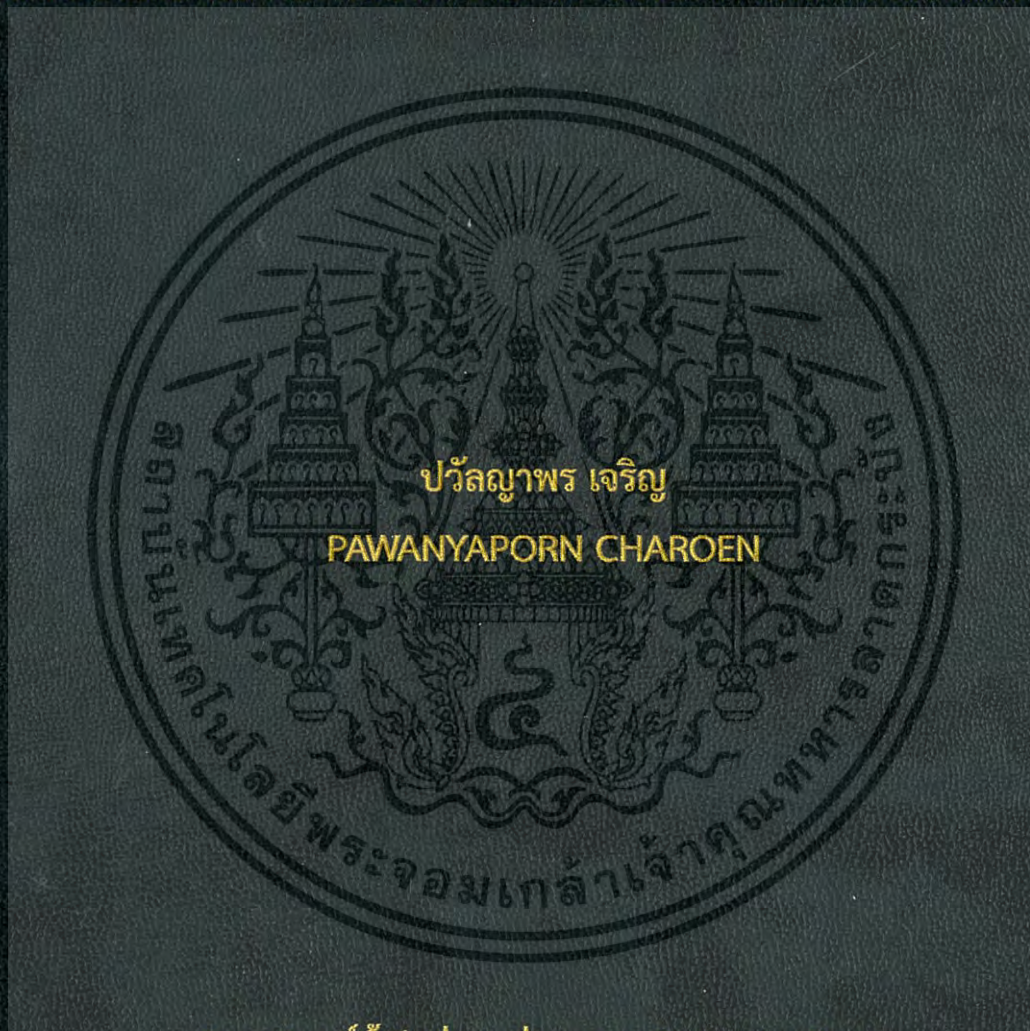


การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่สำหรับใช้กำจัด
ตะกั่วในน้ำเสีย

SYNTHESIS OF TRICALCIUM PHOSPHATE FROM GOLDEN APPLE
SNAIL SHELLS FOR REMOVAL OF LEAD FROM WASTEWATER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-016-009

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่สำหรับใช้กำจัด
ตะกั่วในน้ำเสีย

SYNTHESIS OF TRICALCIUM PHOSPHATE FROM GOLDEN APPLE
SNAIL SHELLS FOR REMOVAL OF LEAD FROM WASTEWATER



T144000



ปวีลญาพร เจริญ
PAWANYAPORN CHAROEN

เลขหมู่..... 144000
เลขทะเบียน..... ศ.ย. ๒๒๓
ใน.เดือน.ปี..... พ.ศ. ๒๕๖๑

b. 00 267037
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-016-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF TRICALCIUM PHOSPHATE FROM GOLDEN APPLE
SNAIL SHELLS FOR REMOVAL OF LEAD FROM WASTEWATER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

KMITL-2016-SC-M-016-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

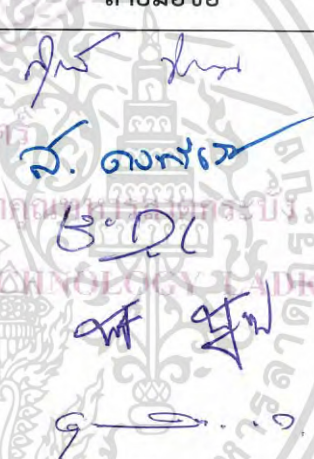
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่สำหรับใช้กำจัดตะกั่วในน้ำเสีย”
(SYNTHESIS OF TRICALCIUM PHOSPHATE FROM GOLDEN APPLE SNAIL SHELLS FOR REMOVAL LEAD FROM WASTEWATER)

ชื่อนักศึกษา นางสาวปวีลญาพร เจริญ
รหัสประจำตัว 55651302
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรจง บุญชม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ ผศ.ดร.บรรจง บุญชม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 17 พฤษภาคม พ.ศ.2559 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาเคมี อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัย ชั้น 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คชณิ ชนะบริพัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 28 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอริ
สำหรับกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

ชื่อนักศึกษา

ปวีลญาพร เจริญ

รหัสประจำตัว

55651302

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชา

เคมีสิ่งแวดล้อม

พ.ศ.

2559

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ.ดร.บรรจง บุญชม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้ไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอริกับสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (MCPM) และไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (DCPA) จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพบว่า เปลือกหอยเชอริมีแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างผลึกแบบ aragonite phase เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อนำเปลือกหอยเชอริมาทำปฏิกิริยากับ MCPM และ DCPA พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET) พบว่า TCP-M มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเท่ากับ $8.098 \text{ m}^2/\text{g}$ และ 110.9 \AA ในขณะที่ TCP-D มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเท่ากับ $9.631 \text{ m}^2/\text{g}$ และ 153.7 \AA ตามลำดับ จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายตะกั่วเข้มข้น 50 mg/L พบว่า TCP-M และ TCP-D สามารถกำจัดตะกั่วให้มีความเข้มข้นเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดภายในเวลาน้อยกว่า 10 นาที เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 2 และปริมาณของ TCP-M และ TCP-D ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2.0 g/L และ 1.5 g/L ตามลำดับ ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของ TCP-M สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยมีความจุในการดูดซับที่คำนวณได้เท่ากับ 74.04 mg/g ขณะที่ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของ TCP-D สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบฟรุนดริช โดยมีความจุในการดูดซับที่คำนวณได้เท่ากับ 54.08 mg/g TCP-M และ TCP-D ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่รวบรวมได้จากกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ น้ำเสียที่ใช้ทดสอบมีความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 10.91 mg/L ปริมาณ TCP-M และ TCP-D ที่ใช้ในการทดสอบคำนวณจากไอโซเทอมที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าเท่ากับ 2.20 และ 1.82 mg/L ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วสำหรับ TCP-M และ TCP-D มีค่า 79.86% และ 83.46% ตามลำดับ

คำสำคัญ : แคลเซียมฟอสเฟต ไตรแคลเซียมฟอสเฟต หอยเชอริ เปลือกหอย ตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานวิจัยนี้ การนำเอกสารไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ถือว่าผิดกฎหมาย ห้ามนำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of tricalcium phosphate from golden apple snail shell for removal of lead in wastewater
Student Name	Pawanyaporn Charoen
Student ID	55651302
Degree	Master of Science
Department	Environmental Chemistry
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr.Usarat Thawornchaisit
Thesis Co-advisor	Asst. Prof. Dr.Banjong Boonchom

ABSTRACT

The aim of this research was to study the removal of lead from industrial wastewater using tricalcium phosphate that was synthesized from reaction between golden apple snail shell and two different calcium phosphate compounds including Monocalcium Phosphate Monohydrate (MCPM) and Dicalcium Phosphate Anhydrous (DCPA). Physical and chemical characterization of the golden apple snail shell showed that the golden apple snail shell consists of calcium carbonate in aragonite phase. Reaction between golden apple snail shell with either MCPM or DCPA yields tricalcium phosphate which is defined in this study TCP-M and TCP-D, respectively. Analysis of specific surface by BET method revealed that TCP-M has specific surface area and pore size of 8.098 m²/g and 110.9 Å while TCP-D has specific surface area and pore size of 9.631 m²/g and 153.7 Å. Results from removal of lead from aqueous solutions showed that TCP-M and TCP-D reduced initial aqueous Pb concentration from 50 mg/L to level that meets the effluent standard within less than 10 min, when solution pH was 2, TCP-M and TCP-D was at 2.0 g/L and 1.5 g/L, respectively. The adsorption of Pb by TCP-M was best described by Langmuir isotherm with the adsorption capacity of 74.04 mg/g while adsorption of Pb by TCP-D was best described by Freundlich isotherm with the adsorption capacity of 54.04 mg/g. TCP-M and TCP-D was applied to treat industrial wastewater that obtained from battery manufacturing process containing 10.91 mg/L of lead. Quantity of TCP-M and TCP-D calculated from best described sorption isotherm. Result showed that level of lead in the effluent was 2.20 and 1.82 mg/L, respectively. Efficiency of lead removal was 79.86% and 83.46% for TCP-M and TCP-D, respectively.

Keywords : calcium phosphate, tricalcium phosphate, golden apple snail, snail shell, lead

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำ ตรวจสอบชี้แนะข้อบกพร่องอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด พร้อมทั้งขัดเกลาวิทยานิพนธ์และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ออกมาสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.บรรจง บุญชม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบชี้แนะข้อบกพร่องอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยตรวจสอบ ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนเสนอแนะแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชโล จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บุคคลากร เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้การช่วยเหลือ จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จรุดไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณโรงงานผลิตแบตเตอรี่ จังหวัดสมุทรปราการ ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พร้อมทั้งอาจารย์ทั้งในอดีตและปัจจุบันทุกท่าน ตลอดจนเพื่อนสนิทและพี่น้อง ที่คอยเป็นที่ปรึกษาและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนสำเร็จการศึกษา

นางสาวปวีลญาพร เจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ช
บทที่ 1. บทนำ.....	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	
2.1 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	3
2.2 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	4
2.2.1 โครงสร้างของไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	4
2.2.2 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	7
2.2.2.1 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง.....	7
2.2.2.2 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีแบบเปียก.....	7
2.2.2.3 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	8
2.3 การกำจัดโลหะหนักด้วยสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	8
2.3.1 การกำจัดโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์อะพาไทต์.....	9
2.3.2 การกำจัดโลหะหนักด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	10
2.4 ตะกั่วและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.4.1 ตะกั่ว.....	10
2.4.2 อุตสาหกรรมตะกั่ว.....	11
2.4.3 อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่.....	12
2.4.3.1 กระบวนการผลิตเนื้อแผ่นธาตุ.....	13
2.4.3.2 กระบวนการผลิตแผ่นธาตุ.....	13
2.4.3.3 การประกอบแบตเตอรี่.....	14
2.4.3.4 ส่วนชาร์จไฟแบตเตอรี่.....	14
2.4.4 คุณสมบัติของน้ำเสียและของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียและกากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่.....	15
2.5.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี.....	15
2.5.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน.....	15
2.5.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ.....	16
2.5.3.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับใน กระบวนการดูดซับ.....	16
2.5.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ.....	17
2.5.3.3 แรย์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล.....	17
2.5.3.4 ไอโซเทอมการดูดซับ.....	18
2.6 หอยเชอร์รี่.....	20
2.6.1 องค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่.....	21
2.6.2 โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	22
2.6.2.1 แคลไซต์.....	22
2.6.2.2 อะราโกไนท์.....	22
2.6.2.2 วาเทอร์ไรท์.....	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3. วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	29
3.1.1 สารเคมี.....	29
3.1.2 อุปกรณ์.....	29
3.2 การเตรียมเปลือกหอยเชอร์รี่.....	29
3.3 การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	30
3.3.1 การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตโดยการทำปฏิกิริยา ระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮดรอกไซด์กับเปลือกหอยเชอร์รี่.....	30
3.3.2 การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตโดยการทำปฏิกิริยา ระหว่างไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮดรอกไซด์กับเปลือกหอยเชอร์รี่.....	30
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	31
3.5 ศึกษาการใช้ประโยชน์จากไตรแคลเซียมฟอสเฟตในการกำจัดโลหะตะกั่ว.....	31
3.5.1 การเตรียมสตั๊กสารละลายตะกั่ว.....	31
3.5.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลในการกำจัดตะกั่ว.....	31
3.5.2.1 ผลของพีเอชของสารละลายโลหะที่ใช้ในการศึกษา.....	31
3.5.2.2 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสม.....	32
3.5.2.3 ผลของปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ศึกษาคุณลักษณะทางกายและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	32
3.6.1 ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	33
บทที่ 4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	34
4.1.1 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต.....	35
4.1.1.1 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่.....	35
4.1.1.2 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต-โมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, MCPM).....	36
4.1.1.3 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไดแคลเซียมฟอสเฟต-ไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, DCPD).....	37
4.1.1.4 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	38
4.1.2 โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	38
4.1.2.1 โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเชอร์รี่.....	38
4.1.2.2 โครงสร้างผลึกของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, MCPM).....	39
4.1.2.3 โครงสร้างผลึกของไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, DCPD).....	40
4.1.2.4 โครงสร้างผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, TCP).....	41
4.1.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต.....	44
4.1.4 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกหอยเชอร์รี่.....	45
4.1.5 พื้นที่ผิวของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	45
4.2 การใช้ประโยชน์จากไตรแคลเซียมฟอสเฟตในการกำจัดสารละลายตะกั่ว (Pb).....	47
4.2.1 ผลของพีเอช.....	47
4.2.1.1 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ที่พีเอชต่างๆ.....	47
4.2.1.2 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ที่พีเอชต่างๆ.....	48
4.2.2 ผลของระยะเวลาต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่ว.....	49
4.2.3 ผลของปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่ว.....	51
4.2.3.1 ผลของปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่ว.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3.2 ผลของปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่ว.....	52
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่ว.....	53
4.3.1 ไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M).....	53
4.3.2 ไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	54
4.4 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม....	55
4.4.1 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต...	56
4.5 คุณสมบัติของไตรแคลเซียมฟอสเฟตภายหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม....	56
4.5.1 โครงสร้างทางเคมีของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$).....	56
4.5.2 โครงสร้างทางเคมีของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$).....	57
4.5.3 คุณสมบัติการละลายเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M).....	58
4.5.4 คุณสมบัติการละลายเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	59
4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	73
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์.....	79
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง.....	81
ภาคผนวก ง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาไอโซเทอมการกำจัดตะกั่ว.....	97
ภาคผนวก จ วิธีการหาขีดจำกัดของการวิเคราะห์.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปต่างๆ.....	3
2.2 สมบัติทางกายภาพของไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	6
2.3 ปริมาณร้อยละ CaCO_3 ในเปลือกหอยเชอรี่.....	22
3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่ที่ทำการวิเคราะห์.....	30
3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	31
3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	32
4.1 ธาตุและสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกหอยเชอรี่.....	35
4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	45
4.3 ค่าคงที่ไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	53
4.4 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	56
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	61
4.6 ค่าใช้จ่ายของสารเคมีและค่าไฟฟ้าสำหรับการสังเคราะห์ TCP-M และ TCP-D.....	62
ก-1 การคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	77
ค-1 ร้อยละของผลผลิต MCPM ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70%.....	81
ค-2 ร้อยละของผลผลิต DCPD ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50%.....	82
ค-3 ร้อยละของผลผลิต TCP-M ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และ MCPM.....	83
ค-4 ร้อยละของผลผลิต TCP-D ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และ DCPA.....	84
ค-5 ตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่ (2 Theta degree).....	85
ค-6 ตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮดรอกไซด์และไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	86
ค-7 ตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	87
ค-8 ตำแหน่งที่พีคหลักปรากฏของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) หลังการกำจัดตะกั่ว (2 Theta degree).....	88
ค-9 ตำแหน่งที่พีคหลักปรากฏของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) หลังการกำจัดตะกั่ว (2 Theta degree).....	89
ค-10 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ที่ pH ต่างๆ.....	90
ค-11 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ที่ pH ต่างๆ.....	91
ค-12 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ที่เวลา	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ค-13 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ที่เวลา ต่างๆ.....	93
ค-14 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ปริมาณต่างๆ.....	94
ค-15 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ปริมาณต่างๆ.....	95
ค-16 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากไอ โซเทอมในหัวข้อ 4.4.1-4.4.2.....	96
ง-1 ผลการศึกษาไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M).....	97
ง-2 ผลการศึกษาไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)	98
จ-1 แสดงความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนในการหาซีตจำกัดของการวิเคราะห์.....	100



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่างๆ.....	4
2.2 โครงสร้างผลึกแบบ (ก) rhombohedral และ (ข) monoclinic.....	5
2.3 โครงสร้างผลึกของ (ก) แอลฟา-ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและ (ข) เบต้า-ไตรแคลเซียม ฟอสเฟต.....	6
2.4 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่รถยนต์.....	12
2.5 กระบวนการผลิตแบตเตอรี่.....	13
2.6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับไปยังวัสดุดูดซับ.....	17
2.7 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับ.....	18
2.8 ไอโซเทอมการดูดซับเชิงเส้นของแสงเมียร์.....	19
2.9 ไอโซเทอมการดูดซับเชิงเส้นของฟรุนดิช.....	20
2.10 หอยเชอร์รี่.....	21
4.1 เปลือกหอยเชอร์รี่บดละเอียดขนาด 100 เมช.....	34
4.2 สเปกตรัม FTIR ของเปลือกหอยเชอร์รี่.....	36
4.3 สเปกตรัม FTIR ของ (ก) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (CaH_2PO_4) $_2$ ·H ₂ O และ (ข) ไดแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4).....	37
4.4 สเปกตรัม FTIR ของ (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และ (ข) ไตรแคลเซียม ฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	38
4.5 กราฟแสดงองค์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของ (ก) เปลือกหอยเชอร์รี่ และแคลเซียมคาร์บอเนต 3 รูปแบบได้แก่ (ข) Aragonite, (ค) Vaterite และ (ง) Calcite.....	39
4.6 กราฟแสดงองค์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของ (ก) โมโนแคลเซียม ฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยเชอร์รี่ และ (ข) สารมาตรฐานโมโน แคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต.....	40
4.7 กราฟแสดงองค์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของ (ก) ไดแคลเซียม ฟอสเฟตไดไฮเดรตที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยเชอร์รี่, (ข) สารมาตรฐานไดแคลเซียม ฟอสเฟตแอนไฮดรัส (DCPA) และ (ค) สารมาตรฐานไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD).....	41
4.8 กราฟแสดงองค์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของ (ก) ไตรแคลเซียม ฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M), (ข) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D), (ค) สารมาตรฐานเบต้า ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) และ (ง) สารมาตรฐานแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -TCP).....	42
4.9 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกหอยเชอร์รี่.....	44
4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (ก) เปลือกหอยเชอร์รี่ ที่ กำลังขยาย 8000 เท่า, (ข) MCPM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า, (ค) DCPD ที่กำลังขยาย 8000 เท่า, (ง) TCP-M ที่กำลังขยาย 10000 เท่า, (จ) และ TCP-D ที่กำลังขยาย 8000 เท่า.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 (ก) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว และ (ข) ร้อยละการกำจัดตะกั่วในชุดทดลองที่เติม TCP-M (■, ●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-M (□, ○) ที่พีเอชต่างๆ.....	47
4.12 (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่ว และ (ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่วในชุดทดลองที่เติม TCP-D (■, ●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-D (□, ○) ที่พีเอชต่างๆ.....	48
4.13 (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-M และ (ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว ในชุดทดลองที่เติม TCP-M (●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-M (○) ที่เวลาต่างๆ.....	49
4.14 (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-D และ (ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว ในชุดทดลองที่เติม TCP-D (●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-D (○) ที่เวลาต่างๆ.....	50
4.15 (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่วและ (ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว ในชุดทดลองที่เติม TCP-M (■, ●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-M (□, ○).....	51
4.16 (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่วและ (ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่วในชุดทดลองที่เติม TCP-D (■, ●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-D (□, ○).....	52
4.17 (ก) ไอโซเทอมแลงมัวร์และ (ข) ไอโซเทอมฟรุนดริชในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M).....	54
4.18 (ก) ไอโซเทอมแลงมัวร์ และ (ข) ไอโซเทอมฟรุนดริชในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D).....	55
4.19 (ก) สเปกตราโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ก่อนและหลัง (ข) การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	57
4.20 (ก) สเปกตราโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ก่อนและ (ข) หลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	58
4.21 (ก) กราฟแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ก่อนและ (ข) หลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม, (ค) สารมาตรฐานเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตหมายเลข PDF#702065, (ง) สารมาตรฐานเลดไฮโดรเจนฟอสเฟตหมายเลข PDF#750757, (จ) สารมาตรฐานเลดไฮโดรเจนฟอสเฟตหมายเลข PDF#810466 และ (ฉ) สารมาตรฐานเลดฟอสเฟตไฮดรอกไซด์หมายเลข PDF#872477.....	59
4.22 (ก) โครงสร้างควมกว้างระนาบผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ก่อนและ (ข) หลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	60

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
MCPM	โมนแคลเซียมฟอสเฟตโมนไฮเดรท (Monocalcium phosphate monohydrate)
MCPA or MCP	โมนแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (Monocalcium phosphate anhydrous)
DCPD	ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรท (Dicalcium phosphate dihydrate)
DCPA or DCP	ไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (Dicalcium phosphate anhydrous)
OCP	ออกตะแคลเซียมฟอสเฟต (Octacalcium Phosphate)
α -TCP	แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -Tricalcium phosphate)
β -TCP	เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -Tricalcium phosphate)
ACP	อะมอร์ฟัสแคลเซียมฟอสเฟต (Amorphous calcium phosphates)
CDHA	แคลเซียมดิฟิเซียนไฮดรอกซีอะพาไทป์ (Calcium deficient hydroxyapatite)
HA or HAp	ไฮดรอกซีอะพาไทป์ (Hydroxyapatite)
FA or FAp	ฟลูออระพาไทป์ (Fluorapatite)
OA or OAp	ไฮดรอกซีอะพาไทป์ (Oxyapatite)
TTCP	เตตระแคลเซียมฟอสเฟต (Tetracalcium phosphate)
CaCO ₃	แคลเซียมคาร์บอเนต
TCP-M	ไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง MCPM และ CaCO ₃
TCP-D	ไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง DCPD และ CaCO ₃
m ² /g	ตารางเมตรต่อกรัม
q _m	ค่าที่แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer)
K	ค่าคงที่พลังงานในการดูดซับ
R ²	ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared)
1/n	ความหนาแน่นของการดูดซับ
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/g.min	มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที
q	ค่าความจุในการดูดซับ
C _e	ปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลาย
Å	องศาอังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ภูจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมขนาดใหญ่หลายประเภทมีการใช้โลหะหนักจำนวนมากในกระบวนการผลิต ซึ่งโลหะหนักที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมชนิดหนึ่งก็คือโลหะตะกั่ว (Pb) เนื่องจากเป็นโลหะค่อนข้างอ่อน สามารถแปรรูปได้ง่าย และ ทนทานต่อการผุกร่อน การใช้ประโยชน์ของตะกั่วสามารถพบได้ตามอุตสาหกรรมดังต่อไปนี้ คือ อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมผลิตสี อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมน้ำมันหล่อลื่นและอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น ทำให้พบการปนเปื้อนของตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมข้างต้น แต่พิษของโลหะตะกั่ว นั้นร้ายแรง เมื่อได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะมีผลทำให้ระบบการทำงานของอวัยวะต่างๆผิดปกติและเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ (สังข์, 2540) ด้วยเหตุนี้ การบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องดำเนินการ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของสิ่งแวดล้อม

กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่นิยมใช้ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กระบวนการดูดซับ (Adsorption) การออสโมซิสแบบย้อนกลับ (Reverse Osmosis) และการกรองด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมากหรือมีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้การพัฒนาวัสดุธรรมชาติเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารเคมี ยกตัวอย่างเช่น การบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสม (อนิสาและคณะ, 2555) แต่ข้อจำกัดของการใช้เปลือกหอยในการกำจัดโลหะหนักคือใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และต้องใช้ปริมาณวัสดุจำนวนมากในการกำจัดโลหะหนักจึงจะมีประสิทธิภาพสูงตามต้องการ การศึกษาของ Lee *et al.* (2005) พบว่าการเตรียมเปลือกหอยนางรมให้อยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตสามารถกำจัดโลหะในสารละลายได้ และมีร้อยละการกำจัดสูงถึง 90% โดยใช้ปริมาณแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ 1 กรัมต่อลิตร (Lee *et al.*, 2005) ประกอบกับเปลือกหอยเชอร์รี่มีปริมาณเหลือทิ้งจำนวนมากอันเนื่องมาจากวิธีการกำจัดหอยเชอร์รี่ ซึ่งเป็นศัตรูพืชในนาข้าวด้วยการนำมารับประทานหรือนำมาทำน้ำหมักชีวภาพ อีกทั้งการนำมาสังเคราะห์เป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเพื่อใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอร์รี่ พร้อมกับศึกษาความเป็นไปได้ของการนำสารประกอบดังกล่าวมาใช้ในการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอร์รี่
2. ศึกษาการใช้ประโยชน์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ ในการบำบัดตะกั่วในน้ำเสีย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างเปลือกหอยเชอร์รี่จากหมู่บ้านคำไฮ ตำบลผาสุก อำเภอวังสามหมอ จังหวัดอุดรธานี ทำความสะอาดและกำจัดอินทรีย์วัตถุด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ จากนั้นเตรียมตัวอย่างเปลือกหอยเชอร์รี่ให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 100 เมช

2. สมบัติของเปลือกหอยเชอร์รี่ที่ทำการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด, สัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอร์รี่, หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบ, คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, คุณสมบัติทางความร้อนและพื้นที่ผิวจำเพาะ

3. สังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ด้วยวิธีการสังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิสูง (Thermal synthesis) อ้างอิงสถานะตาม Boonchom (2009), บรรจง และ นราธิป (2552) และ Alqap and Sopyan (2009) ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) โดยศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบ, คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ

4. ศึกษาการใช้ประโยชน์จากไตรแคลเซียมฟอสเฟตในการกำจัดสารละลายตะกั่ว (Pb) และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยปัจจัยที่ศึกษามีดังต่อไปนี้

- ค่าพีเอช แปรค่าที่ 2, 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ
- ระยะเวลาสัมผัส แปรค่าที่ 1, 3, 5, 7, 10 นาที และ 24 ชั่วโมง
- ปริมาณของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต แปรค่าที่ 0.02, 0.05, 0.1, 0.15 และ 0.2 g

5. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตต่อระยะเวลาสัมผัส

6. ทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยเชอร์รี่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอร์รี่ได้
2. สามารถใช้สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอร์รี่ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย
3. ลดปริมาณขยะในท้องถิ่นและเพิ่มมูลค่าให้แก่เปลือกหอยเชอร์รี่ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต คือ สารประกอบหรือสินแร่ที่ประกอบไปด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และอนุมูลของฟอสเฟตที่สำคัญ ได้แก่ ออโรฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) หรือไพโรฟอสเฟต ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไอออนต่าง ๆ นี้สามารถก่อตัวขึ้นเป็นสารประกอบหรือสินแร่ที่มีโครงสร้างที่หลากหลาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ

Ca/P molar ratio	Compound	Formula	Solubility	Solubility	pH
			at 25°c -log(K_s)	at 25°c g/L	
0.5	MCPM	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.14	18	0.0-2.0
0.5	MCPA or MCP	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	1.14	17	c
1.0	DCPD	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	6.59	0.088	2.0-6.0
1.0	DCPA or DCP	CaHPO_4	6.90	0.048	c
1.33	OCP	$\text{Ca}_8(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	96.6	0.0081	5.5-7.0
1.5	α -TCP	$\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	25.5	0.0025	c
1.5	β -TCP	$\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	28.9	0.0005	c
1.2-2.2	ACP	$\text{Ca}_x\text{H}_y(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	b	b	5-12
1.5-1.67	CDHA	$\text{Ca}_{10-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{PO}_4)_{6-x} \cdot x(\text{HO})_{2-x}$	85	0.0094	6.5-9.5
1.67	HA or HAp	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	116.8	0.0003	9.5-12
1.67	FA or FAp	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	120.0	0.0002	7-12
1.67	OA or OAp	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{O}$	69	0.087	a
2.0	TTCP	$\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$	38-44	0.0007	a

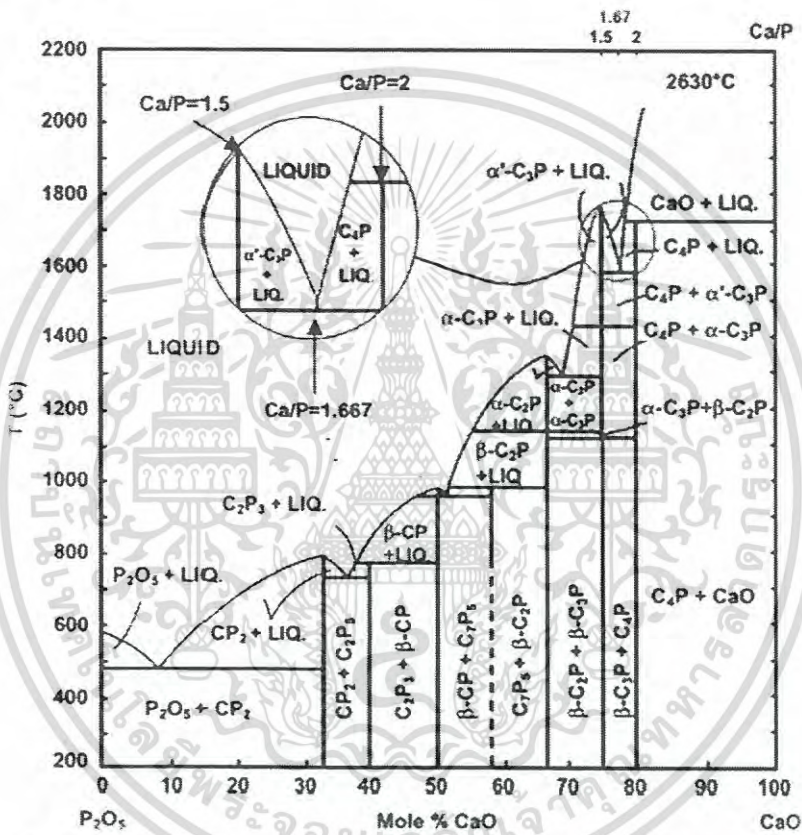
เมื่อ a คือ สารประกอบเหล่านี้ไม่ตกตะกอนในสารละลาย, b คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้ และ c คือ เสถียรเมื่อที่อุณหภูมิ 100°c

ที่มา: Dorozhkin (2011)

สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์หลากหลายสาขา เนื่องจากเป็นสารประกอบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูง จากตารางที่ 2.1 พบว่าสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของ Ca ต่อ P ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.5 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (MCPM) และโมโนแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (MCP)

นอกจากนี้ยังเป็นที่สนใจสำหรับงานวิจัยในเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับเนื้อเยื่อกระดูกอ่อนและเนื้อเยื่อกระดูกอ่อนที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยแสง UV หรือการฉายรังสีแกมมา ซึ่งเนื้อเยื่อเหล่านี้เป็นเนื้อเยื่อที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายน้ำได้ดี ขณะที่สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจะละลายน้ำได้น้อยลงเมื่อมีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca/P ตั้งแต่ 1.0 ขึ้นไป นอกจากนี้ยังพบว่า การเผาสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเหล่านี้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200-2,000 องศาเซลเซียส จะทำให้โมเลกุลของสารประกอบอยู่ในรูปที่ปราศจากโมเลกุลของน้ำ (anhydrous phase) อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้กลายเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่นๆได้อีกด้วย (รูปที่ 2.1) สำหรับงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจไปยังสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) เนื่องจากเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตอีกชนิดหนึ่งที่มีความเสถียรเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้องและบรรยากาศ รวมถึงมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี โดยคาดว่าคุณสมบัติเด่นดังกล่าว จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการกำจัดมลสารต่างๆที่ปนเปื้อนในดินและน้ำได้



รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิต่างๆ
ที่มา: Dorozhkin (2011)

2.2 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP)

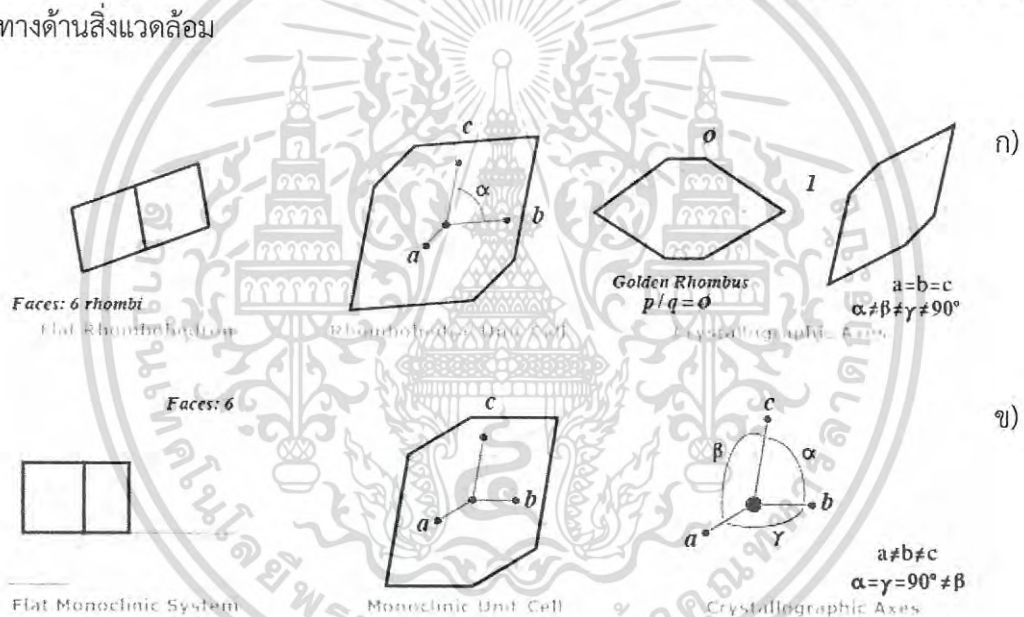
ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) หรือชื่อเรียกทาง IUPAC ว่า “ไตรแคลเซียมไดฟอสเฟต” คือเกลือแคลเซียมของกรดฟอสฟอริกที่มีสูตรเคมี คือ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 310.18 g/mol มีความหนาแน่นอยู่ที่ 3.14 g/cm³ จัดเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น มีความเสถียรเมื่อสัมผัสกับอากาศ และมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก

2.2.1 โครงสร้างของไตรแคลเซียมฟอสเฟต

โครงสร้างของไตรแคลเซียมฟอสเฟตพบในรูปผลึกได้ 2 รูปแบบหลัก คือ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตอยู่ในรูปของ rhombohedral ด้วย space group $R3cH$ (รูปที่ 2.2) ลักษณะเฉพาะของการจัดเรียงตัวตามระดับแนวแกน c ในแนวตั้งถึงระนาบแกน a และ b เสมอเป็นแนวเดียวกัน โดยที่ทั้ง 2 ระนาบ (α - β) ทำมุม 90 องศา เท่ากัน ขณะที่ระนาบแกน a และ b ทำมุมกัน 120 องศา (รูปที่ 2.2) และมีความยาวของหน่วยเซลล์ $a = b = 10.439 \text{ \AA}$, $c = 37.375 \text{ \AA}$ (ตารางที่ 2.2) โครงสร้างของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตมีผลึก non-equivalent ของ PO_4^{3-} อยู่สามตำแหน่งกระจายอยู่ทั่วผลึก โดยมีความยาวพันธะและการทำมุมแตกต่างกันออกไป เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตมีคุณสมบัติของการแลกเปลี่ยนไอออน (electrical charge) การเหนี่ยวนำไอออน (ion conduction) และการจัดเก็บประจุได้ดี (charge storage) เนื่องจาก 1) ความเสถียรของโครงสร้าง (Wang *et al.*, 2010) 2) ภายในหนึ่งยูนิตเซลล์ของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตนั้นประกอบไปด้วยอะตอมที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้มากถึง 273 อะตอม (Yin and Stott, 2003) ประกอบกับภายในโครงสร้างผลึกมีช่องว่างจำนวนมาก (รูปที่ 2.3) (Liang *et al.*, 2010) นอกจากนี้ยังพบว่ามีประสิทธิภาพในการละลายน้ำได้ต่ำกว่าแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต ด้วยเหตุดังกล่าวเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตจึงได้รับความสนใจในการนำมาศึกษาเป็นวัสดุดูดซับทางด้านสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ (ก) rhombohedral และ (ข) monoclinic
ที่มา: Dorozhkin (2011)

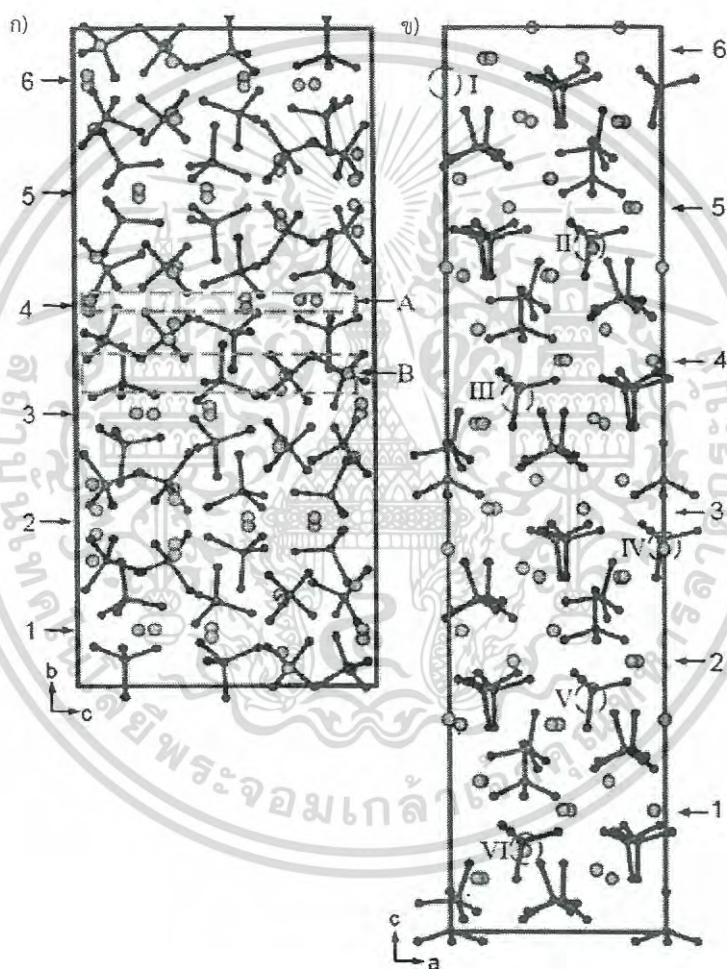
โครงสร้างของแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต อยู่ในรูปของ monoclinic ด้วย space group $P21/a$ มีลักษณะเฉพาะของการจัดเรียงตัวตามระดับแนวแกน c ในแนวตั้งถึงระนาบแกน a (β) ทำมุมกัน 126.20° และมีความยาวของหน่วยเซลล์ $a = 12.887 \text{ \AA}$, $b = 27.280 \text{ \AA}$, $c = 15.219 \text{ \AA}$ โดยปกติแล้วจะเตรียมได้จาก β -TCP โดยให้ความร้อนแก่ β -TCP สูงถึงประมาณ 1,125 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟตระหว่าง 1,125-1,430 องศาเซลเซียส จะทำให้ α -TCP เปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นซูปเปอร์แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α' - $Ca_3(PO_4)_2$) และจะกลายเป็นเฟสที่เสถียรเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,430 องศาเซลเซียส (Yashima *et al.*, 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของไตรแคลเซียมฟอสเฟต

Compound	Space group	Unit cell parameters	Density, g cm ⁻³
α -Tricalcium phosphate (α -TCP)	Monoclinic $P2_1/a$	$a = 12.887 \text{ \AA}$, $b = 27.280 \text{ \AA}$, $c = 15.219 \text{ \AA}$; $\beta = 126.20^\circ$	2.86
β -Tricalcium phosphate (β -TCP)	Rhombohedral $R3cH$	$a = b = 10.439 \text{ \AA}$, $c = 37.375 \text{ \AA}$; $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$	3.07

ที่มา: Dorozhkin (2011)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของ (ก) แอลฟา-ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและ(ข) เบต้า-ไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ที่มา : Liang et al. (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต

การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีการหลักๆคือ การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction) การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีแบบเปียก (wet method) และวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method) โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

2.2.2.1 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction)

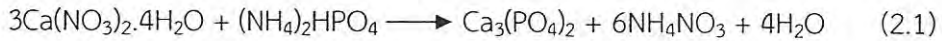
การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction) ทำได้โดยการนำสารเคมีในสถานะที่เป็นของแข็งมาทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิสูง งานวิจัยของ Hsu (2002) ได้ประยุกต์ใช้วิธีนี้และพบว่าเฟสผสมกันระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) และ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ กับ CaCO_3 โดยนำ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ กับ CaCO_3 ไปผสมกับเอทานอลบริสุทธิ์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิค TG/DTA/DSC และศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆพบว่า ที่อุณหภูมิระหว่าง 44-153 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของน้ำภายในโมเลกุลของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 710-815 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3 เป็น CaO และพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียสจะได้เฟสผสมระหว่างระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) และ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ขณะที่อุณหภูมิ 900-1,000 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) และเมื่อให้อุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่ายังคงมีตัวอย่างหลงเหลืออยู่ ซึ่งคาดว่าตัวอย่างที่ยังคงหลงเหลืออยู่นี้คือสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเช่นเดียวกัน ที่จะต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่อไป (Hsu, 2002)

2.2.2.2 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีแบบเปียก (wet method)

วิธีการสังเคราะห์แบบเปียก ทำได้ด้วยวิธีการตกตะกอนสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต โดยใช้สารละลายต่างๆหรือน้ำเป็นตัวกลาง และทำการกำจัดโมเลกุลของน้ำหรือความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถเตรียมได้ในสถานะที่อุณหภูมิไม่ต้องสูงมากนักหรือสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Mirhadi และคณะ (2011) ทำการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตในระดับอนุภาคนาโนด้วยวิธีการตกตะกอนแบบเปียก (wet precipitation) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) กับสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) ตามสมการ (2.1) พร้อมทั้งศึกษาผลของพีเอชที่มีผลต่อเฟสผสมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ขั้นตอนในการสังเคราะห์คือ เตรียมสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 8 M จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรทความเข้มข้น 12 M โดยเตรียมให้ตัวอย่างที่ 1 และ 2 มี pH เท่ากับ 8 และ 10.8 ตามลำดับ หลังจากเวลาผ่านไป 150-200 นาทีที่จะเกิดตะกอนสีขาวเกิดขึ้น จากนั้นกรองตะกอนที่ได้ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลบริสุทธิ์ อบตะกอนให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากการทำปฏิกิริยาและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และในขั้นตอนสุดท้ายคือการนำตะกอนที่ได้ไปเผาแบบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

calcined ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายนี้นำไปศึกษา ลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค XRD, FTIR, ICP-AES และ ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเตรียมสารละลายแคลเซียมไนเตรทเตรไฮเดรทให้มีค่า pH เท่ากับ 8 ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดเป็นเฟสผสมกันระหว่าง $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ กับ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ในขณะที่เมื่อเตรียมสารละลายแคลเซียมไนเตรทเตรไฮเดรทให้มีค่า pH 10.8 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Mirhadi *et al.*, 2011)



2.2.2.3 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method)

วิธีการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ทำได้โดยการนำสารเคมีที่เป็นเกลือของแคลเซียมและฟอสเฟตมาทำปฏิกิริยากันภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ตัวอย่างงานวิจัยของ Laranjeira (2000) ที่ได้ศึกษาการสังเคราะห์เฟสผสมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเปรียบเทียบระหว่างสองวิธีการดังนี้คือ วิธีการที่ 1) เป็นวิธีการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ในน้ำกลั่นกับ CaCO_3 และวิธีการที่ 2) เป็นวิธีการทำปฏิกิริยาระหว่าง $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ในสารละลาย NH_4F เข้มข้น 20 ppm แล้วนำสารละลายที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับ CaCO_3 ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองถูกควบคุม pH ให้อยู่ระหว่าง 8.5-9.0 ด้วย NH_4OH จากนั้นจะถูกบรรจุเข้าไปใน pressure vessel ปิดฝาให้สนิทและนำเข้าเตาเผาที่มีอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดตัวอย่างจะถูกล้างและไล่ความชื้นด้วยการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 ชั่วโมง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพบว่า เมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไตรแคลเซียมฟอสเฟต ขณะที่เมื่อใช้ NH_4F (20 ppm) เป็นตัวทำละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไฮดรอกซีอะพาไทต์

2.3 การกำจัดโลหะหนักด้วยสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายและการตรึงโลหะที่ปนเปื้อนในดิน เนื่องจากพบว่าเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการรองรับไอออนจำนวนมากได้ มีความเสถียรทางเคมี (Chemical stability) และคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal stability) และทนทานต่อความเป็นกรด (Chafki *et al.*, 2014 ; Sugiyama *et al.*, 2002) โดยรูปฟอร์มของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดโลหะประกอบไปด้วยสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Aklil *et al.*, 2004; Dong *et al.*, 2010 ; Xu *et al.*, 2012) โมโนแคลเซียมฟอสเฟต (Minh *et al.*, 2012) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Onoda *et al.*, 2010) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Shul'ga *et al.*, 2007) สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตดังกล่าวมีกลไกการกำจัดโลหะหนักผ่านการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องต่างๆคือ การตกตะกอน (precipitation) การดูดซับ (adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการรวบรวมและอธิบายถึงปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องไว้ในลำดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

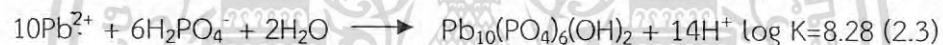
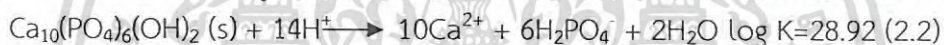
2.3.1 การกำจัดโลหะหนักด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) จัดเป็นรูปฟอร์มของสารประกอบ แคลเซียมฟอสเฟตที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เนื่องจากโครงสร้างผลึกสามารถเกิดการ แลกเปลี่ยนไอออนได้ดี โดย Ca^{2+} สามารถถูกแทนที่ได้ด้วย Ba^{2+} , Sr^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} และ P^{5+} สามารถถูกแทนที่ได้ด้วย V^{5+} , Cr^{5+} และ As^{5+} (Srinivasan *et al.*, 2006 อ้างอิงใน Miretzky and Fernandez-Circilli, 2008)

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วด้วย HA พบว่า HA สามารถทำปฏิกิริยากับ Pb ได้ดีที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3:5 (Ma *et al.*, 1993 และ Laperche *et al.*, 1996 อ้างอิงใน Miretzky and Fernandez-Circilli, 2008) โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้แก่

1. การละลายของ HA ตามด้วยปฏิกิริยาการตกตะกอนของ Pb กับออร์โธฟอสเฟต (Dong *et al.*, 2010 : Xu *et al.*, 2012 : Liao *et al.*, 2010)

กลไกนี้จัดเป็นกลไกหลักในการกำจัดตะกั่วในสารละลายและสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว สามารถลดปริมาณ Pb^{2+} จาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 10 นาที (Miretzky and Fernandez-Circilli, 2008) เกิดขึ้นในสารละลายที่มีความเป็นกรด HA จะเกิดการละลายตามสมการที่ 2.2 จากนั้นตะกั่วในสารละลายจะทำปฏิกิริยากับออร์โธฟอสเฟต (H_2PO_4^-) เกิดการตกตะกอนในรูปของ hydroxypyromorphite ($\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) ดังสมการที่ 2.3



อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับการละลายของ HA และฟอสเฟตที่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นพีเอชของสารละลายจะมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา และพบว่าที่สภาวะกรดจะช่วยเพิ่มการละลายของ HA (Xu *et al.*, 2012 และ Mousa *et al.*, 2015) ปฏิกิริยาการกำจัดตะกั่วเกิดได้ดีที่สุดในช่วง 2-5 (Aklil *et al.*, 2004 และ Liao *et al.*, 2010)

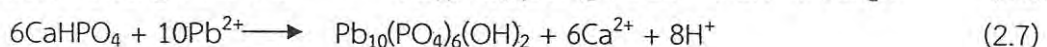
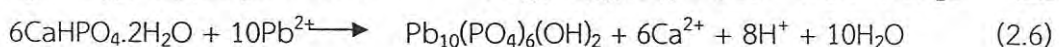
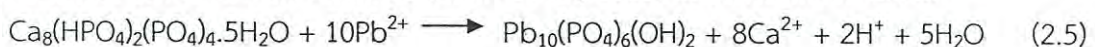
2. การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิวของ HA (He *et al.*, 2013 และ Zhang *et al.*, 2010)

กลไกการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของ HA ก่อน จากนั้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของ Pb^{2+} กับ Ca^{2+} ตามสมการ 2.4



การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Pb^{2+} กับ Ca^{2+} จะดำเนินขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนในที่สุดได้สารประกอบ hydroxypyromorphite ($\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)

นอกจากนี้ยังสันนิษฐานว่าอาจเกิดปฏิกิริยา complexation ที่บริเวณพื้นผิวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ตำแหน่ง POH site ได้อีกด้วย (Minh *et al.*, 2013) แสดงดังสมการที่ 2.5-2.7



2.3.2 การกำจัดโลหะหนักด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

การกำจัดโลหะหนักด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตพบว่ายังมีการศึกษาจำนวนน้อย แต่จากการศึกษาพบว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟตสามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาการกำจัดตะกั่วในสารละลาย โดยสารละลายมีความเข้มข้นของ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ เท่ากับ 1.656-33.12 กรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ เท่ากับ 0.05 กรัม ในสารละลายตะกั่วปริมาตร 100 มิลลิลิตร พบว่าผลิตภัณฑ์ภายหลังการกำจัด ตะกั่วคือ pyromorphite ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัด แสดงดังสมการ 2.8 (Shul'ga *et al.*, 2007)



การใช้สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ร่วมกับสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ในการกำจัดโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณวัสดุเท่ากับ 0.4 กรัม ในสารละลายตะกั่วปริมาตร 100 มิลลิลิตร ผลการทดลองพบว่าวัสดุที่ใช้ในการดูดซับสามารถกำจัดตะกั่วได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างภายหลังการทำปฏิกิริยาพบว่า ตะกั่วได้แทรกตัวเข้าไปอยู่ในสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตดังกล่าว และถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ lead hydroxyapatite ($\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) นอกจากนี้ยังพบว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟตยังคงหลงเหลืออยู่ในระบบและมีส่วนหนึ่งถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ ขณะที่โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรตและไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรตส่วนใหญ่เกิดการละลายไปจนเกือบหมด เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ทำให้เหลือสารประกอบดังกล่าวเพียงบางส่วนเท่านั้นและส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป PbHPO_4 (Sugiyama *et al.*, 2002) นอกจากนี้ความสามารถในการกำจัดตะกั่วในสารละลายแล้ว ยังพบว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟตมีความสามารถในการกำจัดแคลเซียมในสารละลายอีกด้วย โดยงานวิจัยดังกล่าวได้ศึกษาการกำจัดแคลเซียมในสารละลายที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10.34-144.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.015 กรัม ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่าเกิดปฏิกิริยาการดูดซับขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆ คงที่เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป 10 นาที ในขั้นแรกของการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาบริเวณพื้นที่ผิว ในขั้นต่อมาเมื่อพื้นที่ดังกล่าวถูกทำปฏิกิริยาด้วยแคลเซียมจนเต็มจะทำให้ปฏิกิริยาเริ่มคงที่ในระยะเวลาต่อมา (Chafki *et al.*, 2014)

2.4 ตะกั่วและอุตสาหกรรมตะกั่ว

2.4.1. ตะกั่ว

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 82 มีมวลอะตอมเท่ากับ 207.19 กรัมต่อโมล มีสัญลักษณ์คือ Pb มีจุดหลอมเหลว 327.5 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 1,740 องศาเซลเซียส ตะกั่วเป็นโลหะที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม มีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อสัมผัสกับอากาศสีจะเปลี่ยนจากสีขาวอมน้ำเงินเป็นสีเทา

ตะกั่วถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เป็นโลหะที่มีปริมาณการใช้สูงเป็นอันดับ 5 รองจากเหล็ก ทองแดง สังกะสี และอะลูมิเนียม สามารถแปรรูปฟอร์มของการนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็น 3 รูปแบบ คือ สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วและสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว

1) โลหะตะกั่วมีคุณสมบัติที่คงทนต่อการกัดกร่อนและอ่อนตัวหลอมเหลวง่าย รวมทั้งสามารถป้องกันการแผ่รังสีได้ ตะกั่วจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ทำแผ่นตะกั่วในหม้อแบตเตอรี่ หัวขั้วสะพานไฟของหม้อแบตเตอรี่ หล่อตัวพิมพ์ ทำหัวกระสุนปืน ทุ้มสายเคเบิล สายไฟฟ้า สารโทรศัพท์ รวมทั้งนำมาทำอุปกรณ์ป้องกันรังสีเอกซเรย์ เป็นต้น

2) สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (Inorganic Lead Compound) เช่น ตะกั่วออกไซด์ จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสี อุตสาหกรรมผลิตหม้อแบตเตอรี่ เป็นต้น ตะกั่วคาร์บอเนต ตะกั่วซัลเฟตและตะกั่วโครเมต ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสีผสมในผงฝุ่นสีขาว สีน้ำมัน หมึกพิมพ์ และสีพลาสติก เป็นต้น และตะกั่วซิลิเกต ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้อง เครื่องเคลือบเซรามิก เพื่อให้เกิดความเงางามและมีผิวเรียบ

3) สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (Organic Lead Compound) เช่น ตะกั่วสเตียเรต ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแลคเกอร์ น้ำมันหล่อลื่น และจารบี ตะกั่วเตตระเอทิลและตะกั่วเตตระเมทิล ใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้สูงขึ้น ซึ่งในปัจจุบันมีการยกเลิกการใช้ตะกั่วในรูปแบบดังกล่าวแล้ว

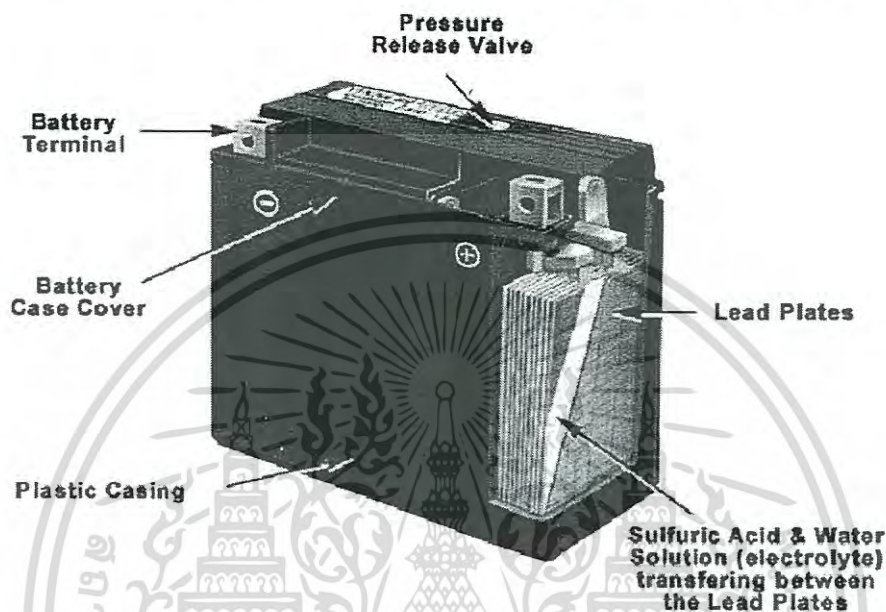
2.4.2 อุตสาหกรรมตะกั่ว

อุตสาหกรรมตะกั่วหรืออุตสาหกรรมผลิตโลหะตะกั่วเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานของอุตสาหกรรมอื่นๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมผลิตสี อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น สถานการณ์ความต้องการใช้โลหะตะกั่วทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมรถยนต์ที่มีการใช้โลหะตะกั่วเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังพบว่าตลาดรถจักรยานไฟฟ้าที่มีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในประเทศเกาหลี อินโดนีเซีย อินเดียและสหรัฐอเมริกา จึงมีส่วนทำให้ความต้องการใช้แบตเตอรี่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (กิตติพันธ์, 2552)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตโลหะตะกั่วจากสินแร่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ โดยใช้แร่ตะกั่วคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบหลัก แต่ต่อมาประสบกับปัญหาการขาดแคลนแร่ตะกั่วดังกล่าว จึงทำให้ปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตตะกั่วจากสินแร่มาเป็นการผลิตตะกั่วจากแผ่นแบตเตอรี่ ซึ่งมีกำลังผลิตรวมแล้วประมาณ 82,200 ตันต่อปี โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้คือเศษแบตเตอรี่ภายในประเทศ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวคือ ตะกั่วบริสุทธิ์ ตะกั่วผสมพลวง ตะกั่วผสมแคลเซียม ซึ่งกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะถูกส่งไปจำหน่ายให้แก่อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ภายในประเทศ (นภาพร, 2551) จากการศึกษากระบวนการผลิตตะกั่วจากเศษแบตเตอรี่รถยนต์พบว่าแบตเตอรี่รถยนต์เฉลี่ยหนึ่งลูกจะมีตะกั่วเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในถึง 9-12 กิโลกรัมต่อลูก ซึ่งลักษณะของแผ่นแบตเตอรี่แสดงดังรูปที่ 2.3 จะมีขั้นตอนหลักๆ ในการผลิตตะกั่วดังนี้คือ การเตรียมวัตถุดิบโดยจะนำเศษแบตเตอรี่เข้าเครื่องผ่าแบตเตอรี่เพื่อแยกแผ่นตะกั่ว ยาง เศษพลาสติก และกากตะกอนที่อยู่ภายในตัวแบตเตอรี่ออก จากนั้นจะล้างทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆ ให้เรียบร้อย แผ่นตะกั่วจะถูกส่งเข้าไปหลอมในเตาเผาพร้อมกับผงตะกั่วที่อุณหภูมิ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนนี้จะทำให้ได้น้ำโลหะและตะกั่วออกมา จากนั้นทำการแยกตะกั่วออก เมื่อได้น้ำโลหะที่ปราศจากตะกั่วแล้วเทลงแม่พิมพ์เป็นขั้นตอนสุดท้าย

จากขั้นตอนการผลิตจะทำให้เกิดของเสียในสามลักษณะ คือ มลพิษทางอากาศ กากของเสียและน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียจากกระบวนการผลิตสามารถจำแนกแหล่งที่มาได้ดังนี้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิต เช่น น้ำกรดจากหม้อแบตเตอรี่ น้ำจากการผ่าแยกแบตเตอรี่ น้ำล้างชิ้นส่วนต่างๆ น้ำจากระบบบำบัดอากาศ น้ำทิ้งจากการปรับ pH น้ำล้างพื้นโรงงาน น้ำล้างรถบรรทุกแบตเตอรี่ เป็นต้น (นภาพร, 2551)

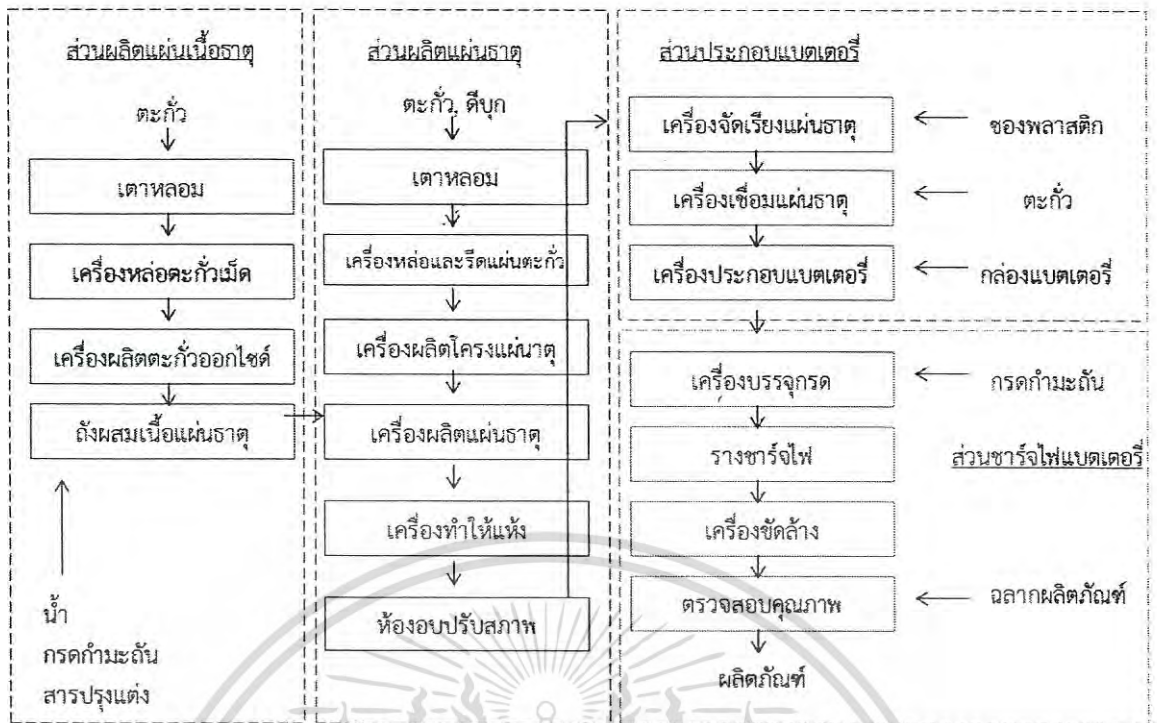


รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่รถยนต์
(ที่มา: นภาพร, 2551)

2.4.3 อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่

อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ในตลาดโลกพบว่าในปี พ.ศ. 2552 มีมูลค่ารวมกันสูงถึง 1.64 ล้านล้านบาทและมีแนวโน้มสูงขึ้นในปี พ.ศ. 2558 ขณะที่สถานการณ์แบตเตอรี่ในประเทศไทยพบว่ามี การนำเข้าแบตเตอรี่และส่วนประกอบทุกประเภทในช่วงปี พ.ศ. 2550-2553 เฉลี่ยประมาณปีละ 2,200 ล้านบาท ซึ่งสถานการณ์แบตเตอรี่รถยนต์และจักรยานยนต์ในประเทศไทยพบว่ายังคงมีความต้องการ การใช้งานอย่างต่อเนื่อง โดยมีปริมาณการใช้งานแบตเตอรี่ดังกล่าวเฉลี่ยปีละ 10-13 ล้านลูก เนื่องจากยังคงมีกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการการใช้งานเพื่อทดแทนแบตเตอรี่เก่าที่หมดอายุการใช้งานหรือเสื่อมสภาพไปนั่นเอง (สุณีพร และ สิรินทร, 2552) นอกจากนี้ยังพบว่าอุตสาหกรรมรถยนต์ ภายในประเทศ ในปี 2555 มียอดการผลิตรถยนต์และรถจักรยานยนต์เพิ่มมากขึ้นกว่าร้อยละ 68.31 และ 27.56 ตามลำดับ สาเหตุการเพิ่มกำลังการผลิตนี้เกิดจากการฟื้นตัวของอุตสาหกรรมและนโยบายของ รัฐบาลเกี่ยวกับการคืนภาษีสรรพสามิตให้กับผู้ซื้อรถยนต์คันแรกในปี 2555 โดยกระบวนการผลิต แบตเตอรี่เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์จะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ แสดงดังรูปที่ 2.4 (บุญ เสริม, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตแบตเตอรี่

ที่มา : สำนักวิชาการ องค์การอิสระด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ (2556)

2.4.3.1 กระบวนการผลิตเนื้อแผ่นธาตุ

กระบวนการผลิตเนื้อแผ่นธาตุ โดยเริ่มจากการหลอมตะกั่ว (Ingot) ด้วยก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง จากนั้นทำการหล่อและตัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมทรงลูกบาศก์ แล้วส่งเข้าสู่เครื่องผลิตตะกั่วออกไซด์ (Ball Mill) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกที่หมุนอย่างต่อเนื่อง ด้านบนติดตั้งหัวพ่นละอองน้ำลงบนตัวถังเพื่อควบคุมอุณหภูมิ และติดตั้งหัวจ่ายอากาศเข้าในถังเพื่อให้ตะกั่วทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนและเปลี่ยนเป็นตะกั่วออกไซด์ เมื่อได้ตะกั่วออกไซด์ในสัดส่วนที่กำหนดจะถูกส่งไปเก็บในไซโลเพื่อเตรียมป้อนเข้าสู่ถังผสมเนื้อแผ่นธาตุ โดยเริ่มจากการป้อนส่วนผสมประกอบด้วยตะกั่วออกไซด์ (PbO) และสารเติมแต่งเข้าในถังผสม ตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นเติมกรดกำมะถัน (H_2SO_4) และน้ำในระหว่างที่เครื่องผสมส่วนต่างๆจนเข้ากัน เมื่อส่วนผสมได้ทีจะมีลักษณะเหมือนโคลนเหนียวสีเทา เรียกว่า “เนื้อแผ่นธาตุ” ซึ่งจะถูกส่งไปยังส่วนผลิตแผ่นธาตุต่อไป

2.4.3.2 กระบวนการผลิตแผ่นธาตุ

กระบวนการผลิตแผ่นธาตุ จะทำการเติมตะกั่วและดีบุกลงไปในเนื้อแผ่นธาตุตามสัดส่วนที่กำหนด เมื่อส่วนผสมหลอมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะถูกสูบไปยังเต้าหลอม ซึ่งใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง เมื่ออุณหภูมิตะกั่วหลอมเหลวในเต้าหลอมลดลงจนถึงเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนผสมระหว่างตะกั่วและดีบุกจะถูกสูบส่งเข้าสู่เตารักษาระดับ ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าในการให้ความร้อน จากนั้นเครื่องหล่อและรีดตะกั่วแผ่นจะทำการหล่อตะกั่วเป็นแผ่นอย่างต่อเนื่อง และปล่อยให้อุณหภูมิลดลงก่อนทำการรีดตะกั่วแผ่นจนได้ขนาดและความหนาตามที่กำหนด จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องผลิตโครงแผ่นธาตุ (Expander) ซึ่งจะทำหน้าที่เจาะและขยายความกว้างของตะกั่วให้กลายเป็นแผ่นตาข่าย ซึ่งแถบกลางของแผ่นจะเจาะเป็นช่อง เหลือไว้เฉพาะส่วนที่จะกลายเป็นหูของแผ่นธาตุ (Lug) ซึ่งจะเชื่อมต่อกับขั้วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อรับส่งประจุของแผ่นธาตุ (Strap) แผ่นตาข่ายที่ได้จะถูกส่งเข้าเครื่องผลิตแผ่นธาตุ ทำหน้าที่ฉาบเนื้อแผ่นธาตุลงบนโครงแผ่นธาตุ (Pasting) โดยจะนำส่วนผสมที่ได้จากส่วนผลิตเนื้อธาตุมาฉาบลงบนโครงแผ่นธาตุทั้งสองด้าน จากนั้นทำการตัดแยกออกเป็นแผ่นธาตุแต่ละแผ่น และส่งเข้าเครื่องทำแห้ง (Dryer) ซึ่งจะใช้ลมร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจี จากนั้นนำแผ่นธาตุที่ได้มาเรียงเข้าในกล่องพลาสติกก่อนส่งเข้าห้องอบปรับสภาพ (Curing)

2.4.3.3 การประกอบแบตเตอรี่

การประกอบแบตเตอรี่ แผ่นธาตุที่ได้จากส่วนผลิตแผ่นธาตุแบ่งเป็นธาตุขั้วลบและขั้วบวก ซึ่งจะถูกรียงเข้าเครื่องจัดเรียงแผ่นธาตุ (Stacker) โดยแผ่นธาตุขั้วลบจะถูกบรรจุในช่องกั้นประจุ (Separator) ก่อนนำมาวางสลับกับแผ่นธาตุขั้วบวกตามจำนวนที่กำหนด ช่องกั้นประจุจะทำหน้าที่กั้นระหว่างประจุบวกและประจุลบเพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรในขณะใช้งานแบตเตอรี่แผ่นธาตุที่ผ่านการเรียงสลับขั้วบวกและขั้วลบจะถูกส่งไปยังเครื่องเชื่อมแผ่นธาตุ (Cast on Strap: COS) ซึ่งประกอบไปด้วยเตาหลอมไฟฟ้า ทำหน้าที่หลอมตะกั่วจนละลาย ซึ่งตะกั่วที่หลอมละลายจะถูกส่งเข้าเครื่องหล่อ ซึ่งทำหน้าที่หล่อตะกั่วเพื่อเชื่อมหูแผ่นธาตุ (Lug) เข้ากับขั้วของแผ่นธาตุ แผ่นธาตุแต่ละกลุ่มที่ผ่านการหล่อจะได้ 1 เซลล์แบตเตอรี่ (Cell) ซึ่งในแบตเตอรี่ 1 ลูกจะมีเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 6 เซลล์ โดยเซลล์ที่อยู่ขอบทั้งสองด้านจะมีลักษณะขั้วเป็นแท่งยาวเป็นขั้วบวกและขั้วลบเพื่อดึงไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ เซลล์แบตเตอรี่ที่ได้จะถูกบรรจุลงในกล่องพลาสติก (Container) จากนั้นเชื่อมต่อขั้วเซลล์แบตเตอรี่ โดยใช้คลิปเชื่อมหนีบ Strap ตะกั่วเข้าด้วยกันโดยเจาะผ่านแผ่นกั้นเซลล์ เพื่อให้สามารถส่งกระแสไฟฟ้าระหว่างแต่ละเซลล์ได้ จากนั้นจึงเข้าสู่เครื่องปิดฝากล่องผนึกเพื่อป้องกันการหกรั่วไหลของสารเคมีเมื่อนำไปใช้งาน และทำการตรวจสอบเบื้องต้น ประกอบด้วยการตรวจสอบรอยรั่วระหว่างเซลล์ บริเวณฝากล่อง วัดความสูงขั้วแบตเตอรี่ และตรวจสอบความเรียบร้อยของแบตเตอรี่ก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการ

2.4.3.4 ส่วนชาร์จไฟแบตเตอรี่

ส่วนชาร์จไฟแบตเตอรี่ (Charging Process) แบตเตอรี่ที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องบรรจุกรด ซึ่งควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติประกอบด้วยส่วนเติมกรดจะสูบส่งสารละลายกรดกัมมาธันเข้ามาเก็บในถังของเครื่องเติมกรด จากนั้นเครื่องจะเติมสารละลายกรดลงไปในแต่ละห้องของแบตเตอรี่จนได้ปริมาณที่กำหนด จากนั้นส่งไปยังอ่างชาร์จไฟซึ่งมีลักษณะเป็นรางยาว หล่อเย็นด้วยน้ำเพื่อลดอุณหภูมิระหว่างชาร์จไฟ ด้านบนมีฝาดมปิดเพื่อรวบรวมไอกรดที่เกิดขึ้นเข้าสู่เครื่องบำบัดอากาศแบบสครับเบอร์ หลังจากผ่านการชาร์จไฟเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการตรวจสอบขั้นสุดท้าย ประกอบด้วยการตรวจระดับสารละลายในแบตเตอรี่ ตรวจสอบการรั่วซึม ทำการล้างและเป่าให้แห้ง ก่อนทำการวัดความสามารถในการปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงสูงของแบตเตอรี่ และการตรวจความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ก่อนทำการติดฉลากและส่งจำหน่ายต่อไป

2.4.4 คุณลักษณะของน้ำเสียและของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่

จากรูปที่ 2.4 ทำให้ทราบว่าของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแบตเตอรี่จะเกิดขึ้นที่กระบวนการผลิตแผ่นเนื้อธาตุและกระบวนการผลิตแผ่นธาตุ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีการเติมโลหะตะกั่วและดีบุกลงไปเพื่อทำการหลอม ทำให้ขั้นตอนนี้จะเกิดกากตะกั่วเป็นของเสียจากการหลอม รีดและตัดแผ่นตะกั่ว ส่วนน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนตะกั่วจากกระบวนการผลิตนั้น ส่วนใหญ่เกิดจากการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ พื้นอาคาร น้ำซักล้างชุดพนักงาน น้ำระบายทิ้งจากระบบหล่อเย็นและจากระบบบำบัดอากาศแบบสครับเบอร์ เนื่องจากในขั้นตอนการหลอมตะกั่วจะทำให้มีไอตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในองค์กรเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นใบเขียวจะเห็นต้นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้น จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้าพบว่าน้ำเสียหลังจากกระบวนการผลิตจะมีปริมาณตะกั่วปนเปื้อนอยู่ในช่วง 4.0-43.16 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีพีเอชอยู่ในช่วง 1.10-2.5 ซึ่งตะกั่วจะอยู่ในรูป Pb^{2+} , $PbSO_4$ และอนุภาคแขวนลอย เป็นต้น ทั้งนี้ปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอาจขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตของแต่ละบริษัทด้วย

2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียและกากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่

อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่เป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะตะกั่วเป็นวัตถุดิบสำคัญในขั้นตอนการผลิต ซึ่งที่เป็นที่ทราบกันดีว่าหากได้รับปริมาณตะกั่วเข้าสู่ร่างกายเกินกว่าปริมาณที่กำหนดจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพ (Telisman et al, 2007 และ Chen and Poretz, 2001) และหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการควบคุมที่เหมาะสม จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษตามมาได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์น้ำเสียตัวอย่างจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่แห่งนี้มีวิธีการบำบัดโลหะตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีเป็นหลัก (การตกตะกอนทางเคมีด้วย NaOH) จากการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ดังกล่าวพบว่า มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 10.72 มิลลิกรัมต่อลิตร มีพีเอชเท่ากับ 2.55 และมีอุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 30-31 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าเป็นน้ำเสียที่มีคุณลักษณะไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด จึงต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งกรรมวิธีในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนอกจากจะใช้วิธีการทางเคมีแล้ว ยังพบว่าสามารถบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการดูดซับ หรือทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้เช่นเดียวกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ

2.5.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี (chemical treatment) เป็นวิธีการบำบัดโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสารพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย วิธีการนี้นิยมใช้บำบัดน้ำเสียที่มีคุณลักษณะบางอย่างสูงหรือต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด ยกตัวอย่างเช่น การมีพีเอชของน้ำเสียต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด หรือมีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดนั่นเอง โดยสารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนทางเคมีคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เนื่องจากให้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพและใช้เวลาในการบำบัดได้อย่างรวดเร็ว

2.5.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

สารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) หรือสารเชิงซ้อน (Complex) คือสารประกอบที่มีโลหะหรือไอออนของโลหะเป็นอะตอมกลางซึ่งส่วนใหญ่อะตอมกลางจะได้แก่ธาตุทรานซิชัน เรียกว่า นิวเคลียสอะตอม (Nuclear atom) และเกิดพันธะกับลิแกนด์ ซึ่งเป็นกลุ่มไอออนหรือโมเลกุลต่างๆ โดยปกติพันธะระหว่างลิแกนด์กับอะตอมกลางจะเกิดขึ้นโดยพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ ดังนั้นจึงเรียกรวมสารประกอบเชิงซ้อนได้อีกชื่อหนึ่งว่า สารประกอบโคออดิเนชัน (Coordination)

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนมักพบปัญหากับน้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำๆ เนื่องจากโลหะหนักสามารถละลายน้ำได้ดีในสภาวะดังกล่าว ดังนั้นจึงต้องทำให้โลหะหนักมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงและสามารถตกผลึกได้ด้วยการเติมสารเคมีประเภทต่างๆ

2.5.3 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ (adsorption)

กระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการสะสมสารประกอบหนึ่งชนิดหรือมากกว่าไว้ที่บริเวณพื้นผิว (interface) ของวัสดุดูดซับ โดยไม่ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุดูดซับนั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพบว่าวัสดุดูดซับจะอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง (adsorbent) และเราจะเรียกระบบสารประกอบต่างๆที่สะสมอยู่บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับว่าสารถูกดูดซับ (adsorbate) โดยประเภทของการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักๆ คือ 1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption, physisorption) 2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption, chemisorption) 3) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน (Exchange adsorption) และ 4) การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) คือ การดูดซับสารถูกดูดซับไว้บนผิวของวัสดุดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน ซึ่งแรงดูดซับทางกายภาพนี้ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวของวัสดุดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดซับความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดซับความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนผิวผลึกดูดซับความชื้น เป็นต้น แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับกับประจุบนผิวของวัสดุดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิววัสดุดูดซับพอลิเมอร์ เป็นต้น แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของวัสดุดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น ซึ่งลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ จะเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิปกติหรือที่อุณหภูมิจนกระทั่งที่อุณหภูมิต่ำๆ สามารถเกิดได้ทั้งบนผิวของวัสดุดูดซับโดยตรงและเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของวัสดุดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวนของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน เรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)”

การดูดซับทางเคมี (chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของวัสดุดูดซับในลักษณะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีและเกิดขึ้นเร็วเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น การดูดซับประเภทนี้จึงเกิดขึ้นได้ชั้นเดียว (monolayer adsorption)

2.5.3.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับเข้าไปในวัสดุดูดซับ เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนต่างๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้

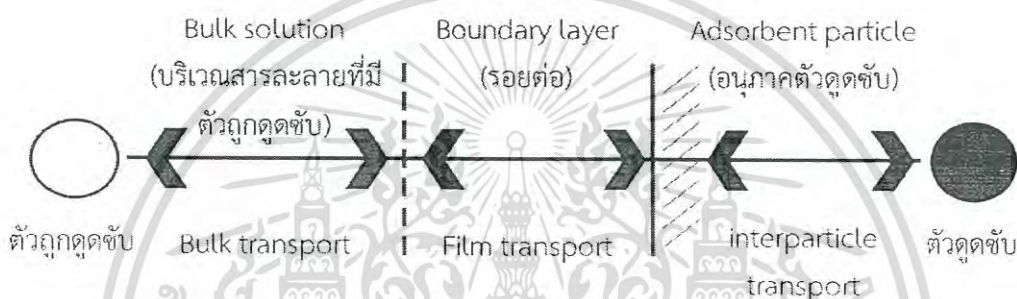
1. การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับแทรกผ่านของเหลวที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับจนเข้าถึงผิวหน้าวัสดุดูดซับ
2. การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวหรือรูพรุนของวัสดุดูดซับ
3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับติดที่ผิวของวัสดุดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมากต่อขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับ โดยแบ่งเป็นสามขั้นตอน (รูปที่ 2.5)

1. ขั้นตอนการเกิด Bulk transport เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับจากสารละลายไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับ
2. ขั้นตอนการเกิด Film transport เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับจากสารละลายข้ามผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับไปยังผิวของวัสดุดูดซับ
3. ขั้นตอนการเกิด Inter-particle transport หรือ Pore transport เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะติดติดกับผิววัสดุดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นรวดเร็วมาก ด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมีหรือทั้งสองแรงพร้อมๆ กัน



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับไปยังวัสดุดูดซับ (ที่มา: ชัยยศ, 2554)

2.5.2.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงทางกายภาพและทางเคมีหรือทั้งสองแรงพร้อมๆ กัน

1. แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ

แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attraction force) เป็นแรงที่เกิดจากการดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน (polar-polar molecule) หรืออาจเกิดจากการดึงดูดระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว (non-polar molecule) และเกิดจากการดึงดูดระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว (nonpolar-nonpolar molecule)

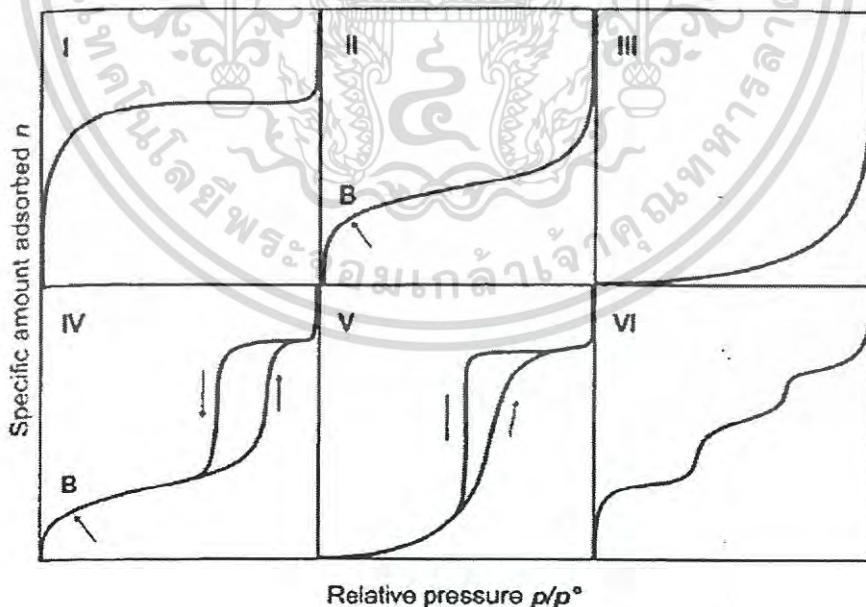
แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) เป็นแรงดึงดูดอ่อนๆ ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้นๆ ทำให้เกิดความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนที่ไม่เท่ากันในอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้เกิดสภาพที่มีขั้วเกิดขึ้น จนทำให้เกิดการดูดซับขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้ ซึ่งแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์นี้ทำให้ศึกษาการเกิดการคายซับได้ง่ายและสะดวกต่อการฟื้นฟูสภาพของวัสดุดูดซับ

2. แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

แรงทางเคมี (chemical force) เป็นแรงที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับ มีลักษณะคล้ายกับการเกิดพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าและไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ และส่วนใหญ่จะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว

2.5.3.4 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือนอยู่ในสารละลาย (c) ที่สภาวะสมดุลและอุณหภูมิคงที่ ซึ่งมีรูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับ 6 ประเภทหลักๆ แสดงดังรูปที่ 2.6 ได้แก่ แบบจำลองที่ 1 เป็นแบบจำลองการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) แบบจำลองที่ 2 เป็นแบบจำลองรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) หรือเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller, BET) แบบจำลองที่ 3 เป็นแบบจำลองที่ไม่มีจุดเปลี่ยนของกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเว้าซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่ค่อยพบบ่อยนัก หรือเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองของของฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) แบบจำลองที่ 4 เป็นแบบจำลองที่พบบ่อยมากในวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำลักษณะของกราฟจะคล้ายกับแบบจำลองที่ 2 แต่เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นจะทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption และแบบจำลองที่ 5 ซึ่งมีลักษณะของแบบจำลองคล้ายคลึงกับแบบจำลองที่ 4 แต่แตกต่างกันตรงที่การเกิด hysteresis loop จะพบบ่อยนัก



รูปที่ 2.6 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับ
ที่มา: เดชา (2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบจำลองการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm)

แบบจำลองการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm) เป็นแบบจำลองการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะเดียวกัน (homogeneous adsorption surface) โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะไม่เกิดการซ้อนทับ เคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งตำแหน่งกัน พื้นผิวตัวดูดซับจะเต็มไปด้วยสารถูกดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น จนสารถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว สมการการดูดซับของแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ 2.9

$$q = \frac{q_m K C}{1 + K C} \quad (2.9)$$

เมื่อ q เท่ากับ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

q_m เท่ากับ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบสมบูรณ์

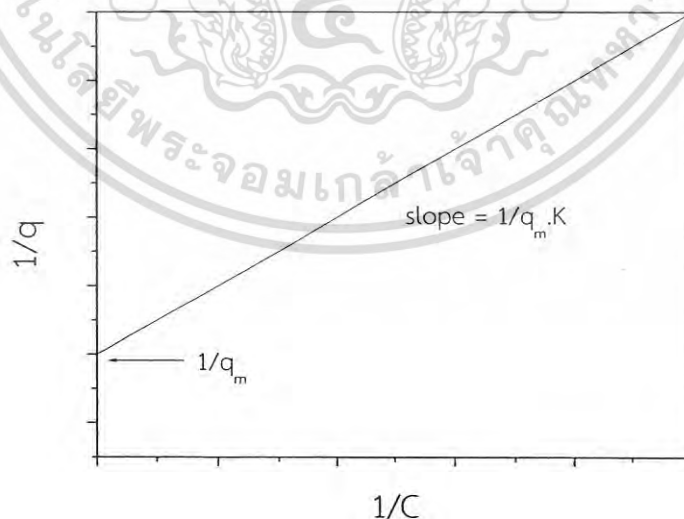
K เท่ากับ ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

C เท่ากับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการที่ 2.9 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K C} + \frac{1}{q_m} \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K}$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดซับเชิงเส้นของแลงมัวร์
ที่มา: ชัยยศ (2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบจำลองของของฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

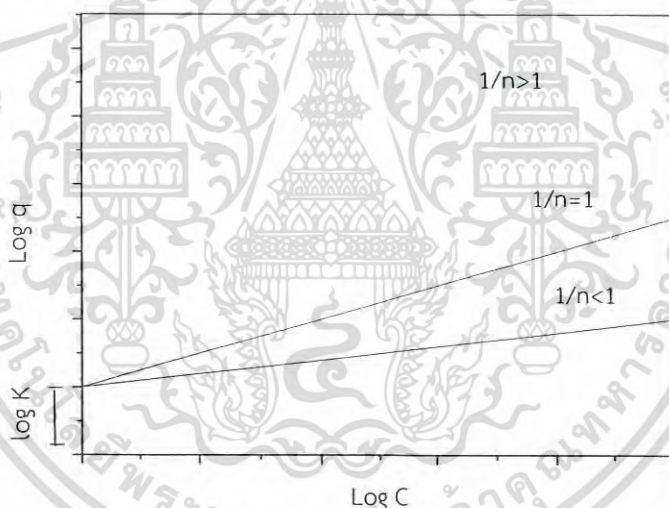
แบบจำลองของของฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) เป็นการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous adsorption surface) ซึ่งสมการการดูดซับของฟรุนดิช แสดงดังสมการที่ 2.11

$$q = KC^n \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิชของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว n จะมีค่ามากกว่า 1 จากสมการที่ 2.11 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (2.12)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ (รูปที่ 2.8)

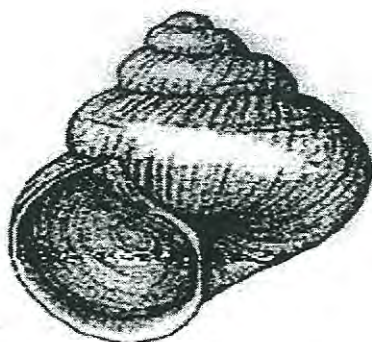


รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดซับเชิงเส้นของฟรุนดิช
ที่มา: ชัยยศ (2554)

2.6 หอยเชอรี (Golden apple snail)

หอยเชอรี (Golden apple snail หรือ Channeled apple snail) มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Pomacea canaliculata* มีต้นกำเนิดมาจากทวีปอเมริกาใต้ จัดเป็นหอยน้ำจืดจำพวกหอยฝาเดียว รูปร่างค่อนข้างกลมใหญ่ เปลือกเรียบ มีฝาปิดเป็นแผ่นแข็งสีน้ำตาลเข้ม หอยเชอรีมีรูปร่างคล้ายกับหอยโข่ง (Apple snail) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 หอยเชอรี่ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544)

หอยเชอรี่ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกจากประเทศญี่ปุ่น ฟิลิปปินส์และไต้หวัน เพื่อประดับตกแต่งตู้ปลา กำจัดตะไคร่น้ำ และเศษอาหารในตู้ปลา ซึ่งนิยมเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในช่วงปี พ.ศ. 2530 โดยต่อมาได้มีการเพาะเลี้ยงและขยายพันธุ์เป็นสัตว์เศรษฐกิจเพื่อการบริโภค แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากหอยเชอรี่ยังเป็นพาหะของโรค *Angiostrongylus cantonensis* ซึ่งเป็นพยาธิที่ก่อให้เกิดโรคสมองอักเสบในคนที่ได้รับพยาธินี้เข้าสู่ร่างกาย จึงมีการปล่อยหอยเชอรี่ทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติประกอบกับหอยเชอรี่เป็นหอยที่มีเจริญเติบโตและสืบพันธุ์ได้รวดเร็ว จึงทำให้หอยเชอรี่มีปริมาณเพิ่มขึ้นและแพร่กระจายไปสู่แหล่งน้ำ ลำคลองและแม่น้ำ (Wood et al., 2006) ปัจจุบันพบหอยเชอรี่ระบาดไปทั่วประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่พบหอยเชอรี่ 2 ชนิด คือ 1) ชนิดเปลือกสีเหลืองปนน้ำตาล มีเนื้อและหนวดสีเหลือง และ 2) ชนิดเปลือกสีเขียวเข้มปนดำ เนื้อและหนวดมีสีน้ำตาลอ่อน หอยเชอรี่ทำความเสียหายแก่ต้นข้าวและพืชน้ำต่างๆในท้องที่เกือบทุกจังหวัด ทำลายพืชเศรษฐกิจต่างๆของประเทศเป็นมูลค่ามหาศาล ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบเศรษฐกิจทางการเกษตรและระบบนิเวศทางน้ำ (Wood et al., 2006)

การใช้ประโยชน์จากหอยเชอรี่ ส่วนใหญ่นั้นจะนำหอยเชอรี่ไปทำเป็นอาหารสัตว์ เช่นนำไปเป็นส่วนผสมในอาหารปลา จำพวกปลากินเนื้อและใช้เป็นอาหารเบ็ด เป็นต้น นอกจากนี้หอยเชอรี่ยังสามารถนำมาใช้ทำเป็นปุ๋ยหมักชีวภาพได้ โดยการนำหอยเชอรี่มาหมักเพื่อใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการปลูกพืช ซึ่งการใช้ประโยชน์ดังกล่าวนิยมใช้เฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อหอย จึงทำให้มีเปลือกหอยเชอรี่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2544)

2.6.1 องค์ประกอบของเปลือกหอยเชอรี่

เปลือกหอยหรือแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า การตกตะกอน ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่ปลดปล่อยออกมาจากแมนเทิล ซึ่งอยู่ติดกับเปลือกหอยหรือโพรงแมนเทิลของหอย เกิดการจัดเรียงตัวเป็นชั้นผลึก ร่วมกับสารอินทรีย์ที่ถูกสกัดออกมาก่อนการทับถมของเปลือกด้านใน และคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ที่มีอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติสลับกับสารอินทรีย์ เกิดเป็นผลึกขนาดเล็กและก่อตัวเพิ่มมากขึ้นจนในที่สุดเกิดเป็นชั้นของผลึกชั้นกลาง ก่อให้เกิดการตกตะกอนเป็นของแข็งสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ห่อหุ้มลำตัวของหอยไว้ภายใน (สำรวม, 2540) เปลือกหอยนั้นมียอดประกอบโดยทั่วไป 3 ชั้น ด้วยกัน คือ 1) ชั้นนอกสุดคือชั้นเพอริโอสตราคัม (periostracum) ประกอบด้วยสารโปรตีนที่แข็งแรงเหมือนโปรตีนของเขาสัตว์ มีชื่อว่า คอนคิโอลิน (conchiolin) ประกอบด้วยเม็ดสีซึ่งทำให้ออกสสารนี้เป็นออกสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลือกหอยมีสีต่างๆ ชั้นนี้ทำหน้าที่ป้องกันกรดในน้ำ 2) ชั้นกลางเป็นชั้นที่แข็งแรงเพราะประกอบด้วยแคลเซียม โดยปกติไม่มีเม็ดสีจึงมีสีขาว แต่เปลือกที่มีอายุมาก เม็ดสีจากชั้นนอกจะเคลื่อนย้ายมาที่ชั้นกลางอย่างช้าๆ และ 3) ชั้นในสุดเป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นแผ่นแบน บางมีความมันวาวเรียงซ้อนอยู่คือชั้นมุก จากการศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเซอร์รี่ของ ศศิพันธุ์และคณะ (2539) และนิชริมา และคณะ (2553) พบว่าเปลือกหอยเซอร์รี่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ปริมาณมาก แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณร้อยละ CaCO_3 ในเปลือกหอยเซอร์รี่

ปริมาณร้อยละ CaCO_3	เทคนิควิเคราะห์	อ้างอิง
88.25	วิธีการอาบนิวตรอน (NAA)	ศศิพันธุ์และคณะ (2539)
99.302	การวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	นิชริมา และคณะ (2553)

2.6.2 โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต

จากการศึกษาพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตตามธรรมชาติมีโครงสร้างผลึกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.6.2.1 แคลไซต์ (*calcite*) ซึ่งเป็นแร่คาร์บอเนตที่เสถียรที่สุด มีสูตรเคมีคือ CaCO_3 ซึ่งประกอบไปด้วย CaO 56.0% โดยน้ำหนัก และมี CO_2 44.0% โดยน้ำหนัก มีรูปผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) รูปทรงคล้ายขนมเปียกปูน สีของแคลไซต์ส่วนใหญ่ที่พบตามธรรมชาติคือสีขาวหรือไม่มีสี (Gopi and Subramanian, 2013 ; Kontoyannis and Vagenas, 1999)

2.6.2.2 อะราโกไนท์ (*aragonite*) ซึ่งเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีรูปผลึกแบบออร์โธโรมบิก ลักษณะผลึกเป็นแบบแท่งยาว มีหน้าตัดตรงปลายแท่งและมีสีขาวไปจนถึงสีเหลืองอ่อน แหล่งที่พบอะราโกไนท์ตามธรรมชาติคือ หินปูนและเปลือกหอย มีสูตรเคมีคือ CaCO_3 ซึ่งประกอบไปด้วย CaO 56.0% โดยน้ำหนัก และมี CO_2 44.0% โดยน้ำหนัก

2.6.2.3 วาเทอร์ไรท์ (*vaterite*) เป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีคุณสมบัติระหว่างแคลไซต์และอะราโกไนท์ ซึ่งเป็นแร่คาร์บอเนตที่เสถียรน้อยที่สุด ซึ่งกล่าวได้ว่าแร่คาร์บอเนตในรูปของอะราโกไนท์และวาเทอร์ไรท์เป็นสารตั้งต้นของแคลไซต์นั่นเอง (Anderson, 1991 ; Islam *et al.*, 2013 ; Kirboga and Oner, 2013 ; Hu *et al.*, 2013)

จากการทบทวนงานวิจัยต่างๆพบว่าคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในเปลือกหอยนั้นประกอบไปด้วยเฟสของอะราโกไนท์เป็นหลัก ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ ปัตตะ และคณะ (2558) ที่พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยแครงอยู่ในเฟสของอะราโกไนท์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam และคณะ (2013) คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Oladoja และ Aliu (2009) ที่พบว่าตัวอย่างเปลือกหอยแถบทวีปอเมริกาประกอบด้วยเฟสของอะราโกไนท์เป็นหลัก ตลอดจนพบว่ามีเฟสผสมกันระหว่างแคลไซต์และอะราโกไนท์อีกด้วย (Hariharan *et al.*, 2014 ; จรรยาพร 2545) ทั้งนี้องค์ประกอบของเปลือกสัตว์ทะเลและเปลือกหอยต่างๆอาจแตกต่างกันออกไปตามแหล่งกำเนิด

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จรรยาพร (2545) ศึกษาการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียด้วยเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่ จากผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกหอยด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชัน (AAS) พบว่าเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มีแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ร้อยละ 96.83 และ 86.65 ตามลำดับ โดยแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกหอยทั้งสองชนิดนั้นเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตในเฟสผสมระหว่างแคลไซต์และอะราโกไนท์ เมื่อศึกษาการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายมีพีเอชเท่ากับ 5 และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที พบว่าภายหลังการบำบัดพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเกิดการละลาย ทำให้ CO_3^{2-} เกิดการจับตัวกับ Pb^{2+} ในสารละลายเป็น PbCO_3 จากผลการทดลองพบว่าเปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเท่ากับร้อยละ 99.48 และ 97.14 ตามลำดับ

ชีวิรัตน์ และคณะ (2544) ศึกษาการกำจัดตะกั่วในสารละลายโดยใช้ตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครงที่ผ่านการใช้สารกระตุ้นที่แตกต่างกันเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว โดยใช้เปลือกหอยแครงที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสภาพ โดยมีวิธีการดังนี้คือ นำเปลือกหอยแครงมาล้างทำความสะอาดและแช่สารละลาย 10 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) นาน 12 ชั่วโมง จากนั้นทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งและบดเปลือกหอยแครงให้มีขนาด 8-16 mesh และ 16-100 mesh ตามลำดับ จากนั้นนำเปลือกหอยแครงทั้งสองขนาดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ และน้ำส้มสายชูนาน 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ขณะที่เปลือกหอยแครงที่ไม่ได้ปรับสภาพนั้นจะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วในสารละลายสามารถทำได้โดย นำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้จากวิธีการดังกล่าว 0.2 กรัม เติมลงในสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่เวลาต่างกััน ดังนี้คือ 0.5, 1, 2, 5, 7 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าเปลือกหอยแครงมีแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปของ aragonite เป็นหลัก และยังพบอีกด้วยว่าเปลือกหอยแครงที่มีขนาด 16-100 mesh มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในสารละลายสูงกว่าเปลือกหอยแครงที่มีขนาด 8-16 mesh โดยเปลือกหอยแครงที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก น้ำส้มสายชูและเปลือกหอยแครงที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว 83.40, 91.93 และ 88.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง โดยมีไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการฟรุนดริช จากการศึกษาคาดว่า การกำจัดตะกั่วในน้ำเกิดจากการแทนที่ (displacement) โดยไอออนของตะกั่วเข้าแทนที่ไอออนของแคลเซียมในแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของเปลือกหอยแครงร่วมกับการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วเกิดการตกตะกอน (precipitation) กับไอออนตะกั่วที่บริเวณเปลือกหอย เกิดเป็นสารประกอบ PbCO_3

อนิสตา และคณะ (2555) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักสังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกหอยบดละเอียดให้มีขนาด 0.28 มิลลิเมตร ที่เตรียมได้จากการนำเปลือกหอยลาย เปลือกหอยตลับ และเปลือกหอยแครงมาบดผสมรวมกัน พบว่าที่ใช้เปลือกหอยผสมปริมาณ 0.25 กรัม พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 เป็นสภาวะที่เกิดการดูดซับได้ดีที่สุด โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาที และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดเท่ากับร้อยละ 65 และมีไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์และฟรุนดริช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boonchom and Danvirutai (2009) ศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) โดยวิธีการตกตะกอน ด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นเท่ากับ 70% ผ่านตัวกลางที่แตกต่างกันสามชนิดคือ น้ำ, อะซิโตน และเอทานอล จากผลการศึกษาพบว่าแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวกลางที่เป็นน้ำและอะซิโตนเป็นตัวกลางนั้นมี XRD แพทเทิร์นที่คล้ายคลึงกันและสอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข PDF#0903047 โดยมีการจัดเรียงตัวของผลึกอยู่ในระบบ monoclinic ในขณะที่แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่เตรียมผ่านตัวกลางเอทานอลมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ถูกรบกวนด้วยสิ่งเจือปนจนไม่สามารถระบุหมายเลขของสารมาตรฐานที่แน่นอนได้

Boonchom (2009) ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้น 70% โดยใช้อะซิโตนเป็นตัวกลางเพื่อลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดความรุนแรงของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที จะเกิดตะกอนสีขาวของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวอมชมพูของแคลเซียมไพไรท์ (CaP_2O_6) จากผลการวิเคราะห์ความกว้างของระนาบผลึกพบว่า $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่ได้สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข PDF#0903047 และ CaP_2O_6 สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข PDF#500584

Tas (2009) ศึกษาการสังเคราะห์ monetite หรือ ไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรรัส (CaHPO_4) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กับกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) เข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์คือใช้เอทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต 2.96 กรัม และกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) เข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร โดยทำการปั่นกวนตัวอย่างให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปริมาณกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ โดยแปรค่าปริมาณกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ 2, 3.5, 3.7 และ 3.8 มิลลิลิตร ตามลำดับ เมื่อครบเวลาที่กำหนดจะได้ตะกอนผลิตภัณฑ์สีขาวเกิดขึ้น จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอลอีกครั้งและกำจัดความชื้นโดยการอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นานข้ามคืน จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิค SEM, FTIR และ XRD ผลการวิเคราะห์พบว่ารูปร่างอนุภาคของไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรรัสที่สังเคราะห์ได้มีอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบพบว่า ไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรรัสแสดงพีคที่ตำแหน่ง 1128, 1065, 996, 884, 582 และ 557 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งการสั่นของหมู่ฟอสเฟต การวิเคราะห์โครงสร้างความกว้างระนาบผลึกพบว่าไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรรัสที่สังเคราะห์สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข ICDD PDF 70-360 เมื่อพิจารณาปริมาณกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์พบว่า การใช้ปริมาณกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ 2 มิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นเฟสผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรรัสรวมกัน ขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็น 3.5, 3.7 และ 3.8 มิลลิลิตร พบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hsu (2002) พบว่าเฟสผสมกันระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) และ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ กับ CaCO_3 โดยนำแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิก ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ กับ CaCO_3 จากนั้นนำไปผสมกับเอทานอลบริสุทธิ์ 250 mL เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติด้วย DTA/DSC/TG และศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิระหว่าง 44-153 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของน้ำภายในโมเลกุล และที่ 710-815 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อให้อุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่ายังคงมีตัวอย่างหลงเหลืออยู่ ซึ่งคาดว่าตัวอย่างที่ยังคงหลงเหลืออยู่นี้คือสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

Islam *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาคุนสมบัติเฉพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตและเปลือกหอยแครง โดยได้นำเปลือกหอยแครงน้ำหนัก 250 กรัม มาล้างทำความสะอาดและต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นและบดเปลือกหอยแครงให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ $90 \mu\text{m}$ และอบเปลือกหอยแครงเพื่อไล่ความชื้นอีกครั้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของเปลือกหอยแครงเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าจากบริษัท Analytical Univar ที่มีความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเทคนิค SEM, EDX, XRD และ FTIR ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า การศึกษาบริเวณพื้นผิวและลักษณะอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้า พบว่ามีลักษณะผลึกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ ขณะที่เปลือกหอยแครงมีลักษณะผลึกเป็นรูปทรงแท่ง aragonite ต่อมาได้ทำการศึกษารูปร่างที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างทั้งสอง ผลการทดลองพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าประกอบไปด้วยธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) แคลเซียม (Ca) คอปเปอร์ (Cu) และ ดีบุก (Sn) เป็นหลัก ขณะที่เปลือกหอยแครงประกอบไปด้วยธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) อะลูมิเนียม (Al) แคลเซียม (Ca) คอปเปอร์ (Cu) และ เทลลูเรียม (Te) นอกจากนี้ยังพบว่าเปลือกหอยแครงมีธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และแคลเซียม (Ca) มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าอีกด้วย การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าและเปลือกหอยแครงพบว่า ให้ผลการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกันเป็นอย่างมาก กล่าวคือแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าแสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2520, 1391 และ 875 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอกซิลิกและคาร์บอเนต เป็นต้น ขณะที่เปลือกหอยแครงแสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอกซิลิกและคาร์บอเนตที่ตำแหน่ง 2520, 1455 และ 857 cm^{-1} เป็นต้น ผลการศึกษาโครงสร้างควมกว้างระนาบผลึกพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดการค้าแสดงเอกลักษณ์เฉพาะของ calcite phase ที่สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข JCPDS 00-047-1743 ขณะที่เปลือกหอยแครงพบว่าแสดงเอกลักษณ์เฉพาะของ aragonite phase สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข JCPDS 00-041-1475

Kawabata *et al.* (2011) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนสังกะสีกับเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4), แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยนำสารตั้งต้นทั้งสามมาผสมรวมกันเป็นเวลา 30 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 1273 เคลวิน นาน 6 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีอยู่ในรูปของกับเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการสร้างพันธะกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และสอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข ICSD 410782

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Louati *et al.* (2005) ได้ศึกษาวิธีการสังเคราะห์สารประกอบ alkaline earth hydrogen phosphate (CaHPO_4) ด้วยวิธีการระเหยอย่างช้าภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไนเตรท ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) เมื่อปล่อยให้มีการระเหยอย่างช้าภายใต้อุณหภูมิห้องจะทำให้เกิดการตกตะกอนของ CaHPO_4 เกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นอยู่ในรูปของ CaHPO_4 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ triclinic system ($P1$ space group) และมีค่า unit cell parameters ดังนี้คือ $a=6.91(1)$ Å, $b=6.63(3)$ Å, $c=6.99(3)$ Å, $\alpha=96.31^\circ$, $\beta=103.87^\circ$ และ $\gamma=88.37^\circ$ นอกจากนี้ยังพบอีกด้วยว่าที่ตำแหน่ง $2\theta=10-50^\circ$ มีการแสดงเอกลักษณ์เฉพาะบนระนาบ 001, 0-11, -111, 111, 200, -1-12, 120, -202, 0-22, 003, -320 และ -401 ตามลำดับ

Martinez *et al.* (2010) ศึกษาการสังเคราะห์และความเสถียรของสารประกอบแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -TCP) การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตนั้นเตรียมได้จากการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากนั้นให้ความร้อนแก่สารผสมด้วยอุณหภูมิตั้งแต่ 25-1,500 องศาเซลเซียส จากการศึกษพบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 408-526 องศาเซลเซียส ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบเบต้าแคลเซียมไพโรฟอสเฟต (β - $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียส แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่อเบต้าแคลเซียมไพโรฟอสเฟต (β - $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) และเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ 1,150 องศาเซลเซียส เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -TCP) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 1,470 องศาเซลเซียส ทำให้แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -TCP) เปลี่ยนไปอยู่ในรูป α' -TCP

Matsumoto *et al.* (2009) ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ที่เตรียมด้วยวิธีการ Co-doped ไอออนโลหะหนักลงไปในการทำปฏิกิริยาเพื่อศึกษาคุณสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial activities) จากการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตั้งต้น ร่วมกับการเติมสารละลายโลหะ AgNO_3 , $\text{AgNO}_3\text{-ZnO}$ และ $\text{AgNO}_3\text{-CuO}$ ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าเกิดการเกิดสารประกอบเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) เกิดจากการทำให้ปฏิกิริยาระหว่าง $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ CaCO_3 เป็นหลัก เมื่อทำการเติมสารละลายโลหะหนักลงไปในจึงเกิดการทำให้ปฏิกิริยากับโลหะชนิดนั้นๆ ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้นอกจากจะมีคุณสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์แล้วยังพบว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานวิจัยด้านยารักษาโรคและอุตสาหกรรมอาหารได้อีกด้วย

Mirhadi *et al.* (2011) พบว่าสารประกอบไตรแคลเซียมในระดับนาโน สามารถเตรียมได้โดยการตกตะกอนแบบเปียก (wet precipitation) จากการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) กับไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) pH 8 และ 10.8 อบตะกอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตะกอนไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง พบว่าที่ pH 8 ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเฟสผสมกันระหว่าง β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ กับ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ เมื่อ pH สารละลายเท่ากับ 10.8 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mourabet *et al.* (2012) ศึกษาการใช้ประโยชน์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตในการกำจัดฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนในสารละลาย ผ่านการออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken Design ดังนี้คือ แปรค่าน้ำหนักไตรแคลเซียมที่ 0.1-0.3 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟลูออไรด์แปรค่าที่ 30-60 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแปรค่าที่ 20-40 องศาเซลเซียส และ pH ของสารละลายแปรค่าที่ 4-11 ตามลำดับ โดยกำหนดให้มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90 นาที และเตรียมสารละลายฟลูออไรด์ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้นเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย A ที่เตรียมได้จากการละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 47 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 550 มิลลิลิตร แล้วเติมแอมโมเนีย ปริมาตร 20 มิลลิลิตร กับสารละลาย B ที่เตรียมได้จากการละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 26 กรัม ในน้ำกลั่น ปริมาตร 1300 มิลลิลิตร แล้วเติมแอมโมเนียปริมาตร 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ ตะกอนผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีขาว ล้างและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ผลจากการทดลองพบว่าที่สภาวะการทดลอง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส pH ของสารละลายเท่ากับ 4 และน้ำหนักไตรแคลเซียมที่ 0.29 กรัม เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดฟลูออไรด์ในสารละลายโดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึง 82.34 เปอร์เซ็นต์

Onoda *et al.* (2010) ศึกษาการเตรียมและการกำจัดตะกั่วด้วยสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้จากเปลือกเม่นทะเล โดยทำการล้างเปลือกเม่นทะเลให้สะอาดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำเปลือกเม่นทะเลมาทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 และ 0.2 โมลต่อลิตร และกรองสารละลายออก ต่อมาทำเปลือกหอยเม่นไปทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร อีกครั้ง จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เมื่อนำ DCPD 0.1 กรัม มากำจัดตะกั่วในสารละลายที่มีพีเอชเท่ากับ 5 และมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร พบว่า DCPD มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงถึงร้อยละ 99.94

Minh *et al.* (2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากแคลเซียมคาร์บอเนตและกรดอโรโทฟอสฟอริก เนื่องจากเป็นวัสดุตั้งต้นที่มีราคาไม่แพงนักและสามารถลดต้นทุนในการผลิตสารประกอบแคลเซียมได้ โดยได้ทำการศึกษาลำดับการเติมสารเคมีในการทำปฏิกิริยาว่ามีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นหรือไม่ ดังนี้ ในวิธีการที่ 1 ทำได้โดยการเตรียมสารละลายระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต 2 mol ผสมรวมกันกับน้ำ 800 mL ปั่นกวนที่ความเร็วรอบเท่ากับ 400 rpm เมื่อ pH ของสารละลายเริ่มคงที่ทำการเติม 1.2 mol ของกรดอโรโทฟอสฟอริก ปริมาตร 80 mL ลงไปด้วยอัตราเร็ว 2 mL/min ในวิธีการที่ 2 ทำได้โดยการเตรียมสารละลายระหว่าง 1.2 mol ของกรดอโรโทฟอสฟอริกผสมรวมกันกับน้ำ 800 mL ปั่นกวนที่ความเร็วรอบเท่ากับ 400 rpm เมื่อ pH ของสารละลายเริ่มคงที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 2 mol (200 กรัม) ลงไปด้วยอัตราเร็ว 5 g/min ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาจะใช้เวลาเท่ากันคือ 40 นาที ผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วยโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (MCPM, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (DCPAs) ออกตะแคลเซียมบิสไฮโดรเจน ฟอสเฟตเตตระคิส ฟอสเฟตเพนตะไฮเดรต (OCP, $\text{Ca}_8(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Ca-HA) ออกตะแคลเซียมฟอสเฟต (OCP) และบีโทปแคลเซียมคาร์บอเนตอะพาไทต์ (CAP, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{CO}_3$) โดยพบว่าวิธีการที่ 1 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กกว่าการทดลองในวิธีการที่ 2 เมื่อนำสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตไปทดสอบไม่วางรวมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการกำจัดตะกั่ว พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการที่ 1 และ 2 มีประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ที่ 322 และ 312 mg/g ตามลำดับ

Ramirez-Perez *et al.* (2013) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ แถบ Touro ประเทศสเปน ด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ ด้วยวิธีการดังนี้คือ ทำความสะอาดเปลือกหอยแมลงภู่ พร้อมกับบดให้ละเอียดจนมีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร และผสมเข้ากับดินตัวอย่างในอัตราส่วน 6, 12 และ 24 กรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ พร้อมทั้งคลุกเคล้าให้เข้ากัน และทิ้งระยะเวลาการทำปฏิกิริยาไว้ 72 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างดินนั้นประกอบไปด้วยโลหะหนักดังนี้คือ อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส โครเมียม แคดเมียม สังกะสี และนิกเกิล โดยพบว่าปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักคือปฏิกิริยาการตกตะกอน และอัตราส่วนระหว่างเปลือกหอยแมลงภู่ 24 กรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม นั้นเป็นอัตราส่วนที่สามารถบำบัดดินได้ดีที่สุด

Stoia *et al.* (2008) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ผ่านวิธีการตกตะกอน เปรียบเทียบระหว่างวิธีการสังเคราะห์สองวิธีคือ วิธีที่ 1 จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง 0.1 โมลต่อลิตร ของ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ และสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร วิธีที่ 2 จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง 0.1 โมลต่อลิตร ของ $\text{Ca}(\text{CH}_2\text{COO})_2$ และสารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยปรับ pH ของสารละลายทั้งสองวิธีให้ค่าเท่ากับ 9.5 ด้วยสารละลายแอมโมเนียม เมื่อทำปฏิกิริยาครบ 1 ชั่วโมง กรองตะกอนที่ได้จากนั้นอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีเกิดการตกตะกอนในรูป $\text{Ca}_9\text{HPO}_4(\text{PO}_4)_5\text{OH}$ ต่อมานำผลิตภัณฑ์ทั้งสองไปศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน (thermal analysis) ผลิตภัณฑ์ทั้งสองเกิดเป็นเฟสผสมระหว่างเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยมีแคลเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) แทรกอยู่ในผลิตภัณฑ์ด้วย

Zhao *et al.* (2014) ศึกษารายละเอียดระหว่างสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต และเฟสผสมระหว่างสารประกอบทั้งสอง (biphatic) โดยการเตรียมตัวอย่างดังกล่าวผ่านวิธีการดังต่อไปนี้คือ เตรียมสารละลายระหว่าง $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ และกรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) โดยคำนวณให้มีอัตราส่วนระหว่าง Ca/P เท่ากับ 1.450, 1.500, 1.525, 1.550, 1.575, 1.600, 1.625, 1.650 และ 1.670 ตามลำดับ โดยระหว่างการทำปฏิกิริยาจะมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วย จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปเผา โดยแปรค่าอุณหภูมิระหว่าง 750-1,150 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยานาน 3 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นประกอบไปด้วย สารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์, γ - $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ และ β -TCP ที่สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข JCPDS 9-432, JCPDS 17-499 และ JCPDS 9-169 ตามลำดับ โดยพบว่าที่อัตราส่วนระหว่าง Ca/P เท่ากับ 1.5 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ β -TCP โดยที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ยังคงพบเฟสผสมระหว่างสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์และ β -TCP เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้นเป็นจาก 850 ไปจนถึง 1,150 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์หลักในแต่ละอุณหภูมิที่ได้คือ β -TCP และยังพบอีกด้วยว่าที่อัตราส่วนระหว่าง Ca/P เท่ากับ 1.575 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือเกิดเป็นเฟสผสมระหว่างสารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์และ β -TCP ที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่าง Ca/P เท่ากับ 1.67 และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เท่ากับ 1,150 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือไฮดรอกซีอะพาไทต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
2. อะซิโตน (acetone) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
3. เลดไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
6. กรดไนตริก (HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
7. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Mallinckrodt

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) รุ่น LEO 1455 VP ยี่ห้อ EDAX
2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (XRD) รุ่น Philips PW 3040 ยี่ห้อ Philips
3. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอานาไลเซอร์ (TGA) รุ่น Pyris 1 TGA ยี่ห้อ Perkin Elmer
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) รุ่น FTIR Spectrum GX Perkin Elmer
5. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น AA-200 ยี่ห้อ Shimadzu
6. เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (BET) ยี่ห้อ Quantachrome
7. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 215 ยี่ห้อ Denver
8. เครื่องชั่งสารแบบละเอียด (Analytical balance) รุ่น Precisa 205A ยี่ห้อ SWISS

QUALITY

9. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น GALLENKAMP orbital shaker
10. เตาเผา Nabertherm Gmbh รุ่น Bahnhofstr
11. ตู้อบ (Oven) บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 การเตรียมเปลือกหอยเชอรี่

ทำการเก็บตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่จากหมู่บ้านคำไฮ ตำบลผาสุก อำเภอวังสามหมอ จังหวัดอุดรธานี ล้างสิ่งสกปรกออกด้วยน้ำสะอาด และนำไปแช่ในสารละลายของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 50% นาน 5 ชั่วโมง เพื่อกำจัดอินทรีย์วัตถุบริเวณเปลือกหอย ล้างด้วยน้ำสะอาดและผึ่งแดดให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยครกหินให้ละเอียด ร่อนด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 100 mesh เปลือกหอยที่ผ่านการร่อน จะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด	เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)
สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบ	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)
คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
คุณสมบัติทางความร้อน	เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA)
พื้นที่ผิวจำเพาะ	การดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET)

3.3 การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต

สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้ในการศึกษา จะถูกเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่กับสารตั้งต้นสองชนิด ได้แก่ โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, MCPM) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, DCPD) ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการดังนี้คือ

3.3.1 การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรตกับเปลือกหอยเชอรี่

การเตรียมโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรตจะเตรียมขึ้นโดยอ้างอิงสถานะของ Boonchom (2009) ซึ่งทำได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70% กับเปลือกหอยเชอรี่ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70% ต่อแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเชอรี่ในข้อ 3.2 เท่ากับ 2:1 ตามลำดับ และใช้อะซิโตนเป็นตัวกลางในการลดอุณหภูมิจากการทำปฏิกิริยา จากนั้นคนสารละลายอย่างต่อเนื่องด้วยแท่งแก้ว ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อไม่เกิดฟองก๊าซ จากนั้นอบผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จะได้สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, MCPM)

นำ MCPM ที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับเปลือกหอยเชอรี่ในข้อ 3.2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ MCPM ต่อแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเชอรี่เท่ากับ 1:2 ตามลำดับ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Hsu, 2002 และ Alqap and Sopyan, 2009) จะได้สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, TCP) ซึ่งในลำดับต่อไปจะขอเรียกผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยานี้ว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

3.3.2 การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรตกับเปลือกหอยเชอรี่

การเตรียมไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD) จะเตรียมขึ้นโดยอ้างอิงสถานะของ บรรจง บุญชม และ นราธิป วิทยากร (2552) ซึ่งทำได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50% กับเปลือกหอยเชอรี่ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50% ต่อแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเชอรี่ในข้อ 3.2 เท่ากับ 1:1 ตามลำดับ และใช้อะซิโตนเป็นตัวกลางในการลดอุณหภูมิจากการทำปฏิกิริยา จากนั้นคนสารละลายอย่างต่อเนื่องด้วยแท่งแก้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อไม่เกิดฟองก๊าซ อบผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จะได้สารประกอบไฮดรอกซีอะปาทิต (CaHPO₄·2H₂O, DCPD)

นำ DCPD ที่สังเคราะห์ได้มาบดผสมกับเปลือกหอยเชอรี่ในข้อ 3.2 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของไฮดรอกซีอะปาทิตต่อแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเชอรี่เท่ากับ 2:1 ตามลำดับ เเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (Hsu, 2002) จะได้ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Ca₃(PO₄)₂, TCP) ซึ่งในลำดับต่อไปจะขอเรียกผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยานี้ว่า ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากทั้งสองวิธีการจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไตรแคลเซียมฟอสเฟต

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบ	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)
คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
พื้นที่ผิวจำเพาะ	การดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET)

3.5 ศึกษาการใช้ประโยชน์จากไตรแคลเซียมฟอสเฟตในการกำจัดสารละลายตะกั่ว (Pb)

3.5.1 การเตรียมสต็อกของสารละลายตะกั่ว

ชั่ง Pb(NO₃)₂ 1.5985 g ใส่ลงในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับให้สารละลายมีปริมาตรสุทธิเท่ากับ 1,000 ml ในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 1,000 mg/L

3.5.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดตะกั่ว

3.5.2.1 ผลของพีเอชของสารละลายโลหะที่ใช้ในการศึกษา

ชั่ง TCP-M 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลาย Pb(NO₃)₂ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (pH 2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร อีกครั้ง นำกระดาษกรองอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการกรองนำไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชัน (AAS) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยน pH ของสารละลายจาก pH 2 เป็น 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ (ทำการทดลองชุดควบคุมโดยใช้สารละลาย Pb(NO₃)₂ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำ Blank โดยเติมไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.2 กรัม ลงในน้ำกลั่น ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 2, 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ)

ทำการทดลองที่กล่าวมาซ้ำอีกครั้งหนึ่ง โดยเปลี่ยนวัสดุที่ใช้จาก TCP-M เป็น TCP-D เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2.2 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสม

ซั่ง TCP-M มา 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเหมาะสมตามข้อที่ 3.5.2.1 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร อีกครั้ง สารละลายที่ได้จากการกรอง นำไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชัน (AAS) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่าจาก 24 ชั่วโมง เป็น 1, 3, 5, 7 และ 10 นาที ตามลำดับ (ทำการทดลองชุดควบคุมโดยใช้สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรและทำ Blank โดยเติมไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.2 กรัม ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการทดลองที่กล่าวมาซ้ำอีกครั้งหนึ่ง โดยเปลี่ยนวัสดุดูดซับจาก TCP-M เป็น TCP-D

3.5.2.3 ผลของปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ซั่ง TCP-M มา 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเหมาะสมตามข้อที่ 3.5.2.1 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm ตามเวลาที่เหมาะสมตามข้อที่ 3.5.2.2 เมื่อครบเวลาที่กำหนด กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร อีกครั้ง สารละลายที่ได้จากการกรอง นำไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชัน (AAS) ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนน้ำหนักไตรแคลเซียมฟอสเฟตจาก 0.2 กรัม เป็น 0.02, 0.05, 0.1, และ 0.15 กรัม ตามลำดับ (ทำการทดลองชุดควบคุมโดยใช้สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำ Blank โดยเติมไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.02, 0.05, 0.1, และ 0.15 กรัม ตามลำดับและน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ทำการทดลองที่กล่าวมาซ้ำอีกครั้งหนึ่ง โดยเปลี่ยนวัสดุดูดซับจาก TCP-M เป็น TCP-D

3.6 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดลองถูกเก็บรวบรวมมาจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่แห่งหนึ่ง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบผสมรวม (composite) โดยผสมรวมน้ำเสียจากบ่อน้ำทิ้งทุกๆ 2 ชั่วโมง ปรับพีเอชให้มีค่าน้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเพื่อรักษาสภาพ พร้อมกับเก็บรักษาตัวอย่างน้ำเสียที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	pH มิเตอร์
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์
ตะกั่ว เหล็ก นิกเกิล	เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโต

เอกสารนี้เป็นที่เก็บที่เก็บสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ซัง TCP-M ตามน้ำหนักที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.2.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปรับให้มี pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อที่ 3.5.2.1 เปรียบเทียบกับน้ำเสียที่มี pH มาจากโรงงานอุตสาหกรรม เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อที่ 3.5.2.2 เมื่อครบเวลาที่กำหนด กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร ไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เหลือจะถูกอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบและรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ สารละลายจะนำไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในขั้นตอนต่อไป (ทำการทดลองชุดควบคุมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำ Blank โดยเติมไตรแคลเซียมฟอสเฟตตามน้ำหนักที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.2.3 และน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตรโดยปรับให้มี pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อที่ 3.5.2.1 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อที่ 3.5.2.2)

ทำการทดลองที่กล่าวมาซ้ำอีกครั้งหนึ่ง โดยเปลี่ยนวัสดุดูดซับจาก TCP-M เป็น TCP-D

บทที่ 4

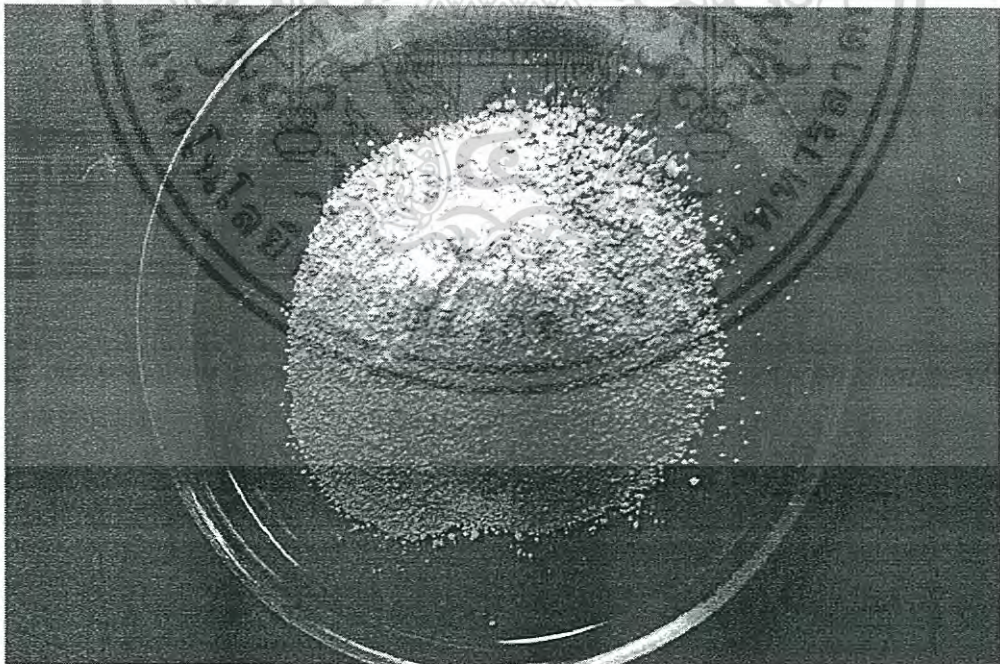
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) จากเปลือกหอยเชอรี่ โดยมีวิธีการสังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันคือ วิธีการที่ 1 เป็นการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟต โมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และเปลือกหอยเชอรี่ และวิธีการที่ 2 เป็นการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมฟอสเฟต ไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเปลือกหอยเชอรี่ โดยสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตทั้งสองวิธีที่สังเคราะห์ได้นั้น จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบ

แคลเซียมฟอสเฟต

เปลือกหอยเชอรี่ที่ผ่านการทำความสะอาดและแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำไปบดด้วยครกหินให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรกร่อนขนาด 100 เมช จะได้ตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่ที่มีสีขาวนวล ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เปลือกหอยเชอรี่บดละเอียดขนาด 100 เมช

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุและองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอรี่ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ผลการวิเคราะห์พบว่าเปลือกหอยเชอรี่มีแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบหลัก อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF นี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณต่ำได้ นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ยังต้องอาศัยการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมและต้องอ้างอิงถึงค่ามาตรฐานการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ที่มีความแม่นยำสูง

สูงถึงร้อยละ 71 และมีธาตุเหล็ก (Fe) และทองแดง (Cu) เป็นองค์ประกอบรวมเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 4.1) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่ในรูปสารประกอบออกไซด์นั้นพบว่าเปลือกหอยเชอร์รี่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 99.3 เมื่อพิจารณาปริมาณ แคลเซียม (Ca) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่วิเคราะห์ได้พบว่ามีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ควรเป็นทางทฤษฎี กล่าวคือ แคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ (CaCO₃) เมื่อเกิดการสลายตัวควรมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 56 เท่านั้น และควรมีปริมาณแคลเซียม (Ca) ที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 40 (รัตนกรและคณะ, 2554) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากขีดจำกัดในการวิเคราะห์ของเครื่องมือที่ใช้ไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ได้ จึงทำให้ผลการคำนวณปริมาณแคลเซียม (Ca) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) คลาดเคลื่อนไป

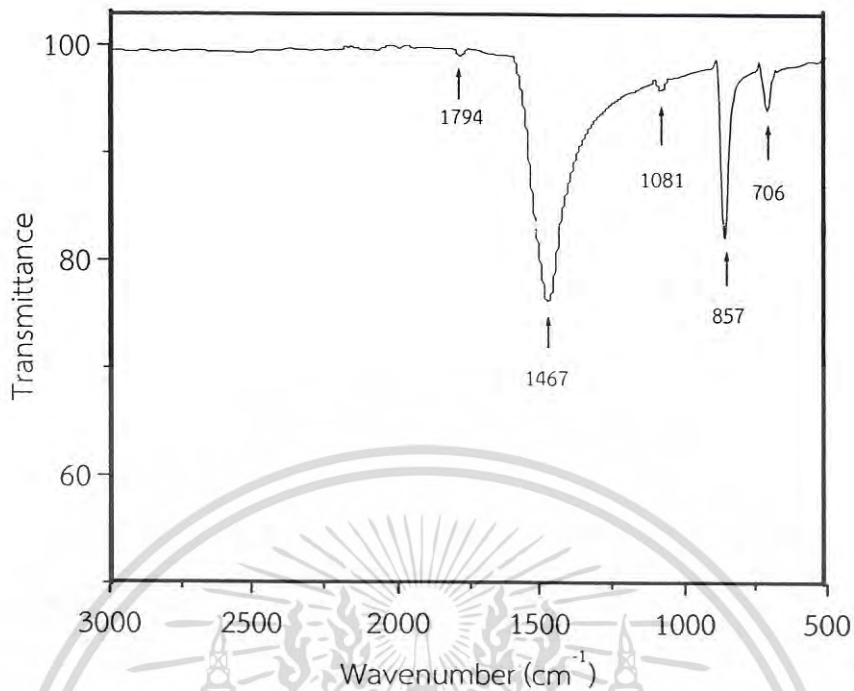
ตารางที่ 4.1 ธาตุและสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกหอยเชอร์รี่

CaO	Fe ₂ O ₃	Cu	Compton	Rayleigh	Norm	-
99.3%	0.281%	0.259%	0.83	1.03	100%	-
O	Ca	Fe	Cu	Compton	Rayleigh	Norm
28.5%	71%	0.197%	0.207%	0.83	1.03	100%

4.1.1 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต

4.1.1.1 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) พบว่าเปลือกหอยเชอร์รี่บดละเอียดแสดงพีคสำคัญปรากฏที่ตำแหน่ง 1467 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคที่แสดงการสั่นของหมู่คาร์บอเนต ที่เกิดจากพันธะระหว่าง C-O แบบ stretching และพีคสำคัญที่ตำแหน่ง 1081 และ 857 cm⁻¹ เป็นพีคที่แสดงการสั่นของหมู่คาร์บอเนต CO₃²⁻ ที่เกิดจากพันธะระหว่าง C-O ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะปรากฏขึ้นคู่กันในสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างผลึกแบบ aragonite phase ดังรายงานไว้ในงานวิจัยของ Andersen and Brecevic (1991) นอกจากนี้ยังปรากฏพีคสำคัญที่ตำแหน่ง 1794 และ 706 cm⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่คาร์บอกซิลิกแบบ stretching และหมู่อัลคิล ตามลำดับ (รูปที่ 4.2) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า (Commercial) จากบริษัท Analytical Univar ที่มีความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ดังรายงานไว้ในงานวิจัยของ Islam *et al.* (2011) พบว่าสเปกตรัมของเปลือกหอยเชอร์รี่ทั้งห้าตำแหน่งมีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าดังกล่าว

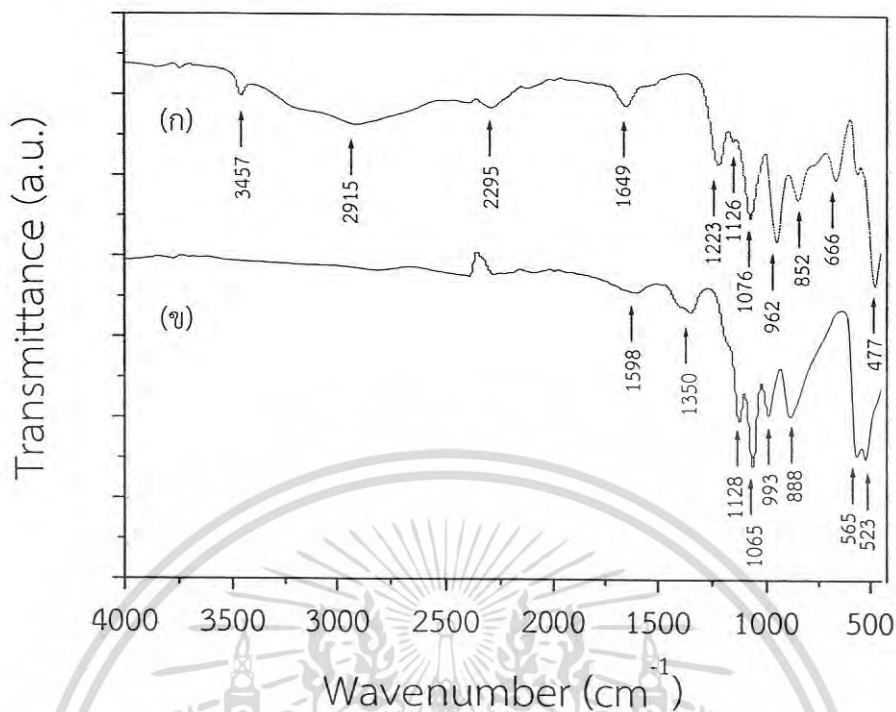


รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของเปลือกหอยเชอรี่

4.1.1.2 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, MCPM)

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) พบว่า สารประกอบที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ แสดงพิกที่เป็นเอกลักษณ์สำคัญของสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (รูปที่ 4.3 (ก)) โดยแสดงพิกสำคัญที่ตำแหน่ง 1223 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ P-O-H bending ในแนวระนาบ พิกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 1126 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-P-O stretching แบบไม่สมมาตร พิกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 1076 และ 962 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ $\text{P}(\text{OH})_2$ stretching แบบไม่สมมาตร พิกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 569 และ 477 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-P-O bending โดยที่ตำแหน่ง 477 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ O-P-O bending ในลักษณะ rocking mode ซึ่งพิกที่ปรากฏ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่กล่าวมาแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ขณะที่พิกที่ปรากฏที่ตำแหน่ง 3457 , 2915 , 2295 , 1649 และ 666 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H ซึ่งเป็นพิกที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีอยู่ในโมเลกุลของน้ำ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boonchom (2009) และ Boonchom and Danvirutai (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม FTIR ของ (ก) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (CaH_2PO_4) $_2$ · H_2O และ (ข) ไดแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4)

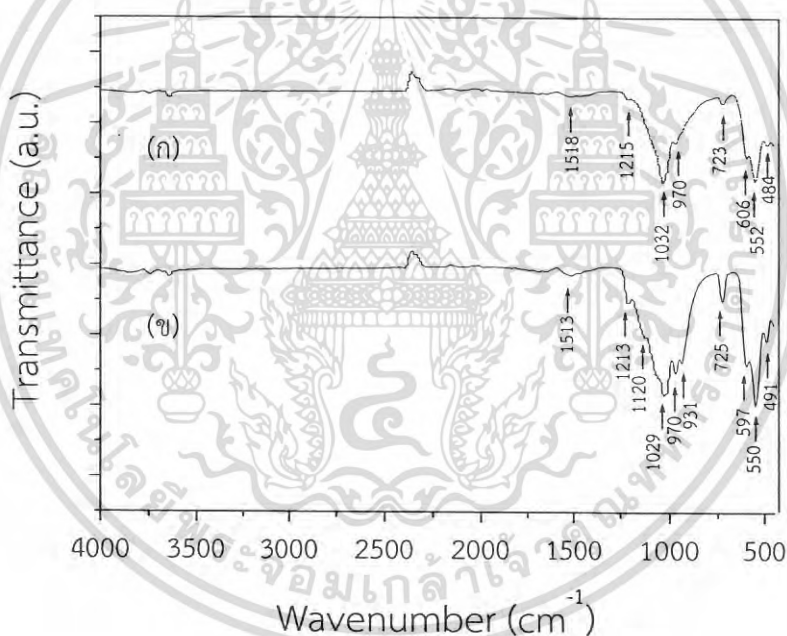
4.1.1.3 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, DCPD)

ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) แสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) พบว่า สารประกอบที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงพิกที่เป็นเอกลักษณ์สำคัญของสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) เนื่องจากบริเวณช่วงความยาวคลื่น $3500\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ ไม่ปรากฏการสั่นของพันธะ O-H หรือหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีอยู่ในโมเลกุลของน้ำ แสดงให้เห็นว่าไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่มีไฮเดรตเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล (CaHPO_4) แต่จะปรากฏเพียงการสั่นของพันธะ P-O ในหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ดังนั้นคือ ปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 1350 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของ HPO_4^- พิกที่ตำแหน่ง 1128 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-P-O stretching แบบไม่สมมาตร พิกที่ตำแหน่ง 1065 และ 993 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ P(OH)_2 stretching แบบไม่สมมาตรและปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 565 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-P-O bending (รูปที่ 4.3 (ข)) จากผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมียังพบอีกด้วยว่าช่วงความยาวคลื่น $1,600\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะเดียวกันกับไดแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) ที่ถูกรายงานไว้ในงานวิจัยของ Tas (2009) และ Furuichi *et al.* (2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.4 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มนอินฟราเรด (FTIR) พบว่าสารประกอบที่สังเคราะห์ได้แสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์สำคัญของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต โดยแสดงพีคสำคัญที่ตำแหน่ง 1032 และ 970 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ P-O ภายในโมเลกุล พีคสำคัญที่ตำแหน่ง 606 และ 552 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของหมู่ PO_4^{3-} ผลการทดลองคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ดังนี้คือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ปรากฏพีคสำคัญที่ตำแหน่ง 1,029 และ 970 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ P-O พีคสำคัญที่ตำแหน่ง 597 และ 550 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของหมู่ PO_4^{3-} ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.4 (ข) การปรากฏพีคที่สำคัญที่ตำแหน่งดังกล่าวสอดคล้องกับไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ถูกรายงานไว้ในงานวิจัยของ Stoia *et al.* (2008) : Mirhadi *et al.* (2011) : Mourabet *et al.* (2012) และงานวิจัยของ Zhao *et al.* (2014) ตามลำดับ



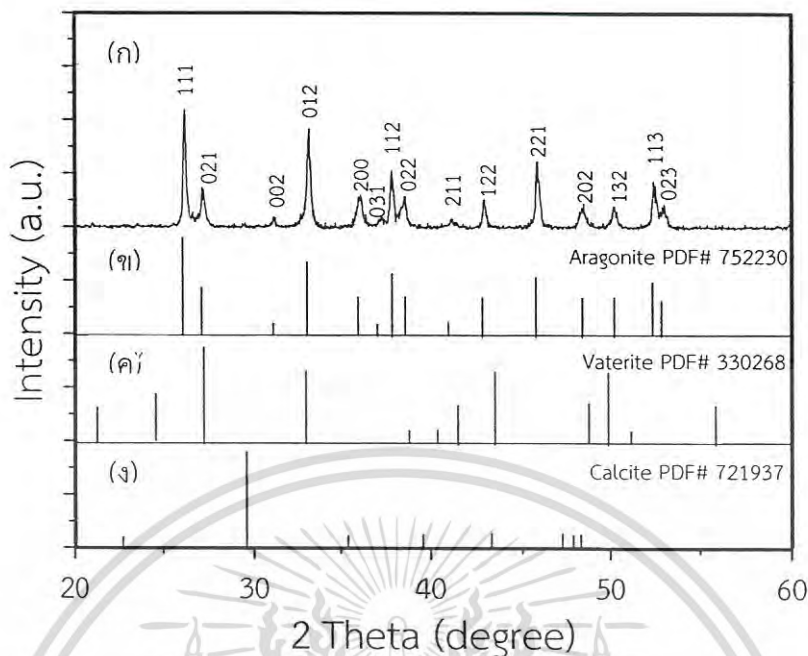
รูปที่ 4.4 สเปกตรัม FTIR ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) (ก) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) (ข)

4.1.2 โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

4.1.2.1 โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเชอรี่

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยเชอรี่ เทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างผลึก 3 รูป ได้แก่ Aragonite (PDF#752230) Vaterite (PDF#330268) และ Calcite (PDF#721937) แสดงดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

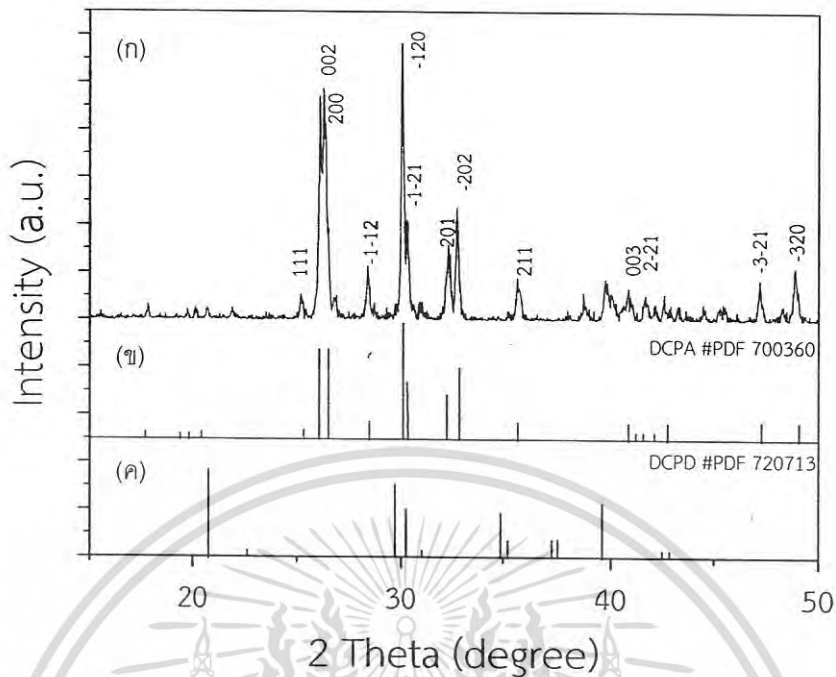


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงองศาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของ (ก) เปลือกหอยเชอร์รี่ และแคลเซียมคาร์บอเนต 3 รูปผลึกได้แก่ (ข) Aragonite, (ค) Vaterite และ (ง) Calcite

จากรูปพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยเชอร์รี่ที่เตรียมขึ้นดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2 สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมาตรฐานหมายเลข PDF#752230 ซึ่งเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างผลึกแบบ aragonite phase โดยมีพีคหลักแสดงเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 26.220 องศา บนระนาบ 111, 27.207 องศา บนระนาบ 021, 33.167 องศา บนระนาบ 012, 37.882 องศา บนระนาบ 112, 45.843 องศา บนระนาบ 221, 48.447 องศา บนระนาบ 202, 52.438 องศา บนระนาบ 113 ตามลำดับ ซึ่งช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอร์รี่ในหัวข้อที่ 4.1.1.1 ได้ว่าเปลือกหอยเชอร์รี่มีแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีโครงสร้างเฟส aragonite

4.1.2.2 โครงสร้างผลึกของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, MCPM)

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ MCPM ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยเชอร์รี่เทียบกับสารมาตรฐานหมายเลข PDF#090347 ซึ่งเป็นสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่มีโครงสร้างแบบ anorthic (#PDF 090347) แสดงดังรูปที่ 4.6



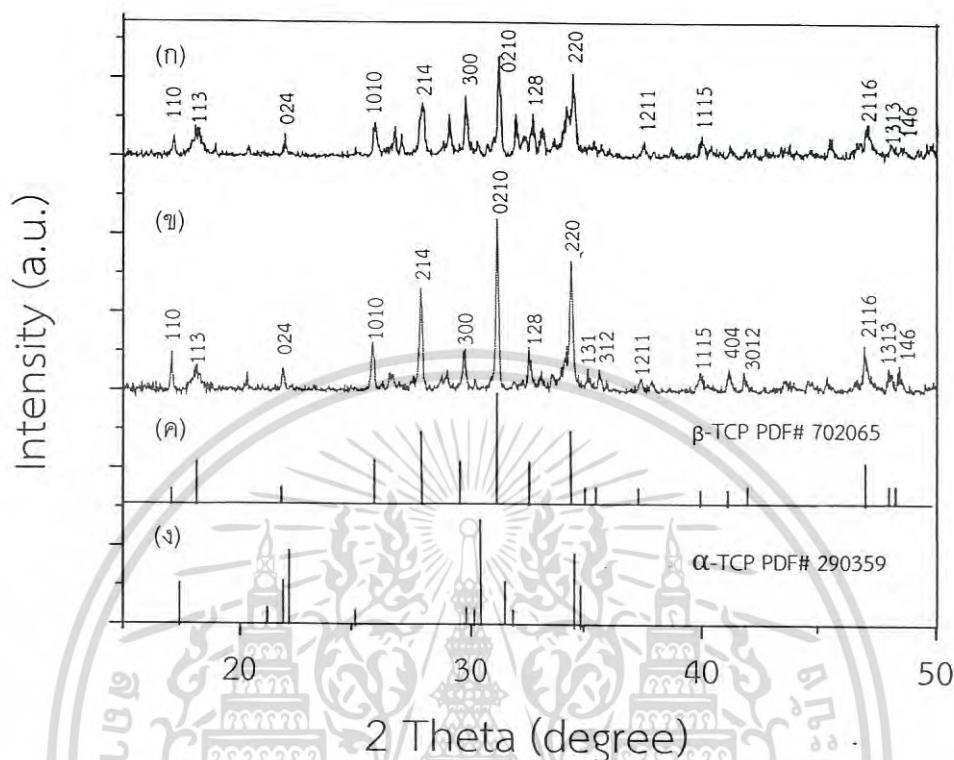
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงองศาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของ (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรตที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยเชอร์รี่, (ข) สารมาตรฐานไตรแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (DCPA) และ (ค) สารมาตรฐานไตรแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD)

เมื่อศึกษาคุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากรูปที่ 4.7 พบว่าสารประกอบที่สังเคราะห์ได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สอดคล้องกับสารมาตรฐาน PDF#700360 ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (DCPA) หรือแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (CaHPO_4) โดยมีพิกัดหลักแสดงเอกลักษณ์สำคัญ ที่ตำแหน่ง 26.366 บนระนาบ 002, 26.545 บนระนาบ 200, 28.533 บนระนาบ -1-12, 30.172 บนระนาบ -120, 30.394 บนระนาบ -1-24, 32.458 บนระนาบ 201, 32.860 บนระนาบ -202, 35.898 บนระนาบ 211, 40.024 บนระนาบ 003 และ 41.759 บนระนาบ 2-21 ตามลำดับ (แสดงรูปที่ 4.7) ซึ่งผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ DCPA ช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของ DCPA ในหัวข้อที่ 4.1.1.3 ได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอร์รี่และกรดอโรฟอสฟอริกเข้มข้น 50% (รายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.2) คือ DCPA

4.1.2.4 โครงสร้างผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, TCP)

ไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้ในการศึกษาเตรียมจากสารตั้งต้น 2 ชนิดคือโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (CaHPO_4) โดยผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จะใช้คำย่อในการจำแนกคือ TCP-M และ TCP-D ตามลำดับ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ TCP ที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 ชนิด เทียบกับสารมาตรฐานหมายเลข PDF# 702065 ซึ่งเป็นเอกสารที่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการดำเนินการค้าสารประกอบเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ที่มีโครงสร้างแบบ rhombohedral และสารไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานหมายเลข PDF# 290359 ซึ่งเป็นสารประกอบอัลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -TCP) แสดงดังรูปที่ 4.8

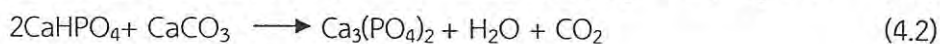
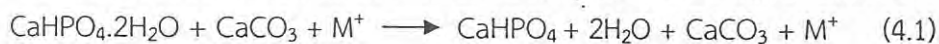


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงองค์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของ (ก) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M), (ข) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D), (ค) สารมาตรฐานเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) และ (ง) สารมาตรฐานอัลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -TCP)

จากรูปพบว่า TCP-M และ TCP-D มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สอดคล้องกับสารมาตรฐาน PDF#702065 ซึ่งเป็นสารประกอบเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral โดยมีพีคที่เป็นเอกลักษณ์บนระนาบ 214, 300, 0210, 220, 1211 และ 315 ซึ่งตรงกับตำแหน่ง 2 Theta ที่ 27.777, 29.620, 31.023, 34.335, 37.328 และ 37.815 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มของระดับสัญญาณที่วัดได้จาก TCP-M ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) กับเปลือกหอยเชอริ มีค่า Intensity ต่ำกว่าความเข้มของระดับสัญญาณที่วัดได้จาก TCP-D ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) กับเปลือกหอยเชอริ (CaCO_3) นอกจากนี้ ยังพบว่า TCP-M มีการแสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์บริเวณตำแหน่ง 2 theta อื่นๆที่ไม่สอดคล้องกับสารประกอบเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) (สารมาตรฐานหมายเลข PDF#702065) เกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่ง 30.296 และ 31.935 ตามลำดับ (แสดงรายละเอียดดังตารางที่ ค-8 ภาคผนวก ค) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกัน จึงมีผลต่อกลไกการก่อตัวเป็นสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

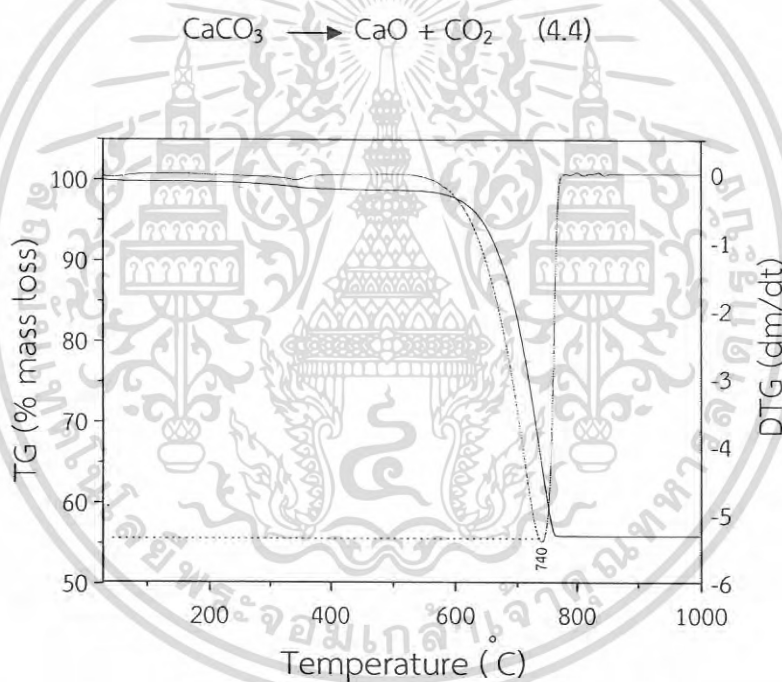
จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า คุณสมบัติทางความร้อนของสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟต โมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการกำจัดน้ำออกจากโมเลกุล (Dehydration) ต่อเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปจนถึง 597 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการ deprotonated phosphate group หรือ phosphate condensation จนทำให้สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมไพโร (β- $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) (Boonchom, 2009) ซึ่งมีกลไกการเปลี่ยนรูปแตกต่างจากไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรต (CaHPO_4) เนื่องจากโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่ไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮไดรต (CaHPO_4) จะมีเพียงโมเลกุลของไฮโดรเจนที่จะสลายไปเท่านั้นที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเบต้าแคลเซียมไพโรฟอสเฟต (β- $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 408-526 องศาเซลเซียส (Kawabata *et al.*, 2011) ในทำนองเดียวกันยังพบว่า 2 โมล ของ CaHPO_4 จะเกิดการสลายตัวกลายเป็น $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ได้อีกด้วย (Xiaowei *et al.*, 2011) นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Bian และคณะ ในปี 2004 กล่าวว่า การเปลี่ยนเฟสของแคลเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ไปเป็นเบต้าแคลเซียมไพโรฟอสเฟต (β- $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) นั้นจะต้องให้อุณหภูมิสูงถึง 750 องศาเซลเซียส และจะคงอยู่ในรูปนี้เมื่อได้รับอุณหภูมิระหว่าง 750-1,000 องศาเซลเซียส ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส เบต้าแคลเซียมไพโรฟอสเฟต (β- $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแอลฟาแคลเซียมไพโรฟอสเฟต (α- $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ตามลำดับ (Bian *et al.*, 2004) เมื่อแคลเซียมไพโรฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Mirhadi *et al.*, 2011 และ Alqap and Sopyan, 2009) การใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกันดังที่กล่าวมา จึงมีผลทำให้กลไกในเกิดผลิตภัณฑ์แตกต่างกันออกไปด้วย จากการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมยังพบว่าการสังเคราะห์สารประกอบเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP) สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่ง $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ จะเกิดการกำจัดน้ำออกจากโมเลกุลเมื่อได้รับความร้อน กลายเป็น CaHPO_4 แสดงดังสมการที่ 4.1 เมื่อ CaHPO_4 ทำปฏิกิริยากับ CaCO_3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ β-TCP (Matsumoto *et al.*, 2009) สอดคล้องกับสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Martinez และคณะ ในปี 2010 และงานวิจัยของ Kawabata และคณะ ในปี 2011 ตามลำดับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 4.2-4.3 จากผลการทดลองจึงอาจกล่าวได้ว่า ที่สภาวะการสังเคราะห์ที่ใช้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง CaHPO_4 มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ มากกว่า $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$



อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ TCP ทั้งสองชนิด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของ TCP ในหัวข้อที่ 4.1.1.4 และ 4.1.1.5 ซึ่งสามารถสนับสนุนได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองชนิดคือ MCPM และ DCPA กับเปลือกหอยเชอรี่ (รายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.2 และ 3.3.2) คือ β-TCP

4.1.3 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกหอยเชอร์รี่

การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (TGA) พบว่าเปลือกหอยเชอร์รี่มีคุณสมบัติในการทนความร้อนได้ดี แสดงดังกราฟ DTG (Derivative Thermogravimetry) (รูปที่ 4.9) กล่าวคือเมื่อให้ความร้อนแก่เปลือกหอยเชอร์รี่ระหว่าง 30-590 องศาเซลเซียส พบว่าไม่เกิดการสลายตัวของเปลือกหอยเชอร์รี่ ขณะที่เมื่อให้ความร้อนแก่เปลือกหอยเชอร์รี่ไปจนถึง 600 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว และพบว่าที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ สอดคล้องกับผลของมวลที่สูญหายไป เนื่องจากมีน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สุดท้ายเหลืออยู่อย่างคงที่ที่ 56 เปอร์เซ็นต์ (แสดงดังกราฟ TG) โดยคาดว่าปฏิกิริยานี้เป็นการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (decomposition) ที่มีค่าร้อยละสูญเสียมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) แสดงดังสมการที่ 4.4 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Islam *et al.* (2013) และงานวิจัยของ รัตนาภรและคณะ (2554) ที่พบว่าเปลือกหอยในธรรมชาติจะมีช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกหอยเชอร์รี่แสดง TG และ DTG

4.1.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต

รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเปลือกหอยเชอร์รี่ โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (Ca(H₂PO₄)₂·H₂O, MCPM) ไตรแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (CaHPO₄·2H₂O, DCPD) ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) โดยรูปที่ 4.10 (ก) พบว่าสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอร์รี่มีลักษณะผลึกรูปร่างเป็นแท่งและมีการรวมตัวกันเป็นผลึกขนาดใหญ่และเล็กกระจายอยู่ทั่วไป เมื่อนำเปลือกหอยเชอร์รี่มาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70% จะได้สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (MCPM) ที่มีผลึกแสดงดังรูปที่ 4.10 (ข) ซึ่งเป็นผลึกขนาดเล็ก มีรูปร่างอนุภาคเป็นเกล็ดสี่เหลี่ยมที่มีปลายมุม

เอกสตรัคชันและผลึกขนาดเล็ก มีรูปร่างอนุภาคเป็นเกล็ดสี่เหลี่ยมที่มีปลายมุมไม่วาร์ณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหลมเกาะกลุ่มรวมตัวกัน การสังเคราะห์ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (DCPD) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอร์รี่และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ จะได้สารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟต (DCP) ที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นเกล็ดกลมมนขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.10 (ค) เมื่อนำสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่ได้มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับเปลือกหอยบดละเอียด (CaCO_3) ภายใต้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ตามหัวข้อที่ 3.3.1 และ 3.3.2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: TCP-D) ตามลำดับ ซึ่งแสดงสัณฐานวิทยา ดังรูปที่ 4.10 (ง) และ 4.10 (จ) ตามลำดับ ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ทั้งสองพบว่า ผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดมีลักษณะสัณฐานวิทยาที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีอนุภาคขนาดเล็กและมีรูปร่างอนุภาคที่ไม่สามารถระบุรูปร่างที่แน่นอนได้ เกาะกลุ่มรวมตัวกัน โดยลักษณะของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) จะมีลักษณะการเกาะกลุ่มจับตัวรวมกันอยู่มากกว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

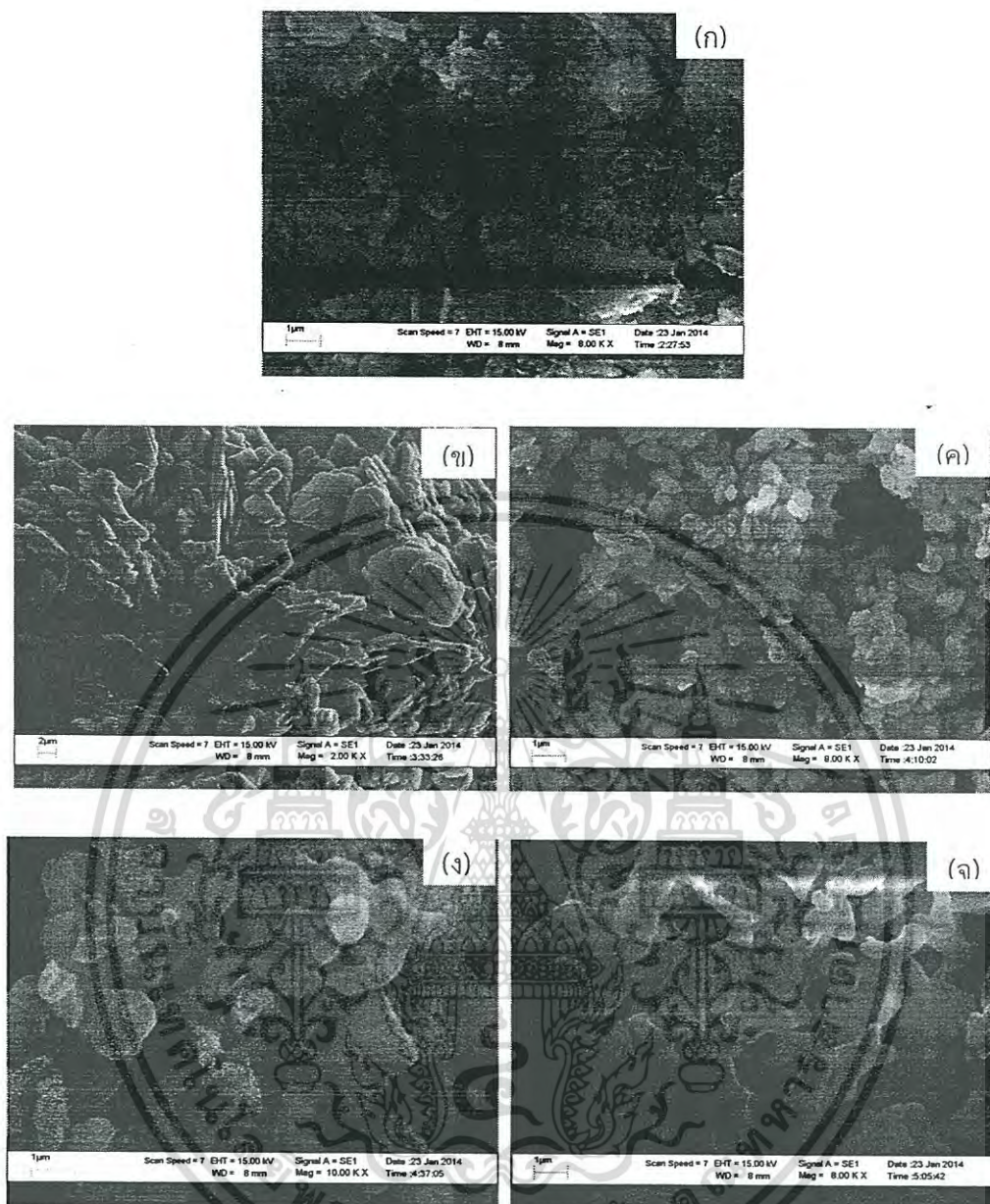
4.1.5 พื้นที่ผิวของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET) ของเปลือกหอยเชอร์รี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cc/g)	ขนาดรูพรุน (\AA)
เปลือกหอยเชอร์รี่	25.26	0.06997	110.8
TCP-M	8.098	0.02246	110.9
TCP-D	9.631	0.03702	153.7

ผลการวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนแสดงให้เห็นว่า เปลือกหอยเชอร์รี่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนสูงกว่า TCP-M และ TCP-D ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากกลไกการก่อตัวเป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างการทำปฏิกิริยาของเปลือกหอย (CaCO_3) และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต (MCPM และ DCPA) ภายใต้อุณหภูมิสูงนั้น มีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของผลิตภัณฑ์ลดน้อยลง นอกจากนี้ ยังพบว่า TCP-D มีพื้นที่และขนาดรูพรุนสูงกว่าพื้นที่และขนาดรูพรุนของ TCP-M ทั้งนี้จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า TCP ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณพื้นที่ผิวน้อยมากเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับทางการค้าหรือวัสดุดูดซับที่เตรียมได้จากวัสดุจากธรรมชาติชนิดอื่นๆ ซึ่งจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 600-1,600 ตารางเมตรต่อกรัม (วีรียา, 2550) อีกทั้งไม่ถูกจัดว่าเป็นวัสดุดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไม่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (ธราพงษ์, 2553)



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (ก) เปลือกหอยเขมือรีที่กำลังขยาย 8000 เท่า, (ข) MCPM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า, (ค) DCPD ที่กำลังขยาย 8000 เท่า, (ง) TCP-M ที่กำลังขยาย 10000 เท่า, (จ) และ TCP-D ที่กำลังขยาย 8000 เท่า

แต่คุณสมบัติเด่นของ TCP และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่างๆที่ทำให้มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักคือ มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนเหนียวน้ำไอออน และ จับเก็บประจุได้ดีเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกที่มีความเสถียรและมีจำนวนอะตอมภายในโครงสร้างจำนวนมากที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Dorozhkin, 2011 และ Wang *et al.*, 2010) อีกทั้งภายในโครงสร้างผลึกของ TCP นั้นมีช่องว่างจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดการดูดซับด้วยแรงอ่อนบนพื้นที่ผิวดังกล่าว ทำให้ TCP และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตยังคงได้รับความสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

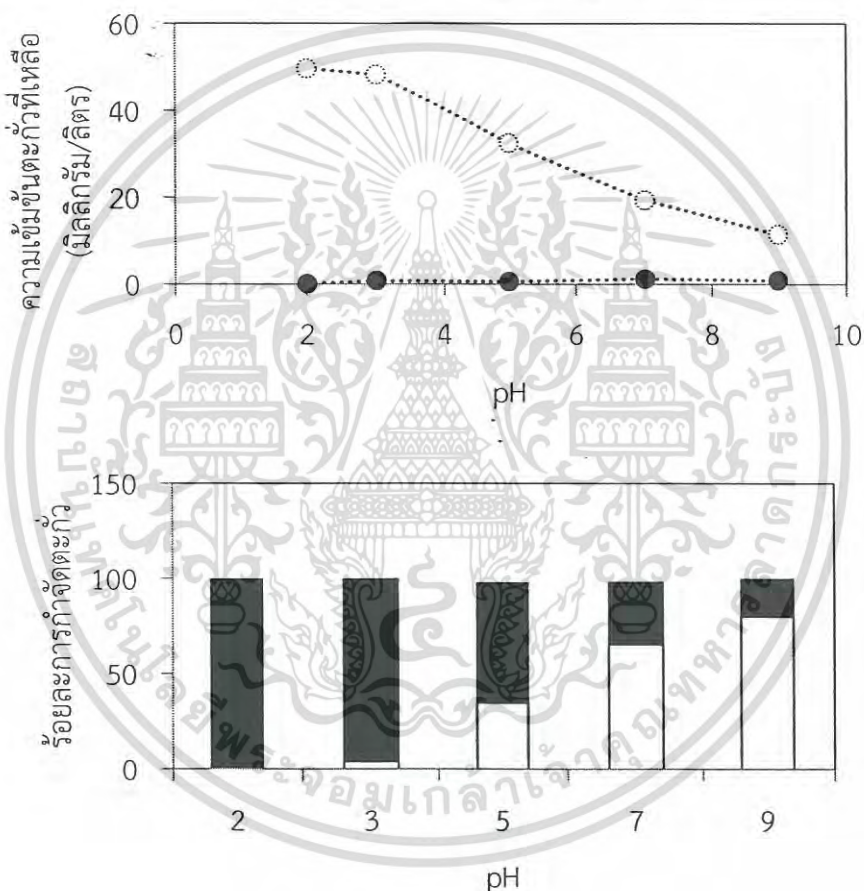
4.2 การใช้ประโยชน์จากไตรแคลเซียมฟอสเฟตในการกำจัดสารละลายตะกั่ว (Pb)

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดสารละลายตะกั่ว ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอร์รี่พร้อมศึกษาผลของพีเอช ระยะเวลาในการสัมผัสและปริมาณของไตรแคลเซียมฟอสเฟตต่อการกำจัดโลหะตะกั่ว ผลการทดลองดังนี้คือ

4.2.1 ผลของพีเอช

4.2.1.1 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) โดยใช้ปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) 0.2 กรัม สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปรับให้มีพีเอชต่างกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-M ที่พีเอชต่างๆ (ก) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว และ (ข) ร้อยละการกำจัดตะกั่วในชุดทดลองที่เติม TCP-M (■, ●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-M (□, ○) ที่พีเอชต่างๆ

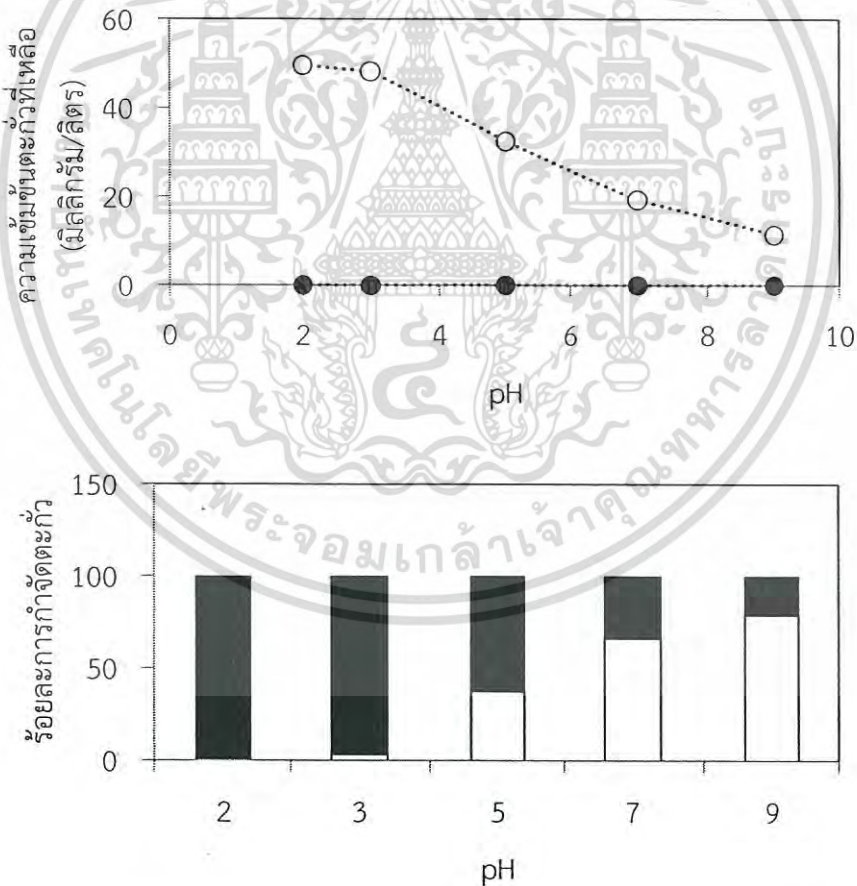
จากรูปที่ 4.11 (ก) (รายละเอียดดูตาราง ค-11 ในภาคผนวก ค) พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในชุดทดลองมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว โดยที่พีเอชเท่ากับ 2 สารละลายมีความเข้มข้นของตะกั่วเหลือเพียง 0.176 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3, 5, 7 และ 9 พบว่ามีตะกั่วเหลือในสารละลายเท่ากับ 0.108, 1.109, 0.931 และ 0.115 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดตะกั่วในชุดทดลองเท่ากับ 99.65, 99.109, 98.65 และ 98.15

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

99.78, 97.78, 98.14 และ 99.77 (รูปที่ 4.11) เมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่วในชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-M พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายมีค่าลดลง โดยความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าเท่ากับ 49.64, 48.13, 32.76, 17.40 และ 10.13 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพีเอชสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 3, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับพีเอชให้สูงขึ้นด้วย NaOH ทำให้เกิดการตกตะกอนของตะกั่วในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) สอดคล้องกับร้อยละการกำจัดของตะกั่วในชุดควบคุมที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามพีเอชของสารละลาย (รูปที่ 4.11) เมื่อนำค่าร้อยละการกำจัดในชุดควบคุมไปหักลบออกจากค่าร้อยละการกำจัดในชุดทดลองพบว่า TCP-M สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุด เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 2 พีเอชดังกล่าวจึงเป็นค่าที่ถูกเลือกให้นำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

4.2.1.2 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) โดยใช้ปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) 0.2 กรัม สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปรับให้มีพีเอชต่างกัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12



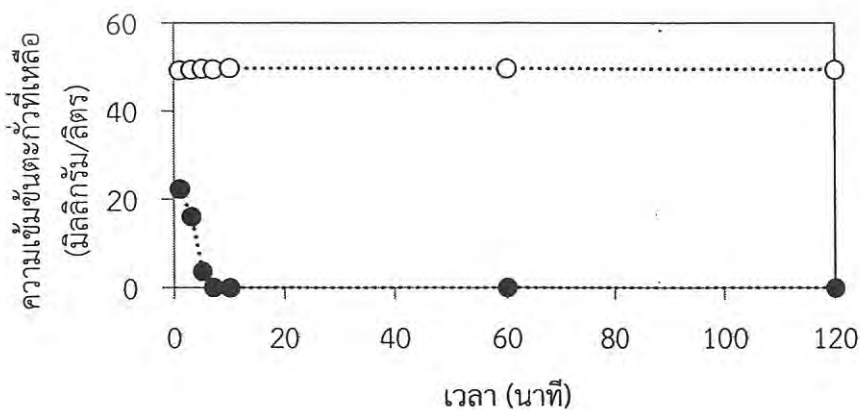
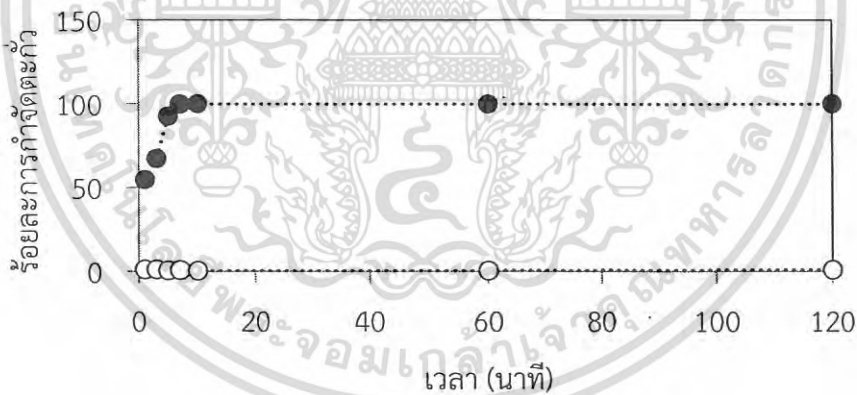
รูปที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-D ที่พีเอชต่างๆ (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่ว และ (ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่วในชุดทดลองที่เติม TCP-D (■, ●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-D (□, ○) ที่พีเอชต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 (ก) (รายละเอียดดูตาราง ค-12 ในภาคผนวก ค) พบว่าผลของพีเอชต่อความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่วในสารละลายและร้อยละการกำจัดของตะกั่วเมื่อใช้ TCP-D มีลักษณะคล้ายคลึงกับผลการทดลองเมื่อใช้ TCP-M กล่าวคือ TCP สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีเมื่อมีพีเอชสารละลายเท่ากับ 2 การเพิ่มพีเอชของสารละลายส่งผลให้ตะกั่วบางส่วนถูกกำจัดออกด้วยปฏิกิริยาการตกตะกอน จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกด้วยว่า TCP-M และ TCP-D สามารถทนทานต่อสารละลายที่มีพีเอชกรดเป็นอย่างดี ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากโครงสร้างที่มีความแข็งแรงของ TCP ดังกล่าว ซึ่งทำให้เกิดข้อได้เปรียบในการนำวัสดุไปใช้บำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่อยู่ในสภาวะกรดได้โดยไม่ต้องสูญเสียสารเคมีในการปรับพีเอชน้ำเสียให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง นอกจากนี้จากการศึกษายังพบว่า สารละลายที่อยู่ในสภาวะกรดจะช่วยเร่งการปลดปล่อยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่มีอยู่ภายในออกมา เป็นเหตุให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักกับหมู่ฟอสเฟตในโครงสร้างได้ดียิ่งขึ้น

4.2.2 ผลของระยะเวลาต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่ว

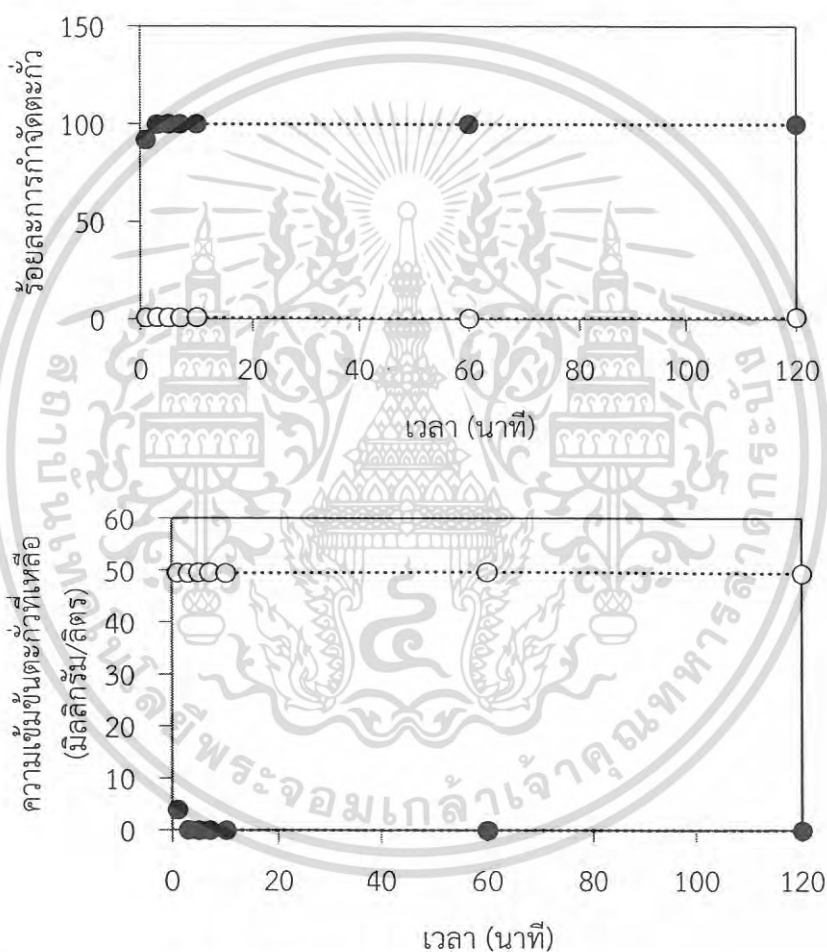
จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วของ TCP ที่สังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้น 2 ชนิดที่แตกต่างกันได้ผลิตภัณฑ์คือ TCP-M และ TCP-D โดยใช้ปริมาณ TCP 0.2 กรัม สารละลาย $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 2 นำไปเขย่าที่ระยะเวลาต่างๆ แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 (รายละเอียดดูตาราง ค-12 และ ค-13 ในภาคผนวก ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-M ที่พีเอชเวลาต่างๆ (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่ว(ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว ในชุดทดลอง (●) และชุดควบคุม (○) ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 (ก) พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสนานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสที่ 1 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) เท่ากับ 54.59 เปอร์เซ็นต์ และมีตะกั่วที่เหลืออยู่ในสารละลายเท่ากับ 21.81 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสให้นานกว่า 7 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาความเข้มข้นตะกั่วที่เหลืออยู่ในสารละลายพบว่าปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) กำหนดไว้คือให้มีความเข้มข้นตะกั่วไม่เกิน 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-D ที่พีเอชเวลาต่างๆ (ก) ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-D และ (ข) ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว ในชุดทดลองที่เติม TCP-D (●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-D (○) ที่เวลาต่างๆ

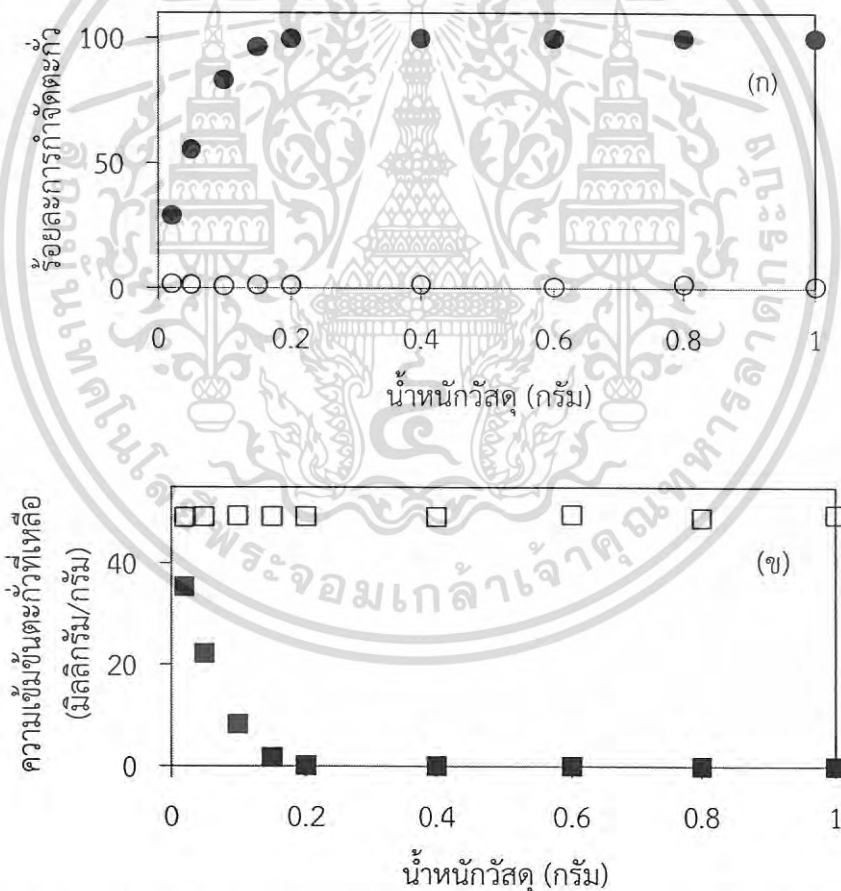
เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดตะกั่วของ TCP-D พบว่าผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับ TCP-M (รูปที่ 4.14) แต่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่า โดยระยะเวลาสัมผัส 1 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 91.90 และมีความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายเท่ากับ 3.610 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าความสามารถในการกำจัดมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสนานตั้งแต่ 3 นาที ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้นไป จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่า การกำจัดตะกั่วในสารละลายด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chafki *et al.* (2014) ที่พบว่าไตรแคลเซียมฟอสเฟตสามารถกำจัดโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีความเข้มข้น 10.34 มิลลิกรัมต่อลิตร (สารละลายมีพีเอชเท่ากับ 5) ได้อย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที โดยใช้ปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.015 กรัม จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของไตรแคลเซียมฟอสเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยธรรมชาติ (จรรยาพร, 2545 และ อนิสา และคณะ (2555)) มีการกำจัดโลหะหนักได้รวดเร็วกว่า

4.2.3 ผลของปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตต่อความสามารถในการกำจัดตะกั่ว

4.2.3.1 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

จากการทดลองกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการแปรค่าน้ำหนัก TCP-M สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 2 เขย่าเป็นระยะเวลา 7 นาที แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.15



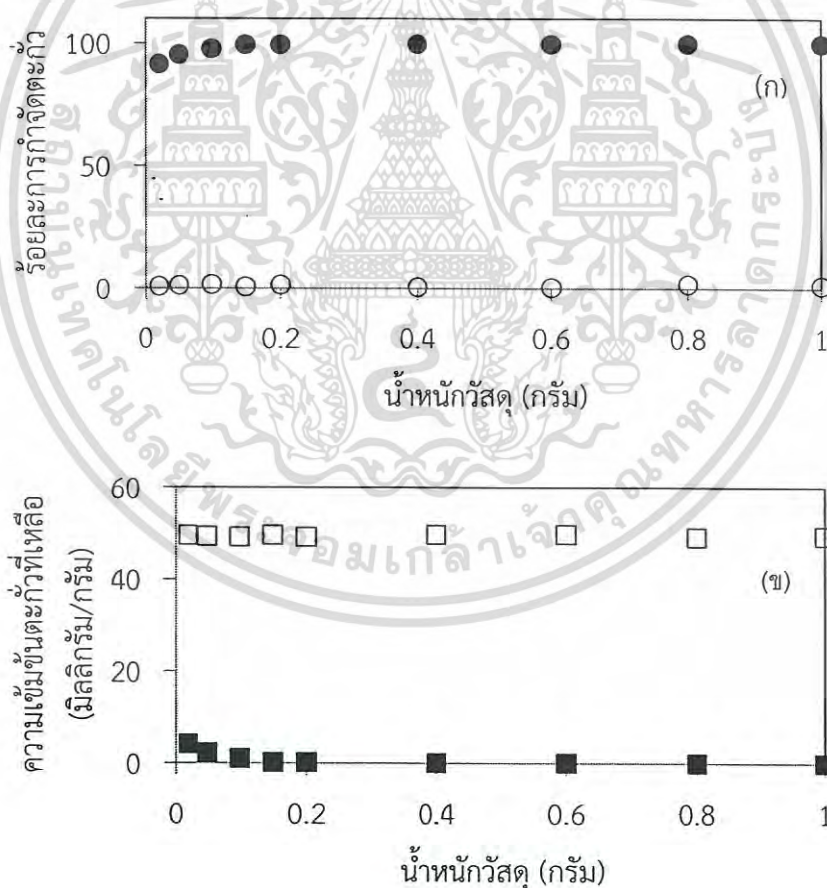
รูปที่ 4.15 ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-M ที่ปริมาณต่างๆ (ก) และความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว (ข) ในชุดทดลองที่เติม TCP-M (■,●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม TCP-M (□,○)

จากรูปที่ 4.15 (ก) (รายละเอียดดูตาราง ค-14 ในภาคผนวก ค) แสดงร้อยละการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ในสารละลาย โดยแปรค่าน้ำหนัก TCP-M ที่ 0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 กรัม ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.80 และ 1.0 กรัม ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า TCP-M สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่อใช้ TCP-M ปริมาณ 0.02 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) มีค่าเท่ากับ 27.98 เปอร์เซ็นต์ และมีความเข้มข้นตะกั่วเหลืออยู่ 34.88 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.15 (ข)) ต่อมาเมื่อเพิ่มปริมาณ TCP-M เป็น 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) มีค่าเท่ากับ 52.54, 82.92, 94.57 และ 97.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มน้ำหนัก TCP-M จาก 0.20 กรัม ไปจนถึง 1.0 กรัม ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ต่ำกว่าที่มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) กำหนด จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ปริมาณ TCP-M เท่ากับ 0.20 กรัม เป็นปริมาณวัสดุที่จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

4.2.3.2 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

จากการทดลองกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการแปรค่าน้ำหนัก TCP-D สารละลาย $Pb(NO_3)_2$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 2 เขย่าเป็นระยะเวลา 3 นาที แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดตะกั่วของ TCP-D ที่ปริมาณต่างๆ ร้อยละการกำจัดตะกั่ว (ก) และความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายตะกั่ว (ข) ในชุดทดลองที่เติม TCP-D (■, ●) และชุดควบคุมซึ่งไม่เติม

TCP-D (□, ○)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 (ก) (รายละเอียดดูตาราง ค-15 ในภาคผนวก ค) แสดงผลการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยแปรค่าน้ำหนัก TCP-D 0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.0 กรัม ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า TCP-D สามารถกำจัดโลหะตะกั่วในสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือเมื่อใช้ TCP-D ปริมาณ 0.02 กรัม สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียได้ 89.88 เปอร์เซ็นต์ และมีความเข้มข้นตะกั่วเหลืออยู่ 4.241 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.16 (ข)) เมื่อเพิ่มปริมาณ TCP-D พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) สูงที่สุดอยู่ที่ 99.99 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลืออยู่มีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) กำหนด คือมีความเข้มข้นตะกั่ว เท่ากับ 0.190 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) เท่ากับ 0.15 กรัม เป็นปริมาณวัสดุที่จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ TCP-D และ TCP-M ที่ใช้ในการกำจัดตะกั่วพบว่า TCP-D ใช้ปริมาณวัสดุน้อยกว่า TCP-M ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างความเป็นผลึกของ TCP-D มีความชัดเจนและใกล้เคียงกับสารมาตรฐานมากกว่า TCP-M จึงทำให้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ดีในการกำจัดตะกั่วในสารละลาย นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวยังทำให้ทราบว่า TCP-D มีปริมาณพื้นที่ผิวมากกว่า TCP-M อีกด้วย จึงเป็นเหตุผลสนับสนุนให้ TCP-D สามารถกำจัดตะกั่วในสารละลายได้ดี

4.3 การศึกษาไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่ว

4.3.1 ไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

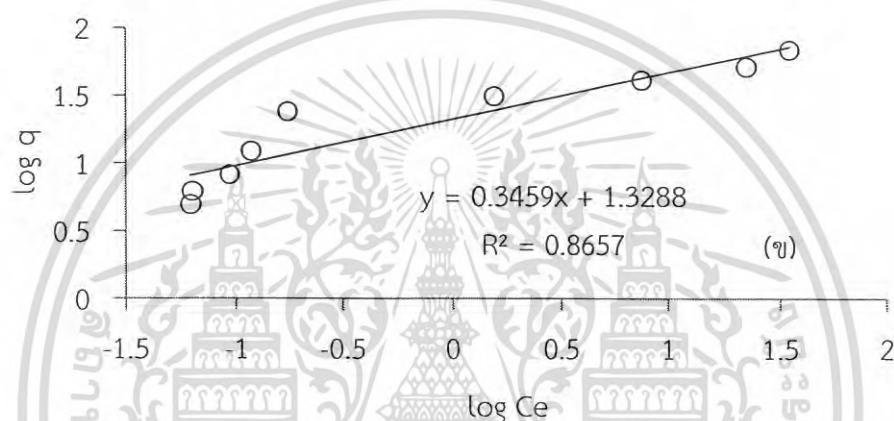
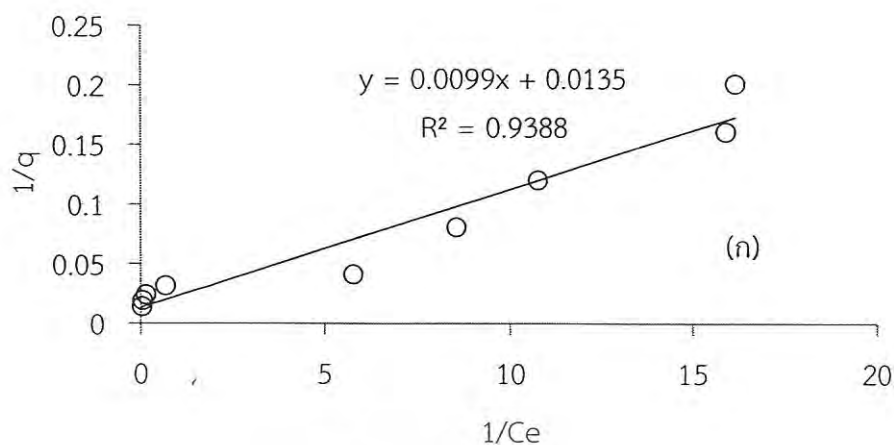
ผลการศึกษาไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณตะกั่ว (Pb^{2+}) เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สัมผัส 7 นาที โดยแปรค่าน้ำหนักไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ตามหัวข้อที่ 4.3.3.1 แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.17 (ดูรายละเอียดในตาราง ง-1 ในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

ค่าคงที่	ไอโซเทอมแลงเมียร์		ค่าคงที่	ไอโซเทอมฟรุนดริช	
	TCP-M	TCP-D		TCP-M	TCP-D
q_m (mg/g)	74.07	25.13	$1/n$	0.3459	0.4961
K_L	1.3636	44.22	K_F	21.32	54.08
R^2	0.9388	0.7571	R^2	0.8657	0.8825

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.17 พบว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มีสมการเส้นตรงเท่ากับ $y=0.0099x + 0.0135$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช จึงเลือกใช้ไอโซเทอมการดูดซับดังกล่าวในการทดลองในขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

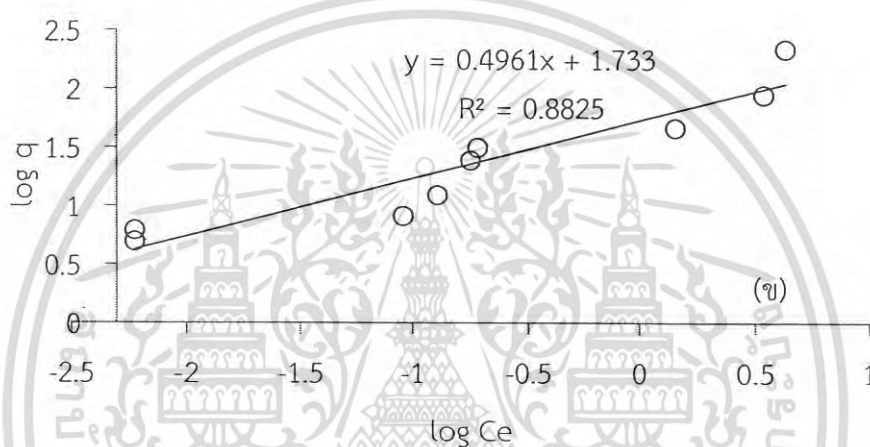
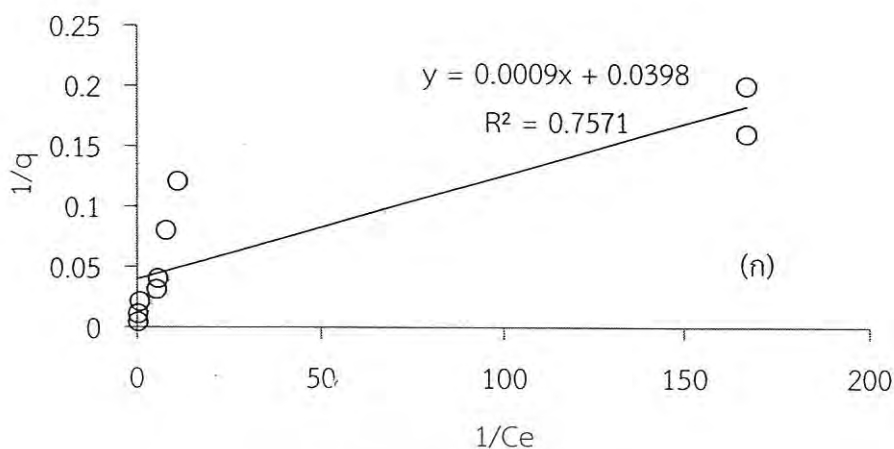


รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมของ TCP-M ไอโซเทอมแลงเมียร์ (ก) และไอโซเทอมฟรุนดริช (ข) ในการกำจัด ตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

4.3.2 ไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

ผลการศึกษาไอโซเทอมการกำจัดโลหะตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณตะกั่ว (Pb^{2+}) เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 2 ระยะเวลาสัมผัส 3 นาที โดยแปรค่าน้ำหนักไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ตามหัวข้อที่ 4.4.3.1 แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.18 (ดูรายละเอียดในตาราง ง-2 ในภาคผนวก ง)

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.18 พบว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริชมีสมการเส้นตรงเท่ากับ $y = 0.4961x + 1.733$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ จึงเลือกใช้ไอโซเทอมการดูดซับดังกล่าวในการทดลองในขั้นต่อไป



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมของ TCP-D ไอโซเทอมแลงเมียร์ (ก) และไอโซเทอมฟรุนดริช (ข) ในการกำจัด ตะกั่วของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

เมื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของไอโซเทอมในการดูดซับเพื่อใช้อธิบายกลไกในการกำจัด โลหะตะกั่วในสารละลายของวัสดุ TCP-M และ TCP-D พบว่า วัสดุทั้งสองสามารถอธิบายกลไกการดูดซับด้วยไอโซเทอมที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากโครงสร้างของ TCP-D นั้นมีความสมบูรณ์มากกว่า TCP-M อีกทั้งภายในหนึ่งยูนิตเซลล์จะประกอบไปด้วยจำนวนอะตอมที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจำนวนมาก ประกอบกับภายในโครงสร้างจะมีช่องว่างจำนวนมากส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนสูงกว่า จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้วัสดุ TCP-D สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมฟรุนดริช ซึ่งเป็นกลไกการดูดซับแบบหลายชั้น

4.4 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งความเข้มข้นของโลหะในน้ำที่นั่นขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและกำลังการผลิตของแต่ละบริษัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ (ก่อน)	ผลการวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์
		หลังบำบัดด้วย TCP-M	หลังบำบัดด้วย TCP-D
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	2.75 ± 0.027	3.11 ± 0.01	2.87 ± 0.02
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	31	31	31
ตะกั่ว (Pb) (mg/L)	10.91 ± 0.558	2.20±0.059	1.82 ± 0.068
เหล็ก (Fe) (mg/L)	2.299 ± 0.420	N.A.	N.A.
ดีบุก (Sn) (mg/L)	N.D.	N.A.	N.A.

หมายเหตุ : N.A. คือ Not available, N.D. คือ Not detect และ MDL ดีบุก เท่ากับ 0.001 mg/L

4.4.1 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

จากการศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ โดยใช้ TCP-M และ TCP-D ในปริมาณตามที่คำนวณได้จากสมการไอโซเทอมที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการดูดซับ (แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ ง-1.3 และ ง-2.3 ภาคผนวก ง) ปริมาณ TCP-M และ TCP-D ที่เติมลงในน้ำเสียนั้นมีค่าเท่ากับ 0.0690 และ 0.0450 กรัม ตามลำดับ เมื่อนำมากำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ที่มีความเข้มข้นตะกั่วเฉลี่ยเท่ากับ 10.91 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีพีเอชเท่ากับ 2.75 พบว่า ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำเสียเท่ากับ 2.20 และ 1.82 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วร้อยละ 79.80 และ 83.46 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ทั้งนี้อาจเป็นผลของอิทธิพลของโลหะร่วมอย่างเหล็ก (Fe) ที่มีอยู่ในน้ำเสีย (ตารางที่ 4.4) ประกอบกับสารละลายกรดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ในขั้นตอนการผลิตเนื้อแผ่นธาตุคือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ขณะที่น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ทำการรักษาสภาพและปรับพีเอชของสารละลายด้วยกรดไนตริก (HNO_3) เมื่ออยู่ในสถานะของสารละลายจะทำให้มีไอออนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) และไนเตรท (NO_3^-) ในระบบที่แตกต่างกันจึงอาจมีผลทำให้เกิดการรบกวนประสิทธิภาพการบำบัดในงานวิจัยนี้ (Mourabet *et al.*, 2012)

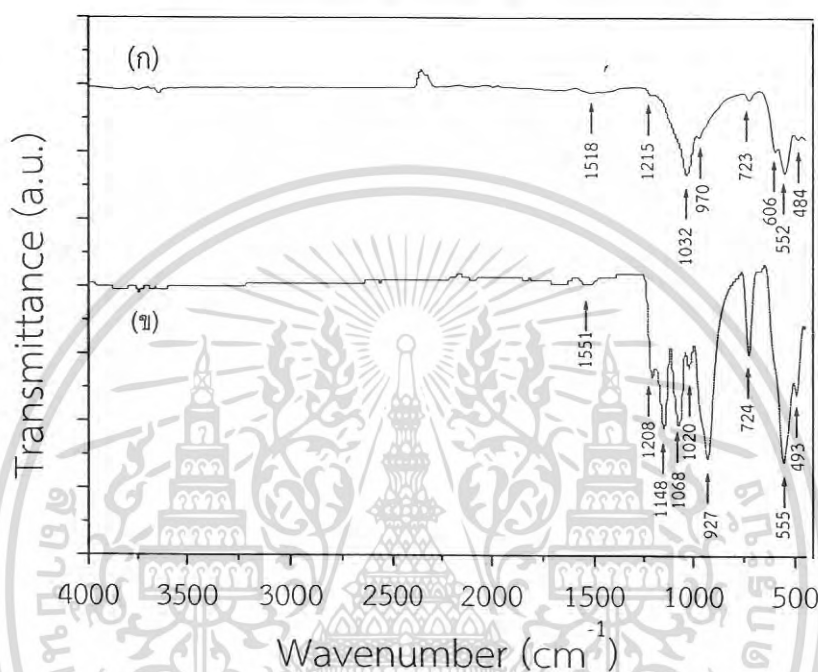
4.5 คุณสมบัติของไตรแคลเซียมฟอสเฟตภายหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม

4.5.1 โครงสร้างทางเคมีของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม ($Ca_3(PO_4)_2$)

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม ($Ca_3(PO_4)_2$) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ก่อนการกำจัดโลหะตะกั่ว (รูปที่ 4.19 (ก)) และหลังการกำจัดโลหะตะกั่ว (รูปที่ 4.19 (ข)) จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม ($Ca_3(PO_4)_2$) ก่อนและหลังการกำจัดโลหะตะกั่วมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน โดยพบว่าแสดงพีกสำคัญที่ตำแหน่ง 555 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของของหมู่ PO_4^{3-} พันธะ P-O ภายในโมเลกุล ภายหลังการกำจัดโลหะตะกั่วแสดงพีก

เอกสาร
ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เป็นเอกลักษณ์ที่ตำแหน่งใหม่ บริเวณตำแหน่ง 1,068 และ 1,148 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ PO_4^{3-} (Alqap and Sopyan, 2009) ทั้งนี้ยังพบว่ามีพีคที่เป็นเอกลักษณ์ที่เคยปรากฏที่ตำแหน่ง 606 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของ PO_4 หายไป จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สันนิษฐานได้ว่าการกำจัดโลหะตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะตะกั่วที่บริเวณพื้นผิวของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)



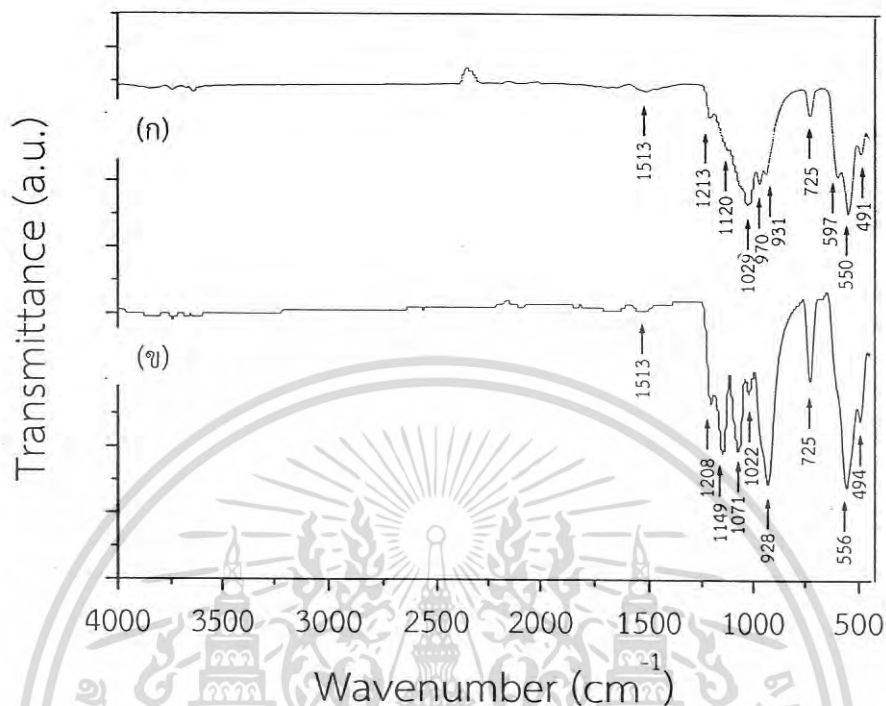
รูปที่ 4.19 สเปกตร้าโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ก่อน (ก) และหลัง (ข) การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม

4.5.2 โครงสร้างทางเคมีของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มนอินฟราเรด (FTIR) ก่อนการกำจัดโลหะตะกั่ว (รูปที่ 4.20 (ก)) และหลังการกำจัดโลหะตะกั่ว (รูปที่ 4.20 (ข)) จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ก่อนและหลังการกำจัดโลหะตะกั่วมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนบริเวณตำแหน่ง 1,071 และ 1,149 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ PO_4^{3-} แต่ในขณะเดียวกันก็ยังคงปรากฏพีคที่เป็นเอกลักษณ์ก่อนการกำจัดโลหะตะกั่ว บริเวณตำแหน่ง 1,208 และ 725 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, ตำแหน่ง 1,022 และ 928 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของหมู่ PO_4^{3-} , ตำแหน่ง 556 และ 494 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นของพันธะ P-O ภายในโมเลกุล ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบว่ามีพีคที่เป็นเอกลักษณ์ที่เคยปรากฏที่ตำแหน่ง 597 และ 970 cm^{-1} ที่เคยแสดงเอกลักษณ์ของ PO_4^{3-} และตำแหน่ง 1120 cm^{-1} ที่เคยแสดงเอกลักษณ์ของหมู่ PO_4^{3-} หายไป ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเกิดการทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาระหว่างโลหะตะกั่วที่บริเวณพื้นผิวของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) เป็นเหตุให้โครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป



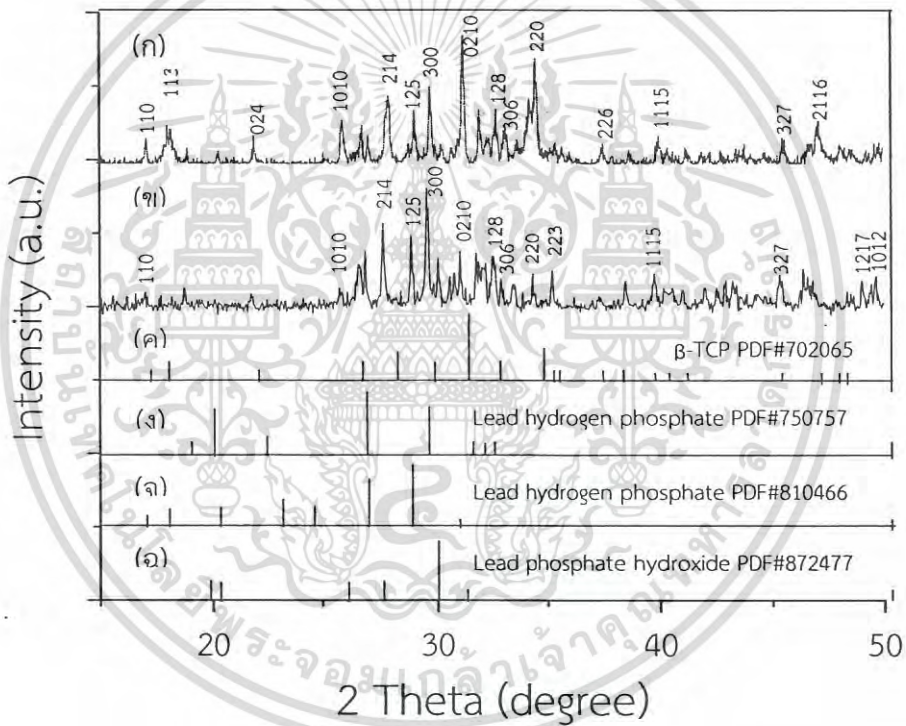
รูปที่ 4.20 สเปกตร้าโครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ก่อน (ก) และหลัง (ข) การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม

4.5.3 คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ก่อนและหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมเทียบกับสารมาตรฐานเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตและสารประกอบเลดฟอสเฟตชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.21 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ภายหลังจากกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างชัดเจน และมีโอกาสเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นสารประกอบเลดฟอสเฟต (Lead phosphate) ได้หลายรูป เนื่องจากมีลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบดังกล่าวแทรกอยู่ในผลิตภัณฑ์ภายหลังจากกำจัดดังนี้ คือไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) แสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์ใหม่บริเวณตำแหน่ง 2 Theta ที่ 18.722, 30.068, 35.234, 38.523, 39.762, 40.985 และ 49.416 ตามลำดับ และพบว่าพีคที่เป็นเอกลักษณ์ที่เคยปรากฏที่ตำแหน่ง 2 Theta ที่ 18.234, 22.007, 37.568, 40.015, 47.116, 48.134 และ 48.654 หายไป (แสดงรายละเอียดดังตาราง ค-4 ภาคผนวก ค) โดยคาดว่าภายหลังจากบำบัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมแบบเตอร์ที่มีความเป็นกรดสูง ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) เกิดการละลายและปลดปล่อยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ออกมาในสารละลาย ทำให้ไอออนของโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) เข้าไปแทนที่แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ดังกล่าวและก่อตัวเป็นสารประกอบเลดฟอสเฟตขึ้นใหม่ ซึ่งสารประกอบเลดฟอสเฟตที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีแนวโน้มเป็นสารประกอบเลดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่

เอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข PDF#750757 และ PDF#810466 ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $PbHPO_4$ และ $Pb_2(HP_3O_{10})$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีโอกาสก่อตัวขึ้นเป็นสารประกอบเลดฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ที่สอดคล้องกับสารมาตรฐานหมายเลข PDF#872477 ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ หรือ $Pb_5(PO_4)_3(OH)$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sugiyama และคณะ (2002) จากผลการทดลองทำให้สามารถยืนยันได้ว่ากลไกในการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างโลหะตะกั่วบริเวณพื้นผิวของวัสดุไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) เป็นหลัก เนื่องจากทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพของ TCP-M ภายหลังจากการบำบัดเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (β -TCP-M) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ก่อนการกำจัดโลหะตะกั่วและหลังการกำจัดโลหะตะกั่ว ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ



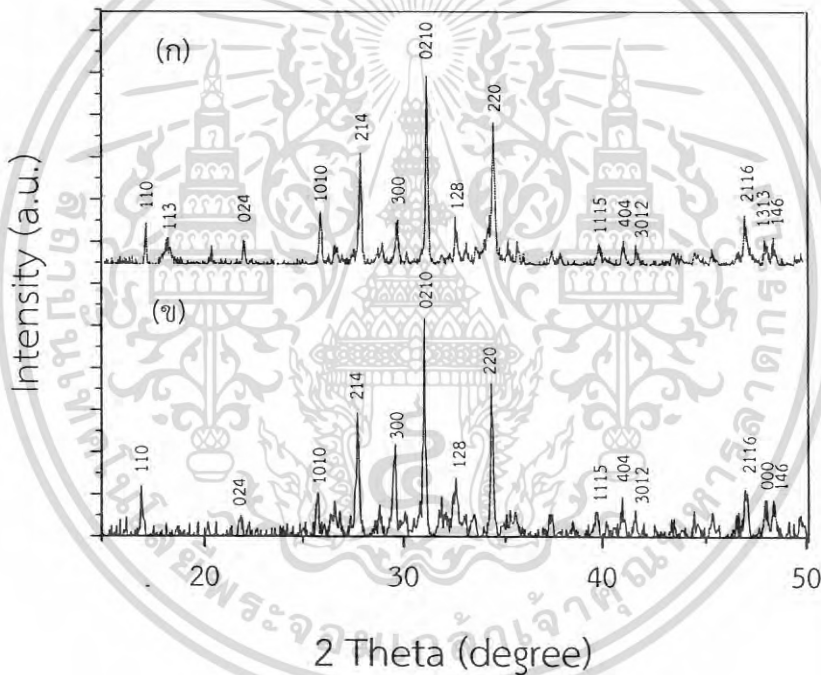
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และความเข้มสัญญาณของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ก่อน (ก) และหลัง (ข) การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม, สารมาตรฐานเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตหมายเลข PDF#702065 (ค), สารมาตรฐานเลดไฮโดรเจนฟอสเฟตหมายเลข PDF#750757 (ง), สารมาตรฐานเลดไฮโดรเจนฟอสเฟตหมายเลข PDF#810466 (จ) และสารมาตรฐานเลดฟอสเฟตไฮดรอกไซด์หมายเลข PDF#872477 (ฉ)

4.5.4 คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ก่อนและหลังการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่ 4.22 จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ได้รับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกซ์และความเข้มสัญญาณภายหลังกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากกลไกการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) สามารถเกิดได้ทั้งสองกรณีคือ กรณีที่ 1 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างโลหะตะกั่วบริเวณพื้นผิวของวัสดุ และกรณีที่ 2 เกิดการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการดูดซับ โดยเกิดผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการสร้างพันธะเพียงอ่อนๆบนพื้นผิวของวัสดุเท่านั้นและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ ทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุมีการหายไปบริเวณตำแหน่ง 2θ ที่ 18.149 องศา และเกิดการเปลี่ยนแปลง intensity บริเวณตำแหน่ง 2θ ที่ 29.568 องศา ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (β -TCP-D) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ก่อนและหลังการกำจัดโลหะตะกั่ว ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 ที่พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและยังคงโครงสร้างเดิม



รูปที่ 4.22 โครงสร้างควมกว้างระนาบผลึกของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ก่อน (ก) และหลัง (ข) การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม

จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (β -TCP-M) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (β -TCP-D) ทำให้สามารถสรุปได้ว่ากลไกที่ใช้ทำปฏิกิริยาในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ โดยเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (β -TCP-M) เป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ชัดเจน เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะตะกั่วที่บริเวณพื้นผิวเป็นหลัก สอดคล้องกับไอโซเทอมแลงเมียร์ที่ใช้อธิบายกลไกในการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ขณะที่เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (β -TCP-D) สามารถเกิดกลไกไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TCP-D) สามารถเกิดกลไกในการกำจัดโลหะตะกั่วได้สองวิธีคือ 1) เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะตะกั่วที่บริเวณพื้นผิวและ 2) เกิดการดูดซับของโลหะภายในช่องว่างที่มีอยู่ในโครงสร้างผลึก ซึ่งการดูดซับในลักษณะนี้สามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้น ส่งผลทำให้ไอโซเทอมฟรอนดริชเป็นไอโซเทอมที่สามารถอธิบายกลไกการกำจัดของ □-TCP-D ที่ดีที่สุดนั่นเอง

4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการสังเคราะห์ MCPM และ DCPA แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายของสารเคมีและค่าไฟฟ้าสำหรับการสังเคราะห์สารตั้งต้น MCPM และ DCPA

วิธีการ	สารเคมี	เกรดสารเคมี	ปริมาณที่ใช้	ราคาอ้างอิง ^{1/}	ราคาสุทธิ (บาท)
การสังเคราะห์ MCPM ^{2/}	เปลือกหอยเชอริ	-	50.00 กรัม	15 บาท/กิโลกรัม	0.75
	H ₃ PO ₄ 70%	การค้า	83.00 ml	67.51 บาท/ลิตร	5.60
	อะซิโตน	การค้า	50 ml	64 บาท/ลิตร	5.31
	ค่าไฟฟ้า (ตูบ)	-	2 ชั่วโมง	2.76 บาท/หน่วย	7.18
	รวม				18.84
การสังเคราะห์ DCPA ^{2/}	เปลือกหอยเชอริ	-	50.00 กรัม	15 บาท/กิโลกรัม	0.75
	H ₃ PO ₄ 50%	การค้า	62.00 ml	50.79 บาท/ลิตร	3.15
	อะซิโตน	การค้า	50 ml	64 บาท/ลิตร	3.97
	ค่าไฟฟ้า (ตูบ)	-	2 ชั่วโมง	2.76 บาท/หน่วย	7.18
	รวม				15.05

หมายเหตุ : ^{1/} การคำนวณราคาเปลือกหอยเชอริ, H₃PO₄ 70%, H₃PO₄ 50% และค่าไฟฟ้าแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก-9 ราคาอะซิโตนอ้างอิงจากบริษัทอิตัลมาร์

^{2/} yield ที่ได้จากการสังเคราะห์ MCPM และ DCPA เท่ากับ 123.99 และ 63.89 กรัม แสดงรายละเอียดในตารางที่ ค-1 และ ค-2

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อนำเปลือกหอยเชอริ 50.00 กรัม ทำปฏิกิริยากับ H₂PO₃ 70% ปริมาตร 83.00 มิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์ MCPM ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 123.99 กรัม (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ค-1) เมื่อนำค่าใช้จ่ายของสารเคมีและค่าไฟฟ้าทั้งหมดมาคำนวณ จะพบว่า MCPM 123.99 กรัม มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 18.84 บาท หรือคิดเป็น 0.152 บาทต่อกรัม ขณะที่เมื่อนำเปลือกหอยเชอริ 50.00 กรัม ทำปฏิกิริยากับ H₂PO₃ 50% ปริมาตร 62.00 มิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์ DCPA ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 63.89 กรัม (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ค-2) เมื่อนำราคาสารเคมีและค่าไฟฟ้าทั้งหมดมาคำนวณค่าใช้จ่าย จะพบว่า DCPA 64 กรัม มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 15.05 บาท หรือคิดเป็น 0.235 บาทต่อกรัม

เมื่อนำราคา MCPM และ DCPD ที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.5 มาคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการสังเคราะห์ TCP-M และ TCP-D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายของสารเคมีและค่าไฟฟ้าสำหรับการสังเคราะห์ TCP-M และ TCP-D

วิธีการ	สารเคมี	เกรดสารเคมี	ปริมาณที่ใช้	ราคาอ้างอิง ^{1/}	ราคาสุทธิ (บาท)
การสังเคราะห์ TCP-M ^{2/}	เปลือกหอยเชอร์รี่	-	78.7 กรัม	15 บาท/กิโลกรัม	1.18
	MCPM	-	100.00 กรัม	0.152 บาท/กรัม	15.20
	ค่าไฟฟ้า (เตาเผา)	-	2 ชั่วโมง	2.76 บาท/หน่วย	11.59
รวม					27.97
การสังเคราะห์ TCP-D ^{2/}	เปลือกหอยเชอร์รี่	-	14.6 กรัม	15 บาท/กิโลกรัม	0.22
	DCPA	-	41.0 กรัม	0.235 บาท/กรัม	9.64
	ค่าไฟฟ้า (เตาเผา)	-	2 ชั่วโมง	2.76 บาท/หน่วย	11.59
รวม					21.45

หมายเหตุ : ^{1/}ราคา MCPM และ DCPA แสดงดังตารางที่ 4.5 และการคำนวณราคาค่าไฟฟ้าแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก-9

^{2/}น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้แสดงในตารางที่ ค-3 และ ค-4 ในภาคผนวก ค

จากตารางที่ 4.6 พบว่า เมื่อนำเปลือกหอยเชอร์รี่ 78.70 กรัมทำปฏิกิริยากับ MCPM 100.00 กรัม ผลิตภัณฑ์ TCP-M ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 124.67 กรัม (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ค-3) เมื่อนำราคาสารเคมีและค่าไฟฟ้าทั้งหมดมาคำนวณค่าใช้จ่ายจะพบว่า TCP-M 124.67 กรัม มีต้นทุนค่าสารเคมีและไฟฟ้าเท่ากับ 27.97 บาท หรือคิดเป็น 22.38 บาทต่อ 100 กรัม ขณะที่เมื่อนำเปลือกหอยเชอร์รี่ 14.60 กรัม ทำปฏิกิริยากับ DCPA 41.0 กรัม ผลิตภัณฑ์ TCP-D ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 39.50 กรัม (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ค-4) เมื่อนำราคาสารเคมีและค่าไฟฟ้าทั้งหมดมาคำนวณค่าใช้จ่ายจะพบว่า TCP-D 39.50 กรัม มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 21.49 บาท หรือคิดเป็น 54.41 บาทต่อ 100 กรัม การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ TCP จากเปลือกหอยเชอร์รี่มาเปรียบเทียบกับราคาสารเคมี TCP เกรดการค้า จากบริษัท GAMMACO พบว่า TCP มีราคาเท่ากับ 950 บาทต่อ 100 กรัม จากการคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ทำให้ทราบว่าวิธีการสังเคราะห์ TCP จากเปลือกหอยเชอร์รี่ในงานวิจัยนี้มีต้นทุนต่ำ จึงช่วยสนับสนุนได้ว่าวิธีการสังเคราะห์ดังกล่าวสามารถลดต้นทุนการผลิต TCP ได้เป็นอย่างดี

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดเปลือกหอยเชอรี่ โดยใช้เปลือกหอยเชอรี่เป็นแหล่งแคลเซียม ในการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต และศึกษาการใช้ประโยชน์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ ในการบำบัดโลหะตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเปลือกหอยเชอรี่ภายหลังการกำจัดสารอินทรีย์บริเวณเปลือกหอยเชอรี่ออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ aragonite phase

2. เมื่อนำเปลือกหอยเชอรี่ที่ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์บริเวณเปลือกหอยเชอรี่ออกไปทำปฏิกิริยากับกรอออกซิฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้น 70 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จะได้ MCPM และ DCPA ที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีรูปร่างเป็นเกล็ดสี่เหลี่ยมที่มีปลายมุมแหลมและเกล็ดกลมมนตามลำดับ

3. การสังเคราะห์ TCP โดยใช้ MCPM และ DCPA เป็นวัสดุตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับเปลือกหอยเชอรี่ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 110.9 และ 153.7 Å ตามลำดับ

4. สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ TCP-M คือ พีเอชสารละลายเท่ากับ 2 ระยะเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 7 นาที และปริมาณ TCP-M เท่ากับ 0.2 กรัม ในขณะที่สภาวะที่เหมาะสมของ TCP-D คือ พีเอชสารละลายเท่ากับ 2 ระยะเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 3 นาที และปริมาณ TCP-M เท่ากับ 0.15 กรัม

5. ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของ TCP-M สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยมีสมการเส้นตรง $y=0.0099x+0.0135$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9388 ในขณะที่ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของ TCP-D สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช $y=0.4961x+0.1733$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.8825

6. ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่พบว่า มีพีเอชของน้ำเสียอยู่ที่ 2.75 และมีความเข้มข้นของปริมาณตะกั่วอยู่ที่ 10.91 มิลลิกรัมต่อลิตรผลการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) โดยใช้สภาวะที่ได้จากไอโซเทอม พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึงร้อยละ 79.80 โดยกลไกที่ใช้ในการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นกลไกทางเคมี เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ก่อนและหลังการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน ขณะที่ผลการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) โดยใช้สภาวะที่ได้จากไอโซเทอม พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 83.46 โดยกลไกที่ใช้ในการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นกลไกทางกายภาพ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ก่อนและหลังการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่และขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตควรมีการตรวจวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่างดังกล่าว
2. ในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ควรมีการตรวจวิเคราะห์ โลหะหนักชนิดอื่นๆร่วมด้วย อาทิเช่น ทองแดง สังกะสี อะลูมิเนียม เป็นต้น เพื่อเป็นการประเมินผลกระทบหรือสาเหตุรบกวนในการกำจัดโลหะตะกั่ว
3. การศึกษาความสามารถในการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต ควรตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนในสารละลาย เพื่อเป็นวิเคราะห์กลไกที่อาจจะเกิดขึ้นในการกำจัดโลหะตะกั่ว
4. ควรทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์สุดท้ายภายหลังการบำบัด เพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์ภายหลังการบำบัดกลายเป็นของเสียที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดต่อไป จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้สารประกอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) หรือไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) ในการกำจัดตะกั่วในสารละลาย ผลิตภัณฑ์สุดท้ายภายหลังการบำบัดจะได้ตะกั่วฟอสเฟต ($Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) ที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวดูดซับที่ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะจำนวนมาก (Tudorache *et al*, 2014) ทั้งนี้ยังมีคุณสมบัติในการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการออกซิเดชันมีเทน (Methane) และอีเทน (Ethane) (Sugiyama *et al*, 1998 และ Park *et al*, 2012) และมีคุณสมบัติในการกำจัดน้ำในโมเลกุลของเอทานอลอีกด้วย (Rahmanian *et al*, 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กิตติพันธ์ บางยี่ขัน. 2552. (รายงานสถานการณ์อุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสีปี 2551). กรุงเทพฯ : กลุ่มอุตสาหกรรมโลหะการ สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2544. หอยเชอรี่อาหารจานโปรด. กรุงเทพฯ : สถาบันส่งเสริมเกษตรชีวภาพและโรงเรียนเกษตรกร กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

จรรยาพร พุ่มงาม. 2545. “การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกหอยแครงและเปลือกหอยแมลงภู่.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์, ปริญญา รุ่งโรจน์กิจไพศาล และ ปวีณา จรัสชาติพินิต. 2544. “การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 52-90.

เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 141-162.

ธราพงษ์ วิทิตศานต์. 2553. ถ่านกัมมันต์ : การผลิตและการนำไปใช้. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 1-2.

นภาพร อรุณเกียรติก้อง. 2551. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษา: อุตสาหกรรมเหล็กและอุตสาหกรรมตะกั่ว. กรุงเทพฯ : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

นิชธิมา รุ่งปิ่น, สรพงษ์ ภาสุปรีย์, ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และ ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ. 2553. “วิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ.” หน้า 183-190. ในการประชุมเชิงสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ.

บุญเสริม เวชการ. 2550. “การจัดการสิ่งแวดล้อมของแบตเตอรี่รถยนต์ใช้แล้วประเภทตะกั่ว-กรดในประเทศไทย.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

บรรจง บุญชม และ นราธิป วิทยากร. กรรมวิธีการผลิตไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากเปลือกหอยแครงและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว. ประเทศไทย. สิทธิบัตรไทยเลขที่ 1201000726. 2552.

ปัตตะ ฮาแว, พนิดา สุมานะตระกูล, ชัยรัตน์ ศิริพัชระ และ นิติธร ชูศรี. 2558. “การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงด้วยเทคนิคการขยายตัวอย่างรวดเร็วของการคาร์บอนไดออกไซด์เหนือสถานะวิกฤติ.” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 2 : 37-45.

รัตนาภร ยวงสวัสดิ์, วลัยรัตน์ จันทระอมพร และ ดวงกมล ณ ระนอง. 2554. “การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย.” วิศวกรรมลาดกระบัง. 4 : 31-37.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วีรียา วิริยะเชชม. 2550. “การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟผงสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศมณพร สุทธิบาก. 2545. “การแยกตะกั่วออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่โดยวิธีซีเมนเทนซ์ด้วยผงสังกะสี.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศศิพันธุ์ ฦ สงขลา, อุษณีย์ ศันตติวงศ์ไชย, สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์ และ ชาญชัย อัครวินิจกุลชัย. 2539. “การวิเคราะห์ธาตุในเปลือกหอยโดยวิธีนิวเคลียร์”
- สุณิพร สุวรรณมณีพงศ์ และ สิรินทร ไชยศักดิ์. 2552. “สำรวจความพร้อมอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ไทยกับโอกาสในตลาดโลก.” *ฝ่ายวิจัยนโยบายสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ*. 38(218) : 64-67.
- สังข์ พิชญ์ชยะนนท์. 2540. “การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียโดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพ.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สำรวล ดอกไม้หอม. 2540. หอยเชอร์รี่และการป้องกันกำจัด. กรุงเทพฯ : กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- อนิสา ทรัพย์นิวัตต์, มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และ อรรถนพ หอมจันทร์. 2555. “การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระช้ำ).” หน้า 411-418. การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9.
- APHA, AWWA and WEF. 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC : American Public Health Association
- Aklil, A., Mouflih, M. and Sebti, S. 2004. “Removal of heavy metal ions from water by using calcined phosphate as a new adsorbent.” *Journal of Hazardous Materials*. A112 : 183-190.
- Alqap, A.S.F. and Sopyan, L. 2009. “Low temperature hydrothermal synthesis of calcium phosphate ceramics: Effect of excess Ca precursor on phase behavior.” *Indian Journal of chemistry*. 48 : 1492-1500.
- Anderson, F.A. and Brecevic, L. 1991. “Infrared spectra of amorphous and crystalline calcium carbonate.” *Acta Chemical Scandinavica*. 45 : 1018-1024.
- Boonchom, B. 2009. “Parallelogram-like microparticles of calcium dihydrogen phosphate monohydrate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) obtained by a rapid precipitation route in aqueous and acetone media.” *Journal Alloy Compound*. 482 : 199-202.
- Boonchom, B. and Danvirutai, C. 2009. “The morphology and thermal behavior of calcium dihydrogen phosphate monohydrate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) obtained by a rapid precipitation route at ambient temperature in different media.” *Journal of Optoelectronics and Biomedical Materials*. 1 : 115-123.
- Bian, J.J., Kim, D.W. and Hong, K.S. 2004. “Phase transformation and sintering behavior of $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$.” *Materials Letter*. 58 : 347-351.

- Chafki, L., Ismi, I., Elaidi, H., Hatim, Z., Lebdiri, A. and Rifi, E.H. 2014. "Equilibrium and kinetic modeling of Cd(II) adsorption from aqueous solution using tricalcium phosphate." *Chemical and process Engineering Research*. 29 : 15-23.
- Chen, G.G., Luo, G.S., Yang, L.M., Xu, J.H., Sun, Y. and Wang, J.D. 2005. "Synthesis and size control of CaHPO₄ particles in a two-liquid phase micro-mixing process." *Journal of Crystal Growth*. 279 : 501-507.
- Chen, X.G. and Poretz, R.D. 2001. "Lead causes human fibroblasts to mis-sort arylsulfatase A." *Toxicology*. 163 : 107-114.
- Dong, L., Zhu, Z., Qiu, Y. and Zhao, J. 2010. "Removal of lead from aqueous solution by hydroxyapatite/magnetite composite adsorbent." *Chemical Engineering Journal*. 165 : 827-834.
- Dorozhkin, S.V. 2011. "Calcium orthophosphates Occurrence, properties, biomineralization, pathological calcification and biomimetic applications." *Biomatter*. 1(2) : 121-164.
- Furuichi, K., Oaki, Y. and Imai, H. 2006. "Preparation of nanotextured and nanofibrous hydroxyapatite through dicalcium phosphate with gelatin." *Chemical Materials*. 18 : 229-234.
- Gopi, S. and Subramanian, V.K. 2013. "Anomalous transformation of calcite to vaterite; Significance of HEDTA on crystallization behavior and polymorphism at elevated temperatures." *Indian Journal of Chemistry*. 52A : 342-349.
- Hariharan, M., Varghese, N. Benny Cherian, A. Sreenivasan, P.V., Paul, J. and Asmy Antony, K.A. 2014. "Synthesis and Characterisation of CaCO₃ (calcite) nano particles from cockle shells using chitosan as precursor." *International Journal of Scientific and Research Publications*. 4 : 1-5.
- He, M., Shi, H., Zhao, X., Yu, Y. and Qu, B. 2013. "Immobilization of Pb and Cd in contaminated soil using nano-crystallite hydroxyapatite." *Procedia Environmental Science*. 18 : 657-655.
- Hsu, C.K. 2002. "A study on thermal behavior of uncalcined Ca(H₂PO₄)₂·H₂O and CaCO₃ mixtures." *Thermochimica Acta*. 392-393 : 157-161.
- Hu, Q., Zhang, J., Teng, H., and Becker, U. 2013. "Growth process and crystallographic properties of ammonia-induced vaterite." *American Mineralogist*. 97 : 1437-1445.
- Islam, Kh.N., Bakar, M.Z.B.A., Noordin, M.M., Hussein, M.Z.B., Rahman, N.S.B.A. and Ali, Md.E. 2011. "Characterisation of calcium carbonate and its polymorphs from cockle shells (*Anadara granosa*)." *Powder Technology*. 213 : 188-191.

- Islam, Kh.N., Ali, Md.E., Bakar, M.Z.B.A., Loqman, M.Y., Islam, A., Islam, Md.S., Rahman, Md.M. and Ullah M. 2013. "A novel catalytic method for the synthesis of spherical aragonite nanoparticles from cockle shells." *Powder Technology*. 246 : 434-440.
- Kawabata, K., Yamamoto, T. and Kitada, Akihiko. 2011. "Substitution mechanism of Zn ions in β -tricalcium phosphate." *Physical B*. 406 : 890-894.
- Kirboga, S. and Oner, M. 2013. "Effect of the Experimental Parameters on Calcium Carbonate Precipitation." *Chemical Engineering Transactions*. 32 : 2119-2124.
- Kivrak, N. and Cuneyt Tas, A. 1998. "Synthesis of calcium Hydroxyapatite-Tricalcium phosphate (HA-TCP) composite bioceramic powder and their sintering behavior." *Journal of American Ceramic Society*. 81 : 2245-2252.
- Kontoyannis, C.G., and Vagenas, N.V. 1999. "Calcium carbonate phase analysis using and FT-Raman spectroscopy." *The Royal Society of Chemistry*. 125 : 251-255.
- Laranjeira, C.M. 2000. "Calcium phosphate biomaterials from marine algae hydrothermal synthesis and characterization." *Quimica Nova*. 23(4) : 441-446.
- Lee, C.K., Kim, H.S. and Kwon, J.H. 2005. "The removal of heavy metals using hydroxyapatite." *Environmental Engineering Research*. 5 : 205-212.
- Liang, L., Rulis, P. and Ching, W.Y. 2010. "Mechanical properties, electronic structure and bonding of α - and β -tricalcium phosphates with surface characterization." *Acta Biomaterialia*. 6 : 3763-3771.
- Liao, D., Zheng, W., Li, X., Yang, Q., Yue, X., Guo, L. and Zeng, G. 2010. "Removal of lead(II) from aqueous solutions using carbonate hydroxyapatite extracted from eggshell waste." *Journal of Hazardous Materials*. 177 : 126-130.
- Louati, B., Hlel, F., Guidara, K. and Gargouri, M. 2005. "Analysis of the effects of thermal treatments on CaHPO_4 by ^{31}P NMR spectroscopy." *Journal of Alloys and Compounds*. 394 : 13-18.
- Martinez, I.M., Velasquez, P.A. and De Aza, P.N. 2010. "Synthesis and stability of α -tricalcium phosphate doped with dicalcium silicate in the system $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ - Ca_2SiO_4 ." *Materials Characterization*. 61 : 761-767.
- Matsumoto, N., Sato, K., Yoshida, K., Hashimoto, K. and Toda, Y. 2009. "Preparation and characterization of β -tricalcium phosphate co-doped with monovalent and divalent antibacterial metal ions." *Acta Biomaterialia*. 5 : 3157-3164.
- Minh, D.P., Sebei, H., Nzihou, A. and Sharrock, P. 2012. "Apatitic calcium phosphates: Synthesis, characterization and reactivity in the removal of lead (II) from aqueous solution." *Chemical Engineering Journal*. 198-199 : 180-190.
- Minh, D.P., Tran, N.D., Nzihou, A. and Sharrock, P. 2013. "Hydroxyapatite gel for the improved removal of Pb^{2+} ions from aqueous solution." *Chemical Engineering Journal*. 232 : 128-138.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Minh, D.P., Martinez, M.G., Nzihou, A. and Sharrock, P. 2012. "Thermal behavior of apatitic calcium phosphates synthesized from calcium carbonate and orthophosphoric acid or potassium dihydrogen orthophosphate." *Journal Therm Anal Calorim*. Published online.
- Mirhadi, B., Mehdikhani, B. and Askari, N. 2011. "Synthesis of nano-sized β -tricalcium phosphate via wet precipitation." *Processing and Application of Ceramics*. 5(4) : 193-198.
- Mourabet M., Rhilassi A.E., Boujaady H.E., Bennani-Ziatni M., Hamri R.E. and Taitai A. 2012. "Removal of fluoride from aqueous solution by adsorption on Apatitic tricalcium phosphate using Box-Behnken design and desirability function." *Applied Surface Science*. 258: 4402-4410.
- Mousa, S.M., Ammar, N.S. and Ibrahim, H.A. 2015. "Removal of lead ions using hydroxyapatite nano-material prepared from phosphogypsum waste." *Journal of Saudi Chemical Society*. 1-9.
- Oladoja, N.A. and Aliu, Y.D. 2009. "Snail shell as coagulant aid in the alum precipitation of malachite green from aqua system." *Journal of Hazardous Materials*. 164 : 1496-1502.
- Onoda, H. Ichimura, M. and Takenaka, A. 2010. "Preparation and lead removal effects of calcium phosphates sea urchin shells." *Phosphorus Research Bulletin*. 24 : 49-53.
- Park, J.H., Lee, D.W., Im, S.W., Lee, Y.H., Suh, D.J., Jun, K.W. and Lee, K.Y. 2012. "Oxidative coupling of methane using non-stoichiometric lead hydroxyapatite catalyst mixtures." *Fuel*. 94 : 433-439.
- Pusapakdepobet, J., Sawangwong, C.P., Satraphat, D., Saowakontha, S. and Panutrakul, S. 2007. "Health risk assessment of villagers who live near a lead mining area: A case study of Klity village, Kanchanaburi province, Thailand." *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*. 38 : 168-177.
- Rahmanian, A. and Ghaziaskar, H.S. 2013. "Continuous dehydration of ethanol to diethyl ether over aluminum phosphate-hydroxyapatite catalyst under sub and supercritical condition." *Journal Supercrit Fluids*. 78 : 34-41.
- Ramirez-Perez, A.M., Paradelo, M., Novoa-Munoz, J.C., Arias-Estevéz, M., Fernandez-Sanjurjo, M.J., Alvarez-Rodríguez, E. and Nunez-Delgado, A. 2013. "Heavy metal retention in copper mine soil treated with mussel shell: Batch and column experiments." *Journal of Hazardous Materials*. 248-249 : 122-130.
- Saadat, S. and Karimi-Jashni, A. 2011. "Optimization of Pb(II) adsorption onto modified walnut shells using factorial design and simplex methodologies." *Chemical Engineering Journal*. 173 : 743-749.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sahin, E. 2012. "Synthesis and characterization of calcium phosphate cement based macroporous scaffolds." Thesis of Engineering and Science. Chemical Engineering. Izmir Institute of Technology.
- Sandrine, B., Ange, N., Didier, B.A., Eric, C. and Patrick, S. 2007. "Removal of aqueous lead ions by hydroxyapatites: Equilibria and kinetic processes." *Journal of Hazardous Materials*. A139 : 443-446.
- Shavandi, A., Bekhit, A.E.D.A., Ali, M.A., Sun, Z. and Gould, M. 2015. "Development and characterization of hydroxyapatite/ β -TCP/chitosan composites for tissue engineering applications." *Materials Science and Engineering C*. 56 : 481-493.
- Shul'ga, N.V., Mil'vit, N.V., Shashkova, I.L. and Rat'ko, A.I. 2007. "Effects of preparation conditions on the pore structure of tricalcium phosphate and on the kinetics of its reaction with the lead ion in solution." *Synthesis and properties of inorganic compounds*. 52 : 667-673.
- Stoia, M., Ionescu, M., Stefanescu, O., Murgan, R. and Stefanescu, M. 2008. "Preparation of β -tricalcium phosphate from precursors obtained by a wet precipitation method." 53(67) : 204-207.
- Sugiyama, S., Abe, K., Miyamoto, T., Hayashi, H. and Moffat, J.B. 1998. "The oxidation of ethane in the presence and absence of tetrachloromethane of calcium hydroxyapatites with incorporated lead." *Journal Molecular Catalysis A: Chemical*. 3 : 297-312.
- Sugiyama, S., Ichii, T., Hayashi, H. and Tomida, T. 2002. "Lead immobilization by non-apatite-type calcium phosphates in aqueous solutions." *Inorganic Chemistry Communications*. 5 : 156-158.
- Sugiyama, S., Ichii, T., Matsumoto, T., Hayashi, H. and Hayashi, H. 2002. "Effect of calcinations and sieving of calcium hydroxyapatite on ion-exchangeability with lead cation in the presence and absence of HCl." *Advances in Environmental Research*. 6 : 285-289.
- Sun, L., Chow, L.C. and Frukhtbeyn, S.A. 2010. "Preparation and properties of nanoparticles of calcium phosphates with various Ca/P ratios." *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 115(4) : 243-255.
- Tas, C.A. 2009. "Monetite (CaHPO_4) synthesis in ethanol at room temperature." *Journal of American Ceramic Society*. 92(12) : 2907-2912.
- Telisman, S., Colak, B., Pizent, A., Jurasovic, J. and Cvitkovic, P. 2007. "Reproductive toxicity of low-level lead exposure in men." *Environmental Research*. 105 : 256-266.

- Tudorache, F., Petrila, L., Popa, K. and Catargiu, A.M. 2014. "Electrical properties and humidity sensor characteristics of lead hydroxyapatite material." *Applied Surface Science*. 303 : 175-179.
- Wang, W., Itoh, S., Yamamoto, N., Okawa, A., Nagai, A. and Yamashita, K. 2010. "Electrical polarization of β -tricalcium phosphate ceramics." *Journal American Ceramic Society*. 93 : 2175-2177
- Wood, T.S., Anurakpongsatorn, P., Chaichana, R., Mahujchariyawong, J. and Satapanajaru, T. 2006. "heavy predation on freshwater bryozoans by the golden apple snail." *The Natural History Journal of Chulalongkorn University*. 6 : 31-36.
- Xiaowei, L., Xin, L., Taihong, G., Bo, G. and Weidong, H. 2011. Effects of the mass ratio of CaCO_3 to $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ on in situ synthesis of hydroxyapatite coating by laser cladding." *Rare Metal Materials and Engineering*. 40 : 22-27.
- Xu, H., Yang, L., Wang, P., Liu, Y. and Peng, M. 2012. "Removal mechanism of aqueous lead by a novel eco-material: carbonate hydroxyapatite." *Journal Materials Science Technology*. 23 : 417-422.
- Yashima, M. and Sakai, A. 2003. "High-temperature neutron powder diffraction study of the structural phase transition between α - α' phases in tricalcium phosphate $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$." *Chemical Physics Letters*. 372 : 779-783.
- Yashima, M., Sakai, A., Kamiyama, T. and Hoshikawa, A. 2003. "Crystal structure analysis of β -tricalcium phosphate $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ by neutron powder diffraction." *J Solid State Chemical*. 175 : 272-277.
- Yin, X. and Stott, M.J. 2003. " α - and β -tricalcium phosphate: A density functional study" *Physical review B*. 68 : 205205-1 - 205205-8.
- Zhang, Z., Li, M., Chen, W., Zhu, S., Liu, N. and Zhu, L. 2010. "Immobilization of lead and cadmium from aqueous solution and contaminated sediment using nano-hydroxyapatite." *Environmental Pollution*. 158 : 514-519.
- Zhao, J., Zhao, J., Chen, J., Wang, X., Han, Z. and Li, Y. 2014. "Rietveld refinement of hydroxyapatite, tricalcium phosphate and biphasic materials prepared by solution combustion method." *Ceramics International*. 40 : 3379-3388.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารเคมีและการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

ก-1 การเตรียมสต็อกสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70% ปริมาตร 2,000 ml จากสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85%

การคำนวณ

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ $C_1 =$ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85%

$C_2 =$ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70%

$V_1 =$ ปริมาตรของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85%

$V_2 =$ ปริมาตรของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70%

แทนค่า $C_1V_1 = C_2V_2$

$$(85\%)(V_1) = (70\%)(2,000 \text{ ml})$$

$$V_1 = 1,647.06 \text{ ml}$$

ดังนั้น ต้องตวงสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% ปริมาตร 1,647.06 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2,000 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 2,000 ml

ก-2 การเตรียมสต็อกสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50% ปริมาตร 2,000 ml จากสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85%

การคำนวณ

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ $C_1 =$ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85%

$C_2 =$ ความเข้มข้นของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50%

$V_1 =$ ปริมาตรของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85%

$V_2 =$ ปริมาตรของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50%

แทนค่า $C_1V_1 = C_2V_2$

$$(85\%)(V_1) = (50\%)(2,000 \text{ ml})$$

$$V_1 = 1,176.47 \text{ ml}$$

ดังนั้น ต้องตวงสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% ปริมาตร 1,176.47 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2,000 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 2,000 ml

ก-3 การคำนวณหาจำนวนโมลของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85 และ 70% โดยการเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นจากหน่วย % โดยมวล หรือ % โดยปริมาตร เป็นความเข้มข้นในหน่วย mol

การคำนวณ

จากสูตร $C = 10\%D/M$

เมื่อ $C =$ ความเข้มข้นในหน่วย mol/l หรือ mol/dm³

$\%$ = ความเข้มข้นในหน่วยร้อยละโดยมวล หรือร้อยละโดยปริมาตร

$D =$ ความหนาแน่นของสารละลาย

$M =$ มวลโมเลกุลของตัวละลาย

แทนค่า $C = 10\%D/M$

$$C = (10)(85\%)(1.689 \text{ g/ml}) / (97.97 \text{ g/mol})$$

$$C = 14.6539 \text{ mol/l}$$

ดังนั้น สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% มีความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกอยู่ 14.6539 mol/l
ถ้าสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70% จะมีความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกอยู่ 12.0679 mol/l

ก-4 การคำนวณหาจำนวนโมลของสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85 และ 50% โดยการเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นจากหน่วย % โดยมวล หรือ % โดยปริมาตร เป็นความเข้มข้นในหน่วย mol

การคำนวณ

จากสูตร $C = 10\%D/M$

เมื่อ $C =$ ความเข้มข้นในหน่วย mol/l หรือ mol/dm³

$\%$ = ความเข้มข้นในหน่วยร้อยละโดยมวล หรือร้อยละโดยปริมาตร

$D =$ ความหนาแน่นของสารละลาย

$M =$ มวลโมเลกุลของตัวละลาย

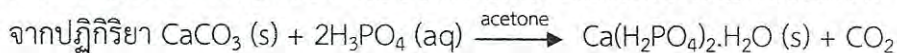
แทนค่า $C = 10\%D/M$

$$C = (10)(85\%)(1.689 \text{ g/ml}) / (97.97 \text{ g/mol})$$

$$C = 14.6539 \text{ mol/l}$$

ดังนั้น สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% มีความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกอยู่ 14.6539 mol/l
ถ้าสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50% จะมีความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกอยู่ 8.6199 mol/l

ก-5 การสังเคราะห์สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต



จะได้ว่า CaCO_3 1 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ H_3PO_4 เข้มข้น 70 % 2 mol

จากสารละลาย H_3PO_4 เข้มข้น 70 % มีเนื้อสารเท่ากับ 12.0679 mol หมายความว่า

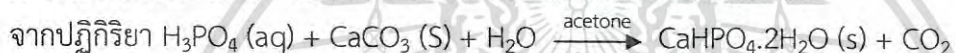
สารละลาย H_3PO_4 เข้มข้น 70 % มีเนื้อสาร 12.0679 mol ในสารละลาย 1,000 ml

$$\begin{aligned} \text{สารละลาย } \text{H}_3\text{PO}_4 \text{ เข้มข้น 70 \% มีเนื้อสาร 2 mol จะอยู่ในสารละลาย} &= \frac{1,000 \text{ ml} \times 2 \text{ mol}}{12.0679 \text{ mol}} \\ &= \underline{165.7289 \text{ ml}} \end{aligned}$$

ดังนั้น CaCO_3 1 mol เท่ากับ 100 กรัม ทำปฏิกิริยากับ H_3PO_4 70 % ปริมาตร 165.7289 ml

ถ้า CaCO_3 0.5 mol เท่ากับ 50 กรัม ทำปฏิกิริยากับ H_3PO_4 70 % ปริมาตร 82.8645 ml

ก-6 การสังเคราะห์สารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต



จะได้ว่า CaCO_3 1 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ H_3PO_4 เข้มข้น 50 % 1 mol

สารละลาย H_3PO_4 เข้มข้น 50 % มีเนื้อสารเท่ากับ 8.619 mol หมายความว่า

สารละลาย H_3PO_4 เข้มข้น 50 % มีเนื้อสาร 8.619 mol ในสารละลาย 1,000 ml

$$\begin{aligned} \text{สารละลาย } \text{H}_3\text{PO}_4 \text{ เข้มข้น 50 \% มีเนื้อสาร 1 mol จะอยู่ในสารละลาย} &= \frac{1,000 \text{ ml} \times 1 \text{ mol}}{8.619 \text{ mol}} \\ &= \underline{122.4140 \text{ ml}} \end{aligned}$$

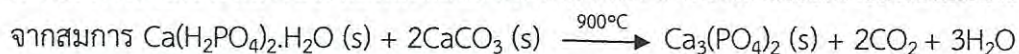
สารละลาย H_3PO_4 เข้มข้น 50 % มีเนื้อสาร 1 mol จะอยู่ในสารละลาย = 122.4140 ml

ดังนั้น CaCO_3 1 mol เท่ากับ 100 กรัม ทำปฏิกิริยากับ H_3PO_4 50 % ปริมาตร 122.4140 ml

ถ้า CaCO_3 0.5 mol เท่ากับ 50 กรัม ทำปฏิกิริยากับ H_3PO_4 50 % ปริมาตร 61.207 ml

ก-7 การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

ก-7.1. การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต



จะได้ว่า $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ CaCO_3 2 mol

($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} = 252.07 \text{ g/mol}$)

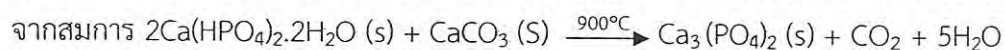
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1 mol มีค่าเท่ากับ 252.07 g และ CaCO_3 1 mol มีค่าเท่ากับ 100 g

ดังนั้น ในขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตสามารถทำได้โดยซึ่งเปลือกหอยเชอรี่

(CaCO_3) 200 g ผสมกับ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 252.07 g แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-7.2. การสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรท



จะได้ว่า $2\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ CaCO_3 1 mol

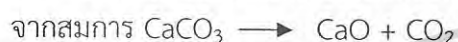
($\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 172.1 \text{ g/mol}$)

$\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 mol มีค่าเท่ากับ 172.1 g และ CaCO_3 1 mol มีค่าเท่ากับ 100 g

ดังนั้น ในขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตสามารถทำได้โดยชั่งเปลือกหอยเชอร์รี่

(CaCO_3) 100 g ผสมกับ $\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 344.2 g แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

ก-8 การคำนวณปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกหอยเชอร์รี่



หมายความว่า CaO 56.08 กรัม เกิดจากการสลายตัวของ CaCO_3 100.09 กรัม

ถ้า CaO 56 กรัม เกิดจากการสลายตัวของ CaCO_3 99.95 กรัม

จาก CaCO_3 100.09 กรัม คิดเป็น CaCO_3 100 เปอร์เซ็นต์

ถ้า CaCO_3 99.95 กรัม คิดเป็น CaCO_3 99.86 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-9 การคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต
ตารางที่ ก-1 การคำนวณต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

วิธีการ	สารเคมี	ราคาอ้างอิง	ปริมาณที่ใช้	ราคา (บาท)	ราคาสุทธิ (บาท)
การเตรียมเปลือกหอย	เปลือกหอยเชอร์รี่	-	10 กิโลกรัม	-	150/10kg
	โซเดียมไฮโปคลอไรท์	30 บาท/ลิตร	5 ลิตร	150	
การเตรียม H ₃ PO ₄ 70%	H ₃ PO ₄ 85%	1,600 บาท/20 ลิตร	1,648 ml	131.84	135.01/2,000ml
	น้ำกลั่น	180 บาท/20 ลิตร	352 ml	3.17	
การเตรียม H ₃ PO ₄ 50%	H ₃ PO ₄ 85%	1,600 บาท/20 ลิตร	1,177 ml	94.16	101.57/2,000ml
	น้ำกลั่น	180 บาท/20 ลิตร	823 ml	7.41	
ค่าไฟฟ้า (ตู้อบ)	-	2.76 บาท/หน่วย	2 ชั่วโมง	7.176	7.18
ค่าไฟฟ้า (เตาเผา)	-	2.76 บาท/หน่วย	2 ชั่วโมง	11.592	11.59

หมายเหตุ : ราคา โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ข้อมูลจากบริษัท MORAL COMPOUND สืบค้นวันที่ 22/05/59

ราคา H₃PO₄ 85% ข้อมูลจากบริษัท MORAL COMPOUND สืบค้นวันที่ 22/05/59

ราคาน้ำกลั่น ข้อมูลจากบริษัท PJK Supply Thailand สืบค้นวันที่ 22/05/59

อัตราค่าไฟฟ้า ข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง สืบค้นวันที่ 22/05/59

ก-9.1. การคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าจากการใช้ตู้อบ

จากสูตร กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ = 1,000 วัตต์

พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) × เวลาการใช้งาน (ชั่วโมง)

จาก อัตราค่าไฟฟ้ากิจกรรมขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.76 บาท/หน่วย

วิธีการคำนวณ ตู้อบมีกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 1,300 วัตต์ หรือเท่ากับ 1.30 กิโลวัตต์

คิดเป็น พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) × เวลาการใช้งาน (ชั่วโมง)

พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = 1.30 (กิโลวัตต์) × 2 (ชั่วโมง)

พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = 2.60 หน่วย

คิดเป็น ค่าไฟฟ้า = 2.76 บาท × 2.60 หน่วย = 7.176 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-9.2. การคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าจากการใช้เตาเผา

จากสูตร กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ = 1,000 วัตต์

พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) × เวลาการใช้งาน (ชั่วโมง)

จาก อัตราค่าไฟฟ้ากิจกรรมขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.76 บาท/หน่วย

วิธีการคำนวณ ตูบมีกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 2,100 วัตต์ หรือเท่ากับ 2.10 กิโลวัตต์

วิธีการคำนวณ คิดเป็น พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) × เวลาการใช้งาน (ชั่วโมง)

วิธีการคำนวณ คิดเป็น พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = 2.10 (กิโลวัตต์) × 2 (ชั่วโมง)

วิธีการคำนวณ คิดเป็น พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) = 4.20 หน่วย

วิธีการคำนวณ คิดเป็น ค่าไฟฟ้า = 2.76 บาท × 4.20 หน่วย = 11.592 บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์

ข.1 วิธีวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ธาตุด้วย X-ray microanalysis โดยการฉาบผิวด้วยคาร์บอนด้วยแท่งคาร์บอน 2 แท่ง แท่งหนึ่งจะฝนให้เป็นปลายตัดเรียบ อีกแท่งหนึ่งจะเหลาให้เรียบแล้วนำไปติดตั้งในเครื่อง Vacuum evaporator โดยให้ปลายทั้งสองชนกัน และอยู่เหนือตัวอย่าง 5-10 cm การฉาบจะทำภายใต้สภาวะสุญญากาศสูง (10-6 Torr) โดยปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่แท่งคาร์บอน ซึ่งถูกยึดติดกับขั้วไฟฟ้า คาร์บอนจะถูกเผาจนร้อนแดง ทำให้ตรงปลายแหลมกลายเป็นไอและเคลือบลงบนผิวตัวอย่าง จากนั้นวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟเฟกเตอร์ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 10-60 องศาเซลเซียส

ข.2 วิธีวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด (FTIR)

สารเคมี

1. โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr)

การทดลอง

1. นำตัวอย่างผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในโกร่งบดสาร โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์
2. บดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก เป็นเวลา 3 นาที
4. นำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด (FTIR)

ข.3 วิธีวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพพื้นฐานวิทยาด้วยเทคนิค (SEM)

1. นำตัวอย่างวางบนคาร์บอนเทปขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร จากนั้นเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำ โดยวางตัวอย่างไว้ระหว่างขั้วแอโนดและวางโลหะที่ใช้ฉาบ (Targer) ไว้ที่ขั้วแคโทดในการฉาบจะดูดอากาศออกให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศระดับ 0.1 Torr

2. จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าและปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าไปใน chamber โดย Ar จะเคลื่อนไปที่ขั้ว cathode และชนแผ่นทองทำให้แตกตัวเป็นโมเลกุล กระจายไปทั่ว chamber แล้วค่อยๆ เคลือบลงบนตัวอย่าง ให้มีความหนาของผิวฉาบระหว่าง 10 -20 nm

3. จากนั้นทำการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยายระหว่าง 2,000-10,000 เท่า

ข.4 วิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF)

สารเคมี

1. กรดบอริก (H_3BO_3)

การทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 g และชั่งกรดบอริก (H_3BO_3) 4.5 g บันทึกน้ำหนักรวมทั้งหมด
2. ผสมตัวอย่างกับกรดบอริกให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องผสมของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
3. นำตัวอย่างอัดเม็ด และส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.

ข-5 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

สารเคมี

1. กรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น

การทดลอง

1. ปิเปิดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
2. นำไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง hot plate จนน้ำเสียตัวอย่างมีปริมาตรเหลืออยู่ 1 มิลลิลิตร
3. นำน้ำเสียตัวอย่างมาปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตร ให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 100 มิลลิลิตร
4. กรองน้ำเสียตัวอย่างที่ปรับปริมาตรสุดท้ายแล้วด้วยกระดาษกรองที่มีรูพรุนขนาด 0.45 ไมครอน
5. วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่างด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง

ตารางที่ ค-1 ร้อยละของผลผลิต MCPM ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70%

ลำดับที่	น.น. เปลือกหอยเชอรี่ (กรัม)	จำนวน โมลเปลือกหอยเชอรี่	ปริมาตร กรด (ml)	จำนวน โมลกรด	น.น. ผลิตภัณฑ์ (กรัม)	จำนวน โมลผลิตภัณฑ์	ร้อยละของผลผลิต
1	50.0140	0.4996	83.00	1.0016	123.3223	0.4892	97.84
2	50.0839	-0.5003	83.00	1.0016	124.7872	0.4950	99.01
3	50.0812	0.5004	83.00	1.0016	124.2091	0.4927	98.55
4	50.0145	0.4997	83.00	1.0016	124.2702	0.4930	98.60
5	50.0411	0.4999	83.00	1.0016	123.3481	0.4893	97.86

จากสมการ $\text{CaCO}_3 (s) + 2\text{H}_3\text{PO}_4 (aq) \xrightarrow{\text{acetone}} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} (s) + \text{CO}_2$
 จะได้ว่า CaCO_3 1 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ H_3PO_4 2 mol
 หรือ จะได้ว่า CaCO_3 0.5 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ H_3PO_4 1 mol ด้วย

จาก $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1 mol มีน้ำหนักเท่ากับ 252.08 กรัม
 ถ้า $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 mol จะมีน้ำหนักเท่ากับ 126.04 กรัม

ร้อยละของผลผลิต = $\frac{\text{น้ำหนักผลผลิตจากการทดลอง} \times 100}{\text{น้ำหนักผลผลิตทางทฤษฎี}}$

ร้อยละของผลผลิต = $\frac{123.3223 \times 100}{126.04}$

ร้อยละของผลผลิต = 97.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ร้อยละของผลผลิต DCPD ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอร์และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50%

ลำดับที่	น.น. เปลือกหอยเชอร์ (กรัม)	จำนวน โมล เปลือกหอยเชอร์	ปริมาตร กรด (ml)	จำนวน โมลกรด	น.น. ผลิตภัณฑ์ (กรัม)	จำนวน โมล ผลิตภัณฑ์	ร้อยละ ของผลผลิต
1	50.0883	0.5004	62.00	0.500	65.6725	0.3816	76.32
2	50.0744	0.5003	62.00	0.500	65.0361	0.3779	75.58
3	50.0503	0.5001	62.00	0.500	62.8995	0.3655	73.10
4	50.0318	0.4998	62.00	0.500	62.9599	0.3658	73.17
5	50.0634	0.5002	62.00	0.500	62.8580	0.3652	73.05

จากสมการ $\text{H}_3\text{PO}_4 (\text{aq}) + \text{CaCO}_3 (\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{acetone}} \text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} (\text{s}) + \text{CO}_2$

จะได้ว่า CaCO_3 1 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ H_3PO_4 1 mol

หรือ จะได้ว่า CaCO_3 0.5 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ H_3PO_4 0.5 mol ด้วย

จาก $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 mol มีน้ำหนักเท่ากับ 172.1 กรัม

ถ้า $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.5 mol จะมีน้ำหนักเท่ากับ 86.05 กรัม

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักผลผลิตจากการทดลอง} \times 100}{\text{น้ำหนักผลผลิตทางทฤษฎี}}$$

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = \frac{65.6725 \times 100}{86.05}$$

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = 76.32$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ร้อยละของผลผลิต TCP-M ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และ MCPM

ลำดับที่	น.น. เปลือกหอยเชอรี่ (กรัม)	จำนวน โมล เปลือกหอยเชอรี่	น.น. MCPM (กรัม)	จำนวน โมล MCPM	น.น. ผลิตภัณฑ์ (กรัม)	จำนวน โมล ผลิตภัณฑ์	ร้อยละของผลผลิต
1	78.7384	0.7867	100.0322	0.3968	124.8435	0.4025	101.64
2	78.7433	0.7867	100.0475	0.3969	123.9804	0.3997	100.94
3	78.7243	0.7865	100.0124	0.3967	125.0381	0.4031	101.80
4	78.7116	0.7864	100.0419	0.3969	125.0395	0.4031	101.80
5	78.7231	0.7865	100.0150	0.3968	124.4592	0.4012	101.33



จะได้ว่า $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ CaCO_3 2 mol

หรือ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.786 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ CaCO_3 0.396 mol ด้วย

จาก $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 1 mol มีน้ำหนักเท่ากับ 310.18 กรัม

ถ้า $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0.396 mol มีน้ำหนักเท่ากับ 122.83 กรัม

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักผลผลิตจากการทดลอง} \times 100}{\text{น้ำหนักผลผลิตทางทฤษฎี}}$$

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = \frac{124.8435 \times 100}{122.83}$$

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = 101.64$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4 ร้อยละของผลผลิต TCP-D ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยเชอรี่และ DCPA

ลำดับที่	น.น. เปลือกหอยเชอรี่ (กรัม)	จำนวน โมล เปลือกหอยเชอรี่	น.น. DCPA (กรัม)	จำนวน โมล DCPA	น.น. ผลิตภัณฑ์ (กรัม)	จำนวน โมล ผลิตภัณฑ์	ร้อยละของผลผลิต
1	14.6045	0.1459	41.0122	0.3014	38.6591	0.2841	85.95
2	14.5455	0.1453	41.0390	0.3016	38.8418	0.2855	86.35
3	14.5551	0.1454	41.0393	0.3016	40.3142	0.2963	89.63
4	14.5444	0.1453	41.0327	0.3016	40.7251	0.2993	90.54
5	14.5451	0.1453	41.0093	0.3014	38.9121	0.2860	86.51

จากผลการทดลอง $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูป CaHPO_4 ดังนั้นสมการ $2\text{CaHPO}_4 (\text{s}) + \text{CaCO}_3 (\text{s}) \xrightarrow{900^\circ\text{C}} \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 (\text{s}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ จะได้ว่า CaHPO_4 2 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ CaCO_3 1 mol หรือ CaHPO_4 0.301 mol ทำปฏิกิริยาพอดีกับ CaCO_3 0.145 mol ด้วย

จาก $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 1 mol มีน้ำหนักเท่ากับ 310.18 กรัม
ถ้า $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 0.145 mol มีน้ำหนักเท่ากับ 44.98 กรัม

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักผลผลิตจากการทดลอง} \times 100}{\text{น้ำหนักผลผลิตทางทฤษฎี}}$$

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = \frac{38.6591 \times 100}{44.98}$$

$$\text{ร้อยละของผลผลิต} = 85.95$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-5 ตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกหอยเชอริ (2 Theta degree)

ตัวอย่าง/ตำแหน่ง (2 Theta degree)			ระนาบ (2 Theta degree)		
CaCO ₃	CaCO ₃	เปลือกหอย เชอริ	h	k	l
PDF#411475 (K.N. Islam et al, 2013)	PDF#752230				
26.213***	26.223***	26.220	1	1	1
27.216	27.226	27.207	0	2	1
31.116	31.132	31.138	0	0	2
33.128	33.146	33.167	0	1	2
36.176	36.184	36.224	2	0	0
37.265	37.276	37.339	0	3	1
37.884	37.902	37.882	1	1	2
38.610	38.630	38.635	0	2	2
41.187	41.199	41.165	2	1	1
42.867	42.917	42.897	1	2	2
45.853	45.866	45.843	2	2	1
48.445	48.463	48.447	2	0	2
50.229	50.246	50.218	1	3	2
52.455	52.481	52.438	1	1	3
53.022	53.047	53.033	0	2	3

หมายเหตุ ; *** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 ตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮดรตและไดแคลเซียมฟอสเฟต

ตัวอย่าง/ตำแหน่ง (2 Theta degree)		ระนาบ (2 Theta degree)			ตัวอย่าง/ตำแหน่ง (2 Theta degree)		ระนาบ (2 Theta degree)		
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ .H ₂ O	MCPM	h	k	l	CaHPO ₄	DCP	h	k	l
PDF#090347					PDF#700360				
15.132	15.119	0	2	0	25.532	25.555	1	1	1
15.643	15.646	1	0	0	26.360	26.366	0	0	2
18.088	18.130	1	1	0	26.547	26.545	2	0	0
20.072	20.095	0	1	1	28.518	28.533	-1	-1	2
20.541	20.596	-1	2	0	30.241	30.172	-1	2	0
21.340	21.355	0	-2	1	30.422	30.394	-1	-2	1
22.901***	22.905	-1	-2	1	32.463	32.458	2	0	1
24.097**	24.120	-1	2	1	32.832	32.860	-2	0	2
24.849	24.844	0	2	1	35.806	35.898	2	1	1
26.585	26.588	0	-3	1	40.000	40.024	0	0	3
28.307	28.347	-1	-3	1	41.080	41.034	-2	-2	2
29.795	29.836	-1	3	1	41.853	41.759	2	-2	1
30.250	30.244	1	1	1	47.398	47.441	-3	-2	1
30.429	30.462	0	4	0	49.275	49.223	-3	2	0
32.076	32.095	-1	-1	2					
33.303	33.333	2	1	0					
33.547	33.587	-2	2	0					
34.671	34.717	-1	-4	1					
35.021	35.029	0	-1	2					
37.087	37.162	-1	2	2					
37.569	37.632	-2	-3	1					
45.399	45.416	-3	2	1					
46.331	46.379	-3	0	2					

หมายเหตุ ; *** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงที่สุด

หมายเหตุ ; ** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงเป็นอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-7 ตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

PDF#702065	ตัวอย่าง/ตำแหน่ง (2 Theta degree)		ระนาบ (2 Theta degree)		
	TCP-M	TCP-D	h	k	l
16.974	17.142	17.060	1	1	0
18.415	18.234	18.149	1	1	3
21.825	22.007	21.902	0	2	4
25.773	25.986	25.862	1	0	10
27.777**	27.988	27.874**	2	1	4
29.620	29.728**	29.700	3	0	0
-	30.296	-	-	-	-
31.023***	31.181***	31.120***	0	2	10
-	31.935	-	-	-	-
32.436	32.356	32.521	1	2	8
34.335**	34.542	34.435**	2	2	0
37.328	37.568	37.454	1	2	11
37.815	-	37.933	3	1	5
40.067	40.015	39.931	1	1	15
41.055	-	41.117	4	0	4
41.670	-	41.760	3	0	12
47.064	47.116	47.028	2	1	16
48.113	48.134	48.011	1	3	13
48.357	48.654	48.450	1	4	6

หมายเหตุ ; *** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงที่สุด

หมายเหตุ ; ** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงเป็นอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-8 ตำแหน่งที่พีคหลักปรากฏของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) หลังการกำจัดตะกั่ว (2 Theta degree)

ตัวอย่าง/ตำแหน่ง (2 Theta degree)			ระนาบ (2 Theta degree)		
PDF#702065	TCP-M (ก่อน)	TCP-M (หลัง)	h	k	l
16.974	17.142	17.020	1	1	0
18.415	18.234	-	1	1	3
-	-	18.722	-	-	-
21.825	22.007	-	0	2	4
25.773	25.986	25.840	1	0	10
-	26.796	26.640	-	-	-
-	27.063	27.039	-	-	-
27.777*	27.988	27.639**	2	1	4
28.703	29.060	28.877	1	2	5
29.620	29.728**	29.551***	3	0	0
-	-	30.068	-	-	-
31.023***	31.181***	31.012	0	2	10
-	31.935	31.742	-	-	-
32.436	32.356	32.525**	1	2	8
32.993	32.721	32.878	3	0	6
34.335**	34.232	34.360	2	2	0
35.104	-	35.234	2	2	3
37.328	37.568	-	2	2	6
-	-	38.523	-	-	-
39.826	-	39.762	1	0	16
40.067	40.015	-	1	1	15
41.055	-	40.985	4	0	4
46.943	46.697	46.512	3	2	7
47.064	47.116	-	2	1	16
48.113	48.134	-	1	3	13
48.357	48.654	-	1	4	6
49.244	-	49.416	1	2	17
49.785	49.604	49.642	0	1	20

หมายเหตุ ; *** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-9 ตำแหน่งที่พิกัดหลักปรากฏของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) หลังการกำจัดตะกั่ว (2 Theta degree)

PDF#702065	ตัวอย่าง/ตำแหน่ง (2 Theta degree)		ระนาบ (2 Theta degree)		
	TCP-D (ก่อน)	TCP-D (หลัง)	h	k	l
16.974	17.060	16.917	1	1	0
18.415	18.149	-	1	1	3
21.825	21.902	21.755	0	2	4
25.773	25.862	25.713	1	0	10
27.777*	27.874*	27.763**	2	1	4
29.620	29.700	29.568	3	0	0
31.023***	31.120***	30.968***	0	2	10
32.436	32.521	32.501	1	2	8
34.335**	34.435**	34.307*	2	2	0
40.067	39.931	39.767	1	1	15
41.055	41.117	40.999	4	0	4
41.670	41.760	41.636	3	0	12
47.064	47.028	46.939	2	1	16
48.113	48.011	47.923	1	3	13
48.357	48.450	48.326	1	4	6

หมายเหตุ ; *** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงที่สุด

หมายเหตุ ; ** หมายถึง ตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณสูงเป็นอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-10 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ที่ pH ต่างๆ

pH	การ ทดลอง ครั้งที่	น้ำหนัก วัสดุ (กรัม)	น้ำเสีย เริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณ ตะกั่วใน ชุด ควบคุม (mg/L)	ค่า เฉลี่ย	S.D.	ปริมาณ ตะกั่ว ในชุด ทดลอง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	% การ กำจัด ในชุด ทดลอง	% การ กำจัด ในชุด ควบคุม	% การ กำจัด ของ TCP- M
2	1	0.2019	50.00	49.98	49.64	0.426	0.183	0.176	0.032	99.65	0.72	98.93
	2	0.2010	50.00	49.16			0.142					
	3	0.2015	50.00	49.77			0.204					
3	1	0.2020	50.00	48.33	48.13	0.205	0.100	0.108	0.052	99.78	3.74	96.04
	2	0.2033	50.00	48.13			0.060					
	3	0.2027	50.00	47.92			0.163					
5	1	0.2014	50.00	32.90	32.76	0.432	1.088	1.109	0.074	97.78	34.48	63.30
	2	0.2021	50.00	33.11			1.191					
	3	0.2022	50.00	32.28			1.047					
7	1	0.2009	50.00	18.09	17.40	1.189	1.027	0.931	0.104	98.14	65.20	32.94
	2	0.2001	50.00	16.03			0.944					
	3	0.2011	50.00	18.09			0.821					
9	1	0.2059	50.00	10.47	10.13	0.311	0.163	0.115	0.043	99.77	79.74	20.03
	2	0.2045	50.00	9.86			0.080					
	3	0.2049	50.00	10.06			0.101					

หมายเหตุ : สภาวะการทดลองคือ TCP-M 0.2 กรัม, ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-11 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ที่ pH ต่างๆ

pH	การ ทดลอง ครั้งที่	น้ำหนัก วัสดุ (กรัม)	น้ำเสีย เริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณ ตะกั่วใน ชุด ควบคุม (mg/L)	ค่า เฉลี่ย	S.D.	ปริมาณ ตะกั่ว ในชุด ทดลอง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	% การ กำจัด ในชุด ทดลอง	% การ กำจัด ในชุด ควบคุม	% การ กำจัด ของ TCP- D
2	1	0.2033	50.00	49.16	49.50	0.311	0.193	0.165	0.032	99.67	1.00	98.67
	2	0.2028	50.00	49.57			0.172					
	3	0.2034	50.00	49.77			0.131					
3	1	0.2012	50.00	47.93	48.47	0.513	0.049	0.062	0.025	99.88	3.06	96.82
	2	0.2027	50.00	48.54			0.090					
	3	0.2044	50.00	48.95			0.046					
5	1	0.2024	50.00	32.32	31.36	0.853	0.070	0.042	0.024	99.92	37.28	62.64
	2	0.2002	50.00	30.68			0.029					
	3	0.2027	50.00	31.09			0.028					
7	1	0.2009	50.00	17.54	16.99	0.632	0.029	0.056	0.031	99.89	66.02	33.87
	2	0.2015	50.00	16.30			0.048					
	3	0.2025	50.00	17.13			0.090					
9	1	0.2011	50.00	10.97	10.62	0.432	0.070	0.042	0.032	99.92	78.76	21.16
	2	0.2012	50.00	10.76			0.008					
	3	0.2001	50.00	10.14			0.049					

หมายเหตุ : สภาวะการทดลองคือ TCP-M 0.2 กรัม, ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง

ร้อยละการกำจัด = $\frac{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น}} \times 100$

ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-12 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่	น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณตะกั่วในชุดควบคุม (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ปริมาณตะกั่วในชุดทดลอง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	% การกำจัดในชุดทดลอง	% การกำจัดในชุดควบคุม	% การกำจัดของ TCP-M
1	1	0.2039	50.00	49.37	49.12	0.219	21.94	21.81	0.580	56.38	1.79	54.59
	2	0.2027	50.00	48.99			22.32					
	3	0.2018	50.00	48.99			21.18					
3	1	0.2033	50.00	48.62	49.13	0.439	18.43	17.30	1.499	65.40	1.77	63.63
	2	0.2035	50.00	49.39			17.87					
	3	0.2040	50.00	49.38			15.60					
5	1	0.2007	50.00	49.17	49.68	0.445	3.383	3.441	0.058	93.12	0.64	92.48
	2	0.2012	50.00	49.94			3.441					
	3	0.2020	50.00	49.94			3.499					
7	1	0.2025	50.00	49.76	49.39	0.323	0.078	0.066	0.011	99.87	1.24	98.63
	2	0.2029	50.00	49.20			0.060					
	3	0.2031	50.00	49.20			0.059					
10	1	0.2024	50.00	49.70	49.82	0.101	MDL	0.006	0.000	99.99	0.36	99.63
	2	0.2026	50.00	49.87			MDL					
	3	0.2030	50.00	49.88			MDL					
60	1	0.2059	50.00	49.46	49.74	0.240	0.080	0.054	0.029	99.99	0.52	99.37
	2	0.2029	50.00	49.88			0.023					
	3	0.2065	50.00	49.87			0.059					
120	1	0.2011	50.00	50.18	49.50	0.592	MDL	0.006	0.000	99.99	1.01	98.98
	2	0.2025	50.00	49.16			MDL					
	3	0.2017	50.00	49.15			MDL					

หมายเหตุ : สภาวะการทดลองคือ TCP-M 0.2 กรัม, pH สารละลายเท่ากับ 2

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น}} \times 100$$

MDL = 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-13 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่	น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณตะกั่วในชุดควบคุม (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ปริมาณตะกั่วในชุดทดลอง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	% การกำจัดในชุดทดลอง	% การกำจัดในชุดควบคุม	% การกำจัดของ TCP-D
1	1	0.2030	50.00	49.37	49.56	0.190	3.528	3.610	0.077	92.78	0.88	91.90
	2	0.2046	50.00	49.56			3.680					
	3	0.2034	50.00	49.75			3.623					
3	1	0.2045	50.00	49.38	49.38	0.190	0.051	0.051	0.019	99.90	1.24	98.66
	2	0.2004	50.00	49.57			0.032					
	3	0.2006	50.00	49.19			0.070					
5	1	0.2001	50.00	49.36	49.17	0.195	MDL	0.006	0.000	99.99	1.66	98.33
	2	0.2005	50.00	48.97			MDL					
	3	0.2043	50.00	49.17			MDL					
7	1	0.2040	50.00	48.45	48.83	0.497	MDL	0.006	0.000	99.99	2.34	97.65
	2	0.2045	50.00	49.39			MDL					
	3	0.2047	50.00	48.64			MDL					
10	1	0.2001	50.00	48.77	48.89	0.107	MDL	0.006	0.000	99.99	2.22	97.77
	2	0.2041	50.00	48.95			MDL					
	3	0.2022	50.00	48.96			MDL					
60	1	0.2018	50.00	49.88	49.74	0.428	MDL	0.006	0.000	99.99	0.52	99.47
	2	0.2026	50.00	49.26			MDL					
	3	0.2031	50.00	50.08			MDL					
120	1	0.2023	50.00	49.77	49.27	0.987	MDL	0.006	0.000	99.99	1.46	98.53
	2	0.2009	50.00	49.90			MDL					
	3	0.2022	50.00	48.13			MDL					

หมายเหตุ : สภาวะการทดลองคือ TCP-D 0.2 กรัม, pH สารละลายเท่ากับ 2

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น}} \times 100$$

หมายเหตุ : MDL = 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-14 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ปริมาณต่างๆ

การทดลองครั้งที่	น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณตะกั่วในชุดควบคุม (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ปริมาณตะกั่วในชุดทดลอง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	% การกำจัดในชุดทดลอง	% การกำจัดในชุดควบคุม	% การกำจัดของ TCP-M
1	0.0209	50.00	49.29	48.87	0.488	31.93	34.88	2.561	30.24	2.26	27.98
2	0.0211	50.00	49.06			36.17					
3	0.0234	50.00	48.32			36.54					
1	0.0512	50.00	49.43	48.57	0.766	23.28	22.30	0.927	55.40	2.86	52.54
2	0.0522	50.00	48.32			22.17					
3	0.0568	50.00	47.96			21.44					
1	0.1019	50.00	48.69	49.06	0.486	7.650	7.601	0.207	84.80	1.88	82.92
2	0.1005	50.00	48.88			7.374					
3	0.1054	50.00	49.61			7.779					
1	0.1522	50.00	48.88	48.82	0.827	1.481	1.536	0.271	96.93	2.36	94.57
2	0.1526	50.00	47.96			1.297					
3	0.1584	50.00	49.61			1.831					
1	0.2027	50.00	49.24	48.94	0.275	0.173	0.173	0.019	99.65	2.12	97.53
2	0.2029	50.00	48.70			0.192					
3	0.2115	50.00	48.88			0.154					
1	0.4014	50.00	49.98	49.18	0.832	0.136	0.117	0.019	99.77	1.64	98.13
2	0.4023	50.00	48.32			0.117					
3	0.4077	50.00	49.24			0.099					
1	0.6015	50.00	49.06	49.06	0.185	0.099	0.093	0.010	99.81	1.88	97.93
2	0.6022	50.00	49.24			0.099					
3	0.6026	50.00	48.87			0.081					
1	0.8044	50.00	48.51	48.94	0.745	0.081	0.063	0.019	99.87	2.12	97.75
2	0.8025	50.00	48.51			0.063					
3	0.8048	50.00	49.80			0.044					
1	1.0006	50.00	49.06	49.00	0.463	0.099	0.062	0.032	99.88	2.00	97.88
2	1.0017	50.00	49.43			0.044					
3	1.0145	50.00	48.51			0.044					

หมายเหตุ : สภาวะการทดลองคือ pH สารละลายเท่ากับ 2, ระยะเวลาสัมผัส 7 นาที

ร้อยละการกำจัด = $\frac{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น}} \times 100$

ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-15 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ปริมาณต่างๆ

การทดลองครั้งที่	น้ำหนักวัสดุ (กรัม)	น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณตะกั่วในชุดควบคุม (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ปริมาณตะกั่วในชุดทดลอง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	S.D.	% การกำจัดในชุดทดลอง	% การกำจัดในชุดควบคุม	% การกำจัดของ TCP-D
1	0.0205	50.00	49.24	49.18	0.104	4.390	4.241	0.129	91.52	1.64	89.88
2	0.0214	50.00	49.24			4.169					
3	0.0207	50.00	49.06			4.164					
1	0.0532	50.00	49.80	49.37	0.745	3.617	3.431	0.542	93.14	1.26	91.88
2	0.0516	50.00	49.80			3.856					
3	0.0515	50.00	48.51			2.820					
1	0.1001	50.00	49.24	49.18	0.832	1.849	1.436	0.668	97.13	1.64	95.49
2	0.1024	50.00	49.98			1.794					
3	0.1107	50.00	48.32			0.665					
1	0.2014	50.00	49.79	49.55	0.588	0.210	0.190	0.019	99.62	0.90	98.72
2	0.2038	50.00	49.98			0.173					
3	0.2017	50.00	48.88			0.186					
1	0.4002	50.00	48.32	48.45	0.110	0.192	0.177	0.054	99.65	3.10	96.55
2	0.4011	50.00	48.51			0.117					
3	0.4044	50.00	48.51			0.222					
1	0.6028	50.00	49.79	49.86	0.113	0.118	0.128	0.036	99.74	0.28	99.46
2	0.6009	50.00	49.99			0.099					
3	0.6107	50.00	49.80			0.168					
1	0.8040	50.00	48.88	48.88	0.185	0.099	0.091	0.009	99.82	2.24	97.58
2	0.8025	50.00	49.06			0.081					
3	0.8034	50.00	48.69			0.094					
1	1.0012	50.00	49.06	48.75	0.386	MDL	0.006	0.000	99.99	2.50	97.49
2	1.0033	50.00	48.32			MDL					
3	1.0033	50.00	48.88			MDL					
1		50.00	48.32	48.38	0.280	MDL	0.006	0.000	99.99	3.24	96.75
2		50.00	48.14			MDL					
3		50.00	48.69			MDL					

หมายเหตุ : สภาวะการทดลองคือ pH สารละลายเท่ากับ 2, ระยะเวลาสัมผัส 3 นาที

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-16 ผลการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ปริมาณต่างๆ

วัสดุ	น้ำหนัก วัสดุ (กรัม)	pH (ก่อน)	น้ำเสีย เริ่มต้น (mgPb/L)	ค่า เฉลี่ย	S.D.	ปริมาณ ตะกั่วใน ชุดทดลอง (mg/L)	ค่า เฉลี่ย	S.D.	pH (หลัง)	% การ กำจัด
TCP- M	0.0699	2.73	10.52	10.91	0.390	2.256	2.204	0.059	3.12	79.80
	0.0690	2.74	11.30			2.217			3.10	
	0.0695	2.77	10.91			2.140			3.11	
TCP- D	0.0455	2.79	11.69	10.98	0.789	1.751	1.816	0.068	2.87	83.46
	0.0458	2.77	11.11			1.810			2.89	
	0.0452	2.72	10.13			1.887			2.85	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาไอโซเทอมการกำจัดตะกั่ว

ง-1 การคำนวณไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

ตารางที่ ง-1 ผลการศึกษาไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

น้ำหนัก เฉลี่ย	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (C ₀) (mg/L)	ความเข้มข้น ตะกั่วที่เหลือ (C _e) (mg/L)	ความจุใน การดูดซับ (q) (mg/g)	1/C _e	1/q	log C _e	log q
0.0218	100	50.00	34.88	69.3578	0.0287	0.0144	1.5426	1.8411
0.0534	100	50.00	22.30	51.8727	0.0448	0.0193	1.3483	1.7149
0.1026	100	50.00	7.601	41.3246	0.1316	0.0242	0.8809	1.6162
0.1544	100	50.00	1.536	31.3886	0.6510	0.0319	0.1864	1.4968
0.2057	100	50.00	0.173	24.2231	5.7803	0.0413	-0.7620	1.3842
0.4038	100	50.00	0.117	12.3534	8.5470	0.0809	-0.9318	1.0918
0.6021	100	50.00	0.093	8.28882	10.7527	0.1206	-1.0315	0.9185
0.8039	100	50.00	0.063	6.21184	15.8730	0.1610	-1.2007	0.7932
1.0056	100	50.00	0.062	4.9660	16.1290	0.2014	-1.2076	0.6960

ง-1.1 การคำนวณค่าคงที่ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

จากรูปที่ 4.17 (ก) จะได้สมการเส้นตรง $y = 0.0099x + 0.0135$

จุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{q_m} = 0.0135$, $q_m = 74.0741$

ความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K} = 0.0099$, $K = 1.3636$

ง-1.2 การคำนวณค่าคงที่ไอโซเทอมแบบฟรุนดิชของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M)

จากรูปที่ 4.17 (ข) จะได้สมการเส้นตรง $y = 0.3459x + 1.3288$

ความชันเท่ากับ $\frac{1}{n} = 0.3459$, $n = 2.891$

จุดตัดเท่ากับ $\log K = 1.3288$, $K = 21.3206$

ง-1.3 การคำนวณปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) ที่ใช้ในการดูดซับ

จากรูปที่ 4.17 (ก) พบว่าการดูดซับของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-M) สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และมีค่า $q_m = 42.9185$, $K = 23.2999$, $C = 0.2$

แทนค่าในสมการ $q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$, $q = 15.8718$

ดังนั้น ปริมาณตะกั่ว 15.8718 มิลลิกรัม ถูกดูดซับอยู่ใน TCP-M 1 กรัม

ปริมาณตะกั่ว 1.095 มิลลิกรัม ถูกดูดซับอยู่ใน TCP-M $\frac{1.095 \times 1}{15.8718} = 0.0690$ กรัม

ดังนั้น น้ำเสีย 100 มิลลิลิตร ใช้ปริมาณ TCP-M = 0.0690 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง-2 การคำนวณไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-เอ็ม (TCP-D)

ตารางที่ ง-2 ผลการศึกษาไอโซเทอมของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

น้ำหนัก เฉลี่ย	ปริมาตร สารละลาย (ml)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (C ₀) (mg/L)	ความเข้มข้น ตะกั่วที่เหลือ (C _e) (mg/L)	ความจุในการ ดูดซับ (q) (mg/g)	1/C _e	1/q	logC _e	logq
0.0208	100	50.00	4.241	219.9952	0.2358	0.0045	0.6275	2.3424
0.0521	100	50.00	3.431	89.3839	0.2915	0.0112	0.5354	1.9513
0.1044	100	50.00	1.436	46.5172	0.6964	0.0215	0.1572	1.6676
0.1567	100	50.00	0.190	31.7869	5.2632	0.0315	-0.7212	1.5022
0.2023	100	50.00	0.177	24.6283	5.6497	0.0406	-0.7520	1.3914
0.4019	100	50.00	0.128	12.4091	7.8125	0.0806	-0.8928	1.0937
0.6048	100	50.00	0.091	8.2522	10.9890	0.1212	-1.0410	0.9166
0.8033	100	50.00	0.006	6.2236	166.6667	0.1607	-2.2218	0.7940
1.0026	100	50.00	0.006	4.9864	166.6667	0.2005	-2.2218	0.6978

ง-2.1 การคำนวณค่าคงที่ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

จากรูปที่ 4.18 (ก) จะได้สมการเส้นตรง $y = 0.0009x + 0.0398$

จุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{q_m} = 0.0398$, $q_m = 25.1256$

ความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K} = 0.0009$, $K = 44.22$

ง-2.2 การคำนวณค่าคงที่ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D)

จากรูปที่ 4.18 (ข) จะได้สมการเส้นตรง $y = 0.4961x + 1.733$

ความชันเท่ากับ $\frac{1}{n} = 0.4961$, $n = 2.0157$

จุดตัดเท่ากับ $\log K = 1.733$, $K = 54.0754$

ง-2.3 การคำนวณปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) ที่ใช้ในการดูดซับ

จากรูปที่ ง-2 พบว่าการดูดซับของไตรแคลเซียมฟอสเฟต-ดี (TCP-D) สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และมีค่า $K = 86.3177$, $C = 0.2$, $n = 1.9361$

แทนค่าในสมการ $q = KC^n$, $q = 24.3355$

ดังนั้น ปริมาณตะกั่ว 24.3355 mg ถูกดูดซับอยู่ใน TCP-D 1 g

ปริมาณตะกั่ว 1.095 mg ถูกดูดซับอยู่ใน TCP-D 0.0450 g

ดังนั้น น้ำเสีย 100 ml ใช้ปริมาณ TCP-D 0.0450 g

ภาคผนวก จ

วิธีการหาขีดจำกัดของการวิเคราะห์ AAS

ขีดจำกัดของวิธีการวิเคราะห์ (Method Detection Limit, MDL) คือความสามารถต่ำสุดของสารที่สนใจที่มีอยู่ในตัวอย่างที่เครื่องมือสามารถวิเคราะห์ได้ ด้วยวิธีทดสอบและรายงานผลที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ด้วยการเตรียมสารมาตรฐานที่ประมาณความเข้มข้นมากกว่าความสามารถที่เครื่องมือตรวจวัดได้ (Instrumental detection limit) 3-5 เท่า มาตรวจวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องอย่างน้อย 7 ตัวอย่าง แล้วนำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และคำนวณหาค่าขีดจำกัดของวิธีการวิเคราะห์ (Method Detection Limit, MDL) ด้วยสมการ

$$MDL = (t_{v=n-1, \infty=0.01})(S_s)$$

เมื่อ t = ค่าสถิติที่อ่านได้จากตารางการกระจายข้อมูลแบบ t (t -distribution table)

v = degree of freedom

∞ = ระดับความเชื่อมั่น (sinnificant level)

n = จำนวนตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

ss = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างที่วิเคราะห์

ช-2 การเตรียมสารละลายตะกั่ว

1. ค่าความสามารถที่เครื่องมือตรวจวัดได้ (Instrumental detection limit) ในการตรวจวัดปริมาณตะกั่วคือ สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ดังนั้นควรเตรียมสารละลายให้มีความเข้มข้นมากกว่าขีดจำกัดดังกล่าว 3 เท่า คือเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 3 ไมโครกรัมต่อลิตร

2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1.000 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร (ขนาด 50 มิลลิลิตร) พร้อมกับปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 3.000 ไมโครกรัมต่อลิตร

ตารางผลการทดลอง

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นตะกั่ว (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่าง	ความเข้มข้นตะกั่ว (ไมโครกรัมต่อลิตร)
1	2.000	11	4.000
2	8.000	12	1.000
3	7.000	13	5.000
4	1.000	14	8.000
5	3.000	15	7.000
6	7.000	16	6.000
7	6.000	17	4.000
8	5.000	18	6.000
9	5.000	19	2.000
10	8.000	20	4.000
ค่าเฉลี่ย			4.950
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			2.282
$MDL = (t_{v=n-1, \infty=0.01})(S_s)$			$2.282 \times 2.539 =$ 5.794

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวปวีลญาพร เจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	13 มกราคม 2533
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เกรดเฉลี่ย 3.13 พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง เกรดเฉลี่ย 3.33
ผลงานทางวิชาการ	การนำเสนอบทความเรื่อง “การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต จากเปลือกหอยเชอร์รี่ ; ศัตรูพืชในนาข้าว” ในการประชุมวิชาการ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้