5	9.14	6.28	2.21	1.84	0.16	0.11	0.69	-0.38
10	8.96	5.57	2.19	1.72	0.18	0.11	0.62	-0.48
20	9.49	4.78	2.25	1.56	0.21	0.11	0.50	-0.69
30	9.18	4.14	2.22	1.42	0.24	0.11	0.45	-0.80
40	9.80	4.23	2.28	1.44	0.24	0.10	0.43	-0.84
60	9.00	3.79	2.20	1.33	0.26	0.11	0.42	-0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์ทางสถิติ

#### ค.1 การศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย

ตารางที่ ค.1 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลาต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Time	7	5, 10, 20, 30, 40, 60

Analysis of Variance (ระยะเวลา)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Time	6	2823.6	470.61	17.46	0.000
Error	14	377.3	26.95		
Total	20	3201.0			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย ณ เวลาต่าง ๆ โดยใช้วิธี

Tuekey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Time	N	Mean	Grouping		
60	3	57.84	A		
40	3	56.82	A		
30	3	54.86	A		
20	3	49.66	A	B	
10	3	37.81		B	C
5	3	31.28			C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.2 การศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย

ตารางที่ ค.2 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	3, 3.96, 5, 7, 9

Analysis of Variance (ค่าพีเอช)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	4	1786.5	446.64	43.03	0.000
Error	10	103.8	10.38		
Total	14	1890.3			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ โดยใช้วิธี Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping		
5.00	3	60.793	A		
7.00	3	59.69	A		
3.96	3	55.03	A		
9.00	3	44.30		B	
3.00	3	31.893			C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค.3 การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย

ตารางที่ ค.3 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียที่ปริมาณตัวดูดซับต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Volume	7	0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 9

Analysis of Variance (ปริมาณตัวดูดซับ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Volume	6	3493.96	582.327	93.18	0.000
Error	14	87.49	6.249		
Total	20	3581.46			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ โดยใช้วิธี Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volume	N	Mean	Grouping			
9.0	3	62.49	A			
7.0	3	62.48	A			
5.0	3	60.050	A			
3.0	3	56.600	A			
2.0	3	49.23		B		
1.0	3	37.00			C	
0.5	3	26.72				D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ค.4 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย

ตารางที่ ค.4 ผลการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ โดยใช้ One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Concentration	5	5, 10, 20, 30, 50

Analysis of Variance (ความเข้มข้นเริ่มต้น)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Concentration	4	3130.93	782.734	1134.71	0.000
Error	10	6.90	0.690		
Total	14	3137.83			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ โดยใช้วิธี Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Concentration	N	Mean	Grouping		
5	3	66.547	A		
10	3	64.703	A		
20	3	46.027		B	
30	3	40.370			C
50	3	28.843			D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 13 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาวนพมาศ เครือหงษ์ รหัสประจำตัว 62050396

นายรัฐธรรมนุญ เหมือนแดง รหัสประจำตัว 62050434

นางสาวศิริพร ไทยภักดี รหัสประจำตัว 62050450

นางสาวอัจฉิมา เครือหงษ์ รหัสประจำตัว 62050465

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชา เคมี  
ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากฝุ่นหินปูน  
ADSORPTION OF PHOSPHATE FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING CALCIUM CARBONATE  
FROM LIMESTONE DUST

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้  
แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว  
โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 6.60 %

ลงชื่อ..... นพมาศ (นันทะตาม) ลงชื่อ..... รัฐธรรมนุญ เหมือนแดง ลงชื่อ..... ศิริพร ไทยภักดี ลงชื่อ..... อัจฉิมา เครือหงษ์.....

( นางสาวนพมาศ นันทะตาม ( นายรัฐธรรมนุญ เหมือนแดง ( นางสาวศิริพร ไทยภักดี ( นางสาวอัจฉิมา เครือหงษ์ ) ) ) )

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการ  
พิเศษของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็น  
หลักฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ลงชื่อ..... สุวรรณี จรรยาพูน (อธิการบดี) ลงชื่อ..... รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน (อธิการบดี).....

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม