



## รายงานการวิจัย

การเตรียมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงเพื่อใช้เป็นสารตัว  
เติมในยางธรรมชาติ

Preparation of Nano Calcium Carbonate from Cockle Shells as  
filler in Natural Rubber

เอกวิทย์ เพียรอรุรักษ์  
ชุตินา แกมกิจ

Ekkawit Pianhanuruk  
Chutima Kamkit

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2561

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครง ด้วยกระบวนการตกตะกอน และการเผาด้วยอุณหภูมิสูง พบว่า การเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครง ด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยความเข้มข้นตัวแปรที่ใช้ในการตกตะกอนที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนต 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ 20 ชั่วโมง และการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงโดยการเผาด้วยอุณหภูมิสูง พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 5 ชั่วโมง โดยกระบวนการตกตะกอนจะให้สมบัติทางฟิสิกส์ ดีที่สุดตามด้วย แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า และผงเปลือกหอย ตามลำดับ

คำสำคัญ : นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เปลือกหอยแครง ยางธรรมชาติ



## กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้ สามารถบรรลุผลสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนทุนการวิจัยนี้ จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดงานวิจัย และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช ที่สนับสนุนปัจจัยพื้นฐานการวิจัย ทำให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์



เรื่อง

บทคัดย่อ

กิตติกรรมประกาศ

หน้า

ก

๗

สารบัญ	ค
สารบัญ(ต่อ)	ง
สารบัญ(ต่อ)	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญภาพ(ต่อ)	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาของวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ตรวจสอบเอกสาร	5
1.4.1 ยางธรรมชาติ	5
1.4.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	5
1.4.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ	7
1.4.4 การใช้งานของยางธรรมชาติ	10
1.4.5 สารเคมีในการออกสูตรยาง	10
1.4.6 หอยแครง	14
บทที่ 2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ	17
2.1.1 วัสดุและสารเคมี	17
2.1.2 อุปกรณ์	17
2.2 วิธีการดำเนินการ	18
2.2.1 ศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากเปลือกหอยด้วยวิธี ตกตะกอน โดยแปรความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 1, 2, และ 3 โมลาร์	18

### สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2.2 ศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยจาก กระบวนการตกตะกอนโดยแปรความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตที่ 1, 2, และ 3 โมลาร์	18
2.2.3 ศึกษาอุณหภูมิในการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือก หอยจากกระบวนการตกตะกอนโดยแปรอุณหภูมิที่ 40, 60, และ 80 องศาเซลเซียส	19
2.2.4 ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนของแคลเซียม คาร์บอเนตจากเปลือกหอยจากกระบวนการตกตะกอนโดยแปร ระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนที่ 10, 20, และ 30 ชั่วโมง	19



2.2.5	ศึกษาการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง	20
2.2.6	ศึกษาสมบัติการแปรรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต	20
บทที่ 3	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	22
3.1	การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอนและการเผาด้วยอุณหภูมิสูง	22
3.1.1	ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต	23
3.1.2	ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต	24
3.1.3	ผลของอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต	26
3.1.4	ผลของอิทธิพลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต	27
3.2	การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง	29

### สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า	
3.3	การถ่ายภาพแคลเซียมคาร์บอเนตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
3.4	การทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์	32
3.4.1	ผลของอิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	32
3.5	อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกล	36
สรุปผลการทดลอง	42	
เอกสารอ้างอิง	44	

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 สูตรในการเตรียมยางคอมปาวด์	20
ตารางที่ 3.1 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร	23
ตารางที่ 3.2 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร	24
ตารางที่ 3.3 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส	26
ตารางที่ 3.4 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 10, 20 และ 30 ชั่วโมง	27
ตารางที่ 3.5 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส	29
ตารางที่ 3.6 เวลาในการสกอร์ช เวลาในการวัลคาไนซ์ อัตราความเร็วในการวัลคาไนซ์ และค่าของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	32
ตารางที่ 3.7 สมบัติเชิงกลต่างๆ	36

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
ภาพที่ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	6
ภาพที่ 1.2 ลักษณะสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ; (ก) ในสภาวะปกติ (ข) ในสภาวะที่ ถูกยืด	7
ภาพที่ 1.3 วัฏจักรของแคลเซียมคาร์บอเนต	13
ภาพที่ 1.4 เปลือกหอยแครง	14
ภาพที่ 3.1 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือกหอย 50 กรัมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร	23
ภาพที่ 3.2 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการเติมสารละลายโซเดียม คาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร	25
ภาพที่ 3.3 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการใช้อุณหภูมิในการ ตกตะกอนที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส	26
ภาพที่ 3.4 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการใช้ระยะเวลาในการ ตกตะกอนที่ 10, 20 และ 30 ชั่วโมง	28
ภาพที่ 3.5 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้อุณหภูมิใน การเผา 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส	29
ภาพที่ 3.6 ลักษณะของผงตะกอน	30
ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
ภาพที่ 3.8 เวลาในการสกอร์ชและเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางธรรม ชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	33
ภาพที่ 3.9 อัตราความเร็วในการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติม แคลเซียม คาร์บอเนต ต่างชนิดกัน	34
ภาพที่ 3.10 ค่าแรงบิดต่ำสุด ค่าแรงบิดสูงสุด และผลต่างระหว่างแรงบิดต่ำสุดและ	35

แรงบิดสูงสุดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

### สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
ภาพที่ 3.11 100 เปอร์เซ็นต์โมดูลัสของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	37
ภาพที่ 3.12 300 เปอร์เซ็นต์โมดูลัสของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	37
ภาพที่ 3.13 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	38
ภาพที่ 3.14 ความสามารถในการยืดจนขาด ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	39
ภาพที่ 3.15 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	39
ภาพที่ 3.16 ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion loss) แบบ Taber ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	40
ภาพที่ 3.17 ความแข็งของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน	41

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การนำเศษขยะเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดผลกระทบต่อพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสามารถลดปริมาณขยะ ลดการสูญเสียพลังงานในการกำจัดขยะ ลดผลกระทบต่อสภาวะเรือนกระจกอันเนื่องมาจากการนำเสียของขยะ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่เศษขยะเหลือทิ้งได้อีกทางหนึ่ง การเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงเพื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเปลือกหอยแครงในปัจจุบันนับเป็นเศษขยะที่สร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากศึกษาทางด้านองค์ประกอบแล้ว พบว่าเปลือกหอยแครงมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีมากถึง ร้อยละ 90 แคลเซียมคาร์บอเนตมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท เนื่องจากมีคุณสมบัติที่บดให้ละเอียดได้ง่ายโดยผงละเอียดของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเสถียรทางเคมีและไม่เป็นพิษ นอกจากนี้คุณสมบัติพิเศษอื่นๆ เช่น ความขาว (brightness) การดูดซับน้ำมัน (oil absorption) ที่เอื้อประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติกและยาง เป็นต้น อุตสาหกรรมยาง เช่น ยางในและยางนอกรถยนต์ และรถจักรยานยนต์ รองเท้า รวมทั้งสายพานสำหรับลำเลียงขนถ่ายสินค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยสามารถใช้เป็นสารผสมเพื่อช่วยในการเสริมแรง และสร้างมูลค่าอย่างมากมายในอุตสาหกรรมยางในงานด้านการเสริมแรง เช่น ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมยางเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของยางคอมพาวด์สูงขึ้นวิธีการสำหรับเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงซึ่งสามารถเตรียมได้โดยใช้กระบวนการตะกอน ในงานวิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครง แล้วศึกษาพื้นฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้ และศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครง ด้วยกระบวนการตกตะกอนและการเผาด้วยอุณหภูมิสูง
2. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการตกตะกอน และการเผาด้วยอุณหภูมิสูง เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า



### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก โดยแปรความเข้มข้น 1, 2, และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนต โดยแปรความเข้มข้น 1, 2, และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 40, 60, และ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน 10, 20 และ 30 ชั่วโมง แล้วตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้ด้วย เทคนิค SEM

2. เตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงโดยการเผาด้วยอุณหภูมิสูงโดยทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ ได้แก่ การแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา 500, 700, และ 900 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเผา 5 ชั่วโมง แล้วตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้ด้วย เทคนิค SEM

3. ศึกษาสมบัติแปรรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงที่ได้จากกระบวนการตกตะกอน จากการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอยแครง เปรียบเทียบกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า โดยใช้ปริมาณ 30 phr

### 1.4 การตรวจเอกสาร

#### 1.4.1 ยางธรรมชาติ

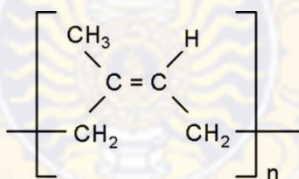
ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะความยืดหยุ่นแบบยาง (rubber elasticity) นั่นคือเมื่อมีแรงดึงยางธรรมชาติสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิม และเมื่อปล่อยแรงออกยางธรรมชาติกลับคืนสู่รูปร่างและความยาวเดิมนอกจากนี้ยางธรรมชาตียังมีสมบัติอื่นๆ เช่น มีความเหนียว (toughness) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศ เป็นต้น ลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของ ยางธรรมชาติ ได้แก่ ความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะและสิ่งทำการเชื่อมติดกับวัสดุเหล่านี้ทำให้ความแข็งแรงของยางสูงขึ้น ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมได้หลากหลายมากขึ้น (บัญชา และคณะ 2546)



### 1.4.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) โมเลกุลยาง 1 โมเลกุล จะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรงโดยทั่วไป ยางธรรมชาติ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.92 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ Tg ประมาณ -72 องศาเซลเซียส นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -72 องศาเซลเซียส สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะที่มีลักษณะเดียวกับแก้ว

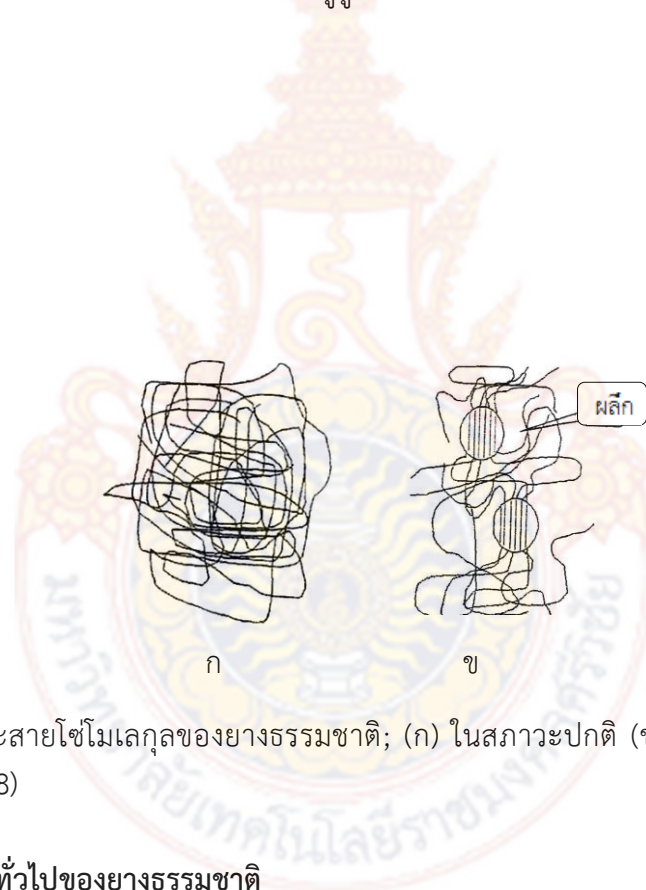
จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าหน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่ซึ่งพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมะถัน อย่างไรก็ตามพันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ หรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน คลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติ ที่ตำแหน่งพันธะคู่ กับสารเคมีต่างๆ เหล่านี้สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ  
ที่มา : พงษ์ธร (2548)

โดยทั่วไปยางธรรมชาตินี้โครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางธรรมชาติถูกยืดโมเลกุลของยางธรรมชาติบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะพบในกรณีที่เกิดยางธรรมชาติไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานโดยยางธรรมชาติจะมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำประมาณ -26 องศาเซลเซียส การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้นและไม่สามารถ

นำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่นๆได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ด้วยเหตุนี้ประเทศในเมืองหนาวจึงต้องนำยางธรรมชาติมาอบที่ อุณหภูมิประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส เพื่อให้ยางอ่อนก่อนจะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain-induced crystallization) จะพบเมื่อยางธรรมชาติถูกดึง ยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวเดิมตั้งต้นประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวจะทำให้ ยางธรรมชาติมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่ง แสงไปเป็นทึบแสงซึ่งจะสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม นอกจากนี้การเกิดผลึก เนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความ ต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูง



ภาพที่ 1.2 ลักษณะสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ; (ก) ในสภาวะปกติ (ข) ในสภาวะที่ถูกยืด  
ที่มา : พงษ์ธร (2548)

#### 1.4.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

1. ความยืดหยุ่นแบบยาง (rubber elasticity) สมบัติดังกล่าวเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมและขนาดเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว
2. ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูปมีสมบัติเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถทนตึงได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (20 MPa) หรือสูงกว่านั้น การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำจึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้ นอกจากนี้จะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

4. ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถทนตึงได้เมื่อถูกยืด ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

5. สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

6. ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงต่ำกว่ายางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene-butadiene rubber, SBR) เล็กน้อยอย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆพบว่ายางธรรมชาติ มีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

7. ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมากโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง  $10^{15}$  หรือ  $10^{16}$  โอห์ม

8. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านั้น อย่างไรก็ตามการบวมตัวของยางดังกล่าวทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง จึงทำให้ยางธรรมชาติ ไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

9. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีพันธะคู่อยู่มากทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกดึงยืดและได้รับโอโซนนานๆจะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ดังนั้นในระหว่างการผลิต

ผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด ได้แก่ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradants) และไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

10. การห้กงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการห้กงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัติที่ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิดคือ ยางบิวทาไดอิน (butadiene rubber) และยางซิลิโคน (silicon rubber)

11. การเสีรูปหลังการกดอัด (compression set) ยางธรรมชาติมีค่าการเสีรูปหลังการกดอัดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่าการเสีรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสีรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพส่งผลให้สมบัติด้านการเสีรูปหลังการกดอัดด้อยลง

12. การกระดอน (rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอนสูงและในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (low hysteresis) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีการสะสมความร้อนสูงก็จะทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

13. อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 องศาเซลเซียส จนถึง 70 องศาเซลเซียส หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่างๆก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม จะมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปในยางธรรมชาติ อาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส หรืออาจสูงถึง 100 องศาเซลเซียส



#### 1.4.4 การใช้งานของยางธรรมชาติ

ในอดีตยางธรรมชาติจัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ได้มากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลักคือ ไม่ทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ ดังนั้นยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ จึงเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนที่ยางธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทยังคงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติ เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตเนื่องจาก

1. ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อแรงดึงแม้ไม่ได้เติมสารตัวเติมเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถังมือยาง ถังยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น

2. ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูงในขณะที่มีความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นงานต่ำและมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน สายยาง ยางกันกระแทกท่าเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตกระเปาะน้ำร้อน เนื่องจากในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง (พงษ์ธร, 2548)

#### 1.4.5 สารเคมีในการออกสูตรยาง

##### 1. สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing or curing agents)

สารทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องการผสมลงในยางเพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาคัลคาไนซ์เซชันหรือปฏิกิริยาคงรูป การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อน เหนียวหนืด และไหลแบบเทอร์โมพลาสติกไปเป็นยางคงรูปที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทาน มีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน ระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ เป็นต้น

ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสมและยางคงรูปที่ได้ก็มีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้วยเหตุนี้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลโดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, และ NBR เป็นต้น อย่างไรก็ตามระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันก็มีข้อจำกัด คือไม่

สามารถใช้ในคงรูปที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลเนื่องจากพันธะคู่เป็นตำแหน่งที่กำมะถันจะเข้าไปทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราเร็วของการคงรูปด้วยกำมะถันจึงขึ้นอยู่กับปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง

ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีความสัมพันธ์การเสีรูลงหลังการกดโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงที่สุด และมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงกว่าที่ได้จากการคงรูปด้วยกำมะถัน เพราะพันธะ C-C ที่เกิดจากการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีความแข็งแรงสูงกว่าพันธะ C-S และพันธะ S-S ที่เกิดจากการคงรูปด้วยกำมะถัน ตามลำดับพลังงานพันธะของ C-C, C-S, S-S มีค่าประมาณ 344, 279 และ 206 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ

ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารเคมีอื่นๆ เช่นการใช้ซีลีเนียมและเทลลูเรียม สามารถนำมาใช้เป็นสารให้ยางวัลคาไนซ์แทนกำมะถัน โดยนิยมใช้เฉพาะในกรณีที่ต้องการให้ยางคงรูปมีความทนทานต่อความร้อนสูงเท่านั้น สารทั้งสองชนิดนี้ทำให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วมากจนสามารถวัลคาไนซ์ยางที่ได้ที่อุณหภูมิต่ำ การใช้โลหะออกไซด์เป็นสารทำให้ยางวัลคาไนซ์ที่นิยมใช้กันมากในยางครอโรพรีน ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และออกไซด์ของตะกั่ว

## 2. สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นสำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน เพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยางเกิดขึ้นได้ช้ามากแม้ที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดขึ้นได้เร็วยิ่งขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ยางทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงเกินไปและยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ดี

## 3. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือสารเคมีที่เติมลงไปในการเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เพราะสารในกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นแม้ว่ากลไกการกระตุ้นปฏิกิริยาค่อนข้างจะซับซ้อนและยังไม่ทราบกันอย่างแน่ชัด แต่เชื่อกันว่าสารกระตุ้นปฏิกิริยาจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่มีอยู่ในยางอย่างรวดเร็วทำให้ยางมีอัตราในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สูงขึ้น โดยทั่วไปสารกระตุ้นปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

- สารอนินทรีย์ เช่น ZnO, MgO และออกไซด์ของตะกั่ว
- กรดอินทรีย์ เช่น กรดสเตียริก
- สารเคมีที่ฤทธิ์เป็นด่าง เช่น ไดบิวทิลอะมิโนโอเลต

## 4. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)

ยางส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลจะเสื่อมได้ง่ายโดยเฉพาะในสภาพการใช้งานงานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน หรือโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งการใช้งานที่ต้องมีการหักเชิงกลตลอดเวลา ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะให้ได้ยาง



ที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เมื่ออย่างเสื่อมสภาพสมบัติต่างๆของยางก็จะด้อยลง การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นอาจสังเกตได้จากการแข็งตัว การอ่อนตัว รวมทั้งการล้าตัวหรือการขยายตัวของรอยแตก

### 5. สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aid)

สารช่วยในการผลิตคือส่วนประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นต่างๆเป็นไปได้อย่างง่ายขึ้น สารในกลุ่มนี้จึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิตเนื่องจากกลุ่มนี้บางตัวนอกจากจะช่วยในกระบวนการผลิตแล้วยังส่งผลทำให้ยางนิ่มมากขึ้นหรือสารที่ทำให้ยางนิ่มส่วนใหญ่มักมีส่วนช่วยในกระบวนการผลิตด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถแยกอย่างชัดเจนได้ว่าสารใดเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตหรือเป็นสารทำให้ยางนิ่ม (พงษ์ธร, 2548)

### 6. สารตัวเติม (fillers)

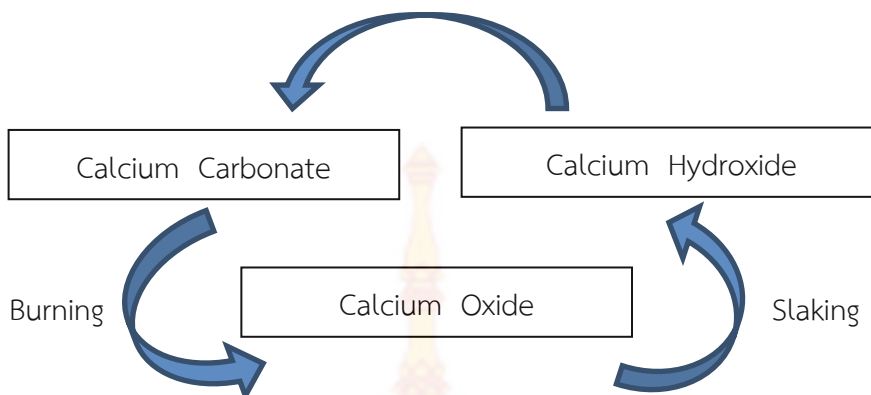
สารตัวเติม คือส่วนประกอบที่เติมเข้าไปในสูตรยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่างเช่นเพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตหรือเพื่อลดต้นทุน ทั้งนี้เพราะสารตัวเติมส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่ายางดิบโดยทั่วไปสารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ สารตัวเติมกลุ่มที่เสริมแรง และสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง

สารตัวเติมกลุ่มเสริมแรง คือ สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กในระดับนาโนเมตรและเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีการเติมสารตัวเติมในกลุ่มนี้จึงส่งผลทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่างๆดีขึ้นตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ และซิลิกา

ส่วนสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง คือ สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ในระดับไมโครเมตรและมีอันตรกิริยากับยางต่ำผู้ประกอบการนิยมใช้สารตัวเติมในกลุ่มนี้ได้แก่ ทัลคัมเคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนต (นิชธิมา และคณะ, 2553)

### 7. แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate)

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอนินทรีย์สารที่เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ มีสมบัติเฉพาะไม่เป็นพิษและมีความเสถียรทางเคมี จึงนิยมนำไปใช้เป็นวัตถุดิบพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก ยาง กระดาษ และสี แคลเซียมคาร์บอเนตยังใช้เป็นสารที่ควบคุมในการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กกล้าและวัตถุที่ทำจากเหล็ก แคลเซียมคาร์บอเนตมี โครงสร้างผลึก 3 แบบ คือ แคลไซต์ อะราโกไนต์ และวาเทอร์ไรต์ ซึ่งแคลไซต์เป็นโครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุดและวาเทอร์ไรต์จะมีความเสถียรน้อยที่สุด เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตได้รับความร้อนสูงจนถึงจุดที่สามารถหลอมละลายจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งจะสามารถดูดความชื้นในอากาศได้ดีและยังสามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้โดยวัฏจักรของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามภาพที่ 2.3 (สุภากร, 2550)



ภาพที่ 1.3 วงจรของแคลเซียมคาร์บอเนต  
ที่มา : สุภกร (2558)

ในธรรมชาติพบวัสดุหลายชนิดที่มีส่วนประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต เช่น ปะการัง เปลือกไข่ เปลือกหอย ซึ่งมีรายงานว่าเปลือกหอยจะประกอบด้วยสารจากพวกแคลเซียมคาร์บอเนตมากถึงร้อยละ 95-99 และมีโปรตีนเป็นสารเชื่อมต่อดังกล่าวร้อยละ 0.1-5.0 โดยน้ำหนักโดยเปลือกหอยจะมีชั้นฉีกแคลเซียมคาร์บอเนต (prismatic layer) ซึ่งเป็นชั้นที่แข็งแรงที่สุดประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแคลไซต์ (สุภกร, 2558)

#### 1.4.6 หอยแครง (cockle shell)

หอยแครงมีชื่อสามัญว่า “หอยแครง” มีชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า cockle shell ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *anadara granosa* เป็นหอยสองฝาลักษณะค่อนข้างกลม เปลือกหนา ส่วนใหญ่จะอาศัยอยู่ตามบริเวณชายฝั่งทะเลที่เป็นหาดโคลนและเลน ด้านนอกของเปลือกทั้งสองข้างนั้นเป็นสันนูนในลักษณะเส้นโค้งจากด้านหลังไปยังปลายขอบของเปลือก มีจำนวนประมาณ 20 เส้น สีของเปลือกชั้นนอกไม่แน่นอน อาจจะมีสีขาวหรือสีแดงปนดำหรือสีแดงปนน้ำตาล โดยปกติแล้วเปลือกหอยจะเป็นสีขาวแต่จะถูกดินโคลนในแหล่งที่อยู่อาศัยจับจนเป็นสีน้ำตาล มีขนาดความยาวประมาณ 6-7 เซนติเมตร เปลือกหอยแครงมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 97 และจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแครง พบว่ามีโครงสร้างเป็นทั้งอะราโกไนต์และแคลไซต์



ภาพที่ 1.4 เปลือกหอยแครง  
ที่มา : สุภกร (2558)

### 1. ลักษณะทั่วไปของหอยแครง

หอยแครง เป็นอาหารทะเลที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายอีกทั้งเป็นสัตว์น้ำที่มีคุณค่าสูงทั้งทางเศรษฐกิจและโภชนาการ การเลี้ยงหอยแครงจะเป็นการรวบรวมพันธุ์หอยจากลูกหอยในธรรมชาติเพื่อหว่านลงเลี้ยงในบริเวณที่เหมาะสม มีการกั้นคอกแสดงอาณาจักรเขตที่เลี้ยงไว้ สำหรับในประเทศไทย พบว่ามีเลี้ยงครั้งแรกที่ ต.บางตะพูน อ.บ้านแหลม จ.เพชรบุรี ในเนื้อที่ 5-10 ไร่ ใช้เวลาเลี้ยง 1-2 ปี จึงเก็บเกี่ยวไปขายได้และต่อมาขยายการเลี้ยงไปในพื้นที่ใกล้เคียงและจังหวัดต่างๆ ทำให้ปัจจุบันมีการขยายพื้นที่เลี้ยงไปยังชายฝั่งที่มีสภาพที่เหมาะสมทั้งฝั่งอันดามันและอ่าวไทย

หอยแครงเป็นหอย 2 ฝา มีขนาดและลักษณะเหมือนกันทั้ง 2 ฝา ไม่มีแผงฟัน (radula) ในช่องปาก เหงือกขนาดใหญ่ไว้สำหรับหายใจและกรองอาหาร เป็นแบบ lamellibranch มีแมนติลคลุมตัว ขอบของแมนติลซ้ายและขวาไม่เชื่อมติดกัน หรืออาจเชื่อมเฉพาะจุด เปลือกมี 2 ฝา ฝาทั้งสองยึดติดกันด้วยบานพับ มีเพศผู้และเพศเมีย การผสมพันธุ์เป็นแบบภายนอกตัว และระยะที่เป็นตัวอ่อนเป็นแพลงก์ตอน

หอยแครงมีเปลือกค่อนข้างกลม มีสัน และร่องในแนวตั้งเห็นชัดเจนทำให้ตามขอบเปลือกเป็นรอยหยักไปด้วย ดังภาพที่ 2.4 เป็นหอยที่มักฝังตัวอยู่ตามหาดเลนหรือโคลนละเอียดในชายฝั่งทะเลจนถึงแนวที่อยู่ห่างจากฝั่งออกไปประมาณ 2 กิโลเมตร หอยแครงชอบฝังตัวอยู่ตามผิวดินโคลนลึกตั้งแต่ 1-12 นิ้ว โดยจะสังเกตเห็นเป็นรูจำนวน 2 รูที่ผิวดิน ซึ่งเป็นช่องสำหรับทางน้ำเข้า-ออก และสามารถเห็นรอยการเคลื่อนที่เพื่อหาอาหาร ขุดดินฝังตัวเพื่อหลบหลีกศัตรูและเพื่อหาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม หอยแครงจะขึ้นมาที่ผิวดินเมื่อน้ำขึ้นเพื่อหาอาหาร และจะฝังตัวใต้ผิวดินเมื่อน้ำลงเพื่อป้องกันน้ำออกภายนอกตัวหอย แต่จะเปิดฝาทั้งสองเล็กน้อย โดยจะยังมีสภาวะการไหลเวียนของน้ำและการหายใจเกิดขึ้นเป็นปกติภายในเปลือกหอย และในเลือดมีสารฮีโมโกลบิน (haemoglobin) ซึ่งเมื่อรวมกับอากาศจะเป็นสีแดง จึงได้ชื่อว่า blood clam

สภาพพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของหอยแครง เป็นพื้นที่ดินบริเวณหาดเลนละเอียดบริเวณปากแม่น้ำ หรือป่าชายเลน ซึ่งบริเวณดังกล่าวควรเป็นอ่าวที่กำบังคลื่นลมได้ดีแม่น้ำลำคลองไหลลงสู่อ่าว เพื่อพัดพาธาตุอาหารที่เป็นอาหารของหอยแครงไปกองรวมกัน โดยหาดต้องเป็นหาดเลนโคลนละเอียดไม่มีเม็ดทรายเจือปน ชั้นของเลนบริเวณหาดไม่ควรต่ำกว่า 0.5-1.0 เมตร และชั้นของเลนไม่ควรมีกลิ่นเหม็น และควรมีระยะเวลาน้ำลงไม่นานเกินกว่า 6 ชั่วโมง

ระบบการเลี้ยงหอยแครงในประเทศไทยแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบคือ ระบบการเลี้ยงแบบดั้งเดิม และการเลี้ยงแบบพัฒนา ซึ่งการเลี้ยงแบบดั้งเดิมเป็นการทำฟาร์มขนาดเล็กในครอบครัว เนื้อที่ 5-30 ไร่ต่อครอบครัว โดยใช้ไม้ไผ่กั้นคอกล้อมแปลงเลี้ยง การเลี้ยงแบบดั้งเดิมนิยมเลี้ยงแถบอ่าว ไทยตอนใน โดยเฉพาะแถบชายฝั่ง จังหวัดเพชรบุรีและสมุทรสงคราม เป็นต้น ส่วนการเลี้ยงแบบพัฒนาเป็นการเลี้ยงหอยแครงแบบธุรกิจขนาดใหญ่ เนื้อที่ 200-1,000 ไร่ต่อราย มีการปักเขตเช่นเดียวกับแบบดั้งเดิม การเลี้ยงระบบนี้นิยมในจังหวัดชายฝั่งทะเลภาคใต้ทั้งฝั่งอ่าวไทยและอันดามัน (นิพนธ์, 2543; วงแห, 2547)

## 2. ประโยชน์หอยแครง

1. เนื้อหอยนำมาลวกน้ำร้อนรับประทานเป็นอาหาร
2. เนื้อหอยแปรรูปเป็นหอยแครงดอง หอยแครงตากแห้ง เป็นต้น สำหรับใส่ในส้มตำหรือใช้ประกอบอาหารต่างๆ
3. เปลือกหอยแครงนำไปเผาเพื่อผลิตปูนขาวหรือผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเปลือกหอยแครงกว่าร้อยละ 95 จะประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ส่วนที่เหลือจะเป็น แคลเซียมฟอสเฟต, แมกนีเซียมฟอสเฟต, แมกนีเซียมซิลิเกต, แมกนีเซียมคาร์บอเนต, โปรตีนประเภทคอนไคโอลิน (conchinolim)

## 3. ส่วนประกอบของเปลือกหอย

เปลือกหอยแครง แบ่งเป็น 3 ชั้น ได้แก่

1. ชั้นนอกสุด (periostracum layer) ชั้นนี้ประกอบด้วยสารหลัก คือโปรตีนประเภทคอนไคโอลิน ที่ทำให้เปลือกด้านนอกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำ ซึ่งเป็นชั้นบางๆ และหลุดได้ง่าย
2. ชั้นกลาง (prismatic layer) เป็นชั้นที่ประกอบด้วยผลึกของแคลเซียมที่อยู่ในรูปผลึกแคลไซต์ (calcite) เป็นส่วนมาก ร่วมกับสารประกอบอื่นๆ ชั้นนี้จะหนา และแข็งมากที่สุด
3. ชั้นในสุด/ชั้นนุ่ม (nacreous layer) เป็นชั้นที่ประกอบด้วยผลึกของแคลเซียมในรูปผลึกอราโกไนท์ (aragonite) มีสีขาวขุ่น เรียงตัวเป็นระเบียบ และเป็นมันวาวแคลเซียมคาร์บอเนต จากเปลือกหอยแครงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมมากมาย ได้แก่ อุตสาหกรรมกระดาษ ทำให้กระดาษมีสีขาว และเรียบเนียน, อุตสาหกรรมยาง เพื่อเพิ่มความขาว, อุตสาหกรรมพลาสติก เพื่อทำให้พลาสติกแข็งแรง หรือเพื่อทำให้เป็นสีขาว, อุตสาหกรรมสี เพื่อให้สีขาว และการยัดเกาะที่ดี, อุตสาหกรรมทางการแพทย์ โดยเป็นสารให้แคลเซียมแก่ร่างกาย หรือใช้รักษาโรคเกี่ยวกับระบบหัวใจ (นิพนธ์, 2543)



## บทที่ 2

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

#### 2.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 2.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. ยางธรรมชาติ
2. ซิงค์ออกไซด์
3. กรดสเตียริก (stearic acid)
4. 6PPD หรือ N-(1-3-Dimethylbutyl)-N-phenyl-phenylenediamine
5. TMTD (tetramethyl thiuram disulphide)
6. แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate)
7. กำมะถัน (sulphur)
8. เปลือกหอยแครงบด (cockle shell)

##### 2.2.2 อุปกรณ์

1. เครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer)
2. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill)
3. เครื่องอัดไฮโดรลิก (compression moulding)
4. เครื่องทดสอบการคงรูปของยาง (oscillating disc rheometer, odr)
5. ตู้อบอากาศร้อน (hot air oven)
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง (electronic balance)
7. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (electronic balance)
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (tensile tester)
9. เครื่องวัดความหนา (thickness)
10. เครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester)
11. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion loss)
12. เครื่องตัดชิ้นทดสอบ (pneumatic cutting machine)
13. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
14. เครื่องกวนสารเชิงกล (mechanical stirrer)
15. เตาเผาอุณหภูมิสูง
16. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

#### 2.2 วิธีการดำเนินการ

### 2.2.1 ศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากเปลือกหอยด้วยวิธีตกตะกอน โดยแปรความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 1, 2, และ 3 โมลาร์

1. นำเปลือกหอยมาล้างให้สะอาด แล้วตากแดดให้แห้ง บดให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช
2. นำผงเปลือกหอยแครง 50 กรัม มาผสมกับกรดไฮโดรคลอริกโดยแปรปริมาณความเข้มข้น 1, 2, และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร กวนจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน แล้วนำมากรองแยกเพื่อที่จะเอาเฉพาะส่วนที่ละลาย
3. เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
4. นำของผสมมาใส่ในขวดแบบปิดแล้วใส่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยให้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
5. เมื่อครบเวลาในการทำปฏิกิริยานำของผสมมาทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับค่าให้เป็นกลาง
6. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
7. นำปริมาณตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ ไปหาคำนวณหาร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนต

### 2.2.2 ศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยจากกระบวนการตกตะกอนโดยแปรความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตที่ 1, 2, และ 3 โมลาร์

1. เลือกความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่เหมาะสมจากข้อที่ 1 เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต โดยแปรความเข้มข้นที่ 1, 2, และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
2. นำของผสมมาใส่ในขวดแบบปิดแล้วใส่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยให้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
3. เมื่อครบเวลาในการทำปฏิกิริยานำของผสมมาทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับค่าให้เป็นกลาง
4. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. นำปริมาณตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ ไปหาคำนวณหาร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนต

### 2.2.3 ศึกษาอุณหภูมิในการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยจากกระบวนการตกตะกอนโดยแปรอุณหภูมิที่ 40, 60, และ 80 องศาเซลเซียส

1. เลือกความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่เหมาะสมจากข้อที่ 1 และเลือกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในสภาวะที่เหมาะสมจากข้อที่ 2 นำของผสมมาใส่ในขวด



แบบปิดแล้วใส่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยแปรอุณหภูมิที่ 40, 60, และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

2. เมื่อครบเวลาในการทำปฏิกิริยานำของผสมมาทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับค่าให้เป็นกลาง

3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4. นำปริมาณตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ ไปหาคำนวณหาร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนต

#### 2.2.4 ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยจากกระบวนการตกตะกอนโดยแปรระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนที่ 10, 20, และ 30 ชั่วโมง

1. เลือกความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสถานะที่เหมาะสมจากข้อที่ 1 และเลือกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในสถานะที่เหมาะสมจากข้อที่ 2 นำของผสมมาใส่ในขวดแบบปิดแล้วใส่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิในสถานะที่เหมาะสมจากข้อที่ 3 หลังจากนั้นแปรระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนที่ 10, 20, และ 30 ชั่วโมง

2. เมื่อครบเวลาในการทำปฏิกิริยานำของผสมมาทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับค่าให้เป็นกลาง

3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4. นำปริมาณตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ ไปหาคำนวณหาร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนต

#### 2.2.5 ศึกษาการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง

1. นำเปลือกหอยมาล้างให้สะอาด แล้วนำไปต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดกาบโปรตีนที่ปนเปื้อนออก แล้วหลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแดด และอบแห้ง

2. นำเปลือกหอยไปอบให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช

3. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500, 700, และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

4. เมื่อครบเวลาในการเผา นำมาทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

5. นำปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผา ไปหาคำนวณหาร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนต

## 2.2.6 ศึกษาสมบัติการแปรรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

1. เตรียมยางคอมปาวด์ที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเริ่มจากการนำยางธรรมชาติผสมสารเคมีต่างๆ ดังตารางที่ 2.1 ผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

### ตารางที่ 2.1 สูตรในการเตรียมยางคอมปาวด์

ยางและสารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)
STR 5L	100
ZnO	5.0
Stearic acid	2.0
6PPD	1.0
TMTD	1.0
Sulphur	2.5
Filler (a,b,c,d)	30

\* หมายเหตุ: สารตัวเติมที่ใช้ ได้แก่

- (a) แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า
- (b) แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงที่ได้จากกระบวนการตกตะกอน
- (c) แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง
- (d) ผงเปลือกหอยแครง

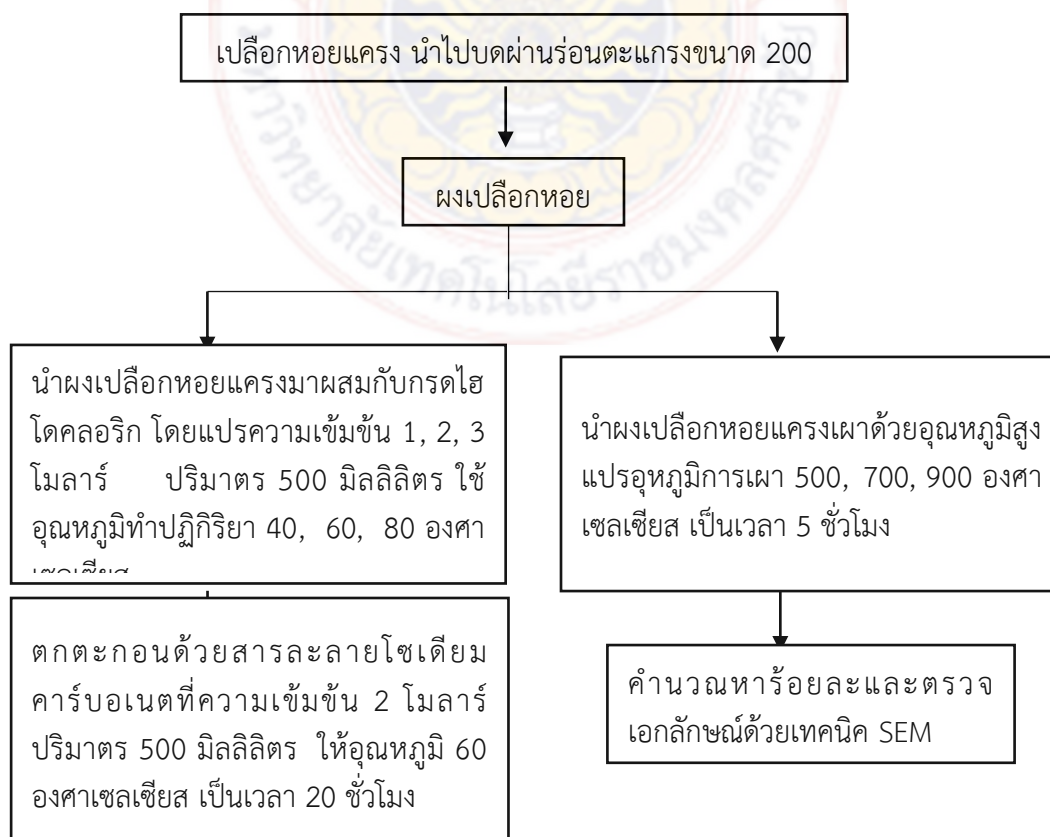
2. ทดสอบสมบัติยางคอมปาวด์ นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ ดังนี้ เวลาสกอร์ช(scorch time), เวลาวัลคาไนซ์ (cure time), อัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate Index)

3. ทดสอบสมบัติยางวัลคาไนซ์ นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ แล้วจึงนำไปอัดเข้าตามระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่ได้ และนำไปทดสอบสมบัติอื่นๆ ดังนี้ ทดสอบความแข็ง (hardness tester) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240, ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile properties) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412, ทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624, ทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion loss) แบบ taber ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 3389-85

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

##### 3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอนและการเผาด้วยอุณหภูมิสูง



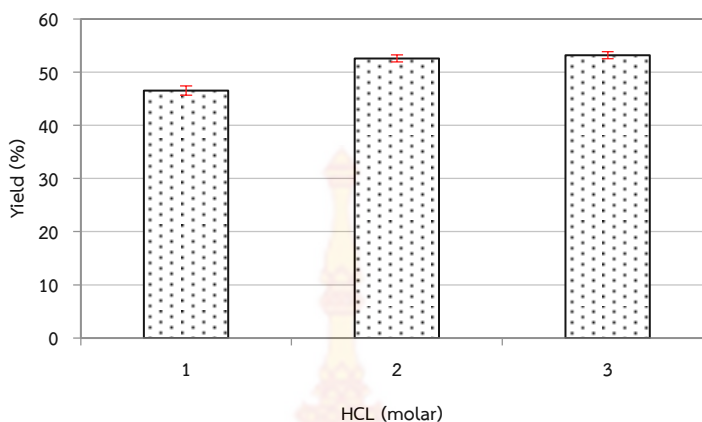
↓  
นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง คำนวณหาร้อยละ และตรวจเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM

### 3.1.1 ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยแปรความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง

**ตารางที่ 3.1** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

[HCl] (molar)	Yield (%)
1	46.54 ± 0.86
2	52.58 ± 0.66
3	53.19 ± 0.65



**ภาพที่ 3.1** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

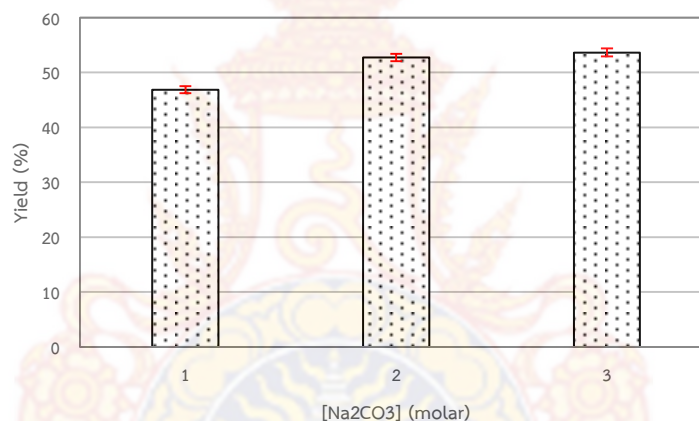
จากภาพที่ 3.1 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยแปรความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 โมลาร์ แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง ผลที่ได้ คือ ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เพราะกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นมากขึ้นก็จะละลายเปลือกหอยได้เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้เพิ่มขึ้นน้อยมาก เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ 2 โมลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณความเข้มข้นที่เพียงพอสำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ เพิ่มความเข้มข้นเป็น 2 โมลาร์ จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นที่มากกว่าการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

### 3.1.2 ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตโดยแปรความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.2 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

[Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ] (molar)	Yield (%)
1	46.89 ± 0.64
2	52.75 ± 0.68
3	53.67 ± 0.72



ภาพที่ 3.2 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการเติมสารละลาย โซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

จากภาพที่ 3.2 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือก หอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตโดย แปรความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 โมลาร์ ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาใน การตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง ผลที่ได้ คือ ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามความ เข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เพราะสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นมากขึ้นก็ จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะ ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ลดน้อยลง เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมคาร์บอเนตที่ 2 โมลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณความเข้มข้นที่เพียงพอสำหรับการตกตะกอนของแคลเซียม คาร์บอเนต เพราะจากเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 1 โมลาร์ เพิ่มความเข้มข้นเป็น 2 โมลาร์



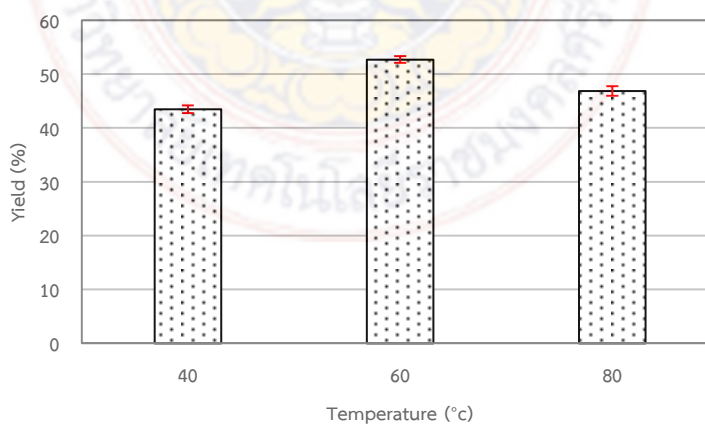
จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นที่มากกว่าการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

### 3.1.3 ผลของอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอนที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง

**ตารางที่ 3.3** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส

Temperature (°c)	Yield (%)
40	43.47 ± 0.72
60	52.70 ± 0.62
80	46.85 ± 0.90



**ภาพที่ 3.3** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส

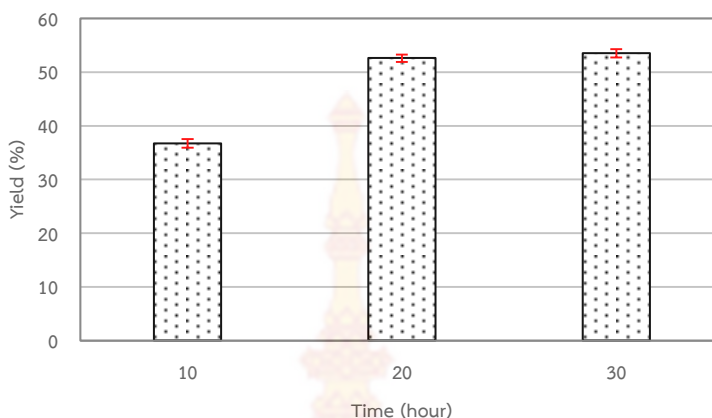
จากภาพที่ 3.3 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2 โมลาร์ แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอนที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง ผลที่ได้ คือ ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอน ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ลดน้อยลง เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอน คือ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะจากอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เพิ่มเป็น 60 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การใช้อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส ในการตกตะกอน จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ปริมาณลดน้อยลงประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ จากการใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ในการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

**3.1.4 ผลของอิทธิพลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต**

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนโดยแปรระยะเวลาที่ 10, 20 และ 30 ชั่วโมง

**ตารางที่ 3.4** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ จากการใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 10, 20 และ 30 ชั่วโมง

Time (hour)	Yield (%)
10	36.72 ± 0.82
20	52.59 ± 0.69
30	53.49 ± 0.79



**ภาพที่ 3.4** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 10, 20 และ 30 ชั่วโมง

จากภาพที่ 3.4 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้จากการละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนโดยแปรระยะเวลาที่ 10, 20 และ 30 ชั่วโมง ผลที่ได้คือ ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน ซึ่งเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้เพิ่มขึ้นน้อยมาก เพราะฉะนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอนคือ 20 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะจากระยะเวลา 10 ชั่วโมงเพิ่มเป็น 20 ชั่วโมง จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เพิ่มขึ้นที่มากกว่าการใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 30 ชั่วโมง จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

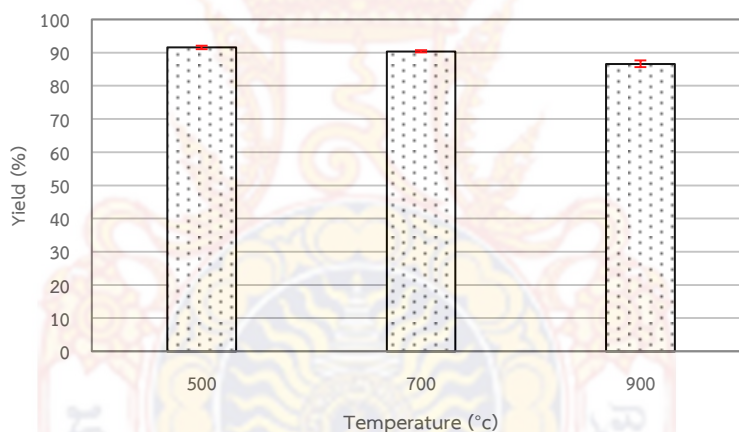
## 3.2 การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง

### 3.2.1 ผลของอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ซึ่งเปลือกหอยปริมาณ 120 กรัม นำไปเผาที่เตาเผาอุณหภูมิสูง โดยแปรอุณหภูมิในการเผาที่ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส

**ตารางที่ 3.5** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส

Temperature (°c)	Yield (%)
500	91.58 ± 0.51
700	90.39 ± 0.33
900	86.62 ± 0.99



**ภาพที่ 3.5** ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ อุณหภูมิในการเผา 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 3.5 แสดงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ อุณหภูมิในการเผาที่ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ผลที่ได้ คือ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ได้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ลดน้อยลงเพราะในขณะที่เผาจะทำให้ผงเปลือกหอยเกิดการสลายตัว และเมื่อใช้



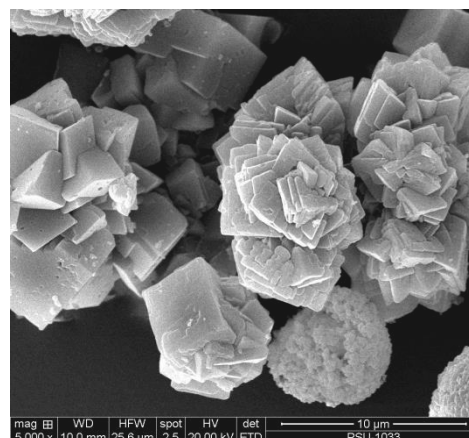
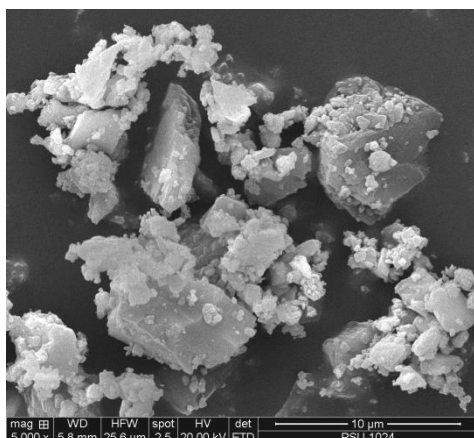
อุณหภูมิที่ต่ำอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่ดี เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่ต่ำเกินไปและไม่สูงเกินไปจนทำให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลดน้อยลงมากและแคลเซียมคาร์บอเนตมีสีที่คล้ำเกินไปซึ่งอาจมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน แสดงดังภาพที่ 3.6



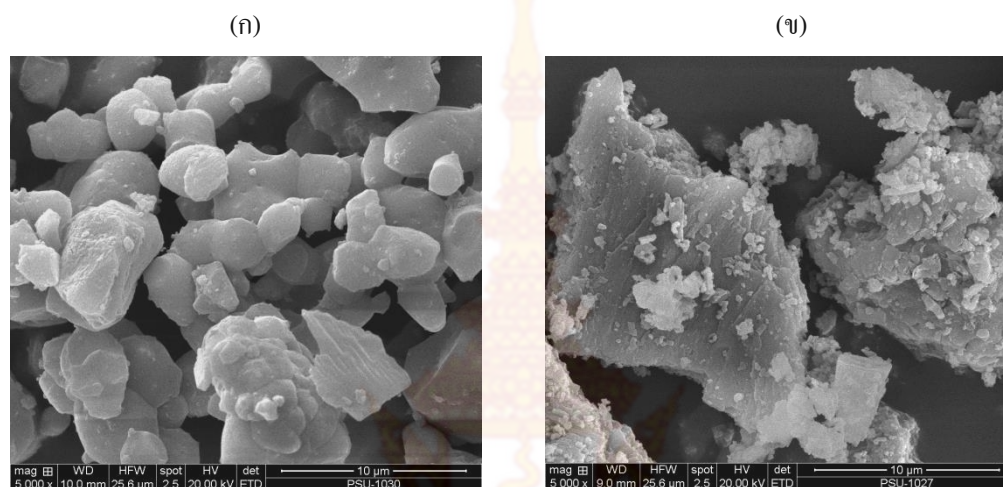
ภาพที่ 3.6 ลักษณะของผงตะกอน (ก) แคลเซียมคาร์บอเนตที่จากการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (ข) แคลเซียมคาร์บอเนตที่จากการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (ค) แคลเซียมคาร์บอเนตที่จากการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

### 3.3 การถ่ายภาพแคลเซียมคาร์บอเนตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 3.3.1 ผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด







ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า  
 (ก) แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า (ข) แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการ  
 ตักตะกอน (ค) แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง (ง) ผงเปลือกหอย

จากภาพที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตักตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอย พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการที่แตกต่างกัน จะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน คือ แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าจะมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนปะปนกันทั้งใหญ่และเล็ก ส่วนผงเปลือกหอยแครงจะมีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนใหญ่ๆ มีก้อนเล็กปะปนเล็กน้อย และเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดให้เล็กลงค่อนข้างสม่ำเสมอและมีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์ และเมื่อผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมค่อนข้างสม่ำเสมอเช่นกัน

### 3.4 การทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์

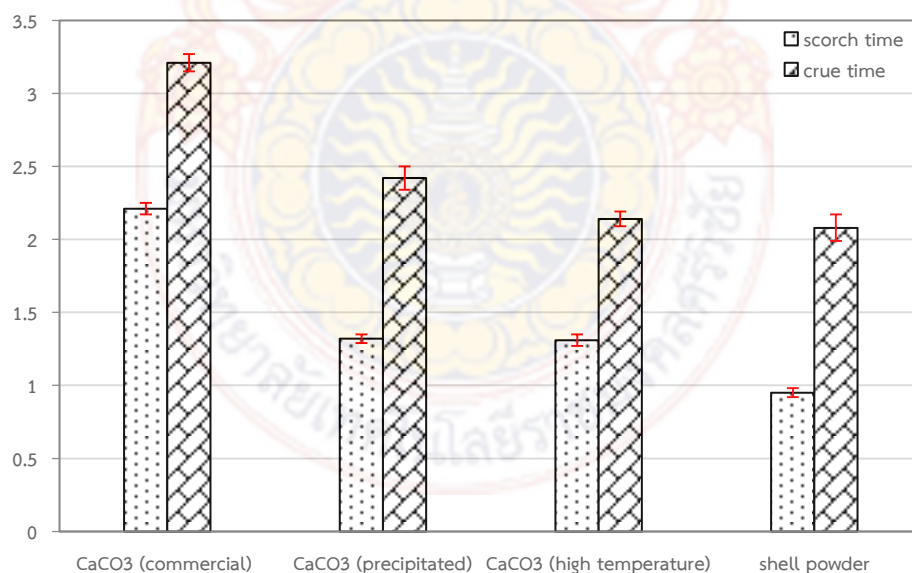
#### 3.4.1 ผลของอิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

ผลการศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากการนำยางธรรมชาติผสมสารเคมีต่างๆ ตามตารางที่ 2.1 ผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด โดยศึกษาชนิดของสารตัว

เติม 4 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอย โดยปริมาณ 30 phr จากนั้นนำยางคอมปาวด์ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่อง Oscilating Disk Rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6

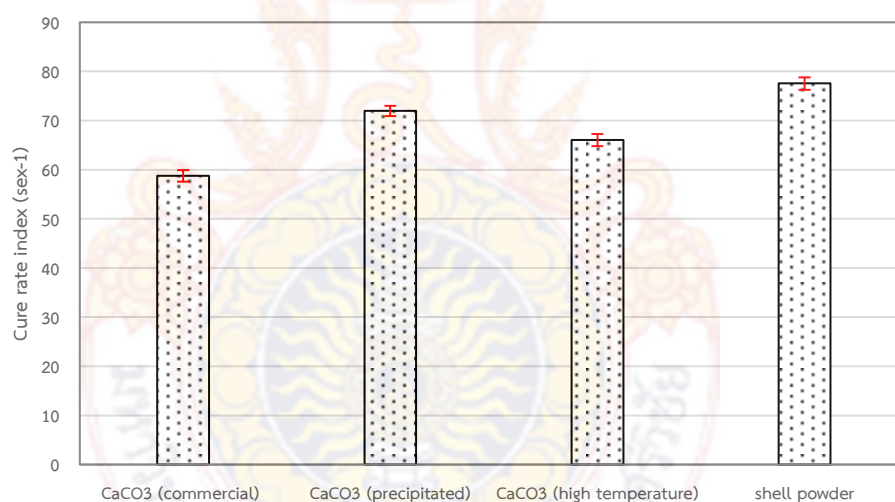
**ตารางที่ 3.6** เวลาในการสกอ์ช เวลาในการวัลคาไนซ์ อัตราความเร็วในการวัลคาไนซ์ และค่าของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

Filler	$t_{s1}$ (min)	$t_{c90}$ (min)	CRI ( $\text{min}^{-1}$ )	$M_L$ (lb.in)	$M_H$ (lb.in)	$M_H - M_L$ (lb.in)
CaCO <sub>3</sub> (commercial)	2.21±0.04	3.21±0.06	58.75±1.17	6.91±0.04	33.98±0.87	27.07±0.83
CaCO <sub>3</sub> (precipitated)	1.32±0.03	2.42±0.08	71.97±1.04	9.62±0.03	31.48±0.78	21.86±0.75
CaCO <sub>3</sub> (high temperature)	1.31±0.04	2.14±0.05	66.01±1.23	9.71 ±0.03	33.77±0.78	24.06±0.76
shell powder	0.95±0.03	2.08±0.09	77.52±1.27	11.06±0.19	34.59±0.96	23.53±0.91



**ภาพที่ 3.8** เวลาในการสกอ์ชและเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

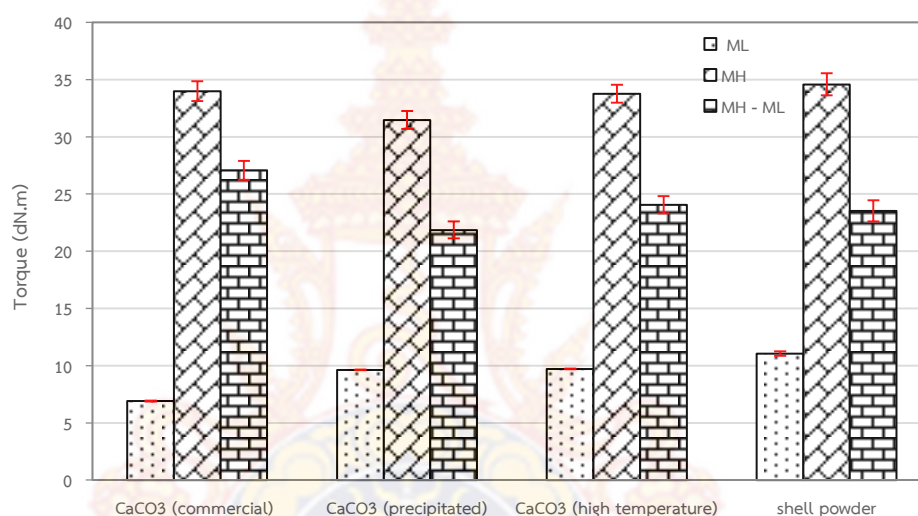
จากภาพที่ 3.8 แสดงผลจากการศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องทดสอบ ODR ของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม 4 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอย โดยปริมาณ 30 phr พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ผสมสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด จะส่งผลให้ค่าเวลาในการสกอ์ชลดน้อยลงตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับเวลาในการวัลคาไนซ์ที่ลดน้อยลงตามลำดับด้วยเช่นกัน แต่แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าจะส่งผลให้เวลาในการสกอ์ชและเวลาในการวัลคาไนซ์มากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นซึ่งจะส่งผลให้มีกระบวนการแปรรูป



ภาพที่ 3.9 อัตราความเร็วในการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.9 แสดงผลจากการศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องทดสอบ ODR ของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม 4 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอย โดยปริมาณ 30 phr พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ผสมสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด จะส่งผลให้อัตราความเร็วในการวัลคาไนซ์ แตกต่างกันตามชนิดของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า ยางที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าจะส่งผลให้อัตราความเร็วในการวัลคาไนซ์ต่ำสุด และยางที่ใส่ผงเปลือกหอยให้ค่า

สมบัติการวัลคาไนซ์สูงสุด ส่วนยางที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนตจากวิธีไฮโดรเทอร์มอลและแคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง จะส่งผลให้อัตราความเร็วในการวัลคาไนซ์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการแปรรูป



ภาพที่ 3.10 ค่าแรงบิดต่ำสุด ค่าแรงบิดสูงสุด และผลต่างระหว่างแรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.10 แสดงผลจากการศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องทดสอบ ODR ของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม 4 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอย โดยปริมาณ 30 phr พบว่า ยางคอมพาวด์ที่ผสมสารตัวเติมทั้ง 4 ชนิด จะส่งผลให้ค่าผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดกับแรงบิดต่ำสุดแตกต่างกันตามชนิดของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการแปรรูป

### 3.5 อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกล

#### 3.5.1 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยแปรชนิดของสารตัวเติม

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยแปรชนิดของสารตัวเติม 4 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอย โดยปริมาณ 30 phr แล้วทำการทดสอบสมบัติ 100% โมดูลัส 300% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ taber และสมบัติความแข็ง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.7

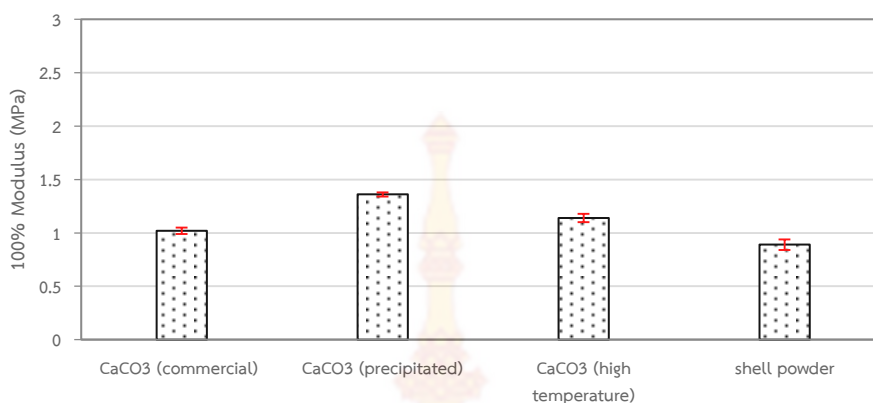
ตารางที่ 3.7 สมบัติเชิงกลต่างๆ

Filler	100% Modulus (MPa)	300% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
CaCO <sub>3</sub> (commercial)	1.02 ± 0.03	2.02 ± 0.09	11.98 ± 0.73	420 ± 20.00
CaCO <sub>3</sub> (precipitated)	1.36 ± 0.02	2.55 ± 0.05	17.48 ± 0.64	580 ± 14.14
CaCO <sub>3</sub> (high temoeratre)	1.14 ± 0.04	2.25 ± 0.07	14.20 ± 0.56	540 ± 14.14
Shell powder	0.89 ± 0.05	1.76 ± 0.11	8.81 ± 0.43	380 ± 20.00

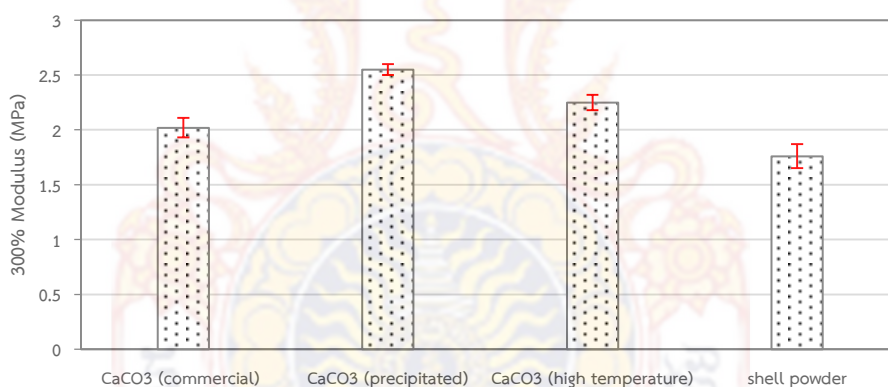
ตารางที่ 3.7 สมบัติเชิงกลต่างๆ (ต่อ)

Filler	Tear Strength (N/mm)	Abrasion Loss (mg/100cycle)	Hardness (Shore A)
CaCO <sub>3</sub> (commercial)	27.06 ± 0.46	445±8.9	50.8 ± 1.1
CaCO <sub>3</sub> (precipitated)	35.68 ± 0.27	163.3±7.1	56.8 ± 0.8
CaCO <sub>3</sub> (high temoeratre)	33.21 ± 0.98	237±5.3	55.2 ± 0.9
Shell powder	21.02 ± 1.24	625.4±9.8	46.4 ± 1.8



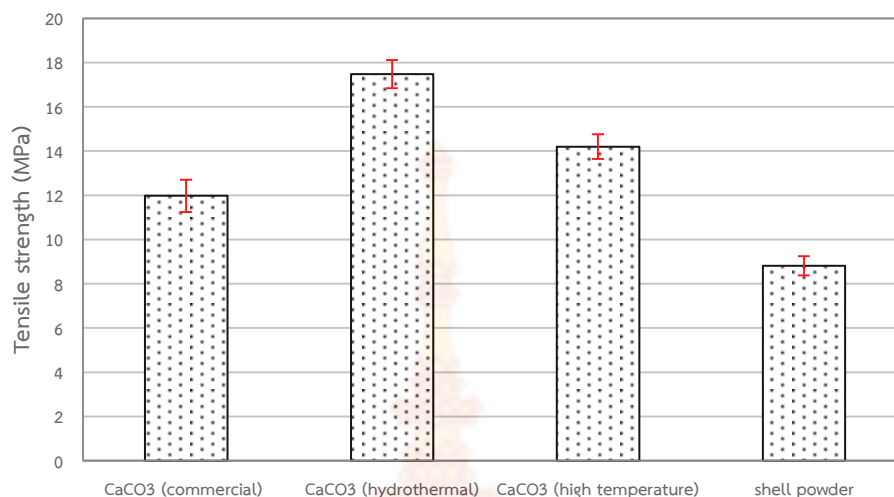


ภาพที่ 3.11 100 เปอร์เซ็นต์โมดูลัสของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน



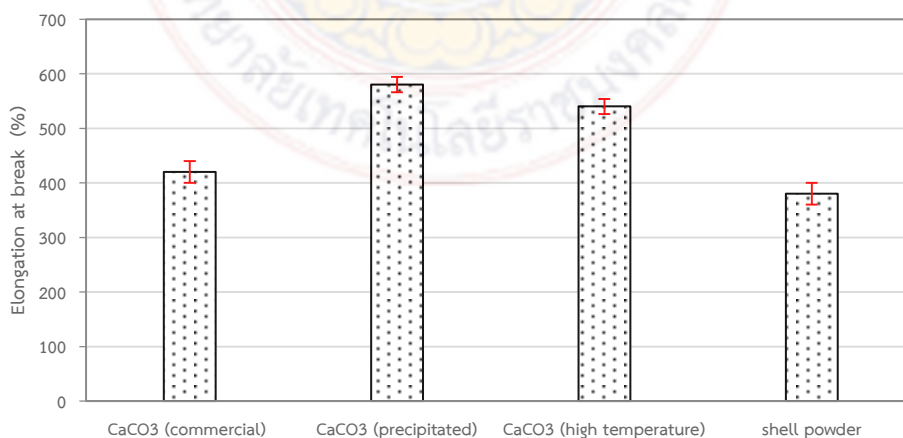
ภาพที่ 3.12 300 เปอร์เซ็นต์โมดูลัสของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.11-3.12 แสดงค่าความต้านทานต่อการยืดที่ 100% โมดูลัส และ 300% โมดูลัส พบว่า การใช้ผงเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมให้ค่าความต้านทานต่อการยืดที่ 100% โมดูลัสและ 300% โมดูลัสน้อยที่สุดเป็นเพราะสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคใหญ่ ทำให้กระจายตัวในยางธรรมชาติได้ไม่ดี และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง และแคลเซียมคาร์บอเนตทางกาค้า ให้ค่าความต้านทานต่อการยืดที่ 100% โมดูลัส และ 300% โมดูลัส มากตามลำดับ อาจเป็นเพราะสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคเล็กและกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ



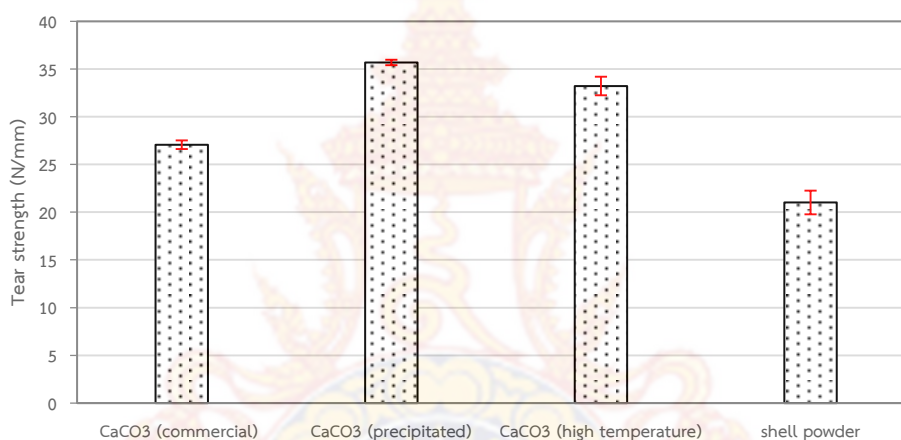
ภาพที่ 3.13 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.13 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่มีการใส่สารตัวเติมที่แตกต่างกัน 4 ชนิด พบว่ายางที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง และแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า และผงเปลือกหอย ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดน้อยลงตามลำดับ เนื่องมาจากสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่



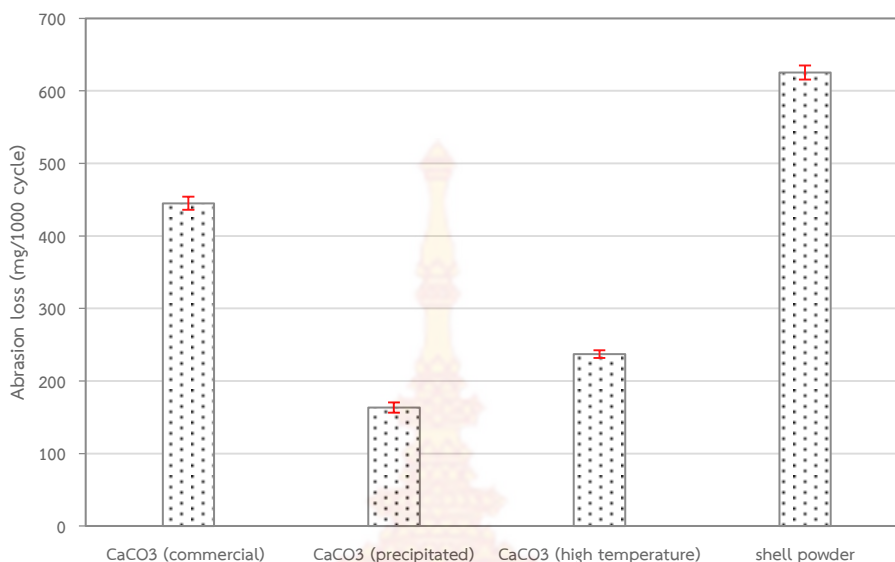
**ภาพที่ 3.14** ความสามารถในการยึดจนขาด ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.14 แสดงค่าความสามารถในการยึดจนขาด พบว่า ผงเปลือกหอยให้ค่าความสามารถในการยึดจนขาดต่ำสุด อาจเป็นเพราะการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติม และสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า ให้ค่าความสามารถในการยึดจนขาดตามลำดับ อาจเป็นเพราะสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคเล็กและกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ



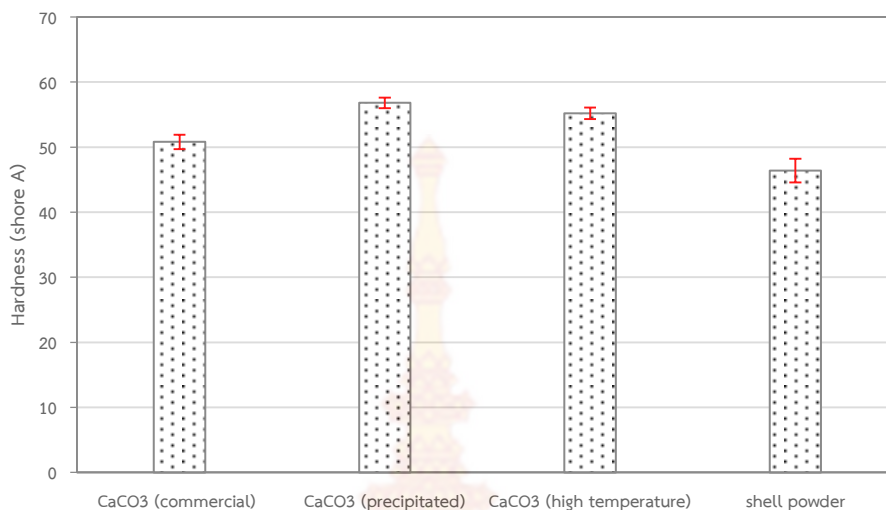
**ภาพที่ 3.15** ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.15 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด พบว่า การใส่สารตัวเติมที่เป็นผงเปลือกหอย จะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำสุด อาจเนื่องมาจากผงเปลือกหอยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ซึ่งแตกต่างจากการใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูงและแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า ที่จะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงตามลำดับ ผลเนื่องมาจากเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าผงเปลือกหอย



**ภาพที่ 3.16** ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion loss) แบบ Taber ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.16 แสดงค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ พบว่า การใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากจากระบวนการตกตะกอน และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง จะให้ค่าความต้านทานต่อการสึกหรอสูงซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก ผลเนื่องมาจากเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก แต่ในขณะที่มีการใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า และผงเปลือกหอย จะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำมากตามลำดับ อาจเนื่องมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าและผงเปลือกหอยมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีไฮโดรเทอร์มอลและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง



ภาพที่ 3.17 ความแข็งของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 3.17 แสดงสมบัติค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่มีการใส่สารตัวเติมที่เป็นผงเปลือกหอย และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าความแข็งของยางที่ใส่สารตัวเติมผงเปลือกหอยให้ค่าความแข็งน้อยสุด และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า ให้ความแข็งมากตามลำดับ กล่าวคือ สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็กจะส่งผลให้ค่าความแข็งของยางสูงกว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคใหญ่

## สรุปผลการทดลอง

### 1. การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีตกตะกอน



### 1.1 ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยแปรความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร พบว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้แตกต่างกันตามเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เพราะกรดไฮโดรคลอริกที่มีเข้มข้นมากขึ้นก็จะละลายผงเปลือกหอยได้เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ตกตะกอนได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้เพิ่มขึ้นน้อยมาก จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ 2 โมลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณความเข้มข้นที่เพียงพอสำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

### 1.2 ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนตต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต โดยแปรความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้แตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เพราะสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นมากขึ้นก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ลดน้อยลง จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ 2 โมลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณความเข้มข้นที่เพียงพอสำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

### 1.3 ผลของอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร แปรอุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอนที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนที่ 20 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอน ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ลดน้อยลง เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอน คือ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

### 1.4 ผลของอิทธิพลของระยะเวลาในการตกตะกอนต่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ละลายเปลือกหอย 50 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใช้ อุณหภูมิในการตกตะกอนที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนโดยแปรระยะเวลาที่ 10, 20 และ 30 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน ซึ่งเมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ได้ปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่พอมาถึงจุดหนึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้

เพิ่มขึ้นน้อยมาก เพราะฉะนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอนคือ 20 ชั่วโมง

## 2. การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูง

### 2.1 ผลของอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาต่อการปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

ซึ่งเปลือกหอยปริมาณ 120 กรัม นำไปเผาที่เตาเผาอุณหภูมิสูง โดยแปรอุณหภูมิในการเผาที่ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จะแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ได้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ลดน้อยลงเพราะในขณะที่เผาจะทำให้ผงเปลือกหอยเกิดการสลายตัว และเมื่อใช้อุณหภูมิที่ต่ำอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่ดี เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่ต่ำเกินไปและไม่สูงเกินไปจนทำให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต

## 3. อิทธิพลของชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยแปรชนิดของสารตัวเติม 4 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และผงเปลือกหอย พบว่า 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความแข็ง พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตจากกระบวนการตกตะกอนให้ค่าดีที่สุด ตามด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจากการเผา และแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า มากตามลำดับ อาจเป็นเพราะสารตัวเติมมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ โดยที่ผงเปลือกหอยจะให้ค่าต่ำที่สุด อาจเป็นเพราะอนุภาคใหญ่ทำให้กระจายตัวในยางธรรมชาติได้ไม่ดี

## เอกสารอ้างอิง

- นิชิตินา รุ่งปิ่น สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และ ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ .2553.  
วิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ. การประชุมสัมมนา วิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- นิชิตินา รุ่งปิ่น. 2554 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเชอรี่และหอยนางรมเป็นสารเสริมแรงสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
- นิชิตินา รุ่งปิ่น สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และ ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ .2553.  
วิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ. การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

- นิชธิมา รุ่งปิ่น. 2554 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเชอร์รี่และหอยนางรมเป็นสารเสริมแรงสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
- ปัตตะ ฮาแว พนิดา สุมานะตระกูล ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ และนิติธร ชูศรี. 2558. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแคลเซียม คาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงด้วยเทคนิคการขยายตัวอย่างรวดเร็วของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือ สภาวะวิกฤติ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2558
- พงษ์ธร แซ่ฮวย. 2548. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).  
พรพรรณ นิธิอุทัย . 2528 . สารเคมีสำหรับยาง . ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ .ปัตตานี.
- สุภกร บุญยืน มณฑา มาลัยทอง อภิสสิทธิ์ โพธิ์แก้ว เบญญา เชิดหิรัญกร และอิสรพงษ์ เชื้อสันเทียะ. 2558. การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย. Thai journal of science and technology ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2558.

