การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ฟักให้เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมเพื่ออุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร

Adding value on hatching eggshell to be a calcium product used in agricultural and food industry

นิศารัตน์ สุระถา

ศิริลักษณ์ นาคาเริงฤทธิ์

สุพัชรี สุทธิบูรณ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADDING VALUE ON HATCHING EGGSHELL TO BE A CALCIUM PRODUCT USED IN AGRICULTURAL AND FOOD INDUSTRY

NISARAT SURATHA
SIRILUK NAKAROENGRIT
SUPATCHAREE SUTTIBOON

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ฟักให้เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมเพื่ออุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนิศารัตน์ สุระถา รหัสนักศึกษา 58050640
	นางสาวศิริลักษณ์ นาคาเริงฤทธิ์ รหัสนักศึกษา 58050684
	นางสาวสุพัชรี สุทธิบูรณ์ รหัสนักศึกษา 58050694
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.บรรจง บุญชม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการ	
รศ.ดร.บรรจง บุญชม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ฟักให้เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมเพื่ออุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนิศารัตน์	สุระถา	รหัสนักศึกษา 58050640
	นางสาวศิริลักษณ์	นาคาเริงฤทธิ์	รหัสนักศึกษา 58050684
	นางสาวสุพัชรี	สุทธิบูรณ์	รหัสนักศึกษา 58050694
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.บรรจง บุญชม		

บทคัดย่อ

ขยะประเภทเปลือกไข่ฟัก เป็นของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมอาหารและชุมชน ซึ่งไม่มีประโยชน์ เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และมีค่าใช้จ่ายในการจัดการสูง ในงานวิจัยนี้ จึงนำเปลือกไข่ฟัก มาผ่านกรรมวิธีล้างทำความสะอาดและบดให้เป็นผงขนาดไม่ต่ำกว่า 50 เมช ผงที่ได้จะกลายเป็นสารตั้งต้นแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำแคลเซียมคาร์บอเนตไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมโมโนแคลเซียมฟอสเฟตและไดแคลเซียมฟอสเฟต ด้วยวิธีที่ง่าย สะดวก และประหยัด โมโนแคลเซียมฟอสเฟตได้จากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70% จากนั้นทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการตกผลึกใหม่ โดยนำไปละลายน้ำในอัตราส่วนของแข็ง 1 กิโลกรัม ต่อน้ำ 3 กิโลกรัม ตะกอนของสารละลายถูกแยกออกและนำไปทำให้แห้ง ส่วนของสารละลายถูกนำไปตกผลึกโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C จนกว่าจะได้สีขาวอมเทาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต กรรมวิธีการเตรียมไดแคลเซียมฟอสเฟตเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตและแคลเซียมออกไซด์ โดยใช้เวลาในการผสม 15 นาที จะได้ไดแคลเซียมฟอสเฟต ตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมไว้และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ถูกตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพโดยการวิเคราะห์หาความหนาแน่น เฉดสีที่ปรากฏ และ SEM และตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR, TGA, XRF และ XRD

คำสำคัญ : แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมออกไซด์ โมโนแคลเซียมฟอตเฟส ไดแคลเซียมฟอตเฟส เปลือกไข่ฟัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Adding value on hatching eggshell to be a calcium product used in agricultural and food industry		
Students	Miss Nisarat	Suratha	Student ID 58050640
	Miss Siriluk	Nakaroengrit	Student ID 58050684
	Miss Supatcharee	Suttiboon	Student ID 58050694
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Banjong Boonchom		

Abstract

Hatched eggshell wastes from the food and community industries those are useless, harm environment and high cost management. This study had investigated hatched eggshell by washed and crushed process to get powder size of 50 mesh and calcium carbonate was obtained as raw material. Then the obtained calcium carbonate was heated at 900 °C for 2 h and its final decomposed product is calcium oxide. Calcium carbonate and calcium oxide are used as starting materials to produce monocalcium phosphate monohydrate and calcium phosphate dihydrate compounds with simple, convenient and economical method. Monocalcium phosphate monohydrate was obtained from reaction between calcium carbonate with 70% phosphoric acid and then was purified by repeated crystallization by dissolving 1 kg of solid per 3 kg of water. The remaining sediment liquid was separated from liquid and then dried for gotten 10% dicalcium phosphate dihydrate. The part of liquid was recrystallized by heating at 100 °C until it is grayish white of monocalcium phosphate monohydrate. While another prepared method of calcium phosphate dihydrate is solid state process from reaction between mono calcium phosphate with calcium oxide with good mixing for 15 minutes to get dicalcium phosphate dihydrate. All prepared starting and product samples were determined physical properties by density analysis, color shade and SEM and chemical properties with FTIR, TGA, XRF and XRD techniques.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords: Calcium carbonate, Calcium oxide, Monocalcium phosphate, Dicalcium phosphate, Hatching egg shell

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.บรรจง บุญชมที่คอยให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาในการทำโครงงานพิเศษ นอกจากนี้ยังให้กำลังใจและการดูแลเป็นอย่างดีทำให้โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงมาได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร และ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ที่เข้าร่วมเป็นคณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและเสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพื่อนำไปแก้ไขโครงงานพิเศษให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงงานพิเศษ และขอบคุณพี่สุพจน์ สำหรับความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดลองให้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆน้องๆ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ทุกคน ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดการทำโครงงานพิเศษ

สุดท้ายนี้กลุ่มผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจเป็นแรงผลักดัน แรงบันดาลใจ และคอยสนับสนุนทางด้านการศึกษาตลอดมา ทำให้กลุ่มของผู้วิจัยสามารถทำโครงงานพิเศษฉบับนี้ประสบความสำเร็จ

นิศารัตน์ สุระถา
ศิริลักษณ์ นาคาเริงฤทธิ์
สุพัชรี สุทธิบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญรูป.....ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.....ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตและไดแคลเซียมฟอสเฟต.....14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย.....15
3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ.....15
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....15
3.1.2 สารเคมี.....15
3.2 การเตรียมสารประกอบแคลเซียม.....16
3.2.1 การเตรียมสารตั้งต้น.....16
3.2.2 กระบวนการเตรียมสารประกอบแคลเซียม.....16
3.2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมโดยการไทเทรตกับสารละลาย EDTA.....17
3.2.4 การหาความหนาแน่นของสารตัวอย่าง.....17
3.3 การตรวจสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี.....18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา 18
3.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบภายในโมเลกุล
(Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) 18
3.3.4 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้าง (X-Ray diffractometer) 19
3.3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (X-Ray Fluorescence Spectrometer) 19
3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analyzer) 19
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 20
4.1 ผลผลิตร้อยละและผลผลิตจากการทดลองและทฤษฎี 20
4.2 เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ทางกายภาพ 21
4.2.1 ค่า ความหนาแน่น และเฉดสี 21
4.2.2 สมการทางเคมี 22
4.2.3 รูปร่างทางสัณฐานวิทยา 23
4.3 เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ทางเคมี 26
4.3.1 องค์ประกอบของธาตุ 26
4.3.2 โครงสร้างและขนาดของผลึก 27
4.3.3 รูปแบบของการสั่น 27
4.3.4 เอกลักษณ์การสลายตัว TGA 29
4.4 การหาความเข้มข้นของแคลเซียมด้วยเทคนิคการไทเทรต (Standardization) 33
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 34
5.1 สรุปผลการวิจัย 34
5.2 ข้อเสนอแนะ 34
เอกสารอ้างอิง 35
ภาคผนวก ก 37
ภาคผนวก ข 38
ภาคผนวก ค 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 ผลผลิตร้อยละและผลผลิตจากการทดลองและทฤษฎี.....21
4.2 แสดงค่าความหนาแน่นและเฉดสีของสารประกอบแคลเซียม.....22
4.3 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก.....26
4.4 ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารประกอบแคลเซียม.....33
ข-1 แสดงการหาความหนาแน่นของสารประกอบแคลเซียม.....38
ข-2 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก.....38
ข-3 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก.....39
ข-4 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ฟัก.....39
ข-5 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ฟัก.....39
ข-6 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก.....39
ข-7 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุโมโนแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก.....40
ข-8 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก..40
ข-9 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุโมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก.....40
ข-10 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก.....41
ข-11 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุไดแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก.....41
ข-12 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก.....41
ข-13 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก.....42
ข-14 แสดงผลการหาความเข้มข้นของ EDTA ด้วยสารละลายมาตรฐาน $CaCO_3$ ด้วยเทคนิคการไทเทรต (Titration).....42
ข-15 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมด้วยสารละลาย EDTA ด้วยเทคนิคการไทเทรต(Titration).....42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.1 แสดงภาพ (ก) เปลือกไข่ฟักหลังจากปั่น ด้วยเครื่องปั่นและใช้ตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช (ข) ผงเปลือกไข่ฟักผสมกับกรดฟอสฟอริก (ค) ส่วนผสมของผงเปลือกไข่ฟักกับกรดฟอสฟอริกที่แห้งแล้ว..... 16
4.1 รูปสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก..... 23
4.2 รูปสัณฐานวิทยาของแคลเซียมออกไซด์..... 24
4.3 รูปสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต..... 24
4.4 รูปสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์..... 25
4.5 รูปสัณฐานวิทยาของไดแคลเซียมฟอสเฟต..... 25
4.6 รูปสัณฐานวิทยาของไดแคลเซียมฟอสเฟต(โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์)..... 26
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Egg Shell, CaO, MCP, MCP-P, DCP, DCP-M..... 27
4.8 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรด ของ Egg Shell, CaO, MCP, MCP-P, DCP, DCP-M..... 28
4.9 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก..... 30
4.10 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียม ออกไซด์..... 30
4.11 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต..... 31
4.12 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์..... 31
4.13 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของไดแคลเซียมฟอสเฟต..... 32
4.14 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของไดแคลเซียมฟอสเฟต (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์)..... 32
ค-1 เฉดสีของเปลือกไข่ฟักก่อนและหลังบด..... 44
ค-2 เฉดสีของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตทิ้งไว้ 1 วัน..... 44
ค-3 เฉดสีของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่อบแห้ง..... 44
ค-4 เฉดสีของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตหลังจากละลายด้วยน้ำเพื่อทำให้บริสุทธิ์..... 44
ค-5 เฉดสีของโนโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์..... 45
ค-6 เฉดสีของไดแคลเซียมฟอสเฟต..... 45
ค-7 เฉดสีของแคลเซียมออกไซด์..... 45
ค-8 เฉดสีของไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์..45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-9 รูปร่างสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่กำลังขยาย 1,000x, 5,000x และ 15,000x จากการทำซ้ำครั้งที่ 2 และ3.....46
ค-10 รูปร่างสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ที่กำลังขยาย 1,000x, 5,000x และ 15,000x จากการทำซ้ำครั้งที่ 2 และ 3.....47
ค-11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก.....48
ค-12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมออกไซด์.....48
ค-13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต.....48
ค-14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์.....49
ค-15 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไดแคลเซียมฟอสเฟต.....49
ค-16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไดแคลเซียมฟอสเฟต (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์).....49
ค-17 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก.....50
ค-18 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของแคลเซียมออกไซด์.....50
ค-19 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต.....50
ค-20 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์.....51
ค-21 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของไดแคลเซียมฟอสเฟต.....51
ค-22 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของไดแคลเซียมฟอสเฟต(โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์).....51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Egg shell	แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก
CaO	แคลเซียมออกไซด์
MCP	โมโนแคลเซียมฟอสเฟต
MCP-P	โมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์
DCP	ไดแคลเซียมฟอสเฟต
DCP-M	ไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ ได้จากการผสมระหว่าง แคลเซียมออกไซด์กับโมโนแคลเซียมฟอสเฟต
SEM	เทคนิคตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด
TGA	เทคนิควิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน
FTIR	เทคนิคการตรวจสอบรูปแบบการสั่นของพันธะในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรด
XRD	เทคนิคการตรวจสอบโครงสร้างและขนาดของผลึก
XRF	เทคนิคการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไข่ฟัก เกิดจากการที่ไก่เพศเมีย ได้รับน้ำเชื้อจากไก่เพศผู้ จากนั้นเมื่อไก่เพศเมียวางไข่ และฟักจะได้เป็นตัวลูกเจี๊ยบ และเปลือกไข่ที่เป็นของเสีย ที่มีเมือกติดอยู่ เรียกว่า เปลือกไข่ฟัก ซึ่งต่างจากเปลือกไข่ที่เราบริโภคตรงที่ เปลือกไข่ที่เราบริโภคนั้นไม่ได้รับเชื้อจากไก่เพศผู้นั่นเอง ขยะประเภทเปลือกไข่ฟัก จะพบมากที่สุดในโรงเพาะฟัก ของเสียประเภทนี้ หากกำจัดไม่ถูกวิธี จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กลิ่นอันไม่พึงประสงค์ และ แมลงวัน ซึ่งการกำจัดของเสียที่นิยมคือการฝังกลบ เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน, มีความยืดหยุ่นดี สามารถรองรับปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มโดยฉับพลันได้ และกรณีที่เกิดปัญหาสามารถแก้ไขได้ทันท่วงที, ไม่เกิดปัญหาขยะมูลฝอยตกค้าง ไม่มีเศษเหลือตกค้างที่จะต้องนำไปกำจัดต่ออีก, สามารถกำจัดขยะมูลฝอยได้ทุกประเภท ทุกขนาด ยกเว้นของเสียอันตรายและของเสียติดเชื้อ, เมื่อทำการฝังกลบเต็มพื้นที่แล้ว สามารถปรับปรุงพื้นที่เดิมเพื่อทำเป็นสวนสาธารณะ สนามกีฬา หรือทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ได้, ก๊าซที่เกิดจากการฝังกลบสามารถพัฒนานำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและอื่นๆ แต่ข้อเสียของการฝังกลบก็คือ ต้องการพื้นที่ฝังกลบขนาดใหญ่ ทำให้ประสบปัญหาในการจัดหาพื้นที่, อยู่ห่างไกลชุมชน ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง, จำเป็นต้องใช้ดินกลบทับขยะมูลฝอยรายวันจำนวนมาก, ในช่วงฤดูฝนอาจมีปัญหาอุปสรรคในการดำเนินงาน และไม่สามารถทำการฝังกลบได้อย่างต่อเนื่อง

วิจัยนี้จึงมุ่งเน้นหาวิธีการกำจัดเปลือกไข่ฟัก แบบไม่ให้เหลือทิ้ง(Zero Waste) การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ฟัก โดยการนำเปลือกไข่ฟัก มาสกัดให้ได้แคลเซียม จึงเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่ศึกษา เนื่องจากแคลเซียมเป็นแร่ธาตุที่พบในเปลือกโลกประมาณ 5.4% โดยมวล พบอยู่ในรูปของสารประกอบ $CaCO_3$ ซึ่งในเปลือกไข่มี $CaCO_3$ เป็นองค์ประกอบหลักถึง 98% และแคลเซียมยังถือเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อร่างกายมนุษย์ สัตว์ พืช และสิ่งแวดล้อม เมื่อสกัดแคลเซียมออกมาแล้ว จะนำไปแปรรูปเป็นสารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด ได้แก่ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต และ ไดแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งประโยชน์ของสารประกอบแคลเซียมทั้ง 2 ชนิด คือ เป็นแร่ธาตุอาหารสัตว์ โดยอาจจะเป็นอาหารเสริมแร่ธาตุ ชนิดที่ให้สัตว์กินโดยตรง อัดเป็นก้อนให้สัตว์เลียกินหรือเป็นผง หรือชนิดที่นำมาผสมกับอาหารวัตถุดิบอย่างอื่น อาหารเสริมแร่ธาตุสำเร็จรูป อาจจะเป็นแบบที่มีเฉพาะแร่ธาตุอย่างเดียว หรืออาจจะรวมกับวิตามินต่างๆ อุตสาหกรรมผลิตแร่ธาตุอาหารสัตว์ในประเทศไทย มีความต้องการใช้เกลือแคลเซียมปริมาณมากต่อปี ซึ่งในประเทศไทยยังมีโรงงานผลิตค่อนข้างน้อย ส่วนใหญ่มักนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีราคาสูง โดยข้อมูลจากเว็บไซต์ www.alibaba.com ตัวอย่างราคา ได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมฟอสเฟต ราคาไม่ต่ำกว่า 35 บาทต่อกิโลกรัม โมโนแคลเซียมฟอสเฟต ราคาไม่ต่ำกว่า 35 บาทต่อกิโลกรัม ราคาที่กล่าวมาข้างต้นเป็นราคาสำหรับเกรดอาหาร ซึ่งต้องมีการสั่งขั้นต่ำมากกว่า 20 กิโลกรัม ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นเหตุผลให้งานวิจัยนี้ มุ่งสนใจคิดค้นกรรมวิธีการผลิตเกลือแคลเซียม เพื่อมุ่งหวังให้มีต้นทุนต่ำกว่าที่มีขายตามท้องตลาดและการนำเข้ามาจำหน่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.แปรรูปเปลือกไข่ฟักให้เป็นสารประกอบแคลเซียมในรูป ไดแคลเซียมฟอสเฟต และโมโนแคลเซียมฟอสเฟต

2.ตรวจสอบองค์ประกอบทางกายภาพ การหาความหนาแน่น เฉดสีที่ปรากฏ SEM และทางเคมีด้วยเทคนิค TGA, FTIR, XRF และ XRD

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.แปรรูปเปลือกไข่ฟักให้เป็นสารประกอบแคลเซียมทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต และ ไดแคลเซียมฟอสเฟต

2.ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพ และทางเคมี ได้แก่ การหาความหนาแน่น, เฉดสีที่ปรากฏ, SEM, TGA, FTIR, XRF และ XRD

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.ได้ทราบกรรมวิธีในการผลิตสารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด คือ ไดแคลเซียมฟอสเฟต และโมโนแคลเซียมฟอสเฟต จากเปลือกไข่ฟักซึ่งเป็นวัตถุดิบแคลเซียม

2.ได้ทราบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกไข่ ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA, FTIR, XRF, XRD และ SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย เรื่อง การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ฟักให้เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมเพื่ออุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร จะถูกอธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะเน้นการแปรรูปเปลือกไข่ฟัก ให้เป็นสารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด ได้แก่ ไดแคลเซียมฟอสเฟต และโมโนแคลเซียมฟอสเฟต ทั้งจากงานวิจัย และสิทธิบัตรที่มีการจดในอดีต และข้อมูลเบื้องต้นของวัตถุดิบ โดยจะมีรายละเอียดที่น่าสนใจดังนี้

เปลือกไข่ (egg shells) ไข่ไก่มีน้ำหนักตั้งแต่ 50-65 กรัมเป็นปกติ โดยเฉลี่ยจะมีน้ำร้อยละ 66 โปรตีนร้อยละ 13 ไขมันร้อยละ 10 และแร่ธาตุร้อยละ 11 แร่ธาตุส่วนใหญ่อยู่ที่เปลือกและเยื่อรองเปลือก ในไข่ไก่ 1 ฟอง จะประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนที่ 1 เปลือกไข่มีประมาณ 10% ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต และที่เปลือกไข่จะมีรูพรุน เล็กๆ 100-200 รู/ตารางเซนติเมตร เพื่อให้อากาศผ่านเข้าใน ฟองไข่ในขณะที่มีกระบวนการฟักออกเป็นตัว โดยเมื่อไข่ไก่ ออกมาใหม่ๆ จะมีเมือกเคลือบอยู่ด้านนอก ซึ่งใช้เป็นหลักการในการตรวจสอบความสดใหม่ของไข่ไก่ได้ แต่เมื่อไข่ไก่ออกมา ไม่นานนัก เมือกที่เคลือบเปลือกไข่ไว้จะแห้ง เพื่อปิดรูที่เปลือกไข่ ป้องกันจุลินทรีย์เข้าไปในฟองไข่ นอกจากนี้ด้านในของ เปลือกไข่ยังมีเนื้อเยื่อสีขาว 2 ชั้น ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันจุลินทรีย์ เข้าไปในฟองไข่เช่นเดียวกัน ส่วนต่อมา คือ ไข่ขาว ซึ่งมีสัดส่วนมากถึง 59.50% ของไข่ โดยมีองค์ประกอบหลัก คือ น้ำประมาณ 88% และ มีโปรตีนประมาณ 10.5% และแยกได้เป็น 2 ส่วน คือ ไข่ขาวข้นล้อมรอบไข่แดงและไข่ขาวส่วนเหลวกระจายอยู่ทั่วฟองไข่ ไข่ขาวข้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสดของไข่ ส่วนสุดท้าย คือ ไข่แดง ซึ่งมีเยื่อหุ้ม ทำให้ไข่แดงคงรูปกลมไว้ในไข่ขาว ถ้าเยื่อดังกล่าวฉีกขาดไข่แดงจะแตกออกมา หากไข่ไม่สดหรือเก็บไว้นานจะพบปัญหานี้ค่อนข้างมาก สำหรับองค์ประกอบของไข่แดง จะมีน้ำประมาณ 49.5% โปรตีน 15.5% ลิพิด 32.6% คาร์โบไฮเดรต 1% แร่ธาตุต่างๆ 1% และ ไวตามินต่างๆ อีกเล็กน้อย

สีเปลือกไข่เป็นรงควัตถุที่สะสมในระหว่างการสร้างไข่ในท่อนำไข่ และชนิดของรงควัตถุดังกล่าวจะขึ้นกับการกำหนดจากพันธุกรรม ตัวอย่างเช่น เมื่อเรานำไก่พันธุ์ต่างกันมาผสมพันธุ์กัน เราจะได้เปลือกไข่ที่แตกต่างกันไป เช่น เมื่อเรานำไก่พันธุ์อะรอคานา (Araucana) พันธุ์แท้ที่ออกไข่สีฟ้าไปผสมพันธุ์กับไก่พันธุ์เล็กฮอร์น (Leghorn) ซึ่งมีไข่สีขาวจะได้เปลือกสีฟ้า ครั้นนำไก่พันธุ์อะรอคานาผสมพันธุ์กับไก่พันธุ์โรด์ไอส์แลนด์เร็ด (Rhode island red) ที่ปกติออกไข่สีน้ำตาลจะได้เปลือกไข่สีเขียว แต่ถ้าผสมไก่พันธุ์อะรอคานากับไก่พันธุ์มะแรนหรือสเป็คเกิลดี้ที่มีเปลือกสีน้ำตาลเข้ม จะได้สี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำตาลโอลีฟ แม้ว่าสีเปลือกไข่จะถูกกำหนดโดยพันธุ์ของสัตว์ชนิดนั้น แต่ก็พบว่ายังมีปัจจัยสภาพแวดล้อมอื่นๆที่มีผลต่อสีเปลือกไข่ เช่น การย้ายที่อยู่ เปลี่ยนอาหารกระทันหัน หรือการตีกันในฝูง จะทำให้แม่ไก่เครียดส่งผลให้มีสีเปลือกไข่ซีดลง

ประโยชน์ของเปลือกไข่ เช่น เปลือกไข่ไล่มด โดยการนำเปลือกไข่ที่เผาไฟแล้วบดให้ละเอียดแล้วจะมีสารแคลเซียมเมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบส เปลือกไข่ซักผ้า เปลือกไข่จะทำให้ผ้าขาว โดยการนำเปลือกไข่ไปห่อกับผ้าแล้วนำไปต้มรวมกับผ้าขาว จากนั้นไปซักตามปกติ หรือ นำเปลือกไข่บดละเอียดไปผสมกับโซดาซักผ้าอัตราส่วน 1:1 เปลือกไข่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ในขณะที่ใช้เตาถ่านก่อไฟให้ทุบเปลือกไข่จนแตกละเอียดแล้วใช้กระดาษห่อมัดไว้ใต้ฟืนจะทำให้ไฟแรงขึ้น การกินเปลือกไข่เพื่อเพิ่มแคลเซียม ใช้เปลือกไข่เป็นเครื่องมือทำความสะอาดโดยการใส่เปลือกไข่เข้าไปในขวด ภาชนะปากแคบ แล้วเขย่าแทนแปรงล้างขวด หรือใช้เปลือกไข่ขัดโดยตรง การใช้เปลือกไข่ลับใบมีดโดยนำเปลือกไข่ไปแช่แข็งแล้วใส่ลงไปในโถปั่นเทน้ำตาม เปลือกไข่จะช่วยทำให้ใบพัดคมและยังช่วยทำความสะอาดโถปั่นด้วย ใช้แทนยาฆ่าแมลง การโรยเปลือกไข่หยาบๆบริเวณใบไม้ ช่วยกำจัดศัตรูพืชบางชนิด เช่น หนอน บุ้ง เนื่องจากเปลือกไข่มีความแหลมคมทำให้บาดผิวหนังของศัตรูพืช และใช้เปลือกไข่ที่ตำเป็นผงโรยไปในดินเพิ่มเพื่อแคลเซียมให้ดิน หรือจะนำไปผสมกับปุ๋ยหมัก เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินมากขึ้น

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) เป็นสารประกอบมีสูตรเคมีคือ $CaCO_3$ คาร์บอเนต มีมวลโมเลกุล 100 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 2.71 g/cm^3(แคลไซต์) และ 2.83 g/cm^3 (อะราโกไนต์) จุดหลอมเหลว 825 °C (แคลไซต์) และ 1339 °C (อะราโกไนต์) ความสามารถ ในการละลายน้ำ 0.00015 mol/L ที่ 25 °C และละลายได้ในสารละลายกรดเจือจาง สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์แล้วกลายเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนต (ซึ่งมีสูตรเคมีคือ $Ca(HCO_3)_2$) แคลเซียมไบคาร์บอเนตจะละลายในน้ำได้เล็กน้อย

ในธรรมชาติจะพบในรูป อะราโกไนต์ (Aragonite), แคลไซต์ (Calcite), ปูนขาว (Chalk), หินปูน (Limestone), หินอ่อน (Marble), ทราเวอร์ตีน (Travertine) ประโยชน์มีดังนี้

1. ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มักจะนิยมใช้ในรูปของ Dietary supplement, alkali, dough conditioner, nutrient, anticaking/firming agent, yeast food โดยจะใช้ในอาหารประเภทชีส ผักผลไม้กระป๋อง หมากฝรั่ง แยม เยลลี่ นมผง และครีมเทียม นอกจากนี้ ยังนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาบริโภคในรูปการอัดเม็ดเป็นอาหารเสริมแคลเซียม เพื่อเสริมสร้างกระดูก และป้องกันโรคกระดูกพรุน เช่น Caltrate®600 ของบริษัทไวท์ฮอลล์ (ประเทศไทย) เป็นต้น

2. การใช้ในภาคการเกษตร การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในภาคการเกษตรจะเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์น้อยกว่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งอาจได้จากการเผาหินปูนโดยตรง หรือการนำกากแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริสุทธิ์สูง การใช้ประโยชน์แคลเซียมคาร์บอเนตในภาคการเกษตร ส่วนใหญ่จะเป็นในเรื่องการปรับปรุงคุณสมบัติดิน และน้ำ รวมถึงเพื่อการปรับความเป็นกรดด่าง และการฆ่าเชื้อโรค

3. ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในอุตสาหกรรมกระดาษมักใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมเพื่อลดปริมาณเยื่อกระดาษ และเพื่อเพิ่มคุณสมบัติกระดาษ เช่น ความขาวสว่าง เคลือบผิวกระดาษให้เรียบ เป็นต้น

คุณสมบัติแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาใช้ประโยชน์

1. มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก
2. มีพื้นที่ผิวสูง ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่เติมในกระบวนการผลิต
3. มีองศาความขาวสูง
4. มีการกระจายตัวดี
5. ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ ไม่เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดความร้อนหรือการระเบิดได้ง่าย

ข้อควรระวังการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต

1. เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดการคายความร้อน
2. เมื่อผสมกับกรด โดยเฉพาะกรดซัลฟูริกจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงทำให้เกิดการคายความร้อนและเกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
3. แคลเซียมคาร์บอเนตจะอยู่ในรูปผงขนาดเล็ก เมื่อมีการใช้งานควรสวมผ้าปิดจมูกให้มิดชิด หากสูดเอาผงเข้าสู่ร่างกายจะให้เกิดการระคายเคืองในระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนเกิดความร้อน และเกิดสภาพกรดขึ้น

แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO) เป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่า ปูนขาว หรือ ปูนเผา หรือในรูปของหินตะกอนว่า หินปูน เป็นสารเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ เป็นผลึกของแข็งอัลคาไลน์ในอุณหภูมิห้อง มวลโมเลกุล 56.0774 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 3.35 g/cm^3 จุดหลอมเหลว 2,572 °C, 2845 K, 4662 °F จุดเดือด 2850 °C, 3123 K, 5162 °F ความสามารถในการละลายน้ำ 1.19 g/L (25 °C), 0.57 g/L (100 °C) สามารถการละลายในกรด กลีเซอรอล และน้ำเชื่อม ไม่สามารถละลายในเมทานอล ไดเอทิลอีเทอร์ ค่าคงที่การแตกตัวของกรด 12.8 ค่าเอนโทรปี 40 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ และค่าเอนทราปี -635 $kJ \cdot mol^{-1}$

แคลเซียมออกไซด์จะผลิตจากการเผาวัสดุใดๆ ที่มีส่วนผสมของหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต : $CaCO_3$) เป็นองค์ประกอบ ณ อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการเผานี้ว่า calcination และจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ออกมา แคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับ CO_2 ที่อยู่ในอากาศ โดยอาศัยระยะเวลาที่นานพอควร และจะกลับกลายเป็น $CaCO_3$ ได้ ดังนั้นการเก็บรักษาต้องระวังไม่ให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปในภาชนะที่ใช้จัดเก็บได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$CaCO_{3(s)} \longleftrightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

คุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ มีดังนี้

1. จะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุดอาจมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้จึงต้องระมัดระวังในการใช้ โดยเฉพาะเมื่อมีสัตว์น้ำอยู่ในบ่อ
2. มีผลต่อคาร์บอเนตอัลคาไลนิตี้ น้อยกว่าปูนคาร์บอเนต
3. เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดความร้อน ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น
4. เมื่อสัมผัสกับน้ำ จะมีฤทธิ์กัดผิวหนัง จึงต้องใช้อย่างระมัดระวัง ควรสวมถุงมือเมื่อใช้หินปูนกลุ่มนี้
5. เมื่อได้รับความชื้นแล้ว จะไม่จับตัวเป็นก้อน เนื่องจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูง ซึ่งเป็นการทำลายโครงสร้างให้มีขนาดอนุภาคเล็กแล้ว

โมโนแคลเซียมฟอสเฟต (Monocalcium phosphate; MCP) เป็นสารประกอบของเกลือแคลเซียมของกรดฟอสฟอริก และเป็นสารประกอบอนินทรีย์ มีสูตรทางเคมี คือ $Ca(H_2PO_4)_2$ มวลโมเลกุล 252 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 2.220 g/cm^3 จุดหลอมเหลว 109 °C, 382 K, 228 °F จุดเดือด 203 °C, 476 K, 397 °F ความสามารถในการละลายน้ำ 2 g/100 ml เป็นของแข็งที่ไม่มีสี มักจะใช้ทำปุ๋ยและนิยมใช้เป็นหมู่หลุดออก โมโนแคลเซียมฟอสเฟตเป็นสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์มากซึ่งได้มาจากการให้ความร้อน สามารถผลิตได้โดยการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาผสมกับกรดฟอสฟอริก

$$CaCO_{3(s)} + 2\ H_3PO_{4(aq)} \longrightarrow Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(s)} + CO_{2(g)}$$

โมโนแคลเซียมฟอสเฟตจะเป็นส่วนผสมของผงฟู ในขนมอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยากับเบรคกิ้งโซดา(โซเดียมคาร์บอเนต) เพื่อผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งช่วยในการขึ้นรูปของแป้ง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้เกิดฟองเป็นจำนวนมากซึ่งทำให้ขนมนุ่มและอร่อย แต่ถ้าเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไปจะทำให้ขนมมีความหนาแน่นมาก หรือถ้าน้อยเกินไปจะทำให้ขนมไม่ขึ้นรูป ดังนั้นเราจึงใช้โมโนแคลเซียมฟอสเฟตเป็นตัวควบคุมการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา และใช้ผสมกับสารเพิ่มรสอื่นๆ เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อที่จำเป็นสำหรับแป้งและผลิตขนมต่างๆ

โมโนแคลเซียมฟอสเฟตเป็นสารประกอบที่มีความปลอดภัยสูง เพราะได้มาจากแหล่งธรรมชาติ ช่วยเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้ผลิตภัณฑ์ดียิ่งขึ้น และจะช่วยลดเศษอาหารที่อาจเป็นผลมาจากมาจากอาหารที่ไม่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดแคลเซียมฟอสเฟต (Dicalcium phosphate; DCP) เป็นสารประกอบของเกลือแคลเซียมของกรดฟอสฟอริก มีสูตรทางเคมี คือ $CaHPO_4$ คำนำหน้าว่า “ได” ในชื่อสามัญเกิดขึ้นจากการก่อตัวของ HPO_4^{2-} ซึ่งเป็นการกำจัดโปรตอนออก 2 ตัวจากกรดฟอสฟอริก(H_3PO_4) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อไดเบสิกแคลเซียมฟอสเฟตหรือแคลเซียมโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต มวลโมเลกุล 172 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 2.31 g/cm^3 ความสามารถในการละลายน้ำ 0.02 g/100 ml ไม่มีกลิ่น ไดแคลเซียมฟอสเฟตใช้เป็นสารเติมแต่งอาหารพบในยาสีฟันบางชนิดทำหน้าที่เป็นสารขัดฟันและวัสดุชีวภาพ

ไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผลิตจากแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนต มาเติมกรดฟอสฟอริกลงไปจนได้ระดับฟอสฟอรัสตามต้องการ ข้อดีของการนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกไข่ มาใช้ในการผลิตก็คือลดความเสี่ยงการปนเปื้อนของฟลูออรีนและโลหะหนัก โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในกระบวนการผลิตจึงลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานความร้อนลงได้ แต่ผู้ผลิตจะต้องเติมฟอสฟอรัส มากขึ้นกว่าการใช้หินฟอสเฟตเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น เนื่องจากในแคลเซียมคาร์บอเนตเองไม่มีฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบ

กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) เป็นกรดชนิดหนึ่ง ที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นผงซักฟอก สบู่ หรือแม้แต่ในน้ำอัดลม ฯลฯ กรดฟอสฟอริกมีสูตรโมเลกุล H_3PO_4 น้ำหนักโมเลกุล 98.0 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จะมีความถ่วงจำเพาะ 1.834 จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 42.350 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายได้ในน้ำและแอลกอฮอล์ หรือเป็นผลึกใส ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและอุณหภูมิ กรดฟอสฟอริก 100% จะอยู่ในรูปผลึกใส กระบวนการผลิตเกิดจาก การทำปฏิกิริยาระหว่าง กรดซัลฟูริกหรือกรดเกลือ กับหินฟอสเฟต กรดฟอสฟอริก ถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทที่สำคัญ ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตสารพวกฟอสเฟต เช่น ที่ใช้ในผงซักฟอก สบู่ ปุ๋ย ใช้ผสมเป็นวัสดุอุดฟัน อุตสาหกรรมโลหะ สำหรับขัดผิวโลหะ ชุบโลหะ ปัดเงาชิ้นงานอลูมิเนียม อุตสาหกรรมยาและอาหาร เช่น เป็นส่วนผสมชนิดหนึ่งในน้ำอัดลม ใช้แก้ไขค่าพีเอช ของน้ำที่ใช้รดกล้วยไม้ (ในกรณีที่ค่าพีเอชสูง) เป็นสารที่ใช้ในการทำความสะอาด (cleaning agents) ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ และเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิวประเภทกรด

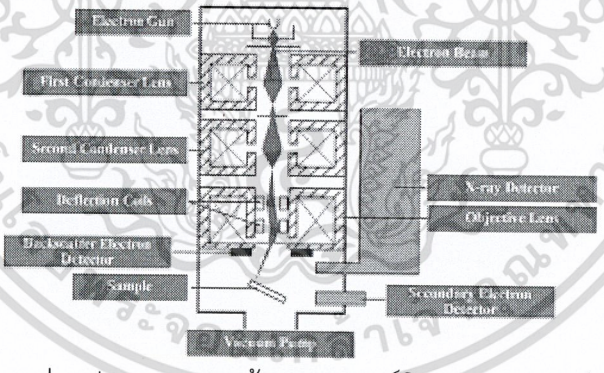
ถึงแม้ว่ากรดฟอสฟอริก จะมีประโยชน์หลายอย่าง แต่ถ้าได้รับกรดชนิดนี้โดยตรง ในปริมาณที่มากพอ ก็สามารถจะก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้ ซึ่งจะอันตรายต่อผู้ที่สัมผัส อาจเกิดขึ้นได้โดยทางการหายใจ การสัมผัสทางผิวหนัง หรือกินเข้าไปจะทำให้ปวดท้องอย่างรุนแรง จะรู้สึกคลื่นไส้ด้วย กรดฟอสฟอริก นอกจากจะเป็นอันตรายต่อระบบร่างกายต่างๆแล้ว ยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศอีกด้วย ถ้ามีกรดฟอสฟอริกในแหล่งน้ำ จะทำให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยสารประกอบพวกฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ จะทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และทำให้ออกซิเจนไม่สามารถละลายในน้ำได้

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ศึกษารายละเอียดของโครงสร้างภายนอกหรือผิวของตัวอย่าง โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งทางชีวภาพ-กายภาพ สามารถคำนวณธาตุเชิงปริมาณ (EDX) ภาพที่ได้จากกล้อง SEM เป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง มีกำลังขยายสูงถึง 200,00 เท่า ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

หลักการทำงานเริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเลคตรอนปล่อยอิเลคตรอนปฐมภูมิ (primary electron) ออกมา อิเลคตรอนเหล่านี้ถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (100 ถึง 30,000 อิเลคตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) จากนั้นจะถูกดูดลงสู่ด้านล่างโดยแผ่นแอโนด (anode plate) ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ 10^{-5} ทอร์ ถึง 10^{-7} ทอร์ และมีชุดเลนส์คอนเดนเซอร์ ช่วยปรับลำอิเลคตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มความเข้มให้กับลำอิเลคตรอน ลำอิเลคตรอนจะวิ่งลงด้านล่างผ่านเลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับลำอิเลคตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิววัตถุพอดีโดยมีชุดขดลวดควบคุมการกราด (scan coil) ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิว ตัวอย่าง ผู้ใช้สามารถกำหนดทิศทางผ่านชุดควบคุม (control unit) ขณะที่ลำอิเลคตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเลคตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของธาตุในวัตถุและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเลคตรอนชนิดต่างๆออกมา ซึ่งใช้ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้

ส่วนประกอบของของกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด มีดังนี้



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด

1. ปืนอิเลคตรอน (Electron Gun) เป็นแหล่งกำเนิดอิเลคตรอน เรียกว่า แคโทด (cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ วัสดุที่ใช้ทำต้องมีเสถียรภาพสูง แหล่งกำเนิดอิเลคตรอนแบ่งประเภทตามกลไกการกำเนิดอิเลคตรอนได้ดังนี้

   1.1 การปล่อยเนื่องจากความร้อน (Thermionic Emission) ได้แก่

   - ไส้หลอดทังสเตน (tungsten filament)
   - ผลึกแลนทานัมเฮกซะบอไรด์ (lanthanum hexaboride crystal source, LaB_6)

   1.2 การปล่อยเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field Emission) ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โคลด์ฟิลด์อิมิสชัน (Cold field emission source)

2. เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) มีหน้าที่ลดขนาดของลำอิเลคตรอนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอิเลคตรอน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ไมโครเมตรให้เหลือประมาณ 5 นาโนเมตร การลดขนาดลำอิเลคตรอนจะใช้เลนส์ 2 หรือ 3 ชุด ในระบบ 3 ชุดจะประกอบด้วย
   - เลนส์ 1: เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) มีหน้าที่ควบคุมกระแสของลำอิเลคตรอน
   - เลนส์ 2: เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) มีหน้าที่ควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเลคตรอน
   - เลนส์ 3: เลนส์วัตถุ (objective lens) มีหน้าที่ โฟกัสลำอิเลคตรอนลงบนชิ้นงาน
3. แท่นวางตัวอย่าง (Sample Stage) แท่นวางตัวอย่างสำหรับ SEM จะมีหลากหลายรูปแบบและหลายขนาด ขึ้นกับยี่ห้อและรุ่นของเครื่อง SEM โดยทั่วไปแท่นวางตัวอย่างจะสามารถเคลื่อนที่ได้ 5 แนว ได้แก่ แนวแกน X, Y, Z, เอียง และ สามารถหมุนทำมุมได้ถึง 360 องศา
4. อุปกรณ์ตรวจจับ (detector) กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดทุกเครื่องต้องมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเลคตรอนทุติยภูมิ ในขณะที่บางเครื่องอาจมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเลคตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์ (Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy, EDS) โดยประสิทธิภาพของเครื่องมือจะขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ

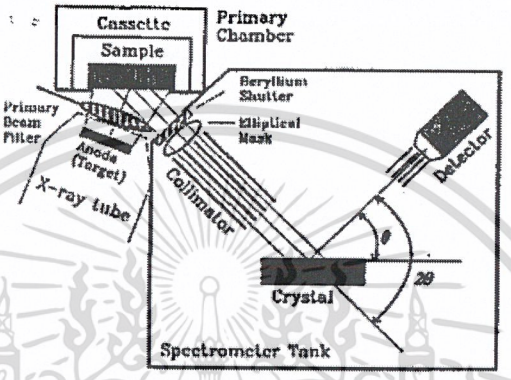
เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมานธาตุ องค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

การใช้รังสีเอ็กซ์วิเคราะห์ธาตุในสสาร โดยรังสีเอ็กซ์พุ่งชน เข้าทำอันตรกิริยากับธาตุ เกิดการดูดกลืนของเอกซเรย์ ทำให้อะตอมได้รับการกระตุ้น (excite) ให้เปลี่ยนระดับพลังงานจากสภาวะปกติ (ground state) สู่สภาวะที่ถูกกระตุ้น (excited state) ที่ไม่เสถียร เมื่ออะตอมนี้กลับสู่สภาวะปกติ โดยการเปลี่ยนระดับพลังงาน (transition) ของอิเล็กตรอน เกิดการคายคลื่นแสง (emission of radiation) ออกมา ในรูปของฟลูออเรสเซนต์ และเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ซึ่งเทคนิคนี้ เรียกว่า x-ray fluorescence หรือ secondary x-ray emission

หลักการทำงานของเครื่อง XRF คือ รังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเครื่องกำเนิด รังสีเอ็กซ์ถูกส่งไปยังสารตัวอย่าง เพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่างๆในสารตัวอย่าง แล้วเกิดเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ขึ้น ให้เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ผ่านคอลลิเมเตอร์ (collimator) เพื่อให้ลำรังสีเอ็กซ์เป็นลำขนาน และไปใน

เอกสารนี้สงวนสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางที่ต้องการ คือ ให้ไปกระทบกับผลึกวิเคราะห์ (analysing crystal) ซึ่งอยู่ในสเปกโทรมิเตอร์ที่ทำให้เป็นสูญญากาศ หรือความดันต่ำมากๆ เพื่อทำหน้าที่กระจาย หรือแยกรังสีเอ็กซ์ออกไป ให้มีความยาวคลื่นต่างๆกัน คล้ายกับเกรตติง (grating) ทำหน้าที่แยกแสงในเครื่อง ยูวี – วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy) รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน จะถูกวัดความเข้มด้วยการสแกน (scan) ของดีเทคเตอร์ (detector) สัญญาณที่วัดได้ จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูล แล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วย printer หรือ recorder จากข้อมูลที่เก็บได้ ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพ และปริมาณได้



ภาพที่ 2.2 แผนภาพองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRF ชนิด Wavelength Dispersive System

ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ก็คือเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีที่ต้องบดตัวอย่างเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด) และให้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว และไม่จำเป็นต้องใช้ standard ในการทดสอบ

ข้อเสียของเครื่อง XRF ความสามารถในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ จะทำได้ยาก โดยเฉพาะในกลุ่มธาตุ Light Element หากมีปริมาณน้อยๆผลที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้ง หากตัวอย่างนั้น ไม่สามารถขึ้นรูปให้เป็นของแข็ง เพื่อทดสอบในสภาพ Low pressure ก็จะเกิดการดูดกลืนรังสีของอากาศภายในห้องใส่ตัวอย่าง ซึ่งมีผลให้ Intensity ของ X-ray ที่ได้ลดลง

สเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟสเรด (Vibrational spectroscopy; Fourier transform infrared, FTIR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เพื่อตรวจวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบ ของโมเลกุลรวมกับเทคนิคอื่น โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรด (Middle infrared region) ประมาณ 400 ถึง 4000 cm^{-1} เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการหมุน (Bending) ของพันธะโควาเลนซ์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสง IR และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave number) ได้ผลเป็นสเปคตรัมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า “Interferogram” ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน อาทิ C=O ~1,800 cm^{-1} , O-H stretching very broad ~ 3,300-2,500 cm^{-1} , N-H stretching ~3500-3300 cm^{-1}, -C=C- Stretching ~1667-1613 cm^{-1}, C-H Stretching ~3,000-2,840 cm^{-1} เป็นต้น ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังนี้



ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบ และลำดับการทำงานของเครื่องตรวจวัด

1. แหล่งกำเนิดรังสีของ Infared Spectrometer คือ สารเฉื่อยที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิระหว่าง 1,000 - 1,800 องศาเซลเซียส
2. ตัวแยกรังสีแบบ Interferometer มีหน้าที่แยกลำรังสีออก ทำให้เกิด Path difference ระหว่างลำแสง แล้วทำการรวมสัญญาณการแทรกสอดซึ่งเป็นฟังก์ชั่นกับ Path difference โดยเครื่องตรวจวัด
3. เครื่องตรวจวัดทำหน้าที่ประมวลผลจากสัญญาณการแทรกสอดที่ส่งผ่านมาจากตัวแยกรังสี

ข้อดีของเครื่อง FTIR มีดังนี้

1. วิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส
2. วิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณน้อยหรือสารที่มีความเข้มข้นสูงได้
3. มีอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนสูงกว่าเครื่องอินฟาเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบกระจาย (dispersive infrared spectrometer)
4. สแกน (scan) ตัวอย่างได้รวดเร็ว
5. ได้สเปกตรัมที่มีการแยกชัดและไม่มีพื้นหลัง (background)
6. สามารถศึกษาสเปกตรัมได้ทั้งแบบสะท้อนและแบบดูดกลืนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนด (specification) ของเครื่องมือ ตัวอย่างสเปกตรัมแบบสะท้อน เช่น ฟิล์ม ยาง พลอย และแก้ว

การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น-ร้อน ก็จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะที่สภาวะทดสอบเปลี่ยนไป

XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้ว นั้นยังสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง

การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) เป็นเทคนิคหนึ่งของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน (Thermal Analysis) นำมาใช้ประโยชน์โดยเฉพาะการหาความทนทานต่อความร้อน (Thermal stability) และหาองค์ประกอบทางเคมีของสาร เครื่อง TGA เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

ข้อมูลจำเพาะ (Specifications) ของเครื่อง TGA อยู่ในช่วงอุณหภูมิห้อง –1,600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง –1,100 องศาเซลเซส 10 นาที อัตราการทำความเย็นตั้งแต่ 1,000 – 100 องศาเซลเซียส 25 นาที ความถูกต้องของอุณหภูมิ +0.5 องศาเซลเซียส ความแม่นยำของอุณหภูมิ +0.3 องศาเซลเซียส ความสามารถในการวิเคาระห์ทดสอบ มีอยู่ 2 ประการดังนี้

1. ใช้เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของปฏิกิริยาทาง Kinetics (characterize the kinetics of a reaction) เช่น ปฏิกิริยา decomposition, evaporization และ dehydration
2. ใช้ในการศึกษาหาปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ในของผสม ดังต่อไปนี้
   ก. วิเคราะห์หาปริมาณของ plasticizers, antioxidants หรือ organic accelerations
   ข. วิเคราะห์ polymer blends เช่น ใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์ (Styrene-butadiene rubber, SBR) หรือยางธรรมชาติผสมกับ (Ethylene-propylenediene monomer, EPDM) เครื่อง TGA สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผลิตภัณฑ์นั้นทำจากยางชนิดเดียวกัน หรือ 2 ชนิดผสมกัน โดยดูจากคุณสมบัติในการสลายตัวของยางที่อุณหภูมิต่างๆ
   ค. วิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) และตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic fillers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กับการเตรียมสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟต และไดแคลเซียมฟอสเฟต

T. GaÈ fvert และคณะ (2001) ศึกษาหินฟอสเฟตที่นำมาผลิตไดแคลเซียมฟอสเฟตเพื่อใช้เป็นแหล่งแคลเซียมและฟอสฟอรัสสำหรับสัตว์เลี้ยง

Birol Engin และคณะ (2006) ศึกษาผงเปลือกไข่ที่อบในอุณหภูมิ 218-1173 เคลวิน โดยจะวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD, FTIR และ ESR ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการหลอมของเปลือกไข่จะอยู่ในช่วง 2.002-2.005 กรัม จาก 1 ใน 4 ของเปลือกไข่

วุฒิพร พรหมขุนทอง (2007) ศึกษาผลของแคลเซียมและฟอสฟอรัสในอาหารสำหรับปลาดุกพันธุ์ผสมและปฏิสัมพันธ์ของแร่ธาตุทั้งสองชนิด โดยแคลเซียมและฟอสฟอรัสสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ร้อยละ 0.3 และ 0.5 ตามลำดับ

J. Reyes-Gasga และ J. Sánchez-Enríquez (2013) การตกตะกอนของแคลเซียมคอลไรด์และโซเดียมฟอสเฟตโมโนเบสิก ถูกทำให้แห้งโดยสูญญากาศและกลายเป็นโมนีไทต์ ($CaH(PO_4)$) โดยโมนีไทต์จะกลายเป็นโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรตด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 90 kHz ที่ 500 W เป็นเวลา 60 นาทีด้วยกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง

Alejandro B. Rodríguez-Navarro และคณะ (2015) ศึกษาไขกระดูกของสัตว์ปีกเพื่อเปลี่ยนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต โดยจะยืนยันลักษณะสัญฐานด้วยการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และอิเล็กตรอน โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีและกล้องจุลทรรศ์อิเล็กตรอน

A.A. Francis และ M.K. Abdel Rahman (2016) แคลเซียมฟอสเฟตถูกเตรียมโดยใช้เปลือกไข่ผสมกับกรดฟอสฟอริกตามเปอร์เซ็นต์ของเจลาติน กรดฟอสฟอริกในช่วง 2.90-8.73 มิลลิลิตร จะส่งผลกระทบต่อผลึกของแคลไซต์ ซึ่งตรวจสอบลักษณะสัญฐานวิทยาได้โดย FESEM และใช้ XRD เพื่อตรวจสอบผลึกจากเปอร์หลังจากบดและให้ความร้อนที่ 700-1200 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ชั่วโมง

Hiroaki Onoda และ Shin YamazakiDepartment (2016) เตรียมแคลเซียมฟอสเฟตจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบเนื้อเดียวกัน เช่นเดียวกับการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริกที่ได้จากเปลือกหอยน้ำจืดและกรดฟอสฟอริกในเชิงพาณิชย์

วรุณทิพย์ ฉัตรจุฑามณี (2017) สังเคราะห์โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ด้วยปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยทรายบดและกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเองของปฏิกิริยาเป็นเวลา 25 นาที ได้วิเคราะห์ผงของแข็งที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD และ ATR-FTIR ผลของ XRD และATR-FTIR ยืนยันว่าผงของแข็งที่เตรียมได้เป็นผลึกระบบแอนอทิค

Seksom Attamangkune และคณะ (2018) ศึกษาการทำงานของลำไส้เล็กตอนปลายที่สามารถย่อยฟอสฟอรัสจาก MCP, MDCP และ DCP ของไก่เนื้อโดยการวิธีถดถอย การย่อยฟอสฟอรัสจาก MCP, MDCP และ DCP มีค่าเท่ากับ 64.6, 60.2 และ 69.3% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเครื่องแก้ว
2. อุปกรณ์สำหรับไทเทรต
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
4. pH meter
5. เตาเผา (Furnace)
6. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer)
7. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-Ray diffractometer) รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker AXS
8. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer) รุ่น SRS 3400 ยี่ห้อ Bruker AXS
9. กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น QUANTA 250 ยี่ห้อ FEI
10. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟาเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) รุ่น Spectrum GX

3.1.2 สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก (37% Hydrochloric acid, HCl) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท CARLO ERBA ประเทศฝรั่งเศส

2. กรดฟอสฟอริก (70% Phosphoric acid, H_3PO_4) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท SUNWAY CORPORATION ประเทศเกาหลีใต้

3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (1.0 M Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท RFCL ประเทศอินเดีย

4. บัฟเฟอร์ พีเอช 10 (buffer pH 10) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท CARLO ERBA ประเทศฝรั่งเศส

5. กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอาเซติก (0.01 M Ethylene diamine tetra-acetic acid, EDTA) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท Dissolvine ประเทศจีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อิริโอโครม แบลคที (Eriochrome black T) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท Thermo Electron LLS India Private Ltd. ประเทศอินเดีย

7. เมทิลเรด (Methyl red) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท CARLO ERBA ประเทศฝรั่งเศส

8. เอทานอล (Ethanol 95%) เกรดวิเคราะห์ ผลิตโดยบริษัท CARLO ERBA ประเทศฝรั่งเศส

9. เปลือกไข่ไก่บด (แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ต่ำกว่าร้อยละ 98.5)

3.2 การเตรียมสารประกอบแคลเซียม

3.2.1 การเตรียมสารตั้งต้น

การเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีขนาด 50 เมชขึ้นไป โดยนำเปลือกไข่ฟักไปปั่นด้วยเครื่องปั่นและร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดขนาด 50 เมช และเก็บบรรจุใส่ภาชนะเพื่อนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในขั้นตอนต่อไป ชื่อสารแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผลิตได้ คือ

แคลเซียมคาร์บอเนตบด (50 เมช) ผลิตจากเปลือกไข่ไก่ (egg shell)

ซึ่งการเตรียมสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ เตรียมได้โดยการนำเอาแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ฟักไปเผาที่อุณหภูมิ 900^{O}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

แคลเซียมออกไซด์ (50 เมช) ผลิตจากเปลือกไข่ไก่ (egg shell)

3.2.2 กระบวนการเตรียมสารประกอบแคลเซียม

ทำการเตรียมสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตและโมโนแคลเซียมฟอสเฟต

1.ชั่งผงเปลือกไข่ฟักที่เตรียมได้ คือ แคลเซียมคาร์บอเนต จำนวน 1 กิโลกรัมใส่ถังพลาสติก

2.ผสมกับกรดฟอสฟอริกในสัดส่วน 1 : 3 ค่อยๆเทกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) จำนวน 3 ลิตรจะมีฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ให้คนอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะได้สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟต



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.1 แสดงภาพ (ก) เปลือกไข่ฟักภายหลังการปั่นด้วยเครื่องปั่นและใช้ตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช (ข) ผงเปลือกไข่ฟักผสมกับกรดฟอสฟอริก (ค) ส่วนผสมของผงเปลือกไข่ฟักกับกรดฟอสฟอริกที่แห้งแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อแห้งทำการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างผลึกซ้ำอีกครั้งในสถานะของแข็ง ทำให้ผลึกมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยนำไปละลายด้วยน้ำและตั้งทิ้งไว้ให้สารตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แยกส่วนที่เป็นของเหลวออกจากตะกอนที่ไม่ละลาย ส่วนที่ตกตะกอน คือ ไดแคลเซียมฟอสเฟต นำตะกอนไปผึ่งในถาดอะลูมิเนียมโดยตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเองตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ คือ โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์

4.จากนั้นนำสารละลายโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ 70^{O}C เพื่อให้เกิดผลึก

5. นำแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้ข้างต้นผสมกับโมโนแคลเซียมฟอสเฟตตามสัดส่วนโมล 56 : 252 กรัมจะได้สารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟต ดังสมการเคมีที่ 3.1

$$CaO_{(S)} + Ca(H_2PO_4)_2 \bullet H_2O_{(S)} \rightarrow 2Ca(HPO_4) \bullet 2H_2O_{(S)} \qquad (3.1)$$

3.2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมโดยการไทเทรตกับสารละลาย EDTA

1. ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก ($CaCO_3$) จำนวน 0.0250 กรัม

2. เติมกรดไฮโดรคลอริก (1.0 M HCl) ทีละหยดจนแคลเซียมคาร์บอเนตละลายหมด

3. เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตรและเติมเมทิลเรดจำนวน 2-3 หยด

4. นำมาปรับให้เป็นสารละลายเบสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (1.0 M NaOH) สารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองฟางข้าว

5. เติมสารละลายบัฟเฟอร์ พีเอช 10 จำนวน 1 มิลลิลิตร จากนั้นเติมอิริโอโครม แบลคทีจำนวน 2-3 หยด

6. นำไปไทเทรตกับสารละลาย EDTA (0.01 M EDTA) เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีม่วงไปเป็นสีฟ้าอมเขียว

7. นำปริมาตรของสารละลาย EDTA และน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟักไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย EDTA ได้

3.2.4 การหาความหนาแน่นของสารตัวอย่าง

1. ใส่สารตัวอย่างลงบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

2. ชั่งบีกเกอร์ที่ใส่สารตัวอย่างไว้ พร้อมบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้

3. จากสูตร D=m/v แทนค่าน้ำหนักที่ชั่งได้หารด้วยปริมาตรที่ใช้ตวง

4. ทำ3ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การตรวจสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี

ขั้นตอนการ

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

งานวิจัยนี้มีสารที่เกี่ยวข้อง คือ สารตั้งต้น 2 ชนิด คือแคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมออกไซด์ และผลิตภัณฑ์สารประกอบแคลเซียมที่ผลิตได้ 4 ชนิด คือ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต, โมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์, ไดแคลเซียมฟอสเฟตและไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับโมโนแคลเซียมฟอสเฟต รวมทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยนำไปตรวจสอบ ความหนาแน่น เฉดสีที่ปรากฏ การเผาไหม้

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

นำสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สารประกอบแคลเซียมที่ต้องการวิเคราะห์ทั้ง 6 ตัวอย่าง โดยนำมาตรวจวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาค โดยนำตัวอย่างไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering) และนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบภายในโมเลกุล(Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

นำสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สารประกอบแคลเซียมที่ต้องการวิเคราะห์ทั้ง 6 ตัวอย่าง โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพันธะ ด้วยเทคนิค KBr-pellet มีขั้นตอนดังนี้ ผสมสารตัวอย่างกับ KBr ในโกร่งบดสาร ในอัตราส่วน sample : KBr เป็น 1:10 โดยบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใส่สารตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้มีความดัน 40 กิโลนิวตัน ทิ้งไว้ 1-2 นาที ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก สารตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมบางๆสีใส และสารตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำสารตัวอย่างเข้าเครื่อง FTIR เพื่อทำการบันทึกสเปกตรัมการสั่น โดยกำหนดการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟาเรด wave number อยู่ในช่วงประมาณ 4000 ถึง 400 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้าง (X-Ray diffractometer)

นำสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สารประกอบแคลเซียมที่ต้องการวิเคราะห์ทั้ง 6 ตัวอย่าง ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray) เมื่อลำรังสีตกกระทบอนุภาคของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน ทำการบดสารตัวอย่างให้ละเอียดแล้วใส่ลงใน sample holder และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray diffractometer (XRD)

3.3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (X-Ray Fluorescence Spectrometer)

นำสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สารประกอบแคลเซียมที่ต้องการวิเคราะห์ทั้ง 6 ตัวอย่าง ทำการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุภายในสารตัวอย่าง ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโตรสโกปี โดยจะยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปในสารตัวอย่าง ธาตุต่างๆที่อยู่ในสารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ออกมานั้นจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่าง ซึ่งข้อมูลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างและอุณหภูมิ

3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analyzer)

นำสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์สารประกอบแคลเซียมที่ต้องการวิเคราะห์ทั้ง 6 ตัวอย่าง ไปศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน โดยวิเคราะห์มวลสารตัวอย่างที่อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไป โดยสารตัวอย่างนั้นจะถูกควบคุมภายใต้ช่วงอุณหภูมิและสภาวะที่กำหนด ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่เป็นระบบปิดสามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด และน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ผลการทดสอบจะถูกแสดงออกมาในรูปกราฟซึ่งมีแกน y แสดง น้ำหนักที่เปลี่ยนไป (weight % หรือ mg) และแกน x แสดงอุณหภูมิหรือเวลาตามที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ ได้คิดค้นการสังเคราะห์สารประกอบ 2 ชนิด คือ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต และ ไดแคลเซียมฟอสเฟต จากแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ผลิตมาจากเปลือกไข่ฟัก ด้วยเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ พร้อมทั้งไม่ก่อให้เกิดอันตราย โดยสารตั้งต้นที่ใช้ คือ แคลเซียมคาร์บอเนตที่มาจากเปลือกไข่ฟัก ที่ผ่านการบด และร่อนด้วยตะแกรงขนาด 50 เมช มาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต และ ไดแคลเซียมฟอสเฟต โดยรายละเอียดของบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลอง ที่ประกอบด้วย ผลการศึกษาร้อยละผลผลิต ผลการวิเคราะห์ เพื่อยืนยันสมบัติทางเคมีและกายภาพของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ตรวจสอบปริมาณแคลเซียมด้วยเทคนิคการไทเทรตกับสารละลาย EDTA (Standardization) ตรวจสอบปริมาณน้ำในโครงผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีต่างๆด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) ตรวจสอบเอกลักษณ์รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรด (Vibrational spectroscopy; Fourier transform infrared, FTIR) ตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างและขนาดผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

4.1 ผลผลิตร้อยละและผลผลิตจากการทดลองและทฤษฎี

การบดเปลือกไข่ฟัก 1 กิโลกรัม จะได้สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต 1 กิโลกรัม การนำสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต 56 กรัม ไปเผาจะได้สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ 54.9 กรัม เมื่อนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกไข่ฟักมาผสมกับกรดฟอสฟอริกจะได้สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟต สามารถคำนวณได้จากสมการเคมีจะเท่ากับ 2.52 กิโลกรัม ซึ่งการทดลองได้เท่ากับ 2.3436 กิโลกรัม

เมื่อนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการตกผลิตใหม่ จะได้ผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ สารละลายของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์จำนวน 0.9777 กิโลกรัม ซึ่งจากสมการจะได้ 1.0800 กิโลกรัม และสารประกอบไดแคลเซียมฟอตเฟส 0.6530 กิโลกรัม ซึ่งจากสมการจะได้ 0.6880 กิโลกรัม

เมื่อนำโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์จะได้ไดแคลเซียมฟอสเฟต 30.8 กรัม จากสมการจะได้ 34.4 กรัม ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลผลิตร้อยละและผลผลิตจากการทดลองและทฤษฎี

สารประกอบแคลเซียม	ผลผลิต (g) ทดลอง/ทฤษฎี	ร้อยละผลผลิต(%) ทดลอง/ทฤษฎี	หมายเหตุ
$CaCO_{3(s)}$ (แคลเซียมคาร์บอเนต)	1000/1000	100/100	Egg shell
$CaO_{(s)}$ (แคลเซียมออกไซด์)	54.9/56	98/100	CaO
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(s)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟต)	2343.6/2520	93/100	MCP
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(aq)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์)	977.76/1080	97/100	$MCP\text{-}P_{(aq)}$
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H2O_{(s)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์)	977.76/1080	97/100	$MCP\text{-}P_{(S)}$
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟต)	653.6/688	95/100	DCP
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์)	30.8/34.4	11/100	DCP-M

4.2 เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ทางกายภาพ

จากปฏิกิริยาการเตรียมสารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด คือ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต และไดแคลเซียมฟอสเฟต โดยใช้สารตั้งต้นเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมจากเปลือกไข่ฟัก มาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก โดยเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมโนแคลเซียมฟอสเฟต และไดแคลเซียมฟอสเฟต ที่มีลักษณะเป็นผง โดยการทดลองจะใช้แคลเซียมคาร์บอเนต 1 กิโลกรัมผสมกับกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วน 1 : 3 ตามลำดับ และทำซ้ำ 3 ครั้ง

4.2.1 ค่าความหนาแน่น และเฉดสี

สารประกอบแคลเซียมแต่ละชนิดนำไปหาค่าความหนาแน่นและสังเกตเฉดสีที่ปรากฏจะได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่น และเฉดสี ของสารประกอบแคลเซียม

สารประกอบแคลเซียม	ความหนาแน่น (g/cm^3)	เฉดสี
$CaCO_{3(S)}$ (แคลเซียมคาร์บอเนต)	2.68	สีครีมเข้ม
$CaO_{(S)}$ (แคลเซียมออกไซด์)	3.33	สีขาว
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(s)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟต)	2.19	สีน้ำตาลอ่อน
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(aq)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์)	1.17	สีน้ำตาลใส เกือบดำ
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H2O_{(s)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์)	2.20	สีน้ำตาล ปานกลาง
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(S)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟต)	2.34	สีครีมเกือบ น้ำตาล
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์)	2.30	สีขาวออก ครีม

4.2.2 สมการทางเคมี

แคลเซียมคาร์บอเนตทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมโนแคลเซียมฟอสเฟต พร้อมกับเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น

$$CaCO_{3(s)} + 2H_3PO_{4(aq)} \longrightarrow Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(aq)} + CO_{2(g)}$$

โมโนแคลเซียมฟอสเฟตละลายน้ำจะได้โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์และเกิดกระบวนการตกผลึกใหม่ (recrystallization)

$$2Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(s)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow Ca(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O_{(aq)} + CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$$

แคลเซียมคาร์บอเนตเผาที่ 900 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ได้แคลเซียมออกไซด์เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

$$CaCO_{3(s)} \xrightarrow{\Delta,\ 900\ ^\circ C,\ 2\ hr} CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโมโนแคลเซียมฟอสเฟตจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไดแคลเซียมฟอสเฟต เกิดกระบวนการเผาไหม้ (Calcination)

$$CaO_{(s)} + Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(s)} \longrightarrow 2Ca(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O_{(aq)}$$

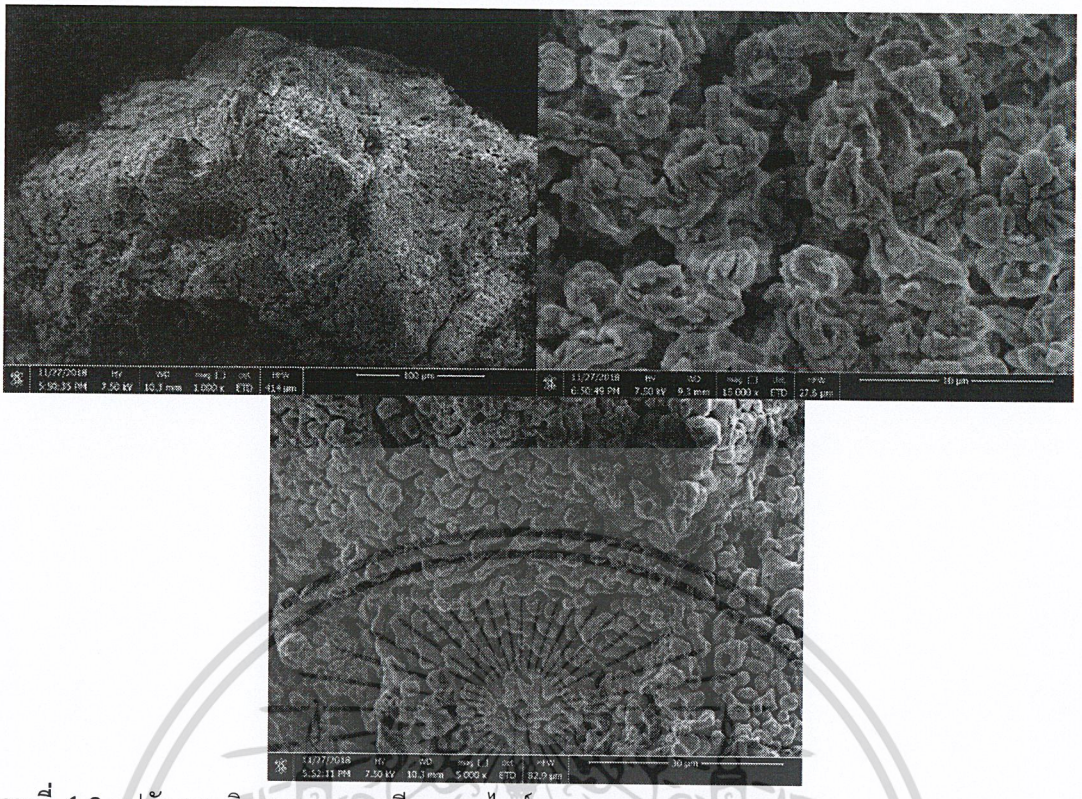
4.2.3 รูปร่างทางสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) จะพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก มีลักษณะเป็นเหลี่ยม บางส่วนมีพื้นผิวเรียบ บางส่วนมีพื้นผิวขรุขระ แคลเซียมออกไซด์ มีลักษณะไร้รูปร่าง ผิวเรียบต่อกันเหมือนปะการัง โมโนแคลเซียมฟอสเฟต มีลักษณะหลายเหลี่ยม ขอบมน จับตัวกันเป็นก้อน โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นแผ่นหนา จับตัวกันเป็นก้อน ไดแคลเซียมฟอสเฟต มีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมยาว เชื่อมต่อกันเป็นก้อนแบบหลวมๆ และไดแคลเซียมฟอสเฟต(โมโนแคลเซียมฟอตเฟสที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์) มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนทับกัน รูปร่างไม่แน่นอน แสดงในรูปที่ 4.1-4.6



ภาพที่ 4.1 รูปสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

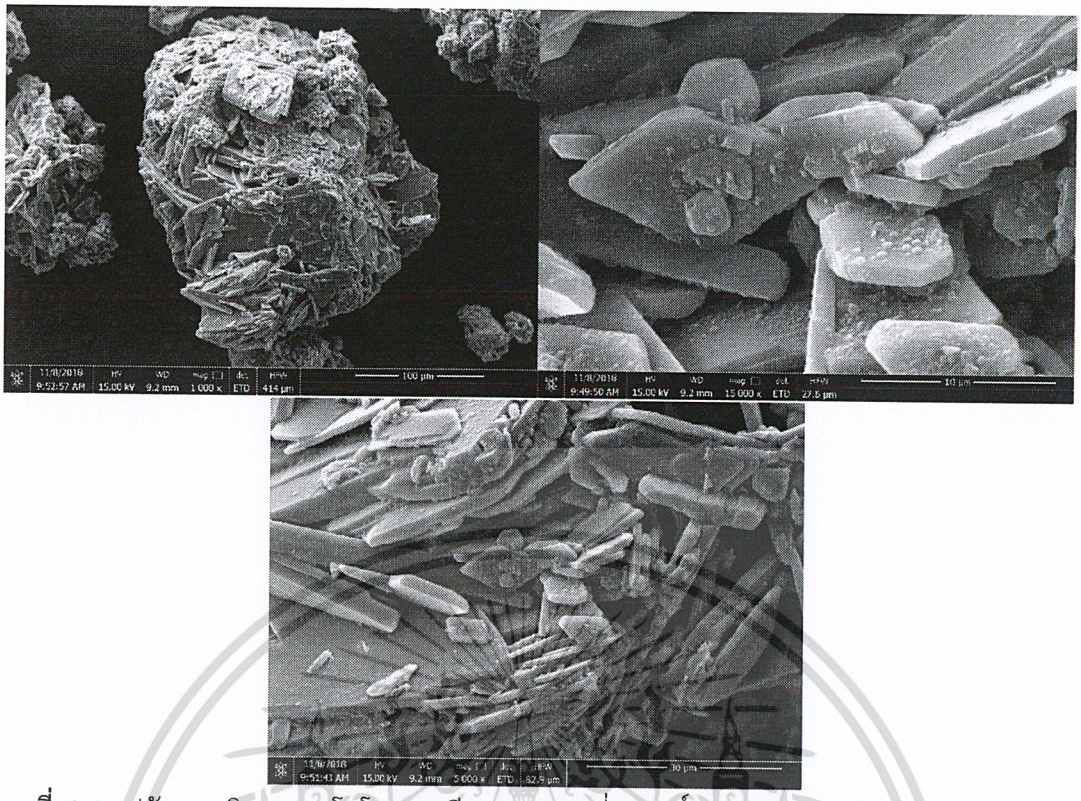


ภาพที่ 4.2 รูปสัณฐานวิทยาของแคลเซียมออกไซด์

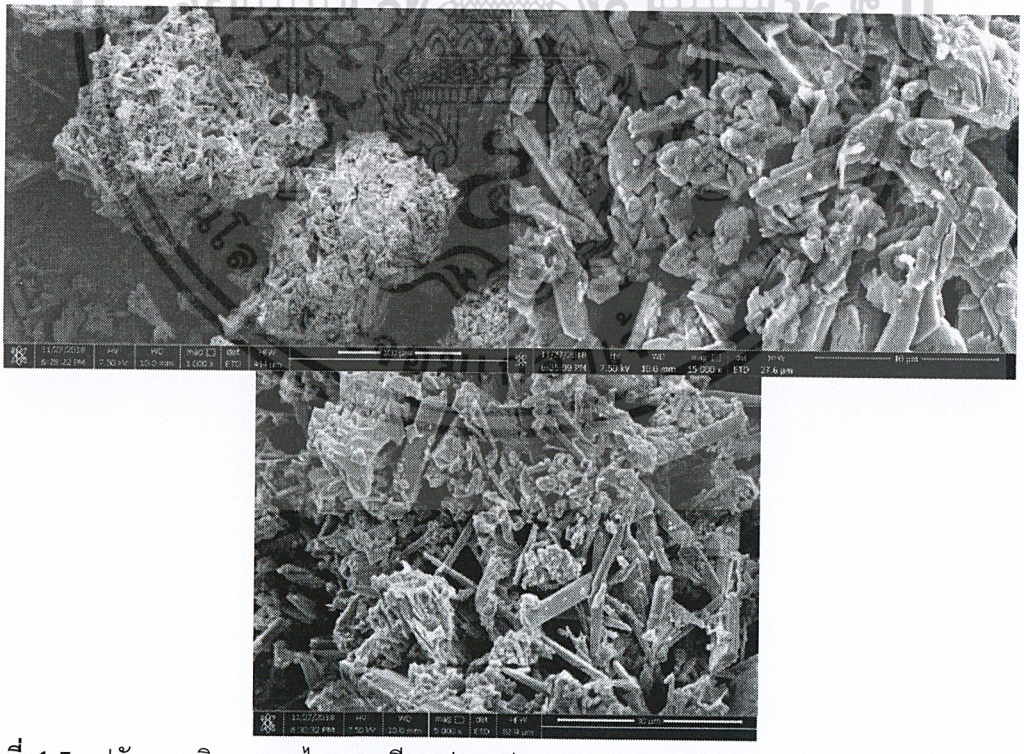


ภาพที่ 4.3 รูปสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

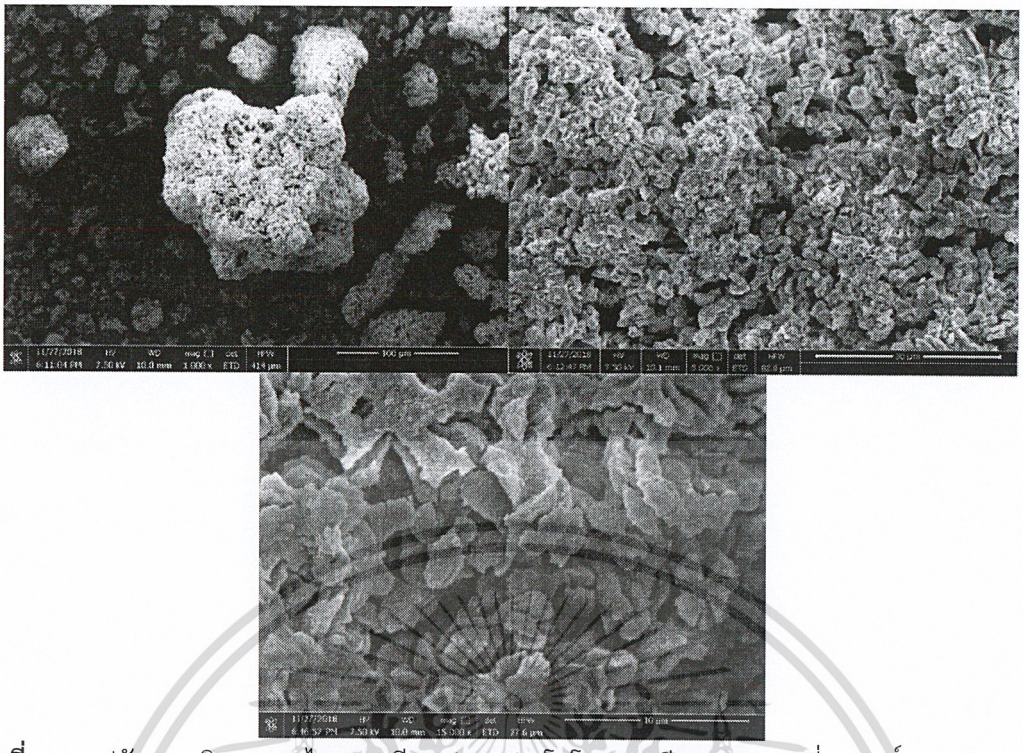


ภาพที่ 4.4 รูปสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์



ภาพที่ 4.5 รูปสัณฐานวิทยาของไดแคลเซียมฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 รูปสัณฐานวิทยาของไดแคลเซียมฟอสเฟต(โมโนแคลเซียมฟอตเฟสที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์)

4.3 เทคนิคการตรวจวิเคราห์ทางเคมี

4.3.1 องค์ประกอบของธาตุ

ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีต่างๆด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) เพื่อหาเปอร์เซ็นองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์และฟอสฟอรัสในสารประกอบแคลเซียมซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.3

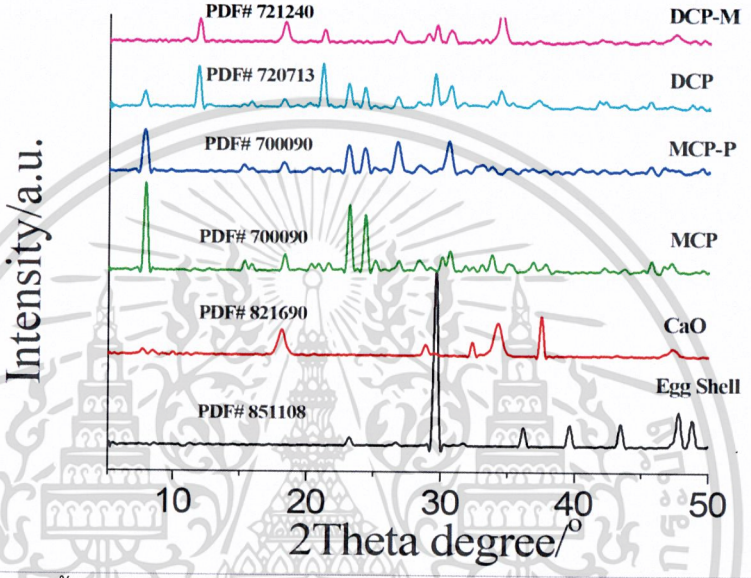
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก

วัตถุดิบ	**ล้างและเผาที่สภาวะ 900 °C**	**แคลเซียมออกไซด์**	**โมโนแคลเซียมฟอสเฟต**		**โมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์**		**ไดแคลเซียมฟอสเฟต**		**ไดแคลเซียมฟอสเฟตผสม**	
	%CaO	%CaO	%CaO	%P	%CaO	%P	%CaO	%P	%CaO	%P
เปลือกไข่ฟัก	93.6	96.5	17.3	34.5	31.6	28.2	29.4	28.4	47.8	21.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 โครงสร้างและขนาดของผลึก

ตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างและขนาดผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ของสารแคลเซียมคาร์บอเนต, แคลเซียมออกไซด์, โมโนแคลเซียมฟอสเฟต, โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์, ไดแคลเซียมฟอสเฟต และไดแคลเซียมฟอสเฟต(โมโนแคลเซียมฟอตเฟสที่บริสุทธิ์ผสมกับแคลเซียมออกไซด์) แล้วนำสเปคตร้าที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับโปรแกรม JCPDS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้เปรียบเทียบสารมาตรฐาน เพื่อใช้ตรวจสอบว่าสารที่เราได้ตรงกับ PDF ใดในสารสามาตรฐาน ดังตารางรูปที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Egg Shell, CaO, MCP, MCP-P, DCP, DCP-M

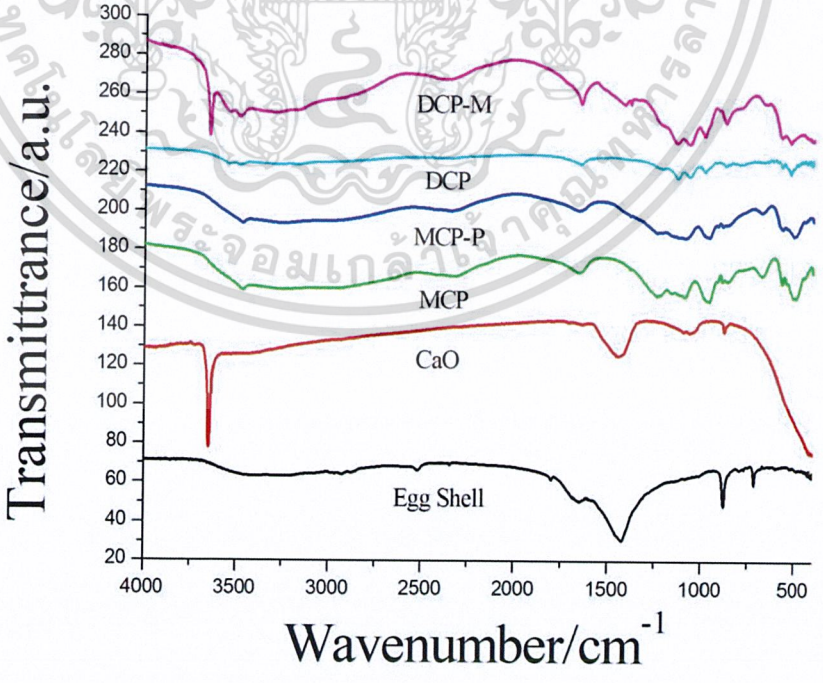
4.3.3 รูปแบบของการสั่น

ตรวจสอบเอกลักษณ์รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรด (Vibrational spectroscopy; Fourier transform infrared, FTIR) จากการนำสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์รวม 6 ชนิด ไปตรวจวิเคราะห์รูปแบบการสั่นของพันธะในโมเลกุล (สเปรคตร้าแสดงดังภาพที่ 4.8) พบว่า

1. สเปคตรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟักมีสเปคตรัม ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่ 2516.28 และ 3402.44 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-H stretching ที่2979 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ที่ 1797.19 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-H bending ที่ 1423.14 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่ 1030 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชัน C-H bending ที่ 874.83 cm^{-1} และ 712.67 cm^{-1}
2. สเปคตรัมของแคลเซียมออกไซด์ มีสเปคตรัม ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่ 3642.92 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-H bending ที่ 875.82 และ 1445.07 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่ 1061.95 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สเปคตรัมของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต มีสเปคตรัม ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่ 3466.20 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C=C stretching ที่ 2324.95 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ที่ 1667.86 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่ 1089.70 cm^{-1} และ1240.05 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชัน C-H bending ที่ 888.21 cm^{-1} และ 959.91 cm^{-1}
4. สเปคตรัมของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์ มีสเปคตรัม ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่ 3466.66 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-H stretching ที่ 3247.78 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C=C stretching ที่ 2344.71 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ที่ 1656.01 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่ 1087.52 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชัน C-H bending ที่ 886.95 cm^{-1} และ 960.16 cm^{-1}
5. สเปคตรัมของไดแคลเซียมฟอสเฟต มีสเปคตรัม ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่ 3481.92 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C=C stretching ที่ 1650.96 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่ 1066.80 cm^{-1} และ 1132.30 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชัน C-H bending ที่ 874.66 cm^{-1} และ 986.30 cm^{-1}
6. สเปคตรัมของไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการผสม(แคลเซียมออกไซด์และโมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์) มีสเปคตรัม ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ที่ 3486.88 cm^{-1} และ 3643.19 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C=C stretching ที่ 1649.06 cm^{-1} และ 2380.83 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-O stretching ที่ 1068.92 cm^{-1} และ 1134.98 cm^{-1} และ หมู่ฟังก์ชัน C-H bending ที่ 874.26 cm^{-1} , 986.41 cm^{-1}



ภาพที่ 4.8 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรด ของ Egg Shell, CaO, MCP, MCP-P, DCP, DCP-M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

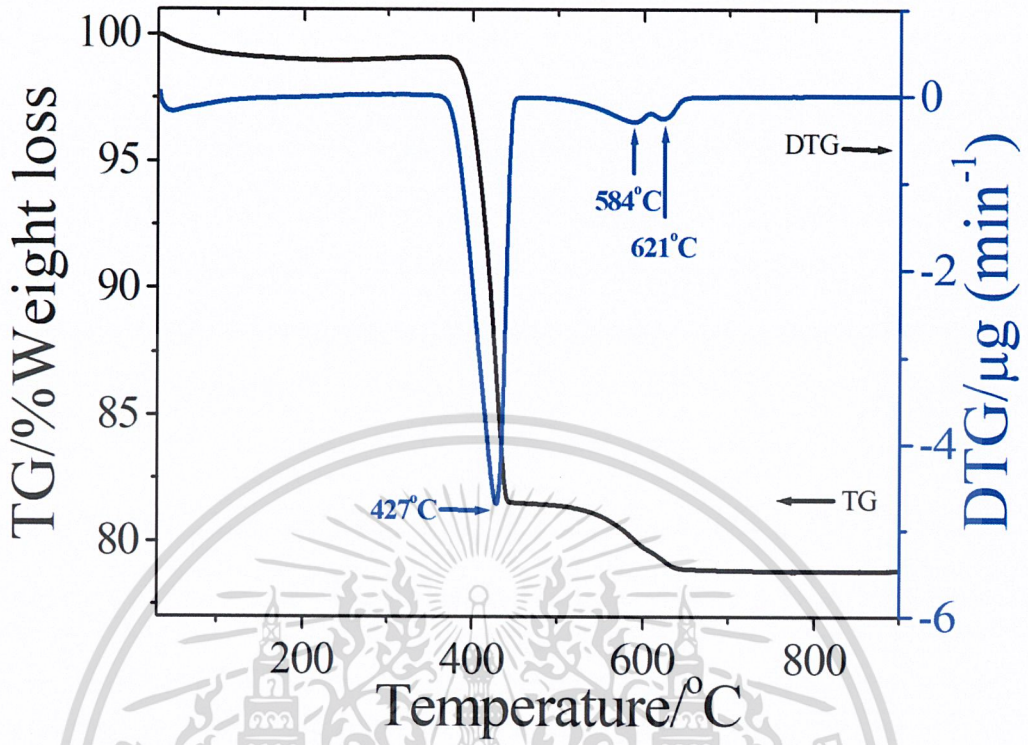
4.3.4 เอกลักษณ์การสลายตัว TGA

ตรวจสอบปริมาณน้ำในโครงผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

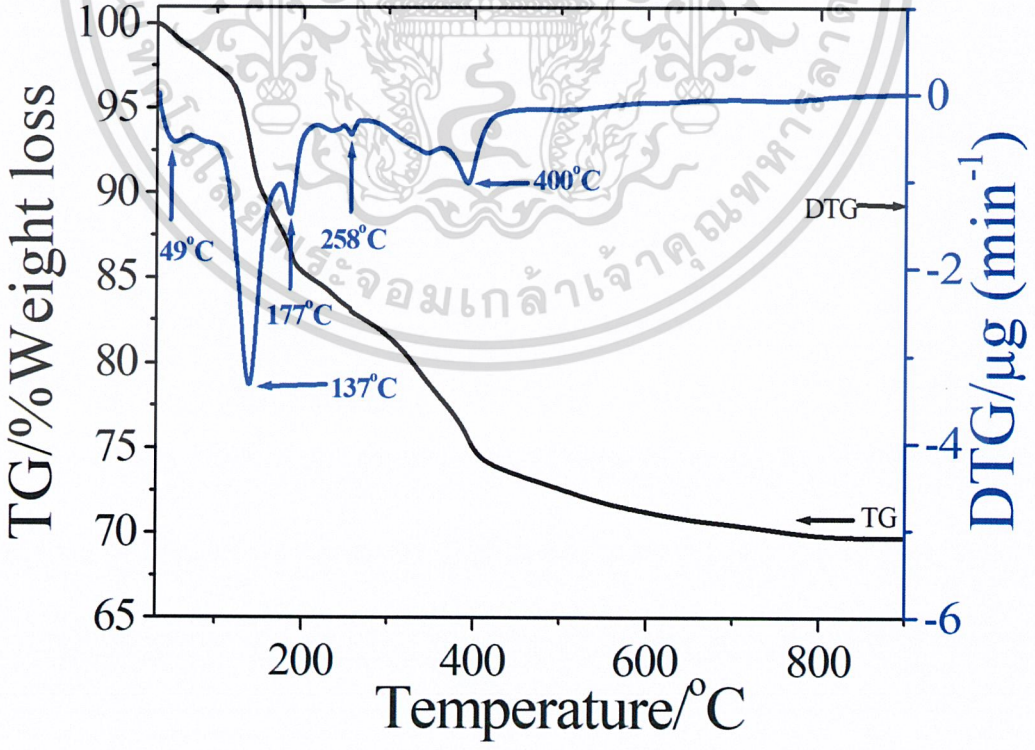
ผลการวิเคราะห์ TGA การวิคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงอุณหภูมิต่างๆ พบว่าสารทั้ง 6 ตัว มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวต่างกัน ดังนี้ (แสดงดังรูปที่ 4.9 - 4.14)

1. แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก มีการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง มีการสูญเสียมวลเล็กน้อยในช่วง 200-400 °C จากนั้นสูญเสียมวลอีกในช่วง 650-750 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 751 °C มีสารอนุพันธ์สุดท้ายเหลืออยู่ร้อยละ 53
2. แคลเซียมออกไซด์ มีการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง มีการสูญเสียมวลเล็กน้อยในช่วง 380-450 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 427 °C จากนั้นสูญเสียมวลอีกในช่วง 550-650 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 584 และ 621 °C มีสารอนุพันธ์สุดท้ายเหลืออยู่ร้อยละ 79
3. โมโนแคลเซียมฟอสเฟต มีการสลายตัวทางความร้อน 4 ช่วง มีการสูญเสียมวลเล็กน้อยในช่วง 50-100 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 49 °C สูญเสียมวลในช่วง 100-120 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 131 °C สูญเสียมวลในช่วง 190-200 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 185 °C สูญเสียมวลอีกในช่วง 250-600 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 246 และ 337 °C มีสารอนุพันธ์สุดท้ายเหลืออยู่ร้อยละ 70
4. โมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์ มีการสลายตัวทางความร้อน 4 ช่วง มีการสูญเสียมวลเล็กน้อยในช่วง 50-80 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 36 °C สูญเสียมวลในช่วง 120-150 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 125 °C สูญเสียมวลในช่วง 180-200 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 177 °C สูญเสียมวลอีกในช่วง 210-400 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 327 °C มีสารอนุพันธ์สุดท้ายเหลืออยู่ร้อยละ 82
5. ไดแคลเซียมฟอสเฟต มีการสลายตัวทางความร้อน 4 ช่วง มีสูญเสียมวลในช่วง 180-200 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 137 และ 177 °C สูญเสียมวลในช่วง 200-400 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 258 °C สูญเสียมวลอีกในช่วง 400-600 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 400 °C มีสารอนุพันธ์สุดท้ายเหลืออยู่ร้อยละ 70
6. ไดแคลเซียมฟอสเฟตผสม (แคลเซียมออกไซด์และโมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์) มีการสลายตัวทางความร้อน 6 ช่วง มีการสูญเสียมวลเล็กน้อยในช่วง 150-200 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 128 และ 181 °C สูญเสียมวลในช่วง 200-300 °C สูญเสียมวลในช่วง 300-400 °C สอดคล้องกับพีค DTG ที่ 412 °C สูญเสียมวลอีกในช่วง 400-420 °C สูญเสียมวลอีกในช่วง 400-630 °C มีสารอนุพันธ์สุดท้ายเหลืออยู่ร้อยละ 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

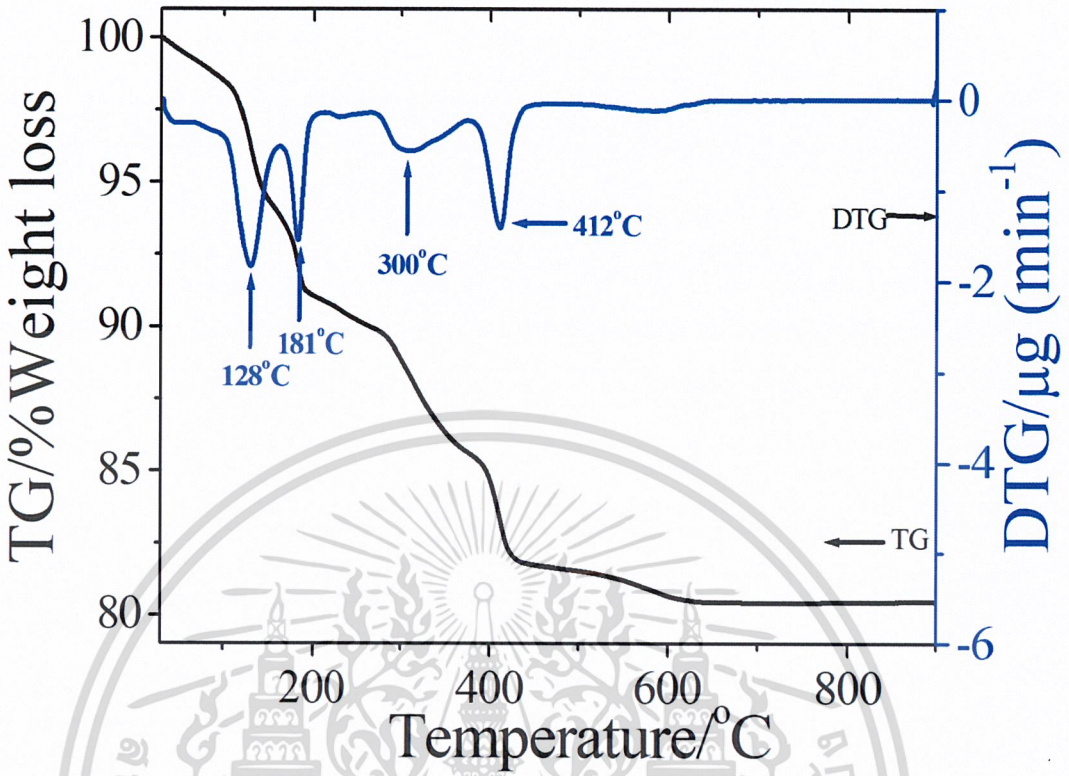


ภาพที่ 4.9 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก

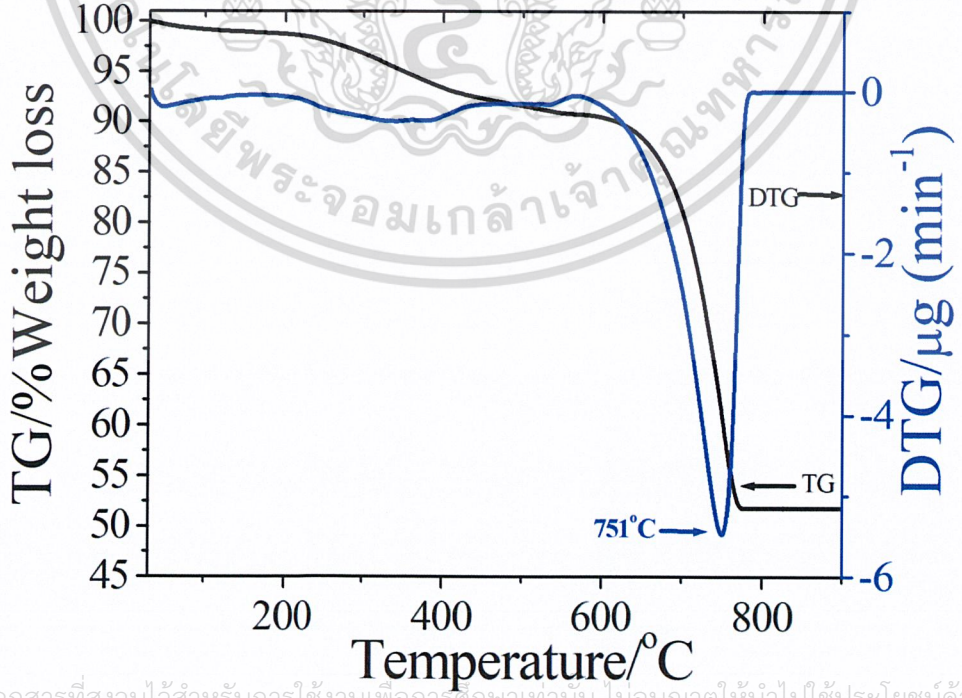


ภาพที่ 4.10 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของแคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

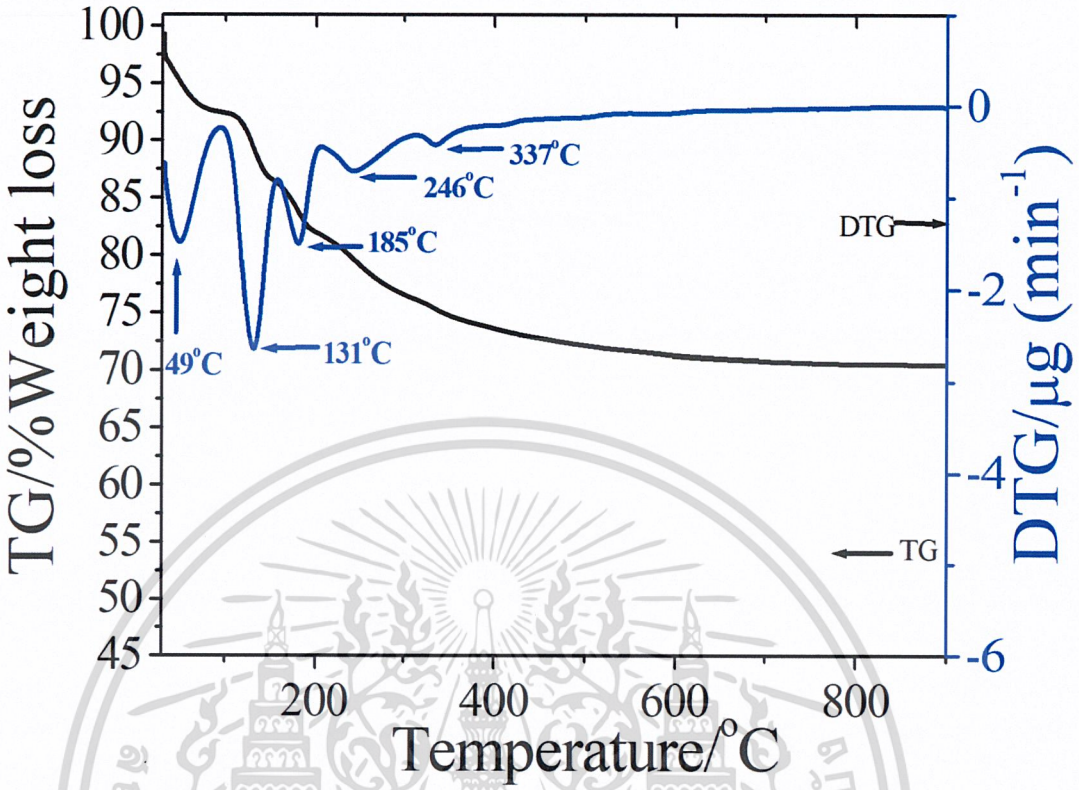


ภาพที่ 4.11 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต

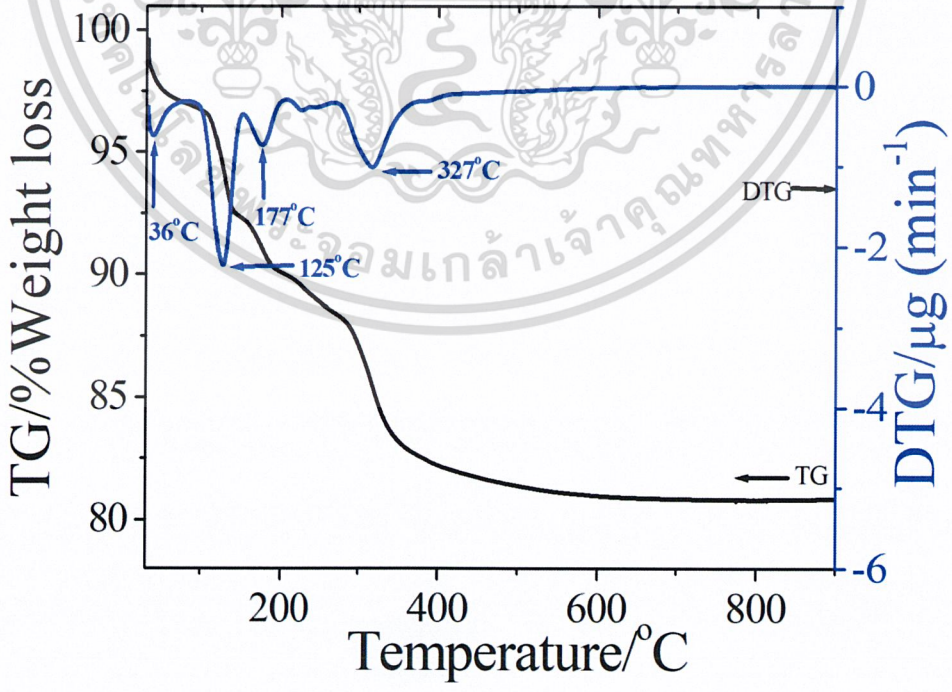


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์



ภาพที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของไดแคลเซียมฟอสเฟต



ภาพที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของไดแคลเซียมฟอสเฟต (ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การหาความเข้มข้นของแคลเซียมด้วยเทคนิคการไทเทรต (Standardization)

หาปริมาณแคลเซียมด้วยการไทเทรตกับสารละลายEDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) โดยใช้สารละลาย พีเอช10 เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ และอิริโอโครมแบลคทีเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมม่วงแล้วนำปริมาตรของสารละลาย EDTA และน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟักไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย EDTA ได้ดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารประกอบแคลเซียม

สารประกอบแคลเซียม	ความเข้มข้น (M)	น้ำหนัก (g)
$CaCO_{3(s)}$ (แคลเซียมคาร์บอเนตที่บริสุทธิ์)	0.0101	10.2400
$CaCO_{3(s)}$ (แคลเซียมคาร์บอเนต)	9.5522	10.2933
$CaO_{(s)}$ (แคลเซียมออกไซด์)	14.5522	18.0476
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(s)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟต)	8.7809	4.0159
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(aq)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์)	0.0983	3933.6408
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟต)	16.2825	5.8732
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์)	12.3044	3.3203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัย เรื่อง “การเพิ่มมูลค่าเปลือกไข่ฟักให้เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมเพื่ออุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร” ได้สารประกอบแคลเซียม 2 ชนิด ได้แก่ โมโนแคลเซียมฟอสเฟต และไดแคลเซียมฟอสเฟต โดยการทดลองต้องเตรียมแหล่งวัตถุดิบที่เป็นแหล่งแคลเซียม คือ เปลือกไข่ฟัก นำมาบดให้ได้ผงขนาด 50 เมช จะได้ ผงเปลือกไข่ ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ และเมื่อนำผงแคลเซียมคาร์บอเนตไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้แคลเซียมออกไซด์ จากนั้น นำผงเปลือกไข่ และแคลเซียมออกไซด์ มาผสมกับกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 70 % ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเองตามธรรมชาติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น โมโนแคลเซียมที่ไม่บริสุทธิ์ จากนั้นตกผลึกใหม่เพื่อให้สารบริสุทธิ์มากกว่าเดิม โดยการผสมน้ำ และตั้งทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง สารจะแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ ตะกอนที่ได้ นำไปผึ่งในถาดให้แห้งเองตามธรรมชาติ ส่วนของของเหลว นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 70 °C จากนั้นนำไปตรวจวิเคราะห์ เพื่อยืนยันสมบัติทางเคมี และทางกายภาพ ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เตรียมขึ้น ด้วยเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ทั้ง 6 เทคนิค โดยจะทำการตรวจสอบปริมาณน้ำในโครงผลึก ด้วยเทคนิควิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (TGA) ตรวจสอบองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (XRF) ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของพันธะในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรด (Vibration spectroscopy; Fourier Transform Infrared, FTIR) ตรวจสอบโครงสร้างและขนาดของผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และ การวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมโดยการไทเทรตกับสารละลาย EDTA รายละเอียดผลการดำเนินต่างๆ จะอธิบายดังต่อไปนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรนำวิจัยเรื่องนี้ไปต่อยอด เนื่องจากว่าใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ง่าย ช่วยเพิ่มรายได้ให้กับประชาชนที่สนใจและลดต้นทุนในการนำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาขยะจากเปลือกไข่ฟัก ซึ่งถือเป็นการกำจัดของเสียแบบ Zero waste

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ดร. บรรจง บุญชม และ ดร. ภิเษก รุ่งโรจน์พรชัย. (2560). **การผลิตสารประกอบแคลเซียมอินทรีย์จากเปลือกหอยและเปลือกไข่เพื่อการใช้งานต่างๆ(การศึกษาอิสระ).**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ม.ป.ป. **"Fourier Transform InfraRed Spectrometer."** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.env.eng.chula.ac.th/?q=content/fourier-transform-infrared-spectrometer (5 ตุลาคม 2561).

ผศ.ดร.กานดา ล้อแก้วมณ. 2561. **"รอบรู้เรื่องไข่ไก่ ตอน รู้จักส่วนประกอบของไข่ไก่ แหล่งโปรตีนที่ทรงคุณค่า."** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://fna.csc.ku.ac.th/wp-content/uploads/2018/06 (เข้าถึงเมื่อ 8 ส.ค. 2561).

CUPress. 2556. **"นักสืบฟองไข่."** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.slideshare.net/toney2010/9789740330615 (เข้าถึงเมื่อ 8 ส.ค. 2561).

Gasmet. 2005. **"หลักการ Fourier Transform InfraRed Spectrometer."** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://digi.library.tu.ac.th/thesis/ra/0126/19APPENDIX_E.pdf (5 ตุลาคม 2561).

The International Food Additives Council (IFAC). n.d. **"Monocalcium Phosphate."** [Online]. Available: http:// https://foodingredientfacts.org/facts-on-food-ingredients/sources-of- food-ingredients/monocalcium-phosphate/ (13 August 2018).

ศันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ. 2558. **"ประโยชน์จาก เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์."** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/. (15 ตุลาคม 2561).

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทค). ม.ป.ป. **"Thermogravimetric Analysis (TGA)."** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=569 (5 ตุลาคม 2561)

โศรดา ขุนโหร. 2549. **"กรดฟอสฟอริก."** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_1_2549_ortho-phosphoric-acid.pdf Z (เข้าถึงเมื่อ 13 ส.ค. 2561).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ม.ป.ป. **“เครื่อง วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.”** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.slri.or.th/bdd/th/22/71-x-ray-diffractometer-xrd.html (18 ตุลาคม 2561)

สุภิญญา มากุล. 2557. **“วิเคราะห์ดินด้วยวิธีX-ray diffraction เพื่อประยุกต์ใช้วิทยาศาสตร์.”** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/snamcn/Supinya_Makul/ (18 ตุลาคม 2561)

อรุณ คงแก้ว. ม.ป.ป. **“เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์.”** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/images/st-article/ct_3_2545_x-ray.pd (15 ตุลาคม 2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สูตรหาความหนาแน่น : $D = \frac{M}{V}$ (g/cm^3)

สูตรหาผลผลิตร้อยละ : $\%yield = \frac{\text{ผลที่ได้จริง}}{\text{ผลที่ได้จากทฤษฎี}} \times 100$

สูตรหาจำนวนโมล : $mole = \frac{g}{Mw}$ (mol)

สูตรหาความเข้มข้นของสารละลาย : $n = \frac{CV}{1000}$ (mol/l)

สูตรหาความเข้มข้นในหน่วยส่วนในล้านส่วน : $ppm = \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย}}{\text{น้ำหนักสารละลาย}} \times 10^6$

สูตรหาการเตรียมสารละลายที่เจือจาง : $C_1V_1 = C_2V_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 แสดงการหาความหนาแน่นของสารประกอบแคลเซียม

สารประกอบแคลเซียม	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
$CaCO_{3(S)}$ (แคลเซียมคาร์บอเนต)	40.20	15	2.68
$CaO_{(S)}$ (แคลเซียมออกไซด์)	50.00	15	3.33
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(s)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟต)	32.90	15	2.19
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O_{(aq)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์)	117.00	100	1.17
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H2O_{(s)}$ (โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์)	33.00	15	2.20
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(S)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟต)	35.10	15	2.34
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$ (ไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์)	34.50	15	2.30

ตารางที่ ข-2 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก

MgO	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO
0.3 KCps	0.3 KCps	0.2 KCps	0.5 KCps	0.3 KCps	0.4 KCps	178.7 KCps
0.916 %	1.59 %	0.797 %	1.36 %	0.352 %	0.181 %	93.6 %

Fe_2O_3	CuO	Compton	Rayleigh	Norm.
2.0 KCps	2.4 KCps			
0.372 %	0.301 %	0.81	0.95	100.10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ฟัก

O	Mg	Al	P	S	Cl	K
	0.3 KCps	0.3 KCps	0.2 KCps	0.5 KCps	0.3 KCps	0.4 KCps
29.4 %	0.552 %	0.841 %	0.348 %	0.546 %	0.352 %	0.150 %
Ca	Fe	Cu	Compton	Rayleigh	Norm.	
178.7 KCps	2.0 KCps	2.4 KCps				
66.9 %	0.260 %	0.241 %	0.81	0.95	100.00 %	

ตารางที่ ข-4 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ฟัก

MgO	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	CaO	CuO
0.6 KCps	0.2 KCps	0.4 KCps	0.6 KCps	380.6 KCps	2.0 KCps
1.07 %	0.623 %	0.808 %	0.634 %	96.5 %	0.126 %
Au	Compton	Rayleigh	Norm.		
1.4 KCps					
0.116 %	0.91	0.99	100.00 %		

ตารางที่ ข-5 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ฟัก

O	Mg	Al	P	S	Ca
	0.6 KCps	0.2 KCps	0.4 KCps	0.6 KCps	380.6 KCps
29.1 %	0.644 %	0.330 %	0.353 %	0.254 %	69.0 %
Cu	Au	Compton	Rayleigh	Norm.	
2.0 KCps	1.4 KCps				
0.100 %	0.116 %	0.91	0.99	100.00 %	

ตารางที่ ข-6 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก

Na_2O	MgO	Al_2O_3	P_2O_5	CaO	Fe_2O_3
0.4 KCps	0.5 KCps	0.3 KCps	45.1 KCps	84.7 KCps	6.3 KCps
1.79 %	0.645 %	0.759 %	79.0%	17.3 %	0.295 %
Compton	Rayleigh	Norm.			
0.88	0.97	100.00 %			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุโมโนแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก

O	Na	Mg	Al	P	Ca
	0.4 KCps	0.5 KCps	0.3 KCps	45.1 KCps	84.7 KCps
50.7 %	1.33 %	0.389 %	0.402 %	34.5 %	12.4 %
Fe	Compton	Rayleigh	Norm.		
6.3 KCps					
0.207 %	0.88	0.97	100.00 %		

ตารางที่ ข-8 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก

Al_2O_3	P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	CuO	Au
0.4 KCps	18.9 KCps	79.1 KCps	7.7 KCps	2.7 KCps	1.6 KCps
1.95 %	64.5 %	31.6 %	0.871 %	0.189 %	0.147 %
Compton	Rayleigh	Norm.			
0.88	0.99	100.00 %			

ตารางที่ ข-9 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุโมโนแคลเซียมฟอสเฟตบริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก

O	Al	P	Ca	Fe	Cu
	0.4 KCps	18.9 KCps	79.1 KCps	7.7 KCps	2.7 KCps
46.9 %	1.03 %	28.2 %	22.6 %	0.609 %	0.151 %
Au	Compton	Rayleigh	Norm.		
1.6 KCps					
0.147 %	0.88	0.99	100.00 %		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก

Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	CaO	Fe_2O_3	CuO
1.0 KCps	24.0 KCps	0.4 KCps	92.9 KCps	7.7 KCps	2.7 KCps
3.60 %	65.0 %	0.639 %	29.4 %	0.670 %	0.146 %
Au	Compton	Rayleigh	Norm.		
1.7 KCps					
0.119 %	0.92	1.01	100.00 %		

ตารางที่ ข-11 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุไดแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ฟัก

O	Al	P	S	Ca	Fe
	1.0 KCps	24.0 KCps	0.4 KCps	92.9 KCps	7.7 KCps
47.5 %	1.91 %	28.4 %	0.256 %	21.0 %	0.469 %
Cu	Au	Compton	Rayleigh	Norm.	
2.7 KCps	1.7 KCps				
0.117 %	0.119 %	0.92	1.01	100 %	

ตารางที่ ข-12 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก

MgO	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	CaO	Fe_2O_3
0.3 KCps	0.4 KCps	17.2 KCps	0.2 KCps	145.5 KCps	5.6 KCps
0.577 %	1.52 %	48.5 %	0.329 %	47.8 %	0.549 %
CuO	Au	Compton	Rayleigh	Norm.	
2.6 KCps	1.7 KCps				
0.164 %	0.139%	0.89	0.99	100.00 %	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 แสดงปริมาณองค์ประกอบของธาตุไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์จากเปลือกไข่ฟัก

O	Mg	Al	P	S	Ca
	0.3 KCps	0.4 KCps	17.2 KCps	0.2 KCps	145.5 KCps
42.5 %	0.348 %	0.805 %	21.2 %	0.132 %	34.1%
Fe	**Cu**	**Au**	**Compton**	**Rayleigh**	**Norm.**
5.6 KCps	2.6 KCps	1.7 KCps			
0.384 %	0.131 %	0.139 %	0.89	0.99	100.00 %

ตารางที่ ข-14 แสดงผลการหาความเข้มข้นของ EDTA ด้วยสารละลายมาตรฐาน $CaCO_3$ ด้วยเทคนิคการไทเทรต (Titration)

ขวดที่	ปริมาณเริ่มต้น (mL)	ปริมาณสิ้นสุด (mL)	ปริมาณที่ใช้ (mL)	จำนวนสารที่ใช้ (g)	ความเข้มข้น EDTA (M)
1	0.00	25.10	25.10	0.0256	0.0102
2	25.10	50.10	25.00	0.0257	0.0103
3	0.00	26.00	26.00	0.0254	0.0098
เฉลี่ย			25.37	0.0256	0.0101

สารละลายแคลเซียมมาตราฐาน 0.0256 g ใช้ปริมาณ EDTA 25.37 ml

ดังนั้น ความเข้มของ EDTA = $\frac{\text{น้ำหนักแคลเซียมคาร์บอเนต}}{\text{ปริมาณ } EDTA} \times 100$ = 0.0101 M

ดังนั้น ความเข้มข้นของสลล.แคลเซียมมาตราฐาน = $\frac{\text{ความเข้มข้น } EDTA \times \text{ปริมาณ } EDTA}{\text{น้ำหนักแคลเซียมคาร์บอเนต}}$ = 9.9922 M

ดังนั้น น้ำหนักของแคลเซียมมาตราฐาน = ความเข้มข้น x มวลโมเลกุล x 1000 = 10.2400 g

ตารางที่ ข-15 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมด้วยสารละลาย EDTA โดยเทคนิคการไทเทรต (Titration)

สารประกอบแคลเซียม	ขวดที่	ปริมาณเริ่มต้น (mL)	ปริมาณสิ้นสุด (mL)	ปริมาณที่ใช้ (mL)	จำนวนสารที่ใช้ (g)	จำนวนโมล (mole)	ความเข้มข้น (g/ml)	น้ำหนักของสาร (g)
แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่	1	0.00	25.30	25.30	0.0257	0.0003	9.9259	10.2800
	2	0.00	25.30	25.30	0.0257	0.0003	9.9259	10.2800
	3	0.00	25.30	25.30	0.0258	0.0003	9.8874	10.3200
เฉลี่ย				25.30	0.0257	0.0003	9.9131	10.2933

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

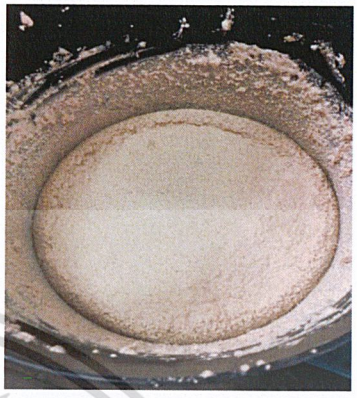
สารประกอบแคลเซียม	ขวดที่	ปริมาณเริ่มต้น (mL)	ปริมาณสิ้นสุด (mL)	ปริมาณที่ใช้ (mL)	จำนวนสารที่ใช้ (g)	จำนวนโมล (mole)	ความเข้มข้น (g/ml)	น้ำหนักของสาร (g)
แคลเซียมออกไซด์	1	0.00	36.80	36.80	0.0256	0.0005	14.4940	18.2857
	2	0.00	36.40	36.40	0.0252	0.0005	14.5641	18.0000
	3	0.00	36.20	35.20	0.0252	0.0004	14.5999	17.8571
เฉลี่ย				36.47	0.0253	0.0005	14.5527	18.0476
โมโนแคลเซียมฟอสเฟตของแข็ง	1	0.00	22.10	22.10	0.0250	0.0001	8.9132	3.9683
	2	22.10	44.00	21.90	0.0255	0.0001	8.6594	4.0476
	3	0.00	22.10	22.10	0.0254	0.0001	8.7728	4.0317
เฉลี่ย				22.03	0.0253	0.0001	8.7818	4.0159
สารละลายโมโนแคลเซียมฟอสเฟต	1	0.00	97.60	97.60	10 ml	0.0984	0.0984	3936.3295
	2	0.00	97.50	97.50	10 ml	0.0983	0.0983	3932.2964
	3	0.00	97.50	97.50	10 ml	0.0983	0.0983	3932.2964
เฉลี่ย				97.53	10 ml	0.0983	0.0983	3933.6408
ไดแคลเซียมฟอสเฟต	1	0.00	42.90	42.90	0.0251	0.0001	17.2332	5.8372
	2	0.00	33.20	33.20	0.0252	0.0001	13.2837	5.8605
	3	0.00	45.50	45.50	0.0250	0.0001	18.3507	5.8140
เฉลี่ย				40.53	0.0251	0.0001	16.2892	5.8372
แคลเซียมออกไซด์ผสมโมโนแคลเซียมฟอสเฟต	1	0.00	29.30	29.30	0.0250	0.0001	11.8171	3.2468
	2	0.00	32.20	32.20	0.0258	0.0001	12.5840	3.3506
	3	0.00	32.10	32.10	0.0259	0.0001	12.4965	3.3636
เฉลี่ย			31.20	31.20	0.0256	0.0001	12.2992	3.3203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

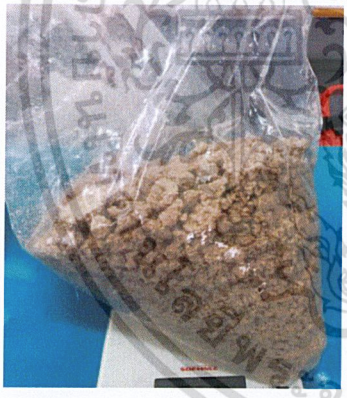
ภาคผนวก ค



ภาพที่ ค-1 เฉดสีของเปลือกไข่ฟักก่อนและหลังบด จะมีสีน้ำตาลอมครีมและสีครีมเข้ม ตามลำดับ



ภาพที่ ค-2 เฉดสีของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต ทิ้งไว้ 1 วันจะมีสีครีม



ภาพที่ ค-3 เฉดสีของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต ที่อบแห้งจะมีสีน้ำตาลอ่อน

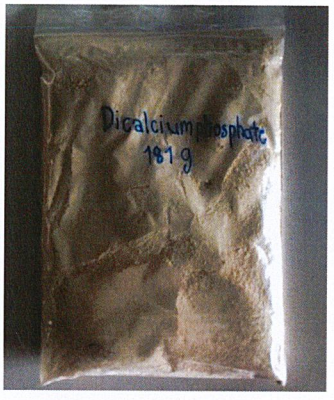


ภาพที่ ค-4 เฉดสีของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต หลังจากการเติมน้ำเพื่อทำให้บริสุทธิ์จะมีสี น้ำตาลเข้มใสเกือบดำ

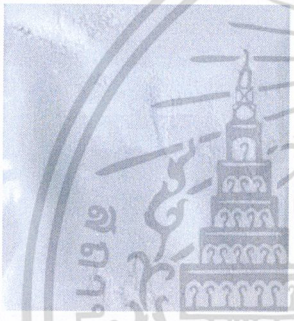
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค-5 เฉดสีของโนโนแคลเซียมฟอสเฟต ที่บริสุทธิ์จะมีสีครีมเข้มออกไปทางน้ำตาลอ่อน



ภาพที่ ค-6 เฉดสีของไดแคลเซียมฟอสเฟต จะมีสีครีมเข้ม

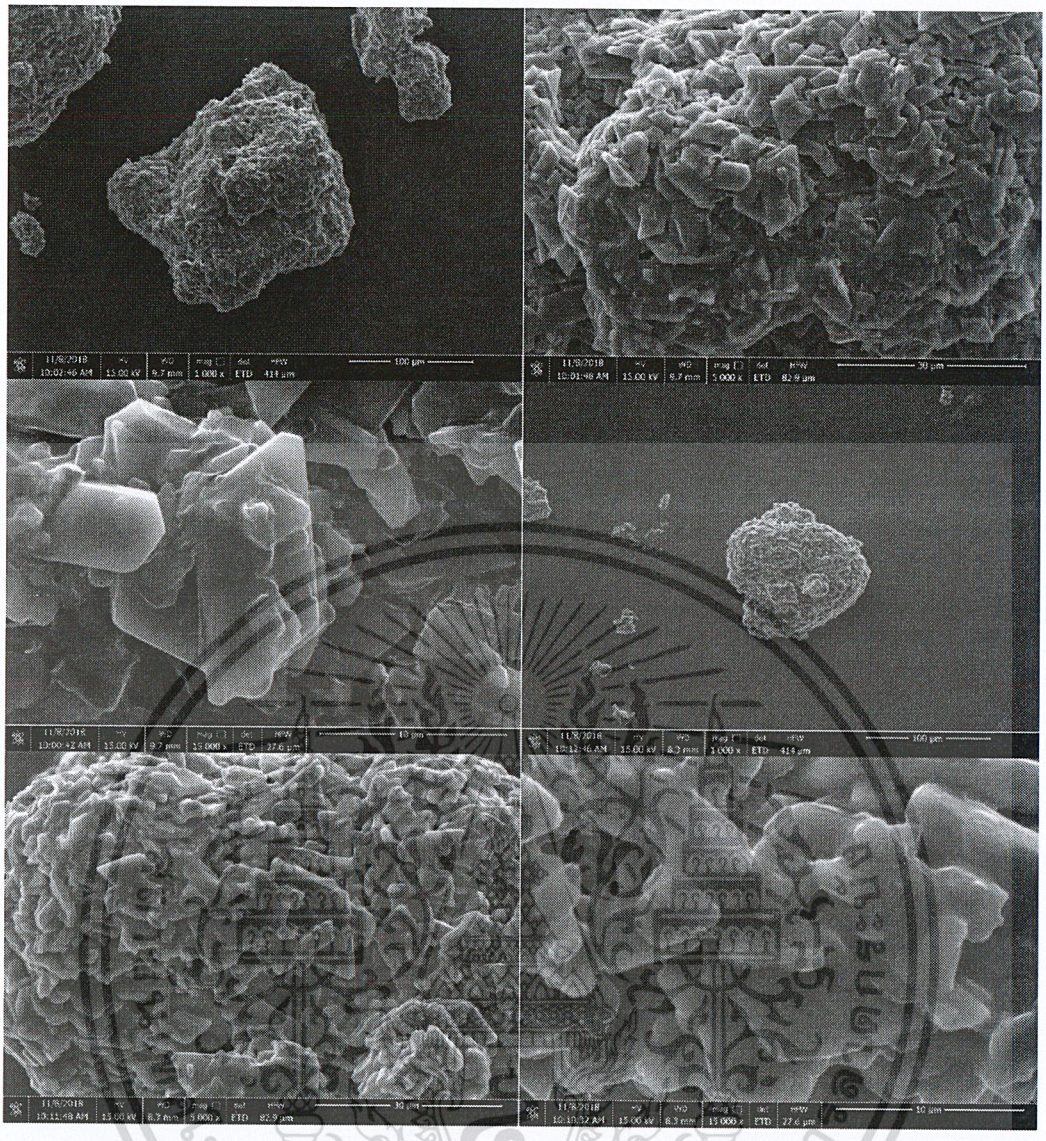


ภาพที่ ค-7 เฉดสีของแคลเซียมออกไซด์จะมีสีขาว



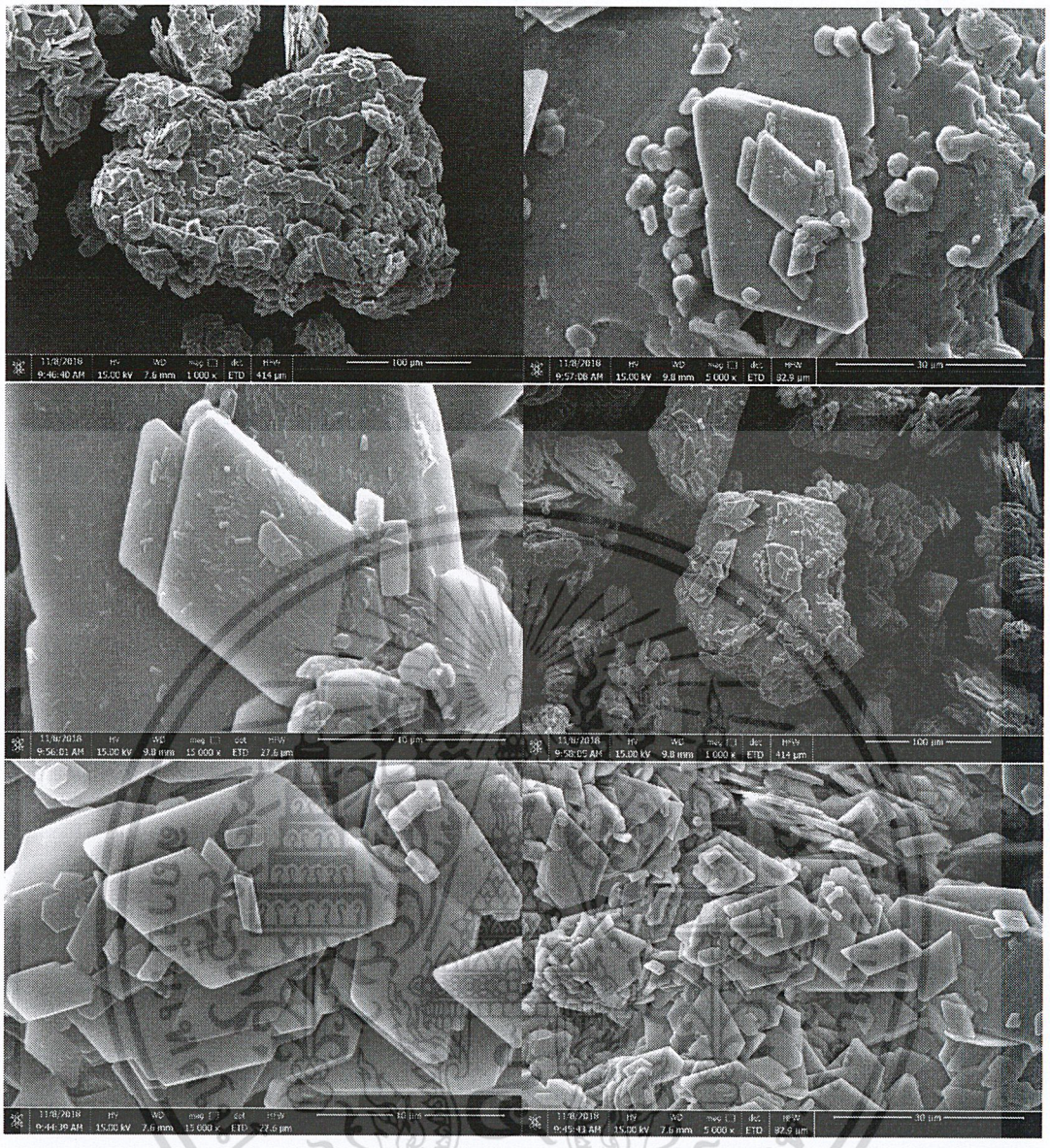
ภาพที่ ค-8 เฉดสีของไดแคลเซียมฟอสเฟตที่ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์จะมีสีขาวออกครีม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



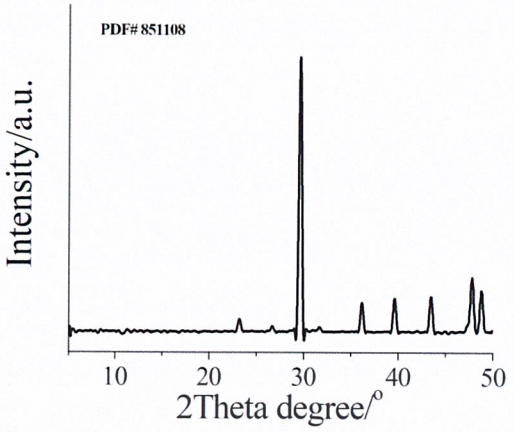
ภาพที่ ค-9 รูปร่างสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่กำลังขยาย 1,000x, 5,000x และ 15,000x จากการทำซ้ำครั้งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

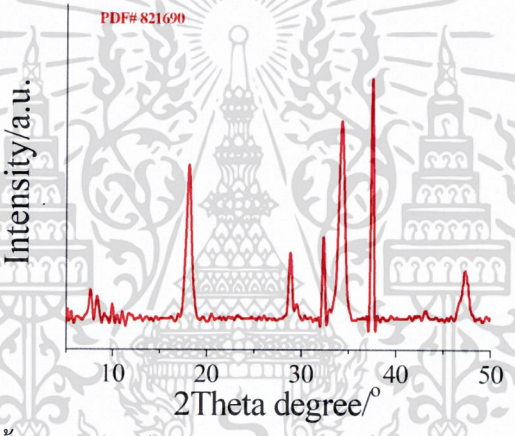


ภาพที่ ค-10 รูปร่างสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์ที่กำลังขยาย 1,000x, 5,000x และ 15,000x จากการทำซ้ำครั้งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

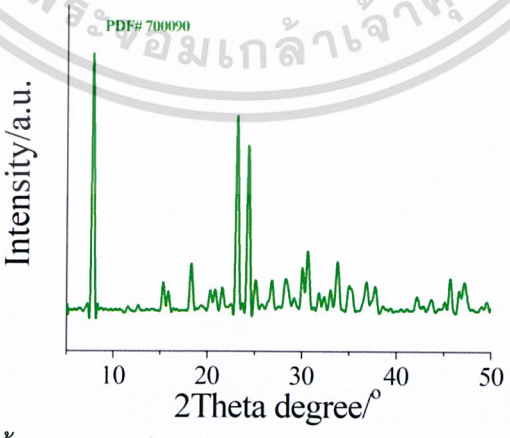
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค-11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกไข่ฟัก

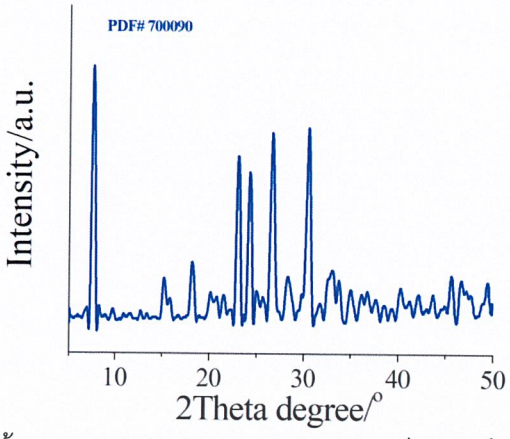


ภาพที่ ค-12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมออกไซด์

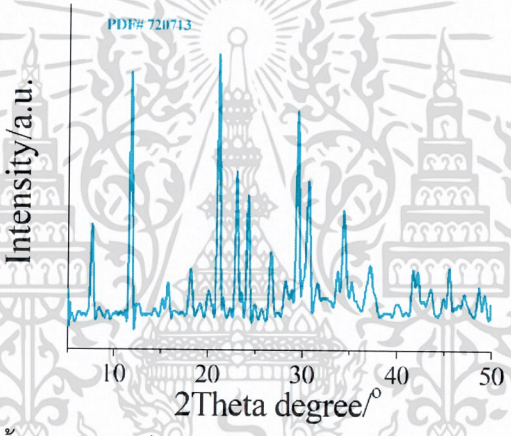


ภาพที่ ค-13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโนโนแคลเซียมฟอสเฟต

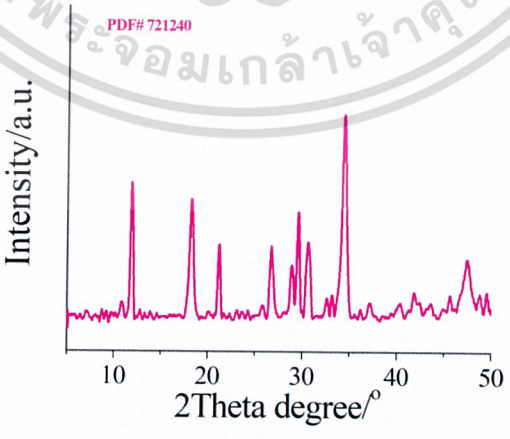
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค-14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโมโนแคลเซียมที่บริสุทธิ์

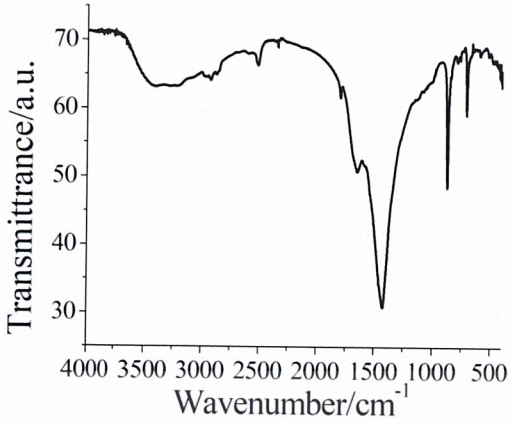


ภาพที่ ค-15 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไดแคลเซียมฟอสเฟต

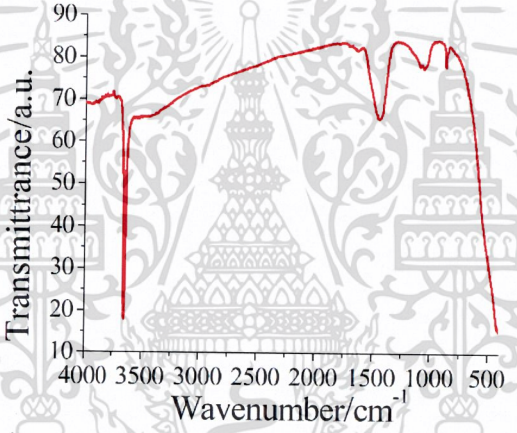


ภาพที่ ค-16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไดแคลเซียมฟอสเฟต (ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์)

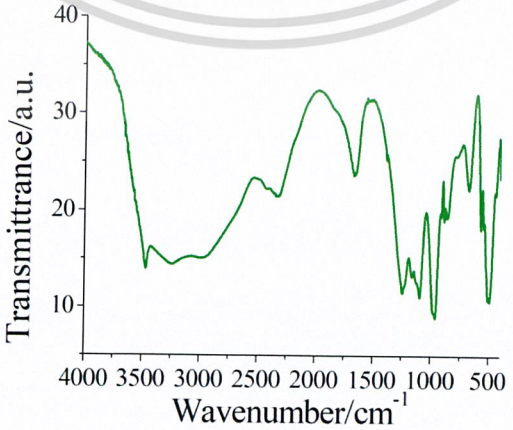
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค-17 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกไข่ฟัก

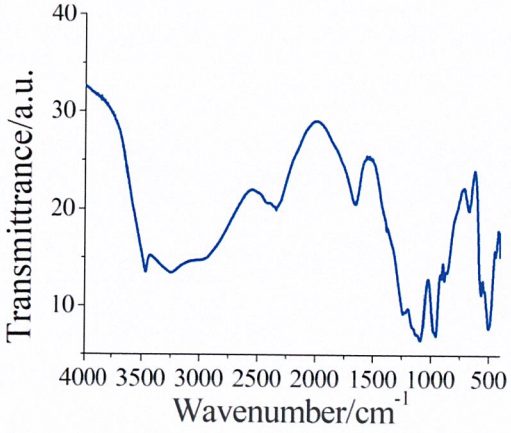


ภาพที่ ค-18 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของแคลเซียมออกไซด์

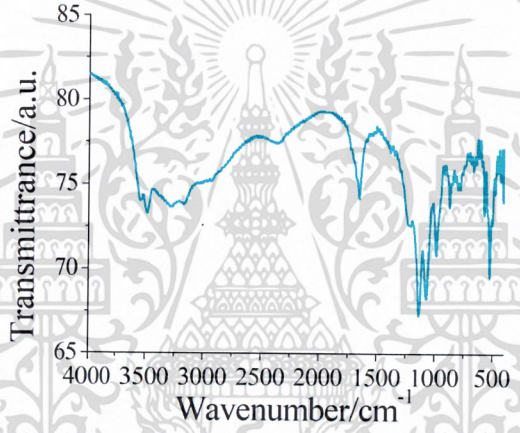


ภาพที่ ค-19 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของโมโนแคลเซียมฟอสเฟต

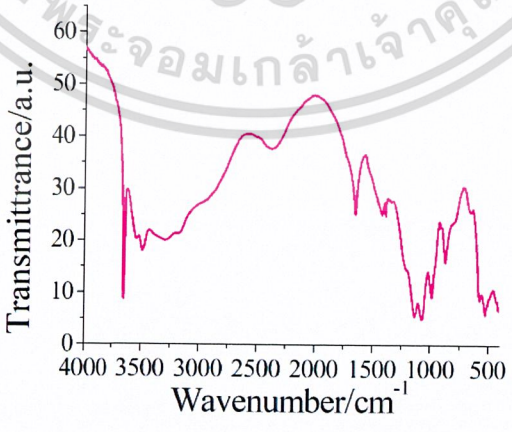
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค-20 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์



ภาพที่ ค-21 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของไดแคลเซียมฟอสเฟต



ภาพที่ ค-22 รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟาเรดของไดแคลเซียมฟอสเฟต (ผสมระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่บริสุทธิ์กับแคลเซียมออกไซด์)

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้