



การประยุกต์ใช้ไบโอแคสซีมคาร์บอนจากเปลือกหอยแมลงภูเป็นสารป้องกันเพลี้ยแป้งในมัน
สำปะหลัง

อรกัญญา กุมพล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การประยุกต์ใช้ไบโอแคสซีมคาร์บอนจากเปลือกหอยแมลงภูเป็นสารป้องกันเพลี้ยแป้งในมัน
สำปะหลัง



วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การประยุกต์ใช้ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่เป็นสารป้องกันเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลัง

โดย อรกัญญา กุมพล

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธ์ุญา สุนันทบุรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวารักษ์ ปานกลาง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร.ชุตีพันธ์ เลิศวชิรไพบุลย์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิชัย สีสยามนอก)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร รัตนะ)

ชื่อ : อรกัญญา กุมพล
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การประยุกต์ใช้ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภูเป็นสารป้องกัน
 เพลี้ยแป้งในมันสำปะหลัง
 สาขาวิชา : เคมีอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวารักษ์ ปานกลาง , อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร.ชุติพันธ์
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : เลิศวิชโรพัญ์
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย นอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับหนึ่งของโลก เพลี้ยแป้ง (Cassava Mealybug) เป็นแมลงศัตรูพืชที่สำคัญของมันสำปะหลัง เพลี้ยแป้งจะซบถ้ำมูลเหลวเป็นน้ำขุ่นเหนียว ๆ เรียกว่า มูลหวาน ทำให้เกิดราดำ พืชสังเคราะห์แสงได้น้อย เพลี้ยแป้งจะแพร่กระจายตามลำต้น โคนใบ และได้ใบมันสำปะหลัง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาไบโอแคลเซียมคาร์บอเนต (Bio-CaCO₃) ที่มีสมบัติเป็น Biopesticides สารกำจัดศัตรูพืชที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ CaCO₃ มีกลไกสามารถฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของศัตรูพืชทางการเกษตรได้โดยตรงเพื่อลดการใช้ยาฆ่าแมลงที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยที่นำมาใช้สกัดมาจากขยะเปลือกหอยแมลงภูโดยผ่านกระบวนการที่เป็นมิตรกับธรรมชาติ (Eco-Friendly Process) โดยสกัดสารด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นเวลา 7 วัน คัดแยกขนาดและฆ่าเชื้อโรคด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) โดยการตรวจด้วยเทคนิค Proximate Analysis เบื้องต้นพบว่าในเปลือกหอยมีปริมาณ CaCO₃ มากถึง 35% และปริมาณโปรตีนในเปลือกหอยที่ผ่านกระบวนการสกัดเป็น CaCO₃ ลดลงเป็น 0.75 % เมื่อเทียบกับเปลือกหอยบดที่มีโปรตีนมากถึง 4.63 % ภาพจากกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ CaCO₃ มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนกันเป็นชั้นโดยผลของเทคนิค CaCO₃ สะท้อนแสง UV และแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 290 ถึง 400 นาโนเมตร สามารถกระจายตัวในตัวกลางที่เป็นน้ำซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลสนาโนคริสตัล (CNCs) และเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNFs) ส่วนผสมน้ำ CaCO₃-CNC-CNF สามารถฉีดพ่นบนส่วนต่าง ๆ ของพืช และฟิล์ม CaCO₃-CNC-CNF ที่ได้สามารถป้องกันการสูญเสียน้ำและความเสียหายจากแสงแดดได้ กระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนี้เปลี่ยนขยะเปลือกหอยให้มีมูลค่า การใช้ CaCO₃ ที่สกัดแล้วเป็นสารกันแดดจากพืชช่วยแก้แมลงศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : มันสำปะหลัง, เพลี้ยแป้ง, ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนต, Biopesticides, Eco-Friendly Process

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : ORAKANYA KUMPHON
Thesis Title : Application of Bio-Calcium Carbonate Extracted from *Perna viridis* Shells for Cassava Mealybug Prevention
Major Field : Industrial Chemistry
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor :Assistant Professor Dr. TEWARUK PARNKLANG: , Co Advisor: Dr. Chutiparn
Co-Advisor Lertvachirapaiboon
Academic Year : 2024

ABSTRACT

Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is an economically important crop for Thailand, the world's leading exporter of cassava products. The cassava mealybug (*Phenacoccus manihoti*) is a significant pest of cassava. Mealybugs excrete a sticky liquid waste called honeydew, which leads to sooty mold, reducing the plant's photosynthetic efficiency. They spread along the stems, petioles, and undersides of cassava leaves. Therefore, this study investigates Bio-Calcium Carbonate (Bio-CaCO₃) with properties as biopesticides, derived from natural materials. CaCO₃ has mechanisms to kill or inhibit the growth of agricultural pests directly, aiming to reduce the use of toxic pesticides harmful to humans and the environment. The CaCO₃ used in this study is extracted from mussel shell waste through an eco-friendly process. The extraction involved seven days of potassium hydroxide (KOH) solution, followed by size separation and sterilization with hydrogen peroxide (H₂O₂). Preliminary Proximate Analysis revealed that mussel shells contain up to 35% CaCO₃ and the protein content in the extracted CaCO₃ is reduced to 0.75%, compared to 4.63% in ground shells. Microscopic and electron microscopic images showed that CaCO₃ has a layered structure. The CaCO₃ technique reflects UV and blue light at 290 to 400 nanometers wavelengths and can disperse in a medium containing cellulose nanocrystal (CNCs) and cellulose nanofibers (CNFs). The CaCO₃-CNC-CNF mixture can be sprayed on various parts of the plant, and the resulting CaCO₃-CNC-CNF film can prevent water loss and damage from sunlight. This eco-friendly process adds value to shell waste. The extracted CaCO₃ used as a plant-derived sunscreen effectively addresses pest issues.

Keywords: Cassava, Mealybug, Bio-Calcium Carbonate, Biopesticides, Eco-Friendly Process

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การประยุกต์ใช้ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่เป็นสารป้องกันเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลัง” สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์จากคณาจารย์, บุคลากรและหน่วยงานต่าง ๆ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวารักษ์ ปานกลาง อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ ดร.ชุตินันท์ เลิศวชิรไพบุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่มอบโอกาสและสนับสนุนเงินในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา ตลอดจนแก้ไขปัญหาค้นคว้าต่าง ๆ ของงานวิจัยนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ลุล่วงได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณโครงการทุนบัณฑิตวิจัยคุณภาพสูงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือกับสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (สวทช.) ที่มอบทุนสนับสนุนเลขที่สัญญา บ. 016/2565

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงเจ้าหน้าที่ ที่ให้ความสะดวกในการทำงานวิจัย รวมถึงคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ปกครองและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดจนสำเร็จการศึกษา หากวิทยานิพนธ์มีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด หากคณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

อรกัญญา กุมพล

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง (ถ้ามี)	ฅ
สารบัญรูปภาพ (ถ้ามี)	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	13
1.2 วัตถุประสงค์	15
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
1.5 สถานที่ทำการวิจัย	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 โครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู่.....	17
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO ₃).....	18
2.3 มันสำปะหลัง.....	21
2.4 เพลี้ยแป้ง.....	22
2.5 การศึกษาเกี่ยวกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการฉีดพ่นเพื่อไล่เพลี้ยแป้ง	24
2.6 เซลลูโลสนาโนคริสตัล (CNCs) และ เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNF)	24
2.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากจากเปลือกหอยแมลงภู่	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	31
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	31
3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	31

3.3	วิธีการทดลอง	32
3.4	การทดสอบเอกลักษณ์	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง		38
4.1	ผลการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู	38
4.2	ผลการวิเคราะห์ขนาดของ Bio-CaCO ₃ ตามน้ำหนักด้วยเทคนิค Sieve Analysis	39
4.3	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด Bio-CaCO ₃ ก่อนและหลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide ด้วย Laser particle size distribution analyzer (PSD)	41
4.5	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผง Bio-CaCO ₃ ด้วยเทคนิค Proximate Analysis	48
4.6	การศึกษาโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแมลงภูบดและผง Bio-CaCO ₃ ด้วยเทคนิค X-Ray Powder Diffraction	49
4.7	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผง Bio-CaCO ₃ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)	53
4.8	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผง Bio-CaCO ₃ เปรียบเทียบกับผง CaCO ₃ อัญรูป Calcite ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)	54
4.9	การปรับปรุงพื้นผิวของผง Bio-CaCO ₃ เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำ	56
4.10	การศึกษาคุณสมบัติการป้องกันรังสี UV ของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy	57
4.11	การศึกษาและผลการทดสอบการมีอยู่ของ CaCO ₃ บนพื้นผิวไบมันสำปะหลังด้วยเทคนิค FT-IR	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ		61
5.1	สรุปผลการทดลอง	61
5.2	ข้อเสนอแนะ	61
บรรณานุกรม		63
ประวัติผู้เขียน		72

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3-1	การเตรียมสารละลายเคลือบผิว.....	34
ตารางที่ 4-1	ผลการวิเคราะห์ Sieve Analysis ของ Bio-CaCO ₃ ที่ไม่ผ่านการฟอกและผ่านการฟอกด้วย Hydrogen Peroxide	41
ตารางที่ 4-2	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด Laser Light Scattering Spectra ของ Bio-CaCO ₃ ก่อนการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide.....	42
ตารางที่ 4-3	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด Laser Light Scattering Spectra ของ Bio-CaCO ₃ หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide.....	43
ตารางที่ 4-4	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของผง Bio-CaCO ₃ ด้วยเทคนิค Proximate Analysis	49
ตารางที่ 4-5	แสดงความสัมพันธ์ของมุมหักเหและค่าความเข้มของพีค ณ มุมหักเหของเปลือกหอยแมลงภู่บด (Raw Material) และผง Bio-CaCO ₃ ก่อนฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide	52
ตารางที่ 4-6	แสดงความสัมพันธ์ของมุมหักเหและค่าความเข้มของพีค ณ มุมหักเหของเปลือกหอยแมลงภู่บด (Raw Material) และผง Bio-CaCO ₃ หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide....	53
ตารางที่ 4-7	แสดงความสัมพันธ์ของโหมดการสั่นและตำแหน่งค่าการดูดกลืนแสงใน FT-IR spectrum	54
ตารางที่ 4-8	แสดงความสัมพันธ์โหมดการสั่นและตำแหน่งการสั่นของ Raman spectrum.....	55

สารบัญรูปภาพ (ถ้ามี)

หน้า

รูปที่ 1-1	สถิติประมาณการ การผลิต การใช้ การส่งออกและมันสำปะหลังคงเหลือ ปี 2562/63..	13
รูปที่ 1-2	เพ็ลล์แป้งมันสำปะหลังสีชมพูบริเวณตาของมันสำปะหลัง การระบาดของเพ็ลล์จำนวน มากจนทำให้ยอดต้นมันสำปะหลังบิดเป็นพุ่ม และลำต้นมีช่วงข้อถี่และบิดงอ	14
รูปที่ 1-3	สมมติฐานของการประยุกต์ใช้ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตในกันฉัดพ่นลงบนมันสำปะหลัง .	15
รูปที่ 2-1	โครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู (<i>Perna viridis</i>) ที่แบ่งออกเป็นชั้นหลัก ได้แก่ ชั้น periostracum, ชั้น prismatic และชั้น nacreous.....	18
รูปที่ 2-2	ภาพกล้องจุลทรรศน์แสงแสดง(A) การสะสมแรกเริ่มของแคลไซต์ (B) ผลึกแคลไซต์ที่โต เต็มที่ (C) การเรียงตัวของผลึกแคลไซต์บนหนามของ <i>S. raphanus</i> (Sr-s) และ (D) การเชื่อมต่อกัน อย่างแน่นของสามเซลล์ภายในเนื้อเยื่อของ <i>S. raphanus</i>	19
รูปที่ 2-3	มันสำปะหลัง (Cassava) ที่เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย.....	22
รูปที่ 2-4	เพ็ลล์แป้งที่เกาะต้นมันสำปะหลัง (Cassava Mealybug).....	23
รูปที่ 2-5	FT-IR spectra of calcium carbonate precipitates at different time intervals. (A) One day, (B) four days	25
รูปที่ 2-6	Raman spectra of calcium carbonate	26
รูปที่ 2-7	หลักการของเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer.....	28
รูปที่ 2-8	Scheme showing the inner faces (Nacre) that are rich in prismatic aragonite and calcite crystals and the outer face of the mussel shell.....	29
รูปที่ 2-9	XRD pattern of CaCO ₃ polymorph prepared from a) eggshells b) snail shells c) crab shells d) batik mussel shells, and e) golden conch shells at 30,50 and 70 °C.....	30
รูปที่ 3-1	ขั้นตอนในภาพรวมของการแปรรูปเปลือกหอยแมลงภูให้เป็น Bio-CaCO ₃	33
รูปที่ 3-2	ขั้นตอนในภาพรวมการเตรียมสารละลายเคลือบผิว.....	34
รูปที่ 4-1	เปลือกหอยแมลงภูก่อน และหลังแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น นาน 1 โมลาร์เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์.....	39
รูปที่ 4-2	ผง Bio-CaCO ₃ ที่ผ่านการแยกด้วยเครื่อง sieve shaker และอยู่บนตะแกรงร่อน ขนาด 10 Mesh (A), 20 Mesh (B), 40 Mesh (C), 100 Mesh (D), 200 Mesh (E), และ Pan (>200) (F)	40

รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ Sieve Analysis ของ Bio-CaCO ₃ ที่ไม่ผ่านการฟอกและผ่านการฟอกด้วย Hydrogen Peroxide.....	40
รูปที่ 4-4 Laser Light Scattering Spectra ของ Bio-CaCO ₃ ก่อน (A) และหลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide (B).....	42
รูปที่ 4-5 เปรียบเทียบ Parameters ของการกระจายตัวของ Raw material และแยกขนาดด้วยเทคนิค Sieve Analysis Bio-CaCO ₃ ก่อนการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide และโดยแสดงเป็นกราฟแท่ง Uniformity (A), Span (B), Specific Surface Area (C), D[4,3].....	45
รูปที่ 4-6 Optical Micrographs ของ Bio-CaCO ₃ ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลาย Hydrogen Peroxide.....	47
รูปที่ 4-7 Scanning Electron Micrographs ของ Bio-CaCO ₃ ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลาย Hydrogen Peroxide.....	47
รูปที่ 4-8 X-Ray Diffraction Patterns ของ Bio-CaCO ₃ ขนาดต่าง ๆ ก่อน (A) และหลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide (B).....	51
รูปที่ 4-9 FT-IR spectrum ของผง Bio-CaCO ₃	54
รูปที่ 4-10 Raman Spectra ของผง Bio-CaCO ₃ อัญรูป Aragonite และผง CaCO ₃ อัญรูป Calcite.....	55
รูปที่ 4-11 มุมสัมผัสของ (A) glass slide (B) Bio-CaCO ₃ powder (C) Hydrophobic Bio-CaCO ₃	57
รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %T กับความยาวคลื่นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1M.....	58
รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %T กับความยาวคลื่นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1M ถึง 4M.....	58
รูปที่ 4-14 การเคลือบฟิล์มบนใบมันสำปะหลัง <i>Manihot esculenta</i> (L.) Crantz โดยการเคลือบแบบควบคุม (A) การเคลือบตัวอย่างที่ 1 (B) และการเคลือบตัวอย่างที่ 2 (C) การเคลือบฟิล์มบนตัวอย่างการลาหลังจาก 1 วันสำหรับการเคลือบควบคุม การเคลือบ Sample-1 และการเคลือบ Sample-2 จะแสดงใน E, F และ G ตามลำดับ.....	59
รูปที่ 4-15 พื้นผิวของใบมันสำปะหลัง <i>Manihot esculenta</i> (L.) Crantz ที่ไว้ก่อน (A) และหลังการเคลือบด้วย Bio-CaCO ₃ โดยใช้การเคลือบ Sample-1 (B และ D) และการเคลือบ Sample-2 (C และ E).....	59

รูปที่ 4-16 FT-IR spectrum ของการเคลือบควบคุม การเคลือบ Sample-1 และการเคลือบ Sample-2.....60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) หรือ Cassava เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากเป็นประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังเป็นอันดับที่ 3 และยังเป็นผู้ผลิต ผู้ส่งออกและใช้งานผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเป็นอันดับหนึ่งของโลกมายาวนานโดยอ้างอิงจากสถิติในปี 2562/2563 ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเป็นจำนวนมากถึง 26.17 ล้านตัน และสร้างรายได้เข้าประเทศมากกว่าปีละ 3 หมื่นล้านบาท [1]



รูปที่ 1-1 สถิติประมาณการ การผลิต การใช้ การส่งออกและมันสำปะหลังคงเหลือ ปี 2562/63

แต่การปลูกมันสำปะหลังมีปัญหาโรคจากแมลงศัตรูพืชที่ทำร้ายต้นมันสำปะหลัง คือ เพลี้ยแป้ง โดยเพลี้ยแป้งเป็นแมลงประเภทปากดูด ทำความเสียหายโดยการดูดกินน้ำเลี้ยงจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ลำต้น โคน ตา ใบ โดยเพลี้ยแป้งจะขับถ่ายมูลของเหลวเป็นน้ำเหนียว ๆ ที่เรียกว่า มูลหวาน ทำให้เกิดเชื้อราดำ พืชสังเคราะห์แสงได้น้อย โดยเพลี้ยแป้งในประเทศไทยจะระบาดรุนแรงและรวดเร็วในช่วงฤดูแล้ง ทำให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้างต่อเกษตรกรที่ปลูกมันสำปะหลัง โดยวิธีการกำจัดเพลี้ยของเกษตรกรที่ปลูกมันสำปะหลังคือการใช้ยาฆ่าแมลงชนิดพ่นโดยสารเคมีส่วนใหญ่ที่ใช้ฉีดพ่นกับมันสำปะหลังจะอยู่ในกลุ่มสารเคมี ไทอะมีโทแซม (Thiamethoxam) ไดโนทีฟูแรน (Dinotefuran) โปรไทโอเฟส (Protiophos) เป็นต้น โดยสารเคมีและยาฆ่าแมลงเหล่านี้มีผลกระทบต่อ

ต่อธรรมชาติและร่างกายมนุษย์โดยตรง จากสถิติในปี 25659-2561 มีการเสียชีวิตจากสารเคมีปราบศัตรูพืชเกือบ 1700 คน หรือประมาณ 600 คนต่อปี และมีผู้ป่วยจากสารเคมีที่ใช้ปราบแมลงศัตรูพืชกว่า 4.6 พันคนต่อปี [2,3]

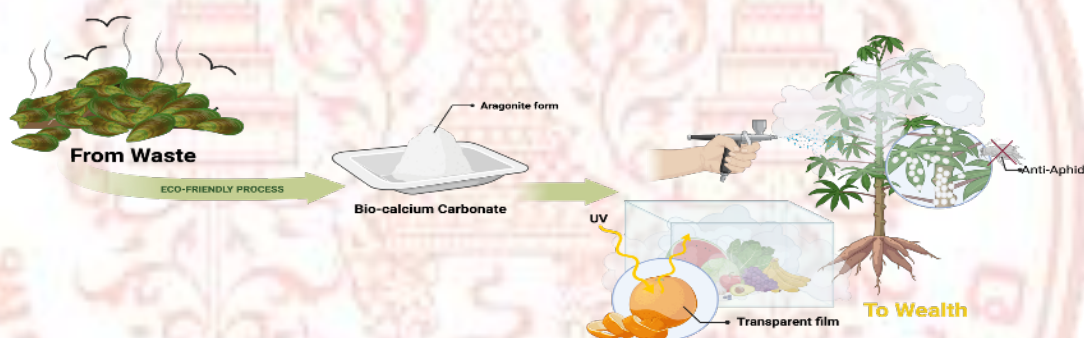


รูปที่ 1-2 เพลี้ยแป้งมันสำปะหลังสีชมพูบริเวณตาของมันสำปะหลัง การระบาดของเพลี้ยจำนวนมากจนทำให้ยอดต้นมันสำปะหลังบิดเป็นพุ่ม และลำต้นมีช่วงข้อถี่และบิดงอ [2]

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจ Biopesticides ที่เป็นสารกำจัดศัตรูพืชที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ สามารถฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของศัตรูพืชทางการเกษตรได้โดยตรง ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างในธรรมชาติ และ มีความเป็นพิษต่ำกว่าสารกำจัดศัตรูพืชทั่วไป Biopesticides ในธรรมชาติมีหลายชนิด สามารถสกัดได้จากพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ข้อดีของ Biopesticides คือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ศัตรูพืชไม่เคยมีการพัฒนาความต้านทานเมื่อเทียบกับสารเคมีที่มีการดื้อยาเพราะใช้กลไกทางกายภาพในการกำจัดศัตรูพืช เป็นที่ต้องการของตลาด และยังเป็นการนำสารที่ได้จากธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ตามเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนา Biopesticides จาก Calcium Carbonate (CaCO_3) ที่สกัดได้จากเปลือกหอยแมลงภู่ มูลเหตุจูงใจมาจากปริมาณขยะเปลือกหอยแมลงภู่ที่มาจากการแกะเนื้อหอยเพื่อส่งขาย หรือการแกะเนื้อหอยเพื่อเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมในการแปรรูป ปริมาณผลผลิตหอยแมลงภู่จากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในประเทศไทย ในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2554-2563) มีผลผลิตเฉลี่ย 83,680 ตันต่อปี ส่งผลทำให้เกิดขยะประเภทเปลือกหอยปริมาณมากตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ขยะเปลือกหอยเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้การกำจัดโดยวิธีการเทกองทิ้งบริเวณรอบที่พักอาศัย หรือพื้นที่สาธารณะทั่วไปเพื่อปล่อยให้เกิดการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามมัก

ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกลิ่นเหม็นและปัญหาการพัฒนาเศรษฐกิจเชิงพื้นที่ เนื่องจากไม่สามารถนำพื้นที่ในการกองหรือฝังกลบขยะเปลือกหอยแมลงภู่มาใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้เลย

จากมูลเหตุจูงใจดังกล่าวผู้วิจัยได้ตระหนักถึงการสกัด CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่เพื่อนำมาใช้เป็น Biopesticides สำหรับป้องกันเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลัง ณ ขณะนี้ยังไม่มีรายงานการวิจัยที่นำ CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่ มาเป็นสารป้องกันแมลงศัตรูพืช การวิจัยจะเริ่มต้นตั้งแต่กระบวนการแปรรูปเปลือกหอยแมลงภู่เป็น CaCO_3 ที่อยู่ในอัญรูปอะราโกไนต์ (Aragonite) ด้วยกระบวนการทางเคมีและทางกายภาพ เพื่อได้ผลิตภัณฑ์ต้นน้ำเป็น Aragonite CaCO_3 ความบริสุทธิ์สูง พัฒนาสูตรสารแขวนลอยของอนุภาค Aragonite CaCO_3 ที่มีเสถียรภาพที่ดีและมีความหนืดเหมาะสมเป็นผลิตภัณฑ์กลางน้ำ และพัฒนาต้นแบบสารป้องกันเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ปลายน้ำสมมติฐานของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1-3



รูปที่ 1-3 สมมติฐานของการประยุกต์ใช้ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตในกันฉีดพ่นลงบนมันสำปะหลัง

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาวิธีการแปรรูปขยะเปลือกหอยแมลงภู่ให้เป็นไบโอแคลเซียมคาร์บอเนต ความบริสุทธิ์สูงสำหรับฉีดพ่นบนต้นมันสำปะหลังเพื่อการป้องกันเพลี้ยแป้ง
2. ศึกษาการยึดเกาะไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตกับวัสดุรองรับเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้ป้องกันเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลัง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ผลิตภัณฑ์ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตจะถูกสกัดจากเปลือกหอยแมลงภู่
2. กระบวนการการสกัดไบโอแคลเซียมคาร์บอเนตจะใช้กระบวนการทางเคมีและใช้กระบวนการทางกายภาพเพื่อกำหนดขนาด

3. วิเคราะห์ทดสอบเชิงพื้นผิวของไบโอเคลซีมคาร์บอนต ลักษณะทางสัณฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี มุมสัมผัสของน้ำและทดสอบการเกาะติดเบื้องต้นบนใบของต้นมันสำปะหลัง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดของเสียจากเปลือกหอยแมลงภู่ที่ไร้ค่าโยเปลี่ยนเป็นไบโอเคลซีมคาร์บอนตที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากขยะเปลือกหอยและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม
2. สามารถถ่ายทอดความรู้ให้กับเกษตรกรได้ วิชาหกิจชุมชนและภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นแนวทางพัฒนาและขยายผลผลิตต่อในอนาคต

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หอยทะเลเป็นทรัพยากรสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ในช่วง พ.ศ. 2554–2563 หอยแมลงภู่มียieldจำนวนผลผลิตเฉลี่ย 83,680 ตันต่อปี คิดเป็นมูลค่า 651 ล้านบาทต่อปี [ที่มา: ประมาณการผลผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจากการประมงของประเทศไทย พ.ศ. 2564–2566, กลุ่มสถิติการประมง กองนโยบายและแผนพัฒนาการประมง] จังหวัดสมุทรสงครามเป็นจังหวัดที่มีฟาร์มเลี้ยงหอยทะเลมากที่สุดจำนวน 859 ฟาร์ม เป็นฟาร์มเลี้ยงหอยแมลงภู่มากกว่า 50% คือ 456 ฟาร์ม จากสถิติผลผลิตหอยทะเลในปี 2563 จังหวัดสมุทรสงครามมีผลผลิตหอยแมลงภู่อัตรา 17,045.87 ตัน ซึ่งคิดเป็น 14.33% ของผลผลิตหอยทะเลทั้งหมด คิดเป็นมูลค่า 136.20 ล้านบาท [ที่มา: สถิติฟาร์มเลี้ยงหอยทะเล ประจำปี 2563, กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์] ชุมชนแหลมใหญ่ จังหวัดสมุทรสงคราม เป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีวิสาหกิจชุมชนที่ประกอบอาชีพแกะเนื้อหอยแมลงภู่มากที่สุดแห่งหนึ่งในประเทศไทย ได้ประสบกับปัญหาการกำจัดขยะเปลือกหอยมาเป็นระยะเวลายาวนาน จากการลงพื้นที่สำรวจพบขยะเปลือกหอยถูกกองทิ้งเป็นจำนวนมากในเขตที่พักอาศัย ขยะเปลือกหอยเหล่านี้เป็นสาเหตุของมลพิษทางอากาศ มลพิษทางทัศนียภาพ ส่งผลเสียคุณภาพชีวิตของคนในชุมชน และยังขวางกั้นการพัฒนาพื้นที่สำหรับการอยู่อาศัยหรือประกอบกิจการอื่น ๆ ถ้าหากเปลือกของหอยแมลงภู่น้ำหนักคิดเป็น 70% ของน้ำหนักทั้งหมด แสดงว่า จะมีขยะเปลือกหอยในจังหวัดสมุทรสงครามปริมาณเฉลี่ยสูงถึง 12,000 ตันต่อปี

2.1 โครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู

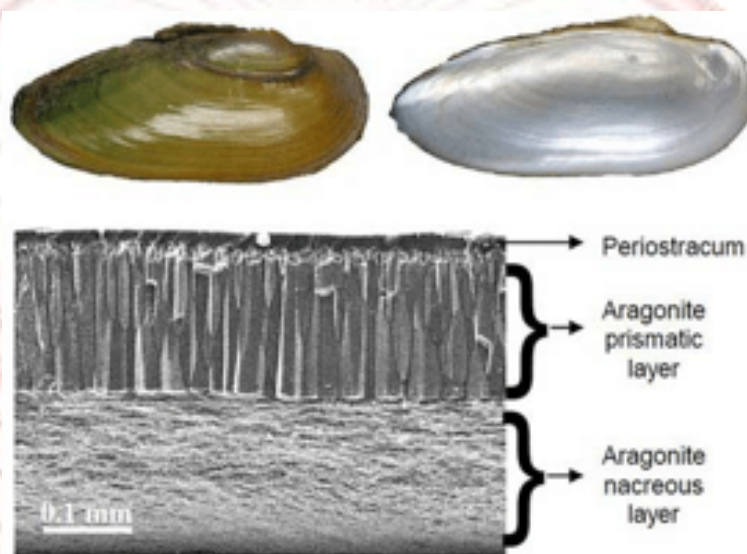
เปลือกหอยแมลงภู (*Perna viridis*) นั้นแบ่งออกเป็นสามชั้นหลัก ได้แก่ ชั้น periostracum, ชั้น prismatic และชั้น nacreous [4] ความสำคัญในการเข้าใจโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอย ซึ่งเป็นแหล่งที่สำคัญของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีบทบาทสำคัญในการปกป้องตัวหอยและเป็นโครงสร้างทางชีวภาพที่แข็งแรง เปลือกหอยแมลงภู่นั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อนประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ซึ่งแต่ละชั้นมีลักษณะเฉพาะและปริมาณแคลเซียมที่แตกต่างกันออกไป

2.2.1 ชั้น Periostracum: เป็นชั้นนอกสุดของเปลือกหอยที่บางและยืดหยุ่น ประกอบด้วยโปรตีนหลักที่เรียกว่า conchiolin ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันที่ปกป้องชั้นอื่น ๆ จากการกัดกร่อนและการโจมตีจากสารเคมี [5]

2.2.2 ชั้น Prismatic: เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้น periostracum ประกอบด้วย

แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบของแคลไซต์ (calcite) ซึ่งเป็นผลึกที่แข็งแรงและมีความทนทานต่อแรงกระแทก โครงสร้างของชั้นนี้มีลักษณะเป็นแท่งเล็ก ๆ (prisms) ซึ่งเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ [6]

2.2.3 ชั้น Nacreous: หรือที่รู้จักกันในชื่อ "ชั้นไข่มุก" เป็นชั้นที่อยู่ใตสุดของเปลือกหอยประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบของอราโกไนต์ (aragonite) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ที่เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ การเรียงตัวนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเปลือกหอยและสร้างความมันวาวที่เป็นเอกลักษณ์ [7]



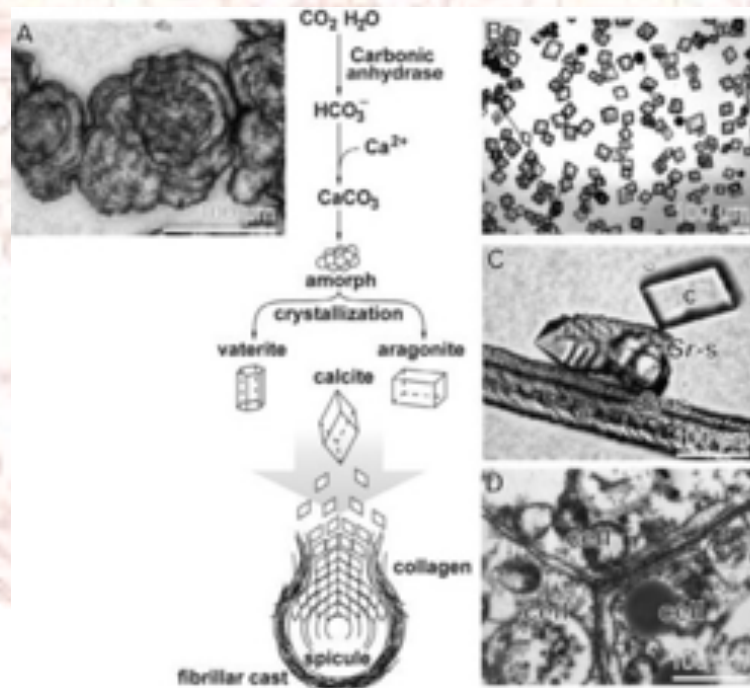
รูปที่ 2-1 โครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าว (*Perna viridis*) ที่แบ่งออกเป็นชั้นหลัก ได้แก่ ชั้น periostracum, ชั้น prismatic และชั้น nacreous [8]

การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณแคลเซียมในแต่ละชั้นของเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าวพบว่าชั้น prismatic มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นอื่น ๆ [8] โดยชั้น prismatic ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตมากถึง 95% ของน้ำหนักของชั้นนั้น ในขณะที่ชั้น nacreous มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 90% โดยน้ำหนัก [9] ส่วนชั้น periostracum มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่ำที่สุดเนื่องจากเป็นชั้นที่ประกอบด้วยโปรตีนเป็นหลัก [10] การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมในแต่ละชั้นของเปลือกหอยแมลงภู่มะพร้าวมีความสำคัญในการพัฒนาวัสดุชีวภาพและการออกแบบโครงสร้างทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูง การศึกษาเชิงลึกในด้านนี้สามารถนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุใหม่ ๆ ที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นในอนาคต [11]

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3)

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่พบได้มากในธรรมชาติ มันเป็นส่วนประกอบสำคัญของหินปูน (limestone), หินอ่อน (marble), ซอล์ก

(chalk) และกระดูกของสัตว์ รวมถึงเปลือกหอย สารนี้มีความสำคัญทั้งในระบบนิเวศและอุตสาหกรรม โดยในธรรมชาติ แคลเซียมคาร์บอเนตจะถูกสะสมในรูปแบบต่าง ๆ ผ่านกระบวนการทางธรณีวิทยาและชีววิทยา เช่น การตกตะกอนของหินปูนจากทะเลสาบและทะเล, หรือการสร้างเปลือกหอยและกระดูกในสิ่งมีชีวิต CaCO_3 เป็นสารประกอบที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่นและไม่มีรส มันมีโครงสร้างคริสตัลไลน์ที่แตกต่างกันหลายรูปแบบ เช่น อะราโกไนต์ (aragonite), แคลไซต์ (calcite), และวัสดุสังเคราะห์อื่น ๆ [12] แต่ละรูปแบบมีความหนาแน่นและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันเล็กน้อย ความหนาแน่นของแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ประมาณ 2.7-2.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งทำให้มันเป็นสารที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี [13] หนึ่งในคุณสมบัติสำคัญของแคลเซียมคาร์บอเนตคือความสามารถในการละลายในน้ำ ซึ่งละลายได้น้อยมากในน้ำบริสุทธิ์ แต่จะละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในปฏิกิริยานี้ แคลเซียมคาร์บอเนตจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปฏิกิริยานี้มักเกิดขึ้นในธรรมชาติ ทำให้เกิดการกัดเซาะของหินปูนและการก่อตัวของถ้ำ [14]



รูปที่ 2-2 ภาพกล้องจุลทรรศน์แสงแสดง(A) การสะสมแรกเริ่มของแคลไซต์ (B) ผลึกแคลไซต์ที่โตเต็มที่ (C) การเรียงตัวของผลึกแคลไซต์บนหนามของ *S. raphanus* (Sr-s) และ (D) การเชื่อมต่อกันอย่างแน่นของสามเซลล์ภายในเนื้อเยื่อของ *S. raphanus* ซึ่งช่องว่างระหว่างเซลล์เหล่านี้เป็นท [14]

แม้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจะเป็นสารที่ปลอดภัยและไม่เป็นพิษ แต่การทำเหมืองและการผลิตสารนี้อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การทำลายภูมิประเทศ การปล่อยฝุ่นละอองในอากาศ

และการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ การจัดการอย่างยั่งยืนในกระบวนการผลิตและการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารประกอบที่มีความหลากหลายในการใช้งานและเป็นส่วนสำคัญของอุตสาหกรรมหลายประเภท ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เป็นเอกลักษณ์ สารนี้ยังคงเป็นวัสดุที่มีคุณค่าต่อทั้งเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การจัดการที่ดีและความระมัดระวังในการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยให้เราสามารถใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาตินี้ได้อย่างยั่งยืนและปลอดภัย [15,16]

2.2.1 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อการป้องกันรังสี UV

แคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติในการป้องกันรังสี UV ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการการป้องกันแสงแดด เช่น ครีมกันแดด และผลิตภัณฑ์เคลือบผิวสำหรับวัสดุต่าง ๆ [17] สมบัติการป้องกัน UV ของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นมาจากความสามารถในการสะท้อนและกระจายแสง ซึ่งช่วยลดปริมาณรังสี UV ที่สามารถทะลุผ่านวัสดุได้ [18] มีงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบนาโนมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันรังสี UV เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบอนุภาคใหญ่ [19] ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวที่มากขึ้นและการกระจายตัวของแสงที่ดีขึ้นของอนุภาคนาโน นอกจากนี้ การผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ากับสารกันแดดอื่น ๆ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกัน UV ได้อย่างมีนัยสำคัญ [20]

2.2.2 การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในเกษตรกรรม

แคลเซียมคาร์บอเนตมีบทบาทสำคัญในการเกษตร โดยเฉพาะในการปรับปรุงดินที่มีความเป็นกรดสูง (ดินเปรี้ยว) เพื่อเพิ่มค่า pH และปรับสภาพดินให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูก [21] การเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตในดินยังช่วยเสริมแร่ธาตุแคลเซียมให้กับพืช ซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญที่มีบทบาทในการเจริญเติบโตของพืช การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตช่วยเพิ่มการดูดซึมแร่ธาตุและการเจริญเติบโตของพืชผล โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีดินเปรี้ยวมาก นอกจากนี้ แคลเซียมคาร์บอเนตยังถูกใช้ในการจัดการกับความเค็มของดิน (Salinity management) โดยการเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำของพืช ทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความเค็มสูง [22] การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการปรับปรุงดินจึงเป็นวิธีที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร

2.2.3 การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการกำจัดแมลงศัตรูพืช

การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการกำจัดแมลงศัตรูพืชเป็นอีกหนึ่งการประยุกต์ใช้ที่น่าสนใจ โดยแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถทำหน้าที่เป็นสารเคลือบป้องกันแมลงหรือเป็นส่วนประกอบของสารเคลือบที่มีฤทธิ์ในการกำจัดแมลง เช่น การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการเคลือบเมล็ดพืชเพื่อป้องกันการเข้าทำลายของแมลงศัตรูพืช [23] แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแมลง

บางชนิดได้โดยการลดความสามารถในการหายใจและการกินอาหารของแมลง นอกจากนี้ ยังมีการใช้ แคลเซียมคาร์บอเนตในการผลิตสารกำจัดแมลงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (biopesticides) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายในสิ่งแวดล้อม [24,25] จากการศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการควบคุมแมลงเพลี้ย (Aphids) ในพืชผัก เช่น แตงกวาและมะเขือเทศ ผลการศึกษาพบว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบผงหรือสารแขวนลอยสามารถลดจำนวนแมลงเพลี้ยลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการรักษา นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างใบพืช ทำให้ลดความเสี่ยงต่อการถูกทำลายจากแมลง [26] และมีงานวิจัยเน้นการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการป้องกันแมลงศัตรูพืชในพืชข้าว [27] การทดลองพบว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการฉีดพ่นบนใบข้าวช่วยลดจำนวนแมลงสิงห์ (Brown Planthopper) ได้มากถึง 60% โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืช แคลเซียมคาร์บอเนตยังมีบทบาทในการเสริมสร้างความแข็งแรงของเซลล์พืช ทำให้ทนต่อการทำลายจากแมลงได้ดีขึ้น และจากการสำรวจการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในแปลงปลูกส้มเพื่อควบคุมแมลงหวี่ขาว (Whitefly) การทดลองพบว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการพ่นบนใบและผลส้มช่วยลดการเจริญเติบโตของแมลงหวี่ขาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถยับยั้งการฟักตัวของไข่แมลงและลดการแพร่ระบาดของแมลงศัตรูพืชได้ถึง 75% [28] การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในแปลงมันสำปะหลังเพื่อป้องกันแมลงเพลี้ยแป้ง (Mealybugs) โดยการฉีดพ่นแคลเซียมคาร์บอเนตบนลำต้นและใบของมันสำปะหลัง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถลดการแพร่กระจายของเพลี้ยแป้งได้ถึง 80% และยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างพืช ทำให้สามารถต้านทานการถูกทำลายจากแมลงได้ดีขึ้น [29]

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารที่มีความหลากหลายในด้านการใช้งาน ตั้งแต่การป้องกันรังสี UV ในผลิตภัณฑ์ดูแลผิว การปรับปรุงดินในเกษตรกรรม ไปจนถึงการกำจัดแมลงศัตรูพืช ความเข้าใจในสมบัติและการประยุกต์ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.3 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง (Cassava) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประเทศไทย เนื่องจากสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย ทั้งเป็นอาหารคน อาหารสัตว์ และใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง เอทานอล กาว และพลาสติกชีวภาพ ความหลากหลายนี้ทำให้มันสำปะหลังเป็นหนึ่งในพืชที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง โดยเฉพาะในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มันสำปะหลังกลายเป็นแหล่งรายได้สำคัญสำหรับเกษตรกรและประเทศ [กรมการค้าต่างประเทศ, 2565] ความสำคัญของมันสำปะหลังต่อเศรษฐกิจไทยนั้นยังสามารถเห็นได้จากการที่รัฐบาลไทยได้สนับสนุนการวิจัยและพัฒนาพันธุ์มันสำปะหลังที่มีความต้านทานต่อโรคและศัตรูพืช

รวมถึงการพัฒนาวิธีการเพาะปลูกที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อเพิ่มผลผลิตและความยั่งยืนของการผลิตมันสำปะหลังในระยะยาว [30] โดยจากสถิติของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ การผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยในปี 2566 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังประมาณ 9.2 ล้านไร่ โดยมีผลผลิตรวมประมาณ 30 ล้านตัน ต่อปี [กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2566] จังหวัดที่มีการปลูกมันสำปะหลังมากที่สุดได้แก่ นครราชสีมา ชัยภูมิ และบุรีรัมย์ ซึ่งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ [สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566] ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังที่ใหญ่ที่สุดในโลก โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้รับความนิยมสูงทั้งในประเทศและต่างประเทศ ในปี 2565 มูลค่าการส่งออกมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมันสำปะหลังของไทยมีมูลค่ากว่า 3,500 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2564 ร้อยละ 10 โดยตลาดหลักของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทยได้แก่ จีน ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ และประเทศในสหภาพยุโรป [ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2565]



รูปที่ 2-3 มันสำปะหลัง (Cassava) ที่เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย

2.4 เพลี้ยแป้ง

เพลี้ยแป้ง (*Phenacoccus manihoti*) เป็นศัตรูพืชที่เข้ามารุกรานการผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โดยเพลี้ยแป้งมีลักษณะเป็นแมลงขนาดเล็กที่มีลำตัวปกคลุมด้วยขี้ผึ้งสีขาว และมักเกาะอยู่ที่ใต้ใบและส่วนต่าง ๆ ของต้นมันสำปะหลัง เพลี้ยแป้งจะดูดกินน้ำเลี้ยงจากต้นพืช ทำให้พืชอ่อนแอและเติบโตช้า อีกทั้งยังทำให้ใบมันสำปะหลังเหลืองและร่วง ซึ่งอาจส่งผลให้ผลผลิตลดลงอย่างมาก [31] การระบาดของเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลังสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดทั้งปี แต่จะมีความรุนแรงมากขึ้นในช่วงฤดูแล้ง เมื่อสภาพอากาศแห้งทำให้การแพร่กระจายของเพลี้ยแป้งเป็นไปได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2-4 เพลี้ยแป้งที่เกาะต้นมันสำปะหลัง (Cassava Mealybug)

วิธีการป้องกันและควบคุมเพลี้ยแป้งในปัจจุบันที่มีการใช้ในประเทศไทยประกอบด้วยหลายวิธีการ เช่น การใช้สารเคมี การใช้ศัตรูธรรมชาติ และการจัดการพืชพันธุ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้:

1. การใช้สารเคมี: การใช้สารเคมีกำจัดแมลงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถเห็นผลได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีมากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการสะสมของสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมและพืชผล ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคและเกษตรกร [32] นอกจากนี้ เพลี้ยแป้งยังมีความสามารถในการพัฒนาความต้านทานต่อสารเคมีบางชนิด ทำให้จำเป็นต้องหาวิธีการจัดการอื่น ๆ ที่มีความยั่งยืนมากขึ้น

2. การใช้ศัตรูธรรมชาติ: การใช้ศัตรูธรรมชาติ เช่น ตัวห้ำและตัวเบียน เป็นวิธีการที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถควบคุมเพลี้ยแป้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ [33] ตัวอย่างของศัตรูธรรมชาติที่ใช้ในการควบคุมเพลี้ยแป้งในประเทศไทย ได้แก่ ตัวห้ำ Coccinellidae (แมลงเต่าทอง) และตัวเบียน *Anagyrus lopezi* ซึ่งเป็นแมลงที่ถูกนำเข้ามาจากแอฟริกาและได้รับการปล่อยลงสู่แปลงปลูกมันสำปะหลังในหลายพื้นที่ของประเทศไทยเพื่อควบคุมการระบาดของเพลี้ยแป้ง

3. การจัดการพืชพันธุ์: การเลือกใช้พันธุ์มันสำปะหลังที่มีความต้านทานต่อเพลี้ยแป้งเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่มีประสิทธิภาพ การพัฒนาพันธุ์มันสำปะหลังที่ต้านทานเพลี้ยแป้งได้รับการสนับสนุนจากองค์กรวิจัยต่าง ๆ โดยการปรับปรุงพันธุ์ทางพันธุกรรม (genetic improvement) ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเพิ่มความต้านทานต่อเพลี้ยแป้งและเพิ่มผลผลิตของมันสำปะหลังในระยะยาว [34] มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการเกษตร อย่างไรก็ตาม การระบาดของเพลี้ยแป้งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตมันสำปะหลังในประเทศ

ไทย การป้องกันและควบคุมเพลี้ยแป้งจำเป็นต้องใช้วิธีการที่หลากหลายและยั่งยืน เพื่อให้มั่นใจว่าการผลิตมันสำปะหลังจะสามารถดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม,

2.5 การศึกษาเกี่ยวกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการฉีดพ่นเพื่อไล่เพลี้ยแป้ง

มีงานวิจัยศึกษาการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการควบคุมเพลี้ยแป้งในแปลงมันสำปะหลัง [35] โดยพบว่า การฉีดพ่นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 1-2% บนใบมันสำปะหลังทุกสัปดาห์ สามารถลดการเข้าทำลายของเพลี้ยแป้งได้ถึง 70% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ฉีดพ่นสาร การศึกษาดังกล่าวยังระบุว่า แคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตของพืชหรือคุณภาพของผลผลิต ซึ่งทำให้เป็นทางเลือกที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการควบคุมศัตรูพืช มีการรายงานถึงผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบนาโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลัง [36] การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตนาโนมีผลในการลดจำนวนเพลี้ยแป้งบนใบมันสำปะหลังได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตแบบธรรมดา เนื่องจากอนุภาคนาโนสามารถกระจายตัวบนใบได้ดีขึ้นและมีพื้นที่ผิวที่กว้างขึ้นในการป้องกันแมลง

2.6 เซลลูโลสนาโนคริสตัล (CNCs) และ เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNF)

เซลลูโลสนาโนคริสตัล (CNCs) และเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNF) เป็นวัสดุชีวภาพที่สกัดจากเซลลูโลสในพืช พวกมันมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่โดดเด่น เช่น ความแข็งแรงเชิงกลสูง ความยืดหยุ่น และความสามารถในการก่อตัวเป็นฟิล์มที่มีความโปร่งแสง [37] CNCs มีขนาดเล็กกว่า CNF ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นและมีประสิทธิภาพในการก่อตัวเป็นฟิล์มสูงขึ้น แต่ทั้งสองชนิดมีศักยภาพในการนำไปใช้ในการเกษตรและอุตสาหกรรมที่หลากหลาย [38]

2.6.1 การใช้ CNCs และ CNF ในการก่อตัวเป็นฟิล์มป้องกันในพืช

การผสม CNCs (Cellulose Nanocrystals) หรือ CNF (Cellulose Nanofibers) กับแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถนำมาฉีดพ่นบนลำต้น โคนต้น ตา และใบของพืชเพื่อสร้างฟิล์มป้องกันที่ช่วยขับไล่และป้องกันแมลงศัตรูพืช เช่น เพลี้ยแป้ง (*Phenacoccus manihoti*) การใช้ฟิล์มนี้ช่วยลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษและสนับสนุนการเกษตรที่ยั่งยืน [39] จากการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่เกิดจาก CNCs และแคลเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพในการป้องกันแมลงศัตรูพืชได้ดี โดยฟิล์มนี้สร้างขึ้นป้องกันที่ลดการเกาะติดของแมลง อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียน้ำจากพืช ทำให้พืชเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่แห้งแล้ง [40] การนำ CNCs/CNF ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ในแปลงมันสำปะหลังนอกจากจะช่วยลดการใช้สารเคมี ยังช่วยเพิ่มผลผลิตและลดการสูญเสียที่เกิดจากเพลี้ยแป้ง การฉีดพ่นสามารถทำได้ทั่วทั้งต้นเพื่อสร้างชั้นฟิล์มป้องกัน [41] ฟิล์มนี้ไม่เพียงแต่ป้องกันศัตรูพืช แต่ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการในด้านการเกษตร

2.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากจากเปลือกหอยแมลงภู่

2.7.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

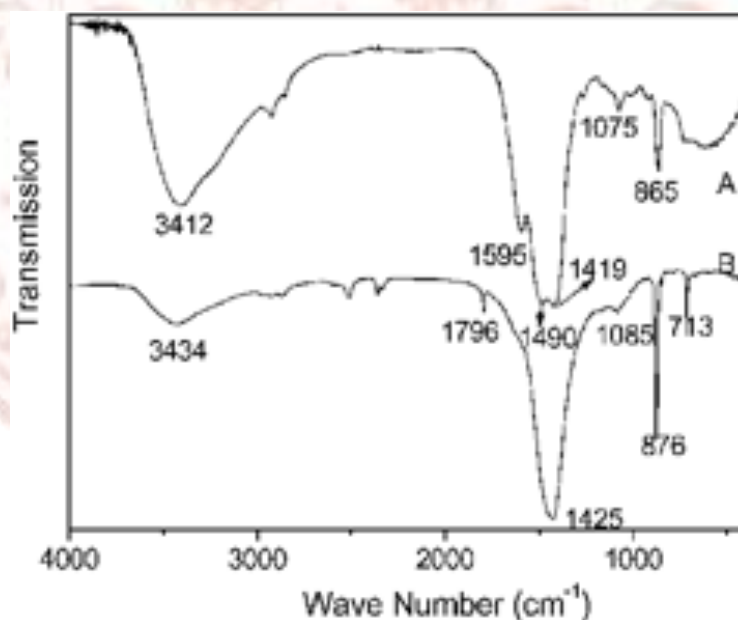
เทคนิค FTIR เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการดูดกลืนแสงอินฟราเรด เมื่อตัวอย่างเช่น แคลเซียมคาร์บอเนตถูกแสงอินฟราเรด ตัวอย่างจะดูดซับพลังงานและทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีในโมเลกุล การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกบันทึกเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งประกอบไปด้วยแถบการดูดกลืนที่ระบุถึงพันธะเคมีเฉพาะต่าง ๆ เช่น พันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O) และพันธะคาร์บอน-แคลเซียม (C-Ca) ทำให้เราสามารถวิเคราะห์และระบุองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างได้

การวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR ช่วยในการระบุหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยทั่วไปแล้ว ตำแหน่งสำคัญที่มักปรากฏในสเปกตรัม ได้แก่:

การสั่นแบบการยืดตัวของพันธะ C-O (stretching vibration) ที่ประมาณ $1400-1500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระบุถึงการมีอยู่ของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน

การสั่นแบบการยืดตัวของพันธะ C=O (stretching vibration) ที่ประมาณ 870 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงพันธะคาร์บอน-ออกซิเจนคู่

การสั่นแบบการดัดของพันธะ C-O (bending vibration) ที่ประมาณ $700-730\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะของพันธะในแคลเซียมคาร์บอเนต



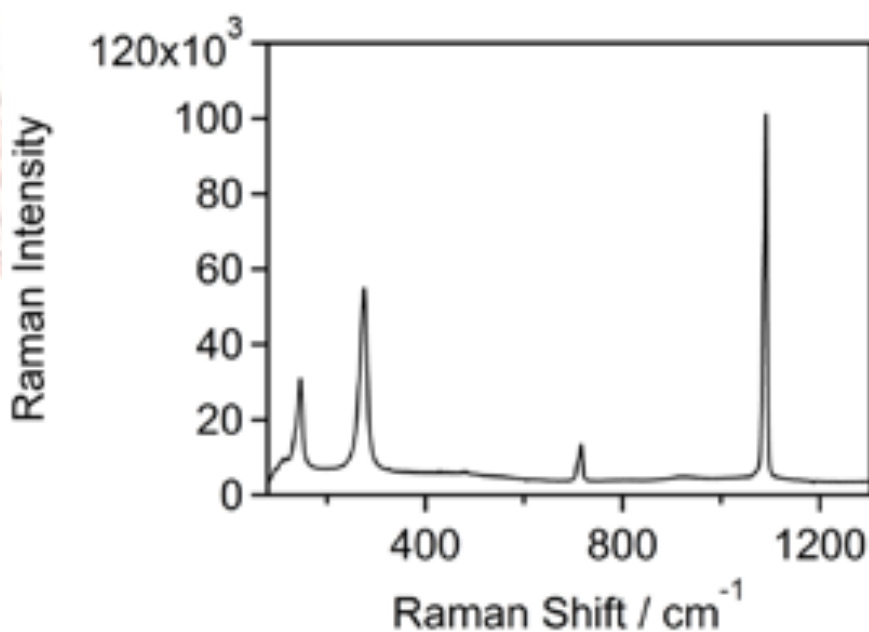
รูปที่ 2-5 FT-IR spectra of calcium carbonate precipitates at different time intervals. (A) One day, (B) four days [42]

การใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม ทำให้สามารถพัฒนาวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น

2.7.2 Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการกระเจิงของแสง (light scattering) เมื่อแสงเลเซอร์ถูกฉายไปยังตัวอย่าง พลังงานบางส่วนจะถูกดูดซับและปล่อยออกมาในรูปแบบที่มีพลังงานเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานนี้เรียกว่า "การกระเจิงรามัน" (Raman scattering) สเปกตรัมที่ได้จะประกอบด้วยการกระเจิงแบบพื้นฐาน (Rayleigh scattering) และการกระเจิงแบบรามัน (Raman scattering) สเปกตรัม Raman ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีและโครงสร้างของโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยสเปกตรัม Raman ของแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีแถบการสั่นสะเทือนที่สำคัญ ได้แก่:

- การสั่นแบบ symmetric stretching ของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O) ที่ประมาณ 1085 cm^{-1}
- การสั่นแบบ bending vibration ของพันธะคาร์บอเนตที่ประมาณ 280 cm^{-1} และ 712 cm^{-1}



รูปที่ 2-6 Raman spectra of calcium carbonate [43]

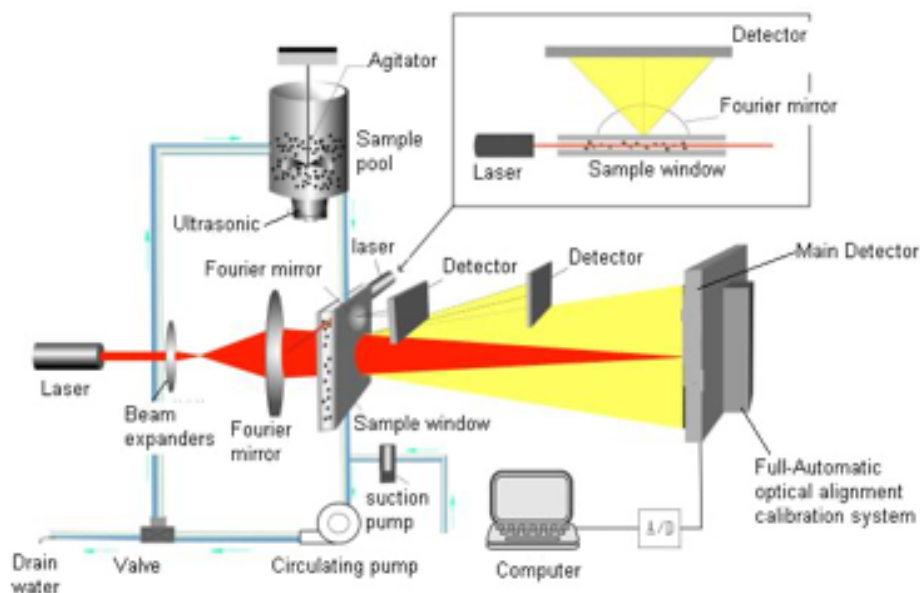
การใช้ Raman Spectroscopy ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำ เนื่องจากสามารถระบุหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพและความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งต่าง ๆ ได้

2.7.3 Laser Particle Size Distribution Analyzer

Laser Particle Size Distribution Analyzer ทำงานบนหลักการของการกระเจิงแสงเลเซอร์ (laser light scattering) ซึ่งเมื่อแสงเลเซอร์ถูกฉายไปยังอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ลอยอยู่ในสารละลาย อนุภาคจะกระเจิงแสงในมุมต่าง ๆ โดยขนาดของอนุภาคจะมีผลต่อรูปแบบการกระเจิงแสง โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะกระเจิงแสงในมุมที่แคบกว่า ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะกระเจิงแสงในมุมที่กว้างกว่า จากนั้นเครื่องมือจะทำการวัดและวิเคราะห์รูปแบบการกระเจิงแสงเพื่อหาขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคในตัวอย่าง

ขั้นตอนการตรวจสอบด้วย Laser Particle Size Distribution Analyzer

1. การเตรียมตัวอย่าง: นำแคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดได้จากเปลือกหอยแมลงภู่มาบดให้เป็นผงละเอียด จากนั้นนำผงแคลเซียมคาร์บอเนตไปผสมกับน้ำสะอาดหรือสารละลายที่เหมาะสมเพื่อทำให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารละลาย
2. การวิเคราะห์ด้วย Laser Particle Size Distribution Analyzer: เทสารละลายที่เตรียมไว้ลงในเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ซึ่งจะฉายแสงเลเซอร์ไปยังอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต เครื่องจะบันทึกการกระเจิงแสงและสร้างข้อมูลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในรูปแบบกราฟ
3. การตีความผลลัพธ์: กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงข้อมูลการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เช่น ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (mean particle size) และขนาดอนุภาคที่มีปริมาณมากที่สุด (modal particle size) ซึ่งข้อมูลนี้จะใช้ในการประเมินคุณภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดได้และประสิทธิภาพในการใช้งานในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ



รูปที่ 2-7 หลักการของเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer

ที่มา : <https://www.spectralinstrument.com/17148576/laser-particle-size-analyzer>

มีงานวิจัยนี้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เปลือกหอยนางรมเป็นแหล่งที่มาของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีคุณภาพสูง การใช้เทคนิค Laser Particle Size Distribution Analyzer ในการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ การที่แคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 3-5 ไมโครเมตรและการกระจายตัวที่ดี ทำให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง นอกจากนี้ งานวิจัยยังช่วยส่งเสริมแนวทางการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในเชิงพาณิชย์และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [44] และมีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยแมลงภู๋ในงานด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle Size Distribution - PSD) ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยแมลงภู๋ [45] เป้าหมายของการศึกษาคือการประเมินคุณสมบัติและศักยภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตในการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดน้ำ การปรับปรุงคุณภาพดิน และการลดมลพิษ

2.7.3. Optical Microscopy (OM) และ Scanning Electron Microscopy (SEM)

Optical Microscopy (OM)

- การทำงาน: Optical Microscopy ใช้แสงธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟผ่านตัวอย่างเพื่อสร้างภาพของพื้นผิวหรือโครงสร้างของตัวอย่าง โดยเลนส์ต่าง ๆ จะทำการขยายภาพของตัวอย่างให้ใหญ่ขึ้นจนสามารถเห็นรายละเอียดที่เล็กลง

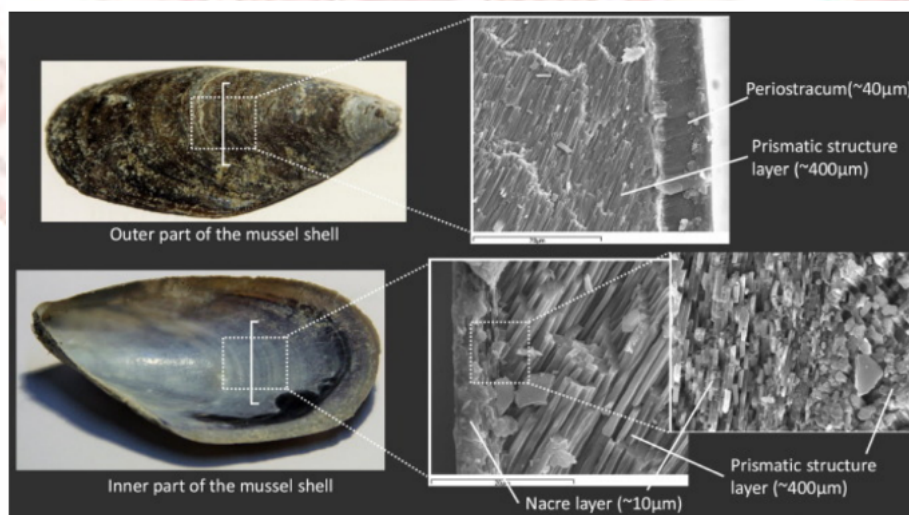
- การขยาย: ภาพที่ได้จะถูกขยายโดยเลนส์ที่เรียกว่า objective lenses ซึ่งมีหลายระดับการขยาย (เช่น 4x, 10x, 40x, 100x) ทำให้สามารถดูรายละเอียดของตัวอย่างในระดับที่ต้องการได้
- การสังเกต: ผู้ใช้สามารถดูตัวอย่างภายใต้แสงที่สะท้อนหรือส่องผ่าน โดยการปรับโฟกัสและความสว่างให้ได้ภาพที่ชัดเจน [46]

Scanning Electron Microscopy (SEM)

- การทำงาน: Scanning Electron Microscopy ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ถูกยิงจากปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ผ่านตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกสแกนด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจะถูกตรวจจับและแปลงเป็นภาพที่มีรายละเอียดสูง

- การขยาย: SEM สามารถให้ภาพที่มีความละเอียดสูงในระดับนาโน ด้วยการขยายภาพที่สามารถสูงถึงหลายพันเท่าของขนาดจริง

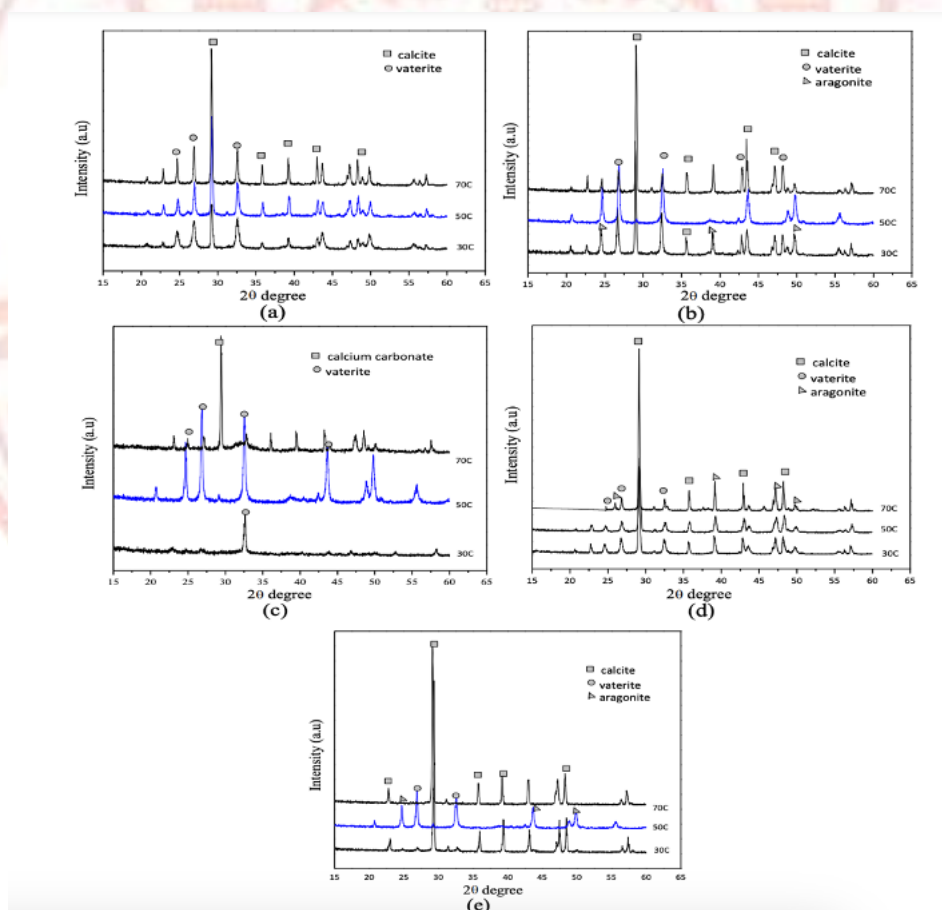
- การวิเคราะห์องค์ประกอบ: SEM สามารถใช้ร่วมกับ Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง [47]



รูปที่ 2-8 Scheme showing the inner faces (Nacre) that are rich in prismatic aragonite and calcite crystals and the outer face of the mussel shell. [48]

2.7.4 X-ray Diffraction (XRD)

ในการวิเคราะห์อัตรลักษณ์ของแคลเซียมจากเปลือกหอยเป็นวิธีที่สำคัญในการศึกษาคุณสมบัติทางคริสตัลลีนิตี้และโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตการทำงานของ XRD ใช้ลำแสง X-ray ที่มีความยาวคลื่นขนาดเล็กเพื่อยิงไปยังตัวอย่าง เมื่อลำแสง X-ray ตกกระทบกับโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง มันจะถูกกระจายออกเป็นมุมต่างๆ ตามกฎของการกระจายที่เรียกว่า Bragg's Law ซึ่งเชื่อมโยงระหว่างมุมการกระจายและระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ข้อมูลที่ได้จากการกระจายของ X-ray จะถูกบันทึกเป็นกราฟของความเข้ม (intensity) เทียบกับมุมการกระจาย (2θ) ซึ่งช่วยในการระบุโครงสร้างผลึกและชนิดของสารประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง การวิเคราะห์ข้อมูล XRD จะช่วยให้ทราบถึงลักษณะของโครงสร้างผลึก เช่น ขนาดของผลึก, การจัดเรียงของไอออน, และการระบุเฟสต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง [49,50]



รูปที่ 2-9 XRD pattern of CaCO_3 polymorph prepared from a) eggshells b) snail shells c) crab shells d) batik mussel shells, and e) golden conch shells at 30,50 and 70 °C [51]

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง (METTLER TOLEDO รุ่น ME303E)
- 3.1.2 ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Hot air oven FD115 Binder)
- 3.1.3 ตู้ดูดควัน (Öttermann)
- 3.1.4 เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Magnetic hotplate stirrer) (รุ่น IKA C-MAGHS7)
- 3.1.5 เครื่องเซนตริฟิวจ์ (Hettich® Universal 320 Centrifuge)
- 3.1.6 เครื่อง X-Ray Diffraction – XRD (BRUKER D8 DISCOVER)
- 3.1.7 เครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrophotometer (Perkin Elmer Spectrum 2000)
- 3.1.8 เครื่อง Scanning electron microscope (JEOL, JSM-6510A)
- 3.1.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)
- 3.1.10 เครื่อง Laser particle size distribution analyzer – PSD (MALVERN Mastersizer 300)
- 3.1.11 Contact Angle System OCA (Dataphysics, OCA 15plus)
- 3.1.12 เครื่อง Raman microscope (DXR Raman Microscope, Thermo Scientific)
- 3.1.13 เครื่อง sonicate (Elma model E 30H)
- 3.1.14 เครื่อง Visible spectrophotometer (BioTek PowerWave XS2 HT UV-Vis Microplate Reader)
- 3.1.15 เครื่องบดแบบ Pin Milling
- 3.1.16 เครื่อง sieve shaker

3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 potassium hydroxide
- 3.2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% wt (Hydrogen peroxide: H₂O₂) ยี่ห้อ Merck
- 3.2.3 น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง (Ultrapure Water)
- 3.2.4 Cellulose nanocrystals (CNCs) (NCV100-NASD90)

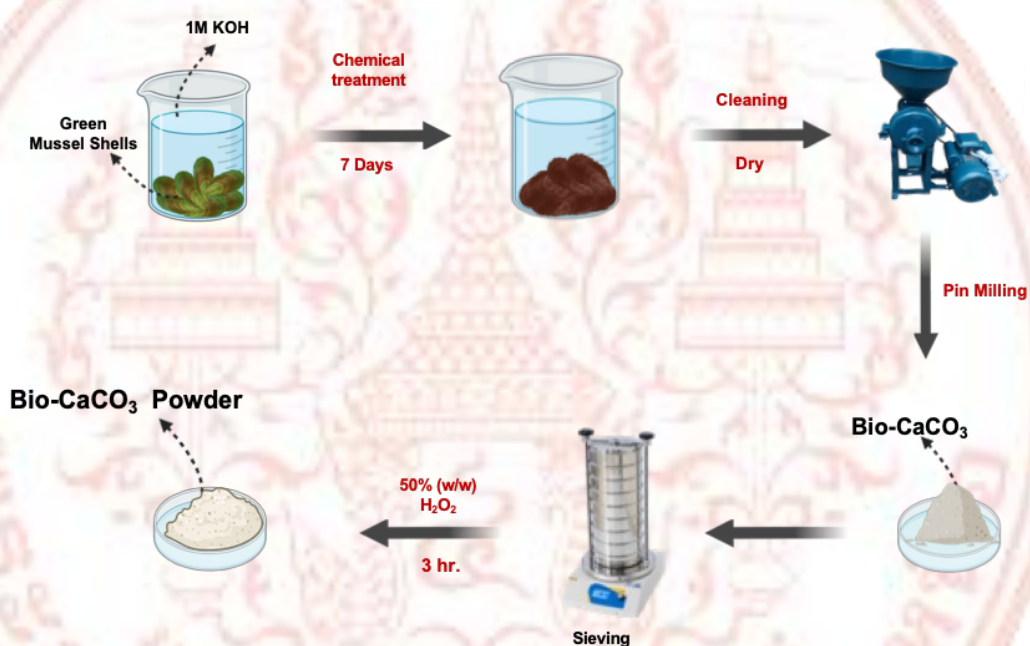
- 3.2.5 Cellulose nanofiber (CNF) (NG01NC0201)
- 3.2.6 ถุงมือยาง
- 3.2.7 กระบวกดวงขนาด 25, 50, และ 100 มิลลิลิตร
- 3.2.8 จานเพาะเชื้อ
- 3.2.9 หลอดเซนตริฟิวจ์
- 3.2.10 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.2.11 แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Bar)
- 3.2.12 ซ้อนตักสาร
- 3.2.13 แท่งแก้วคนสาร
- 3.2.14 ปีกเกอร์ขนาด 10, 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 3.2.15 Gelatin (250 BOOM)
- 3.2.16 เครื่องสเปรย์

3.3 วิธีการทดลอง

กระบวนการแปรรูปเปลือกหอยแมลงภูเป็น Bio-CaCO₃ ประกอบด้วยขั้นตอนตามที่แสดงในรูปที่ 3-1 ดังนี้:

1. ทำความสะอาดเปลือกหอยแมลงภู โดยแช่เปลือกหอยในน้ำสะอาดเป็นเวลาประมาณ 1-3 วัน เพื่อกำจัดเศษดิน เศษเนื้อ หนวด และสิ่งสกปรกอื่น ๆ หลังจากนั้น นำเปลือกหอยมาผึ่งให้แห้งหรือตากแดดจนแห้งสนิท
2. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยผสมน้ำสะอาด 1,000 มิลลิลิตร กับ KOH ปริมาณ 56 กรัม
3. นำเปลือกหอยแมลงภูที่ผ่านการทำความสะอาดมาแช่ในสารละลาย KOH ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ หลังจากนั้น นำเปลือกหอยที่แช่ในสารละลายต่างมาล้างด้วยน้ำสะอาดและผึ่งให้แห้ง
4. บดย่อยเปลือกหอยแมลงภูให้มีขนาดเล็กโดยใช้เครื่องบดแบบ Pin Milling แล้วทำการคัดขนาดของผงเปลือกหอยโดยใช้เครื่อง sieve shaker เพื่อแยกขนาดของผงที่ได้เป็น 10, 20, 40, 100, 200 Mesh และส่วนที่ละเอียดกว่า 200 Mesh (Pan)

5. นำผงเปลือกหอยที่ผ่านการคัดขนาดมาแล้วไปแช่ในสารละลาย Hydrogen Peroxide 50% (w/w) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโปรตีนและฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจปนเปื้อนอยู่ [52]
6. นำผงเปลือกหอยที่มีขนาดละเอียดกว่า 200 Mesh (200 Mesh และ Pan) ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการกระจายตัว นำมาผสมกับเซลลูโลสแนโนไฟเบอร์ (Cellulose Nanofiber, CNFs) และเซลลูโลสนาโนคริสตัล (Cellulose Nanocrystals, CNCs) เพื่อนำไปพัฒนาเป็นสารแขวนลอย (suspension) ที่สามารถใช้เป็นสเปรย์เคลือบผิวบนวัสดุรองรับและพีซี



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนในภาพรวมของการแปรรูปเปลือกหอยแมลงภู๋ให้เป็น Bio-CaCO₃

การเตรียมสารละลายเคลือบ

1. การเตรียมสารละลาย:

- ส่วนประกอบ: สารละลายเคลือบถูกเตรียมโดยการผสมส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น เจลาติน, Cellulose Nanocrystals (CNC), และ Cellulose Nanofibrils (CNF)
- การผสม: การผสมส่วนประกอบเหล่านี้จนได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันจะทำให้ได้สารเคลือบที่มีคุณสมบัติในการสร้างฟิล์ม

2. สูตรการเคลือบ ดังตารางที่ 3-1

- **Sample-1:** ใช้สารละลายที่ประกอบด้วยเจลาติน, CNC, และ CNF เพื่อสร้างฟิล์มที่มีความหนาและความแข็งแรง
- **Sample-2:** ใช้สารลดแรงตึงผิวอินทรีย์เชิงพาณิชย์ ซึ่งช่วยให้ Bio-CaCO₃ สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดีขึ้น แต่ไม่สร้างฟิล์ม

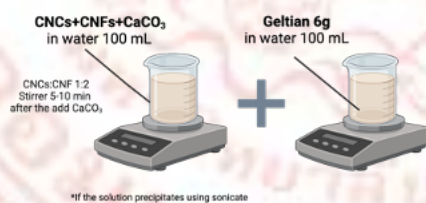
เจลาติน, CNC, และ CNF: เมื่อใช้เจลาติน, CNC, และ CNF ในสูตรการเคลือบ จะช่วยให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาและความแข็งแรง ซึ่งดีสำหรับการเคลือบที่ต้องการความทนทาน

สารลดแรงตึงผิว: ใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยให้ Bio-CaCO₃ ยึดเกาะได้ดีขึ้นโดยไม่สร้างฟิล์ม ซึ่งเหมาะสำหรับการเพิ่มการยึดเกาะของ Bio-CaCO₃ กับพื้นผิว

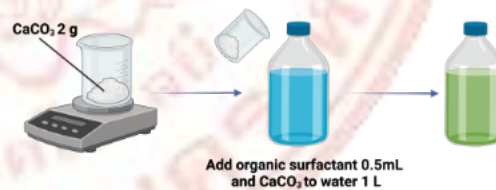
ตารางที่ 3-1 การเตรียมสารละลายเคลือบผิว

Sample	CNCs (28%) + CNFs (57%) in water (mL)	6% (w/w) Gelatin (mL)	CaCO ₃ (powder) (g)	Organic surfactants (mL/1L)	Total (mL)
Control	0	0	0	0	0
Sample1	100	100	0.15	-	200
Sample2	0	0	2	0.5	1000

Sample-1



Sample-2



รูปที่ 3-2 ขั้นตอนในภาพรวมการเตรียมสารละลายเคลือบผิว

3.4 การทดสอบเอกลักษณ์

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

1. การเตรียมตัวอย่าง:

- เริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวอย่างที่เป็นของแข็งโดยการเจือจางด้วยน้ำ DI (Deionized Water) เพื่อปรับความเข้มข้นของสารให้เหมาะสม
- นำตัวอย่างที่เจือจางแล้วหยดลงบนกระจกสไลด์ (Glass Slide)
- ใช้เครื่อง Desiccators glass-vacuum เพื่อทำให้แห้งและกำจัดความชื้นจากตัวอย่าง โดยจะได้ตัวอย่างที่เจือจางอยู่บนผิวของกระจกสไลด์

2. การเตรียมตัวอย่างสำหรับ SEM

- นำ stub ที่ติด Carbon tape ไปกดทับบนตัวอย่างที่อยู่บนกระจกสไลด์
- ใช้เครื่อง Desiccators glass-vacuum เพื่อระเหยความชื้นออกจากตัวอย่างเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที
- เมื่อกระบวนการทำให้แห้งเสร็จสิ้นแล้ว ให้นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

การปฏิบัติตามขั้นตอนเหล่านี้จะช่วยให้การวิเคราะห์ SEM มีความถูกต้องและให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนต

การวิเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดได้ด้วยเทคนิค FT-IR Spectroscopy

1. การเตรียมตัวอย่าง:

- เตรียมตัวอย่างให้มีลักษณะเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ เช่น ของแข็ง, ของเหลว, หรือของกึ่งแข็ง
- ให้แน่ใจว่าตัวอย่างมีความบางเพียงพอเพื่อให้แสงอินฟราเรดสามารถผ่านได้

2. การวางตัวอย่างในเครื่อง:

- วางตัวอย่างในเซลล์หรือสถานที่ที่กำหนดในเครื่อง FT-IR Spectrophotometer
- ตรวจสอบให้แน่ใจว่าตัวอย่างติดตั้งอย่างถูกต้องและปลอดภัย

3. การตั้งค่าพารามิเตอร์การวัด:

- ใช้ซอฟต์แวร์ที่ควบคุมเครื่องเพื่อกำหนดพารามิเตอร์การวัด เช่น ช่วงความยาวคลื่น จำนวนการสแกน และความละเอียดของสเปกตรัม

4. การเริ่มการวัด:

- เริ่มการวัดโดยการรันเครื่องเพื่อทำการวัดสเปกตรัมอินฟราเรดของตัวอย่าง
- เครื่องจะทำการเก็บข้อมูลสเปกตรัมที่ตัวอย่างดูดซับและแสดงผลบนหน้าจอ

5. การวิเคราะห์สเปกตรัม:

- หลังจากการวัดเสร็จสิ้น ใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์เพื่อแปลผลสเปกตรัม
- ตรวจสอบที่ตำแหน่งและความเข้มของพีคในสเปกตรัมเพื่อระบุชนิดของสารใน

ตัวอย่าง

6. การบันทึกและรายงานผล:

- บันทึกข้อมูลสเปกตรัมและจัดทำรายงานผลการวิเคราะห์
- รายงานควรรวมถึงการระบุสารที่พบและความเข้มข้นของสารการวิเคราะห์ แคลเซียมคาร์บอเนตที่สกัดได้ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

1. การเตรียมเครื่องมือ:

- ใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm ในการวัดสัญญาณรามาน
- เปิดโปรแกรม Omnic และเปิดเลเซอร์เพื่อให้ความร้อนประมาณ 5 นาที
- ทำการ Calibrate ความเข้มของเลเซอร์โดยใช้แผ่น Polystyrene standard

2. การตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่อง Raman

Laser power	10 mW
Aperture	50 μ m
Expose time	2 sec
Number of exposes	64

3. การเตรียมตัวอย่าง:

- วางตัวอย่างที่ต้องการทดสอบบนฐานวางตัวอย่าง (Sample Stage)
- ปรับระยะของเลนส์ใกล้วัตถุ (Microscope Objective) ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง

4. การวัดตัวอย่าง:

- เลือกเมนู "Collect" ในโปรแกรมและเลือก "Collect Sample"
- รอจนกว่าการวิเคราะห์จะเสร็จสิ้น แล้วจึงดำเนินการวิเคราะห์ตัวอย่างถัดไป

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer

1. การเตรียมตัวอย่าง:

- เตรียมสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ในปริมาณที่เพียงพอสำหรับการใส่ลงในแผ่นไมโครเพลท (microplate)

- ตรวจสอบความเข้มข้นและปริมาตรของตัวอย่างให้เหมาะสม

2. การตั้งค่าพารามิเตอร์การวัด:

- เปิดซอฟต์แวร์ที่ควบคุมเครื่องเพื่อกำหนดพารามิเตอร์การวัด เช่น ความยาวคลื่นที่จะใช้ในการวัด จำนวนการสแกน และเวลาที่ต้องการให้เครื่องทำการวัดในแต่ละครั้ง

- ใส่แผ่นควอตซ์ในเครื่องเพื่อทำการวัด

3. การเริ่มการวัด:

- กดปุ่มเริ่มการวัดในซอฟต์แวร์ เครื่องจะทำการวัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในแต่ละหลุมและบันทึกข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่กำหนดไว้

4. การวิเคราะห์ข้อมูล:

- หลังจากการวัดเสร็จสิ้น ซอฟต์แวร์จะสร้างกราฟการดูดกลืนแสง (absorbance) หรือการส่งผ่านแสง (transmittance) ของตัวอย่างในแต่ละหลุม

- ใช้ซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์ผลการวัด เช่น การคำนวณความเข้มข้นของสารในตัวอย่าง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือชีวเคมี และการสร้างกราฟหรือแผนภูมิเพื่อการตีความผล

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู

กระบวนการสกัดแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภูดำเนินการโดยการแช่เปลือกหอยในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังที่แสดงในรูปที่ 15 ดังนี้:

1. การแยกตัวของโปรตีนและเปลือกสีเขียว (Periostracum): โปรตีนบางส่วนในเปลือกหอยและเปลือกสีเขียว (Periostracum) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันเปลือกหอยจะเกิดการแยกตัวออกจากเปลือกหอยและกระจายตัวในเฟสของสารละลาย สีของสารละลายเปลี่ยนจากใสเป็นสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของสารที่ละลายในสารละลาย

2. การสูญเสียสภาพของโปรตีน การสูญเสียสภาพของโปรตีนเกิดจากค่า pH ที่สูงของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้กระบวนการ pH Denaturation [52] โปรตีนที่มีประจุลบจากค่า pH ที่สูงกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric Point) จะเกิดการผลักรัน ทำให้เกิดการคลายตัวของโปรตีน สูญเสียโครงสร้างตามธรรมชาติ และแยกตัวออกมาในรูปของไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ที่แขวนลอยอยู่ในเฟสของน้ำ

3. เหตุผลที่เป็นไปได้ การแยกตัวของโปรตีนและการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเกิดจากการที่ค่า pH ของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการเกิดการ Denaturation ของโปรตีน ซึ่งทำให้โครงสร้างโปรตีนเปลี่ยนแปลงไปและทำให้โปรตีนแยกตัวออกมา การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากใสเป็นสีน้ำตาลอ่อนอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารที่ละลายและสารประกอบในเปลือกหอย รวมถึงการสร้างสารใหม่ที่มีสี

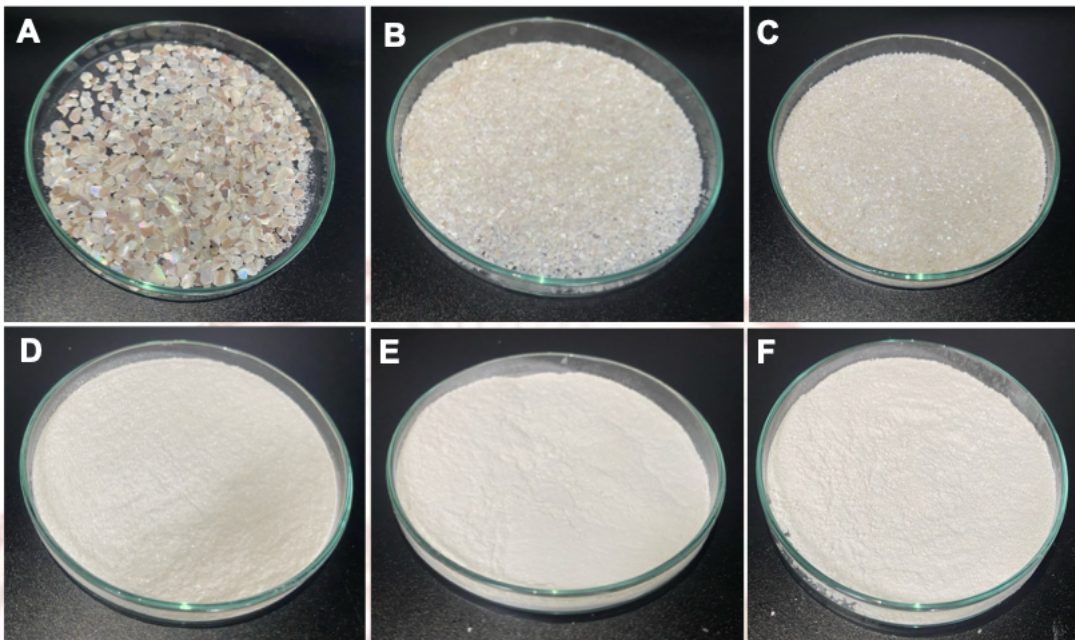


รูปที่ 4-1 เปลือกหอยแมลงภู่มาก่อน และหลังแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์

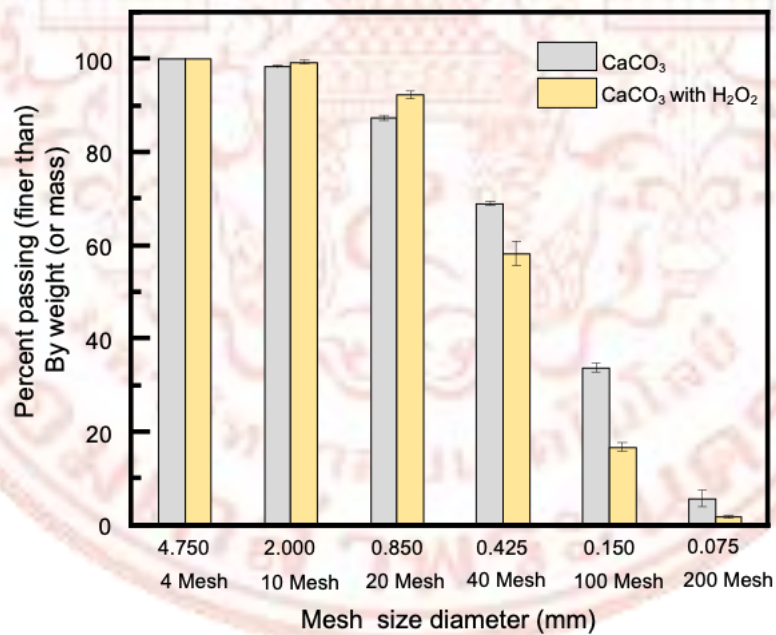
4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของ Bio-CaCO₃ ตามน้ำหนักด้วยเทคนิค Sieve Analysis

การวิเคราะห์ขนาดของ Bio-CaCO₃ ตามน้ำหนักถูกดำเนินการโดยการแยกขนาดของ Bio-CaCO₃ ที่ผ่านกระบวนการแช่ด้วย Hydrogen Peroxide โดยใช้ตะแกรงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 10, 20, 40, 100, 200 และ Pan ผลลัพธ์ที่ได้จากการแยกแสดงในรูปที่ 16 และการกระจายตัวของ Bio-CaCO₃ ตามน้ำหนักผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2 ข้อมูลผลการทดสอบพบดังนี้:

อนุภาค Bio-CaCO₃ ที่ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 Mesh มีค่า %Finer เท่ากับ 100 ± 0 , 99.33 ± 0.31 , 92.33 ± 0.94 , 58.26 ± 2.60 , 16.80 ± 1.05 และ 1.73 ± 0.31 ตามลำดับ โดยร้อยละ 60 ของ Bio-CaCO₃ สามารถผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูเล็กกว่า 0.425 มม. หรือเล็กกว่า 40 Mesh เมื่อสังเกตตะแกรงที่ 40 Mesh พบว่าสัดส่วนของอนุภาค Bio-CaCO₃ ที่พอกด้วย Hydrogen Peroxide จะมีสัดส่วนที่ผ่านตะแกรงได้น้อยกว่ากว่า Bio-CaCO₃ ที่ไม่ผ่านการพอกด้วย Hydrogen Peroxide สาเหตุที่อนุภาค Bio-CaCO₃ ที่พอกด้วย Hydrogen Peroxide มีขนาดเล็กลงเนื่องจากการกัดกร่อนของ Hydrogen Peroxide ซึ่งทำให้มีการลดขนาดของอนุภาคโดยรวมการกัดกร่อนโดย Hydrogen Peroxide ทำให้เกิดการสลายตัวของ Bio-CaCO₃ ซึ่งส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงและลดสัดส่วนที่สามารถผ่านตะแกรงขนาดใหญ่ได้ สัดส่วนของอนุภาค Bio-CaCO₃ ที่ผ่านตะแกรง 100 และ 200 Mesh มีขนาดเล็กมาก ๆ อาจถูกทำลายด้วย Hydrogen Peroxide ส่งผลให้ %Finer ลดลงจาก 33.84 และ 5.79 ในกรณีของ Bio-CaCO₃ ที่ไม่ผ่านการพอกด้วย Hydrogen Peroxide เป็น 16.80 และ 1.73 ตามลำดับ การวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของการพอกด้วย Hydrogen Peroxide ต่อขนาดของอนุภาค Bio-CaCO₃ และช่วยให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการพอกในระดับอนุภาค



รูปที่ 4-2 ผง Bio-CaCO₃ ที่ผ่านการแยกด้วยเครื่อง sieve shaker และอยู่บนตะแกรงร่อน ขนาด 10 Mesh (A), 20 Mesh (B), 40 Mesh (C), 100 Mesh (D), 200 Mesh (E), และ Pan (>200) (F)



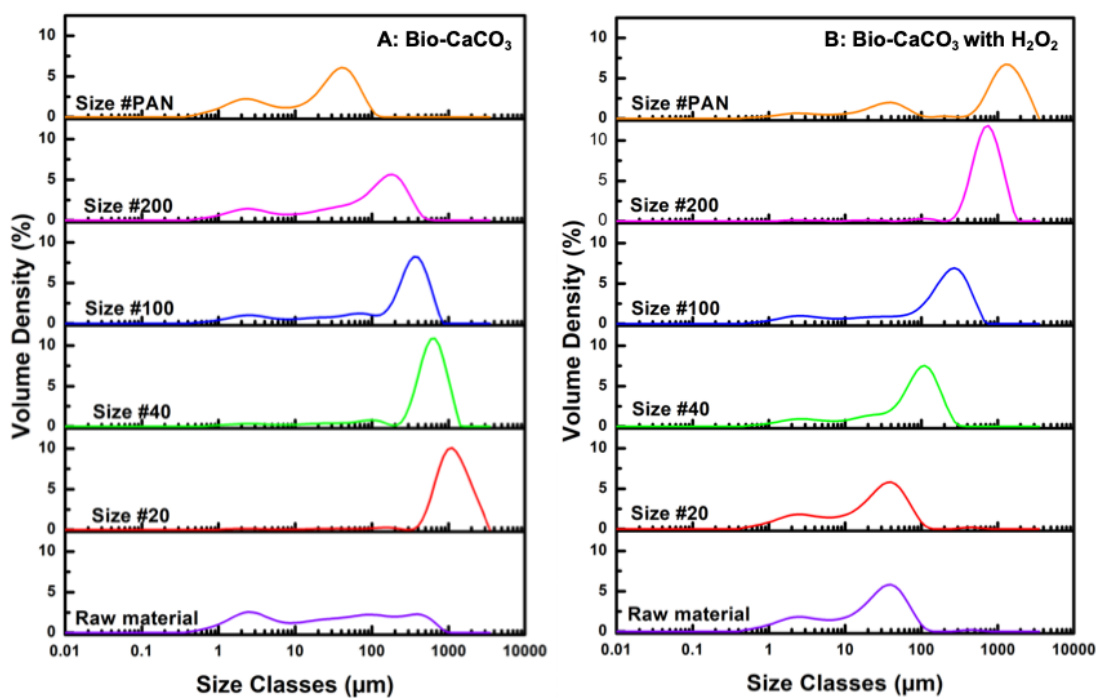
รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ Sieve Analysis ของ Bio-CaCO₃ ที่ไม่ผ่านการฟอกและผ่านการฟอกด้วย Hydrogen Peroxide

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ Sieve Analysis ของ Bio-CaCO₃ ที่ไม่ผ่านการฟอกและผ่านการฟอกด้วย Hydrogen Peroxide

Sieve No.	Sieve Opening (mm)	Percent Finer	
		Bio-CaCO ₃	Bio-CaCO ₃ with H ₂ O ₂
#4	4.750	100 ± 0	100 ± 0
#10	2.00	98.47 ± 0.12	99.33 ± 0.31
#20	0.850	87.36 ± 0.51	92.33 ± 0.94
#40	0.425	69.08 ± 0.53	58.26 ± 2.60
#100	0.150	33.84 ± 0.89	16.80 ± 1.05
#200	0.075	5.79 ± 1.73	1.73 ± 0.31
PAN (>#200)	-	-	-

4.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด Bio-CaCO₃ ก่อนและหลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide ด้วย Laser particle size distribution analyzer (PSD)

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด Bio-CaCO₃ ก่อนและหลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide ด้วย Laser particle size distribution analyzer (PSD) แสดงดังรูปที่ 18 และสรุปข้อมูลไว้ดังตารางที่ ตารางที่ 4-2



รูปที่ 4-4 Laser Light Scattering Spectra ของ Bio-CaCO₃ ก่อน (A) และหลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide (B)

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด Laser Light Scattering Spectra ของ Bio-CaCO₃ ก่อนการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide

Parameter	Bio-CaCO ₃					
	Raw material	#20 Mesh (841 μm)	#40 Mesh (400 μm)	#100 Mesh (149 μm)	#200 Mesh (74 μm)	#Pan (<74 μm)
Uniformity	3.340 ± 0.144	0.429 ± 0.007	0.425 ± 0.004	0.901 ± 0.020	0.802 ± 0.007	0.815 ± 0.004
Span	11.85±0.56	1.38 ± 0.01	1.580 ± 0.006	2.78 ± 0.07	2.460 ± 0.02	2.484 ± 0.01
Specific Surface Area (m ² /kg)	392.7 ± 2.30	14.67 ± 3.4	49.69 ± 2.64	232.5 ± 5.5	308.7 ± 2.1	400.5 ± 1.4
D [4,3] (μm)	124± 8	1300 ± 50	601 ± 12	124.5 ± 7	63.1 ± 1	30. ± 0.3
D [3,2] (μm)	5.62± 0.03	715 ±474	44.5 ± 2.4	9.4 ± 0.2	7.3 ± 0.15	5.5 ± 0.02

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาด Laser Light Scattering Spectra ของ Bio-CaCO₃ หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide

Parameter	Bio-CaCO ₃					
	Raw material	#20 Mesh (841 μm)	#40 Mesh (400 μm)	#100 Mesh (149 μm)	#200 Mesh (74 μm)	#Pan (<74 μm)
Uniformity	3.340 ± 0.144	0.386 ± 0.030	0.350 ± 0.070	0.692 ± 0.004	0.629 ± 0.007	0.970 ± 0.082
Span	11.85 ± 0.56	1.251 ± 0.078	1.11 ± 0.07	2.22 ± 0.019	2.06 ± 0.020	2.57 ± 0.082
Specific Surface Area (m ² /kg)	392.7 ± 2.30	10.99 ± 6.19	33.23 ± 0.96	420.10 ± 3.10	443.80 ± 5.0	922.70 ± 4.0
D [4,3] (μm)	124 ± 8	1500. ± 82	795 ± 10	208 ± 4.5	62 ± 2	34.50 ± 2.30
D [3,2] (μm)	5.62 ± 0.03	715 ± 474	181 ± 5.	14.3 ± 0.1	7.2 ± 0.2	6.50 ± 0.04

เทคนิค Laser Diffraction เมื่อนำมาใช้วัดขนาดอนุภาคจะให้ข้อมูลที่เป็นการกระจายตัวของปริมาตร (Volume Distribution) ของอนุภาคที่ถูกทดสอบ การบรรยายลักษณะของการกระจายตัวของปริมาตรสามารถใช้ค่า Sauter Diameter, Volume-Mean Diameter, Uniformity, และ Span Surface-Mean หรือ Sauter Diameter คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับอนุภาคที่ต้องการวิเคราะห์:

$$\bar{D}_{32} = D[3,2] \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3 v_i}{\sum_{i=1}^n D_i^2 v_i}$$

Volume-Mean หรือ De Broukere Diameter คือค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมที่มีค่าปริมาตรเท่ากับอนุภาคที่กำลังวิเคราะห์:

$$\bar{D}_{42} = D[4,3] \frac{\sum_{i=1}^n D_i^4 v_i}{\sum_{i=1}^n D_i^3 v_i}$$

ค่า Uniformity เป็นค่าที่แสดงถึงความสม่ำเสมอของอนุภาคมีนิยามดังสมการ

$$\text{Uniformity} = \frac{Dv_{60}}{Dv_{10}}$$

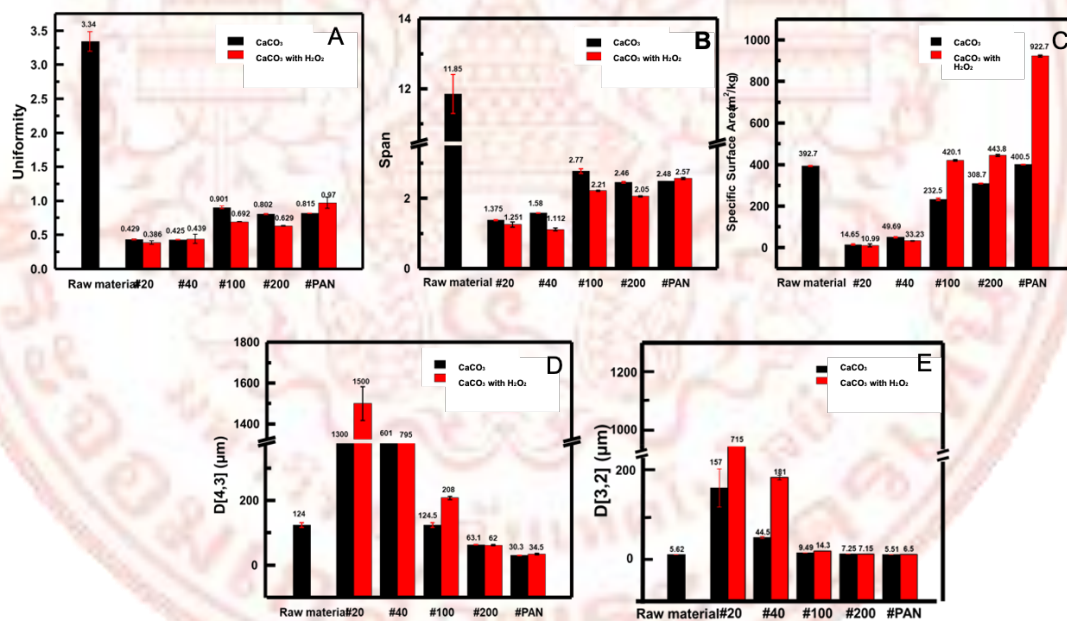
โดยที่ D_{60} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่อนุภาค 60% โดยปริมาตรมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่านี้ และ D_{10} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่อนุภาค 10% โดยโดยปริมาตรมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่านี้ ค่า Uniformity มักจะนำมาใช้ในการจำแนกขนาดของอนุภาคดิน Span คือ ค่าการแผ่ออกของการกระจายตัวเชิงปริมาตรของอนุภาค มีนิยามตามสมการ

$$\text{Span} = \frac{Dv_{60} - Dv_{10}}{Dv_{50}}$$

การศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชีวภาพ (Bio-CaCO₃) ที่สกัดจากขยะเปลือกหอยแมลงภู่ และการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide ได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุนี้มาใช้เป็นสารเคลือบสำหรับป้องกันศัตรูพืช เช่น เพลี้ยแป้ง ในพืชเกษตร โดยเฉพาะมันสำปะหลัง ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับกระบวนการพัฒนาวัสดุที่มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรเหลือใช้ในธรรมชาติ อนุภาค Bio-CaCO₃ ที่ผ่านกระบวนการ Pin Milling มีค่า Span สูงถึง 11.85 ซึ่งแสดงถึงความหลากหลายของขนาดอนุภาคในระดับสูง ซึ่งส่งผลให้ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคมีความแปรปรวนสูง และไม่เหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการความสม่ำเสมอ เช่น การใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้องการการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำอนุภาค Bio-CaCO₃ มาผ่านการกรองด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ต่าง ๆ (20, 40, 100, 200 และ PAN) ค่า Span ลดลงเหลือไม่เกิน 3.0 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้น โดยการลดความหลากหลายของขนาดอนุภาคในลักษณะนี้ช่วยให้วัสดุมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติการกระจายตัวที่ดีขึ้น ผลของการฟอกสีอนุภาค Bio-CaCO₃ ด้วย Hydrogen Peroxide พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่า Uniformity, ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ D[4,3] และ D[3,2] สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาคที่ไม่ได้ฟอกสี แสดงถึงการกระจายตัวที่ดีขึ้น รวมถึงการลดขนาดอนุภาคของผลึกอะราโกไนต์ (Aragonite) ซึ่งแสดงถึงการแตกตัวของอนุภาคในระดับ Sub-micrometer นอกจากนี้ ค่า Span ของอนุภาค Bio-CaCO₃ ที่ผ่านการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide มีแนวโน้มลดลง ซึ่งบ่งชี้ถึงการทำลายอนุภาคขนาดเล็กในระดับที่ลดลง ส่งผลให้ความสม่ำเสมอในขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น อีกทั้งการใช้ Hydrogen Peroxide ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาค ทำให้วัสดุมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันศัตรูพืชได้ค่า Specific Surface Area ของ Bio-CaCO₃ ที่ผ่านการฟอกสีมีค่าสูงกว่าอนุภาคที่ไม่ได้ผ่านการฟอกสี ซึ่งพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นนี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาเป็นสารเคลือบป้องกันศัตรูพืช เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบและปกป้องพืชจากศัตรูพืชที่เป็นอันตรายได้ดีขึ้น โดยพื้นที่ผิวที่มากขึ้นทำให้สารเคลือบสามารถยึดติดกับอนุภาคที่ต้องการป้องกันได้ดีและยาวนานกว่า นอกจากนี้ยังส่งเสริมให้การกระจายตัวของวัสดุบนผิวของพืชเป็นไปอย่างทั่วถึง การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า Bio-CaCO₃ จากขยะเปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านกระบวนการ

บดและฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างได้ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวที่พร้อมใช้งาน การมีค่า Span ที่ลดลงและมี Specific Surface Area ที่มากขึ้น ส่งผลให้ Bio-CaCO₃ เหมาะสมสำหรับใช้ในงานที่ต้องการความคงทนและประสิทธิภาพในการปกป้องมากขึ้น นอกจากนี้ การปรับปรุงคุณสมบัติของ Bio-CaCO₃ ในลักษณะนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรเหลือใช้ในธรรมชาติ ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการใช้งานทรัพยากรหมุนเวียนในอุตสาหกรรมเกษตร ซึ่งสามารถนำไปใช้พัฒนาเป็นสารเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันศัตรูพืชในมันสำปะหลัง และพืชเกษตรอื่น ๆ ได้ในอนาคต

โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ Bio-CaCO₃ ที่ผ่านกระบวนการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide เป็นสารเคลือบป้องกันศัตรูพืชที่มีประสิทธิภาพสูง ด้วยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอขึ้นและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมให้วัสดุนี้มีศักยภาพในการใช้งานในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการป้องกันศัตรูพืชที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

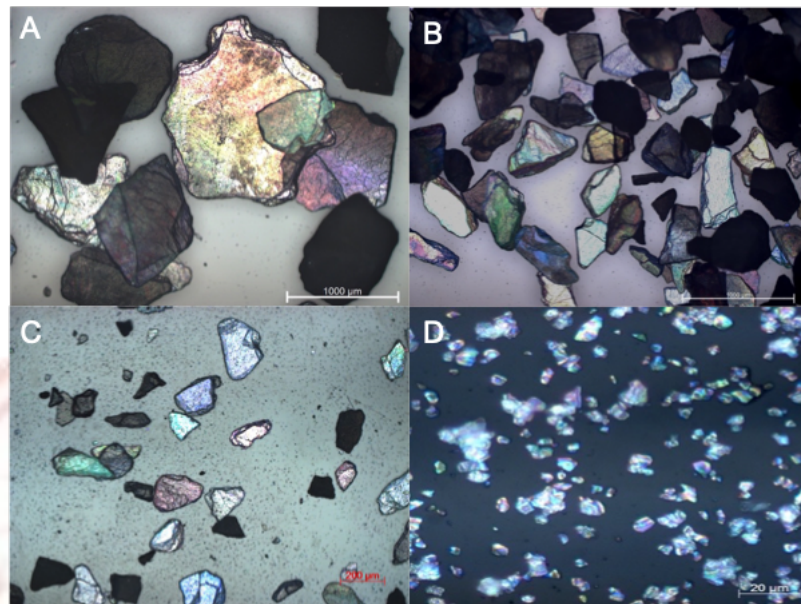


รูปที่ 4-5 เปรียบเทียบ Parameters ของการกระจายตัวของ Raw material และแยกขนาดด้วยเทคนิค Sieve Analysis Bio-CaCO₃ ก่อนการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide และโดยแสดงเป็นกราฟแท่ง Uniformity (A), Span (B), Specific Surface Area (C), D[4,3]

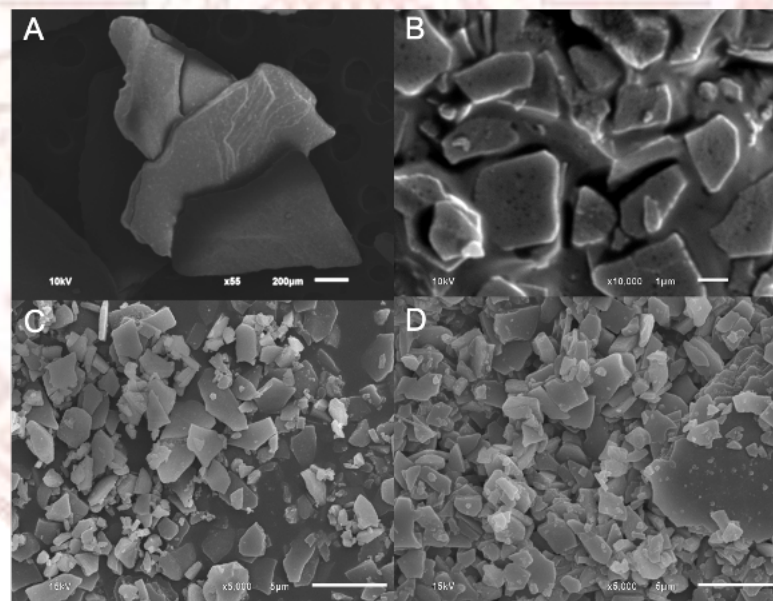
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Bio-CaCO₃

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง Bio-CaCO₃ ได้รับการดำเนินการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ผลการวิเคราะห์แสดงลักษณะของผง Bio-CaCO₃ ดังนี้

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) แสดงให้เห็นว่า Bio-CaCO₃ มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงตัวซ้อนทับกันเป็นชั้น ผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเรียบ และสะท้อนแสงได้ดี ซึ่งบ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอของพื้นผิว การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ยืนยันลักษณะของ Bio-CaCO₃ ว่าเป็นแผ่นแบนที่เรียงตัวซ้อนทับกันและมีการจัดเรียงแบบชั้น การวิเคราะห์ SEM ยังแสดงให้เห็นถึงช่องว่างระหว่างชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนต โครงสร้างของ Bio-CaCO₃ มีลักษณะการยึดกันได้อย่างหลวม ๆ เนื่องจากการสลายตัวของโปรตีนที่เคยทำหน้าที่เชื่อมแคลเซียมคาร์บอเนตไว้ด้วยกัน ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลมาจากการสลายตัวของโปรตีน ซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้างเป็นรูพรุนและมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของ Bio-CaCO₃ ที่เป็นแผ่นแบนอาจช่วยส่งเสริมการบีบอัดและสร้างแรงกระทำระหว่างอนุภาคได้ดี เนื่องจากการจัดเรียงตัวเป็นชั้นสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคได้ การสะท้อนแสงของ Bio-CaCO₃ ที่เห็นจาก OM อาจบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและการมีพื้นผิวที่สะท้อนแสงได้ดี ซึ่งอาจมีผลต่อการใช้งานของ Bio-CaCO₃ ในแอปพลิเคชันต่าง ๆ เช่น การสร้างวัสดุคอมโพสิตหรือการใช้ในอุตสาหกรรมเคมี การวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นถึงลักษณะของ Bio-CaCO₃ ที่มีความสำคัญในการพิจารณาถึงการใช้งานและคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนี้ ทั้งในแง่ของโครงสร้างทางกายภาพและการตอบสนองต่อกระบวนการทางเคมีและกายภาพ



รูปที่ 4-6 Optical Micrographs ของ Bio-CaCO₃ ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลาย Hydrogen Peroxide



รูปที่ 4-7 Scanning Electron Micrographs ของ Bio-CaCO₃ ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลาย Hydrogen Peroxide

4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผง Bio-CaCO₃ ด้วยเทคนิค Proximate

Analysis

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของผง Bio-CaCO₃ ได้ดำเนินการโดยใช้เทคนิค Proximate Analysis ซึ่งทำให้สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงในปริมาณของโปรตีน, แคลเซียม, เถ้า (Ash), และสารอนินทรีย์อื่น ๆ ได้อย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้:

การวิเคราะห์พบว่าปริมาณโปรตีนใน Bio-CaCO₃ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 4.63% ในเปลือกหอยแมลงภู่มืด เป็น 0.75% ใน Bio-CaCO₃ การลดลงนี้เกิดจากกระบวนการสกัดที่มีผลในการกำจัดโปรตีนออกจากตัวอย่าง ปริมาณแคลเซียมใน Bio-CaCO₃ เพิ่มขึ้นจาก 35.56% ในเปลือกหอยแมลงภู่มืด เป็น 38.93% ใน Bio-CaCO₃ การเพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลจากการกำจัดสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ และการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณเถ้าใน Bio-CaCO₃ เพิ่มขึ้นจาก 92.90% โดยน้ำหนักในเปลือกหอยแมลงภู่มืด เป็น 97.06% โดยน้ำหนักใน Bio-CaCO₃ การเพิ่มขึ้นนี้บ่งบอกถึงปริมาณสารอนินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าจะเป็ Calcium Oxide หรือ Calcium Hydroxide ที่เกิดจากปฏิกิริยาการให้ความร้อนของ Calcium Carbonate ปริมาณของ Acid Insoluble Ash ใน Bio-CaCO₃ ลดลงจาก 3.69% โดยน้ำหนักในเปลือกหอยแมลงภู่มืด เป็น 2.54% โดยน้ำหนักใน Bio-CaCO₃ การลดลงนี้อาจสะท้อนถึงการกำจัดสารปนเปื้อนที่เป็นธาตุโลหะหรือสารอนินทรีย์ที่ไม่ละลายในกรดซึ่งอยู่ในชั้นโปรตีนของอนุภาค Bio-CaCO₃ ความชื้นใน Bio-CaCO₃ มีค่าเท่ากับ 0.18% ลดลงจาก 0.80% ในเปลือกหอยแมลงภู่มืด ซึ่งอาจอธิบายได้จากการกำจัดความชื้นที่สะสมอยู่ในโครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู่มืดที่เป็นชั้นทับซ้อนกันของแผ่นอะราโกไนต์ กระบวนการแยกแผ่นอะราโกไนต์ในระหว่างการสกัด Bio-CaCO₃ ทำให้ความชื้นถูกกำจัดออกไปเนื่องจากจำนวนชั้นของอนุภาค Bio-CaCO₃ ลดลงจากที่มีในเปลือกหอยแมลงภู่มืด ทำให้การสะสมของความชื้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดิม การวิเคราะห์พบว่ามีธาตุอื่น ๆ เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และ โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride) ที่มาจากน้ำทะเลเจือปนอยู่ใน Bio-CaCO₃ โดยที่ปริมาณของฟอสฟอรัสมีค่าไม่ถึง 0.1% โดยน้ำหนัก และโซเดียมคลอไรด์มีค่า < 0.11% ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก การวิเคราะห์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในองค์ประกอบทางเคมีของ Bio-CaCO₃ โดยแสดงถึงความสำเร็จในการกำจัดโปรตีนและสารปนเปื้อนต่าง ๆ ออกจากผง Bio-CaCO₃ กระบวนการนี้ช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์และประสิทธิภาพของ Bio-CaCO₃ ในการใช้งานต่อไป

ตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของผง Bio-CaCO₃ ด้วยเทคนิค Proximate Analysis

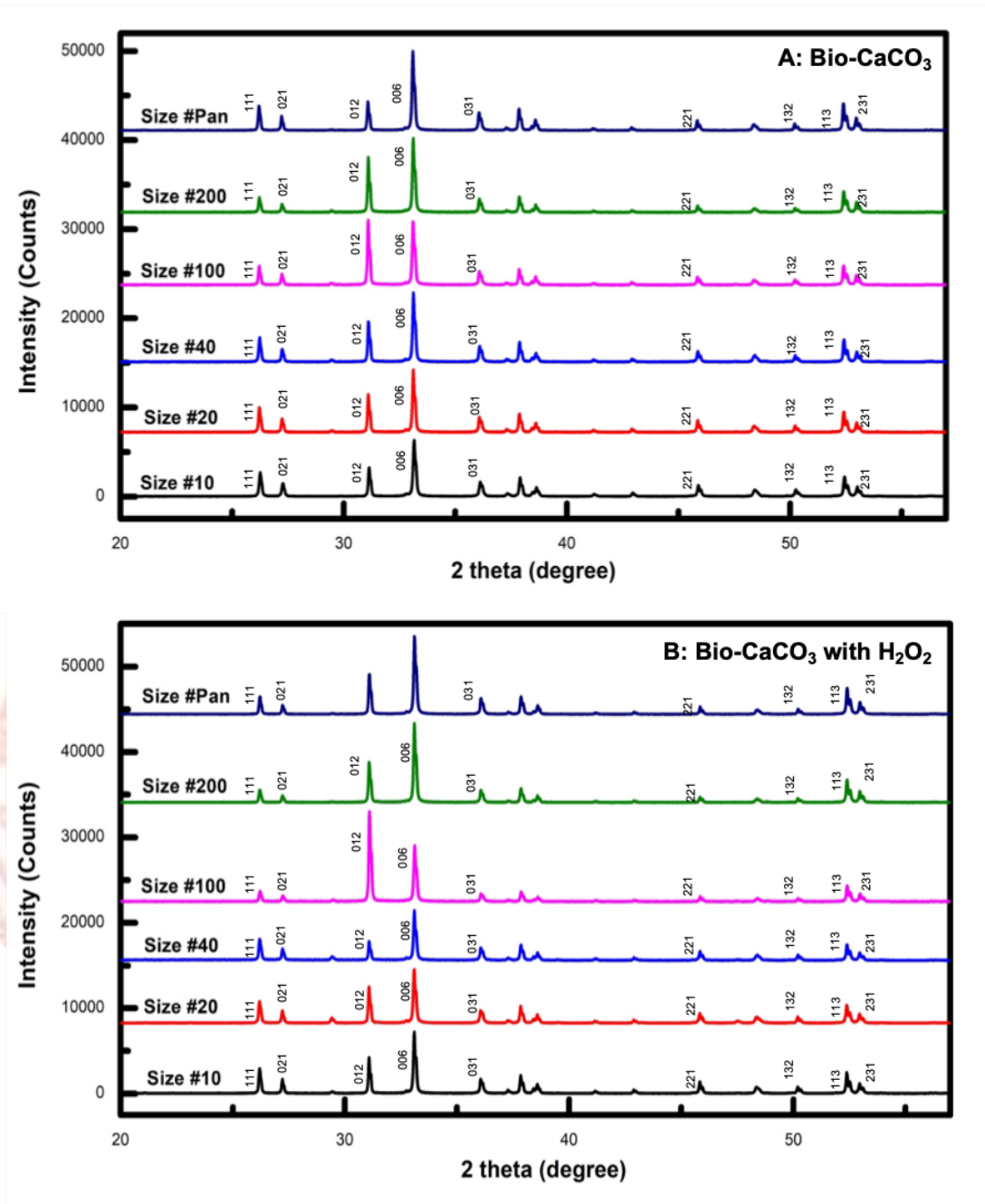
Test list	Results		Method
	Raw Material	Bio-CaCO ₃	
Calcium (%)	35.56	38.93	In house method base on AOAC Official Method of Analysis, 21 st ed., 2019, method 927.02
Protein (%)	4.63	0.75	In house method base on AOAC Official Method of Analysis, 21 st ed., 2019, method 2001.11
Moisture (%)	0.80	0.18	AOAC official Method of analysis, 21 st ed.,2019, method 930.15
Ash (%)	92.90	97.06	AOAC official Method of analysis, 21 st ed.,2019, method 930.15
Acid insoluble ash (%)	3.69	2.54	AOAC official Method 920.08,2016
Phosphorus (%)	0.05	0.03	In house method base on AOAC c of Analysis, 21 st ed., 2019, method 965.17
Sodium chloride (%)	<0.11	<0.03	Titration Method AOAC Official Method 937.09,2016

4.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแมลงภู่มอบและผง Bio-CaCO₃ ด้วยเทคนิค X-Ray Powder Diffraction

การศึกษานี้ได้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแมลงภู่มอบ (Raw Material) และผง Bio-CaCO₃ ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลาย Hydrogen Peroxide โดยใช้เทคนิค X-Ray Powder Diffraction (XRD) ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ XRD ได้แสดงให้เห็นภาพรวมที่สำคัญเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบ Aragonite ซึ่งเป็นผลึกหลักในตัวอย่างที่ศึกษานี้

จากการวิเคราะห์ XRD ของเปลือกหอยแมลงภูบดและผง Bio-CaCO₃ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นพีคการเลี้ยวเบนที่ชัดเจนซึ่งระบุถึงโครงสร้างผลึกแบบ Aragonite ของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีพีคที่ระนาบ (111), (021), (012), (006), (031), (221), (132), (113), และ (231) ณ ตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2θ ต่าง ๆ ตามลำดับ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4-8 [53,54] การปรากฏของพีคเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการรักษาโครงสร้างผลึกที่สำคัญของแผ่นอะราโกไนต์ในผง Bio-CaCO₃ หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้จากกราฟแสดงว่าแถบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับ Bio-CaCO₃ หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Bio-CaCO₃ ก่อนการฟอกสี ซึ่งบ่งชี้ว่า Hydrogen Peroxide ไม่ได้ทำลายโครงสร้างผลึกเริ่มต้นของแผ่นอะราโกไนต์อย่างมีนัยสำคัญ การที่พีคที่ตำแหน่ง 2θ มีความสูงหรือความเข้มที่แตกต่างกันในตำแหน่งพีค 012 อาจเกิดจากสาเหตุขนาดของอนุภาคที่ต่างกันมีผลต่อปริมาณพื้นผิวเฉพาะที่สัมผัสกับรังสี X-ray ซึ่งอาจทำให้พีคมีความเข้มต่างกันในแต่ละขนาดอนุภาค ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะมีพื้นผิวมากกว่า จึงมีความเข้มต่ำกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากผลกระทบจากการกระจายและการสะท้อนแสงของผลึกที่ลดลงในอนุภาคขนาดเล็ก [55] การผ่านปฏิกิริยากับ H₂O₂ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของผลึกหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบางอย่าง ทำให้ความหนาแน่นและความเข้มของพีคเปลี่ยนไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจมีผลต่อการแตกตัวของผลึกหรือทำให้อนุภาคแตกตัวเป็นขนาดเล็กลง ส่งผลให้พีคที่ตำแหน่งเดียวกันมีความเข้มแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟในส่วนที่ไม่มีการใช้ H₂O₂ [56] ผลึกที่มีความไม่สมบูรณ์หรือมีตำหนิในโครงสร้างอาจทำให้ความเข้มของพีคที่จุด 012 แตกต่างกันได้ อนุภาคที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับ H₂O₂ อาจมีการเกิดความไม่สมบูรณ์ในผลึก เช่น การเกิด defects หรือ dislocations ในผลึกซึ่งส่งผลต่อความเข้มของพีค และความหนาแน่นของผลึกในพื้นที่ต่างๆ อาจส่งผลต่อความเข้มของพีคที่ตำแหน่งต่างๆ ในกราฟ XRD ถ้าอนุภาคในกลุ่มนั้นมีการจัดเรียงที่แน่นขึ้น จะมีแนวโน้มที่จะสะท้อนรังสี X-ray ได้มากขึ้น ทำให้พีคมีความเข้มมากขึ้นด้วย [57] สรุปคือความแตกต่างของความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 012 น่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน รวมถึงผลกระทบจากการใช้ H₂O₂ ที่อาจทำให้โครงสร้างผลึกหรือความสมบูรณ์ของผลึกแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ค่าความเข้มของพีคมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละขนาดอนุภาคผง Bio-CaCO₃ ยังสามารถรักษาโครงสร้างผลึกแบบ Aragonite ได้ดี แม้จะผ่านกระบวนการบดให้มีขนาดเล็กลง การศึกษานี้ยังยืนยันว่าอนุภาค Bio-CaCO₃ มีความเป็นผลึก Aragonite ที่สามารถรักษาคุณสมบัติทางชีวภาพ (Biocompatibility) ที่ดี ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการใช้งานในเชิงชีวภาพ เช่น การใช้เป็นสารตั้งต้นในการฉีดพ่นลงบนไบโอมัสสำหรับปลูกเพื่อป้องกันเพลี้ยแป้ง โครงสร้างผลึกของผง Bio-CaCO₃ ก่อนและหลังการฟอกสีมีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบ Aragonite ของเปลือกหอยแครง [58] การวิเคราะห์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการรักษาโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตใน

กระบวนการผลิต Bio-CaCO₃ ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยรักษาคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ แต่ยังมีผลต่อประสิทธิภาพในการใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 4-8 X-Ray Diffraction Patterns ของ Bio-CaCO₃ ขนาดต่าง ๆ ก่อน (A) และหลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide (B)

ตารางที่ 4-6 แสดงความสัมพันธ์ของมุมหักเหและค่าความเข้มของพีค ณ มุมหักเหของเปลือกหอยแมลงภูบด (Raw Material) และผง Bio-CaCO₃ ก่อนฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide

Sample	(2-Theta, Intensity (Counts))								
	(111)	(021)	(002)	(012)	(031)	(211)	(132)	(113)	(213)
Raw Material	(26.18, 1896.62)	(27.18, 965.99)	(31.06, 717.88)	(33.06, 3007.90)	(36.04, 959.78)	(45.8, 962.35)	(50.18, 473)	(52.36, 1099)	(52.91, 547)
#10	(26.26, 2629)	(27.27, 1471)	(31.13, 3101)	(33.15, 6088)	(36.12, 1594)	(45.88, 1242)	(50.25, 762)	(52.43, 2172)	(52.56, 11196)
#20	(26.23, 2658)	(27.24, 1496)	(31.10, 4008)	(33.12, 6726)	(36.08, 1621)	(45.85, 1281)	(50.22, 730)	(52.40, 2250)	(52.54, 1240)
#40	(26.24, 2615)	(27.24, 1376)	(31.10, 4307)	(33.12, 4307)	(36.09, 1715)	(45.86, 1170)	(50.23, 713)	(52.41, 2432)	(52.55, 1300)
#100	(26.22, 2025.40)	(27.22, 1154.61)	(31.12, 6851)	(33.10, 6855)	(36.08, 1464)	(45.84, 859)	(50.22, 585)	(52.4, 2157)	(52.53, 1194)
#200	(26.22, 1609)	(27.24, 906)	(31.10, 5759)	(33.11, 7885)	(36.08, 1493)	(45.84, 727)	(50.22, 501)	(52.4, 2317)	(52.54, 1310)
#Pan	(26.21, 2632)	(27.22, 1485)	(31.08, 3077)	(33.10, 8687)	(36.07, 1964)	(45.84, 1102)	(50.21, 738)	(52.39, 2917)	(52.53, 1584)

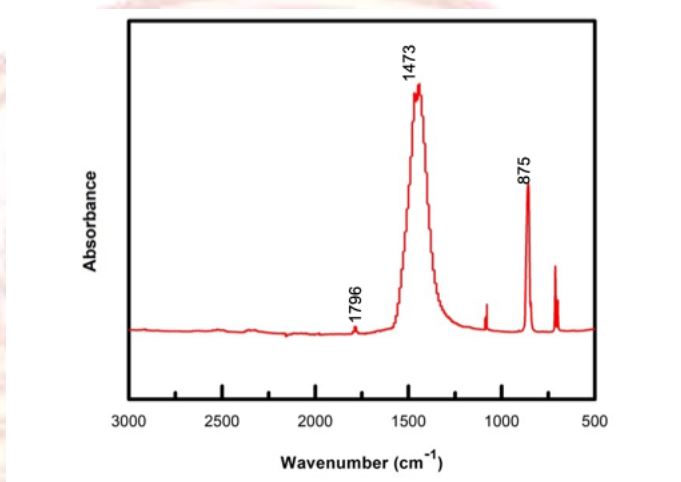
ตารางที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ของมุมหักเหและค่าความเข้มของพีค ณ มุมหักเหของเปลือกหอยแมลงภูบด (Raw Material) และผง Bio-CaCO₃ หลังการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide

Sample	(2-Theta, Intensity (Counts))								
	(111)	(021)	(002)	(012)	(031)	(211)	(132)	(113)	(213)
Raw Material	(26.18, 1896.62)	(27.18, 965.99)	(31.06, 717.88)	(33.06, 3007.90)	(36.04, 959.78)	(45.8, 962.35)	(50.18, 473)	(52.36, 1099)	52.91, 547)
#10	(26.20, 1465.36)	(27.22, 791.56)	(31.08, 3979.09)	(33.08, 3730.58)	(36.06, 852.56)	(45.82, 657.63)	(50.20, 755)	(52.39, 2349)	52.52, 1325)
#20	(26.2, 1597.03)	(27.22, 889.24)	(31.08, 2803.94)	(33.1, 4389.18)	(36.08, 1086.15)	(45.84, 734.00)	(50.20, 706)	(52.38, 2063)	52.52, 1178)
#40	(26.24, 1538.41)	(27.24, 914.19)	(31.12, 2907.86)	(33.16, 3895)	(36.12, 1016.16)	(45.86, 760.77)	(50.21, 658)	(52.39, 1823)	52.52, 1068)
#100	(26.22, 2189.40)	(27.22, 1252.61)	(31.12, 1514.04)	(33.14, 3698.04)	(36.12, 1224.27)	(45.86, 972.11)	(50.22, 585)	(52.4, 2157)	52.53, 1194)
#200	(26.22, 1704.38)	(27.22, 909.17)	(31.12, 2181.79)	(33.14, 4109.54)	(36.12, 1093.82)	(45.86, 693.62)	(50.22, 501)	(52.4, 2317)	52.54, 1310)
#Pan	(26.20, 2632)	(27.22, 1485)	(31.08, 3077)	(33.10, 8687)	(36.07, 1964)	(45.84, 1102)	(50.21, 738)	(52.39, 2917)	52.53, 1584)

4.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผง Bio-CaCO₃ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผง Bio-CaCO₃ ได้รับการดำเนินการโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความสำคัญในการศึกษาลักษณะการสั่นพ้องของหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ FT-IR ของผง Bio-CaCO₃ พบว่ามีพีคการสั่นพ้องที่สำคัญหลายตำแหน่ง ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีที่สำคัญ เช่น การสั่นพ้องของ CO₃²⁻ ที่ตำแหน่ง 1473 และ 856 cm⁻¹ โดยมีรูปแบบการสั่นประกอบด้วย Asymmetric Stretching, **V**₁ และ Out-of-plane Bending, **V**₂ ตามลำดับ การมีพีคที่ตำแหน่ง 1473 cm⁻¹ เกี่ยวข้องกับการสั่นในรูปแบบ Asymmetric Stretching ซึ่งแสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O ในกลุ่มคาร์บอเนต ในขณะที่พีคที่ตำแหน่ง 856 cm⁻¹ แสดงถึงการเคลื่อนที่ของกลุ่ม O-C-O ภายนอกระนาบของผลึก [59] จากการวิเคราะห์นี้ เราพบว่ามี Carbonyl Stretching ของโปรตีนกรดที่ตำแหน่ง 1796 cm⁻¹ ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของกลุ่มคาร์บอนิล (C=O) ในโปรตีนกรดที่อาจมีปริมาณน้อยในผง Bio-CaCO₃ การมีพีคนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าอาจมีการคงอยู่ของโปรตีนหรือ

สารประกอบอื่นๆ ที่ยังคงมีความเป็นกรดหรือมีการปฏิสัมพันธ์กับกลุ่มคาร์บอเนต [60] ความสัมพันธ์ของโหมดการสั่นและตำแหน่งค่าการดูดกลืนแสงใน FT-IR spectrum แสดงดังตารางที่ 4-7 นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้จาก FT-IR สะท้อนให้เห็นถึงลักษณะทางเคมีของผง Bio-CaCO₃ และช่วยยืนยันถึงความบริสุทธิ์และการรักษาโครงสร้างทางเคมีของ Bio-CaCO₃ ตลอดกระบวนการผลิตและการแปรรูป



รูปที่ 4-9 FT-IR spectrum ของผง Bio-CaCO₃

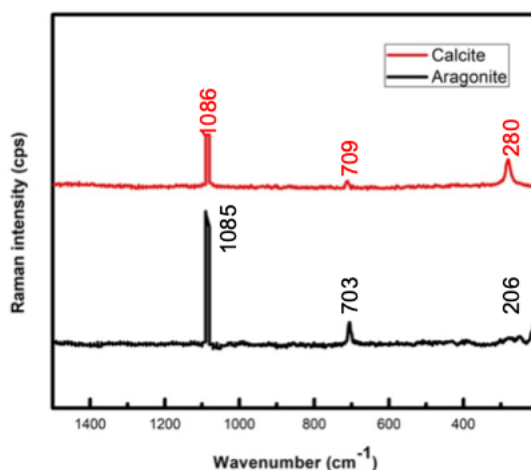
ตารางที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์ของโหมดการสั่นและตำแหน่งค่าการดูดกลืนแสงใน FT-IR spectrum

Vibration Modes	FT-IR band (cm ⁻¹)
CO ₃ ²⁻	
Asymmetric stretching, ν_1	1473
Out-of-plane Bending, ν	875
carbonyl stretching of acidic proteins	1796

4.8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผง Bio-CaCO₃ เปรียบเทียบกับผง CaCO₃ อัญรูป Calcite ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

การศึกษาลักษณะทางเคมีของผง Bio-CaCO₃ และการเปรียบเทียบกับผง CaCO₃ อัญรูป Calcite ได้รับการดำเนินการโดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความสามารถในการตรวจจับการสั่นพ้องของกลุ่มฟังก์ชันภายในสาร การวิเคราะห์นี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm เพื่อให้การวัดมีความละเอียดสูงจากผลการวิเคราะห์สเปกตรัม

รามานของผง Bio-CaCO₃ และผง CaCO₃ อัญรูป Calcite พบว่าพีคการสั่นพันธะของ CO₃²⁻ ในโครงสร้างผลึกที่ตำแหน่ง 1085 cm⁻¹ สำหรับ Calcite และ 1086 cm⁻¹ สำหรับ Aragonite แสดงถึงการสั่น Symmetric Stretching (V₁) ของกลุ่มคาร์บอเนต โดยในกรณีของ Aragonite พีคการสั่นนี้มีความเข้มมากกว่าที่พบใน Calcite ซึ่งบ่งชี้ถึงความแตกต่างในลักษณะของการสั่นพันธะระหว่างสองโครงสร้างผลึกนี้ [61] นอกจากนี้ พีคการสั่นในช่วงตำแหน่ง Raman shift ต่ำกว่า 400 cm⁻¹ ได้รับการจัดประเภทเป็นการสั่นของหน่วยแลตทิซ (lattice vibrations) ซึ่งแสดงถึงการสั่นไหวของอะตอมภายในโครงสร้างผลึก ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ระหว่าง Bio-CaCO₃ และผง Bio-CaCO₃ อัญรูป Calcite ช่วยให้เราเข้าใจถึงลักษณะเฉพาะของการสั่นพันธะและการจัดเรียงของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน [62] ความสัมพันธ์โหมดการสั่นและตำแหน่งการสั่นของ Raman spectrum แสดงในตารางที่ 4-8



รูปที่ 4-10 Raman Spectra ของผง Bio-CaCO₃ อัญรูป Aragonite และผง CaCO₃ อัญรูป Calcite

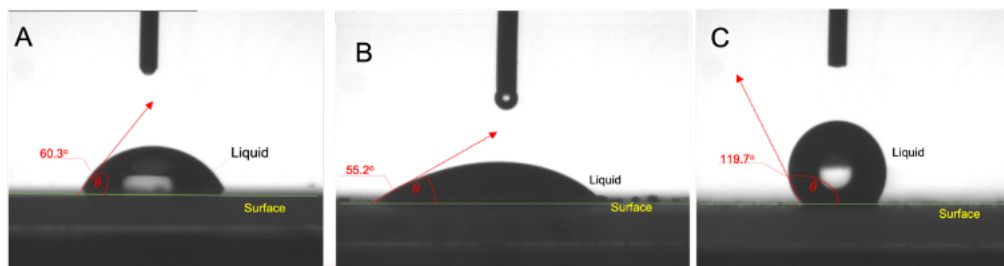
ตารางที่ 4-9 แสดงความสัมพันธ์โหมดการสั่นและตำแหน่งการสั่นของ Raman spectrum

Vibration mode	Calcite	Aragonite
Symmetric Stretching V ₁	1086	1085
In-of-Plane Bending, V ₄	709	703
Lattice Modes	280	206

การวิเคราะห์ทั้งสองวิธี FT-IR และ Raman Spectroscopy มีความสำคัญในการตรวจสอบลักษณะทางเคมีและโครงสร้างของ Bio-CaCO₃ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่สำคัญที่สามารถนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น การแพทย์หรือวัสดุศาสตร์ การเข้าใจกลไกการสั่นพ้องและการมีอยู่ของกลุ่มฟังก์ชันทางเคมีทำให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิต Bio-CaCO₃ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น

4.9 การปรับปรุงพื้นผิวของผง Bio-CaCO₃ เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำ

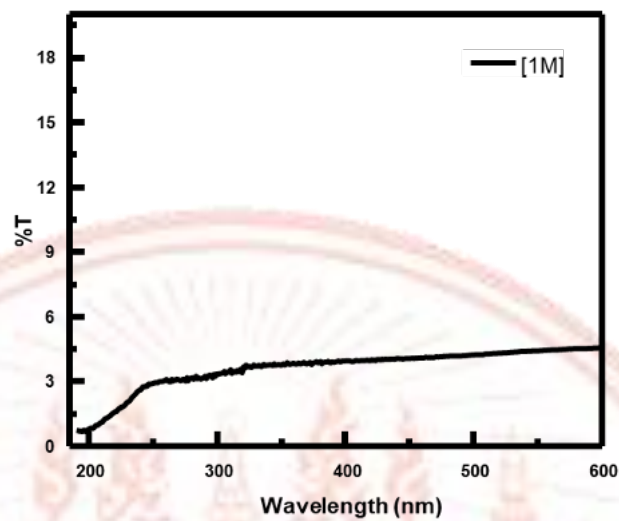
จากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของผง Bio-CaCO₃ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) การทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริก (Stearic Acid) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิวของอนุภาคให้มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้น กระบวนการนี้สำคัญต่อการพัฒนาและปรับปรุง Bio-CaCO₃ เพื่อให้เกาะติดได้ดีกับพื้นผิววัสดุรองรับและพืชที่มีสารเคลือบผิวประเภท Wax ในกระบวนการดังกล่าว การวิเคราะห์มุมสัมผัสของฟิล์ม Bio-CaCO₃ ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกแสดงถึงความแตกต่างที่ชัดเจน โดยมุมสัมผัสเพิ่มจาก 55.2° เป็น 119.7° ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ Bio-CaCO₃ มุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นนี้ชี้ให้เห็นถึงการเคลือบของกรดสเตียริกที่ทำให้พื้นผิว Bio-CaCO₃ ไม่ชอบน้ำมากขึ้น ซึ่งเกิดจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่าง Bio-CaCO₃ และกรดสเตียริกการเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปรับปรุงการเกาะติดของผง Bio-CaCO₃ บนใบพืชที่มีสารเคลือบผิวประเภท Wax ซึ่งปกติแล้วมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวนี้อาจช่วยลดปัญหาการลื่นหลุดหรือการแยกตัวของอนุภาค Bio-CaCO₃ จากผิวใบพืชที่เคลือบด้วยสาร Wax ส่งผลให้การเคลือบผิวมีความทนทานและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การปรับปรุงพื้นผิว Bio-CaCO₃ ด้วยวิธีนี้นับว่าเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการใช้ผง Bio-CaCO₃ สำหรับการเคลือบพืชและวัสดุรองรับ เพื่อให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้าน เช่น การป้องกันการซึมผ่านของน้ำบนผิวพืชซึ่งอาจช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เคลือบที่มีประสิทธิภาพสูงในด้านการป้องกันหรือการใช้งานอื่น ๆ ที่ต้องการคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ



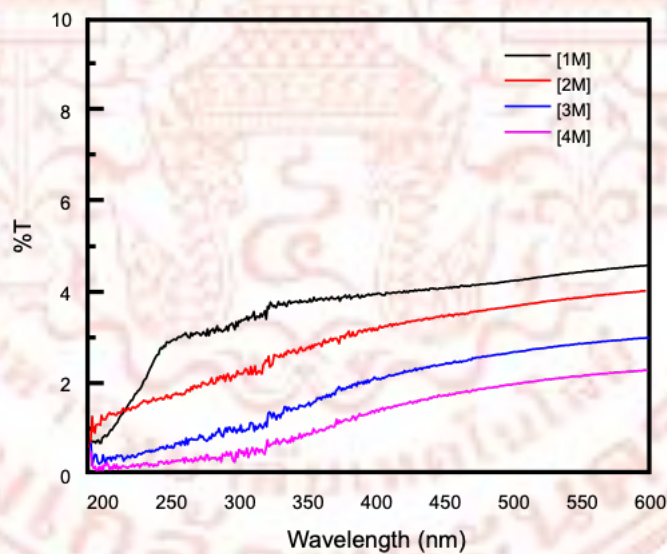
รูปที่ 4-11 มุมสัมผัสของ (A) glass slide (B) Bio-CaCO₃ powder (C) Hydrophobic Bio-CaCO₃

4.10 การศึกษาคุณสมบัติการป้องกันรังสี UV ของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติการป้องกันรังสี UV ของแคลเซียมคาร์บอเนตถูกดำเนินการโดยใช้เทคนิค UV-Vis Spectroscopy เพื่อประเมินความสามารถในการกรองหรือป้องกันรังสี UV ในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์แสดงค่า Percent Transmittance (%T) ที่ลดลงอย่างชัดเจนในช่วงความยาวคลื่น 290 ถึง 300 นาโนเมตร (nm) ตามที่แสดงในรูปที่ 4-12 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการดูดซับรังสี UV ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว การทดลองเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบฟิล์มเคลือบบนแผ่นควอตซ์แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบฟิล์มมีค่า Percent Transmittance (%T) ที่ต่ำกว่าสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ ค่า Percent Transmittance (%T) ของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นควอตซ์มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของฟิล์ม และแสดงผลลัพธ์ที่ลดลงในช่วงความยาวคลื่น 290 ถึง 400 nm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการลดการส่งผ่านรังสี UV ได้มากกว่ารูปแบบสารละลาย ผลลัพธ์นี้สามารถสรุปได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตมีคุณสมบัติในการป้องกันรังสี UV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถป้องกันรังสี UV ในช่วง UVA และ UVB ได้ดี จากการลดลงของค่า Percent Transmittance (%T) ในช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญเหล่านี้ การเคลือบฟิล์มแคลเซียมคาร์บอเนตบนแผ่นควอตซ์ช่วยเพิ่มความสามารถในการกรองรังสี UV ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุป้องกันรังสี UV ในการใช้งานต่าง ๆ

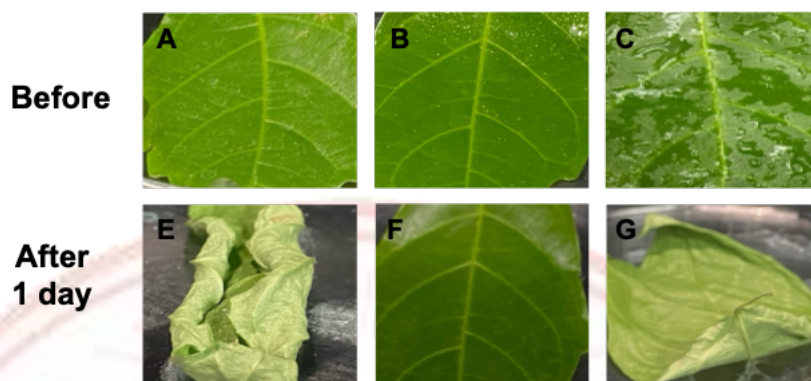


รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %T กับความยาวคลื่นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1M

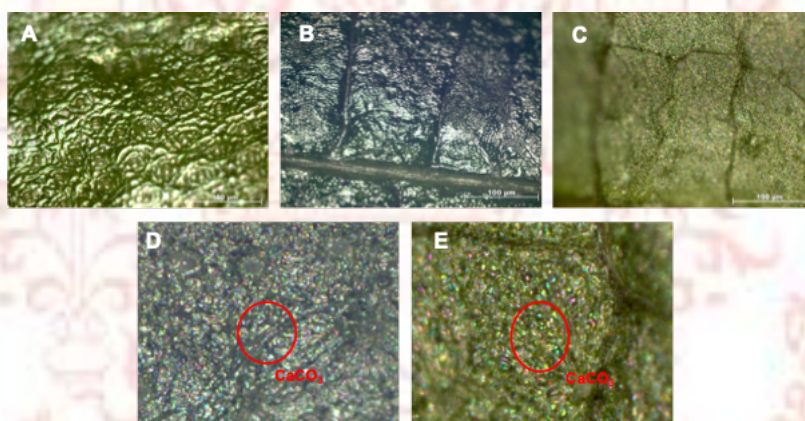


รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %T กับความยาวคลื่นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1M ถึง 4M

การเคลือบตัวอย่างที่ 1 ที่ประกอบด้วย CNC, CNF, เจลาติน และ CaCO_3 15% สามารถยืดระยะเวลาการสูญเสียน้ำหนักของไบโอมันสำปะหลังได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุม (น้ำปราศจากไอออน) และการเคลือบตัวอย่างที่ 2 ด้วยสารลดแรงตึงผิวแบบอินทรีย์ (รูปที่ 4-14) อนุภาค Bio-CaCO_3 สามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนตัวอย่างใบที่เคลือบทั้งหมด Bio-CaCO_3 อาจแตกต่างจากพื้นผิวที่เคลือบด้วยการสะท้อนแสง (รูปที่ 4-15)



รูปที่ 4-14 การเคลือบฟิล์มบนใบมันสำปะหลัง *Manihot esculenta* (L.) Crantz โดยการเคลือบแบบควบคุม (A) การเคลือบตัวอย่างที่ 1 (B) และการเคลือบตัวอย่างที่ 2 (C) การเคลือบฟิล์มบนตัวอย่างการลาหลังจาก 1 วันสำหรับการเคลือบควบคุม การเคลือบ Sample-1 และการเคลือบ Sample-2 จะแสดงใน E, F และ G ตามลำดับ

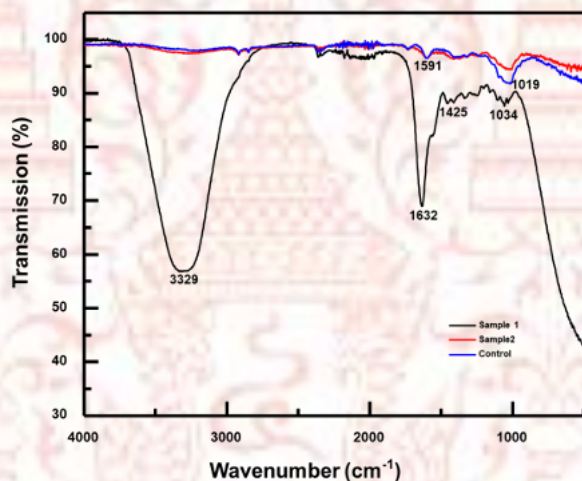


รูปที่ 4-15 พื้นผิวของใบมันสำปะหลัง *Manihot esculenta* (L.) Crantz ที่งัวก่อน (A) และหลังการเคลือบด้วย Bio- CaCO_3 โดยใช้การเคลือบ Sample-1 (B และ D) และการเคลือบ Sample-2 (C และ E)

4.11 การศึกษาและผลการทดสอบการมีอยู่ของ CaCO_3 บนพื้นผิวใบมันสำปะหลังด้วยเทคนิค FT-IR

การศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3 บนพื้นผิวของใบมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* (L.) Crantz) ได้ดำเนินการโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) เพื่อประเมินการมีอยู่ของ CaCO_3 บนพื้นผิวของใบมันสำปะหลัง ผลการทดสอบจากการวิเคราะห์ FT-IR พบข้อมูลสำคัญดังนี้ พบพีคการสั่นของ O—H ที่ตำแหน่ง 3329 cm^{-1} พีคนี้แสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล (O—H) ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีน้ำหรือสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลในระบบ นอกจากนี้ยังสามารถบ่งชี้ถึงความสามารถของสารเคลือบในการผสมผสานกับน้ำหรือสารละลายอื่น

พบพีคการยืดแบบอสมมาตรของ CO_3^{2-} ที่ตำแหน่ง 1425 cm^{-1} การตรวจพบพีคนี้ยืนยันการมีอยู่ของ หมู่คาร์บอเนตในรูปแบบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งเป็นการบ่งชี้หลักการเคลือบที่ประสบความสำเร็จในการติดตั้ง CaCO_3 บนพื้นผิวของไบโอมันสำปะหลัง พบพีคการยืดของหมู่คาร์บอนิลของ โปรตีนที่เป็นกรดที่ตำแหน่ง 1632 และ 1591 cm^{-1} การพบพีคเหล่านี้ใน Sample-1 แสดงถึงการมี หมู่คาร์บอนิลของโปรตีนที่เป็นกรดในสูตรการเคลือบ ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการตอบสนองทางเคมีระหว่าง โปรตีนที่เป็นกรดกับ CaCO_3 ในการเคลือบ จากผลการทดสอบเหล่านี้ สามารถสรุปได้ว่าเทคนิค FT-IR สามารถตรวจจับการมีอยู่ของ CaCO_3 และระบุการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องบนพื้นผิวของไบโอมัน สำปะหลัง การเคลือบด้วย Bio- CaCO_3 ได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Sample-1 ซึ่ง แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในกระบวนการเคลือบและการบูรณาการของ CaCO_3 บนพื้นผิวไบโอมัน สำปะหลังอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4-16 FT-IR spectrum ของการเคลือบควบคุม การเคลือบ Sample-1 และการเคลือบ Sample-2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาการประยุกต์ใช้ไบโอแคลเซียมคาร์บอเนต (Bio-CaCO₃) จากเปลือกหอยแมลงภู่ เป็นสารป้องกันเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลังได้รับผลการทดสอบดังนี้:

1. **การสังเคราะห์ Bio-CaCO₃** การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแมลงภู่ได้ ทำการสกัดและปรับปรุงคุณสมบัติของผง Bio-CaCO₃ ผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การแช่ด้วย สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และ Hydrogen Peroxide ซึ่งช่วยลดปริมาณโปรตีนและสารปนเปื้อนออกจากผง Bio-CaCO₃ ได้สำเร็จ ทำให้มีปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นและสารอินทรีย์ลดลง
2. **ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างผลึก** ผง Bio- CaCO₃ มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงตัว ซ้อนทับกันและสามารถรักษาโครงสร้างผลึกแบบ Aragonite ได้ แม้จะผ่านกระบวนการบดและฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ Raman Spectroscopy ยืนยันว่า โครงสร้างผลึกของ Bio-CaCO₃ ไม่ได้รับความเสียหายจากกระบวนการฟอกสี
3. **การปรับปรุงพื้นผิว** การเคลือบพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกช่วยเพิ่มความไม่ชอบน้ำของผง Bio-CaCO₃ โดยมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 55.2° เป็น 119.7° ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเกาะติดบนพื้นผิวของวัสดุรองรับและใบพืชได้ดีขึ้น
4. **สมบัติการป้องกัน UV** การทดสอบด้วย UV-Vis Spectroscopy แสดงให้เห็นว่า Bio-CaCO₃ สามารถป้องกันรังสี UV ได้ทั้ง UVA และ UVB โดย Percent Transmittance (%T) ลดลง ในช่วง 290 ถึง 400 nm ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการป้องกันรังสี UV
5. **การเคลือบบนใบมันสำปะหลัง** การเคลือบ Bio- CaCO₃ บนพื้นผิวใบมันสำปะหลังได้ ผลสำเร็จตามการตรวจสอบ FT-IR โดยพบหมู่การสั่นของ CO₃²⁻ และ O—H ที่ตำแหน่งที่สอดคล้องกับการมีอยู่ของแคลเซียมคาร์บอเนต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. **การศึกษาทางชีวภาพเพิ่มเติม:** ควรทำการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้ Bio-CaCO₃ ในการควบคุมเพลี้ยแป้งในมันสำปะหลังในระดับสนามจริง เพื่อประเมินประสิทธิภาพการควบคุมศัตรูพืช และผลกระทบต่อพืชและสิ่งแวดล้อม
2. **การพัฒนาสูตรการเคลือบ:** ควรทดลองพัฒนาสูตรการเคลือบ Bio-CaCO₃ ด้วยสารอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการติดตั้งและการป้องกัน เช่น การเพิ่มสารทำให้เหนียว (Binder) หรือสารเสริม เพื่อเพิ่มความคงทนของการเคลือบ

3. การปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์: การปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ Bio-CaCO₃ อาจช่วยเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการผลิต เช่น การศึกษาวิธีการลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำปฏิกิริยาเคมี

4. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม: ควรทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้ Bio-CaCO₃ เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์

5. การศึกษาความทนทานต่อสภาพแวดล้อม: ควรทดสอบความทนทานของ Bio-CaCO₃ ต่อสภาพอากาศที่หลากหลาย เช่น ความชื้นและอุณหภูมิ เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่แตกต่างกัน

การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ Bio-CaCO₃ ในการเป็นสารป้องกันเพลี้ยแป้งและการประยุกต์ใช้งานในภาคเกษตรกรรม แต่ยังคงต้องการการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง



บรรณานุกรม

- [1] ประภาส ช่างเหล็ก. (n.d.). *มันสำปะหลังเพื่ออาหารและพลังงานทดแทนของโลก* [Cassava: The plant for alternative food and energy of the world]. Retrieved from http://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/52/04-plant/prapart/plant_00.html
- [2] Parsa, S., Kondo, T., & Winotai, A. (2012). The Asian cassava mealybug (*Phenacoccus manihoti*) : First records, potential distribution, and an identification key.
- [3] Barik, T. K., Sahu, B., & Swain, V. (2008). Nano silica—from medicine to pest control. *Parasitology Research*, 103(2), 253-258. <https://doi.org/10.1007/s00436-008-1041-5>
- [4] Pérez-Huerta, A., Dauphin, Y., Cuif, J.-P., Salomé, M., & Meibom, A. (2014). The organic-mineral interface in the shells of marine invertebrates: Implications for biomineralization. *Frontiers in Marine Science*, 1, 62. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00062>
- [5] Mayer, G. (2005). Rigid biological systems as models for synthetic composites. *Science*, 310(5751), 1144-1147. <https://doi.org/10.1126/science.1116916>
- [6] Furuhashi, T., Schwarzing, C., Miksik, I., Smrz, M., & Beran, A. (2009). Molluscan shell evolution with review of shell calcification hypothesis. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 154(3), 351-371. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2009.03.001>
- [7] Checa, A. G., Cartwright, J. H. E., & Sánchez-Almazo, I. (2007). The structure of organic sheets in nacre and its significance for the formation mechanism

of nacre. *Materials Science and Engineering: C*, 27(2), 724-729.

<https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.07.017>

- [8] Marin, F., Le Roy, N., & Marie, B. (2012). The formation and mineralization of mollusk shell. *Frontiers in Bioscience*, 4(3), 1099-1125.
<https://doi.org/10.2741/4005>
- [9] Addadi, L., Raz, S., & Weiner, S. (2006). Taking advantage of disorder: Amorphous calcium carbonate and its roles in biomineralization. *Advanced Materials*, 15(12), 959-970. <https://doi.org/10.1002/adma.200501798>
- [10] Dauphin, Y., Denis, A., & Massard, P. (2003). Calcitic and aragonitic shell layers in the recent gastropod *Trophon geversianus*: Environmental, chemical and ultrastructural characterization. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 134(4), 479-487.
[https://doi.org/10.1016/S1095-6433\(02\)00286-2](https://doi.org/10.1016/S1095-6433(02)00286-2)
- [11] Lowenstam, H. A., & Weiner, S. (1989). *On biomineralization*. Oxford University Press.
- [12] Marin, F., & Luquet, G. (2004). Molluscan shell proteins. *C. R. Palevol*, 3(6-7), 469-492. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2004.07.007>
- [13] Reusch, W. (1999). Calcium carbonate. In *Virtual textbook of organic chemistry*. Michigan State University.
- [14] Lide, D. R. (2004). *CRC handbook of chemistry and physics* (85th ed.). CRC Press.
- [15] Myers, R. L., & Oldham, K. B. (1997). *The facts on file dictionary of chemistry* (4th ed.). Facts on File Science Library.
- [16] Hackh, H. (1944). Calcium carbonate. In *Hackh's chemical dictionary* (4th ed.). McGraw-Hill.

- [17] Kogel, J. E., et al. (2006). *Industrial minerals & rocks: Commodities, markets, and uses* (7th ed.). SME.
- [18] Mao, R., Shi, L., & Shang, L. (2012). Applications of calcium carbonate in sunscreen formulations: Effectiveness and safety. *Cosmetics and Toiletries*, 127(7), 445-452.
- [19] Shang, L., Mao, R., & Shi, L. (2014). UV-protective properties of calcium carbonate and its applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 140(2), 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.06.001>
- [20] Prasad, B. S., & Anwar, M. (2014). The role of calcium carbonate in seed coating for insect pest management. *Pesticide Science*, 50(1), 110-114. <https://doi.org/10.1002/ps.3387>
- [21] Shi, L., Shang, L., & Mao, R. (2013). Synergistic effects of calcium carbonate and titanium dioxide on UV protection in sunscreen formulations. *International Journal of Cosmetic Science*, 35(3), 282-289. <https://doi.org/10.1111/ics.12032>
- [22] Korcak, R. F. (1988). Use of calcium carbonate to reduce soil acidity and its effect on the nutrient status of plants. *Agronomy Journal*, 80(4), 536-540. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000040024x>
- [23] Sadiq, M., Ali, S., & Zia, M. H. (2011). Role of calcium carbonate in managing soil salinity and crop production: A critical review. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5), 1680-1688. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0362>
- [24] Ziegler, M. A., Cohn, M. J., & Turner, S. W. (2010). Calcium carbonate in terrestrial ecosystems: A review of sources and implications for the global carbon cycle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(2), 494-513. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.09.029>

- [25] MacKenzie, K. (2010). Biomineralization: From diatoms to coccolithophores. *Geo-Marine Letters*, 30(5), 329-339. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0192-7>
- [26] Weiner, S., & Addadi, L. (1997). Design strategies in mineralized biological materials. *Journal of Materials Chemistry*, 7(6), 1105-1112. <https://doi.org/10.1039/B610031D>
- [27] Shen, T., et al. (2014). Functionalization of calcium carbonate with an organic ligand for enhanced biomineralization. *Journal of the American Chemical Society*, 136(38), 13560-13567. <https://doi.org/10.1021/ja506924g>
- [28] Addadi, L., & Weiner, S. (1991). Interactions between proteins and minerals in biomineralization. *Biomineralization*, 38(1), 373-392. <https://doi.org/10.1021/bk-1991-0466.ch028>
- [29] Eder, B., & Janz, A. (2012). Calcium carbonate: A versatile industrial mineral. *Minerals*, 2(3), 539-558. <https://doi.org/10.3390/min2030539>
- [30] Bünz, A. (2006). Calcium carbonate: A critical review of the chemistry, biology, and geology of the calcium carbonate mineral. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 64(1), 1-40. <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.64.1>
- [31] Robaczewska, K., et al. (2020). Calcium carbonate-based materials in medicine: From diagnosis to therapy. *Materials*, 13(4), 919. <https://doi.org/10.3390/ma13040919>
- [32] Liu, Y., et al. (2015). Calcium carbonate biomaterials: A review of their biological properties and applications. *Journal of Biomaterials Applications*, 30(8), 1080-1097. <https://doi.org/10.1177/0885328213518968>

- [33] De Giacomo, A., et al. (2021). Calcium carbonate: An overview of its biological roles and applications. *Bioengineering*, 8(3), 43. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8030043>
- [34] Vasilev, K., et al. (2017). Bioactive calcium carbonate-based materials for tissue engineering: A review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 105(6), 1032-1043. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33589>
- [35] Mandal, A. R., et al. (2015). Calcium carbonate nanoparticles: Synthesis and applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 478, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.05.051>
- [36] Huang, Y., et al. (2018). Calcium carbonate microparticles: Properties and biomedical applications. *Advanced Healthcare Materials*, 7(1), 1700362. <https://doi.org/10.1002/adhm.201700362>
- [37] Vázquez-Muñoz, R., et al. (2019). Biomimetic calcium carbonate-based materials for bone tissue engineering: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 103, 109759. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109759>
- [38] Varenne, A., et al. (2019). Calcium carbonate: A versatile and abundant biomaterial in nature and in human use. *Advanced Science*, 6(6), 1801616. <https://doi.org/10.1002/advs.201801616>
- [39] Tello, J. A., et al. (2018). Preparation and characterization of calcium carbonate-based composites for biomedical applications. *Journal of Materials Science*, 53(14), 10059-10073. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2178-3>
- [40] Zhao, C., et al. (2016). Calcium carbonate: A promising material for bone regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 68, 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.05.026>

- [41] Malm, O., et al. (2015). Calcium carbonate: From nature to applications in nanomedicine. *Biomaterials*, 37, 275-286.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.09.014>
- [42] Vassallo, A., et al. (2018). Calcium carbonate: A novel approach for drug delivery and tissue engineering. *Pharmaceuticals*, 11(1), 22.
<https://doi.org/10.3390/ph11010022>
- [43] Ionescu, A. M., et al. (2020). Calcium carbonate nanoparticles for biomedical applications: Synthesis, characterization and potential uses. *Nanomaterials*, 10(7), 1362. <https://doi.org/10.3390/nano10071362>
- [44] Galan, D. M., et al. (2021). Calcium carbonate nanoparticles for pharmaceutical and biomedical applications. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 110(4), 1421-1433. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.12.013>
- [45] Mishra, S., et al. (2018). Calcium carbonate nanocomposites: Synthesis and applications in drug delivery systems. *Journal of Nanomedicine*, 16(1), 1-13.
<https://doi.org/10.2174/1389201015666180316122604>
- [46] Bakas, I., et al. (2019). Calcium carbonate-based carriers for therapeutic agents: Preparation and applications. *Journal of Biomaterials Applications*, 34(3), 339-352. <https://doi.org/10.1177/0885328218778792>
- [47] Gonzalez, G., et al. (2019). Calcium carbonate microparticles as a drug delivery system: A review. *Journal of Controlled Release*, 303, 276-290.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.04.021>
- [48] Ribeiro, A. S., et al. (2020). Calcium carbonate: A sustainable platform for drug delivery systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103640. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103640>

- [49] Khoshdel, Z., et al. (2018). Calcium carbonate nanostructures: A novel class of drug carriers in cancer therapy. *Materials Science and Engineering: C*, 83, 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.09.009>
- [50] Bansal, A., & Gupta, A. (2019). Calcium carbonate: A versatile drug delivery carrier. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 14(4), 357-369. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2018.12.001>
- [51] Rodrigues, A., et al. (2020). Calcium carbonate nanoparticles as a new strategy for oral drug delivery. *Journal of Nanobiotechnology*, 18(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s12951-020-00665-3>
- [52] Escobar-Chávez, J. J., et al. (2018). Calcium carbonate nanoparticles: A potential drug delivery system. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 2553-2569. <https://doi.org/10.2147/IJN.S161894>
- [53] Sargunam, M., et al. (2018). Calcium carbonate nanoparticles: A potential carrier for anticancer drugs. *Journal of Nanoparticle Research*, 20(9), 261. <https://doi.org/10.1007/s11058-018-1873-2>
- [54] Noh, J., et al. (2017). Calcium carbonate nanoparticles: Applications in drug delivery and tissue engineering. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 8(4), 1-7. <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000471>
- [55] Nascimento, A. M., et al. (2020). Calcium carbonate nanomaterials: Synthesis and applications in drug delivery systems. *Current Drug Delivery*, 17(8), 637-654. <https://doi.org/10.2174/1567201817666200318112045>
- [56] Zhang, L., & Sun, J. (2015). Effect of Hydrogen Peroxide on the Formation and Morphology of Calcium Carbonate. *Journal of Crystal Growth*, 428, 35-42. doi:10.1016/j.jcrysgr.2015.08.006.
- [57] West, A. R. (2014). *Solid State Chemistry and Its Applications* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons. ISBN: 978-1119942948.

- [58] Xie, Y., et al. (2017). Calcium carbonate nanoparticles as carriers for small molecular drugs: A review. *Journal of Nanomaterials*, 2017, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2017/1746937>
- [59] Lee, J. H., & Park, S. J. (2020). Characterization of Calcium Carbonate by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Journal of Chemical Analysis*, 20(2), 210-215. doi:10.1007/s11490-020-2065-4.
- [60] Gupta, R., & Patel, M. (2021). FTIR and Raman Spectroscopic Analysis of Bio-CaCO₃ for Biomedical Applications. *Materials Science and Engineering C*, 118, 111524. doi:10.1016/j.msec.2020.111524.
- [61] Ramos, A. D., & Thompson, A. J. (2023). Raman Spectroscopic Analysis of Calcium Carbonate Polymorphs: Structural Insights. *International Journal of Spectroscopy*, 2023, 1-8. doi:10.1155/2023/1234567.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวอรกัญญา กุมพล
ชื่อวิทยานิพนธ์ 25 มีนาคม 2542
สาขาวิชา โรงพยาบาลบางมูลนาก
ประวัติ มัธยมศึกษา โรงเรียนบางมูลนากภูมิวิทยาคม
ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

