

การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียดังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์  
จากเปลือกหอยแมลงภู  
ADSORPTION OF PHOSPHATE IN SYNTHETIC  
WASTEWATER BY  
CALCIUM OXIDE FROM MUSSEL SHELLS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION OF PHOSPHATE IN SYNTHETIC  
WASTEWATER BY  
CALCIUM OXIDE FROM MUSSEL SHELLS



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  
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนภัสสรณ์ จันทร์เทศ รหัสนักศึกษา 62050400 นางสาวปฐมวรรณ ประลองกิจ รหัสนักศึกษา 62050406 นายสมจิตร โสโพธิ์ รหัสนักศึกษา 62050455
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู โดยการนำเปลือกหอยไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวดูดซับที่เตรียมได้ไปศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD (X-ray diffractometry) และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟต ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับ, ระยะเวลาในการดูดซับ, ปริมาณตัวดูดซับ รวมถึงการนำตัวดูดซับมาใช้ซ้ำ ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟต ผลจากการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟต คือ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ 4 , ระยะเวลาการดูดซับที่ 30 นาที และปริมาณตัวดูดซับที่ 1.0 กรัม สามารถดูดซับฟอสเฟตได้ร้อยละ 99.02 สำหรับศึกษาการคายซับของตัวถูกดูดซับด้วยน้ำกลั่น พบว่าดูดซับได้เกิน 80% ถึง 3 ครั้ง เมื่อทำการคายซับกับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.01 mg/l สามารถดูดซับซ้ำได้เกิน 80% ได้เพียง 2 ครั้ง ในส่วนผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir) ซึ่งมีสมการเส้นตรง คือ  $y = 0.3625x + 0.0142$  มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) คือ 0.9788 แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมีตัวดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียว บนพื้นผิวตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**คำสำคัญ :** เปลือกหอยแมลงภู, แคลเซียมออกไซด์, การดูดซับ, การคายซับ, บำบัดฟอสเฟส

<b>Title</b>	ADSORPTION OF PHOSPHATE IN SYNTHETIC WASTEWATER BY CALCIUM OXIDE FROM MUSSEL SHELLS
<b>Students</b>	Miss Napatsorn Jantet Student ID 62050400 Miss Parthomwan Pralongkit Student ID 62050406 Mr. Somjit Sopo Student ID 62050455
<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>	2565
<b>Advisor</b>	Dr. Glinsukol Suwannarat

### Abstract

The aims of this special project were studying the efficiency of calcium oxide from mussel shells to adsorb phosphate in synthetic wastewater. The shells were calcined at 900 °C for 5 hours. Then, the adsorbents were analyzed by XRD (X-ray diffractometry) to analyze the crystal structure of the adsorbent and the optimum conditions for phosphate adsorption including pH, amount of adsorbent, duration for adsorbing, isotherm of the adsorbent were studied. The research result found that the optimum conditions for phosphate adsorption were pH 4, duration for adsorbing 30 minutes, and amount of adsorbent 1 gram. The percentage of phosphate adsorption was 99.02%. and Desorption with distilled water was adsorption efficiency more than 80% within 3 times, while the desorption with nitric acid concentration 0.01mg/L was 80% within 2 times. The adsorption isotherm of activated phosphate was best fit to the Langmuir isotherm straight line equation  $y = 0.3625x + 0.0142$  ( $R^2 = 0.9788$ ). Showing that was chemical adsorption, the adsorbent was arranged in only one layer on the adsorbent surface

เอกสารนี้ **Keywords**: mussel shells, calcium oxide, absorption, Dehydration, Phosphate treatment  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะส่งเสริมและช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ นอกจากนี้ยังให้กำลังใจและดูแลเป็นอย่างดีทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุวรรณณี จรรยาพูน และ รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่เข้าร่วมเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขโครงการพิเศษให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการจัดการด้านการเงิน ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้กลุ่มผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่ให้ได้รับการศึกษาและเป็นแรงผลักดัน แรงบันดาลใจตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน ทำให้กลุ่มผู้วิจัยสามารถทำโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ทุกคน และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา กลุ่มของผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นภัสสรณ์	จันทร์เทศ
ปฐมวรรณ	ประลองกิจ
สมจิตร	โสโพธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 เปลือกหอยแมลงภู.....	5
2.2 ฟอสฟอรัสและฟอสเฟต.....	6
2.2.2 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต.....	7
2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process).....	8
2.3.1 ประเภทการดูดซับ.....	8
2.3.2 ตัวดูดซับ.....	8
2.3.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	9
2.4 กระบวนการคายซับ (Desorption).....	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>18</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	18
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	18
3.1.2 สารเคมี.....	18
3.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รับภาระใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใด 3.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์..... 19

3.2.1 การทดสอบความเป็นเส้นตรงของช่วงการวิเคราะห์ (Linearity and RANG).....	19
3.2.2 การทดสอบความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ (Accuracy).....	20
3.3 การเตรียมตัวดูดซับ .....	20
3.4 การวิเคราะห์ฟิสสูงน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ .....	21
3.4.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD.....	21
3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วยCaCO <sub>3</sub> และCaO จากเปลือกหอยแมลงภู่.....	21
3.5.1 ศึกษาอิทธิพลของpH เริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต ..	22
3.5.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต.....	22
3.5.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต ...	22
3.6 ศึกษาการคายซับและใช้ซ้ำของแคลเซียมออกไซด์ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์.....	23
3.7 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ .....	23
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>24</b>
4.1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับ .....	24
4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Validation of Method) .....	27
4.1.2 ผลการทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีการวิเคราะห์ .....	28
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย CaCO <sub>3</sub> จากเปลือกหอยแมลงภู่ และ CaO จากเปลือกหอยแมลงภู่เผา.....	29
4.3.1 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต.....	29
4.3.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับและระยะเวลาการดูดซับ .....	31
4.3.3 ผลการศึกษานำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ.....	32
4.4 ผลของการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	34
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>36</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	36
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	36
เอกสารอ้างอิง.....	37
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าภาคผนวกอื่น ลีฟนี้แนบมาในไฟล์ฉบับแปลเรื่องและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไป	39

ภาคผนวก ก.....	40
ตารางผลการทดลอง.....	40
ภาคผนวก ข .....	45
รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิค XRD.....	45
ภาคผนวก ค .....	47
เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	47
ภาคผนวก ง.....	49
การทดสอบทางสถิติ.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร .....	26
4.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร .....	27
4.3 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์ จากเปลือกหอยในปริมาณต่างๆความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร.....	30
4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ (Langmuir) และ (Freundlich) .....	34
ก.1 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร .....	40
ก.2 การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีการวิเคราะห์.....	40
ก.3 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ที่ใช้ดูดซับด้วยแคลเซียม คาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู 1g โดยใช้เวลาดูดซับ 30 นาที.....	41
ก.4 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ที่ใช้ดูดซับด้วยแคลเซียม ออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู 1g โดยใช้เวลาดูดซับ 30 นาที.....	41
ก.5 ผลการทดลองแสดงร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับ ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยในปริมาณต่างๆ .....	42
ก.6 ผลการทดลองแสดงร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับ ด้วยแคลเซียมออกไซด์ในระยะเวลาต่างๆจากเปลือกหอยในปริมาณ 1 กรัม.....	43
ก.7 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4 ที่นำไปคายซับกับน้ำกลั่นแล้ว นำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู 1g โดยใช้เวลาดูดซับ 30 นาที....	43
ก.8 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4 ที่นำไปคายซับกับกรด ไนตริกแล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู 1g โดยใช้เวลาดูดซับ 30 นาที.....	44
ง-1 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต .....	47
ง-2 ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต .....	48
ง-3 ผลต่างของ pH ที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต .....	48
ง-4 ผลต่างของ pH ที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต .....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ .....	11
2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์ .....	12
2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ .....	12
2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช .....	13
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเทคนิค XRD..	24
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD..	24
4.3 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง....	25
4.4 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ที่ใช้ดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที .....	28
4.5 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที .....	29
4.6 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที .....	31
4.7 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4 ที่นำไปคายซับกับน้ำกลั่นแล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที.....	32
4.8 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4 ที่นำไปคายซับกับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 mg/l แล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที.....	32
4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดริช .....	33
4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์แบบแลงเมียร์ .....	34
ค-1 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง .....	45
ค-2 เตาอบ .....	45
ค-3 เครื่องกวนผสม .....	45
ค-4 ชุดเครื่องกรองลดความดัน.....	46
ค-5 เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
XRD	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค (X-ray diffractometry)
BET	การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีปัญหามลพิษทางน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการเจริญเติบโต แต่ละด้านของประเทศ ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่น่าจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมนอกจากนี้ยังทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ และมนุษย์มีส่วนทำให้เกิดซึ่งเป็นผลวงมาจากกิจกรรมด้านต่างๆที่ปล่อยฟอสฟอรัสลงสู่แหล่งน้ำเช่น กิจกรรมการซักล้างภายในครัวเรือนรวมถึงโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เนื่องจากผงซักฟอกมีสารเคมีตกค้างจากการซักผ้าจะส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ เพราะฟอสเฟตที่อยู่ในผงซักฟอก (เพื่อแก้ความกระด้างของน้ำ จะทำให้เกิดฟอง) เมื่อไหลลงสู่แหล่งน้ำ จะเป็นปุ๋ยให้แก่พืชน้ำจำพวกผักตบชวาได้เป็นอย่างดี เมื่อพืชน้ำเหล่านี้ตายลง แบคทีเรีย น้ำต้องการออกซิเจนจำนวนมากเพื่อย่อยให้มันสลายตัวตามธรรมชาติ แต่เมื่อออกซิเจนในน้ำถูกดึงไปใช้ในการย่อยสลายพืชน้ำหมด จึงทำให้น้ำเน่าเสีย หรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน” หรือสาหร่ายสะพรั่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลของทั้งสิ่งมีชีวิต และไม่มีชีวิตในระบบนิเวศแหล่งน้ำที่ส่งผลต่อระบบนิเวศที่ส่งผลต่อระบบนิเวศน้ำเป็นวงกว้าง สาเหตุหลักเกิดจากมลภาวะจากธาตุอาหารพืช เนื่องจากมีธาตุอาหารหลักในแหล่งน้ำมากเกินไป โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen) และฟอสฟอรัส (Phosphorus) ส่งผลให้สาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว เพราะไนโตรเจนมีส่วนสำคัญต่อการสร้างโปรตีนและกรดนิวคลีอิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของยีนในสิ่งมีชีวิต ในทำนองเดียวกันกับฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิกและสารประกอบต่าง ๆ ภายในเซลล์ของพืชนอกจากนี้ ในธรรมชาติ ธาตุอาหารที่จำเป็นเหล่านี้ มีปริมาณต่ำมาก หากเปรียบเทียบกับปริมาณที่สิ่งมีชีวิตต้องการ และส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปของสารประกอบที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ดังนั้นปริมาณของธาตุอาหารเหล่านี้จึงกลายเป็นปัจจัยจำกัด (Limiting Factors) ต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตกลุ่มออโตโทรป (Autotrophs) หรือกลุ่มแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายต่าง ๆ ซึ่งเป็นผู้ผลิตเบื้องต้นของระบบนิเวศแหล่งน้ำ ประเทศเป็นหนึ่งประเทศที่ประสบปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชัน จากการศึกษาพบว่ามีข้อมูลการเกิดยูโทรฟิเคชันในภาคต่างๆเช่นภาคเหนือ อ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่กวงอุดมธารา จังหวัดเชียงใหม่ มีรายงานการบลูมของแพลงก์ตอนพืช *Microcystis aeruginosa* จำนวนมาก โดยแพลงก์ตอนพืชชนิดนี้ สามารถผลิตสารพิษไมโครซิสตินได้ ในส่วนของพื้นที่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากข้อมูลของชัยวัฒน์ประภีระเศ จากสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาค 10 ระบุว่า

จังหวัดขอนแก่นมีแหล่งน้ำหลายแห่งที่เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน โดยเฉพาะที่หนองซอแง ในพื้นที่ ตำบลศิลา อำเภอเมือง ที่เกิดการบลูมของแพลงก์ตอนพืชอย่างมากโดยมีสาเหตุมาจากน้ำที่ชุมชนไม่ทั่วถึง

เพราะไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียหรือที่บริเวณบึงหนองโครต มีรายงานการบลูมของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพราะบึงดังกล่าวเป็นพื้นที่รองรับน้ำทิ้งจากชุมชน และเมื่อแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ตายลงได้ส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็นอย่างรุนแรง หรือบริเวณแหล่งท่องเที่ยววน้ำตกตาดโตนจังหวัดชัยภูมิ ก็พบปัญหาการบลูมของแพลงก์ตอนพืชด้วยเช่นกัน แต่สถานการณ์ยังไม่รุนแรงมากนักถ้าหากในอนาคตไม่มีการแก้ไข อาจส่งผลต่อการท่องเที่ยวได้ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังมีรายงานการเกิดยูโทรฟิเคชันในอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำตะคองในปี 2541 ที่พบสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วจนส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา ในส่วนของพื้นที่ภาคกลางพบการบลูมของแพลงก์ตอนพืชที่อ่างเก็บน้ำห้วยสงสัย ตำบลเขากระปุก อำเภอท่ายางจังหวัดเพชรบุรี และจากการศึกษาของ Chaichana พบการบลูมของแพลงก์ตอนพืชสกุล *Auracoseira* บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อ่างเก็บน้ำบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ส่วนในพื้นที่ภาคใต้ มีรายงานการเกิดยูโทรฟิเคชันในทะเลสาบสงขลา บริเวณทะเลหลวง ทะเลสาบตอนกลางและทะเลสาบตอนนอก โดยเฉพาะบริเวณทะเลหลวงพบปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ หรือมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชสูงที่สุด จากข้อมูลเบื้องต้นแสดงให้เห็นแล้วว่าปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชันในประเทศไทยเกิดขึ้นในแหล่งน้ำทั่วทุกภูมิภาคและส่วนใหญ่ยังเกิดในแหล่งน้ำที่มีความสำคัญต่อการอุปโภคและบริโภคของประชาชนอีกด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมแหล่งกำเนิดธาตุอาหารหรือจะต้องทำการบำบัดธาตุอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อีกทั้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องรวมถึงประชาชนจะต้องร่วมมือกันในการหามาตรการเฝ้าระวัง ป้องกัน รวมถึงการแก้ไขฟื้นฟูแหล่งน้ำที่มีปัญหายูโทรฟิเคชันเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เหมือนเดิม (พงศศักดิ์ และรัฐชา, 2557) ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมปริมาณของฟอสเฟตที่ระบายสู่แหล่งน้ำให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ วิธีการกำจัดฟอสเฟตมีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ การใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical Treatment Processes) การใช้กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Treatment Processes) และ การใช้กระบวนการทางเคมี (Chemical Treatment Processes) ข้อเสียของการใช้กระบวนการทางกายภาพคือจะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงส่วนการใช้กระบวนการทางชีวภาพจำเป็นต้องมีผู้ที่มีความรู้และความชำนาญเป็นพิเศษและตะกอนที่ได้จากการกำจัดโดยกระบวนการทางชีวภาพจะปล่อยฟอสฟอรัสออกมา หากอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน การกำจัดฟอสฟอรัสโดยใช้กระบวนการทางเคมีนั้นจะเติมสารเคมีลงไปเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำ สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวตกตะกอน เช่น สารส้ม ( $Al(SO_4)_3$ ) เฟอร์ริคคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) หรือเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) เป็นต้น แต่ตะกอนที่ได้อาจมีสารพิษเจือปน (Thi An Hang Nguyen, et al, 2012) และ การใช้ตัวตกตะกอนบางชนิดอาจมีค่าใช้จ่ายที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุผลข้างต้นทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกจะทำงานวิจัยในครั้งนี้โดยการคำนึงถึงประสิทธิภาพในการบำบัด ในการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตที่อยู่ในน้ำทิ้งโดยการดูดซับบยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอย โดยทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตได้ในปริมาณมากและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ การนำวัสดุเหลือทิ้งได้แก่เปลือกหอยแมลงภู่มาใช้เป็นตัวดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำทิ้ง นอกจากจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายโดยไม่ต้องใช้ตัวดูดซับที่มีราคาแพงแล้วยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้งอีกด้วยทั้งยังเป็น การช่วยจัดการของเสียและของเหลือทิ้งเหล่านี้ อีกทางหนึ่งซึ่งในแต่ละปีจะมีปริมาณเปลือกหอยแมลงภู่ที่ถูกทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะจากร้านอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอาหารที่ต้องใช้ ในกระบวนการผลิตที่มีเปลือกหอยแมลงภู่เหลือทิ้งในปริมาณที่สูงโดยต้องเสียค่าใช้จ่ายในการฝังกลบจำนวนมาก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่
2. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่
3. เพื่อศึกษาความสามารถในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่โดยนำเปลือกหอยแมลงภู่มาล้างสิ่งสกปรกแล้วนำมาต้มกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4% m/v ที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดแล้วทำไปตากให้แห้งสนิทจากนั้นนำมาเผา ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง บดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดยาและร่อนผ่านตะแกรงกรอง ขนาด 100 ไมโครเมตร เก็บในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท

2. ศึกษาคุณลักษณะของเปลือกหอยแมลงภู่ ได้แก่ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD (X-ray diffractometry)

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตด้วยแคลเซียมออกไซด์โดยเปลือกหอยแมลงภู่ ได้แก่ ศึกษาระยะเวลาสัมผัส โดยแปรค่าที่เวลา 10, 20, และ 30 นาที ศึกษาปริมาณตัวดูดซับโดยแปรค่าที่ 0.05, 0.1, 0.5, และ 1.0 กรัม ศึกษาความเป็นกรด-ด่าง โดยแปรค่าที่ 4, 4.69(ความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น), 7, และ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตด้วยแคลเซียมออกไซด์โดยเปลือกหอยแมลงภู๋ โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง
5. ศึกษาการคายซับและใช้ซ้ำของแคลเซียมในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตในกระบวนการดูดซับและช่วยลดปัญหาฟอสเฟตปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ
2. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัส
3. สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เปลือกหอยในปัจจุบันนับเป็นเศษขยะที่มีปริมาณเหลือทิ้งและสะสมเป็นจำนวนมากจนอาจจะสร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมปริมาณขยะจากเปลือกหอยแต่ละชนิดจะมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นกับความนิยมในการบริโภคเนื้อหอยหอยแมลงภู่เป็นหอยที่นิยมบริโภคกันเป็นอย่างมากมีผลผลิตมากที่สุดถึง 38,004.87 ตัน คิดเป็นร้อยละ 42.72 ของปริมาณผลผลิตของหอยชนิดต่างๆ ทั้งหมดในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2562 ( ) เปลือกของหอยแมลงภู่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ถึง 95-99% (สุภกร และคณะ, 2558) ความยาวของเปลือกหอยแมลงภู่มีความสัมพันธ์กับการสะสมแคลเซียมออกไซด์ในเปลือกดังนั้นเปลือกหอยแมลงภู่ที่มีขนาดใหญ่และพื้นที่ผิวมากจึงมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าหอยที่มีขนาดเล็ก (สุภกรและคณะ, 2558) การเตรียมสารประกอบแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่เพื่อนำมาใช้เป็นสารจับตัวกับออร์โธฟอสเฟตในน้ำโดยตรงหรือเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตปูนขาวสำหรับใช้ตกตะกอนฟอสเฟตในน้ำจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจของการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการตกตะกอนฟอสเฟตในน้ำโดยใช้สารประกอบแคลเซียมที่เตรียมจากการเผาเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุดมภูมิสูง

#### 2.1 เปลือกหอยแมลงภู่

หอยเป็นสัตว์ในไฟลัมมอลลัสกา (Mollusca) สิ่งมีชีวิตฟลัมนี้รวมเรียกว่า มอลลัส (Mollus) เป็นพวกที่มีลำตัวอ่อนนุ่มมีเปลือกแข็งหุ้มภายนอก มีจำนวนมากอันดับสองรองจากแมลงพบทั่วไปทั้งบนบก ในน้ำเค็ม น้ำจืด และน้ำกร่อย ส่วนใหญ่ดำรงชีวิตเป็นอิสระ เคลื่อนที่และว่ายน้ำไปมาได้ บางชนิดยึดติดกับหิน ผังตัวในดินและทราย ทั้งนี้การเติบโตของเปลือกหอยจะโตตามตัวซึ่งเปลือกก็ถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของหอยธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกหอยคือแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) สารประกอบชนิดนี้เป็นของแข็งสีขาว มีสมบัติไม่ละลายน้ำ การเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่ากระบวนการตกตะกอน (Precipitation) เกิดจากการรวมตัวของประจุแคลเซียม ที่ปลดปล่อยออกมาจากหอยและประจุคาร์บอเนตที่อยู่ในน้ำทะเล แล้วตกตะกอนของแข็งสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตออกมาก่อตัวเป็นเปลือกห่อหุ้มภายนอก โดยแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยมีอยู่ 2 รูปแบบด้วยกันคือ แคลไซต์ (Calcite) ซึ่งพบบริเวณเปลือกนอกมีพื้นผิวขรุขระและอราโกไนต์ (Aragonite) ซึ่งพบบริเวณเปลือกด้านใน คุณลักษณะมันวาวคล้ายไข่มุกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Nacre ซึ่งมีความหนาเพิ่มขึ้นตลอดช่วงชีวิตของหอยและเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำหนักของเปลือกหอยหอยแมลงภู่เป็นหอยที่นิยมเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ หอยแมลงภู่ที่เลี้ยงในประเทศไทยมีชื่อวิทยาศาสตร์ *Perna viridis* Linneaus มีชื่อเรียกสามัญทั่วไปว่า Green mussel! ซึ่งได้จัดลักษณะทางอนุกรมวิธานได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phylum Mollusca

Class Bivalvia

Order Mytilaida

Family Mytilidae

หอยแมลงภู่ประกอบด้วยเปลือกแข็งที่ห่อหุ้มลำตัวอยู่ภายนอกเปลือกหรือฝาหอยมีลักษณะ รียาคล้ายรูปไข่เหมือนกันและมีขนาดเท่ากันทั้งสองฝา ด้านนอกของฝามีสีเขียวเข้มคล้ายปีกแมลงทับและบ้างก็เป็นสีน้ำตาล ส่วนด้านในมีสีขาวคล้ายมุกโดยโครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู่แบ่งออกเป็น 3 ชั้นคือ

1) ชั้นนอกสุด เรียกว่า ชั้นผิววนอก (Periostracum layer) ประกอบด้วยสารส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภทคอนโคโอลินเป็นชั้นที่บางและหลุดง่าย ซึ่งจะสังเกตได้จากหอยที่ตายแล้วและเปลือกที่ถูกทิ้งอยู่ตามชายหาด หรือหอยที่ยังมีชีวิตแต่เปลือกถูกคลื่นซัดหรือทรายขัดสี เปลือกชั้นนี้อาจหลุดหายไปจนไม่เหลือให้เห็น

2) ชั้นกลาง เรียกว่า ชั้นผลึกแคลเซียม (Pismatic layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่าง ๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) เป็นชั้นที่หนาและแข็งแรงที่สุด

3) ชั้นในสุด เรียกว่า ชั้นมุก (Nacreous layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่าง ๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอราโกไนต์ (Aragonite) เป็นชั้นที่เรียบมีความหนาบางแตกต่างกันไปตามชนิดของหอยทำให้เปลือกมีสีขาวขุ่นและเป็นมันแวววาวแตกต่างกัน (กิตติศักดิ์ชัย, 2553)

## 2.2 ฟอสฟอรัสและฟอสเฟต

ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและในน้ำทิ้งจะอยู่ในรูปต่างๆ กันของฟอสเฟต เช่น ออร์โธฟอสเฟต อินทรีย์ฟอสเฟต หรือคอนเดนส์ฟอสเฟต เป็นต้น ฟอสเฟตเหล่านี้ถูกปนเปื้อนในธรรมชาติได้หลายทางเนื่องจากกิจกรรม เช่น การเติมลงไปใต้น้ำประปาเพื่อป้องกันการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต ภายหลัง การซักฟอกหรือล้างภาชนะซึ่งใช้ผงซักฟอกในรูปของฟอสเฟตและโพลีฟอสเฟต จากกิจกรรมทางการเกษตรซึ่งใช้ปุ๋ยเคมีในรูปของออร์โธฟอสเฟต เป็นต้น

### 2.2.1 ประเภทของสารประกอบฟอสฟอรัส

สารประกอบฟอสฟอรัสที่พบในน้ำ มี 3 ประเภท ดังนี้ (กรรณิการ์, 2544)

1. ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble Reactive Phosphorus) ได้แก่ ไตรโซเดียมฟอสเฟต ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) ไดโซเดียมฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) โมโนโซเดียมฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ ) และ ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต

2. คอนเดนส์ฟอสเฟต (Condentphosphate) หรือ โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำทิ้งจากบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของ

น้ำยาทำความสะอาดเมื่อแตกตัวจะให้ไอโธฟอสเฟต ออกมา ได้แก่ โซเดียมเฮกซาเมตาฟอสเฟต (Na<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)) โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (Na<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub>) และ เตระโพลีฟอสเฟต (Na<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) คอนเดนส์ฟอสเฟตเป็น Dehydrate Phosphate ดังนั้นจะถูกไฮโดรไลสในน้ำกลับไปเป็นออร์โธฟอสเฟตตามเดิม อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพีเอชที่ต่ำ และจะเกิดในน้ำสกปรกรวดเร็วกว่าน้ำบริสุทธิ์

3. อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphate) ได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดนิวคลีอิก (Nucleic Acid) ฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) น้ำตาลฟอสเฟต (Sugar Phosphate)

### 2.2.2 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต

ฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตอาจหาได้โดยวิธี Gravimetric หรือ Volumetric หรือ Colorimetric สำหรับวิธี Gravimetric เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีฟอสเฟตอยู่เป็นจำนวนมากส่วนวิธี Volumetric ใช้เมื่อมีฟอสเฟตอยู่ในความเข้มข้นสูงกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบมากในหม้อต้มน้ำ (Boiler) ซึ่งจะเติมฟอสเฟตลงไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกรันซึ่งอาจทำให้หม้อน้ำเกิดการระเบิดได้ เนื่องจากวิธีนี้ทำให้ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงนิยมใช้วิธี Colorimetric วิธี Colorimetric ที่ใช้หาปริมาณฟอสเฟตมี 3 วิธี คือ

1. Vanadomolybdophosphoric acid
2. Stannous Chloride
3. Ascorbic Acid

ทั้งสามวิธีมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงตัวลดออกซิเจนที่ใช้ทำให้เกิดสีในขั้นตอนสุดท้าย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ฟอสเฟตจะรวมตัวกับแอมโมเนียมโมลิบเดตภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเกิดเป็นแอมโมเนียมฟอสโฟโมลิบเดต ซึ่งเป็นสาร Complex ดังสมการที่ (2.1)



เมื่อมีฟอสเฟตในน้ำเป็นจำนวนมากจะเกิดเป็นตะกอนสีเหลืองของ Phosphomolybdate ซึ่งกรองออกได้และใช้ในการหาวิธี Volumetric ในความเข้มข้นต่ำๆ จะได้เป็น colloidal สีเหลือง ซึ่งถือว่าเป็นความเข้มข้นปานกลางใช้วัดโดยวิธี Colorimetric ได้เลย ถ้าฟอสเฟตมีอยู่น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบเป็นส่วนใหญ่ในการวิเคราะห์น้ำ สีเหลืองของคอลลอยด์จะไม่ปรากฏชัด จึงต้องใช้ตัวลดออกซิเจนไปทำให้เกิดสีซึ่งสามารถวัดได้ สารที่นิยมใช้คือสแตนนัสคลอไรด์หรือกรดแอสคอร์บิก 8 ตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งสารนี้จะปรีดิซ์ Molybdenum ใน แอมโมเนียมโมลิบเดตเกิดเป็นสารสีน้ำเงิน สีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยากับปริมาณฟอสเฟตในน้ำ โดยที่ปริมาณแอมโมเนียมโมลิบเดตที่เกินพอจะไม่ถูกรีดิซ์และไม่ขัดขวางการวิเคราะห์ สารที่มีสีที่เกิดขึ้นยังแยกไม่ได้จึงไม่ทราบสูตรที่แน่นอน เรียกกันว่า Molybdenum Blue หรือ Heteropoly Blue ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สแตนนัสคลอไรด์เป็นตัวลดออกซิเจนเป็นดังสมการ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่สารดูดซับได้ตั้งโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลว ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งซึ่งมีผิวเป็นที่เกาะจับ เรียกส่วนของแข็งนี้ว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็งและพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากอากาศและน้ำ การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (นิพนธ์และคณิตา, 2555)

### 2.3.1 ประเภทการดูดซับ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Physical Adsorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าไปติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (Activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของสารดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Multilayer) โดยแต่ละชั้นจะเกิดขึ้นซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่เกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโควาเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (วรวิทย์, 2558)

### 2.3.2 ตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุอันสมควรและต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดุก สินแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับอนินทรีย์มักมีพื้นผิวที่จำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีขีดจำกัด
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเปปเปอร์
3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
4. วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชี้อัลไคโตซาน (Chitosan) กากกาแฟและชาเขียว ฟางข้าว (Rice straw) กากถั่วเหลือง เปลือกไม้ ถั่วแกลบดำ
5. สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์หรือรา สายพันธ์ต่างๆและสาหร่าย

### 2.3.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความดัน หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับโดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า "ไอโซเทอร์ม (Isotherm) ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับเป็น 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรืออาจเรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่า เป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped Isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee Of sotherm) เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

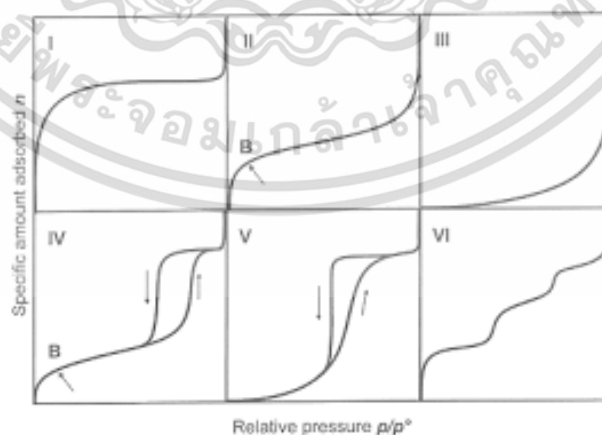
Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็ง ที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous Solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำแต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบบ่อยที่สุดในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับ

ไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด Hysteresis Loop ในช่วง Desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) ในของแข็ง ที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง Desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์มชนิด Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี Hysteresis Loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบบ่อยน้อย

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบบ่อยน้อย โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กักระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ



รูปที่ 2.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ที่มา : [www.sutir.sut.ac.th](http://www.sutir.sut.ac.th) (อ้างถึง กุซงค์, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบล สาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932 (นิพนธ์ และคณิตา, 2555) โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous Adsorption Surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย บนผิวของแข็งได้ดังสมการที่ (2.3)

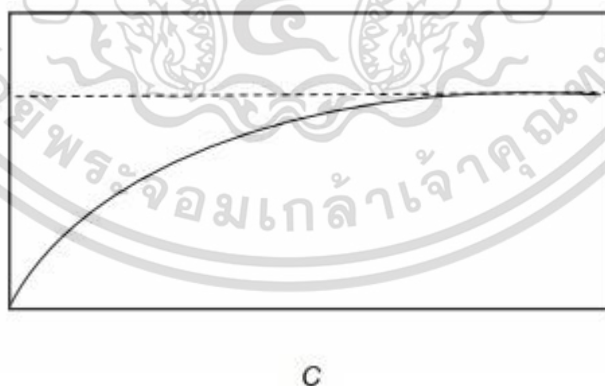
$$q = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.3)$$

$q$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ

$q_m$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (mg/g)

$K_L$  = ค่าคงที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (L/mg)

$C$  = ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์

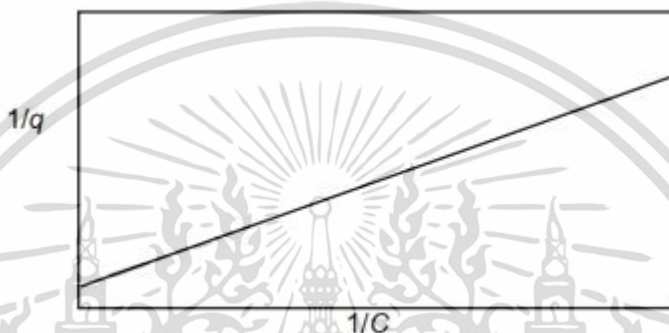
ที่มา: (เสาวภา, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปสถานการณ์เส้นตรง จะได้สมการที่ (2.4)

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

เขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{q_m K_L}$  และจุดตัดบนแกนเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: (เสาวภา, 2558)

### 2.3.3.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Freundlich ได้อธิบายสมมุติฐานไอโซเทอร์มของการดูดซับที่ว่าตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดมีรูปแบบของสมการดัง (2.5)

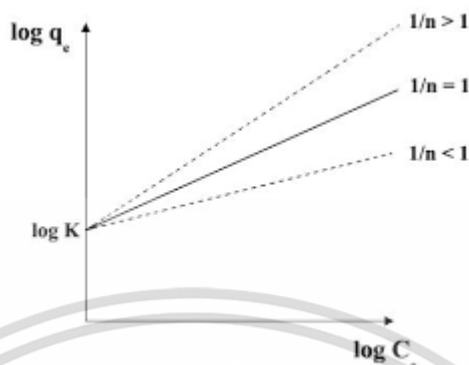
$$q = K_F C^{1/n} \quad (2.5)$$

โดยสมการที่ 2-5 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad 2-6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_c$  กับ  $\log C_c$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{n}$  และมีจุดตัดเท่ากับ  $\log K_F$



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนดิช

ที่มา: <https://archive.lib.cmu.ac.th>

ถ้า  $\frac{1}{n} = 1$  ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า  $\frac{1}{n} < 1$  บอกลักษณะความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น  $c$  หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า  $\frac{1}{n} > 1$  บอกลักษณะความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q_c$  และ  $C_c$  จากสมการที่ 2-5 ดังภาพที่ 2.4 จะไม่สามารถบอกลักษณะของตัวดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตั้งถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้

## 2.4 กระบวนการคายซับ (Desorption)

เป็นการหลุดออกของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) (เกรียงศักดิ์, 2546) โดยกระบวนการจะเป็นการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ (Regeneration) ที่เริ่มหมดสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้แทนที่จะนำสารดูดซับไปทิ้งโดยไม่ใช้ประโยชน์ ซึ่งวิธีการฟื้นฟูสภาพอาจใช้วิธีทางเคมี วิธีความร้อน หรือวิธีเผา (เกรียงศักดิ์<sup>3</sup>, 2539)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ภคพงษ์ (2553)** ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นของเปลือกไข่และเปลือกหอย โดยเตรียมสารดูดซับความชื้นจากเปลือก ไข่ไก่ ไข่เป็ด หอย แครง และหอยแมลงภู่เปลือกของสาร ตัวอย่างข้างต้นจะประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับความชื้นโดยการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตจนเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) การเตรียมตัวอย่างเปลือกของสาร ตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมถูกบดและร่อนให้มีขนาดเล็กกว่า 250 ไมโครเมตรและใหญ่กว่า 500 ไมโครเมตร แล้วเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 200 ถึง 1300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า  $\text{CaCO}_3$  เปลี่ยนเป็น  $\text{CaO}$  สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส  $\text{CaO}$  ที่ได้ถูกนำไปทดสอบ การดูดซับความชื้นในหอยดูดซับแบบแบริ่ง พบว่า เปลือกไข่ไก่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูงที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นตัวดูดความชื้นแต่ละชนิด ตัวดูดความชื้นที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร จะดูดความชื้นได้เร็วกว่าขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 500 ไมโครเมตร

**ยะโก๊ะ (2553)** ได้ศึกษาการดูดซับสารประกอบฟอสเฟตบนซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 พบว่า สมบัติการดูดซับของสารประกอบฟอสเฟตบนซีโอไลต์ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับ การขยายขนาดของโครงสร้าง (Extended Structure) ของซีโอไลต์และได้ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมใน การดูดซับน้ำตัวอย่างสังเคราะห์  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  พบว่าเวลาการดูดซับ 30 นาที ค่า pH 12 ส่งผลให้ เกิดการดูดซับสูงสุด และพฤติกรรม การดูดซับฟอสเฟตด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีความสอดคล้อง กับสมการ Freundlich Isotherm ( $R^2=0.99$ ) มากกว่า Langmuir Isotherm ( $R^2=0.93$ ) แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบหลาย ชั้น หรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่า ทางเคมี และเมื่อประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติดูดซับ ฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักผ้าด้วยเครื่อง ซักผ้าอัตโนมัติ โดยผ่านชุดกรองแบบน้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ ฟอสเฟตสูงถึง 94 เปอร์เซ็นต์

**ปภามณูชู้ และคณะ (2554)** ได้ศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมมีประ โยชน์ต่อการประเมินความสามารถในการเคลื่อนย้ายและการ แพร่กระจายของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม ทดสอบการดูดซับโดยใช้ตัวอย่างดินจาก อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก การ ทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดินนาข้าว พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสม สำหรับสมดุล ของการดูดซับแคดเมียม คือ 6 ชั่วโมง รูปแบบการดูดซับเมื่อความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย เท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 mg Cd/kg สอดคล้องกับรูปแบบการดูดซับของ Freundlich โดยมี สมการ  $Y = 29.402X^{0.3872}$  ค่า Hysteresis Index (HI) เท่ากับ 2.0, 14.1, 12.3, 13.5 , 106.5 แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมที่ถูกดูดซับในดินจะปลดปล่อย ออกมามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคดเมียมมากขึ้น นอกจากนี้การปลดปล่อยแคดเมียมยังขึ้นกับระยะเวลาที่ แคดเมียมปนเปื้อนอยู่ใน ดิน โดยแคดเมียมดูดซับในดินในฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ และในฟอร์มที่ยึด เหนี่ยวกับ คาร์บอเนตซึ่งพืชจะสามารถนำไปใช้ได้ ในขณะที่ฟอร์มที่ยึดเหนี่ยวกับของเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่ ยึดเหนี่ยวกับอินทรีย์วัตถุ ซึ่งพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ จะมีมากในดินที่เกิดการปนเปื้อนมาแล้ว เป็นระยะเวลาานาน

**เสาวภา (2558)** ได้ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ โดยศึกษาคุณสมบัติการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วย  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่ไก่และ  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่ไก่เผา วิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีการแอสคอร์บิก พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับเมื่อใช้  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับ คือ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1 เวลาในการดูดซับ 180 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัม โดยประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนการใช้  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับ พบว่า พีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4 - 11 เวลาในการดูดซับ 30 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 0.1 และ 0.5 กรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ ออร์โธฟอสเฟตมากกว่าร้อยละ 97 การศึกษาไอโซเทอร์มของตัวดูดซับออร์โธฟอสเฟตสามารถวิเคราะห์และทำนายได้จากไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดิชและแลงเมียร์ ซึ่งในการใช้  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวดูดซับพบว่า มีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชได้ดีกว่าแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นแบบหลายชั้นหรือเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าทางเคมี ส่วนการใช้  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับจะสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟรุนดิช แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกันโดยประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 73 และ 99 เมื่อใช้  $\text{CaCO}_3$  จากเปลือกไข่ไก่ และ  $\text{CaO}$  จากเปลือกไข่ไก่เผาเป็นตัวดูดซับตามลำดับ

**ภาวิณี และคณะ (2559)** ได้ศึกษาการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำทะเลโดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่ โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสองชนิด คือ ตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำทะเลเทียม ความเค็ม 30 psu โดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่ขนาด 0.8 - 1.0 มิลลิเมตร ที่ผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่กรดและไม่แช่กรด ผลการศึกษาการดูดซับแคดเมียม ด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ทั้ง 2 วิธี พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (T-test) โดยเปลือกหอยสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงกว่าแคดเมียม 300 เท่าด้วยกระบวนการดูดซับตะกั่วที่ผิวของเปลือกหอยแบบชั้นเดียว แสดงให้เห็นว่าในสภาวะน้ำทะเลเทียมเปลือกหอยแมลงภู่มีความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเพื่อใช้เปลือกหอยแมลงภู่เป็นเครื่องมือในการติดตามตะกั่วในน้ำทะเลชายฝั่ง

**จักรกฤษณ์ และคณะ (2560)** ได้ศึกษาศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา โดยการเอกลำต้นเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กระตุ้นทางเคมีเพื่อใช้ดูดซับสีย้อม รีแอคทีฟแบล็ค 5 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับถูกวิเคราะห์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกทั้งหมัดให้หมดไปและต้องยังต้องเองเจ้าของเอกสารทุกฉบับที่กรนไปใช้

ด้วยการวิเคราะห์ IR-spectra BET-method และภาพ SEM การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับแบบกะ พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นกับเวลาและเข้าสู่สมดุลที่ 150 นาที ค่าพีเอชไม่ส่งผลต่อการดูดซับ ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม การคายซับเกิดขึ้นได้โดยใช้ตัวทำละลายอะซิโตนไตรีน นอกจากนี้ผลการทดลอง สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับอันดับสองเทียม และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ส่วนที่ 2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับในเบตนิ่ง พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบตนิ่งและอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ขณะที่ ปริมาณการดูดซับลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้น จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ถ่าน กัมมันต์จากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5

**ธนบดี และคณะ (2562)** ได้ศึกษาประสิทธิภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์โครงการพิเศษนี้จัดทำเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ในการตกตะกอนออร์โธฟอสเฟตในน้ำ ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบแคลเซียมในเปลือกหอยด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่วิธีการเตรียมเปลือกหอยและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ผลการศึกษาพบว่าเปลือกหอยบดที่ล้างด้วยน้ำประปามีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 85.06 แคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยบดมีปริมาณลดลงเมื่อล้างด้วยน้ำประปร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ พบว่าเปลือกหอยบดที่ผ่านการล้างทั้งสองวิธีประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปอะราโกไนต์ การเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 700 องศาเซลเซียส ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก เป็นแบบแคลไซต์ ซึ่งจะเกิดการสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์เมื่อนำเปลือกหอยไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาศามารถในการกำจัดฟอสเฟตของสารประกอบแคลเซียมที่เตรียมได้จาก เปลือกหอย พบว่าการตกตะกอนฟอสเฟตเกิดขึ้นได้มากที่สุดเมื่อใช้สารประกอบแคลเซียมที่ได้จากการ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส น้ำที่ผ่านการบำบัดมีพีเอชและความกระด้างสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ สารประกอบแคลเซียมในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

**Jibing Xiong, et al. (2011)** ได้ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตจากสารละลายโดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่ โดยการกำจัดฟอสเฟตออกจากสารละลาย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการกำจัดฟอสเฟตจากเปลือกหอยแมลงภู่ พบว่ามีปัจจัยสำคัญ เช่น ความเข้มข้นของฟอสเฟตระยะเวลา และค่า pH ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้ 1.) ระยะเวลา pH ตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ คือทั้งหมดของกระบวนการกำจัดฟอสเฟต 2.) การเผาเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นจาก 25% เป็น 55% เมื่อค่า PH 5.53) ความผันผวนไนกรดซัลฟิวริก (2%) เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงมากกว่า 90% ของฟอสเฟตที่ดูดซับบนตัวดูดซับละลายออก และ

4.) การทดสอบการดูดซับแบบไอโซเทอร์มสมการของ Temkin isotherm และ Dubinin-Radushkevich isotherm นั้นเหมาะสมกับเปลือกหอยดังนั้นการดูดซับของเปลือกหอยจึงเป็นการดูด

ซับทางเคมี ความสามารถในการดูดซับความอิมิตัว ( $\text{mg P} / 9$ ) ของหอยแมลงภู่วัฒนชาติคือ 6.95 ผลการทดลองเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ผงเปลือกหอยแมลงภู่วัฒนชาติเป็นวัสดุดูดซับที่ดียิ่งขึ้นในการกำจัดฟอสเฟตออกจากสารละลาย

Paradelo R, *et al.* (2016) ได้ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่วัฒนชาติ โดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่วัฒนชาติผ่านการเผาและบดละเอียดมาใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสตามรูปแบบฟรันทิช (Freundlich) ในเวลาสูงสุดคือ 72 ชั่วโมง และตามรูปแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ในเวลาที่ต่ำกว่าคือ 24 ชั่วโมง ความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นตามเวลาและความเข้มข้นของฟอสฟอรัสอัตราการสูญเสียสารละลายฟอสฟอรัสมีอัตราต่ำมาก (<4%) หอยแมลงภู่วัฒนชาติผ่านการเผามีความสามารถในการกำจัดมากกว่าเปลือกหอยแมลงภู่วัฒนชาติที่ละเอียดซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของแร่ธาตุและองค์ประกอบ หลังจากการวิจัยพบว่ากลไกการดูดซับและการตกตะกอนมีส่วนช่วยในการกำจัดฟอสฟอรัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เปลือกหอยแมลงภู
2. กระดาษกรอง ยี่ห้อ Whatman ขนาด 42
3. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) ยี่ห้อ LabTech รุ่น BlueStar B S/N 1604UV1494
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น MS1003TS
5. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น 8603 Schwerzenbach
6. เต้าเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ CHAVACHOTE
7. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UN 55
8. ไมโครปิเปต (Micropipette) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
9. เครื่องกวนผสม (Jar Test) ยี่ห้อ Trad Raypa รุ่น FLOC-6C
10. ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
11. ครกหินบด
12. เตาให้ความร้อน (Hot plate)
13. อุปกรณ์เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.Sulfuric Acid,  $H_2SO_4$ ) เกรดการวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie
2. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid,  $C_6H_8O_6$ ) เกรดการวิเคราะห์ บริษัท Chemsupply
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) เกรดการวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie
4. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium Dihydrogen Phosphate,  $KH_2PO_4$ ) เกรดการวิเคราะห์ บริษัท AJAX Finechem
5. โพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เตต (Potassium Antimony Tartrate,  $(SbO)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดเผยแพร่ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดค้าน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium Molybdate,  $(\text{NH}_4)_2 \text{Mo}_7 \text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ )  
เกรตวิเคราะห้ บริษัท Carlo Erba
7. กรดไนตริกเข้มข้น 69% (Nitric Acid 69%,  $\text{HNO}_3$ ) เกรตการวิเคราะห้  
บริษัท Loba Chemie

### 3.2 การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์

การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในรูปแบบของออร์โธฟอสเฟต เพื่อนำไปวิเคราะห์ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ มีดังนี้คือ การสร้างกราฟมาตรฐานหาช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์ หาความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ หาความแม่นยำ และความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ ดังรายละเอียดการทดลองต่อไปนี้

#### 3.2.1 การทดสอบความเป็นเส้นตรงของช่วงการวิเคราะห์ (Linearity and RANG)

##### - การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต

การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตโดยใช้วิธีกรดแอสคอร์บิก โดยมีการทดลองดังนี้

ปีเปตสารละลายฟอสฟอรัสเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ซึ่งเตรียมโดยชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.4394 กรัม ละลายในน้ำกรั้มแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร) จำนวน 100, 200, 300, 400, 500 และ 1000 ไมโครลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent จำนวน 8 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน สารละลายแต่ละขวดมีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายที่ไม่ได้เติมสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเป็นแบลนด์

นำค่าการดูดกลืนที่วัดได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (mg/L) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

Combine Reagent คือ Sulfuric acid 100 ml, Antimony potassium tartrate solution 10 ml, Ammonium molybdate solution 30 ml, Ascorbic acid solution 60 ml เตรียมสารละลายใหม่ทุกครั้งก่อนทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การทดสอบความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ (Accuracy)

การทดสอบความแม่นยำ แสดงความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ คือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ควร มีค่าเท่ากับค่าจริง (True Value) หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด แสดงค่าทางสถิติเป็นค่าร้อยละ การกลับคืน (% Recovery) (เสาวภา, 2533)

$$\text{ดังสมการ} \quad \text{ร้อยละการกลับคืน} = \frac{C_u}{C_s} \times 100$$

เมื่อ  $C_u$  = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่วัดได้จากการวิเคราะห์

$C_s$  = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงในสารตัวอย่าง (Spiked Sample)

- ร้อยละการกลับคืนสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตในน้ำตัวอย่าง ผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่

การทดลองการดูดซับออร์โทฟอสเฟตด้วยแคลเซียมออกไซด์ได้ศึกษาหา ร้อยละการกลับคืน ของปริมาณฟอสฟอรัสซึ่งอยู่ในรูปของออร์โทฟอสเฟตโดยทำการทดสอบความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ ที่ระดับ 0.2, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ผ่านการดูดซับ 5 มิลลิตร (น้ำตัวอย่างมีความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 200 มิลลิตร และผ่านการดูดกลืนด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่เผา 1.0 กรัม เป็นระยะเวลา 30 นาที) ลงในขวดปรับปริมาตร เติมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ปริมาตร 100, 200 และ 300 ไมโครลิตร เติม Combine Reagent จำนวน 8 มิลลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิตร ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวนี้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร การทดลอง ทำ 3 ซ้ำ ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้นำไปหักลบกับค่าแบลนด์ของน้ำตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารละลาย มาตรฐานออร์โทฟอสเฟต แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 3.2.1 เพื่อคำนวณหา ร้อยละการกลับคืน

หมายเหตุ สำหรับปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่ปริมาณ 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตรทำ เช่นเดียวกับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เปลี่ยนสารละลายมาตรฐานออร์โทฟอสเฟตเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เป็น 200 และ 300 ไมโครลิตร

### 3.3 การเตรียมตัวดูดซับ

การเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่ โดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่ มาล้างสิ่งสกปรกจนสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง นำมาต้มกับ 4% m/v โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 85-91 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโปรตีน ล้างน้ำให้สะอาดผึ่งลมให้แห้ง นำมาอบในตู้อบความเอกซาร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที บดขนาดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดยา ร้อนผ่านตะแกรงคัดกรอง ขนาด 100 ไมโครเมตร เก็บใส่ภาชนะที่แห้งและปิดสนิท

**การเตรียมแคลเซียมออกไซด์**จากเปลือกหอยแมลงภู่นำเปลือกหอยแมลงภู่นำมาล้างสิ่งสกปรกจนสะอาด ผึ่งลมให้แห้งหมาด นำมาต้มกับ 4% m/v โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 85-91 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโปรตีน ล้างน้ำให้สะอาด ผึ่งลมให้แห้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น นำมาบดด้วยโกร่งบดยา ร้อนผ่านตะแกรงคัดกรอง ขนาด 100 ไมโครเมตร เก็บใส่ภาชนะที่แห้งและปิดฝาให้สนิท จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเปลือกหอยต่างๆ มีปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 95-99 (สุภกร และคณะ :2559 อ้างถึง Kaplan : 1998)

### 3.4 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ

#### 3.4.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD) โดยการนำตัวอย่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยแมลงภู่นำมาผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และแคลเซียมออกไซด์สังเคราะห์จากเปลือกหอยแมลงภู่นำมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD โดยกำหนดสภาวะดังนี้

ช่วงมุม $2\theta$ ที่ใช้วิเคราะห์	: 30 – 55 องศา
Duration time	: 50.00 องศา/นาที
Step width	: 0.01 องศา
Scan range	: 5 - 60 องศา

### 3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $\text{CaCO}_3$ และ $\text{CaO}$ จากเปลือกหอยแมลงภู่นำ

ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ จากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่นำและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่นำผ่านการเผาเป็นตัวดูดซับ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสม ปริมาณของเปลือกหอยแมลงภู่นำผ่านการเผา ระยะเวลาในการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต และเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วเลือกตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดมาทำการทดลอง ในการทดลองใช้ความเร็วรอบของการปั่นกวนคงที่ที่ 200 รอบต่อนาทีตลอดการทดลอง โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของเสาวภา (2558) ที่ทำการศึกษาเรื่องการกำจัดฟอสเฟตในน้ำไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

### 3.5.1 ศึกษาอิทธิพลของpH เริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

การศึกษา pH เริ่มต้นในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุด โดยแปรเปลี่ยนค่า pH 4, 4.69 (pH เริ่มต้น), 7, และ 10 ของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต คือ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ที่ถูเผาในปริมาณที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุดจากข้อ 3.5.2 ปั่นกวนความเร็รรอบ 200 รอบต่อนาทีจากนั้นกรองสารละลายแบบกรองลดความดัน จากนั้นบีบอัดสารละลายที่ผ่านการกรองมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ตามระยะเวลาการดูดซับในข้อ 3.5.3

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ เลือกตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดมาทำการทดลองต่อ

### 3.5.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

ทำการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร แล้วแปรเปลี่ยนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่เผา 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 กรัมตามลำดับ ปั่นกวนที่ความเร็รรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้pH ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.5.1 กรองสารละลายแบบกรองลดความดัน จากนั้นบีบอัดสารละลายที่ผ่านการกรองมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร จากนั้น เติม Combine Reagent 8 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลือภายในระยะเวลา 30 นาที

### 3.5.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

การศึกษาระยะเวลาในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตสูงสุด โดยเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมแคลเซียมออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตที่ดีที่สุด และค่าpH ที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 3.5.1 ปั่นกวนที่ความเร็รรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลา 30 นาที แล้วกรองสารละลายแบบกรองลดความดัน จากนั้นบีบอัดสารละลายที่ผ่านการกรองมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร เติม Combine Reagent 8 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ออร์โธฟอสเฟตที่เหลือทุกๆ ช่วงเวลา 10 นาที ภายในระยะเวลา 10-30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ศึกษาการคายซับและใช้ซ้ำของแคลเซียมออกไซด์ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

จากการทดลองการใช้แคลเซียมออกไซด์ซ้ำในการกำจัดออร์โทฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ 1.0 กรัม ใส่ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นออร์โทฟอสเฟตเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่า pH ที่ดีที่สุดเท่ากับ 4 ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลา 30 นาที แล้วกรองสารละลายแบบกรองลดความดัน เปิดสารละลายที่ผ่านการกรองมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent 8 มิลลิลิตร ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำตัวดูดซับมาดูดซับใหม่ โดยการเติมน้ำกลั่น ปริมาณ 200 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลา 30 นาที กรองสารละลายแบบกรองลดความดัน เปิดสารละลายที่ผ่านการกรองมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent 8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ตั้งสารละลายทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟตที่ถูกดูดซับ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวชะล้างเป็นกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.01 mg/L

### 3.7 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

จากการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โทฟอสเฟตโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าว 1.0 กรัม และความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟตตั้งแต่ 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่สภาวะ pH เท่ากับ 4 ระยะเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ กรองสารละลายแบบกรองลดความดัน เปิดสารละลายที่ผ่านการกรองมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม Combine Reagent 8 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของออร์โทฟอสเฟตที่เหลือจากการดูดซับ แล้วนำผลการทดลองมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับออร์โทฟอสเฟตตามสมการของ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในการศึกษาการดูดซับอโรฟอสเฟต ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยศึกษาถึงผลของ pH ที่เหมาะสม ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม ระยะเวลาในการดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับ รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ของการนำกลับมาใช้ซ้ำ ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์ เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับ โดยวิเคราะห์ศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRD เพื่อวิเคราะห์ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นจากเปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และ เปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

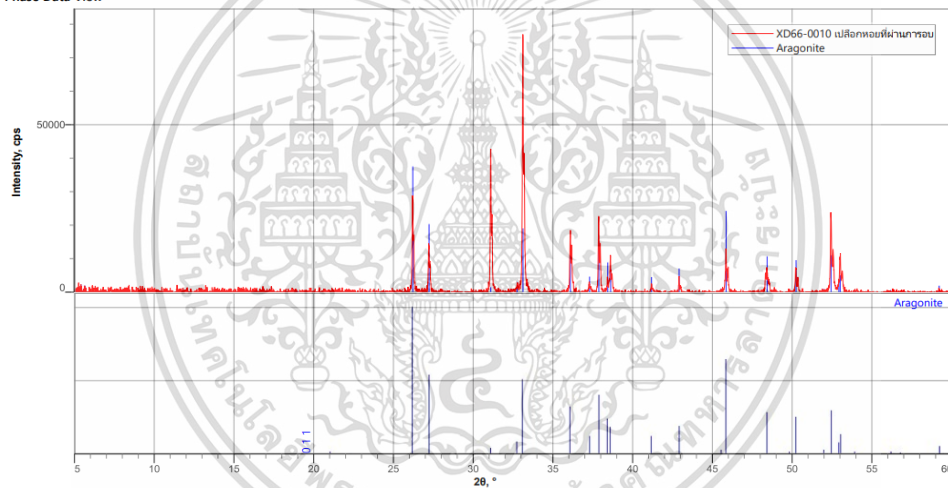
Path: Unsaved

Solution

## Qualitative Analysis Results

Phase name	Chemical formula	FOM	Phase ref. detail	Space Group	DB Card Number
Aragonite	Ca (C O3)	0,826	S/M-PDF-2 2021	62 : Pmcn	01-075-9982

## Phase Data View



XD66-0010 เฟสของหินน้ำร้อน-Evaluation report (XD66-0010  
เฟสของหินน้ำร้อน-Evaluation)

Page 3 of 9

รูปที่ 4.1 โครงสร้างการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราวินโคราเทห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเทคนิค XRD

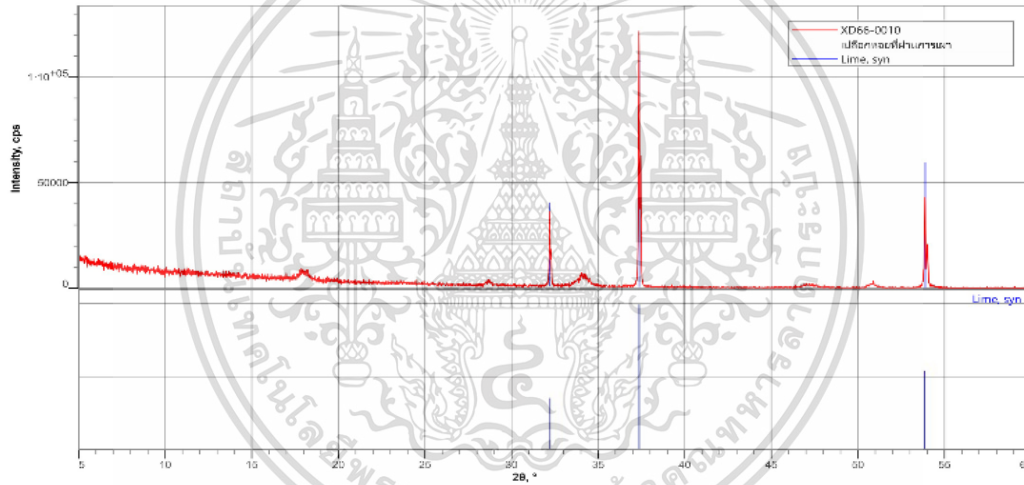
Path: Unseved

Solution

## Qualitative Analysis Results

Phase name	Chemical formula	FOM	Phase ref. detail	Space Group	DB Card Number
Lime_syn	Ca O	0.363	SYM-PDF# 2_2021	225 : Fm-3m	00-037-1497

## Phase Data View



XD66-0010 เป็ลยอกอี่นเกอระนแอ-Evaluation report (XD66-0010  
เป็ลยอกอี่นเกอระนแอ-Evaluation)

Page 2 of 6

รูปที่ 4.2 โครงสร้างการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราวอิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าจากการศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า เปลือกหอยที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยพบโครสมลิกแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ องศาเลี้ยวเบน  $2\theta$  คือ  $26.193^\circ$ ,  $27.215^\circ$ ,  $31.085^\circ$ ,  $32.740^\circ$ ,  $33.1056^\circ$ ,  $36.077^\circ$ ,  $37.255^\circ$ ,  $37.854^\circ$ ,  $38.405^\circ$ ,  $38.587^\circ$ ,  $41.157^\circ$ ,  $42.885^\circ$ ,  $45.834^\circ$ ,  $48.334^\circ$ ,  $50.197^\circ$ ,  $52.405^\circ$ ,  $52.977^\circ$ ,  $53.917^\circ$  และ  $59.186^\circ$  โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของแคลเซียมคาร์บอเนต Card No 01-075-9982 พบว่าตรงกับฐานข้อมูล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่เตรียมได้จากการทดลอง คือ แคลเซียมคาร์บอเนต

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าจากการศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า เปลือกหอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ โดยพบโครสมลิกแคลเซียมออกไซด์ ที่ องศาเลี้ยวเบน  $2\theta$  คือ  $32.19^\circ$ ,  $37.34^\circ$  และ  $53.84^\circ$  โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของแคลเซียมออกไซด์ Card No 00-037-1497 พบว่าตรงกับฐานข้อมูล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่เตรียมได้จากการทดลอง คือ แคลเซียมออกไซด์

## 4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Validation of Method)

4.2.1 ผลการตรวจสอบความเป็นเส้นตรงของช่วงการวิเคราะห์ (Linearity and Rang) จากการทดสอบความเป็นเส้นตรง ได้ศึกษาความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟตในช่วง 0.2-2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-1 และนำผลการวิเคราะห์มาสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณออร์โทฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตาราง ก.1 ภาคผนวก ก )

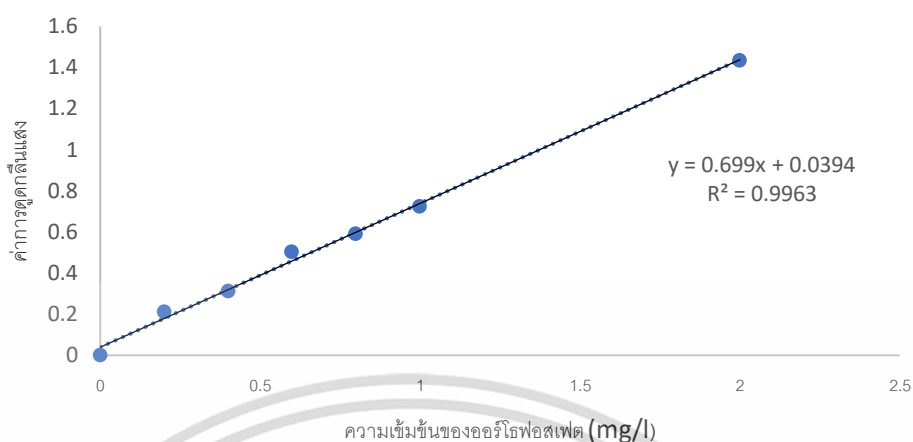
ตารางที่ 4.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร

ออร์โทฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 nm
0.0	0.0000±0.000
0.2	0.2103±0.002
0.4	0.3150±0.006
0.6	0.5026±0.002
0.8	0.5881±0.001
1.0	0.7221±0.008
2.0	1.4317±0.007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 2.0 รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ  $\bar{x} \pm SD$ , n=3

กราฟมาตรฐานของออร์โทฟอสเฟต



รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง จากการทดลองกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9963

#### 4.1.2 ผลการทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision)

##### ของวิธีการวิเคราะห์

การทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณออร์โทฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการดูดซับด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ระดับ คือ 0.2, 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร

การทำซ้ำ	ความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟต (mg/l)		
	0.2	0.4	0.6
1	0.2106	0.4507	0.6556
2	0.2086	0.4405	0.6484
3	0.2241	0.4486	0.6582
X	0.2144	0.4466	0.6540
SD	0.0084	0.0053	0.0071
%RSD	3.9179	1.1814	0.7800
%Recovery	107.2	111.65	109.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า วิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิกมีความน่าเชื่อถือเพราะในการทดสอบความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์พบว่า ร้อยละการกลับคืน (%Recovery) อยู่ในช่วง 107.20-111.65% และในการทดสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ แสดงค่าทางสถิติเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) มีค่า 0.7800-3.9179 % ซึ่งไม่เกิน 5 % ดังนั้นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิกจึงมีความน่าเชื่อถือเพราะมีความแม่นยำและความเที่ยงสูง

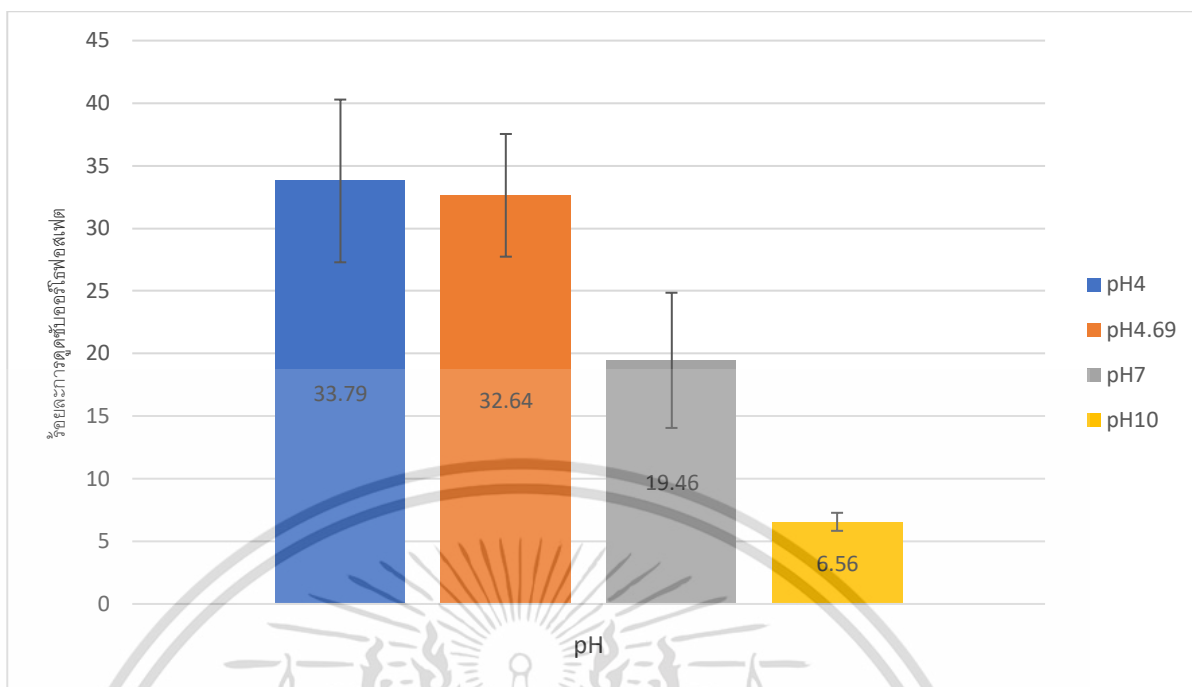
#### 4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟตด้วย $\text{CaCO}_3$ จากเปลือกหอยแมลงภู่ และ $\text{CaO}$ จากเปลือกหอยแมลงภู่เผา

ในการศึกษาการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต ทำการศึกษา ค่า pH ที่เหมาะสม ปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับ รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ของการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ

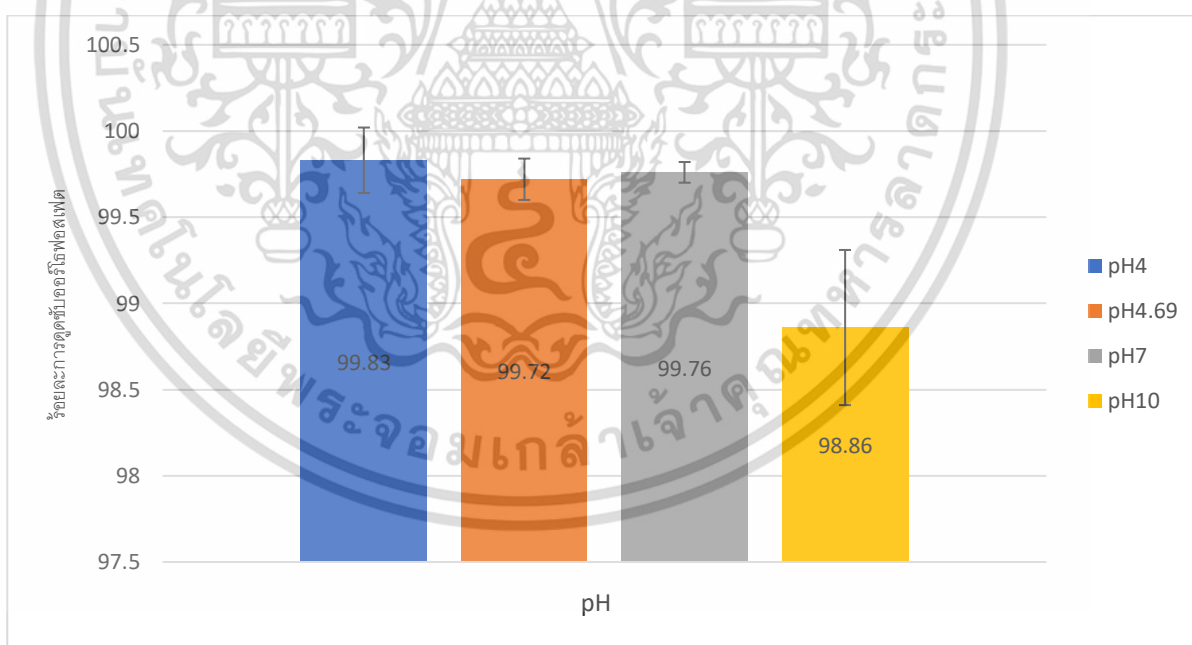
ในการทดลองนี้ใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่ และแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู่เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เป็นตัวดูดซับ

##### 4.3.1 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

การทดลองนี้ใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของออร์โธฟอสเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเปิดมา 1 มิลลิลิตร นำมาปรับในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการปรับค่า pH ของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก ให้มี pH 4, pH 7 และ pH 10 ตามลำดับ โดย pH เริ่มต้นเท่ากับ 4.69 ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่ปริมาณ 1.0 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็นแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการเผา แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ที่ใช้ดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่ม 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที



รูปที่ 4.4 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ม 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า แคลเซียมออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One way ANOVA พบว่า ค่า pH หรือ ค่าร้อยละการดูดซับของออร์โทฟอสเฟตที่ระดับ pH ต่างๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ\*งานวิจัยของ เสาวภา ไวยสุศรี (2558) ที่พบว่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับออร์โทฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาคือ pH ที่อยู่ในช่วง 4-11 ซึ่งในการทดลองเลือกใช้ที่ pH 4 เพราะมีค่าร้อยละการดูดซับใกล้เคียงกับน้ำตัวอย่างเริ่มต้น นำตัวดูดซับและ pH ที่ดีที่สุดในการทดลอง 4.3.1 ไปใช้ในการทดลองถัดไป ( ดูรายละเอียดในตาราง ก.3-ก.4 ภาคผนวก ก )

#### 4.3.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับและระยะเวลาการดูดซับ

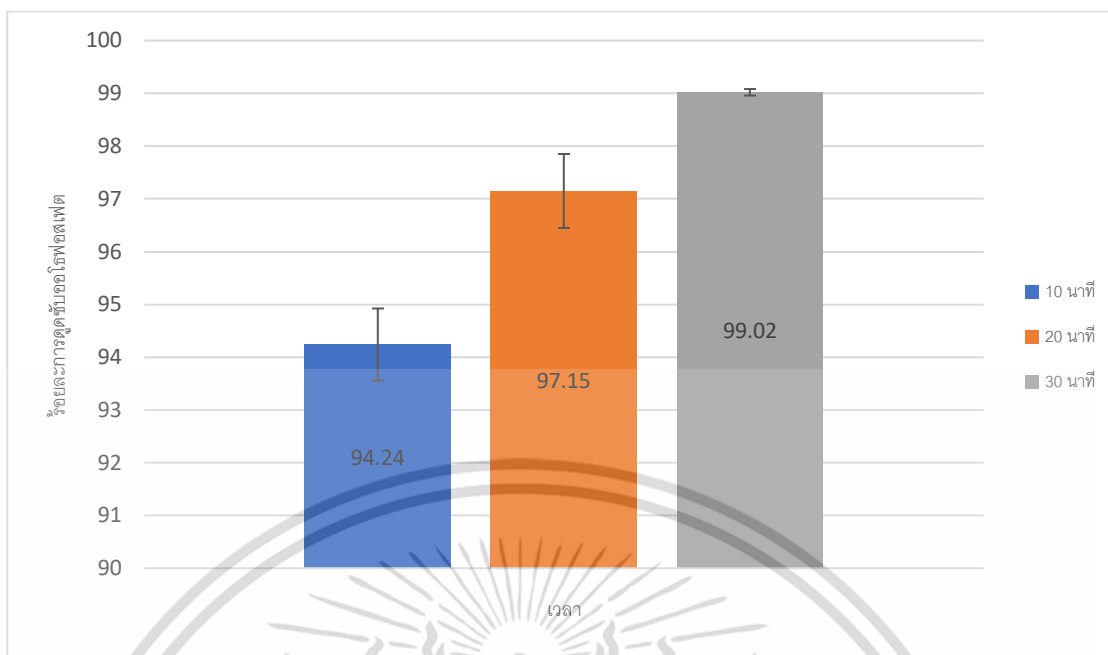
จากการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมและระยะเวลาในการดูดซับในการกำจัดออร์โทฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ โดยศึกษาปริมาณที่เปลี่ยนแปลงของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่มากุ่ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 กรัม เก็บน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่เหลือทุกๆช่วง 10 นาที ภายในระยะเวลา 10-30 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4-3 และรูปที่ 4.5

**ตารางที่ 4.3** ร้อยละการดูดซับออร์โทฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยในปริมาณต่างๆความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟตเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ร้อยละการดูดซับออร์โทฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วย แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยในปริมาณต่างๆ (mg/l)			
	0.05g	0.1g	0.5g	1.0g
10	71.17±1.89	91.12±0.34	91.99±0.17	94.24±1.29
20	76.97±1.82	92.84±0.56	93.12±0.34	97.15±0.23
30	78.24±0.35	94.33±0.38	95.49±0.65	99.20±0.18

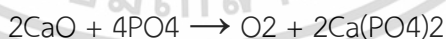
หมายเหตุ : ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ  $\bar{x} \pm SD$ , n=3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

จากการทดลองเมื่อพิจารณาระยะเวลาในการดูดซับที่ 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ พบว่า ปริมาณตัวดูดซับขนาด 1 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดถึง 94.24, 97.15 และ 99.02 ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One way ANOVA พบว่า แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ที่ระยะเวลา 30 นาที จึงเลือกค่าที่มีปริมาณการดูดซับสูงสุดคือที่ 30 นาที สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ เสาวภา ไวยสุศรี (2558) พบว่า ที่ระยะเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ (ดูรายละเอียดในตาราง ก.6 ภาคผนวก ก ) ในการทำการทดลอง เมื่อแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออร์โธฟอสเฟต อาจจะเป็นแคลเซียมฟอสเฟต ดังสมการนี้

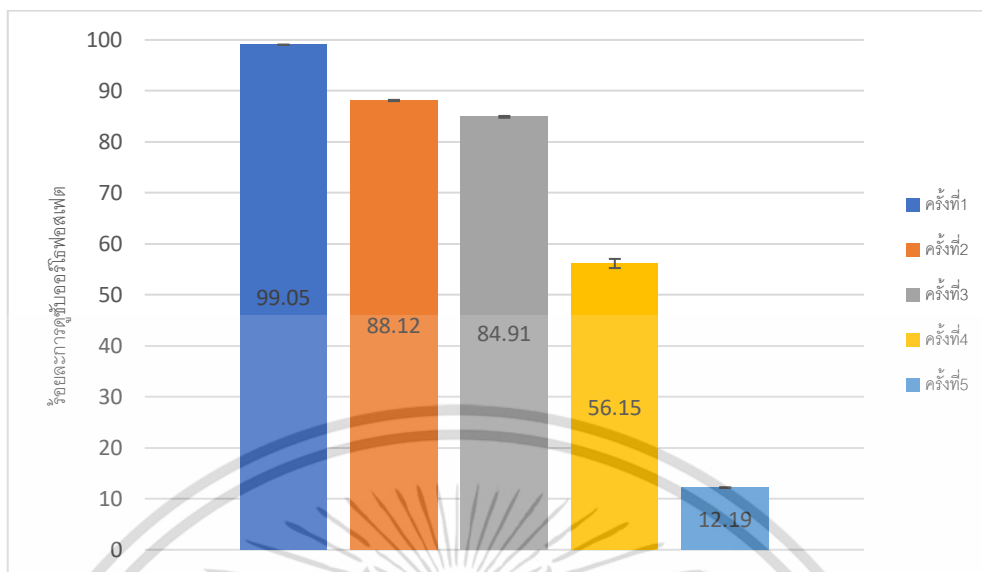


### 4.3.3 ผลประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ซ้ำ

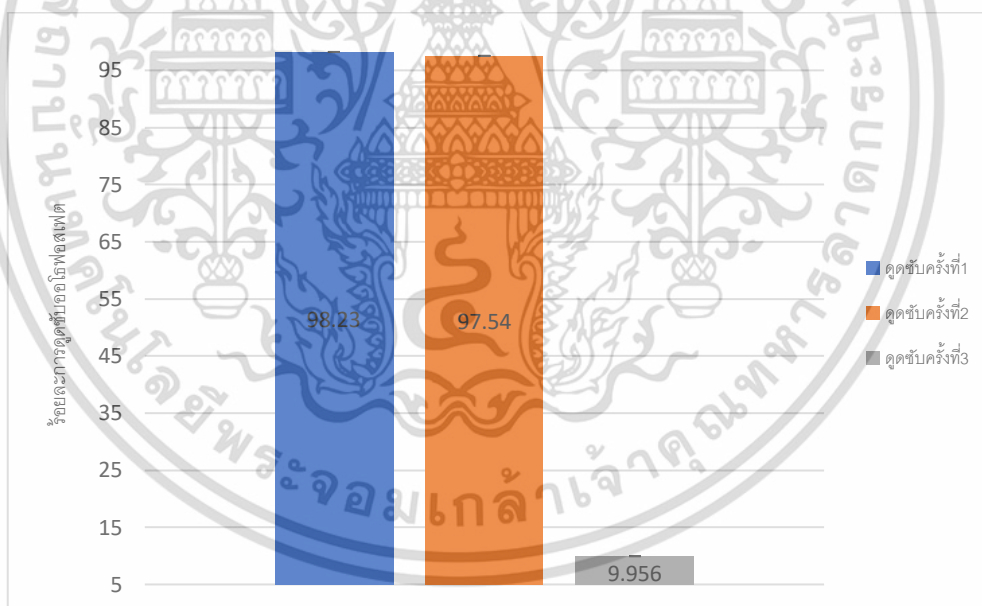
ทำการคายซับตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานจำนวน 1 กรัม ใส่ในน้ำกลั่นปริมาตร 200 เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปดูดซับฟอสเฟตความเข้มข้น ที่สภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาไว้ตอนต้น ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.6 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวสารที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 043-851-2000

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ศึกษาประสิทธิภาพในการนำมาใช้ซ้ำที่นำไปคายซึบกับน้ำกลั่นแล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที



รูปที่ 4.7 ศึกษาประสิทธิภาพในการนำมาใช้ซ้ำที่นำไปคายซึบกับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 mg/l แล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู 1 กรัม โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

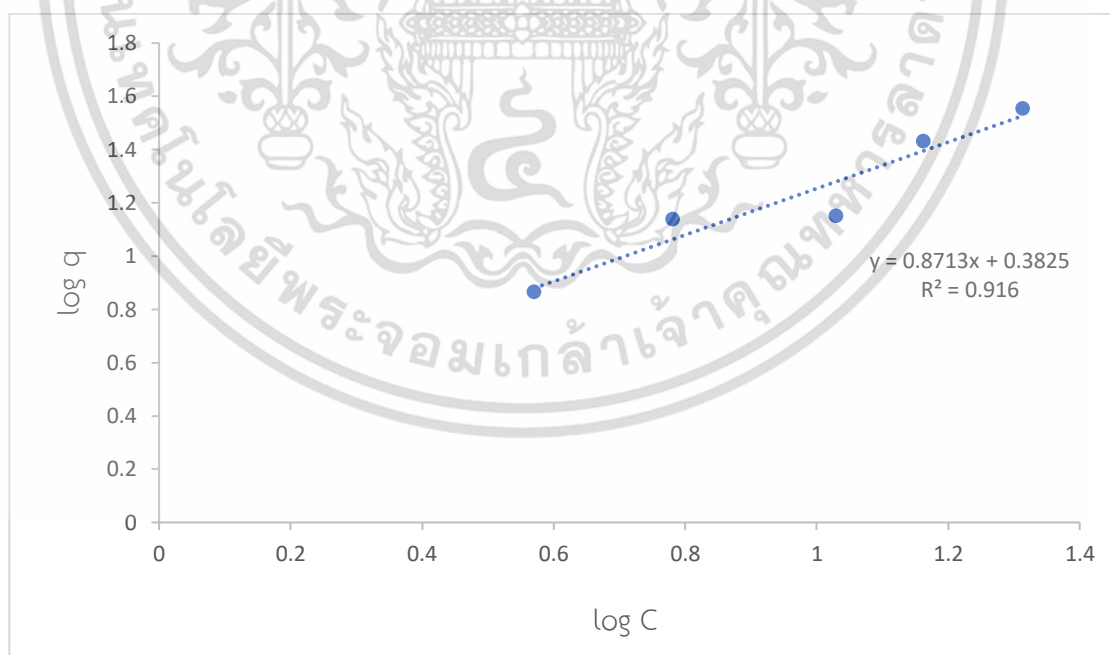
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการนำแคลเซียมออกไซด์มาดูดซับซ้ำและคายซับพบว่า การนำแคลเซียมออกไซด์มาดูดซับซ้ำและคายซับกับน้ำกลั่นสามารถดูดซับที่ pH 4 ได้เกิน 80 % 3 ครั้ง ส่วนการนำแคลเซียมออกไซด์มาดูดซับซ้ำและคายซับกับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 mg/l สามารถดูดซับซ้ำได้เกิน 80 % ได้เพียง 2 ครั้ง สรุปการนำมาใช้ซ้ำและคายซับกับน้ำกลั่น สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ 3 ครั้ง และการนำมาใช้ซ้ำและคายซับด้วยกรดไนตริก สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง แต่เนื่องจากตัวดูดซับมีขนาดเล็ก (100 mesh) ทำให้การนำกลับมาใช้ซ้ำทำได้ยาก จึงไม่เหมาะในการนำกลับมาใช้ซ้ำ (ดูรายละเอียดในตาราง ก.7-ก.8 ภาคผนวก ก )

#### 4.4 ผลของการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

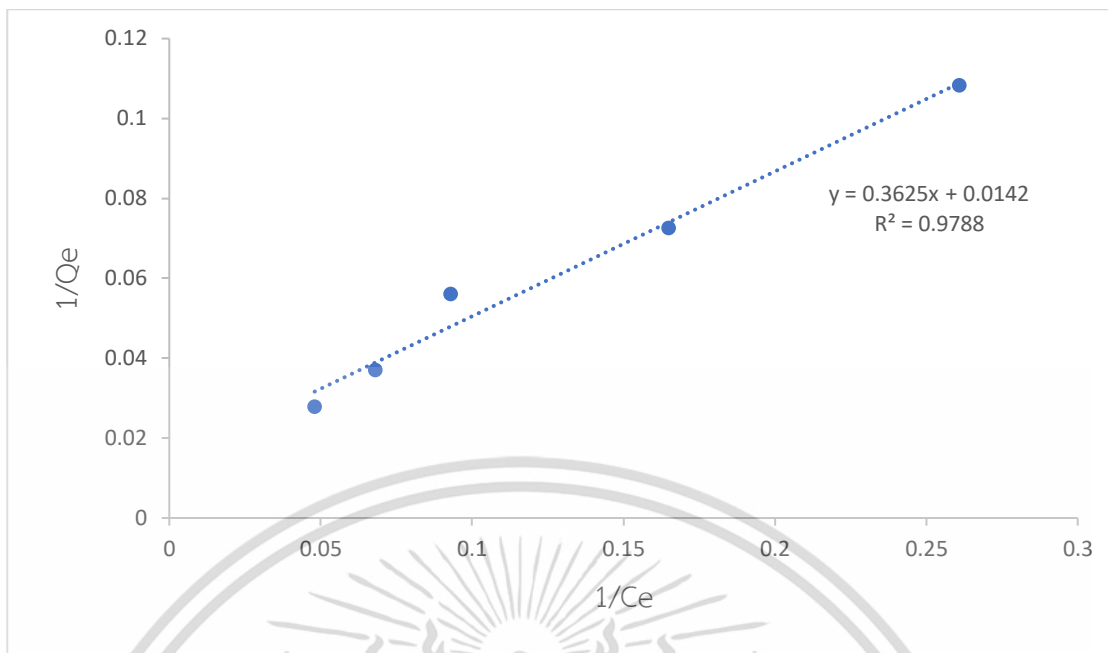
ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับออร์โธฟอสเฟต เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของออร์โธฟอสเฟตที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์กับความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับออร์โธฟอสเฟตของแคลเซียมออกไซด์โดยนำผลข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ตาม แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ของแคลเซียมออกไซด์ แสดงในรูป 4.8-4.9



รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดริช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอมการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์แบบแลงเมียร์

ตารางที่ 4.4 ไอโซเทอมการดูดซับของ (Langmuir) และ (Freundlich)

วัสดุดูดซับ	ไอโซเทอมแลงเมียร์			ไอโซเทอมฟรุนดิช		
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$	$K_F$ (mg/g)	$1/n$	$R^2$
แคลเซียมออกไซด์	2.7586	25.5281	0.9788	2.4126	0.8713	0.9160

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชและแบบแลงเมียร์ พบว่าการใช้แคลเซียมออกไซด์ในการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ เป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir) ซึ่งมีสมการเส้นตรง คือ  $y = 0.3625x + 0.0142$  มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9788 ดังแสดงในรูป 4.9 ในขณะที่สมการฟรุนดิช (Freundlich) มีค่าสมการเส้นตรง คือ  $y = 0.8713x + 0.3825$  มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9160 สรุปได้ว่าพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งจากข้อสรุปดังกล่าวอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีตัวดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียว บนพื้นผิวดูดซับ โดยโมเลกุลจะไม่เกิดการทับซ้อนกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับ ที่เตรียมจากเปลือกหอยแมลงภู โดยการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าตัวดูดซับเป็นแคลเซียมออกไซด์ ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต พบว่า ที่ pH 4-7 เป็นระดับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการใช้แคลเซียมออกไซด์ในการดูดซับ โดย pH 4 เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ และที่ปริมาณ 1 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดต่อการใช้ดูดซับ ระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 30 นาที การคายซับตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ซ้ำในน้ำกลั่น สามารถนำมาใช้ดูดซับซ้ำได้ 3 ครั้ง และการคายซับตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ซ้ำในกรดไนตริก สามารถนำมาใช้ดูดซับซ้ำได้ 2 ครั้ง

ในการประเมินรูปแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich) และแลงเมียร์ (Langmuir) พบว่าพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับของแลงเมียร์ โดยความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 2.76 มิลลิกรัมต่อกรัม และผลของไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับเพิ่มเติม เช่น การศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET), และอุณหภูมิในการดูดซับ
2. ควรศึกษาการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากหลายๆ แหล่ง และน้ำเสียจากโรงงานจริง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อ้างอิง

กรรณิการ์ สิริสิงห. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 3.

คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2544.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555

ยะโก๊ะ ขาเริ่มดาเบะ. การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยทักษิณ, 2533

ปภามณูชู้ และคณะ. การดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียม (2554)

เสาวภา ไวยสุศรี. การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (2558)

ธนบดี และคณะ. ประสิทธิภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียม (2562)

สุภกร และคณะ. ความยาวของเปลือกหอยแมลงภู่มี่ความสัมพันธ์กับการสะสมแคลเซียมออกไซด์ในเปลือกดังนั้นเปลือกหอยแมลงภู่มี่มีขนาดใหญ่และพื้นที่ผิวมากจึงมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าหอยที่มีขนาดเล็ก (2558)

ภาวิณี และคณะ. การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำทะเลโดยใช้เปลือกหอยแมลงภู่มี่ (2559)

จักรกฤษณ์ และคณะ. ศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา (2560)

พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัชชา ชัยชนะ. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (2557)

ภคพงษ์ ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นของเปลือกไข่และเปลือกหอย (2553)

กรุงเทพฯ, 2558 : [www.sutir.sut.ac.th](http://www.sutir.sut.ac.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อ้างอิง (ต่อ)

Christian, G.D. Analytical Chemistry. 6th ed. United States of America : John

Wiley&Sons,Inc., 2004.

Dhuha D. Salman, et.al. “Determination the Optimal Conditions of Methylene Blue

Adsorption by the Chicken Egg Shell Membrane” International Journal of

Poultry Science. 11(2012)

Elwakeel and Yousif. “Adsorption of Malathion on Thermally Treated Egg Shell Material” Fourteenth International Water Technology Conference, TWTC 14 (2010)

Nurul Aimi binti Rohaizar, et.al. “Removal of Cu(II) from Water by Adsorption on

Chicken Eggshell” international Journal of Engineering & Technology. 13 (2012)

Ramakrishnaiah C.R. and Vismitha. “Removal of Phosphate from Wastewater using Low-Cost Adsorbents” International Journal of Engineering Inventions. 1

(2012)

Sabir Hussain, et.al. “Othophosphate removal from domestic wastewater using limestone and granular activated carbon” Desalination. 271 (2011)

Ennil Kose, Betul Kivanc. “Adsorption of phosphate from aqueous solutions using calcined waste eggshell” Chemical Engineering Journal. 178 (2011)

Yanan Zhang, Yuanzhong Deng. Dietary zinc supplementation affects eggshell quality and ultrastructure in commercial laying ducks by influencing calcium metabolism (2022)

jibing Xiong “Phosphate removal from solution using powdered freshwater mussel shells” (2011)

R.Paradelo “Phosphorus removal from wastewater using mussel shell: Investigation on retention mechanisms” (2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการฟรีเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต ที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง			เฉลี่ย	SD
0	0	0	0	0	0
0.2	0.2125	0.2087	0.2098	0.2103	0.0019
0.4	0.3189	0.3076	0.3106	0.3123	0.0058
0.6	0.5034	0.4987	0.5021	0.5014	0.0024
0.8	0.5906	0.5895	0.5903	0.5905	0.0010
1.0	0.7139	0.7294	0.7235	0.7222	0.0078
2.0	1.4266	1.4368	1.4397	1.4343	0.0068

ตารางที่ ก.2 การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีการวิเคราะห์

การทำซ้ำ	ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg/l)		
	0.2	0.4	0.6
1	0.2106	0.4507	0.6556
2	0.2086	0.4405	0.6484
3	0.2241	0.4486	0.6582
X	0.2144	0.4466	0.6540
SD	0.0084	0.0053	0.0071
%RSD	3.9179	1.1814	0.7800
%Recovery	107.2	111.65	109.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ที่ใช้ดูดซับด้วย แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

pH เริ่มต้นของสารละลาย	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยที่ pH ต่างๆ			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	26.42	39.05	35.91	33.79 $\pm$ 6.5
4.69	27.05	36.42	34.56	32.64 $\pm$ 4.96
7	18.88	14.29	25.22	19.46 $\pm$ 5.4
10	5.81	7.26	6.62	6.56 $\pm$ 0.72

ตารางที่ ก.4 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ที่ใช้ดูดซับด้วย แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

pH เริ่มต้นของสารละลาย	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยที่ pH ต่างๆ			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	99.61	99.91	99.94	99.83 $\pm$ 0.19
4.69	99.74	99.60	99.84	99.72 $\pm$ 0.12
7	99.83	99.76	99.71	99.76 $\pm$ 0.06
10	99.39	98.63	98.58	98.86 $\pm$ 0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองแสดงร้อยละการดูดซับออร์โทสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยในปริมาณต่างๆ

เวลาการดูดซับ (นาที)	ร้อยละการดูดซับออร์โทสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยใน ปริมาณต่างๆ(mg/l)											
	0.05 g			0.01 g			0.05 g			1 g		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
10	69.24	71.23	73.03	91.20	91.45	90.76	91.39	93.34	91.23	94.34	93.52	94.86
20	75.87	76.56	78.48	92.33	93.45	92.76	92.78	93.46	93.12	97.14	97.78	96.54
30	77.86	78.34	78.56	94.56	93.89	94.57	96.25	95.23	95.02	99.08	98.96	99.03

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองแสดงร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยแคลเซียมออกไซด์ในระยะเวลาต่างๆ จากเปลือกหอยในปริมาณ 1 กรัม

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยในระยะเวลาต่างๆ ที่ปริมาณ 1 g			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	94.34	93.52	94.86	94.24 $\pm$ 0.6755
20	97.14	97.78	96.54	97.15 $\pm$ 0.6201
30	99.08	98.96	99.03	99.02 $\pm$ 0.0620

ตารางที่ ก.7 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4 ที่นำไปคายซึบกับน้ำกลั่นแล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู 1 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

จำนวนครั้งที่ นำไปดูดซับซ้ำ	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4 ที่นำไปคายซึบกับน้ำกลั่นแล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอย			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	98.43	99.48	99.23	99.05 $\pm$ 0.006
2	89.64	90.96	83.75	88.12 $\pm$ 0.004
3	86.74	84.15	83.81	84.91 $\pm$ 0.017
4	49.67	51.62	66.64	56.15 $\pm$ 0.096
5	4.54	14.73	17.29	12.19 $\pm$ 0.083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

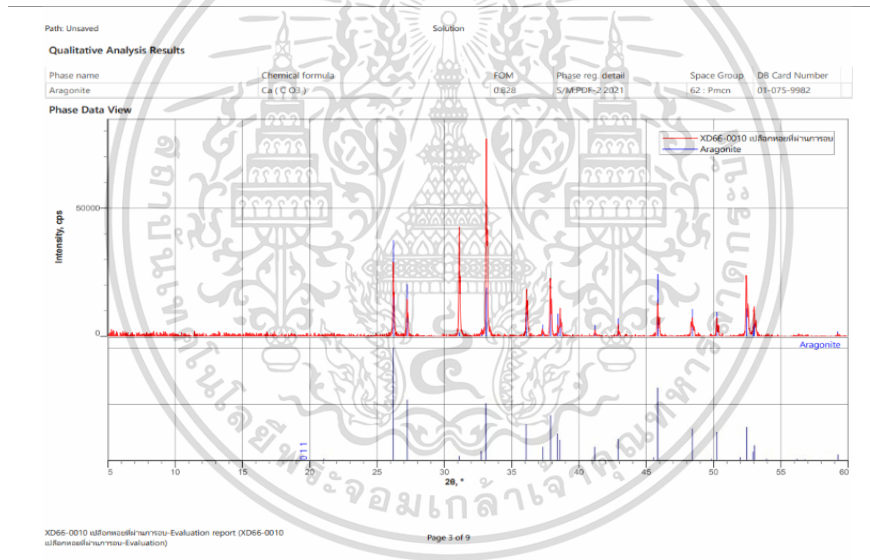
ตารางที่ ก.8 ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4 ที่นำไปคายซับกับกรดไนตริกแล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่ 1 g โดยใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที

จำนวนครั้งที่นำไปดูดซับซ้ำ	ร้อยละการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ pH 4.69 ที่นำไปคายซับกับน้ำกลั่นแล้วนำมาดูดซับซ้ำด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอย			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	98.84	98.82	98.53	98.72 $\pm$ 0.002
2	98.61	98.45	98.53	98.53 $\pm$ 0.001
3	6.37	11.17	12.18	9.91 $\pm$ 0.040

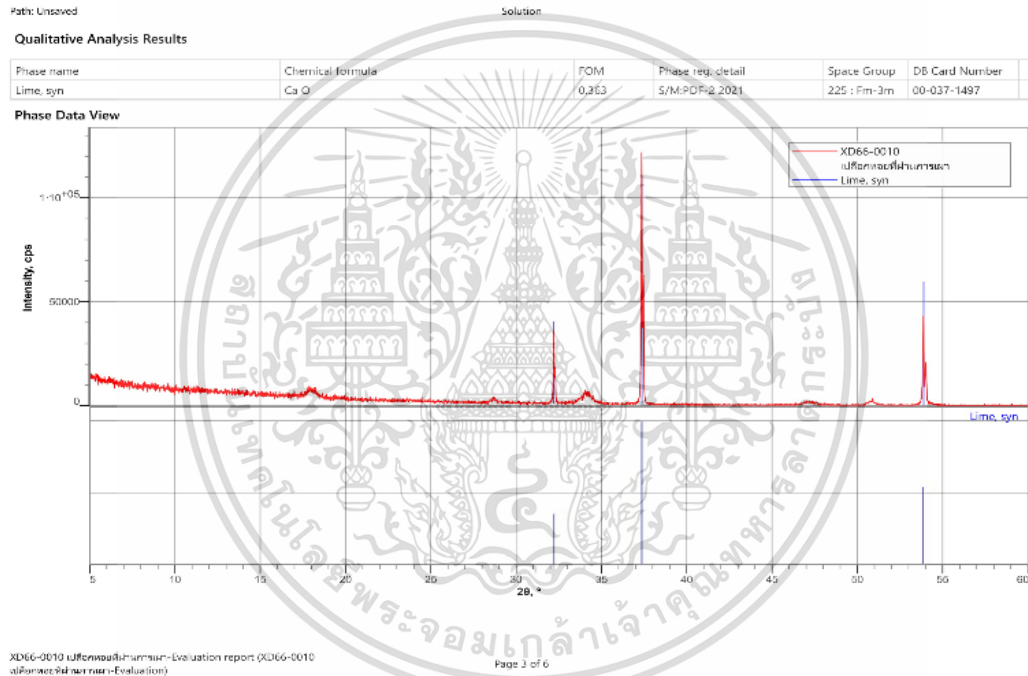
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD



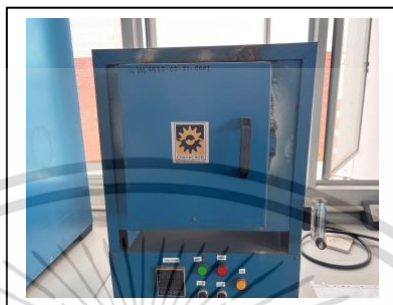
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเคลือบฟันนาโนด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD

## ภาคผนวก ค

### เครื่องมือและอุปกรณ์



รูป ค-1 เต้าเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง



รูป ค-2 เต้าอบ



รูป ค-3 เครื่องกวนผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ค-4 ชุดเครื่องกรองลดความดัน



รูป ค-5 เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสเปิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การทดสอบทางสถิติ

ตารางที่ ง-1. ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

Amount of CaO (g/l)	N	Mean	Grouping
1.00	3	99.20	A
0.50	3	93.20	B
0.10	3	92.76	B
0.05	3	75.46	C

ตั้งสมมติฐาน

$H_0$  : ค่าของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ไม่แตกต่างกันในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

$H_1$  : ค่าของปริมาณแคลเซียมออกไซด์แตกต่างกันในการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

ระดับนัยสำคัญ : 0.05

P-value: 0.000

การตัดสินใจ เนื่องจาก P-value <  $\alpha$  นั่นคือ 0.000 < 0.05 ดังนั้น ปฏิเสธ  $H_0$  ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ มีอิทธิพลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟต ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2. ผลของเวลาที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

Time (min)	N	Mean	Grouping
10	3	99.02	A
20	3	97.15	B
30	3	94.24	C

ตั้งสมมติฐาน

$H_0$ : ระยะเวลาในการปั่นกวนไม่มีผลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

$H_1$ : ระยะเวลาในการปั่นกวนมีผลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับนัยสำคัญ : 0.05

P-value: 0.000

การตัดสินใจ เนื่องจาก P-value <  $\alpha$  นั่นคือ 0.000 < 0.05 ดังนั้น ปฏิเสธ  $H_0$  ระยะเวลาในการปั่นกวนมีผลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ง-3. ผลต่างของ pH ที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

pH	N	Mean	Grouping
4.00	3	99.83	A
4.69	3	99.76	A
7.00	3	99.76	A

ตั้งสมมติฐาน

$H_0$  : ความเป็นกรด-ด่างไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

$H_1$  : ความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับนัยสำคัญ : 0.05

P-value: 0.635

การตัดสินใจ เนื่องจาก P-value >  $\alpha$  นั่นคือ 0.635 > 0.05 ดังนั้น ยอมรับ  $H_0$  ความเป็นกรด-ด่างไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-4. ผลต่างของ pH ที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับออร์โธฟอสเฟต

pH	N	Mean	Grouping
4.00	3	99.83	A
4.69	3	99.76	A
7.00	3	99.76	A
10.00	3	98.86	B

ตั้งสมมติฐาน

$H_0$  : ความเป็นกรด-ด่างไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

$H_1$  : ความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับนัยสำคัญ : 0.05

P-value: 0.005

การตัดสินใจ เนื่องจาก P-value <  $\alpha$  นั่นคือ  $0.005 < 0.05$  ดังนั้น ปฏิเสธ  $H_0$  ความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อการดูดซับออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 24 เดือน พฤษภาคม พ.ศ 2565

ข้าพเจ้า นางสาว นภัสสรณ์ จันทร์เทศ รหัสประจำตัว 62050400

นางสาว ปฐมวรรณ ประลองกิจ รหัสประจำตัว 62050406

นาย สมจิตร โสโพธิ์ รหัสประจำตัว 62050455

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแมลงภู่

ชื่อภาษาอังกฤษ ADSORPTION OF PHOSPHATE IN SYNTHETIC WASTEWATER BY CALCIUM OXIDE FROM MUSSEL SHELLS

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษราวินูตี.....25.22.....% หรือโปรแกรม Turnitin.....%

ลงชื่อ..... นภัสสรณ์ จันทร์เทศ

ลงชื่อ..... ปฐมวรรณ ประลองกิจ

ลงชื่อ..... สมจิตร โสโพธิ์

(นางสาว นภัสสรณ์ จันทร์เทศ)

(นางสาว ปฐมวรรณ ประลองกิจ)

( นาย สมจิตร โสโพธิ์ )

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ศ. / รศ. / ผศ. / ดร. / อ.....ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาของเอกสารนี้ส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงชื่อ.....

อาจารย์ที่ปรึกษา