

การสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเพื่อใช้เป็น
สารตัวเติมในแอลดีพีอีในกระบวนการเป่าฟิล์ม

SYNTHESIS OF NANOCALCIUM CARBONATE FROM SHELLS AS
FILLER IN LDPE BLOWN FILM PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชนเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-014-012

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเพื่อใช้เป็น
สารตัวเติมในแอลดีพีอีในกระบวนการเป่าฟิล์ม

SYNTHESIS OF NANOCALCIUM CARBONATE FROM SHELLS AS
FILLER IN LDPE BLOWN FILM PROCESS



T143995



b. 00 266991
i.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 143995
รับเดือนปี..... 10 ต.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-014-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF NANOCALCIUM CARBONATE FROM SHELLS AS
FILLER IN LDPE BLOWN FILM PROCESS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMUTL-2016-SC-M-014-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในกระบวนการเป่าฟิล์ม LDPE”
(SYNTHESIS OF NANOCALCIUM CARBONATE FROM SHELLS AS FILLER IN LDPE BLOWN FILM PROCESS)

ชื่อนักศึกษา นายณัฐพงษ์ พิณปรุ
รหัสประจำตัว 56605044
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ ประธานกรรมการ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) รศ.ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 13 มิถุนายน พ.ศ.2559 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาเคมี อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยลักษณะ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณิ ธนะชรีพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 12 เดือน 11 พ.ศ. 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในแอลดีพีอีในกระบวนการเป่าฟิล์ม
นักศึกษา	นาย ญัฐพงษ์ พินปรุ
รหัสประจำตัว	56605044
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ที่อยู่ในรูปของแคลไซต์จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ โดยใช้วิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal method) เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE) โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริก 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 และเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้นำมาทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เทคนิควิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน เทคนิคการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารโดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แสดงให้เห็นว่าในเปลือกหอยมีปริมาณ CaCO_3 สูงถึง 95-98% โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแคลไซน์คือที่ 450 องศาเซลเซียสจะสามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอะราโกไนท์เป็นแคลไซต์ได้ ผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ พบว่า CaCO_3 จากเปลือกหอยจะมีโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์หลังผ่านกระบวนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ร่วมกับวิธีโซลโวเทอร์มอล การตรวจสอบสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่า CaCO_3 จากเปลือกหอยมีขนาดอนุภาคที่เล็ก กลม และเป็นแผ่น และการตรวจสอบขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูงพบว่า CaCO_3 มีขนาดอนุภาคและการกระจายตัวอยู่ในช่วง 23.4-85.4 นาโนเมตร

จากนั้นทำการศึกษาอัตราส่วนของ LDPE : CaCO_3 จากเปลือกหอยที่ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 60:40, 50:50 และ 40:60 โดยใช้พาราฟินออยล์ 0.5 % เป็นสารช่วยในการผสม และทำการวัดค่าดัชนีการไหล และทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม นำมาศึกษาสมบัติเชิงกล เทคนิควิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน สัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นทำการเลือกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ดีที่สุดเปรียบเทียบกับการใช้ nano-CaCO₃ ในทางการค้า เป็นสารตัวเติม จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ CaCO₃ จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมที่ 10% โดยน้ำหนัก แต่จะทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลกับ nano-CaCO₃ ที่ 10% โดยน้ำหนัก จากทางการค้า พบว่ามีค่าต่ำกว่าทั้งค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ผลการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงให้เห็นว่าการใช้ CaCO₃ จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมที่ 10% โดยน้ำหนัก จะทำให้การสลายตัวทางความร้อนมีค่าสูงกว่าฟิล์ม LDPE ที่ไม่ได้มีการผสม CaCO₃ จากเปลือกหอย โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะพบพีกเอกลักษณ์ของ LDPE และ CaCO₃ ที่ระนาบ (110) และ (104) ในฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต ผลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนกับการเกิดผลึกพบว่าความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ CaCO₃ เป็นสารตัวเติมที่ 10% โดยน้ำหนัก และการตรวจสอบสัญญาณวิทยาแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวและการยึดเกาะที่ดีของอนุภาค CaCO₃ บนพอลิเมอร์เมทริกซ์

คำสำคัญ : นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต, วิธีโซโวเทอมอล, หอยแครง, หอยแมลงภู่, หอยตลับ, ฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Synthesis of nanocalcium carbonate from shells as filler in LDPE blown film process
Student	Nattapong Pinpru
Student ID	56605044
Degree	Master of science
Program	Technology polymer
Year	2016
Thesis adviser	Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongkolchai

ABSTRACT

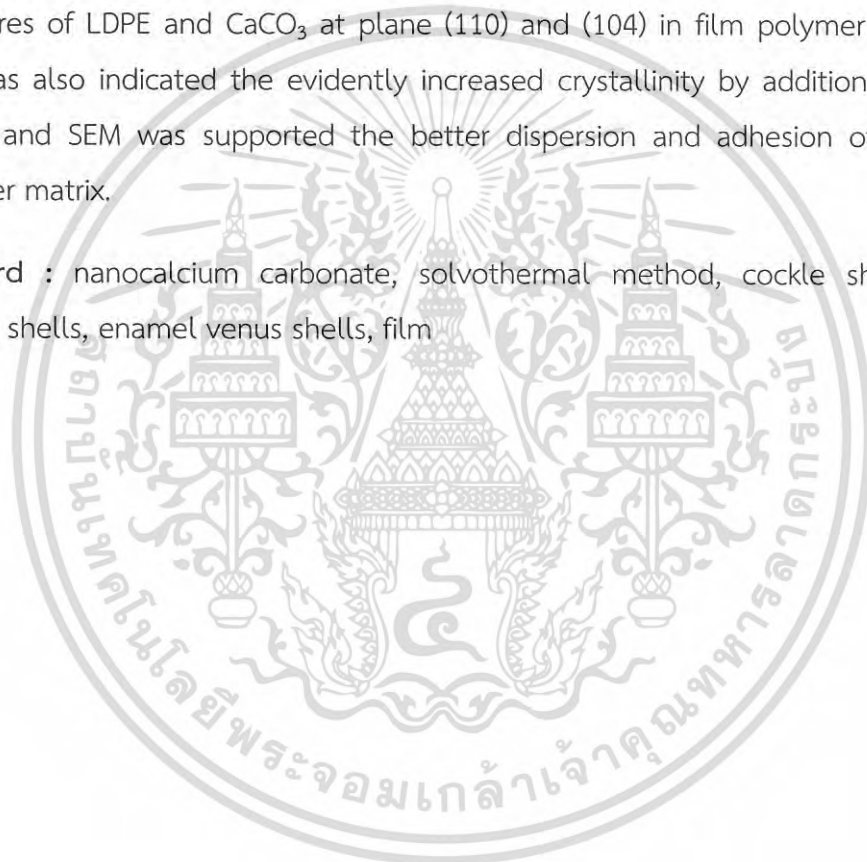
This research was synthesized Nanoparticle of calcium carbonate in calcite form from cockle, green mussel and enamel venus shells prepared by solvothermal method which is widely used as filler in low density polyethylene (LDPE). The surface of nanoparticles CaCO_3 was modified with 2% wt% stearic acid for better dispersion and adhesion between the nanoparticles CaCO_3 and polymer matrix. The synthesized nanoparticles CaCO_3 were characterized by X-ray fluorescence spectrometry (XRF), Thermogravimetric analysis (TGA), Fourier transmission infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray powder diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM) and Field-emission electron microscopy (FE-SEM). The XRF results showed the high content of CaCO_3 from shells of 95-98 wt%. The TGA results were revealed an temperature for calcination was 450°C for aragonite to calcite form. XRD pattern and FT-IR spectra were demonstrated that the CaCO_3 from shells dominated a calcite crystal structure after calcination at 450°C via solvothermal method. The morphological results obtained from SEM were indicated the small-round and sheet particle CaCO_3 from shells of all systems. Field-emission electron microscope image of the prepared were shown that the particle size distribution of the CaCO_3 particles was about 23.4–85.4 nm.

The optimum ratio of LDPE: CaCO_3 from shells was further studied as 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 60:40, 50:50 and 40:60, respectively. The composites were prepared using an internal mixer with 0.5% paraffin oil as a processing aid and then measured the melt flow index (MFI) from blown film process. Mechanical properties, Thermogravimetric analysis (TGA), X-ray powder diffraction (XRD), Differential scanning calorimetry (DSC), Scanning electron microscopy (SEM) and dispersion ability of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

calcium carbonate were further characterized and compared the best mechanical properties to the commercial CaCO_3 . The mechanical properties results were indicated the highest tensile strength and modulus at 10 wt% CaCO_3 from shells content but decreased percentage of elongation at break when compared the mechanical properties at 10 wt% to the commercial nano- CaCO_3 , it was found that the tensile strength, modulus and percent elongation at break of commercial nano- CaCO_3 was higher than the CaCO_3 from shell as filler. TGA of film polymer composite revealed the content of CaCO_3 at 10 wt% from shell had increased temperature degradation more than that of neat LDPE film. XRD pattern were shown the peak signatures of LDPE and CaCO_3 at plane (110) and (104) in film polymer composite. DSC was also indicated the evidently increased crystallinity by addition of 10 wt% CaCO_3 and SEM was supported the better dispersion and adhesion of CaCO_3 on polymer matrix.

Keyword : nanocalcium carbonate, solvothermal method, cockle shells, green mussel shells, enamel venus shells, film



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาโครงการพิเศษในหัวข้อการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิดได้แก่ หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในกระบวนการเป่าฟิล์ม งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีหากไม่ได้รับการช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับงานวิจัย และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นตลอดจนให้ความหวังใจจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และ รศ.ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ที่เป็นกรรมการสอบและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องรวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขงานวิทยานิพนธ์สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. บรรจง บุญชม ที่นำแนวคิด วิธีการสังเคราะห์และเปลือกหอยมาเป็นแหล่งวัตถุดิบในการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเบิกเครื่องมืออุปกรณ์ รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการต่างๆ

ขอขอบพระคุณบริษัทสุรินทร์ออย์เคมีคอล ไทยแลนด์ที่ให้ความอนุเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต ขนาด 2-3 ไมครอน จำนวน 10 กิโลกรัม สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้โอกาสเข้าศึกษาในระดับปริญญาโทและได้รับการสนับสนุนที่ดีตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ของผู้จัดทำที่เป็นกำลังใจและคอยให้ความหวังใจอยู่เสมอ ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจในงานด้านนี้และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

ณัฐพงษ์ พินปรุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต.....	4
2.1.1 ชนิดของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	4
2.2 เปลือกหอย.....	8
2.2.1 หอยแครง.....	8
2.2.2 หอยแมลงภู่.....	9
2.2.3 หอยตลับ.....	10
2.3 กระบวนการฟอกขาวเปลือกหอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์.....	10
2.4 กระบวนการแคลไซน์ (Calcination method).....	11
2.5 วิธีการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต	11
2.5.1 วิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal method).....	14
2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	16
2.7 การใช้สารตัวเติม	16
2.8 อิทธิพลของการใช้สารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์.....	17
2.8.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength).....	17
2.8.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break).....	18
2.8.3 มอดุลัส (Modulus).....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9 การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม.....	18
2.10 สารหล่อลื่น (Lubricants).....	19
2.10.1 พาราฟิน ออยล์ (Paraffin oil).....	21
2.11 การผสมสารตัวเติมกับพอลิเมอร์.....	21
2.11.1 เครื่องผสมภายใน	22
2.11.2 เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	23
2.11.3 การบดย่อยพลาสติก.....	23
2.12 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก	24
2.13 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	25
2.13.1 การทดสอบความแข็งแรงดึง	25
2.13.2 การทดสอบอัตราการไหลของพอลิเมอร์.....	26
2.14 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ.....	27
2.15 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	28
2.16 การตรวจวิเคราะห์สมบัติของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	28
2.17 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึก	29
2.18 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของสาร	30
2.19 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
2.20 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยภาพ Binary image	32
2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	43
3.2 วัสดุและสารเคมี	45
3.3 กระบวนการเตรียมผงแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอย.....	48
3.4 กระบวนการเผาแคลไซน์	49
3.5 กระบวนการสังเคราะห์ nano-CaCO ₃ โดยวิธี Solvothermal.....	49
3.6 กระบวนการปรับปรุงพื้นผิว CaCO ₃ จากเปลือกหอย	50
3.7 กระบวนการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO ₃ จากเปลือกหอย	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.8 กระบวนการบดย่อยพลาสติกสำหรับเตรียมใช้ขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	53
3.9 การทดสอบสมบัติการไหลของพลาสติก.....	53
3.10 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม	54
3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	56
4.1 การสังเคราะห์ nano-CaCO ₃ จากเปลือกหอย	56
4.1.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของ CaCO ₃ จากเปลือกหอย	56
4.1.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค XRF.....	57
4.1.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของ CaCO ₃ จากเปลือกหอยโดย TGA.....	59
4.1.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของ CaCO ₃ จากเปลือกหอยโดยเทคนิค FTIR	62
4.1.5 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	64
4.1.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO ₃ ก่อนทำการสังเคราะห์ด้วย กระบวนการแคลไซน์.....	67
4.1.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO ₃ หลังทำการสังเคราะห์ด้วย กระบวนการแคลไซน์.....	68
4.1.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO ₃ หลังทำการสังเคราะห์ด้วย วิธีโซโวลเทอร์มอลด้วยเทคนิค FE-SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	69
4.1.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO ₃ หลังทำการสังเคราะห์ด้วย วิธีโซโวลเทอร์มอลด้วยเทคนิค FE-SEM ที่กำลังขยาย 70,000 เท่า	70
4.1.10 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค CaCO ₃ หลังจากผ่าน กระบวนการสังเคราะห์	71
4.1.11 การหาขนาดอนุภาค CaCO ₃ จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ หลังจากทำการเผาแคลไซน์และลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอล.....	72
4.1.12 การทำ Binary image เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO ₃ จาก เปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ หลังจากทำการเผาแคลไซน์และ ลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอล	73
4.1.13 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของ CaCO ₃ จากเปลือกหอยหลังจากทำการปรับปรุง พื้นผิวด้วยกรดสเตียริก.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 การผสม nano-CaCO ₃ จากเปลือกหอยกับเม็ดพลาสติก LDPE	76
4.2.1 การวัดความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	77
4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตและการตรวจวิเคราะห์	78
4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพล ขนาดอนุภาค การกระจายตัวของ CaCO ₃ จากเปลือก หอยต่อสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือก หอย.....	78
4.3.1.1 ค่าความแข็งแรงดึง	78
4.3.1.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด	85
4.3.1.3 ค่ามอดุลัส.....	87
4.3.1.4 ผลการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต	88
4.3.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต	96
4.3.2.1 การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต	96
4.3.2.2 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึก	98
4.3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างผลึก	99
4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือกหอยเปรียบเทียบกับ ทางการค้า	101
4.4.1 ค่าความแข็งแรงดึง.....	101
4.4.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด	102
4.4.3 ค่ามอดุลัส	103
4.4.4 ผลการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตจากทางการค้า	104
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	106
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
เอกสารอ้างอิง	110
ภาคผนวก	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วิธีการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต	12
2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของ LDPE และ HDPE.....	16
2.3 ลักษณะเฉพาะของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก	20
2.4 ข้อดีและข้อเสีย ของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก	20
2.5 สารหล่อลื่นตามประเภทของพอลิเมอร์	21
2.6 สมบัติทางเคมีของพาราฟิน ออยล์	21
3.1 แสดงสมบัติเม็ดพลาสติก LDPE จาก PTT Global Chemical Public	45
3.2 แสดงสมบัติแคลเซียมคาร์บอเนต บริษัทสุรินทร์ออย่าเคมีคอลไทยแลนด์	45
3.3 แสดงสมบัติ nano-CaCO ₃ บริษัทไทยพอลิเคมีคอล จำกัด	46
3.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ nano-CaCO ₃ บริษัทไทยพอลิเคมีคอล จำกัด	46
3.5 สูตรในการผสมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO ₃ จากเปลือกหอย	52
4.1 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค XRF.....	57
4.2 สูตรในการผสมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO ₃ จากเปลือกหอย	76
4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตสำหรับเตรียมฟิล์ม	77
4.4 การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO ₃	97
4.5 แสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์คอมโพสิตและความเป็นผลึกจากเทคนิค DSC 99	
5.1 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตผสม CaCO ₃ จากเปลือกหอย.....	107
5.2 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตผสม CaCO ₃ จากเปลือกหอยเปรียบเทียบกับการใช้ CaCO ₃ จากทางการค้า.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบผลึกเฮกซโกนัลของแคลไซต์	5
2.2 ลักษณะผลึกแคลไซต์	6
2.3 ระบบผลึกออร์โธโรมบิกของอะราโกไนท์.....	6
2.4 ลักษณะผลึกอะราโกไนท์	7
2.5 ระบบผลึกเฮกซโกนอลของแวร์ทีไรต์	7
2.6 ลักษณะผลึกแวร์ทีไรต์.....	8
2.7 ลักษณะทั่วไปของเปลือกหอยแครง.....	8
2.8 ภาพลักษณะทางชีววิทยาของหอยและเปลือกหอยแครง	9
2.9 ลักษณะทั่วไปของเปลือกหอยแมลงภู่.....	9
2.10 ลักษณะทั่วไปของเปลือกหอยตลับ.....	10
2.11 แสดงช่วงอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของ CaCO_3	11
2.12 แผนผังแสดงกระบวนการโซโวเทอร์มอล	14
2.13 แสดงกลไกและวิธีการเปลี่ยนขนาดของอนุภาคนาโนจากวิธีโซโวเทอร์มอล	15
2.14 แสดงชุดอุปกรณ์โซโวเทอร์มอล	15
2.15 แสดงความแข็งแรงดึงเมื่อสารตัวเต็มมีขนาดต่างกัน.....	17
2.16 โครงสร้างของกรตสเดयरริก.....	19
2.17 ลักษณะการผสมและกระจายตัวของสารตัวเต็ม	22
2.18 เครื่องผสมภายใน	22
2.19 เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	23
2.20 เครื่องบดย่อยพลาสติก	23
2.21 กระบวนการ Blown film Extrusion	24
2.22 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงพฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง.....	26
2.23 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพอลิเมอร์.....	27
2.24 แสดงการทำงานของเครื่อง XRF.....	27
2.25 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	28
2.26 แสดงการทำงานของเครื่อง TGA	29
2.27 แสดงการทำงานของเครื่อง DSC	29
2.28 แสดงการทำงานของเครื่อง FTIR.....	30
2.29 แสดงการทำงานของเครื่อง SEM.....	31
2.30 ตัวอย่างการหาการกระจายตัวของอนุภาคจากโปรแกรม Image J	32
2.31 ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวจากโปรแกรม Image J	32
2.32 แสดงขนาดอนุภาคของ nano- CaCO_3 ที่อยู่ในรูปของแคลไซต์และแวร์ทีไรต์	33
2.33 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของผลึกแคลไซต์และ แวร์ทีไรต์.....	33
2.34 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของ nano- CaCO_3 ในรูป แคลไซต์.....	34

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.35 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาค nano-CaCO ₃	34
2.36 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาค nano-CaCO ₃	34
2.37 การตรวจหามูฟกัซันด้วย FTIR spectra ของ CaCO ₃ nanocrystals aragonite phase	35
2.38 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ผง nano-CaCO ₃ เปลือก หอยแครง	35
2.39 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดผง nano-CaCO ₃ เปลือก หอยแครง	36
2.40 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน nano-CaCO ₃ เปลือก หอยแครง	36
2.41 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ของ CaCO ₃ จากเกล็ดปลา...	37
2.42 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสัณฐานวิทยา CaCO ₃ จาก เกล็ดปลา	37
2.43 แสดงสมบัติเชิงกลของ CaCO ₃ จากเกล็ดปลาเปรียบเทียบกับการใช้ nano-CaCO ₃ จาก ทางการค้า.....	38
2.44 การตรวจหามูฟกัซันด้วย FTIR spectra ของ nano-CaCO ₃ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิว และไม่มี.....	38
2.45 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติไฮโดรโฟบิกของ nano-CaCO ₃ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิว และไม่มี.....	39
2.46 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงสัณฐานวิทยา nano-CaCO ₃ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดโอเลอิก	39
2.47 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค (X-ray diffraction).....	40
2.48 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy) ของอนุภาค nano-CaCO ₃ จากเปลือกไข่ จาก (a-d) เมื่อใช้สภาวะในการทดลองต่างกัน	40
2.49 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) ของอนุภาค Talc และ CaCO ₃ และ Talc/PVA และ CaCO ₃ /PVA.....	41
2.50 ภาพ a แสดงสมบัติ Tensile strength เมื่อใช้ CaCO ₃ และ Talc เป็นสารเติมใน PVA.....	41
2.51 ภาพ b แสดงสมบัติ Modulus เมื่อใช้ CaCO ₃ และ Talc เป็นสารเติมใน PVA.....	42
2.52 ภาพ C แสดงสมบัติ Elongation at break เมื่อใช้ CaCO ₃ และ Talc เป็นสารเติมใน.....	42
3.1 แผนผังการเผาแคลไซน์.....	49
3.2 วิธีการเตรียม Solvothermal method.....	50
3.3 เครื่องผสมระบบปิดอินเตอร์มิกซ์	52
3.4 เครื่องบดพลาสติก	53
3.5 เครื่องทดสอบสมบัติการไหลของพลาสติก	53
3.6 เครื่อง Blown film machine.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	56
4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของ CaCO_3 จากเปลือกหอยในแต่ละชนิด.....	58
4.2 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุในเปลือกหอยแครง.....	58
4.3 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุในเปลือกหอยแมลงภู่.....	58
4.4 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุในเปลือกหอยตลับ.....	59
4.5 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแครง.....	60
4.6 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแมลงภู่.....	60
4.7 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยตลับ.....	61
4.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของผงผลึก CaCO_3 จากเปลือกหอย ก่อนแคลไซน์.....	63
4.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของผงผลึก CaCO_3 จากเปลือกหอย หลังแคลไซน์.....	64
4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยก่อนแคลไซน์.....	65
4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยหลังแคลไซน์.....	66
4.12 แสดงสัญญาณวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยก่อนกระบวนการแคลไซน์.....	67
4.13 แสดงสัญญาณวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังกระบวนการแคลไซน์.....	68
4.14 แสดงสัญญาณวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังกระบวนการโซโวเทอร์มอล ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	69
4.15 แสดงสัญญาณวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังกระบวนการโซโวเทอร์มอล ที่กำลังขยาย 70,000 เท่า.....	70
4.16 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค CaCO_3 หลังจากผ่านกระบวนการ สังเคราะห์.....	71
4.17 การหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครงหลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแคลไซน์ และวิธีโซโวเทอร์มอล.....	72
4.18 การหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่หลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแคลไซน์ และวิธีโซโวเทอร์มอล.....	72
4.19 การหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับหลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแคลไซน์ และวิธีโซโวเทอร์มอล.....	73
4.20 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง.....	73
4.21 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่.....	74
4.22 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ.....	74
4.23 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของ CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย กรดสเตียริกโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทมิเตอร์.....	75
4.24 ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:CS.....	79
4.25 ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:GS.....	79
4.26 ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:ES.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	81
4.28 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่ (GS) ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	81
4.29 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	81
4.30 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) ในสูตรที่ 4 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	82
4.31 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่ (GS) ในสูตรที่ 4 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	83
4.32 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในสูตรที่ 4 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	84
4.33 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:CS.....	85
4.34 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:GS.....	85
4.35 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:ES.....	86
4.36 ค่ามอดูลัส แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:CS.....	87
4.37 ค่ามอดูลัส แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:GS.....	87
4.38 ค่ามอดูลัส แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:ES.....	88
4.39 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3000 เท่า และ 5000 เท่า.....	89
4.40 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:CS.....	90
4.41 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:GS.....	92
4.42 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE:ES.....	94
4.43 การสลายตัวทางความร้อนของ LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE: CaCO_3 จากเปลือกหอย.....	97

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 อุณหภูมิในการหลอมเหลวของ LDPE และ LDPE ที่ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย.....	98
4.45 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม LDPE.....	100
4.46 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE: CaCO_3 จากเปลือกหอย	100
4.47 แสดงค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE: CaCO_3 จากทางการค้าและจากเปลือกหอยในแต่ละสูตร.....	101
4.48 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE: CaCO_3 จากทางการค้าและจากเปลือกหอยในแต่ละสูตร.....	102
4.49 ค่ามอดูลัสในแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE: CaCO_3 จากทางการค้าและจากเปลือกหอยในแต่ละสูตร.....	103
4.50 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม nano- CaCO_3 (Nano) จากทางการค้า และจากเปลือกหอยแครง (CS) หอยแมลงภู่ (GS) และหอยตลับ (ES) ในปริมาณ 10 %wt ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า..	104
4.51 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 (CA) ขนาด 2-3 ไมครอน จากทางการค้าในปริมาณ 10 %wt ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีความสำคัญอย่างมากและถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยา และ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ แคลเซียมคาร์บอเนตจัดเป็นแร่อนินทรีย์ (inorganic minerals) ที่พบได้ในธรรมชาติทั้งในสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต โดยเฉพาะในเปลือกหอย เช่น หอยแครง หอยแมลงภู่ และ หอยตลับ พบว่ามีแคลเซียมคาร์บอเนตสูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับเปลือกหอยชนิดอื่นๆ แคลเซียมคาร์บอเนตมีรูปแบบพหุสัณฐาน (Polymorphs) แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ผลึกแคลไซต์ (Calcite) ผลึกอะราโกไนท์ (Aragonite) และผลึกแวก์ไทรต์ (Vaterite) ในธรรมชาติพบว่าผลึกแคลไซต์เป็นผลึกที่มีเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic stability) สูง และมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง ผลึกอะราโกไนท์มีเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ต่ำกว่าผลึกแคลไซต์ และไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง ส่วนผลึกแวก์ไทรต์เป็นผลึกที่มีเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ต่ำมากและไม่พบในธรรมชาติ สำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตที่พบในเปลือกหอยพบว่าเกิดทั้งผลึกแคลไซต์และผลึกอะราโกไนท์อยู่ร่วมกัน แต่จะมีปริมาณผลึกแคลไซต์และผลึกอะราโกไนท์ในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามชนิดของเปลือกหอยแต่ละชนิด ปัจจุบันมีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากการค้าในปริมาณที่สูงมาก สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกเพื่อลดต้นทุนและลดการใช้พลาสติก ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตจากการค้าจะมีลักษณะอนุภาคในระดับไมโครเมตรถึงระดับมิลลิเมตรซึ่งไม่สามารถใช้เสริมแรงได้และจะใช้เป็นสารตัวเติมเท่านั้นในพลาสติก จึงทำให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกลดลงอย่างเห็นได้ชัด และถ้าต้องการให้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ จะต้องทำให้ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร จึงจะสามารถใช้เป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงในพลาสติกได้ และยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลบางประการของพลาสติกให้สูงขึ้นอีกด้วย จากที่ได้กล่าวมาในช่วงต้นเกี่ยวกับแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าขยะจากเปลือกหอยเหลือทิ้งในประเทศไทยมีปริมาณที่สูงมากถึง 10,000 ตันต่อปี [1] และมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะจากเปลือกหอยเหล่านี้ในปริมาณที่สูงในขณะเดียวกันก็พบว่าขยะพลาสติกในประเทศไทยก็มีปริมาณที่สูงมากถึง 12,000 ตันต่อปี [2]

ในปี 2013 Tarig และ Hassan [3] ได้ทำการเตรียม nano- CaCO_3 จากเปลือกไข่เหลือทิ้งด้วยวิธีแมคคาโนเคมีคอล (Mechanochemical method) ร่วมกับวิธีโซโนเคมีคอล (Sonochemical method) พบว่า CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปของผลึกแคลไซต์และมีขนาดอนุภาคประมาณ 10 นาโนเมตร

ในปี 2013 Bin Wang และ Qi Wang [4] ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติต่างๆ ของ CaCO_3 และ Talc ที่ใช้เป็นสารตัวเติมใน Poly vinyl alcohol (PVA) พบว่าทั้ง CaCO_3 และ Talc ที่ใช้เป็นสารตัวเติมนั้นจะทำให้ Tensile strength และ Modulus สูงขึ้น แต่จะทำให้ % Elongation ลดต่ำลงตามปริมาณ CaCO_3 และ Talc ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังพบว่าในกระบวนการขึ้นรูปนั้นจะช่วยลด Die swell เมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 และ Talc เป็นสารตัวเติม

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่อยู่ในรูปผลึกของแคลไซต์จากเปลือกหอย 3 ชนิด ได้แก่ หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ในพลาสติก โดยเห็นถึงปัญหาที่พบจากขยะเปลือกหอยที่มีปริมาณสูงมาก เนื่องมาจากหอยทั้ง 3 ชนิด เป็นที่นิยมนำมารับประทานกันมากเพราะมีรสชาติที่ดีและราคาไม่สูงมากนัก เหมาะกับสถานะเศรษฐกิจและสังคมไทย จึงมีการเพาะเลี้ยงในฟาร์มเพื่อการบริโภคและการส่งออกเป็นจำนวนมาก สิ่งที่ตามมาหลังจากการบริโภคคือขยะจากเปลือกหอยที่ไม่มีวิธีกำจัดที่ดีพอและไม่สามารถนำมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้ นอกจากนี้แล้วยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับขยะจากเปลือกหอยได้อีกด้วย งานวิจัยนี้นอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะจากเปลือกหอยและช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกหอยแล้ว ยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการใช้พลาสติกลงได้อีกด้วย และที่สำคัญสำหรับงานวิจัยนี้คือช่วยในการปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก LDPE โดยใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมในกระบวนการเป่าฟิล์ม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 สามารถสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-CaCO_3) ให้อยู่ในรูปของแคลไซต์จากเปลือกหอยเหลือทิ้งทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับได้
- 1.2.2 เพื่อให้ทราบ ขนาดอนุภาค ปริมาณ และลักษณะพื้นผิวของ CaCO_3 ที่มีผลต่อสมบัติของ LDPE: CaCO_3 จากเปลือกหอย
- 1.2.3 เพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่างๆของ LDPE: CaCO_3
- 1.2.4 สามารถใช้ nano-CaCO_3 เป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนในการใช้พลาสติก LDPE

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการสังเคราะห์ nano-CaCO_3 จากเปลือกหอยเหลือทิ้งด้วยวิธีโซโนโพรมอลและทำการตรวจวิเคราะห์โดยเทคนิค
 - 1.3.1.1 ศึกษาการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
 - 1.3.1.2 ศึกษาการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนโดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อได้รับความร้อน
 - 1.3.1.3 ศึกษาการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของสารโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรเมตรี
 - 1.3.1.4 ศึกษาการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
 - 1.3.1.5 ศึกษาสัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของ nano-CaCO_3 จากเปลือกหอย และ CaCO_3 จากทางการค้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของ LDPE: CaCO_3 ประกอบด้วย
 - 1.3.2.1 ศึกษาสมบัติการไหล
 - 1.3.2.2 ศึกษากระบวนการ Blown film process
 - 1.3.2.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล
 - Tensile Strength

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Modulus
- Elongation at break
- 1.3.2.4 ศึกษาการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนโดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่อได้รับความร้อน
- 1.3.2.5 ศึกษาการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.3.2.6 ศึกษาการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึกโดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน
- 1.3.2.7 ศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 ใน LDPE ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูป CaCO_3 เพื่อเป็นสารตัวเติมในพลาสติกได้
- 1.4.2 สามารถลดต้นทุนการใช้พลาสติกลง เมื่อใช้ CaCO_3 ที่ได้จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมโดยที่ยังให้สมบัติต่างๆที่ดีขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับ CaCO_3 จากเกรดการค้า
- 1.4.3 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกหอยเหลือทิ้งได้



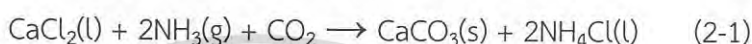
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จัดเป็นสารตัวเติม (filler) ในพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีราคาถูก และเป็นสารตัวเติมที่หาได้ง่ายตามธรรมชาติ เช่น ใน เปลือกหอย เปลือกไข่ หรือ ในดิน ซึ่งมีอยู่อย่างมากมายในธรรมชาติ นอกจากนี้แล้วยังสามารถสังเคราะห์ CaCO_3 ได้จากกระบวนการทางเคมีอีกด้วย



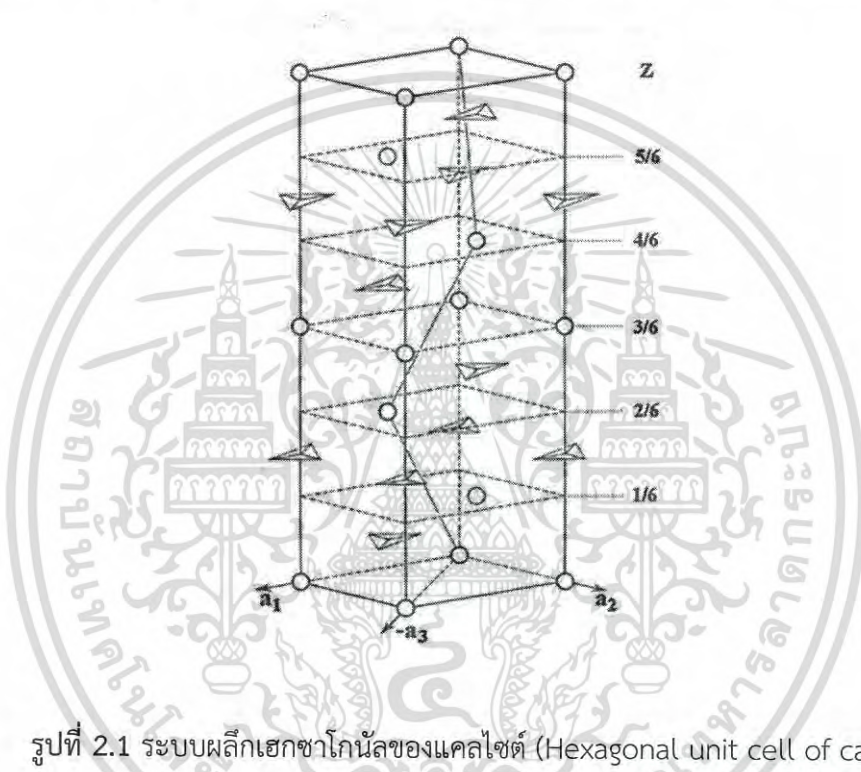
CaCO_3 มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภท เนื่องจากมีคุณสมบัติที่บดให้ละเอียดได้ง่าย โดยผงละเอียดของแคลเซียมคาร์บอเนต มีความเสถียรทางเคมีและไม่เป็นพิษ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติพิเศษอื่น ๆ เช่น ความขาว (brightness) การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) ที่เอื้อประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยาง และ อุตสาหกรรมสี เป็นต้น CaCO_3 นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกประมาณร้อยละ 65 คิดเป็นประมาณ 6 ล้านตันต่อปี ถือว่าเป็นฟิลเลอร์ที่มีความสำคัญมากสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติก เช่นการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในพอลิเอทิลีน (Polyethylene) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น จะช่วยเพิ่มความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) แต่จะทำให้สมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และสมบัติการโค้งงอ (Flexural properties) ลดลง เป็นต้น CaCO_3 ยังสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของพื้นผิว ได้แก่ ประเภทที่มีการปรับปรุงพื้นผิวและไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งสมบัติของ CaCO_3 ที่มีลักษณะเด่น คือ มีความบริสุทธิ์สูง มีความขาวสูง ร้อยละ 95-96 มีค่าดัชนีหักเหต่ำ ทำให้ได้สีขาวที่เข้มและสม่ำเสมอ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $32-40 \text{ m}^2/\text{g}$ มีการกักร้อนต่ำ จึงช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรที่มีการกระจายตัวดีโดยเฉพาะเกรดที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ที่สำคัญคือ CaCO_3 มีราคาถูกเมื่อเทียบกับพลาสติก จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกเพื่อเป็นการลดต้นทุนให้ต่ำลงในอุตสาหกรรม

2.1.1 ชนิดของแคลเซียมคาร์บอเนต (Type of Calcium carbonate ; CaCO_3)

CaCO_3 สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกของแคลไซต์ (Calcite) เป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด โครงสร้างของอะราโกไนท์ (Aragonite) และโครงสร้างของแวม์ที่ไรต์ (Vaterite) โดยอะราโกไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ส่วนแวม์ที่ไรต์นั้นไม่เสถียร

1. แคลไซต์ (Calcite) [6]

มีรูปผลึก ระบบเฮกซาโกนัล (Hexagonal unit cell) แสดงดังรูปที่ 2.1 พบเกิดเป็นรูปผลึกได้มากกว่า 300 แบบและเป็นผลึกที่ซับซ้อนมาก ซึ่งประกอบด้วยชั้นของไอออนแคลเซียมสลับกับชั้นของไอออนคาร์บอเนตด้วยระยะห่าง $1/12$ เท่าของเซลล์หน่วย แต่ละชั้นของไอออนเหล่านี้เรียงในลักษณะตั้งฉากกับแกน Z ของหน่วยเซลล์ ไอออนคาร์บอเนตในแต่ละชั้นเรียงตัวกันโดยระนาบไอออนขนานกับระนาบของชั้น และหันไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับไอออนคาร์บอเนตในชั้นที่อยู่ติดกันจะมีทิศทางต่างกัน 180 องศา ไอออนแคลเซียมแต่ละไอออนถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอมของไอออนคาร์บอเนตที่อยู่ติดกัน ในแต่ละเซลล์หน่วยประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจำนวน 6 หน่วย



รูปที่ 2.1 ระบบผลึกเฮกซาโกนัลของแคลไซต์ (Hexagonal unit cell of calcite) [6]

ที่พบบ่อยคือรูปผลึกที่เป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหรือมีลักษณะเป็นแท่งหัวแหลมยาว แสดงดังรูปที่ 2.2 คล้ายฟันสุนัขเรียกว่าแร่ฟันหมาหรือหินเขี้ยวหมา มีค่าความแข็งที่ 3 ตามสเกลของโมส์ (Moh's scale) มีความถ่วงจำเพาะ 2.72 มีความวาวคล้ายแก้ว หรือด้านคล้ายดิน โปรงใสถึงโปร่งแสง ปกติมีสีขาวหรือไม่มีสีแต่หากมีมลทินปนจะทำให้มีสีอื่นเช่น สีเทา สีแดง สีเขียว สีเหลือง สีน้ำเงิน สีน้ำตาล หรือสีดำ รอยแยกแนวเรียบเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ลักษณะเป็นแท่ง ปลายแหลมยาวๆ คล้ายฟันสุนัขความวาวคล้ายแก้วมีผงละเอียดสีขาวหรือสีเทา มีสูตรเคมี CaCO_3 มี CaO 56.0 % และ CO_2 44.0 % บางชนิดอาจมีแมงกานีส สังกะสี หรือเหล็กเข้าไปแทนที่ธาตุแคลเซียม หากมีการแทนที่อย่างสมบูรณ์ด้วยธาตุแมงกานีส จะได้เป็นโรโดโครไซต์ แคลไซต์จะทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ คือหยดกรดเกลือแล้วเกิดเป็นฟองฟู (acid test) แต่แร่ตระกูลคาร์บอเนตชนิดอื่นเช่น โดโลไมต์ (dolomite) และ ซิเดอไรต์ (siderite) จะไม่ทำปฏิกิริยาเป็นฟองฟูเหมือนแคลไซต์ นอกจากนี้แคลไซต์ยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถทำให้เกิดการหักเหแสงออกได้เป็นสองแนว (double refraction)

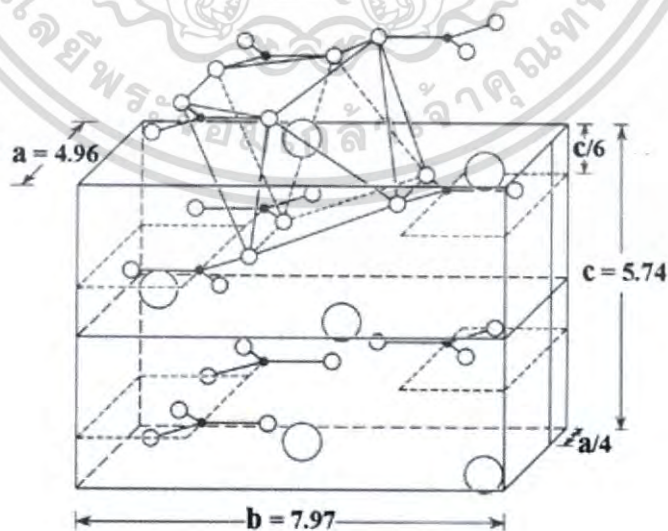
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะผลึกแคลไซต์ [6]

2. อะราโกไนท์ (Aragonite) [7]

มีรูปผลึก ระบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic unit cell) แสดงดังรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยชั้นของไอออนแคลเซียมที่เรียงตัวแบบซูโดเฮกซะโกนอล (pseudo-hexagonal) สลับกับชั้นของไอออนคาร์บอเนต โดยชั้นของไอออนเหล่านี้เรียงตั้งฉากกับแกน Z ของเซลล์ ไอออนคาร์บอเนตเรียงตัวโดยระนาบของไอออนตั้งฉากกับแกน Z ของเซลล์หน่วย คล้ายกับแคลไซต์ แต่ชั้นของไอออนคาร์บอเนตในอะราโกไนท์มีลักษณะยื่น เนื่องจากไอออนคาร์บอเนตในแถวที่อยู่ติดกันแยกตัวเป็น 2 ระดับ ที่เหลื่อมกันขนานกับแกน A ของเซลล์หน่วย ไอออนแคลเซียมแต่ละไอออนถูกล้อมรอบด้วยไอออนคาร์บอเนตจำนวน 6 ไอออน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกประกอบด้วยคาร์บอเนต 3 ไอออน โดยแต่ละไอออนใช้ออกซิเจน 1 อะตอมสร้างพันธะกับไอออนแคลเซียม และอีกกลุ่มหนึ่งประกอบด้วยคาร์บอเนตอีก 3 ไอออน โดยแต่ละไอออนใช้ออกซิเจน 2 อะตอม สร้างพันธะกับไอออนแคลเซียม ดังนั้นไอออนแคลเซียมแต่ละไอออนถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 9 อะตอมของไอออนคาร์บอเนตที่อยู่ติดกัน แต่ละเซลล์หน่วยของอะราโกไนท์ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจำนวน 4 หน่วย



รูปที่ 2.3 ระบบผลึกออร์โธโรมบิกของอะราโกไนท์ (Orthorhombic unit cell of Aragonite) [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะผลึกเป็นแบบแท่งยาว ปลายเรียวแหลมเหมือนแท่งดินสอดำ แสดงดังรูปที่ 2.4 แบบผลึกมีหน้าตัดตรงปลายบน และล่างเหมือนรูปจั่ว หรือ พบแบบเกิดเป็นผลึกแผ่ มีรูปหน้าตัดคล้ายหกเหลี่ยม มีความวาวคล้ายแก้ว ไม่มีสี สีขาว เหลืองอ่อน โปร่งใสจนกระทั่งโปร่งแสง ความแข็ง 3.5 - 4 Moh's scale ความถ่วงจำเพาะ 2.95 มีสูตรเคมี CaCO_3 มี CaO 56.0 % และ CO_2 44.0 % อาจมีสตรอนเทียม สังกะสี และตะกั่ว เข้าแทนที่แคลเซียมได้ สามารถเปลี่ยนเป็นแคลไซต์ที่อุณหภูมิในการเผา 400 องศาเซลเซียสได้



รูปที่ 2.4 ลักษณะผลึกอะราโกไนท์ [7]

3. แวร์ทีไรต์ (Vaterite) [8]

มีรูปผลึก ระบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal unit cell) แสดงดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วยชั้นของไอออนแคลเซียมเรียงตัวสลับกับชั้นของไอออนคาร์บอเนต โดยชั้นของไอออนเหล่านั้นเรียงตั้งฉากกับแกน Z ของเซลล์หน่วย อย่างไรก็ตาม ไอออนคาร์บอเนตในแวร์ทีไรต์ วางตัวในลักษณะที่ระนาบของไอออนขนานกับแกน Z ของเซลล์หน่วย ซึ่งแตกต่างจากไอออนคาร์บอเนตในแคลไซต์และอะราโกไนท์ ในแต่ละเซลล์หน่วยของแวร์ทีไรต์ ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจำนวน 6 หน่วย



รูปที่ 2.5 ระบบผลึกเฮกซะโกนอลของแวร์ทีไรต์ (Hexagonal unit cell of Vaterite) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะผลึกเป็นทรงกลมและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กตั้งแต่ 0.05-5 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 2.6 ไม่มีสีใส มีความเสถียรที่น้อยกว่า แคลไซต์ และอะราโกไนต์ มีความแข็ง 3 Moh's scale ความถ่วงจำเพาะ 2.54 มีสูตรเคมี CaCO_3 มี CaO 56.0% และ CO_2 44.0 % แวร์ทไรต์สามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตได้เมื่อสัมผัสกับน้ำ นอกจากนี้แล้วแวร์ทไรต์ยังมีความสามารถในการละลายที่สูงกว่าแคลไซต์และอะราโกไนต์



รูปที่ 2.6 ลักษณะผลึกแวร์ทไรต์ [8]

2.2 เปลือกหอย

2.2.1 หอยแครง

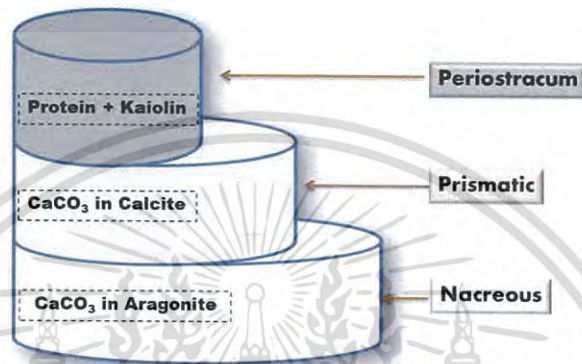
เป็นหอยสองฝาที่มีขนาด และลักษณะเหมือนกัน มีเปลือกด้านนอกค่อนข้างหนา ด้านในโปร่งนูน มีซี่ฟันแข็งแรงเรียงกันเป็นแถวทางตอนบนของส่วนที่เป็นบานพับ ด้านนอกของเปลือกมีร่องยาว เรียงกันเป็นแถวประมาณ 20 แถว สีของเปลือกไม่แน่นอน แสดงดังรูปที่ 2.7 มีสันและร่องในแนวตั้ง (radial rib and radial groove) มีเอ็นอยู่ด้านนอกของเปลือก แมนเทิลช่วยขยำไม่เชื่อมติดกัน กล้ามเนื้อยึดเปลือกเจริญดี ไม่มีท่อน้ำ ในเลือดมีสารฮีโมโกลบิน ซึ่งเมื่อรวมกับอากาศจะเป็นสีแดงจึงได้ชื่อ blood clam และมีฝักตัวอยู่ตามหาดเลน หรือโคลนละเอียดในบริเวณชายฝั่งทะเล



รูปที่ 2.7 ลักษณะทั่วไปของเปลือกหอยแครง [9]

ชั้นของเปลือกหอยแครง แบ่งออกเป็น 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.8 ชั้นนอกสุด เรียกว่า ชั้นผิวนอก (Periostracum layer) ประกอบด้วยโปรตีนประเภทคอนไคโอลินเป็นชั้นที่บางและหลุดได้ไม่ยากนัก ทั้งสิ้น อีกทั้งหามีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง่าย สังเกตได้จากเปลือกหอยแครงที่ถูกทิ้งตามชายหาด หรือเปลือกหอยแครงที่ถูกคลื่นซัด เมื่อถูกทรายซัดสี เปลือกชั้นนี้อาจหลุดหายไปทำให้ไม่สามารถมองเห็นได้ ชั้นต่อมาคือชั้นกลาง เรียก ชั้นแคลเซียม (Prismatic layer) ประกอบด้วย ผลึกรูปต่างๆ กัน ของสารประกอบแคลเซียม ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลไซต์ เป็นชั้นที่หนา และมีความแข็งแรงที่สุดของเปลือกหอยแครง และชั้นในสุดเรียก ชั้นนุก (Nacreous layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่างๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอะราโกไนท์ เป็นชั้นที่เรียบ มีสีขาวขุ่น และเป็นมันวาว



รูปที่ 2.8 ภาพลักษณะทางชีววิทยาของหอยและเปลือกหอยแครง

โครงสร้างเปลือกหอยแครง ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) อยู่ถึง 95% และวัสดุอินทรีย์ปริมาณเล็กน้อย เช่น แคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลิเกต แมกนีเซียมคาร์บอเนต โปรตีนประเภทคอนโคไอลิน (conchinolim)

2.2.2 หอยแมลงภู่

เป็นหอยสองฝาที่มีรูปร่างคล้ายเสียมที่งอนทางด้านหัวเล็กน้อย เป็นหอยที่อาศัยอยู่บริเวณใต้น้ำตลอดเวลาจะมีเปลือกสีเขียวอมดำ แสดงดังรูปที่ 2.9 ส่วนพวกที่อยู่บริเวณน้ำขึ้นและน้ำลงมีโอกาสถูกแสงแดดบ้างเปลือกจะมีสีเหลืองซึ่งจะมีขนาดความยาว 4 - 20 เซนติเมตร โดยเปลือกหอยแมลงภู่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 96 นอกจากนี้แล้วยังพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่พบในเปลือกหอยแมลงภู่จะมีโครงสร้างผลึกแบบ แคลไซต์ และอะราโกไนท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.9 ลักษณะทั่วไปของเปลือกหอยแมลงภู่ [10] ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นของเปลือกหอยแมลงภู่ แบ่งออกเป็น 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.8 ชั้นนอกสุดคือชั้นเพอริโอสตาคัม (Periostarcum) เป็นแผ่นบางมีสีเป็นส่วนประกอบ ชั้นที่สองคือ ปริสมติก (Prismatic) เป็นชั้นกลางที่มีความหนาและแข็งแรงที่สุด เนื่องจากมีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตอัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น มีโครงสร้างผลึกแบบ แคลไซต์และ อะราโกไนท์ ชั้นที่สามเนเคเรียน (Nacreous) เป็นชั้นในสุดเป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปอะราโกไนท์ มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบาง มีความมันวาวเรียงซ้อนกัน

2.2.3 หอยตลับ

เป็นหอยสองฝาโดยฝาทั้งสองมีขนาดเท่ากัน รูปร่างคล้ายรูปสามเหลี่ยม ตรงกลางนูนออก เปลือกหนา ผิวเปลือกด้านนอกมีลักษณะมันวาว และมีลายเล็กน้อยเป็นสีน้ำตาลอ่อน มีขนาดตั้งแต่ 1.8 – 8 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2.10 บางชนิดอาจมีลายพื้นสีขาว ด้านในของเปลือกจะมีสีขาวหอยตลับแต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่สีและลวดลายที่ด้านนอกของเปลือก



รูปที่ 2.10 ลักษณะทั่วไปของเปลือกหอยตลับ [11]

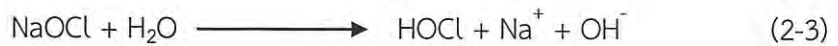
ชั้นของเปลือกหอยตลับแบ่งออกเป็น 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.8 เหมือนกับหอยแครงและหอยแมลงภู่ ชั้นนอกสุด เรียกว่า ชั้นผิวนอก (Periostarcum layer) เป็นชั้นบางๆ ชั้นต่อมาคือชั้นกลาง (Prismatic layer) ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเหมือนกับในหอยแครงและหอยแมลงภู่ ชั้นในสุด (Nacreous layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่างๆกันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอะราโกไนท์ มีสีขาวขุ่น และเป็นมันวาว

2.3 กระบวนการฟอกขาวเปลือกหอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite ; NaOCl) [12]

โซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็นสารละลายใส มีสีเหลืองอมเขียวมีสูตรทางเคมี คือ NaOCl ความเข้มข้นประมาณ 16% โดยน้ำหนัก ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่าย ทำให้เสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว จึงควรเก็บไว้ในที่มืดและอุณหภูมิไม่สูงกว่า 30 °C เพื่อชะลออัตราการเสื่อมคุณภาพ สำหรับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ เมื่ออยู่ในสภาวะ pH ต่ำ จะระเหยเป็นแก๊สคลอรีน สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (2-3) ซึ่งจะให้เกิดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid ; HOCl) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีน (protein) หรือพิกเมนต์ (pigment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

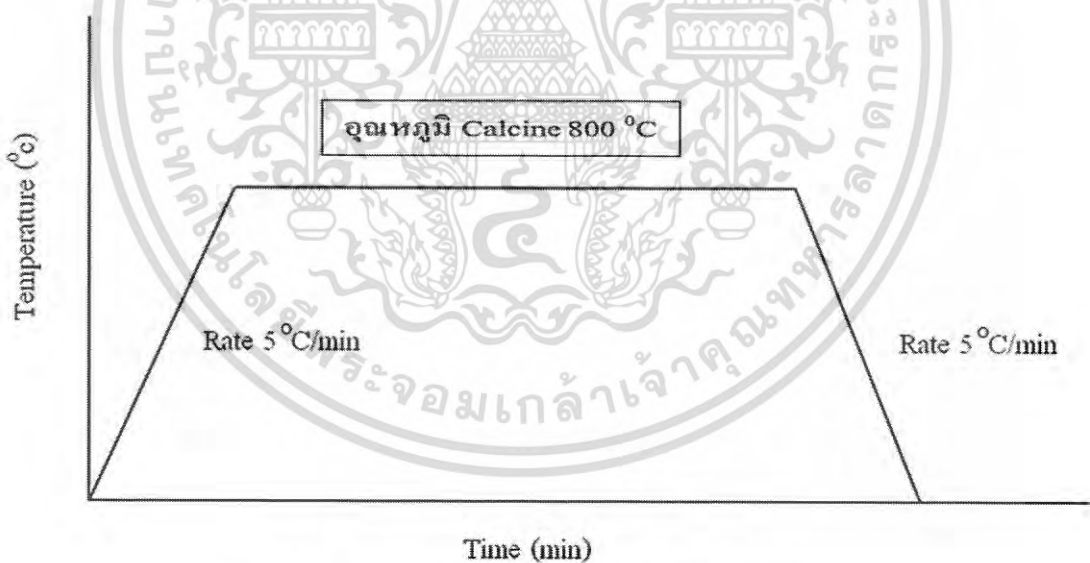
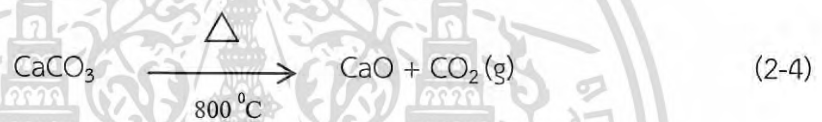
หรืออาจเกิดการออกซิไดซ์ (oxidize) ขึ้นได้ นอกจากนี้แล้วยังช่วยในการละลายเนื้อเยื่อหรืออินทรีย์สารได้ดีอีกด้วย



ในอุตสาหกรรมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ฟอกขาว กระดาษ สิ่งทอ น้ำยาฆ่าเชื้อโรค และอาหาร ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงนำโซเดียมไฮโปคลอไรต์มาใช้ในการฟอกขาวเปลือกหอยก่อนเตรียมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

2.4 กระบวนการแคลไซน์ (Calcination method) [13]

กระบวนการแคลไซน์ เป็นกระบวนการที่มีการใช้อุณหภูมิสูงในการเผาสารที่อยู่ในสถานะของแข็ง (solid) ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transition) หรือเป็นการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ หรือแก๊สที่ไม่ต้องการออกจากสารตั้งต้น ตัวอย่างเช่น กระบวนการเผาแคลเซียมคาร์บอเนต ให้เกิดการสลายตัว (decomposition) เป็นแคลเซียมออกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 800°C ดังแสดงในสมการ (2-4)



รูปที่ 2.11 ช่วงอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของ CaCO_3

2.5 วิธีการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต [14]

วิธีการสังเคราะห์ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-CaCO_3) ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกันซึ่งแต่ละวิธี มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน วิธีที่นิยมใช้สำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีอยู่ 5 วิธีด้วยกันคือ วิธีโซลโวลเทอร์มอล (Solvolthermal) วิธีโซลเจล (Sol gel) วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid - state reaction) วิธีการตกตะกอน (Precipitation) และวิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ ดังตารางที่ 2.1 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 วิธีการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต [14]

วิธีการ	หลักการ	ข้อดี - ข้อเสีย
โซลโวเทอร์มอล (Solvothermal)	เป็นวิธีการเตรียมสาร โดยมี solvent เป็นตัวทำละลาย และมีการควบคุมอุณหภูมิในการสังเคราะห์ นอกจากนี้แล้วยังมี Mechanical shear เป็นตัวช่วยในการปั่นกวนสาร สารที่ได้จะมีความละเอียดมีความบริสุทธิ์สูงโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนอื่นๆ	ข้อดี คือมีขั้นตอนในการสังเคราะห์เพียงขั้นตอนเดียว ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นผลึกสูง และมีรูปร่างที่เหมือนกัน การกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกัน มีความบริสุทธิ์สูง และใช้ อุณหภูมิ ในการสังเคราะห์ต่ำ นอกจากนี้แล้วยังสามารถเตรียมสารได้ในปริมาณมากอีกด้วย ข้อเสีย ควบคุมสภาวะได้ยาก อุณหภูมิที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยจะทำให้ขนาดอนุภาคของสารมีขนาดแตกต่างกัน และการเลือกใช้สารละลายในอัตราส่วนที่ต่างกันจะส่งผลต่อวิธีการสังเคราะห์ทั้งความเป็นผลึก ขนาดอนุภาค และการกระจายตัว
โซลเจล (Sol - gel)	เป็นการเตรียมแคลเซียมคาร์บอเนตโดยวิธีทางเคมีจากสารตั้งต้นที่เป็นสารละลาย ซึ่งกระบวนการในลักษณะนี้จัดเป็นกระบวนการแบบเปียก(Wet Process) โดยมีหลักการพื้นฐานคือสารที่ใช้ในการเตรียมจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (Sol) ไปเป็นเจล (Gel) ซึ่งอยู่ในรูปกิ่งของแข็ง โดยการดึงน้ำออกหรือเพิ่มอุณหภูมิ	ข้อดี ขนาดของอนุภาคที่ได้อยู่ในระดับนาโนเมตรอนุภาคมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ข้อเสีย เตรียมได้ในปริมาณน้อย และมีความซับซ้อนในการเตรียมที่ยุ่งยาก
ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)	เป็นวิธีการที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นที่สถานะเป็นของแข็งผสมกันอยู่โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะของแข็งตามปริมาณที่ต้องการมาบดคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจใช้ เครื่องเขย่า หรือ	ข้อดี ค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย ข้อเสีย ผลผลิตที่ได้มักมีความบริสุทธิ์ต่ำ ได้สารเนื้อหยาบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และอาจมีสารประกอบรูปอื่นๆเจือปนจากสารตั้งต้นหรือจากชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการบด

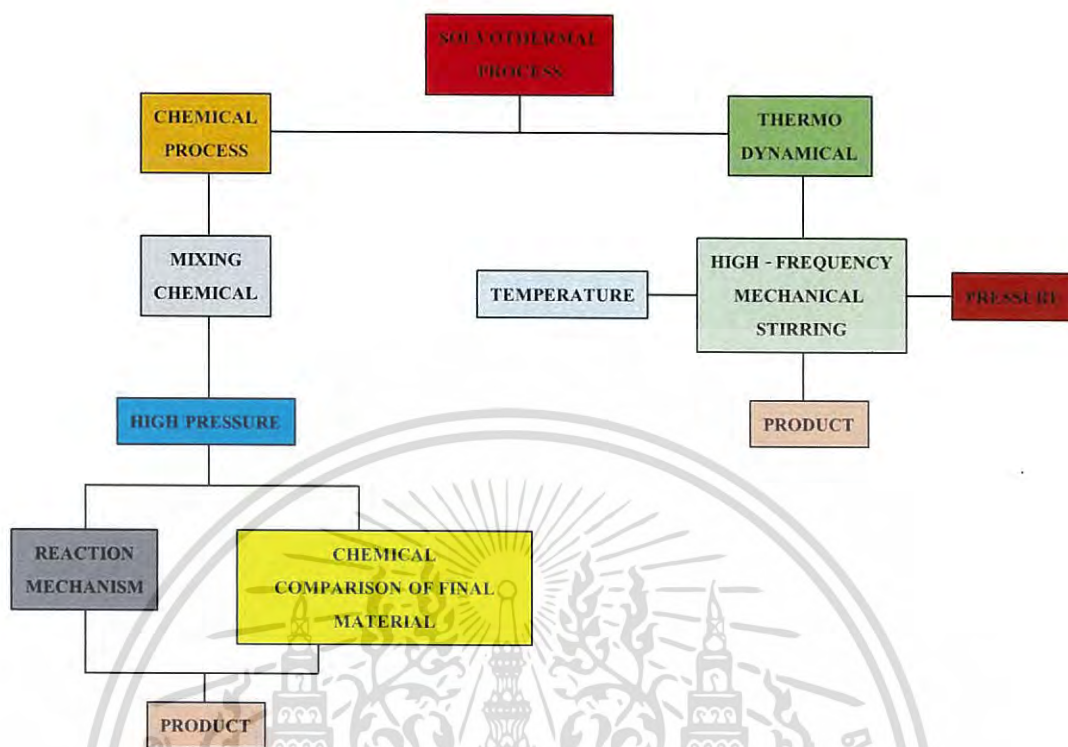
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อยู่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของหน่วยงานใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	เครื่องบด จากนั้นนำไปอบแห้ง แล้วเผาที่อุณหภูมิและเวลาตามที่ต้องการ	
การตกตะกอน (Precipitation)	การตกตะกอนเป็นการทำให้โมเลกุลหรือไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายเกิดการแยกตัวออกมาจากสารละลายโดยอาศัยการเติมสารเคมีที่เหมาะสมที่เรียกว่า พรีซิพิแทนต์ (Precipitant) อย่างช้าๆในปริมาณที่พอเหมาะหรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันเพื่อลดขีดความสามารถในการละลายของระบบทำให้ระบบมีการตกตะกอนเกิดขึ้น	ข้อดี ปฏิกริยาสามารถเกิดได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 °C ถึง 100°C ทำให้เกิดผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดนาโนเมตร ข้อเสีย อาจจะได้สารตัวอื่นร่วมด้วย
ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)	เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมสารให้ มีอนุภาคระดับนาโนเมตร โดยมีวิธีการเตรียมคือ เตรียมเฟสของน้ำมันและ Surfactant ก่อน จากนั้นทำการเติมน้ำที่อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้อนุภาคสารที่มีขนาดใหญ่เกิดการแตกตัว	ข้อดี สารที่ได้มีขนาดอยู่ในช่วงนาโนเมตร เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ง่าย ข้อเสีย ความบริสุทธิ์ต่ำเนื่องจากเกิดการเจือปนของเฟสอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

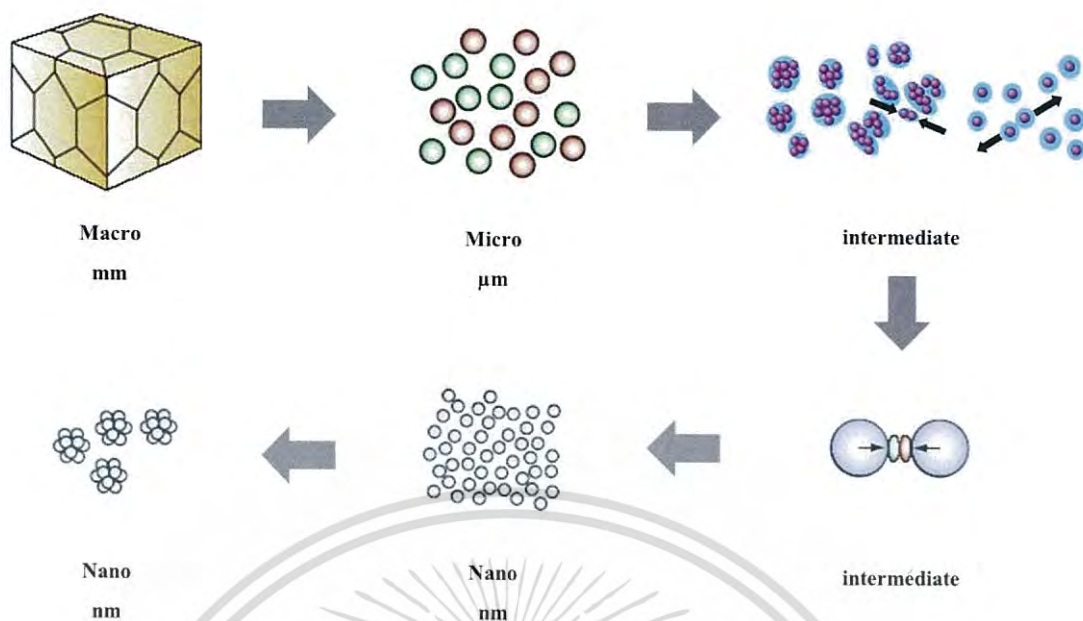
2.5.1 วิธีโซโวเทอร์มอล (Solvolthermal method) [15]



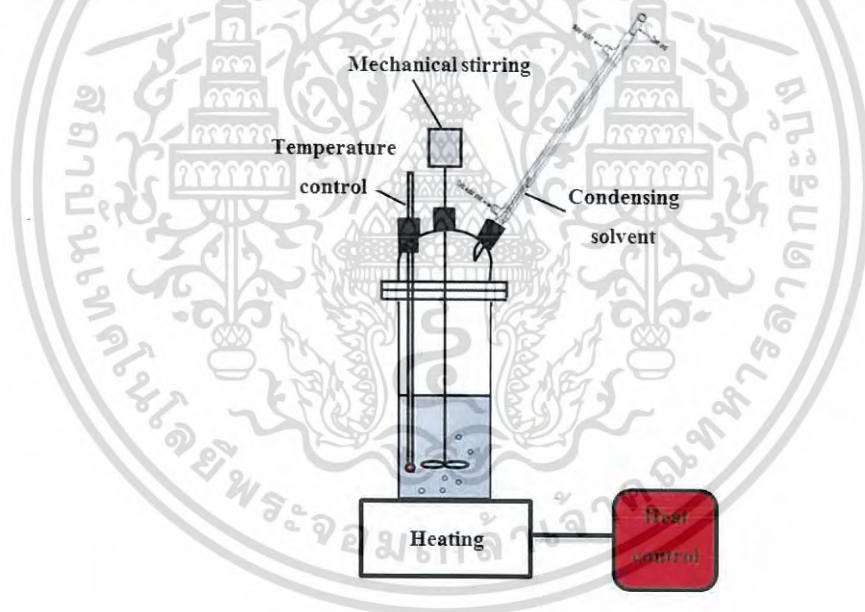
รูปที่ 2.12 แผนผังแสดงกระบวนการโซโวเทอร์มอล

หลักการโซโวเทอร์มอล [15]

วิธีโซโวเทอร์มอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยกลุ่มแรกจะอาศัยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารที่จะทำการสังเคราะห์โดยใช้ความดันสูงในระบบเป็นตัวช่วยในการทำให้อนุภาคเกิดการแตกตัวหลังจากทำปฏิกิริยากันแล้ว ขนาดอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กจนถึงระดับนาโนเมตร กลุ่มที่สองจะอาศัยกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) ซึ่งจะมีการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และอาศัยแรงเชิงกลสูง วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ทำให้สารที่จะสังเคราะห์เกิดปฏิกิริยาทางเคมีแต่จะอาศัยอุณหภูมิ ความดัน และแรงเชิงกลในระบบที่จะทำให้อนุภาคเกิดการแตกตัวออกจนได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กถึงในระดับนาโนเมตร นอกจากนี้แล้วทั้ง 2 กลุ่มจะต้องมีสารละลายตัวกลาง (intermediate) รวมอยู่ด้วยซึ่งสารละลายตัวกลางจะช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้อนุภาคของสารที่จะสังเคราะห์นั้นมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย



รูปที่ 2.13 กลไกและวิธีการเปลี่ยนขนาดของอนุภาคนาโนจากวิธีโซโวเทอร์มอล [15]



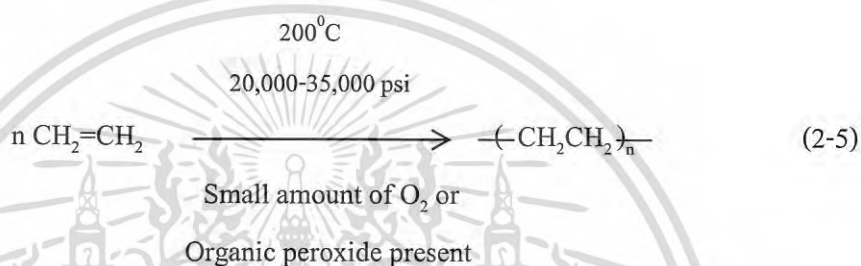
รูปที่ 2.14 ชุดอุปกรณ์โซโวเทอร์มอล

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ nano-CaCO₃ ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะใช้วิธีโซโวเทอร์มอลในการสังเคราะห์ nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่และหอยตลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene ; LDPE) [16]

พอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ Polythene) ถูกค้นพบในปี 1933 โดย Reginald Gibson and Eric Fawcett แห่งบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในประเทศอังกฤษ วัสดุประเภทนี้มี 2 รูปแบบ คือ LDPE และ HDPE โดย LDPE ใช้ผลิตแผ่นฟิล์มและวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ ส่วน HDPE มีความแข็งแรงกว่า ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ ท่อน้ำ และอุปกรณ์ยานยนต์ LDPE เป็นวัสดุประเภท Polyethylene Thermoplastic ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยปกติแล้ว พอลิเมอร์ชนิดนี้มี Impact strength, toughness , และ ductility สูง ซึ่งนิยมนำมาทำเป็นถุงฟิล์มบรรจุภัณฑ์ลักษณะต่างๆ เช่นถุงฟิล์มบางสำหรับใส่ของหรือแผ่นฟิล์มหลายชั้น (Multilayer film) ทั้งแบบ Laminate และ Coextrudated พอลิเมอร์ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง การสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดนี้จะใช้วิธีการ พอลิเมอร์ไรเซชันแบบฟรีเรดิคัล (Free radical polymerization) ดังสมการที่ (2-5)



ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของ LDPE และ HDPE [16]

Properties	LDPE	HDPE
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.91-0.94	0.94-0.97
ความเป็นผลึก (%)	50-60	80-95
อุณหภูมิการหลอม (°C)	98-120	127-135
ความสามารถในการทนต่อแรงดึง (GPa)	4.1-16	21-38
Young's Modulus (GPa)	0.10-0.26	0.41-1.24
การยืดที่จุดขาด (Elongation,%)	0.1-0.26	20-130
Impact strength (J/m)	ไม่แตก	27-1068
T _m (°C) ภายใต้อันตรึง 445 kPa	38-49	60-88

2.7 การใช้สารตัวเติม (Filler) [17]

การใช้สารตัวเติมในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเมอร์คือ เพื่อลดต้นทุน ปรับปรุงกระบวนการผลิต และปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ เหตุผลสำคัญในการใช้สารตัวเติมในพอลิเมอร์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

1. ใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ (extender filler)

- ทำให้ความหนาแน่น ความแข็งและมอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น ช่วยลดการหดตัว (shrinkage) ของพอลิเมอร์
- ลดต้นทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้เป็นสารเสริมแรง (reinforcing filler)

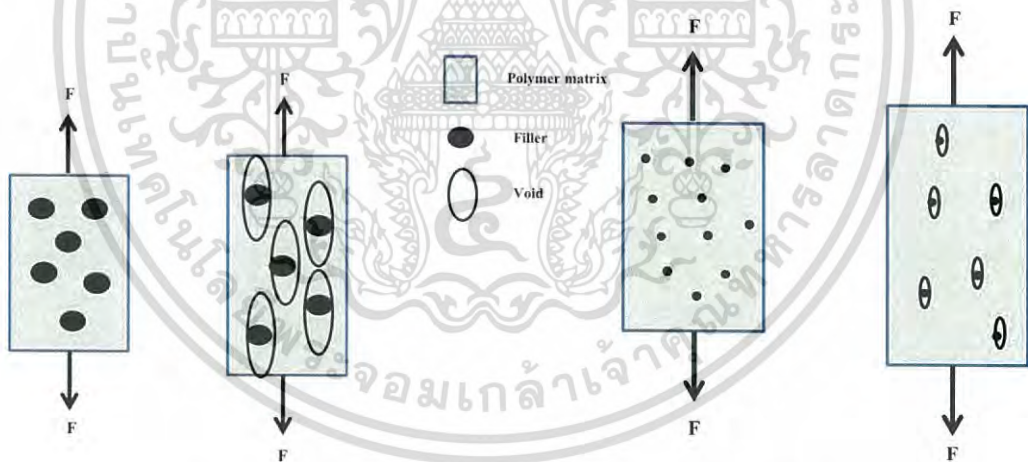
- ทำให้ความแข็งแรง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น
- ปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกดีขึ้น

สารตัวเติมที่นำมาใช้มีหลายประเภทจึงมี ขนาด รูปร่าง และการยึดเกาะที่แตกต่างกัน จึงขึ้นอยู่กับทางเลือกไปใช้ในงานที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงใน LDPE และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากทางการค้า

2.8 อิทธิพลของการใช้สารตัวเติมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [17]

2.8.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)

ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีอิทธิพลต่อสมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ ได้แก่ ขนาดรูปร่าง การกระจายตัว และการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ โดยที่ สารตัวเติมอาจจะทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยทั่วไปขนาดอนุภาคที่เล็กและเข้ากันได้ดี กับพอลิเมอร์รวมถึงการกระจายตัวและการยึดเกาะที่ดีของสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ จะทำให้โอกาสที่ค่าความแข็งแรงดึงนั้นเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้าในกรณีที่การผสมระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ไม่ดี จะทำให้ความสามารถในการรับแรงและการยึดตัวของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียหายได้ง่าย ความแข็งแรงดึงจึงลดลง



รูปที่ 2.15 ความแข็งแรงดึงเมื่อสารตัวเติมมีขนาดต่างกัน

จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าถ้าขนาดสารตัวเติมมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดช่องว่าง (void) ขนาดใหญ่บนพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) เมื่อให้แรงดึง ช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้สมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาคระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ทำให้การยึดเกาะนั้นไม่ดีจึงไม่สามารถทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นได้ แต่ถ้าขนาดสารตัวเติมมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กบนพอลิเมอร์เมทริกซ์เมื่อให้แรงดึง จึงสามารถที่จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นได้มากกว่าการใช้สารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นสารตัวเติมก็ควรที่จะสามารถยึดเกาะได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช.สนับสนุนให้ท่านใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break)

ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลการยืดตัวของพอลิเมอร์นั้นลดลง โดยที่สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีการยึดเกาะที่ติดกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ (Polymer Matrix) จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงดึง และทำให้การยืดตัวของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

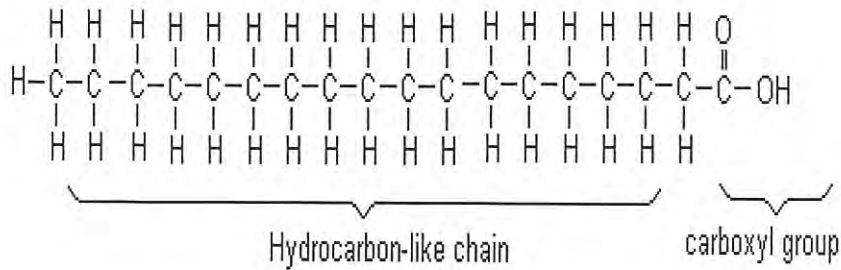
2.8.3 มอดูลัส (Modulus)

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นของแข็งไม่ยืดหยุ่นจะช่วยทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นในพอลิเมอร์ เนื่องจากสารตัวเติมมีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์ ปริมาณของสารตัวเติมยังมีผลทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย นอกจากนี้แล้วอนุภาคของสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงแคบจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสลดลง ขณะที่สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงกว้าง จะทำให้ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมนั้นเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลของการกระจายตัวของอนุภาคจะพบว่าการรวมตัวของอนุภาค (Agglomerate) อาจทำให้ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนที่มีการรวมตัวกันจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลง Stress และ Strain น้อยกว่า หรือเนื่องจากการมี interaction ระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ และ interaction ระหว่างสารตัวเติมเองทำให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้น

2.9 การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม [18]

เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์กับสารตัวเติมจะพบว่าพอลิเมอร์และสารตัวเติมนั้นจะมีความไม่เข้ากัน (incompatibility) ที่บริเวณผิวสัมผัส (interface) เนื่องจากพอลิเมอร์และสารตัวเติมจะมีความแตกต่างในเรื่องของเคมีพื้นผิว (surface chemistry) โดยที่สารตัวเติมนั้นจะมีผิว และมี surface area สูง ทำให้ยากต่อการกระจายตัว และการสัมผัสพื้นผิว (wetting) ของพอลิเมอร์ เมื่อสารตัวเติมกระจายตัวได้ไม่ดี ส่งผลให้พอลิเมอร์นั้นมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์นั้นลดลงได้ การใช้สารตัวเติมในปริมาณสูง ทำให้ความหนืดในการผสมสูงและไหลได้ยาก จึงมีการเคลือบผิวของสารตัวเติมเพื่อให้การผสมพอลิเมอร์กับสารตัวเติมผสมกันได้ดียิ่งขึ้น และให้สมบัติของพอลิเมอร์ดีขึ้น การเคลือบผิวหรือการปรับปรุงพื้นผิวจะใช้สารเคมีในกลุ่มของ fatty acid esters เช่น สเตียริก แอซิด (stearic acid) หรือ coupling agent เช่น ซิลเลน (silane) ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมจะช่วยให้สารตัวเติมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและยึดเกาะได้ดีกับพอลิเมอร์ ส่งผลให้สามารถเพิ่มปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ได้ ประเภทของสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวได้แก่ Fatty acid esters, Silane coupling agent, Titanate coupling agent และ Hydrophobic wetting agent

ในที่นี่จะเป็นการใช้กรดสเตียริก [19] เป็นสารที่สามารถใช้ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมได้ โดยจะช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติม ทำให้สารตัวเติมเกิดการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ และยังช่วยในเรื่องของกระบวนการผลิตเนื่องจากสามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ จึงสามารถช่วยในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่าย



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของกรดสเตียริก [19]

กรดสเตียริกเป็นกรดไขมันชนิดหนึ่งไม่มีอิมัลชัน มีสูตรทางเคมี $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ เป็นผลึกสีขาวมีกลิ่นเหม็นหืน ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และอีเธอร์

2.10 สารหล่อลื่น (Lubricants) [20]

เป็นสารที่ช่วยทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ และลักษณะการไหลให้ดีขึ้น ช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการลง ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับองค์ประกอบอื่นๆ ช่วยประหยัดพลังงาน และเพิ่มผลผลิตในการผลิต นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เม็ดพลาสติกที่มีสารหล่อลื่นอยู่ ทำให้การไหลในอุปกรณ์ป้อนวัสดุเป็นไปได้ ด้วยดี
- ควบคุมความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานและอัตราการหลอมเหลว
- ลดความหนืดของหลอมเหลว
- ลดกำลังที่ต้องใช้ ทำให้เกิดการไหลได้อย่างรวดเร็ว
- ลดการบวมของตาย
- ลดการเสียคุณภาพเนื่องจากความเสียด (Shear degradation)
- ช่วยให้พอลิเมอร์หลุดออกจากอุปกรณ์ทางกระบวนการ เช่น ตาย แม่พิมพ์ หรือลูกกลิ้ง
- เพิ่มความเงา (gloss)
- เป็นสารช่วยยึดเกาะ

สารหล่อลื่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สารหล่อลื่นภายนอก (External Lubricants) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อลดความฝืดระหว่างผิวของพลาสติกกับผิวของโลหะหรือวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักรและแม่พิมพ์
2. สารหล่อลื่นภายใน (Internal Lubricants) เป็นสารที่ช่วยลดความฝืดภายในเนื้อพลาสติก กล่าวคือเป็นตัวช่วยลดความฝืดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ สารหล่อลื่นบางชนิดมีคุณสมบัติอย่างอื่นอยู่ด้วย เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้พลาสติกเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก [20]

สารหล่อลื่นภายใน	สารหล่อลื่นภายนอก
1. วัสดุที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายในต้องสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลักที่ใช้	1. วัสดุที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายนอกไม่สามารถเข้ากับพอลิเมอร์หลักได้
2. สารหล่อลื่นภายในทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุล	2. สารหล่อลื่นภายนอกมีความสามารถในการละลายได้กับพอลิเมอร์หลักค่อนข้างต่ำ และเกิดเป็นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยวอยู่ระหว่างอนุภาคพอลิเมอร์และผิวโลหะร้อน ทำให้ลดแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุล
3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายในคือการลดความหนืดของไหล ช่วยเหลือพอลิเมอร์ไหลได้โดยไม่มีผลต่อการไหลของสารประกอบ	3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายนอกคือลดความเสียหายระหว่างอนุภาคในกระบวนการหลอมเหลว ด้วยเหตุนี้จึงมีผลอย่างมากต่อเวลาที่ใช้ในการหลอมสูตรผสม

ตารางที่ 2.4 ข้อดี และ ข้อเสียของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก [20]

สารหล่อลื่นภายใน	สารหล่อลื่นภายนอก
ข้อดี 1. เพิ่มความเร็วในการอัดแบบได้โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการไหม้ขึ้นเนื่องจากความเสียด 2. ลดการเกิดการบวมตาย 3. ป้องกันการเกิดรอยยุบของชิ้นงาน 4. ปรับปรุงการเติมเต็มของตาย 5. ไม่มีผลต่อการพิมพ์ หรือการทาสี 6. ส่งเสริมให้เกิดการไหล	ข้อดี 1. มีประสิทธิภาพในการปล่อยชิ้นงานให้ออกจากผิวของโลหะ 2. ช่วยให้วัสดุเกิดความเงา 3. ช่วยเพิ่มผลิตผลในการผลิต
ข้อเสีย (เกิดเมื่อมีการใช้ปริมาณมากเกินไป) 1. ลดอุณหภูมิการเป็ยงเบนทางความร้อน 2. ในบางครั้งทำให้สมบัติเชิงกลลดลง 3. มีแนวโน้มไหลออกจากผลิตภัณฑ์ถ้าคุณภาพไม่ดีพอ 4. ต้องใช้ปริมาณมากขึ้นกว่าเดิมเพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้น	ข้อเสีย (เกิดเมื่อมีการใช้ปริมาณมากเกินไป) 1. ทำให้เกิดรอยแยกและชิ้นงานหลุดออกเป็นชิ้นๆ 2. ความแข็งแรงรอยต่อ (weld line) ต่ำ 3. เกิดการไหลออก (exudation) ส่งผลให้ความสามารถในการทาสี การทำลามิเนตและความใส ลดต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 สารหล่อลื่นตามประเภทของพอลิเมอร์ [20]

สารหล่อลื่น	ปริมาณที่ใช้ (เปอร์เซ็นต์)
สารหล่อลื่นทั้งหมดต่อพอลิเมอร์ทั้งหมด	0.19
พอลิไวนิลคลอไรด์	0.60
พอลิสไตรีน	0.35
พอลิโอลิฟินส์	0.09
เทอร์โมเซต	0.075
สารหล่อลื่นในเทอร์โมพลาสติก	
พอลิไวนิลคลอไรด์	65
พอลิสไตรีน	18
พอลิโอลิฟินส์	11
อื่นๆ	6

2.10.1 พาราฟิน ออยล์ (Paraffin oil) [20]

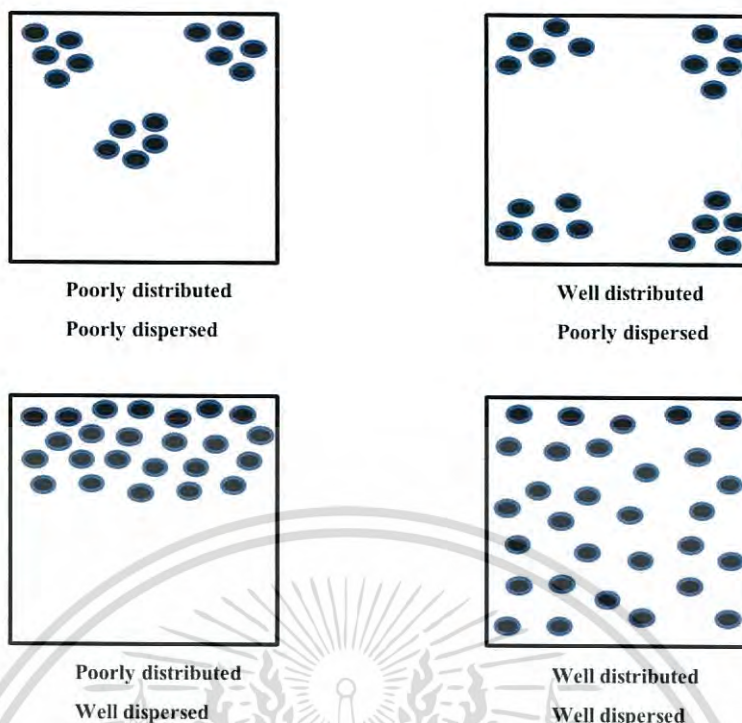
เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอน ที่จัดอยู่ในกลุ่มปิโตรเลียม (Petroleum) โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ C_nH_{2n+2} มีสีเหลืองอ่อนถึงขาว ใช้เป็นสารช่วยผสมในพลาสติก

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางเคมีของพาราฟิน ออยล์ [20]

สมบัติ	พาราฟิน ออยล์	หน่วย
ความถ่วงจำเพาะ	0.88	-
ความหนาแน่น	0.86	g/cm ³
จุดหลอมเหลว	47-64	°C
ความหนืด	110-125	kg/m ³

2.11 การผสมสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ [21]

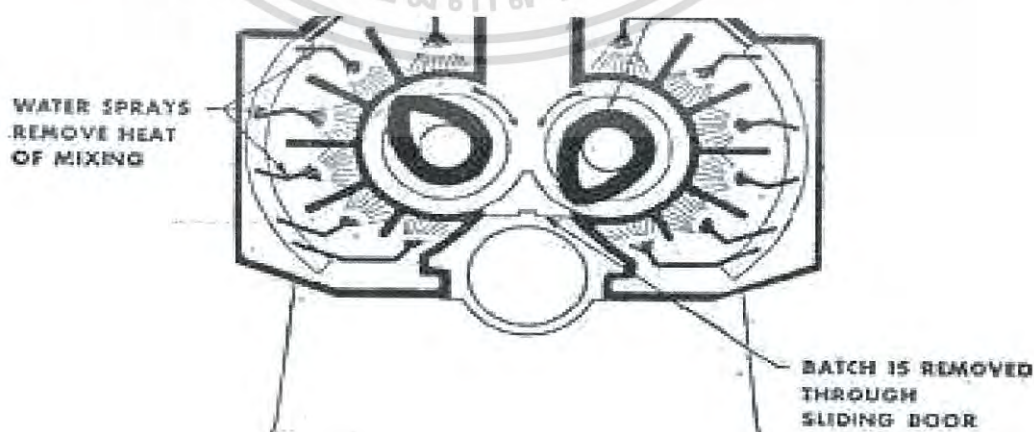
การผสมสารตัวเติมในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีผสมองค์ประกอบครั้งเดียวหรือแบบแบช (Batch) และวิธีผสมต่อเนื่อง (Continuous) เครื่องผสมที่ใช้สำหรับผสมแบบแบชได้แก่ เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two Rolls Mill) และเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ส่วนเครื่องผสมที่ใช้สำหรับผสมแบบต่อเนื่องที่นิยม ได้แก่ เครื่องหลอมอัดรีดทั้งชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและเกลียวหนอนคู่ (Single or Twin Screw Extruder) โดยส่วนผสมต่างๆจะส่งผ่านไปยังเครื่องผสมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการผสมที่ดีและการกระจายตัวที่ดีจะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีตามไปด้วย



รูปที่ 2.17 ลักษณะการผสมและการกระจายตัวของสารตัวเติม

2.11.1 เครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) [22]

เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้งจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียน โรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.18 ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก จึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ใช้เวลาในการผสมสั้น ผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ขนาดและความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้ และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก

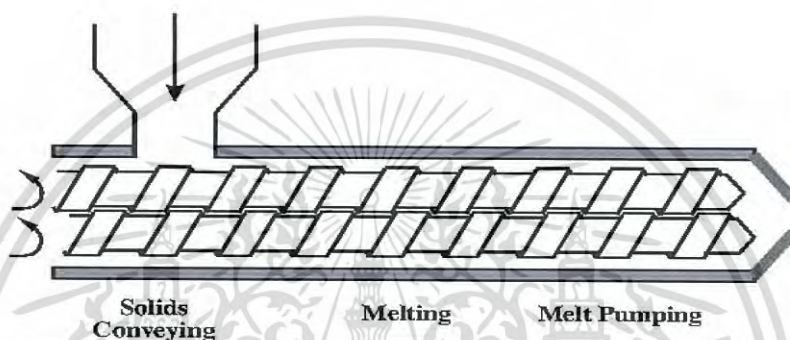


รูปที่ 2.18 เครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ (Twin Screw Extruder) [23]

เครื่องหลอมอัดรีดเป็นเครื่องผสมสำหรับผสมฟิลเลอร์หรือสารเติมแต่งอื่นๆ ให้เข้ากับพอลิเมอร์และช่วยในการกระจายตัวได้ดี เพื่อให้ได้สารผสม (Compound) ที่มีคุณลักษณะและสมบัติตามต้องการ นิยมใช้ชนิดเกลียวหอนคู่มากกว่าชนิดเกลียวหอนเดี่ยว โดยการทำงานของเครื่องจะอาศัยการหมุนของสกรูซึ่งมีสองแบบได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw) และการหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating screw) ในการผสมส่วนใหญ่แล้วจะนิยมใช้สกรูที่มีลักษณะการหมุนในทิศทางเดียวกัน แสดงภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ ดังรูปที่ 2.19 และเนื่องจากเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหอนเดี่ยวมีประสิทธิภาพของการผสมที่ทำให้การกระจายตัว จึงนิยมใช้เพื่อการผสมเบื้องต้นเท่านั้น



รูปที่ 2.19 เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ (Twin Screw Extruder) [23]

2.11.3 การบดย่อยพลาสติก (Grinding) [24]

การบดย่อยคือการลดขนาดของพลาสติกลงด้วยวิธีเชิงกล เพื่อให้พลาสติกมีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายในกระบวนการต่างๆ ในการบดย่อยจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็กแตกต่างกัน เหตุผลที่สำคัญในการบดย่อยพลาสติกมีหลายอย่าง เช่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสเมื่อทำการผสม บ้อนเข้าเครื่องจักรได้ง่าย หลอมละลายได้อย่างรวดเร็ว เป็นต้น การทำงานของเครื่องจะอาศัยการหมุนของใบมีดที่ติดอยู่กับตัวเครื่องเป็นตัวตัดเฉือนพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงไปจนกว่าจะลอดผ่านตะแกรงได้ รูปที่ 2.20 แสดงเครื่องบดย่อยพลาสติก



รูปที่ 2.20 เครื่องบดย่อยพลาสติก (Grinding Machine) [24]

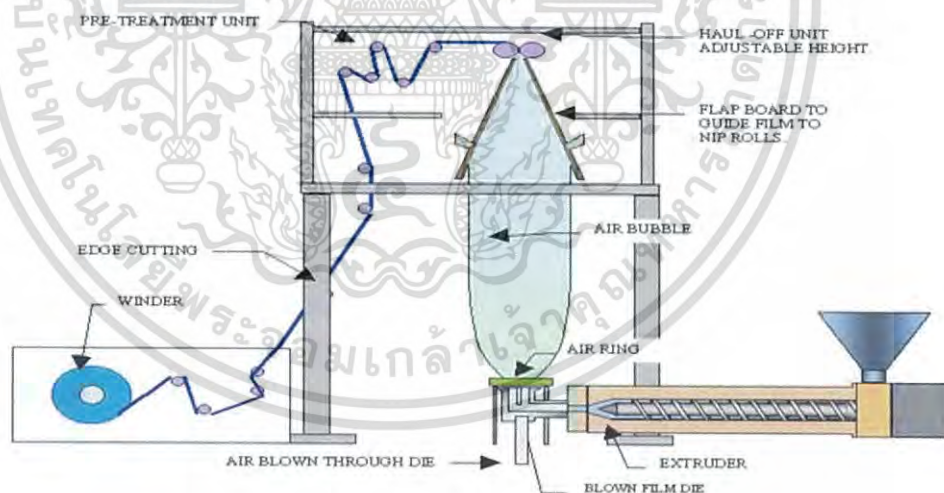
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 กระบวนการขึ้นรูปถุงพลาสติก (Blown Film Process) [25]

การเป่าฟิล์มเป็นเทคโนโลยีในการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยทั่วไปการเป่าฟิล์มจะเป็นการเป่าขึ้นในแนวตั้งแต่ปัจจุบันการเป่าตามแนวนอนและเป่าลงในแนวตั้งก็มีทำกันอย่างแพร่หลาย กระบวนการเป่าฟิล์มเกี่ยวกับการ Extrude พอลิเมอร์เหลวผ่าน Die ทรงกลม เพื่อให้ได้ลูกโป่งฟิล์มทรงกระบอกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ แล้วจึงทำการพับลูกโป่งฟิล์มให้เป็นแผ่นหรือนำไปตัดเป็นถุงต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.21

กระบวนการเป่าฟิล์ม

1. เริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกมาอัดหลอมอย่างต่อเนื่องจนได้เป็นพลาสติกเหลวหนืดซึ่ง จะถูก extrude ผ่าน die ทรงกลม
2. เป่าลมเข้าทางศูนย์กลาง die แรงดันลมจะทำให้พลาสติกเหลวพองออกลักษณะเป็นลูกโป่งฟิล์ม ควบคุมให้ปริมาณลมเข้าเท่ากับปริมาณลมออก เพื่อให้แรงดันลมคงที่ซึ่ง จะทำให้ความหนาฟิล์มมีความสม่ำเสมอ
3. โป่งฟิล์มถูกดึงออกจาก die อย่างต่อเนื่องและถูกทำให้เย็นตัวลงโดยลมจาก Air ring นอกจากนี้ด้านในโป่งฟิล์มสามารถทำให้เย็นลงได้โดยการใช้ internal bubble cooling
4. หลังจากฟิล์มแข็งตัวดีแล้วซึ่งเป็นจุดที่เกิดเส้นแข็งตัว ฟิล์มจะถูกดึงและหนีบเป็นแผ่น โดย nip rollers แล้ว แผ่นฟิล์มก็จะถูก puller rolls ดึงฟิล์มให้ตึงและส่งเก็บเข้าม้วนที่ windup โดยที่ระหว่าง nip rollers และ windup rollers อาจมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม เช่น เครื่องระเบิดผิวฟิล์มเครื่องตัดประจุไฟฟ้า หรือเครื่องตัดฟิล์มเพื่อแยกเป็นแผ่น



รูปที่ 2.21 กระบวนการ Blown film Extrusion [25]

2.13 การทดสอบสมบัติเชิงกล [26]

คือ พฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ แรงภายในของวัสดุจะเกิดขึ้นเพื่อต้านทานแรงภายนอกที่มากกว่า แรงที่เกิดขึ้นจะเรียกว่าแรงเค้น (Stress) วัสดุเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ แสดงดังสมการที่ (2-6) และส่วนอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากวัสดุรับแรงไว้ไม่ไหวต่อความยาวเดิม เรียกว่า ความเครียด (Strain) ซึ่งความเครียดจะไม่มีหน่วยระบุไว้ แต่นิยมบอกเป็น เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) แสดงดังสมการที่ (2-7)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-6)$$

F = แรงที่ใช้ในการดึง (N)

A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน (m^2)

σ = ความเค้นเนื่องจากการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (Nm^{-2}, Pa)

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2-7)$$

L = ความยาวของชิ้นงาน ณ จุดที่เกิดการแตกหัก

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

ϵ = การยืดตัวของชิ้นงาน ณ จุดขาด (%)

ทั้งความเค้นและความเครียดนี้ เป็นสิ่งที่น่าสนใจใช้พิจารณาถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความยืดหยุ่น (Flexibility) ความอ่อนตัว (Ductility) ความเปราะ (Brittleness) ความเหนียว (Toughness) ความแข็งแกร่ง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength)

2.13.1 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing) ASTM D638

โดยทำการดึงชิ้นงานทดสอบจนขาดออกจากกัน ในขณะเดียวกัน จะบันทึกแรงที่ใช้ในการดึง และระยะยืดของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องบันทึก การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง ถ้าทำการดึงชิ้นงานที่มีสมบัติแข็งเปราะอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก ผลจากการวัดแรงที่มากกว่าต่อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหักเรียกว่าความเค้นสูงสุดเนื่องจากแรงดึง (Ultimate Tensile Stress) หรือ ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ตามกฎของฮุก (Hook's law) สำหรับวัสดุอุดมคติที่มีสมบัติยืดหยุ่น ความเค้นเป็นสัดส่วนกับความเครียด อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดนี้เป็นค่าคงที่ เรียกว่ามอดูลัส (Modulus ;E) สำหรับการให้ความเค้นใดๆกับวัสดุที่มีมอดูลัสต่ำ วัสดุนั้นจะแสดงค่าความเครียดหรือระยะยืด หรือการสูญเสียรูปร่างของชิ้นงานได้สูงกว่าวัสดุที่มีมอดูลัสสูง ดังนั้น มอดูลัสของวัสดุจึงหมายถึง ความสามารถในการต้านทานต่อการสูญเสียรูปร่างของชิ้นงานนั่นเอง ในความเป็นจริงพลาสติกและอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่จะประพฤติตัวตามแบบฮุกเกียน (Hookean's Behavior) เฉพาะเมื่อทำการทดสอบด้วยอัตราเร็วในการยืดตัวต่ำ บางครั้งเรียกมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นว่า อีลาสติกมอดูลัส (Elastic Modulus) หรือมอดูลัสของยังส์ (Young's Modulus) การวัดมอดูลัสนี้ทำได้โดยการสร้างเส้นตรงสัมผัสกับช่วงต้นของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด จากนั้นคำนวณค่าความชันของเส้นสัมผัส ดังสมการที่ (2-8)

เอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

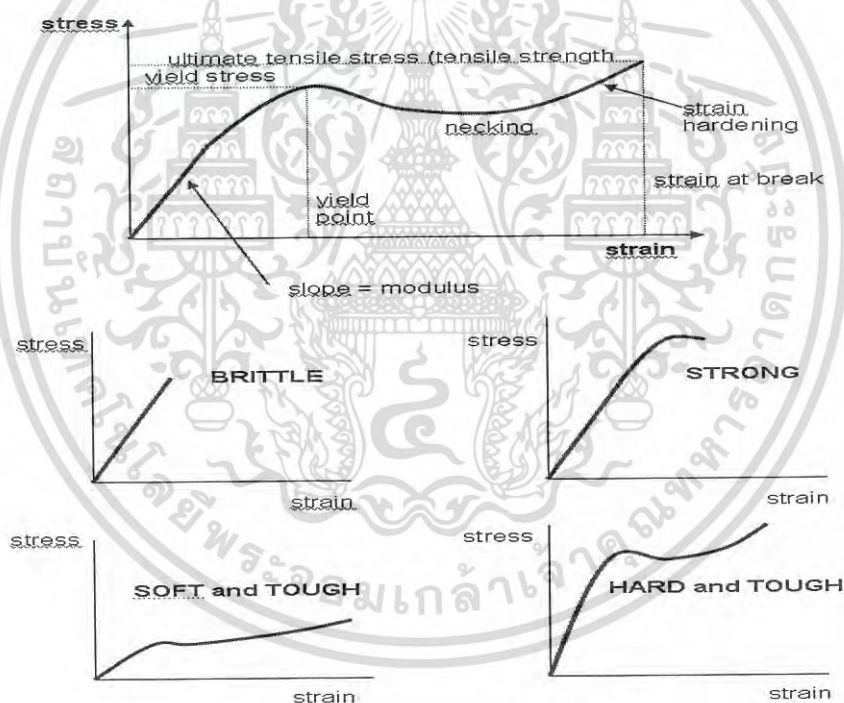
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2-8)$$

ε = มอดูลัส (Nm^2 , Pa)

$\Delta\sigma$ = ความแตกต่างของความเค้นระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

$\Delta\varepsilon$ = ความแตกต่างของความเครียดระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

การเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดึงของพอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่ว่าจะเป็นเทอร์โมพลาสติกเทอร์โมเซต พอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์คอมโพสิต และอีลาสโตเมอร์ จะแตกต่างกันตามลักษณะการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ สมบัติด้านความเป็นผลึก และความแข็งแรงในการยึดติดกันระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดกับวัสดุผสม (Adhesive Strength of Interface) ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างจากกราฟความเค้น-ความเครียด แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงพฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง [26]

2.13.2 การทดสอบอัตราการไหลของพอลิเมอร์ Melt Flow Index ASTM D1238 [27]

Melt Flow Index คือน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมที่ไหลผ่านออกมาจากหัวตายมาตรฐาน (2.095x8 มม.) ที่อุณหภูมิที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 2.23 โดยใช้น้ำหนักมาตรฐานวางบนแกนลูกสูบที่กดลงไปยังตัวอย่างทดสอบ มาตรฐาน ISO 1133 ระบุถึงสองวิธีที่ใช้ในการทดสอบ วิธี A เป็นวิธีการวัดมวลแบบแมนนวล โดยการจับเวลาแล้วนำส่วนของพอลิเมอร์ที่ถูกรีดออกมาไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อเป็นการคำนวณค่าอัตราการไหลของมวลหลอม (MFR) ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

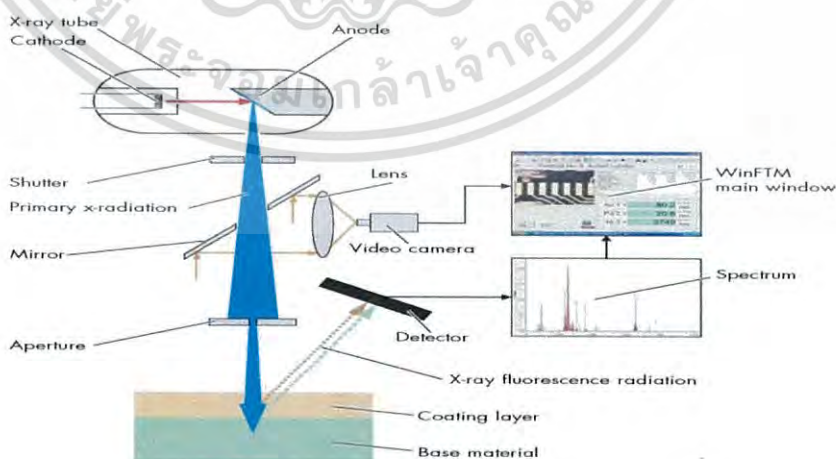
กรัมต่อ 10 นาที ส่วนวิธีทดสอบ B นั้นเป็นวิธีการวัดระยะการเคลื่อนที่โดยการวัดการเคลื่อนที่ของลูกสูบโดยการใช้อุปกรณ์ encoder ผลการทดสอบที่ได้คือ อัตราการไหลของปริมาตรหลอม (MVR) ซึ่งมีหน่วยวัดเป็น ลบ.ซม.ต่อ 10 นาที โดยเป็นค่าเฉลี่ยของจุดข้อมูลที่ได้จาก encoder ความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอม จะถูกตรวจวัดเช่นกันและใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 2.23 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index : MFI) [27]

2.14 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) [28]

การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการของรังสีเอกซ์ โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.24 ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมาโดยพลังงานที่คายหรือ Fluorescence ออกมานั้นจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้สามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีธาตุอะไรรออยู่บ้างโดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง



รูปที่ 2.24 การทำงานของเครื่อง XRF [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray Diffractometer (XRD) [29]

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอกซ์บนผิววัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (Scattering) และเลี้ยวเบน (Diffraction) โดยมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนจะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างของผลึกและระนาบ (h k l) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ ทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันเป็นลักษณะเฉพาะของสารโดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิวัฒนาการและองค์ประกอบของสาร ตัวอย่าง การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกันซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d แสดงดังรูปที่ 2.25 โดยระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึกที่รังสีเอกซ์ตกกระทบทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะปฏิบัติตามกฎแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2-9)

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

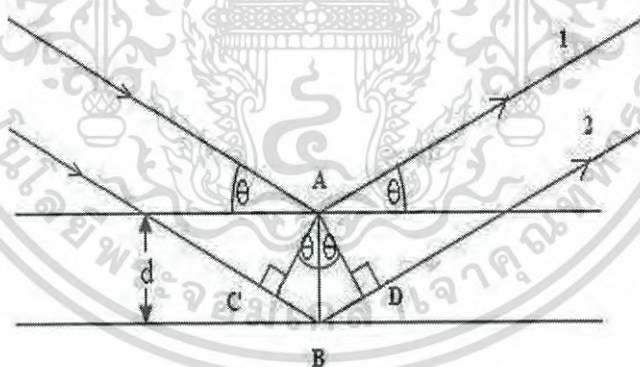
(2-9)

เมื่อ d คือ ระยะห่างระนาบ (h k l)

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์กับระนาบผลึก

n คือ จำนวนเต็มใดๆ (1,2,3....)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54 Å)



รูปที่ 2.25 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [29]

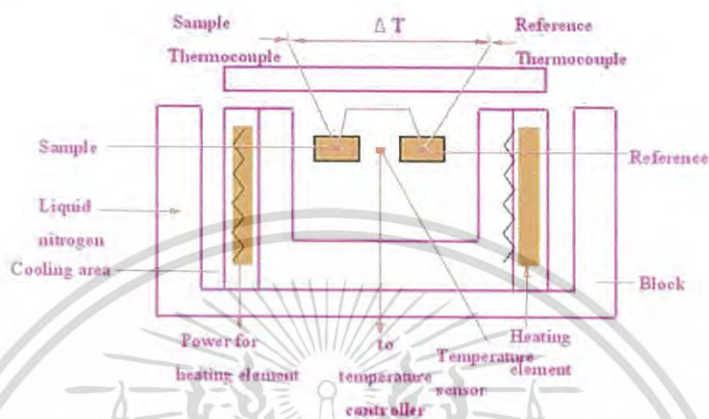
2.16 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ Thermogravimetric analyzer (TGA) [30]

Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อนใช้วิเคราะห์มวลวัสดุตัวอย่างที่อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 2.26 โดยวัสดุตัวอย่างนั้นจะถูกควบคุมภายใต้ช่วงอุณหภูมิและสภาวะที่กำหนดในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่เป็นระบบปิดสามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีเอส จำกัด ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

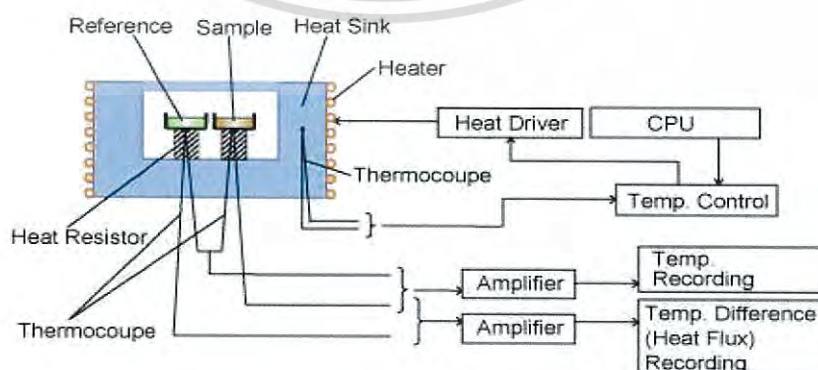
ที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ผลการทดสอบจะถูกแสดงออกมาในรูปกราฟซึ่งมีแกน y แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนไป (weight % หรือ mg) และแกน x แสดงอุณหภูมิหรือเวลาตามที่กำหนด ผลที่ได้จาก TGA นั้นจะสามารถบอกได้ว่าตัวอย่างที่ทำกรวิเคราะห์นั้นมีการเจือปนของธาตุอื่นด้วยหรือไม่โดยดูจากกราฟที่เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่างๆที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.26 การทำงานของเครื่อง TGA [30]

2.17 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึก Differential Scanning Calorimetry (DSC) [31]

เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของ Heat flow ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดความร้อน (Endothermic) หรือคายความร้อน (Exothermic) ของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.27 โดยเทคนิคนี้จะนำมาใช้ศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ โดยการใช้ศึกษาการเกิดผลึกของพอลิเมอร์จากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน และสามารถใช้ศึกษาผลของการก่อผลึก โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) โดยที่ T_c จะเพิ่มตาม nucleus density และแสดงผลของการก่อผลึก



รูปที่ 2.27 การทำงานของเครื่อง DSC [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

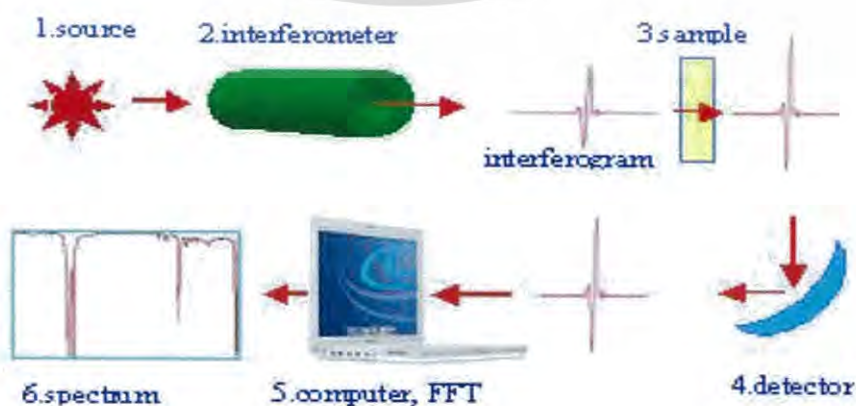
นอกจากนี้แล้วเทคนิค DSC ยังสามารถคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้อีก ด้วยโดยอาศัยการคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของอุณหภูมิในการหลอมเหลว ดังสมการที่ (2-10)

$$\text{Degree of Crystallinity (\%)} = \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0} \quad (2-10)$$

เมื่อ H_f^* = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (J/g)
 H_f^0 = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% สำหรับพอลิเมอร์

2.18 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของสาร Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) [32]

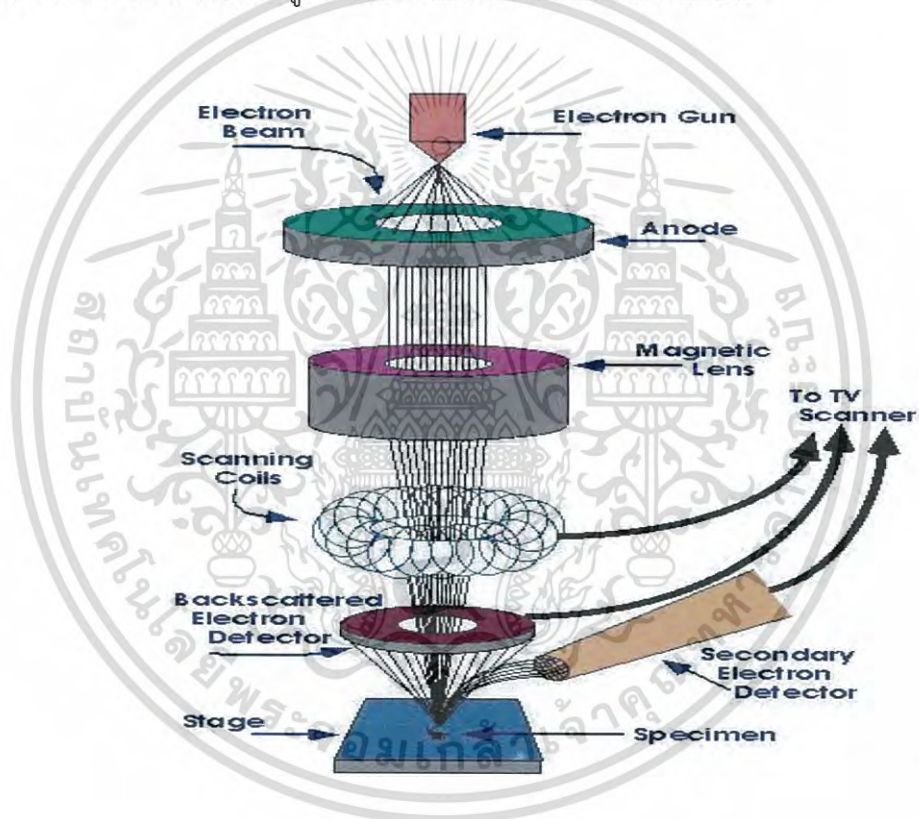
Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร แสดงดังรูปที่ 2.28 โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12500 - 5 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ Near Infrared ($12,500 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$) Middle Infrared ($4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$) Far Infrared ($400 - 5 \text{ cm}^{-1}$) ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.28 การทำงานของเครื่อง FT-IR [32] หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.19 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) [33]

หลักการทำงานของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 2.29 จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาหลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป

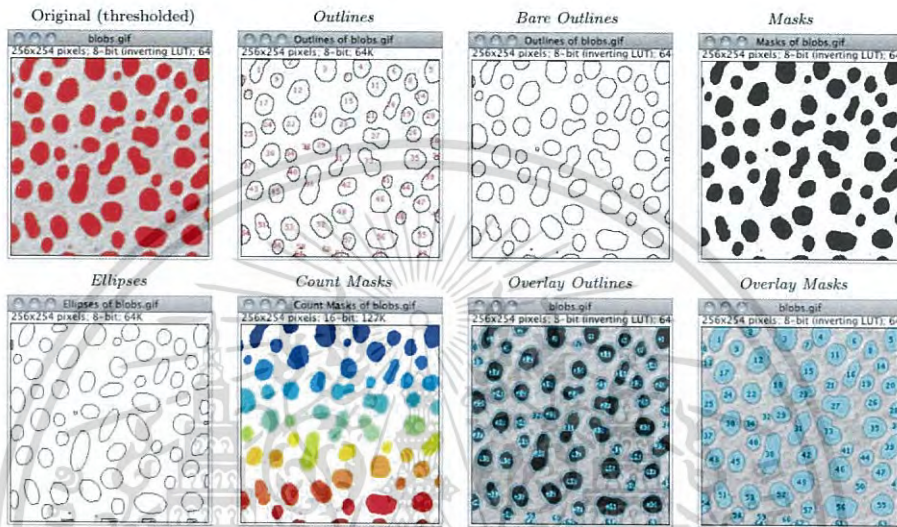


รูปที่ 2.29 การทำงานของเครื่อง SEM [33]

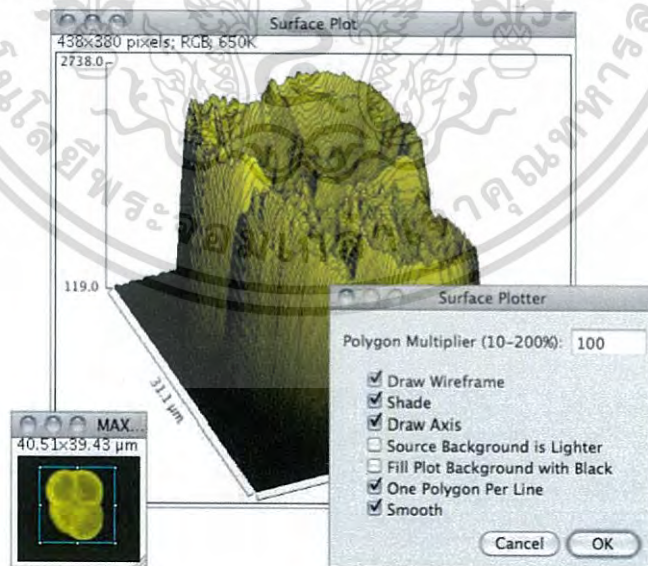
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยภาพ Binary image จากโปรแกรม Image J [34]

การทำภาพ Binary image เป็นวิธีที่ช่วยในการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค ขนาดของอนุภาค ความแตกต่างของอนุภาค หรือเป็นวิธีที่ใช้สำหรับดูความแตกต่างของเฟสผสม 2 เฟส ที่มีความแตกต่างกัน เช่นบริเวณพื้นผิวเรียบ ขรุขระ หรือพื้นผิวที่ไม่มีความสม่ำเสมอ ที่ผสมกันอยู่ให้แสดงผลที่ชัดเจนขึ้นทำให้การวิเคราะห์ผลมีความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการหาการกระจายตัวของอนุภาคจากโปรแกรม Image J



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวจากโปรแกรม Image J

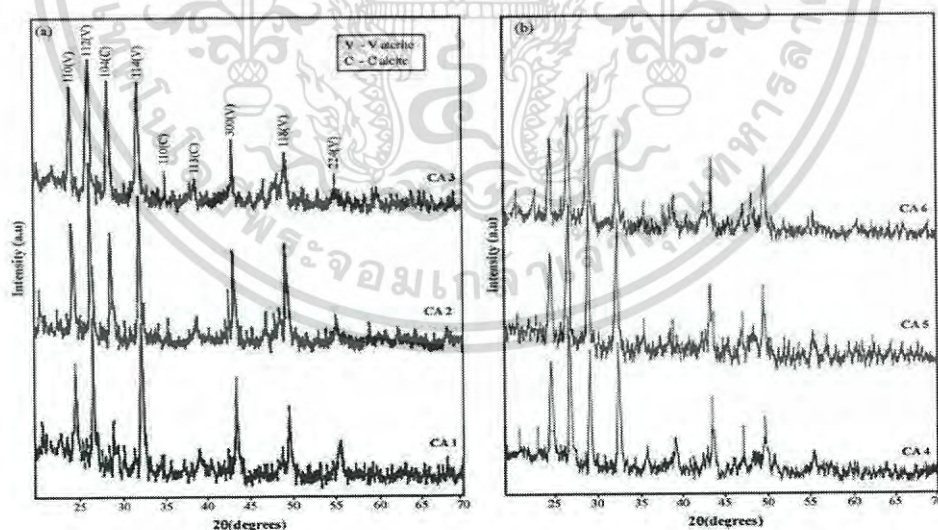
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 2007 A. Devarajan และคณะ [35] ได้ทำการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-CaCO₃) จาก แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) และแอมโมเนียม คาร์บอเนต (Ammonium carbonate) โดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี ร่วมกับวิธีการบดย่อย พบว่าผลของการบดย่อยไม่ได้ส่งผลต่อขนาดอนุภาค CaCO₃ ที่อยู่ในรูปของ แวร์ทีไรต์ เฟส (Vaterite phase) แต่ในทางตรงกันข้ามการบดย่อยมีผลต่อขนาดอนุภาคของ CaCO₃ ที่อยู่ในรูปแคลไซต์ เฟส (Calcite phase) โดยขนาดอนุภาคลดลงจาก 50 นาโนเมตร เป็น 32 นาโนเมตร

Sample code	Vaterite phase		Calcite phase	
	<i>hkl</i> planes	Crystallite size (nm)	<i>hkl</i> planes	Crystallite size (nm)
CA1	110	28	104	50
	112	26		
	114	23		
CA6	110	31	104	32
	112	24		
	114	19		

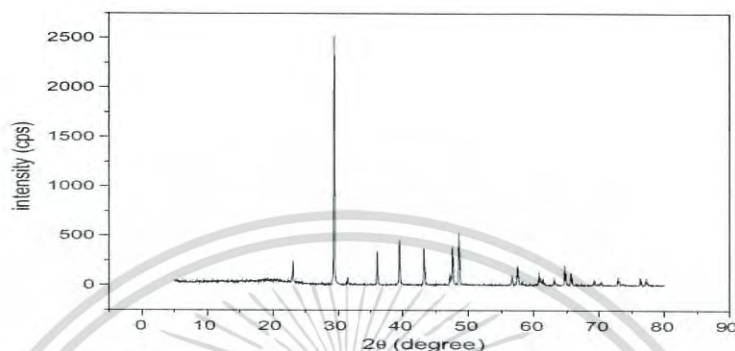
รูปที่ 2.32 แสดงขนาดอนุภาคของ nano-CaCO₃ ที่อยู่ในรูปของแคลไซต์และแวร์ทีไรต์ [35]



รูปที่ 2.33 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค (X-ray diffraction) ของผลึก แคลไซต์และแวร์ทีไรต์ [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

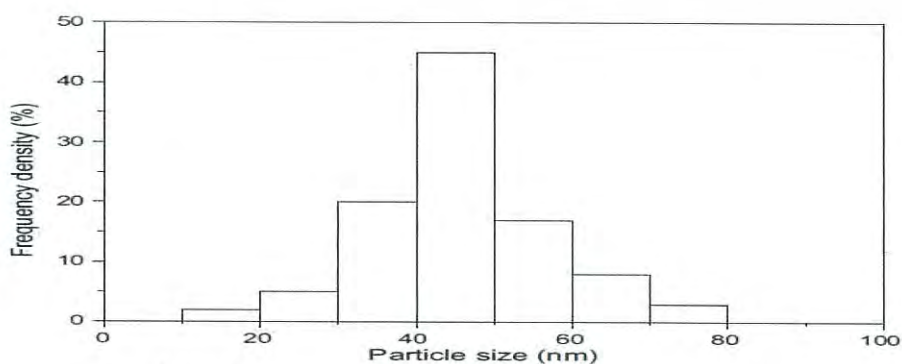
ปี 2011 Bao-chang Sun และคณะ [36] ได้ทำการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nanoCaCO_3) โดยอาศัยการดูดซับ CO_2 และ NH_3 ในสารละลาย CaCl_2 ด้วยวิธี rotating packed bed (RPB) พบว่า CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในรูปของแคลไซต์ เฟส (Calcite phase) และมีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตร นอกจากนี้แล้วยังพบว่ามี การกระจายตัวขนาดอนุภาคของ nano-CaCO_3 อยู่ในช่วง 10 – 80 นาโนเมตร



รูปที่ 2.34 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค (X-ray diffraction) ของ nano-CaCO_3 ในรูปของแคลไซต์ เฟส [36]



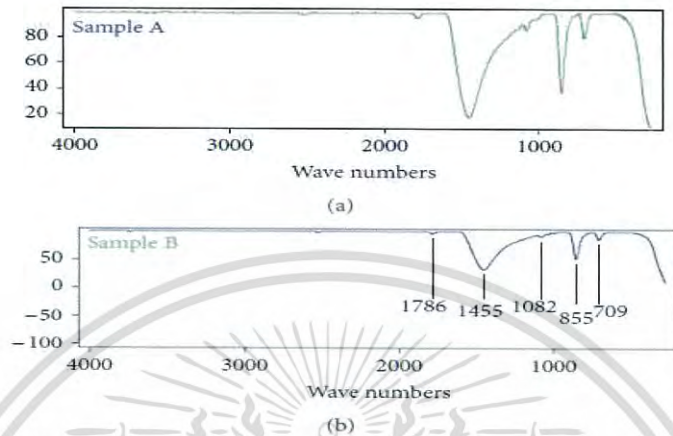
รูปที่ 2.35 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy) ของอนุภาค nano-CaCO_3 [36]



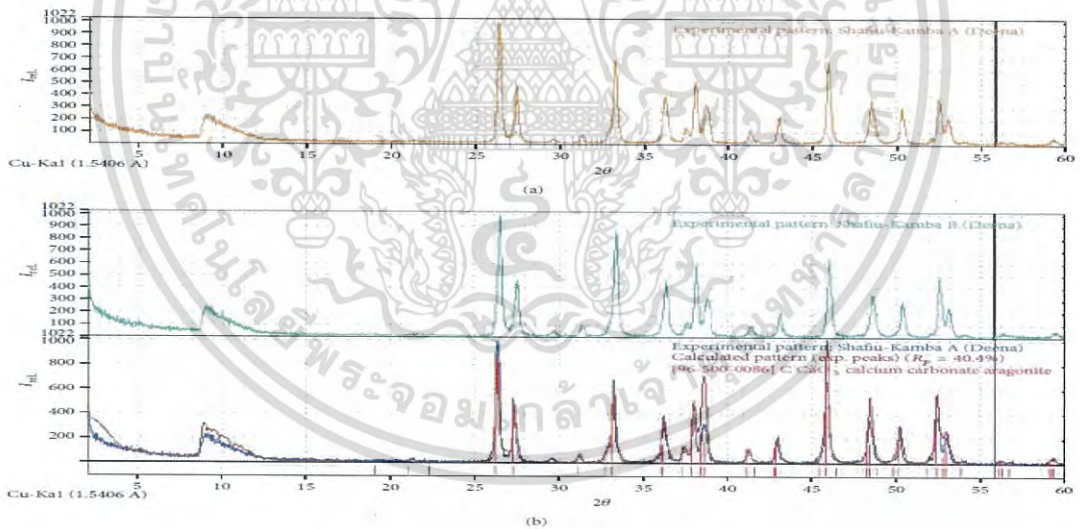
รูปที่ 2.36 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาค nano-CaCO_3 [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี 2013 Abdullahi Shafiu Kamba และคณะ [37] ได้ทำการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-CaCO₃) จากเปลือกหอยแครง โดยใช้วิธี High pressure homogeniser (HPH) ร่วมกับวิธีไมโครอิมัลชัน (microemulsion) พบว่า CaCO₃ ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในรูปของ ออราโกไนท์เฟส (Aragonite phase) มีลักษณะเป็นแท่ง และมีขนาดประมาณ 50 นาโนเมตร

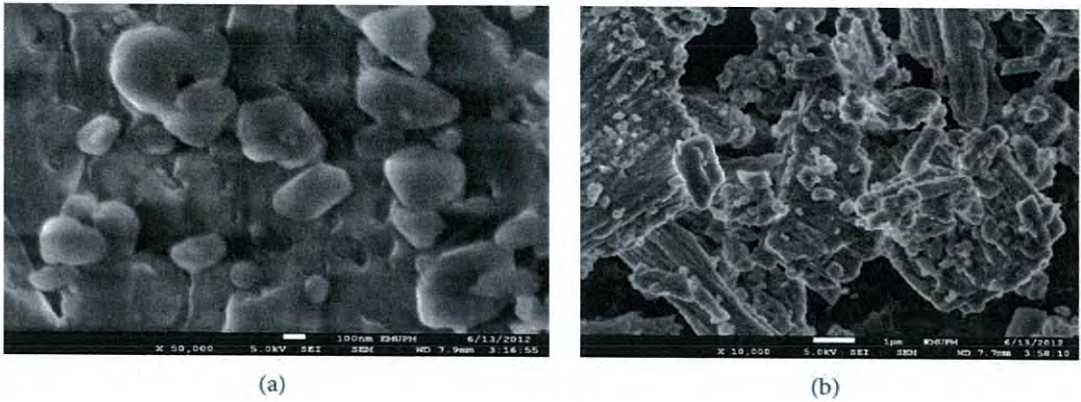


รูปที่ 2.37 การตรวจหมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR spectra ของ CaCO₃ nanocrystals aragonite phase (a) และ ผงเปลือกหอยแครง (b) [37]



รูปที่ 2.38 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค (X-ray diffraction) (a) ผง nano-CaCO₃ เปลือกหอยแครง และ (b) ผง CaCO₃ เปลือกหอยแครง [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

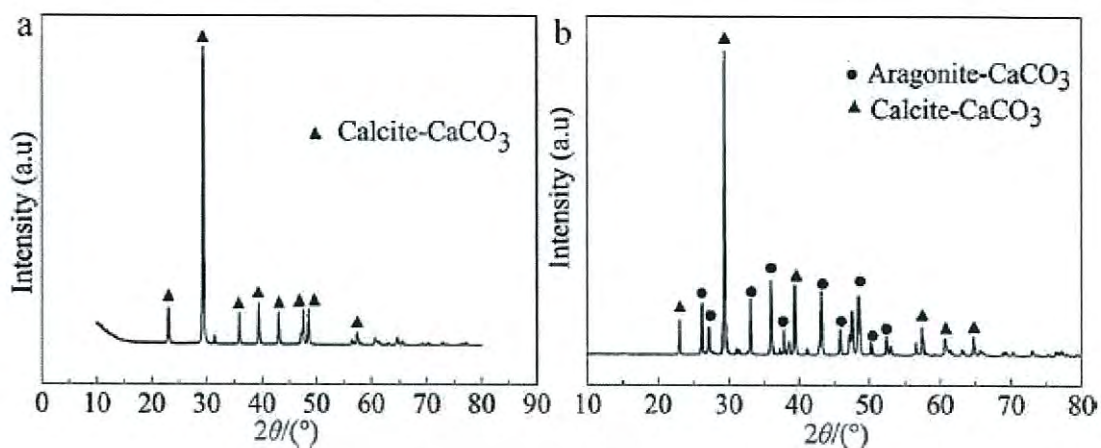


รูปที่ 2.39 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) (a) ผง nano-CaCO₃ เปลือกหอยแครง (b) ผง CaCO₃ เปลือกหอยแครง [37]

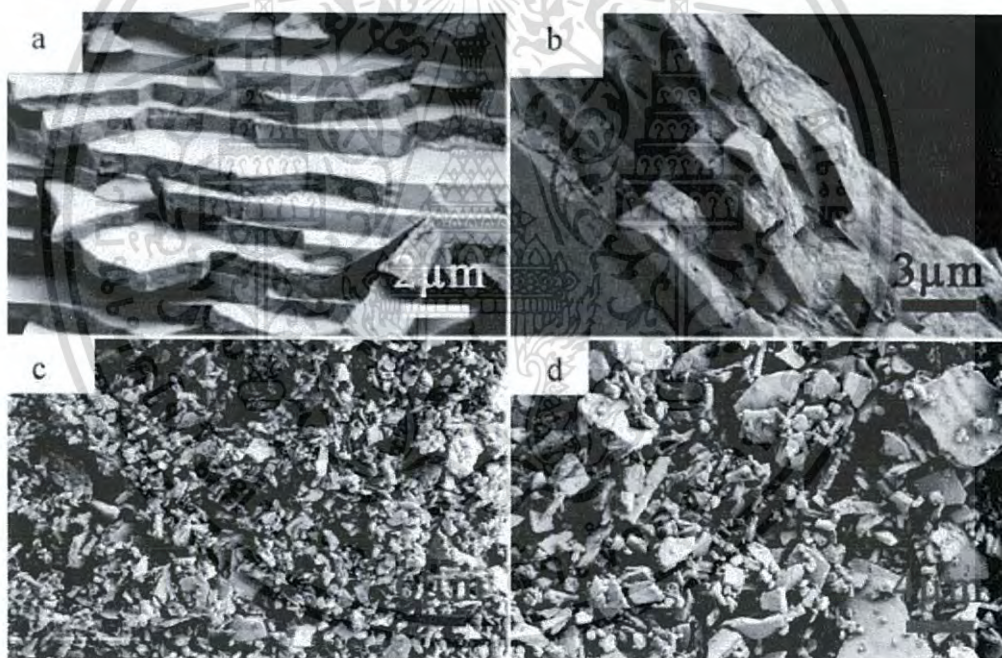


รูปที่ 2.40 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy) (a) rod-shaped nanocrystals (b) ผง CaCO₃ เปลือกหอยแครง [37]

ในปี 2012 Hai-Yan Li และ คณะ [38] ได้ทำการเตรียม CaCO₃ จากเกลือดปลาเหลือทิ้งเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) พบว่า CaCO₃ ที่เตรียมได้จะอยู่ในรูปของอะราโกไนท์ จากนั้นได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO₃ ด้วย BME เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีและทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้ CaCO₃ จากเกร็ดปลาเปรียบเทียบกับการใช้ nano-CaCO₃ จากทางการค้า พบว่าสมบัติเชิงกลของการใช้ CaCO₃ จากเกร็ดปลาเป็นสารตัวเติมในพอลิโพรไพลีนให้สมบัติที่ดีกว่าการใช้ nano-CaCO₃ จากทางการค้า เนื่องจากขนาดอนุภาคของ CaCO₃ ที่เตรียมได้จากเกลือปลา มีขนาดใหญ่กว่าจากทางการค้า จึงไม่สามารถที่จะยึดเกาะได้ดีกับพอลิโพรไพลีน

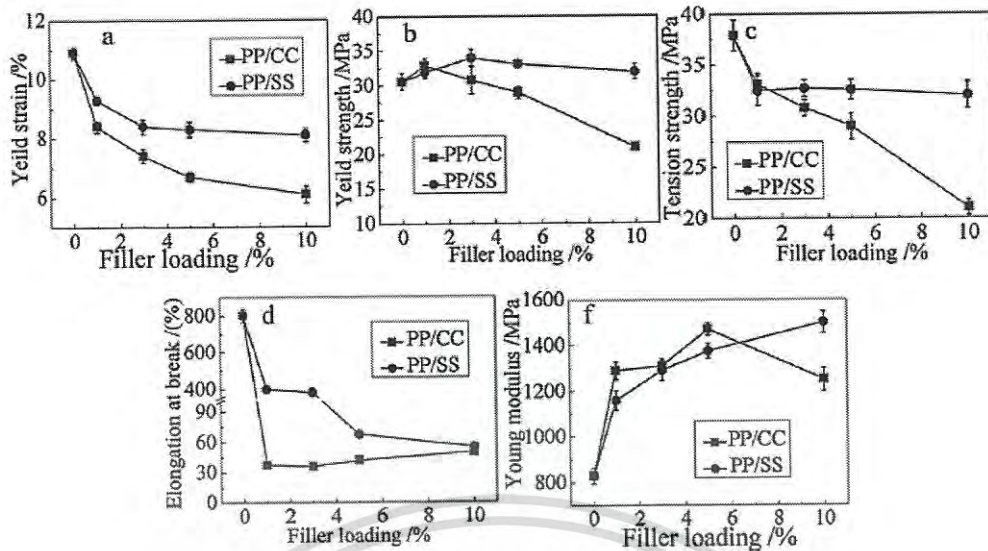


รูปที่ 2.41 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค (X-ray diffraction) ภาพ a คือ nano- CaCO_3 จากทางการค้าที่มีโครงสร้างแบบแคลไซต์ ภาพ b คือ CaCO_3 จากเกล็ดปลาที่มีโครงสร้างแบบอะราโกไนท์ [38]



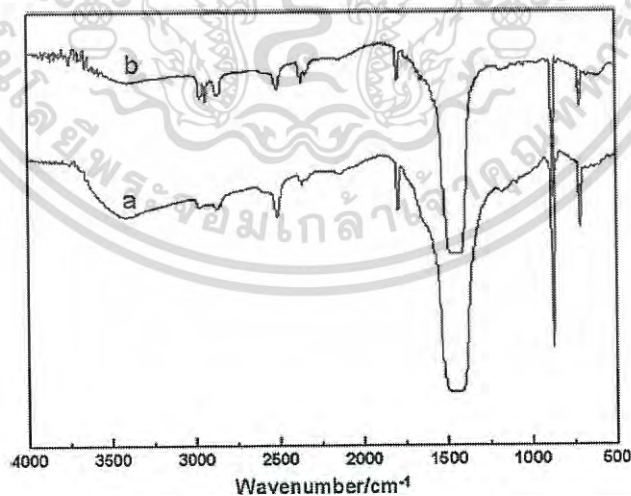
รูปที่ 2.42 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) แสดงสัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเกล็ดปลา รูป a และ b แสดงภาพแนวตัดขวางของอนุภาค CaCO_3 รูป c และ d แสดงลักษณะผงของ CaCO_3 จากเกล็ดปลา [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



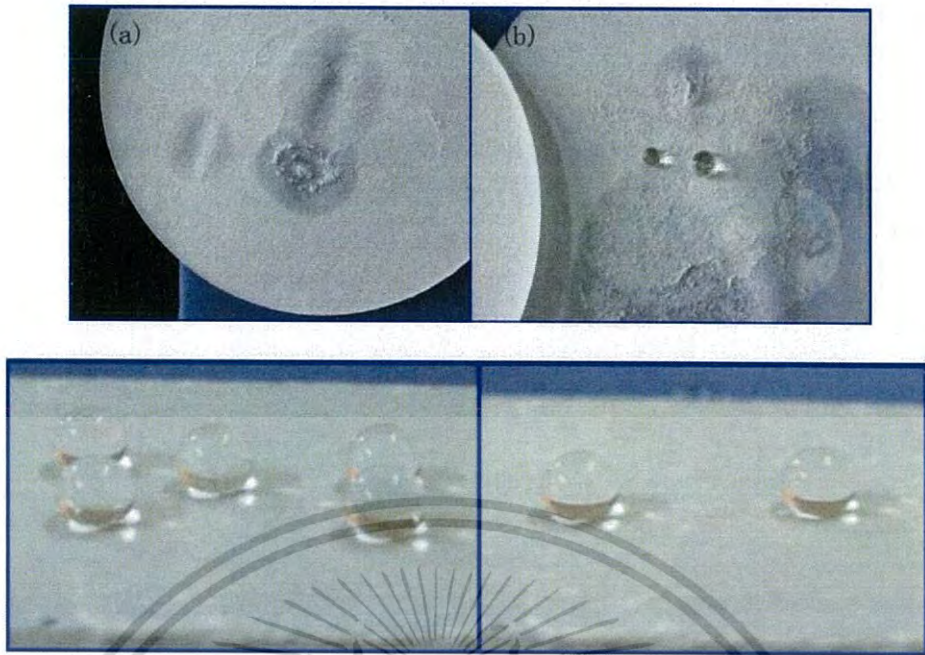
รูปที่ 2.43 แสดงสมบัติเชิงกลของ CaCO_3 จากเปลือกปลา (SS) เปรียบเทียบกับการใช้ nano- CaCO_3 จากทางการค้า (CC) [38]

ในปี 2013 Yansheng Zheng และคณะ [39] ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของ nano- CaCO_3 ให้มีสมบัติเป็น Superhydrophobic โดยใช้โอเลอิก แอซิด (Oleic acid) ส่งผลให้ nano- CaCO_3 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้วแสดงสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) โดยบริเวณพื้นผิวจะทำให้เกิด surface wettability มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดการยึดเกาะได้ดีและยังช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของ nano- CaCO_3 ได้ดียิ่งขึ้นและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

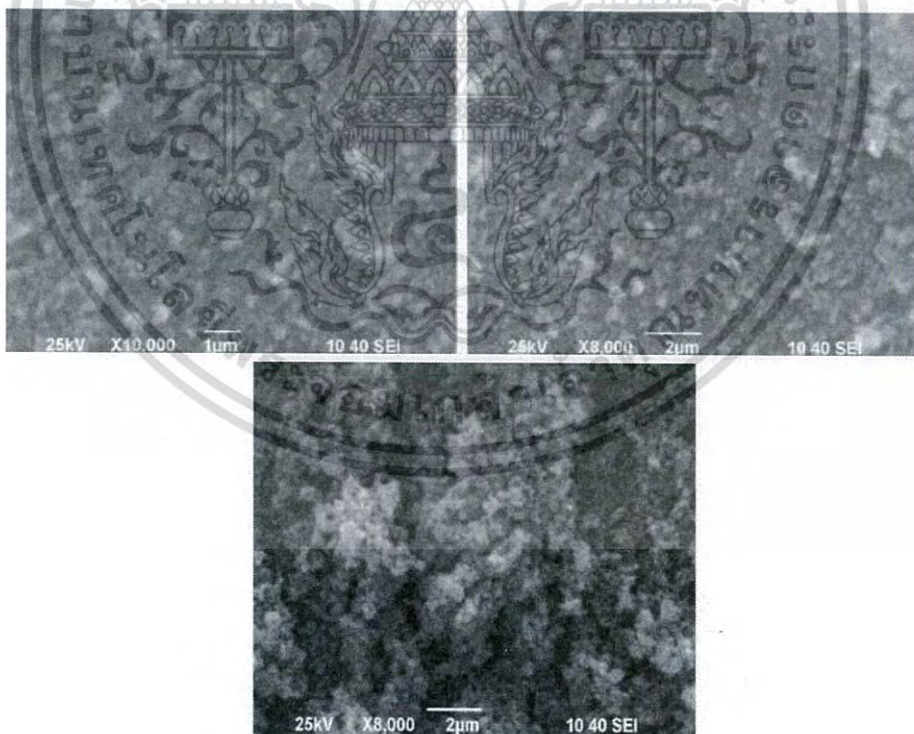


รูปที่ 2.44 การตรวจหามู่งักซ์ชันด้วย FTIR spectra ของ nano- CaCO_3 โดย (a) ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิว (b) มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโอเลอิกแอซิด [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.45 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติไฮโดรโฟบิกของ nano-CaCO₃ โดย (a) ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิว (b) มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโอเลอิกแอซิด [39]



รูปที่ 2.46 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) แสดงสัญญาณวิทยาของ nano-CaCO₃ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโอเลอิกแอซิด [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2013 Tariq และ Hassan [3] ได้ทำการเตรียม nano- CaCO_3 จากเปลือกไข่เหลือทิ้ง ด้วยวิธีแมคคาโนเคมีคอล (Mechanochemical method) ร่วมกับวิธีโซโนเคมีคอล (Sonochemical method) พบว่า CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปของแคลไซต์และมีขนาดอนุภาคประมาณ 10 นาโนเมตร

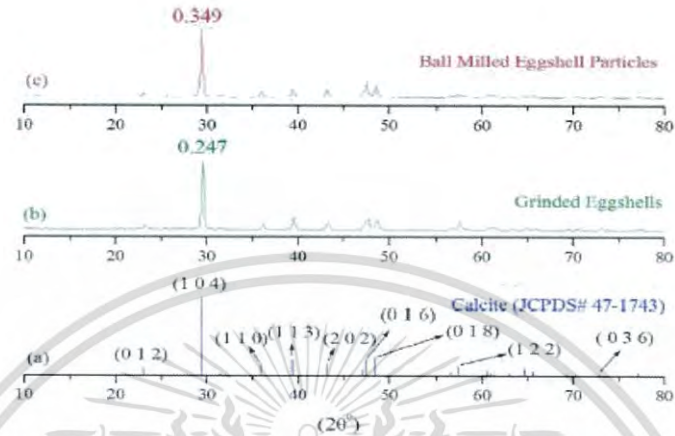
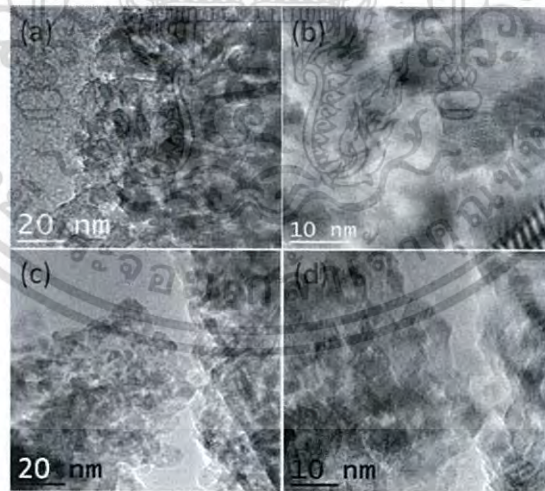


Fig. 2. (a) JCPDS Card No. 47-1743 of Calcite (CaCO_3) and XRD patterns of (b) ground eggshells and (c) ball milled eggshell particles.

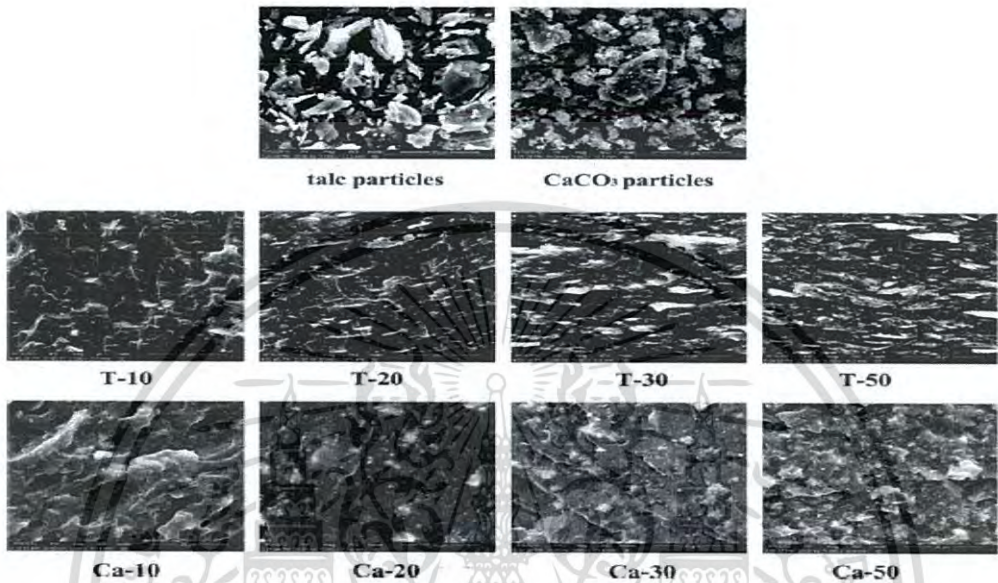
รูปที่ 2.47 พิสูจน์เอกลักษณ์และลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค (X-ray diffraction) (a) JCPDS No. 47-1743 ของ Calcite (b) CaCO_3 จากเปลือกไข่ที่ผ่านการบด (c) CaCO_3 จากเปลือกไข่ที่ผ่านการ Ball Milled [3]



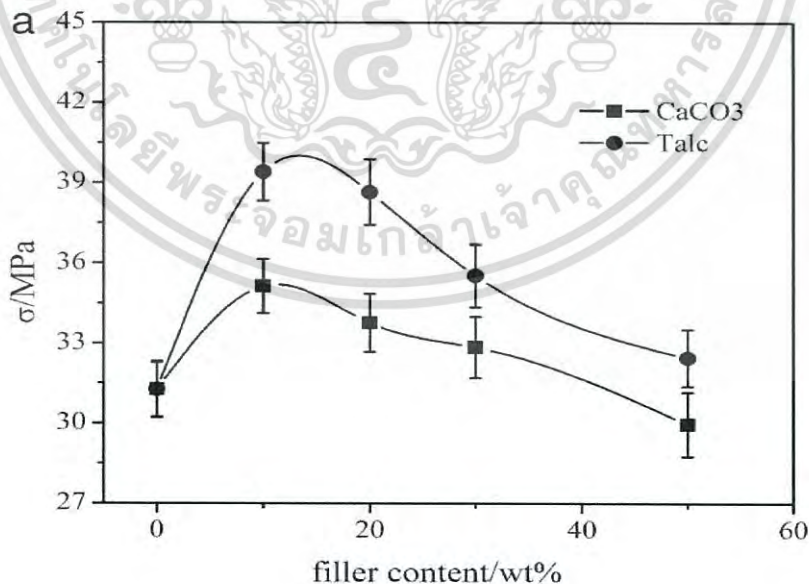
รูปที่ 2.48 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy) ของอนุภาค nano- CaCO_3 จากเปลือกไข่ จาก (a-d) เมื่อใช้สภาวะในการทดลองต่างกัน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2013 Bin Wang และ Qi Wang [4] ศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติต่างๆ ของ CaCO_3 และ Talc ที่ใช้เป็นสารตัวเติมใน Poly vinyl alcohol (PVA) พบว่าทั้ง CaCO_3 และ Talc ที่ใช้เป็นสารตัวเติมนั้นจะทำให้ Tensile strength และ Modulus สูงขึ้น แต่จะทำให้ % Elongation ลดต่ำลงตามปริมาณ CaCO_3 และ Talc ที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้แล้วยังพบว่าในกระบวนการขึ้นรูปนั้นจะช่วยลด Die swell เมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 และ Talc เป็นสารตัวเติม

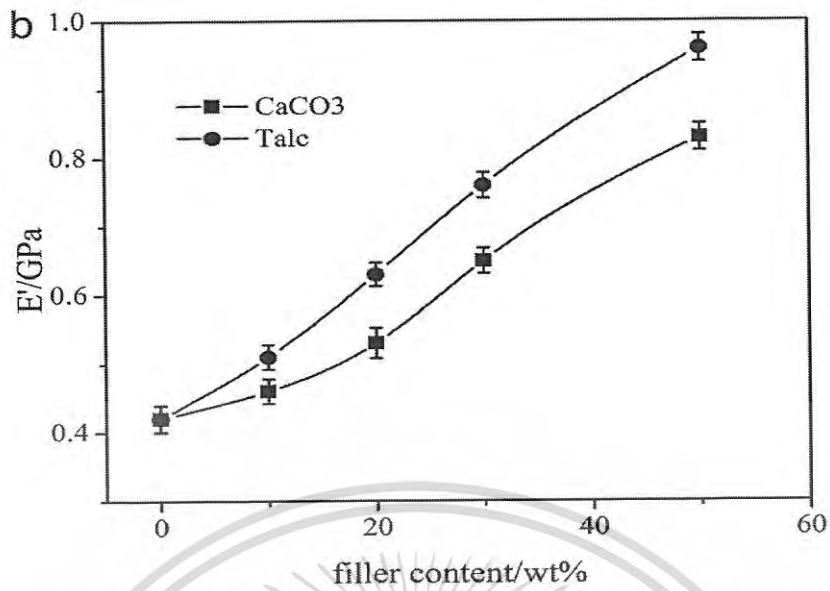


รูปที่ 2.49 ภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) ของอนุภาค Talc และ CaCO_3 และ Talc/PVA และ CaCO_3 /PVA [4]

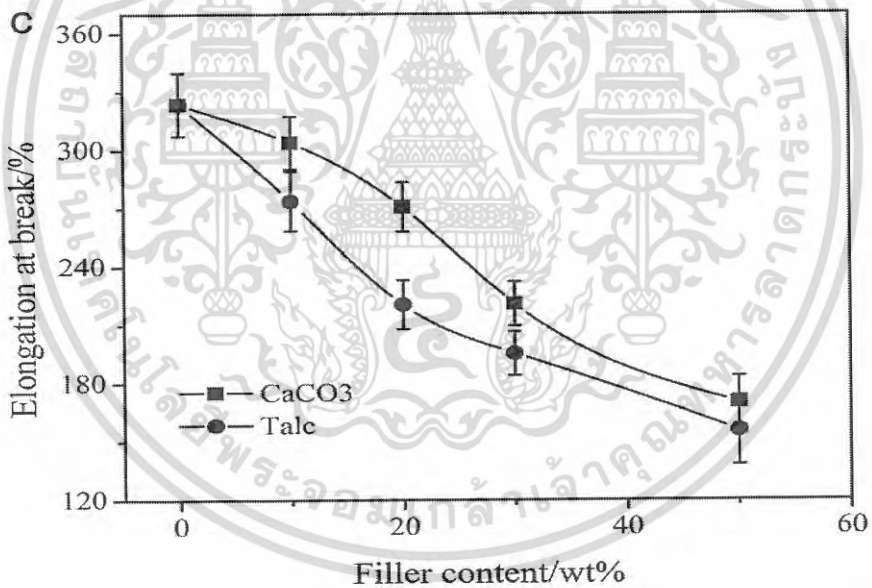


รูปที่ 2.50 ภาพ a แสดงสมบัติ Tensile strength เมื่อใช้ CaCO_3 และ Talc เป็นสารเติมใน PVA [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.51 ภาพ b แสดงสมบัติ Modulus เมื่อใช้ CaCO₃ และ Talc เป็นสารเติมใน PVA [4]



รูปที่ 2.52 ภาพ C แสดงสมบัติ Elongation at break เมื่อใช้ CaCO₃ และ Talc เป็นสารเติมใน PVA [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 กระดาษฟอยล์
- 3.1.2 ซ้อนตักสารพลาสติก
- 3.1.3 ผ้าคัดขนาดอนุภาค ขนาด 50, 170 และ 325 Mesh
- 3.1.4 ครกบดสาร
- 3.1.5 บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 500, 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.6 แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
- 3.1.7 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.1.8 ขวด 3 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.1.9 เครื่องปั่นสาร Moulinex กำลังรอบสูง
- 3.1.10 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.11 เครื่องชั่งสารดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Satorious ประเทศเยอรมัน
- 3.1.12 ถ้วยเซรามิกพร้อมฝาปิด (Ceramic crucible)
- 3.1.13 เตาเผาสารอุณหภูมิสูง
- 3.1.14 เตาแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.15 ตู้อบสาร ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.16 ชุดกรวยกรอง 1 ชุด
- 3.1.17 ถังมือกันความร้อน
- 3.1.18 ฝาปิดจุก
- 3.1.19 แวนตาป้องกัน
- 3.1.20 ถังซีบ LDPE
- 3.1.21 ถังผสมเม็ดพลาสติก
- 3.1.22 เครื่องผสมภายใน (Internal mixing) BRABENDER รุ่น MX500-D75L90, บริษัท CHAREON, ประเทศไทย
- 3.1.23 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Cutting machines) รุ่น BG25, บริษัท BOSCO, ประเทศไทย
- 3.1.24 เครื่องเป่าชั้นรูปพลาสติก (Blown-film machines) รุ่น LF-250, บริษัท Lab Tech Engineering Company LTD, ประเทศไทย
- 3.1.25 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) รุ่น LR 5K, บริษัท LLYOD INSTRUMENT LTD, ประเทศอังกฤษ
- 3.1.26 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Index; MFI) รุ่น MF20, บริษัท Instron®'s CEAST, ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.27 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (X-ray Fluorescence; XRF) รุ่น D8 Advance, บริษัท SIEMENS, ประเทศเยอรมัน
- 3.1.28 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) รุ่น D8 Advance, บริษัท SIEMENS, ประเทศเยอรมัน
- 3.1.29 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric analyzer; TGA) รุ่น PYRIS Diamond, บริษัท PERKINELMER LTD, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.30 เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Scanning Calorimetry; DSC) รุ่น DSC-7RS, บริษัท PERKINELMER LTD, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.31 เครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสาร (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR) รุ่น SPECTRUM GX, บริษัท PERKIN ELMER LTD, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.32 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) LEO รุ่น JSM-5410 LV, บริษัท JEOL LTD, ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.33 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning electron microscope; FE-SEM) รุ่น JSM-7001F, บริษัท JEOL LTD, ประเทศญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วัสดุสารเคมี

- 3.2.1 เปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ
- 3.2.2 เอทานอล (Ethanol) ความบริสุทธิ์ 95% ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagents
- 3.2.3 น้ำปราศจากไอออน (De-ionization water : DI)
- 3.2.4 น้ำกลั่น (Distribution water)
- 3.2.5 สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium Hypochlorite; NaOCl)
- 3.2.6 พาราฟิน ออยล์ (Paraffin oil)
- 3.2.7 กรดสเตียริก แอซิด (Stearic acid) ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagents
- 3.2.8 เม็ดพลาสติก LDPE เกรดเป่าถุง ผลิตโดยบริษัท PTT Global Chemical Public
- 3.2.9 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากทางการค้าขนาด 2-3 ไมครอน จากบริษัทสุรินทร์ออยล์เคมีคอล ไทยแลนด์ (Surintomya chemicals Thailand Co.Ltd)
- 3.2.10 นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano- CaCO_3) จากทางการค้าขนาด 35-40 นาโนเมตร จาก บริษัทไทยโพลีเคมีคอล จำกัด (ThaiPoly Chemicals Co.Ltd)

ตารางที่ 3.1 สมบัติเม็ดพลาสติก LDPE จากบริษัท PTT Global Chemical Public

Properties	Test Method	Value	Units
Melt flow rate ที่ 190 °C	ASTM D1238	4.00	g/10 min
Density	ASTM D1505	0.917-0.930	g/cm ³
Tensile strength	ASTM D638	0.20-0.40	N/mm ²
Elongation at break	ASTM D638	400	%
Hardness, Shore D	ASTM D2240	SD48	-
Melting Point	ASTM D2117	120	°C

ตารางที่ 3.2 สมบัติ CaCO_3 บริษัทสุรินทร์ออยล์เคมีคอลไทยแลนด์

Test Items	Specification	Typical	Test Method
Dry Whiteness	92.000-95.000 %	94.00	DIN 53163
Mean Particle Size	2.000-3.000 Micron	2.645	Mastersizer 2000
Oil Absorption	17.000-23.000 Paraffin/100 g CaCO_3	18.490	ISO 787/5
Moisture Content	0.000-0.200 %	0.100	ISO 782/2

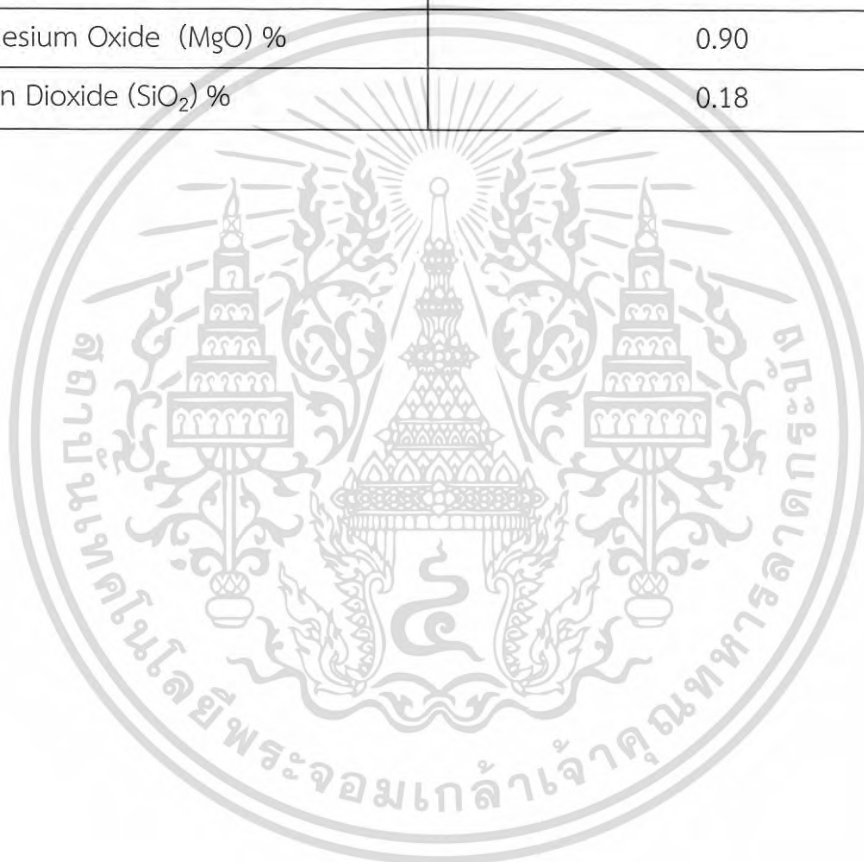
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติ nano-CaCO₃ บริษัทไทยโพลีเคมีคอล จำกัด

Product Specifications	Value
Brightness (%min)	92.50
Mean Particle Size (nano meter)	35-40
Moisture Ex-work (%-max)	0.20

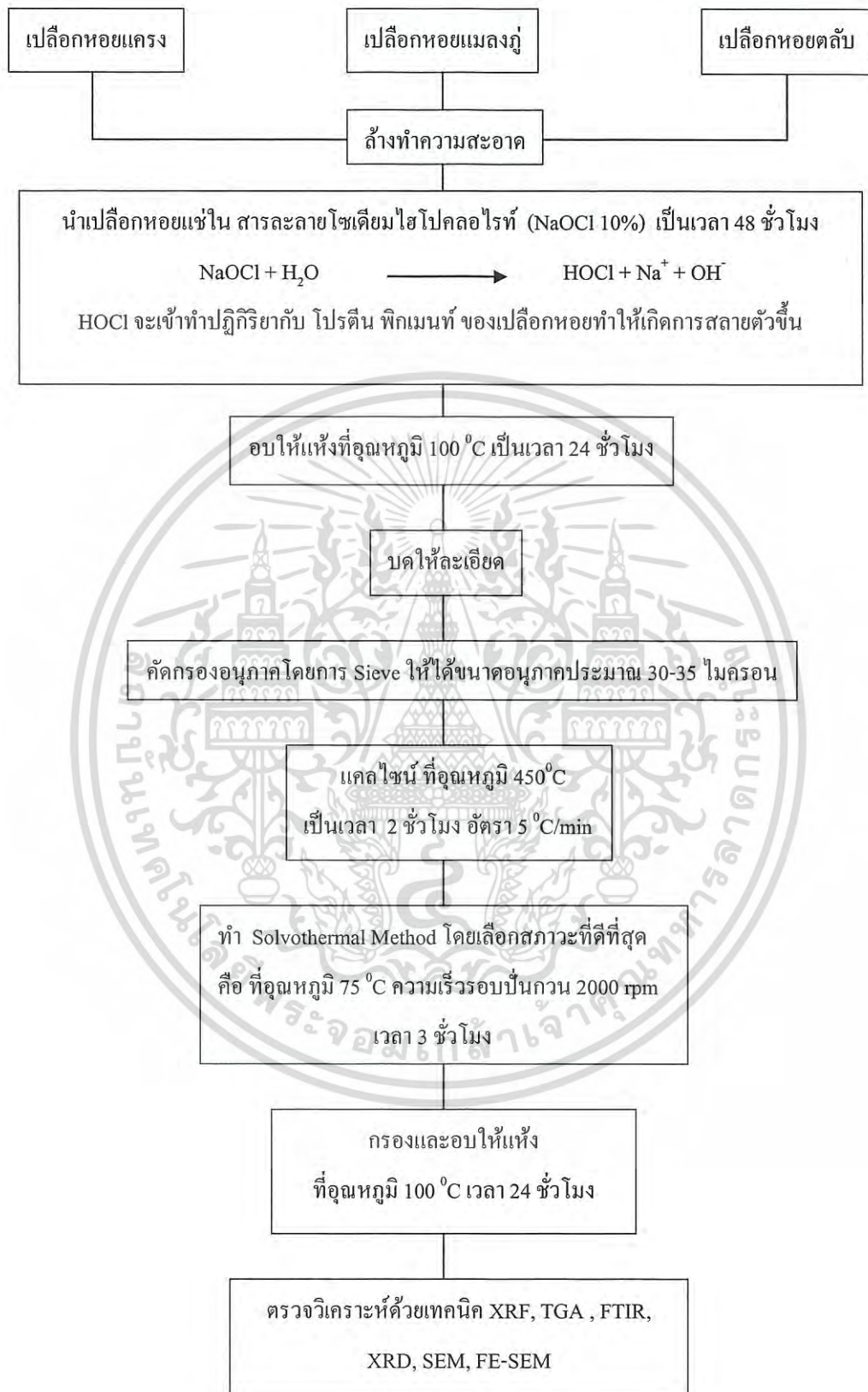
ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมี nano-CaCO₃ บริษัทไทยโพลีเคมีคอล จำกัด

Typical Chemical Properties	Value
Calcium Carbonate (CaCO ₃) %	98.30
Megnesium Oxide (MgO) %	0.90
Silicon Dioxide (SiO ₂) %	0.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังแสดงวิธีการสังเคราะห์ nano-CaCO₃ จากเปลือกหอย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการเตรียมผง CaCO_3 จากเปลือกหอย

ในการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano- CaCO_3) จากเปลือกหอยจะต้องทำการเตรียมผง CaCO_3 จากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

3.3.1 ทำการล้างเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด และกำจัดคราบดิน โคลน และสิ่งสกปรกบริเวณเปลือกหอยให้สะอาด

3.3.2 เตรียม Stock solution ของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ NaOCl 10% จาก NaOCl 28% จากทางการค้า โดยการชั่ง NaOCl 357.14 กรัม ละลายน้ำ 1 ลิตร จะได้เป็นสารละลาย NaOCl 10% โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 10% คลอรีน แต่ในการทดลองต้องเตรียม Stock solution โดยมีปริมาตร 100 ลิตร เพื่อใช้แช่เปลือกหอยในการฟอกขาว เพราะฉะนั้นจะต้องใช้สารละลาย NaOCl = 35,714 กรัม หรือเท่ากับ 35.71 กิโลกรัม (วิธีการคำนวณโดยละเอียดจะแสดงในภาคผนวก ก.1 การเตรียม Stock solution)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น



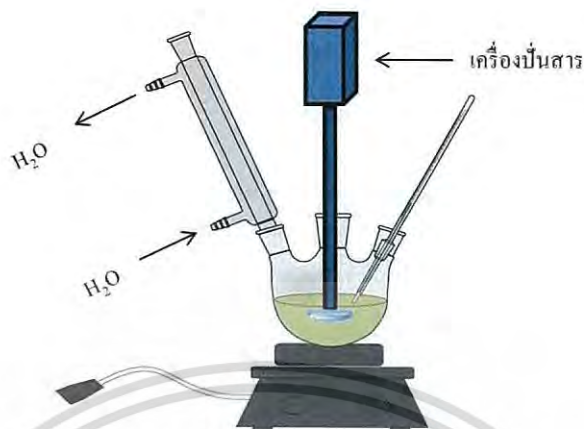
กรดไฮโปคลอรัส HOCl จะเข้าทำปฏิกิริยากับโปรตีนฟิวกเมนต์ หรือสารอินทรีย์ของเปลือกหอยทำให้เกิดการสลายตัวขึ้น [40] ทำให้ได้เปลือกหอยที่มีสีขาว

3.3.3 นำเปลือกหอยที่ผ่านการแช่ในโซเดียมไฮโปคลอไรท์แล้วอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.4 บดเปลือกหอยด้วยครกบดจนละเอียดเป็นผง แล้วทำการ Sieve ด้วยผ้าคัดขนาดอนุภาค ที่ขนาด 50, 170 และ 325 Mesh

3.3.5 เก็บผง CaCO_3 ที่ได้ในถุงพอลิเอทิลีนและเก็บไว้ในที่แห้ง

- 3.5.3 นำสารในข้อ 3.5.1 และ 3.5.2 เทผสมลงในขวด 3 คอ
 3.5.4 ตั้งชุดอุปกรณ์ Solvothermal method แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วิธีการเตรียม Solvothermal method

- 3.5.5 ให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate จากนั้นทำการปรับอุณหภูมิในขวด 3 คอให้อยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส และเครื่องปั่นสาร (Moulinex) ตั้งความเร็วรอบที่ 2000 rpm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
 3.5.6 จากนั้นทำการกรองระเหยเอาเอทานอลและน้ำปราศจากไอออนออก
 3.5.7 นำ CaCO_3 ที่ได้ไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 3.5.8 ผง CaCO_3 ที่ได้เก็บใส่ถุงพอลิเอทิลีนและเก็บไว้ในที่แห้ง
 3.5.9 ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ XRD เพื่อเป็นการยืนยันว่า CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้จะต้องอยู่ในรูปของแคลไซต์ และมีขนาดอนุภาค ระดับนาโนเมตรโดยใช้เทคนิค FE-SEM เป็นตัววิเคราะห์ผล และหาขนาดอนุภาค จากภาพ SEM ด้วยวิธี linear intercept และศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคจากการทำภาพ Binary image ด้วยโปรแกรม Image J

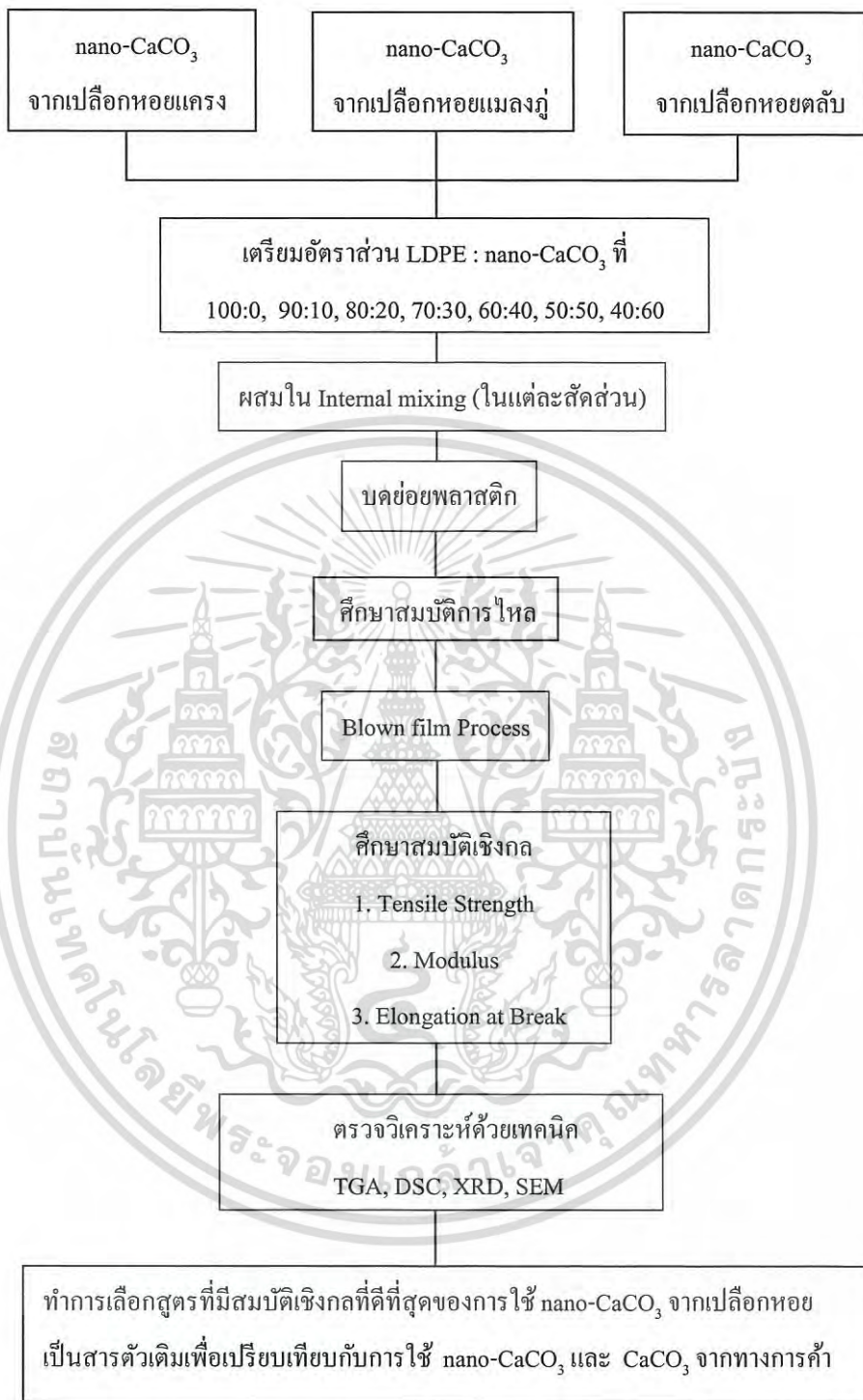
3.6 กระบวนการปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 จากเปลือกหอย

จากงานวิจัยของ K. PREMPHET และ P. HORANONT [42] พบว่ากรดเตตระริก 1 กรัมจะทำปฏิกิริยาครอบคลุมพื้นที่ผิวของสารตัวเดิม 455 m^2 โดยที่ nano- CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับมีพื้นที่ผิวประมาณ $1.49 \text{ m}^2/\text{g}$ ดังนั้นกรดเตตระริก 2 %wt จะครอบคลุมพื้นที่ผิวของ nano- CaCO_3 จากเปลือกหอยได้ทั้งหมด

ทำการปรับปรุงพื้นผิวของ nano- CaCO_3 จากเปลือกหอย 1000 กรัม โดยซังสเตียริก แอซิด 20 กรัม ละลายในเอทานอล 500 มิลลิลิตร และกวนให้เข้ากันโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการเติม nano- CaCO_3 จากเปลือกหอยลงไปผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการกรองและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังแสดงกระบวนการขึ้นรูปพลาสติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 กระบวนการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสมกับ CaCO_3 จากเปลือกหอยในแต่ละชนิด

หลังจากที่ได้ผง nano- CaCO_3 จากเปลือกหอยในแต่ละชนิด ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสแตียริกแล้ว จะนำมาผสมกับเม็ดพลาสติก LDPE เพื่อศึกษาผลของการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมใน LDPE โดยมีวิธีการเตรียมในอัตราส่วนต่างๆดังต่อไปนี้ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สูตรในการผสมของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย

ชนิด CaCO_3	พอลิเมอร์คอมโพสิต	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	สูตรที่ 6	สูตรที่ 7
หอยแครง	LDPE:nano- CaCO_3	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
หอยแมลงภู่	LDPE:nano- CaCO_3	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
หอยตลับ	LDPE:nano- CaCO_3	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60

ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดแบบ อินเทอร์เน็ต มิกซ์เซอร์ (Internal mixer) จากบริษัท CHAREON TUT CO,LTD รุ่น MIXER : MX500-D75L90 โดยใช้สารหล่อลื่นพาราฟินออยล์ (Parafin oil) เป็นสารช่วยผสมในอัตราส่วน 0.5 % โดยน้ำหนัก และทำการผสมใน Internal mixer โดยทำการตั้งพารามิเตอร์ดังนี้

อุณหภูมิที่ = 160 องศาเซลเซียส
 Screw speed = 50 รอบต่อนาที
 เวลาที่ใช้ในการผสม = 5 นาที



รูปที่ 3.3 เครื่องผสมระบบปิดอินเทอร์เน็ตมิกซ์เซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 กระบวนการบดย่อยพลาสติกสำหรับเตรียมใช้ขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต

เตรียมเครื่องบดพลาสติก (Grinding Machine) จากบริษัท BOSCO โดยนำของผสมในขั้นตอนที่ 3.7 ของแต่ละสูตรเข้าเครื่องบดพลาสติก เพื่อให้ได้พลาสติกขนาดเล็กเหมาะสมที่จะใช้บดลงในเครื่องเป่าฟิล์ม จากนั้นนำพลาสติกที่ได้ไปทดสอบสมบัติการไหล



รูปที่ 3.4 เครื่องบดพลาสติก

3.9 การทดสอบสมบัติการไหลของพลาสติก Melt Flow Index (MFI)

ดัชนีการไหล (MFI) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งวัดในหน่วยของน้ำหนักพอลิเมอร์ (กรัม) ที่ไหลผ่านท่อ capillary ในช่วงเวลา 10 นาที ซึ่งสมบัตินี้เป็นสมบัติหนึ่งซึ่งมีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์นั้นๆ งานวิจัยนี้จะทำการทดลองหาดัชนีการไหล โดยใช้เครื่องทดสอบจากบริษัท CEAST ในการทดสอบ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในพลาสติก LDPE โดยทำการควบคุมสภาวะดังนี้

ทดสอบมาตรฐานตาม ASTM 1238 [27]

อุณหภูมิ	=	190	องศาเซลเซียส
ใช้น้ำหนักกดทับ	=	2.16	กิโลกรัม
จับเวลา	=	1	นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบสมบัติการไหลของพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blown film process)

ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมสารตัวเติม LDPE: nano-CaCO₃ จากเปลือกหอย ที่เตรียมไว้ในแต่ละสูตรด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown Film Machine) จากบริษัท Lab Tech Engineering Company LTD โดยทำการควบคุมสภาวะดังนี้

อุณหภูมิที่ Zone 1	=	160	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ Zone 2	=	170	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ Die	=	180	องศาเซลเซียส
Screw speed	=	40	รอบต่อนาที
ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1	=	3.0	รอบต่อนาที
ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2	=	3.2	รอบต่อนาที



รูปที่ 3.6 เครื่อง Blown film machine

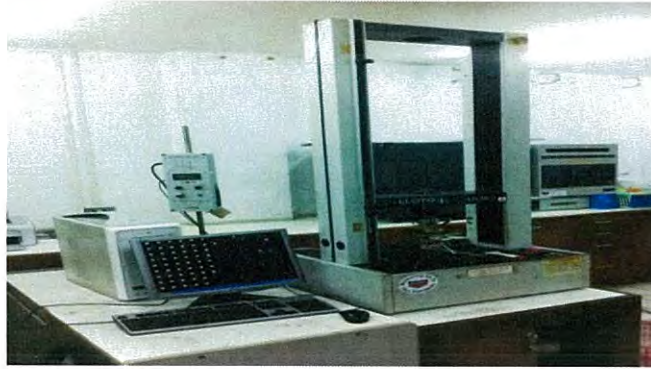
3.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Testing)

ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ด้วยเครื่อง Universal Machine Testing จากบริษัท LLOYD INSTRUMENTS รุ่น LR 5K ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มหนา 0.05 มิลลิเมตร และมีความยาวของเกต (Gauge length) 30 มิลลิเมตร นำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบสมบัติค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด โดยทำการควบคุมสภาวะดังนี้

ทดสอบมาตรฐานตาม ASTM D882 [43]

อุณหภูมิ	=	25 °C
น้ำหนักโหลด	=	100 N
ความเร็วในการดึง	=	100 mm/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึง

ค่าที่นำมารายงาน คือ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ชี้วัดเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต ระหว่าง LDPE : nano-CaCO₃ ว่าเหมาะสมกับการนำไปใช้งานชนิดใด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล นำนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยแต่ละชนิดมาทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค ตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก เทคนิคการดุกกลืนรังสีอินฟราเรด ตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และทำการหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูงร่วมกับวิธี linear intercept จากนั้นนำ CaCO_3 ผสมกับเม็ดพลาสติก LDPE และทำการขึ้นรูปฟิล์มและทำการวัดสมบัติเชิงกล และเลือกสูตรที่ดีที่สุดมาทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก ตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนกับการเกิดผลึก ด้วยตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ รวมทั้งศึกษาลักษณะสัมพันธ์ของฟิล์มและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 35-40 นาโนเมตร และแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2-3 ไมครอนจากการค้า

4.1 การสังเคราะห์ nano- CaCO_3 จากเปลือกหอย

นำเปลือกหอยมาทำการแคลไซน์ (Calcination) ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยใช้อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นนำผงที่ได้จากกระบวนการแคลไซน์มาทำการสังเคราะห์ nano- CaCO_3 ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal method) เพื่อลดขนาดอนุภาค โดยทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3 ชั่วโมง โดยมีเอทานอลและน้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายตัวกลางที่ใช้ในระบบ จากนั้นนำมากรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก เพื่อให้ได้ผง nano- CaCO_3 จากเปลือกหอยที่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมใน LDPE

4.1.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของ CaCO_3 จากเปลือกหอย



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ CaCO_3 จากเปลือกหอยในแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า CaCO_3 จากเปลือกหอยทั้งสามชนิดนั้นมีลักษณะที่เหมือนกันคือ เป็นผงสีขาวละเอียดขนาดเล็ก a) เปลือกหอยแครง , b) เปลือกหอยแมลงภู่ และ c) เปลือกหอยตลับ

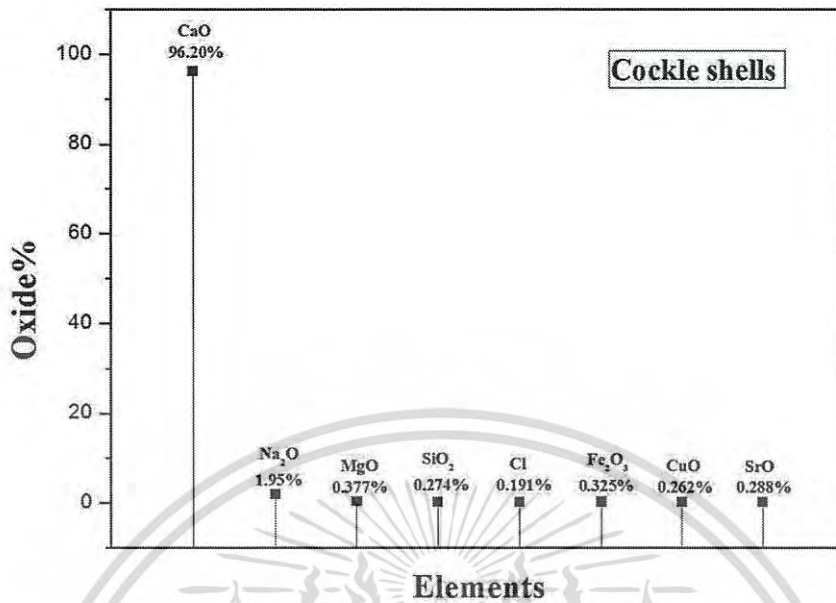
4.1.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในผงเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และ หอยตลับ พบว่ามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ [44] และมีธาตุตัวอื่นเจือปนใน ปริมาณที่น้อยมาก โดยพบว่าหอยที่มีปริมาณ CaO สูงสุดคือ หอยตลับโดยมี CaO ถึง 98.40 เปอร์เซ็นต์ หอยแมลงภู่มี CaO ถึง 96.60 เปอร์เซ็นต์ และหอยแครงมี CaO ถึง 96.20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง CaO ที่พบในเปลือกหอยนั้นคือปริมาณ CaCO_3 [43] เนื่องจากว่าเทคนิค XRF จะไม่สามารถตรวจ วิเคราะห์ปริมาณ CO_2 ได้ จากสมการ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ เพราะเครื่องมือมีข้อจำกัดจากการ วิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีออกไซด์โลหะอื่น ๆ อีกปริมาณเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 - 4.4

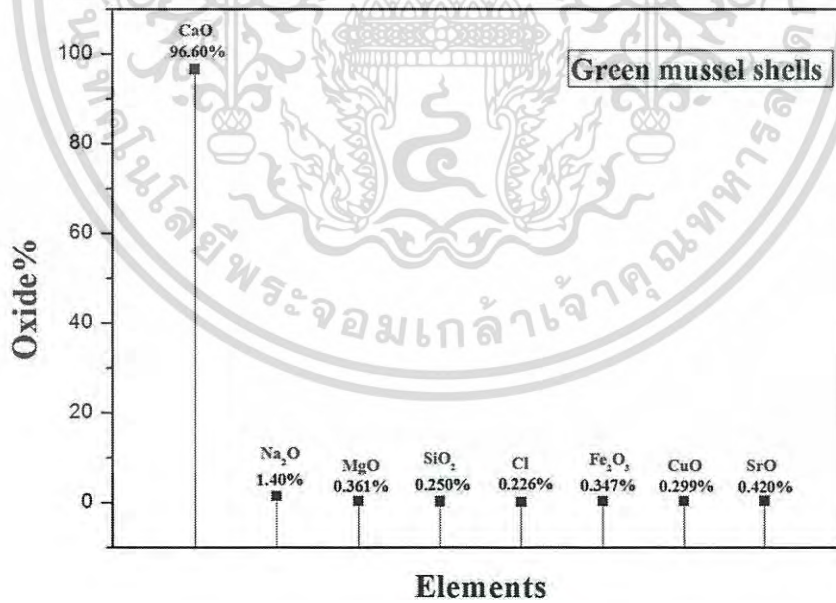
ตารางที่ 4.1 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

Oxide %	หอยแครง	หอยแมลงภู่	หอยตลับ
CaO	96.20	96.60	98.40
Na ₂ O	1.950	1.400	-
MgO	0.377	0.361	-
SiO ₂	0.274	0.250	0.243
Cl	0.191	0.226	-
Fe ₂ O ₃	0.325	0.347	0.385
CuO	0.262	0.299	0.281
SrO	0.288	0.420	0.345
Al ₂ O ₃	-	-	0.291

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

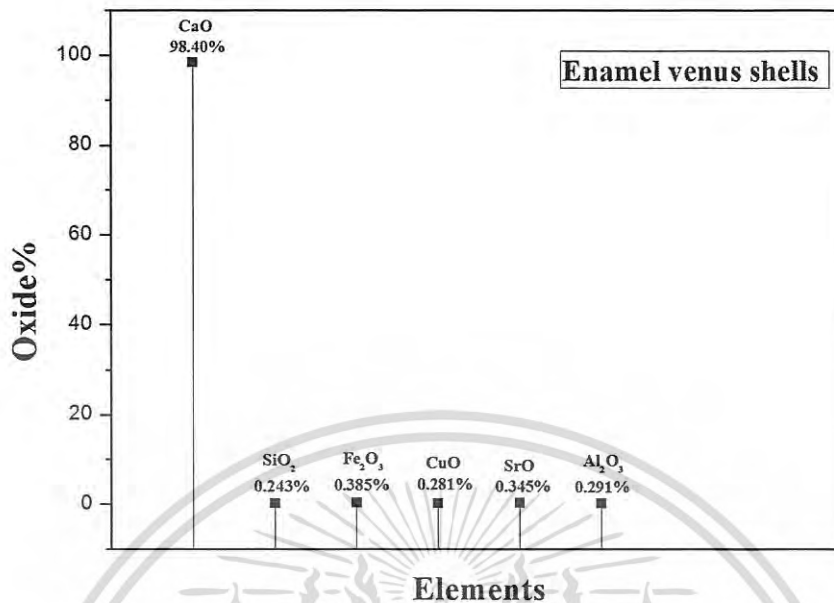


รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในเปลือกหอยแครง



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในเปลือกหอยแมลงภู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

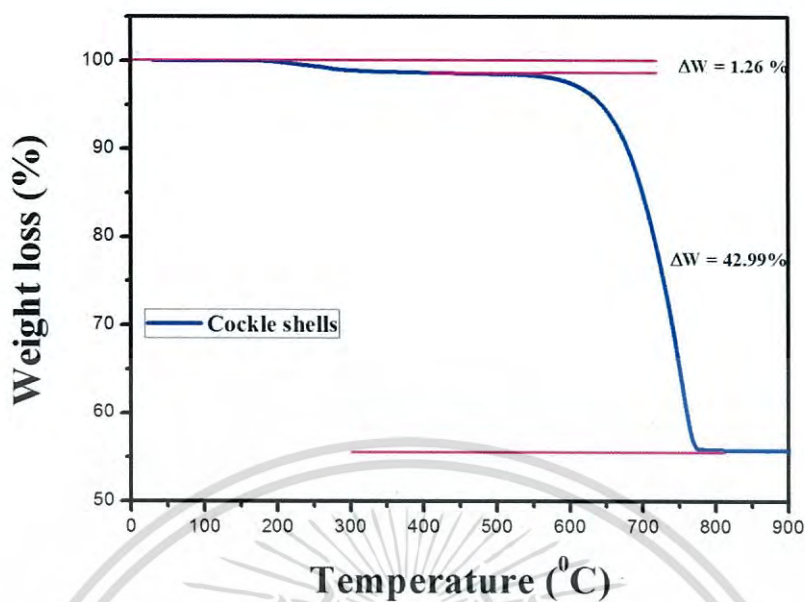


รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในเปลือกหอยตลับ

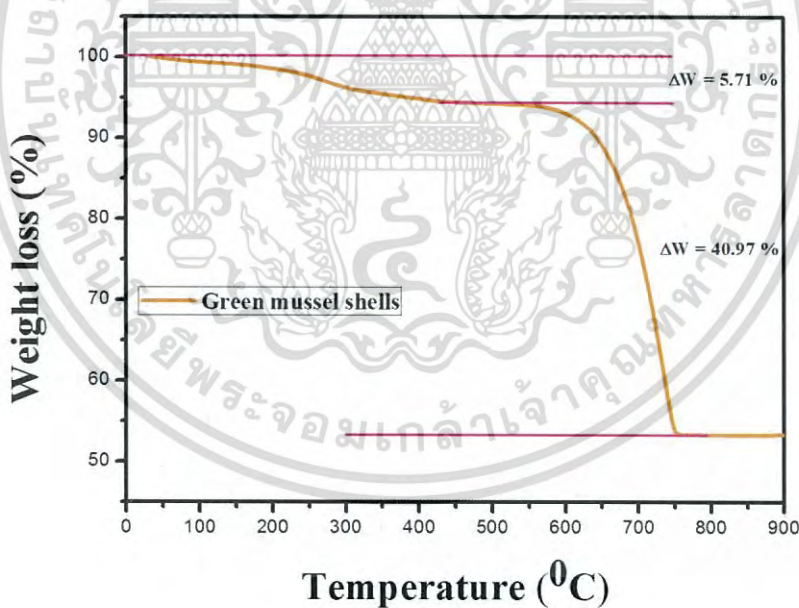
จะเห็นได้ว่าในเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ มีปริมาณ CaCO_3 อยู่สูงมาก ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาเตรียม nano- CaCO_3 สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมในกระบวนการเป่าฟิล์มอย่างยิ่ง

4.1.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของ CaCO_3 จากเปลือกหอยโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis ;TGA) ซึ่งจะวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิ การทดลองจะทำในระบบปิด โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่าง เช่น การสูญเสียมวลขององค์ประกอบ (Decomposition) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่ (Formation) และหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการเผาแคลไซน์ของ CaCO_3 จากเปลือกหอยให้เปลี่ยนเป็นแคลไซต์อย่างสมบูรณ์ (ภาคผนวก ข.1-ข.3 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแต่ละชนิด)

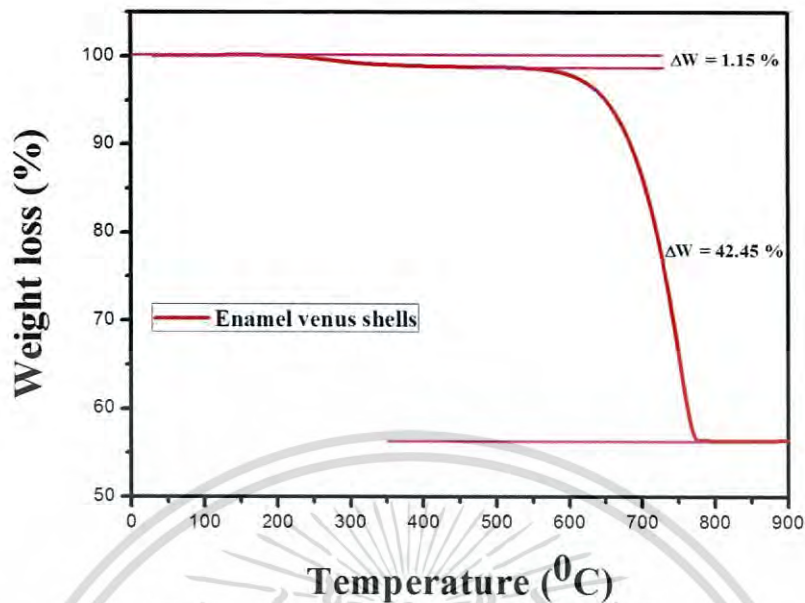


รูปที่ 4.5 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแครง



รูปที่ 4.6 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแมลงภู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยตลับ

จากรูปที่ 4.5-4.7 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปแบบการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 จากเปลือกหอยแต่ละชนิด มีรูปแบบการสลายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.5 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแครงพบว่า เปลือกหอยแครงนั้นมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วงอุณหภูมิ คืออุณหภูมิในช่วง 260-360 องศาเซลเซียส โดยมีการลดลงของน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 1.26 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ [37] ที่เป็นส่วนประกอบในเปลือกหอย และช่วงอุณหภูมิประมาณ 688.5-753 องศาเซลเซียส พบการลดลงของน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 42.99 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ CaCO_3 ออกมาในรูป CaO และ CO_2 จากปริมาณการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแครงทั้งหมดพบว่ามีปริมาณ CaCO_3 สูงถึงร้อยละ 98.74 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผล XRF ที่มีปริมาณ CaCO_3 สูงถึงร้อยละ 96.20 โดยน้ำหนัก [37] รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกแมลงภู่ พบว่าเปลือกหอยแมลงภู่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วงอุณหภูมิ คืออุณหภูมิในช่วง 270-480 องศาเซลเซียส โดยมีการลดลงของน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 5.71 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในเปลือกหอย และช่วงอุณหภูมิประมาณ 673.2-734.4 องศาเซลเซียส พบการลดลงของน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 40.97 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของ CaCO_3 ออกมาในรูป CaO และ CO_2 จากปริมาณการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแมลงภู่ทั้งหมดพบว่ามีปริมาณ CaCO_3 สูงถึงร้อยละ 94.29 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผล XRF ที่มีปริมาณ CaCO_3 สูงถึงร้อยละ 96.60 โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.7 แสดงกราฟการสลายตัวทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

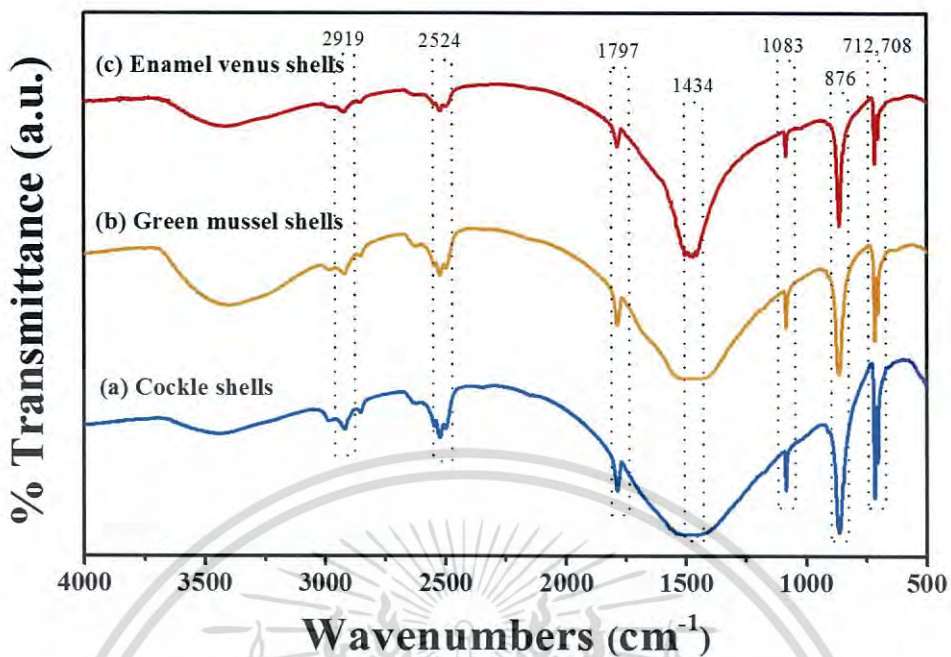
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนของเปลือกหอยตลับ พบว่าเปลือกหอยตลับนั้นมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วงอุณหภูมิ คืออุณหภูมิช่วง 280-400 องศาเซลเซียส โดยมีการลดลงของน้ำหนักคิดเป็น 1.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในเปลือกหอย และช่วงอุณหภูมิ 686.4-751.5 องศาเซลเซียส พบการลดลงของน้ำหนัก 42.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นช่วงการสลายตัวของ CaCO_3 ออกมาในรูป CaO และ CO_2 จากปริมาณการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยตลับทั้งหมดพบว่ามีปริมาณ CaCO_3 สูงถึงร้อยละ 98.85 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผล XRF ที่มีปริมาณ CaCO_3 สูงถึงร้อยละ 98.40 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบ TGA ทำให้ทราบช่วงอุณหภูมิในการแคลไซน์ที่เหมาะสมสำหรับเปลี่ยนโครงสร้างจากอะราโกไนท์เป็นแคลไซต์จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

4.1.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของ CaCO_3 จากเปลือกหอย โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

จาก IR Spectrum ของเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์นำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยเริ่มจากนำสารตัวอย่างมาอัดเป็นเม็ดบางๆร่วมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide, KBr) ซึ่งโพแทสเซียมโบรไมด์จัดเป็นสารเฉื่อยที่ยอมให้คลื่นรังสีอินฟราเรดส่องผ่านได้ และมีช่วงคลื่นอินฟราเรดที่กว้างกว่าสารอื่น ๆ ที่มีสมบัติเดียวกัน พบว่า IR สเปกตรัม ของเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ แสดงดังรูปที่ 4.8 ในสเปกตรัมนี้แบนด์ที่ตำแหน่ง 1434 cm^{-1} คือ CO_3^{2-} เป็นแบนด์ที่เกิดจากการสั่นแบบ doubly degenerate planar asymmetric stretching, (V_3) แบนด์ที่ตำแหน่ง 1083 cm^{-1} คือ CO_3^{2-} เป็นแบนด์ที่เกิดจากการสั่นแบบ symmetric stretching, (V_1) แบนด์ที่ตำแหน่ง 876 cm^{-1} คือ CO_3^{2-} เป็นแบนด์ที่เกิดจากการสั่นออกเข้าออกแบบ out-of-plane-bending, (V_2) แบนด์ที่ตำแหน่ง 708 และ 712 cm^{-1} คือ CO_3^{2-} เป็นแบนด์ที่เกิดจากการสั่นออกเข้าออกแบบ doubly degenerate planar bending, (V_4) แบนด์ทั้ง 4 ที่เกิดขึ้นจัดเป็น fundamental band ของ CO_3^{2-} ไอออน ใน CaCO_3 นอกจากนี้ยังพบแบนด์ที่เกิดจาก combination vibration ต่างๆของ fundamental band อีก 2 แบนด์ โดยแบนด์ที่ตำแหน่ง 1797 cm^{-1} เป็นแบนด์ของ (V_1+V_4) และแบนด์ที่ตำแหน่ง 2524 cm^{-1} เป็นแบนด์ของ (V_1+V_3) นอกจากนี้ยังพบแบนด์ที่ตำแหน่ง 2919 เป็นแบนด์ที่เกิดจาก C-H Stretching ของ alkyl group จากสารอินทรีย์ในธรรมชาติของเปลือกหอย ส่วนแบนด์ที่ตำแหน่ง 3440 cm^{-1} เป็นแบนด์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของโมเลกุลของน้ำ จากแบนด์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นพบว่าที่ตำแหน่ง 1083 cm^{-1} เป็นแบนด์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนแบบ symmetric stretching V_1 ของคาร์บอเนต CO_3^{2-} ไอออน ซึ่งจะแสดงสเปกตรัม IR เมื่ออยู่ในรูปของอะราโกไนท์ เท่านั้น [37] ซึ่งเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับที่ไม่ได้ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างของ CaCO_3 อยู่ในรูปของอะราโกไนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

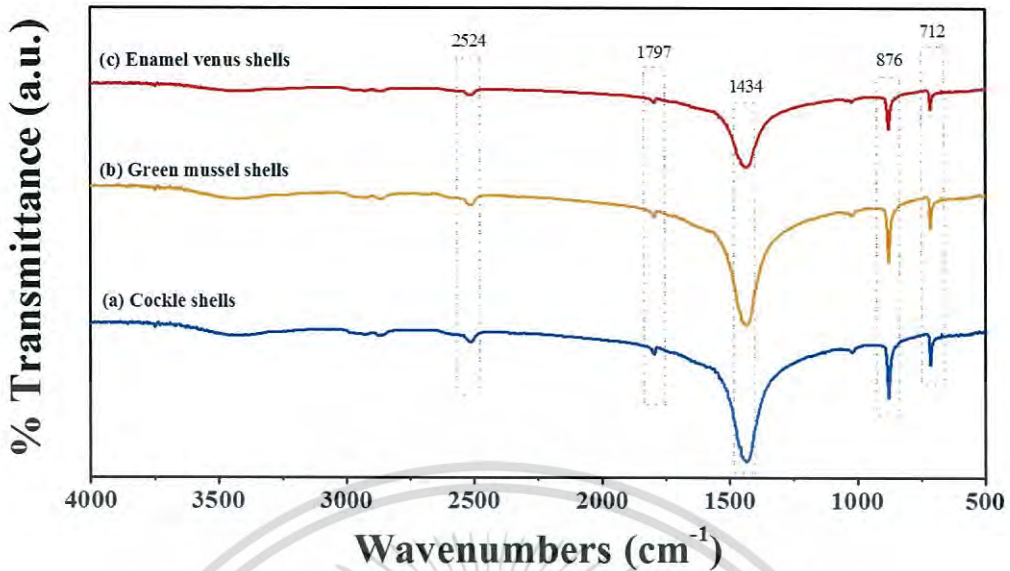


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของผงผลึก CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (a) เปลือกหอยแมลงภู่ (b) และเปลือกหอยตลับ (c) ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์

แต่เมื่อทำการเผาแคลไซน์เปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราให้ความร้อน 5 องศาต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า IR สเปกตรัม มีแบนด์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1797, 1434, 876 และ 712 cm^{-1} เท่านั้น [38] โดยแบนด์ที่ตำแหน่ง 1083 cm^{-1} ซึ่งเป็นแบนด์ที่เกิดจากการสั่นแบบ symmetric stretching, (ν_1) และแบนด์ที่ตำแหน่ง 708 cm^{-1} ซึ่งเป็นแบนด์ที่เกิดจาก doubly degenerate planar bending, (ν_4) ของคาร์บอนเนต CO_3^{2-} ไอออน ซึ่งแบนด์เหล่านี้จะปรากฏใน IR สเปกตรัมของคาร์บอนเนต CO_3^{2-} ไอออน ในรูปของอะราโกไนท์เท่านั้นได้หายไป แสดงว่า CaCO_3 ในเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอะราโกไนท์เป็นแคลไซต์แล้วเมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราให้ความร้อน 5 องศาต่อนาที ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นหลังจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากอะราโกไนท์เป็นแคลไซต์แล้ว คือลักษณะของ CaCO_3 ที่ได้จะมีสีขาวขึ้นอย่างชัดเจนและมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ CaCO_3

และเพื่อเป็นการยืนยันว่า CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปผลึกของแคลไซต์ ซึ่งเป็นผลึกที่มีความเสถียรที่สุดในกลุ่มของ CaCO_3 และเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน จึงใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อเป็นตัวยืนยันผลอีกวิธีหนึ่งและจะให้ผลที่สอดคล้องกัน ซึ่งจะรายงานผลในส่วนถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

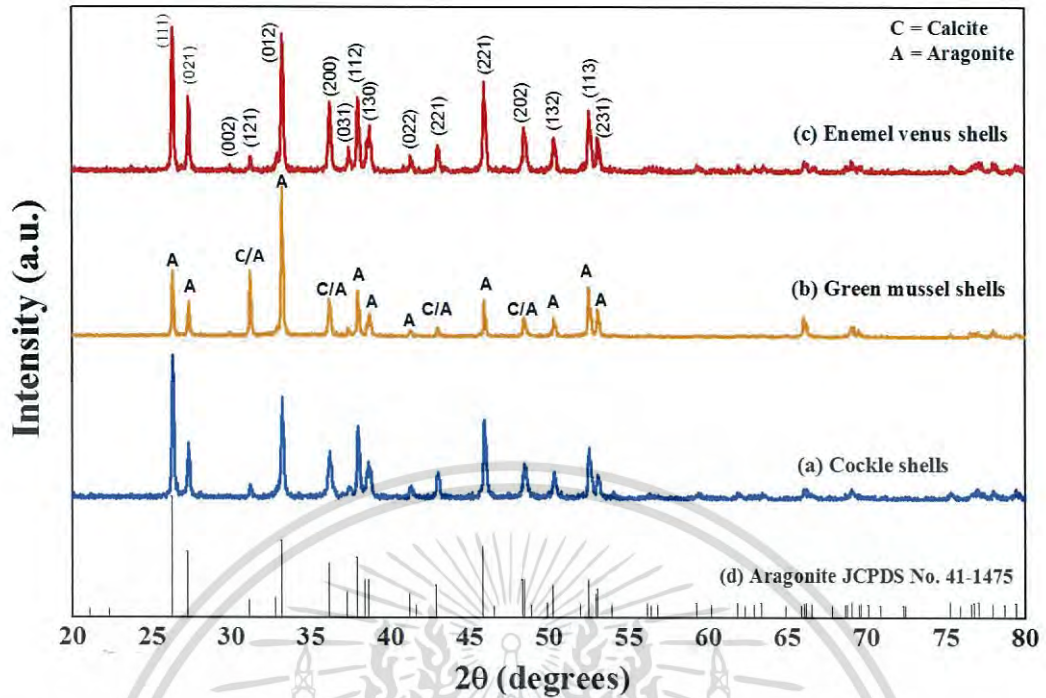


รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของผงผลึก CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (a) เปลือกหอยแมลงภู่ (b) และเปลือกหอยตลับ (c) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.1.5 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction (XRD)

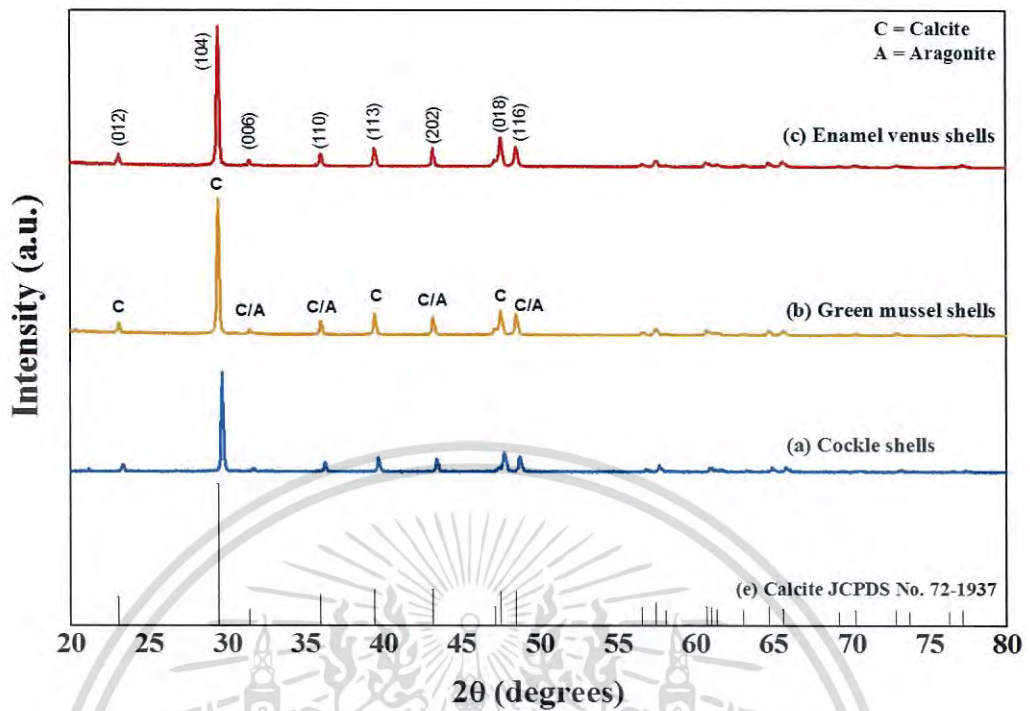
จากการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแคลไซน์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะพบตำแหน่งพีคที่สำคัญที่ 2 θ ประมาณ 26.37, 27.39, 33.19, 38.09, 38.59, 41.29, 46.04, 50.39, 52.45 และ 53.13 องศา ซึ่งตำแหน่งพีคเหล่านี้จะพบเฉพาะในโครงสร้างของ CaCO_3 ที่อยู่ในรูปอะราโกไนท์เท่านั้น [7] และตำแหน่งพีคที่ 2 θ เท่ากับ 31.17, 36.21, 43.07 และ 48.56 องศา เป็นตำแหน่งพีคที่สามารถพบได้ทั้งโครงสร้างของ CaCO_3 ที่อยู่ในรูปอะราโกไนท์และแคลไซต์ ซึ่งเกิดได้ในตำแหน่งเดียวกัน [7] และเมื่อนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานไฟล์ JCPDS file No. 41-1475 พบว่าตำแหน่งพีคที่เกิดขึ้นเป็นตำแหน่งพีคของโครงสร้าง CaCO_3 ในรูปอะราโกไนท์ แสดงว่าเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ ตามธรรมชาติจะมีโครงสร้างผลึกของ CaCO_3 ที่อยู่ในรูปของอะราโกไนท์เป็นหลัก ซึ่งมีหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยแครง (a) เปลือกหอยแมลงภู่ (b) และเปลือกหอยตลับ (c) ที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ เปรียบเทียบกับไฟล์ JCPDS ของ CaCO_3 ที่มีโครงสร้างแบบอะราโกไนท์ (d)

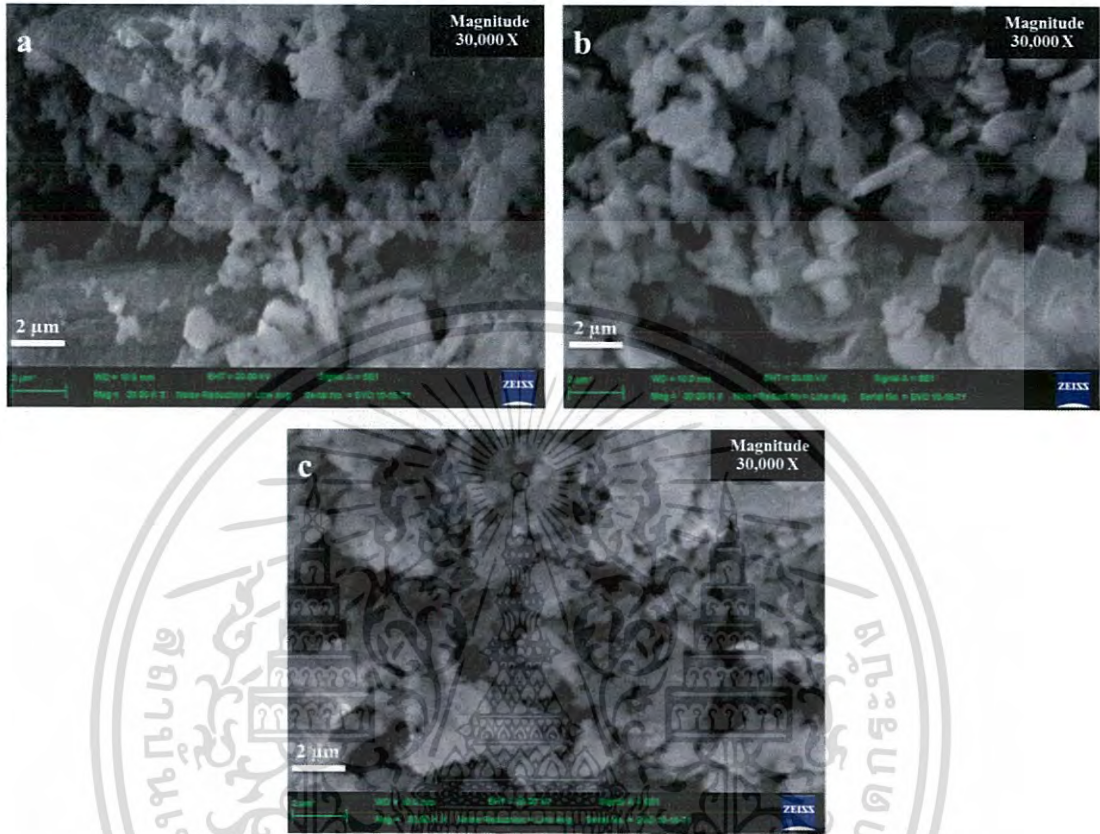
จากนั้นนำเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ มาทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการแคลไซน์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะปรากฏตำแหน่งพีคของ CaCO_3 ที่อยู่ในรูปแคลไซต์ ชัดเจนมากขึ้นที่ 2θ เท่ากับ 23.08, 29.43, 39.50, และ 47.51 องศา [37] ส่วนพีคตำแหน่งที่สามารถพบได้ทั้ง CaCO_3 ที่อยู่ในรูปอะราโกไนท์และแคลไซต์ มีความสูงของพีคไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงว่าตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นเป็น CaCO_3 ที่อยู่ในรูปแคลไซต์ ซึ่งแสดงว่า CaCO_3 ในเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากอะราโกไนท์เป็นแคลไซต์ได้อย่างสมบูรณ์และทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากแบบออโรมบิกเป็นรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) อีกด้วย จึงเชื่อได้ว่า CaCO_3 ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยนั้นเป็น CaCO_3 ที่มีโครงสร้างแบบแคลไซต์จริงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No. 72-1937 และเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานในกระบวนการเป่าฟิล์ม



รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยแครง (a) เปลือกหอยแมลงภู่ (b) และเปลือกหอยตลับ (c) ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับไฟล์ JCPDS ของ CaCO_3 ที่มีโครงสร้างแบบแคลไซต์ (e)

จากการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าการให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเผาแคลไซน์ 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จะสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากอะราโกไนต์เป็นแคลไซต์ได้อย่างสมบูรณ์ในเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด

4.1.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยก่อนทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแคลไซน์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยตรง (a) หอยแมลงภู่ (b) และหอยตลับ (c) ก่อนทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแคลไซน์

จากรูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยตรง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ ก่อนกระบวนการเผาแคลไซน์พบว่า CaCO_3 ของเปลือกหอยในแต่ละชนิดมีลักษณะของอนุภาคโดยมีพื้นผิวขรุขระไม่เป็นระเบียบ อนุภาคมีลักษณะเป็นแบบแท่ง แบบกลม และแบบแผ่นกระจายอยู่เป็นกลุ่มๆ ซึ่งภาพที่เห็นมีสเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า

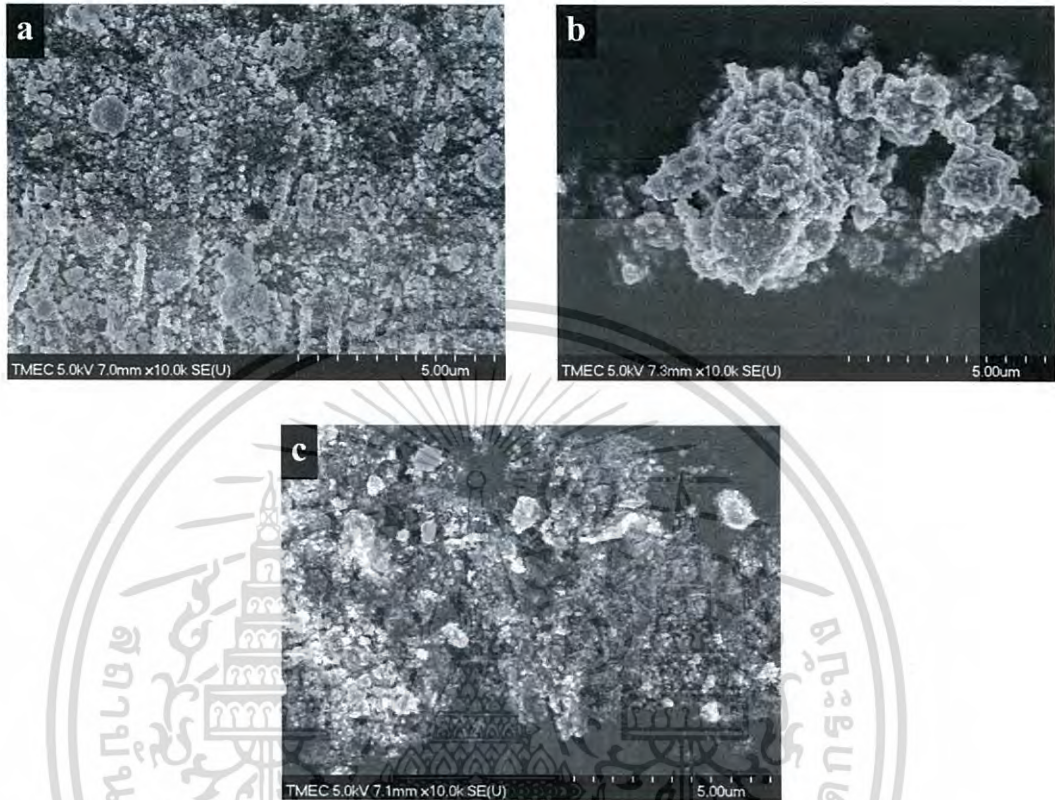
4.1.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแคลไซน์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (a) หอยแมลงภู่ (b) และหอยตลับ (c) หลังทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแคลไซน์

จากรูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ หลังกระบวนการเผาแคลไซน์ที่ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเผาแคลไซน์ 2 ชั่วโมง โดยใช้ อัตราให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า CaCO_3 ของเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด มีขนาดเล็กลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเกิดการสลายตัวของน้ำและสารอินทรีย์อื่นๆในโครงสร้าง นอกจากนี้แล้วยังเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากอะราโกไนต์เป็นแคลไซด์ ซึ่งภาพที่เห็นมีสเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอนที่กำลังขยาย 30,000 เท่า

4.1.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซโวเทอร์มอลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

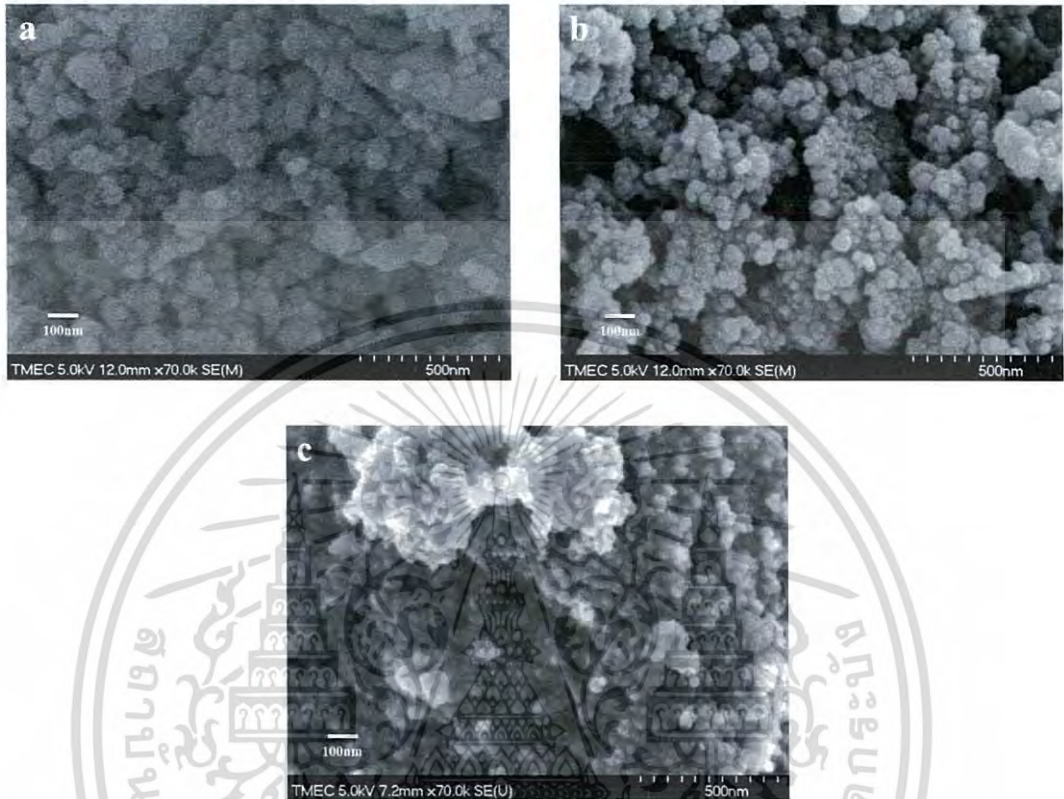


รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยตรง (a) หอยแมลงภู่ (b) และหอยตลับ (c) หลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซโวเทอร์มอล

จากรูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยตรง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ หลังจากทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที และทำการลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีโซโวเทอร์มอล โดยทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้เอทานอลและน้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายตัวกลางในกระบวนการ พบว่า CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ไม่ค่อยดีและเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน (Agglomerate) ซึ่งภาพที่เห็นมีสเกลบาร์ขนาด 5 ไมครอน ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ที่กำลังขยาย 70,000 เท่า

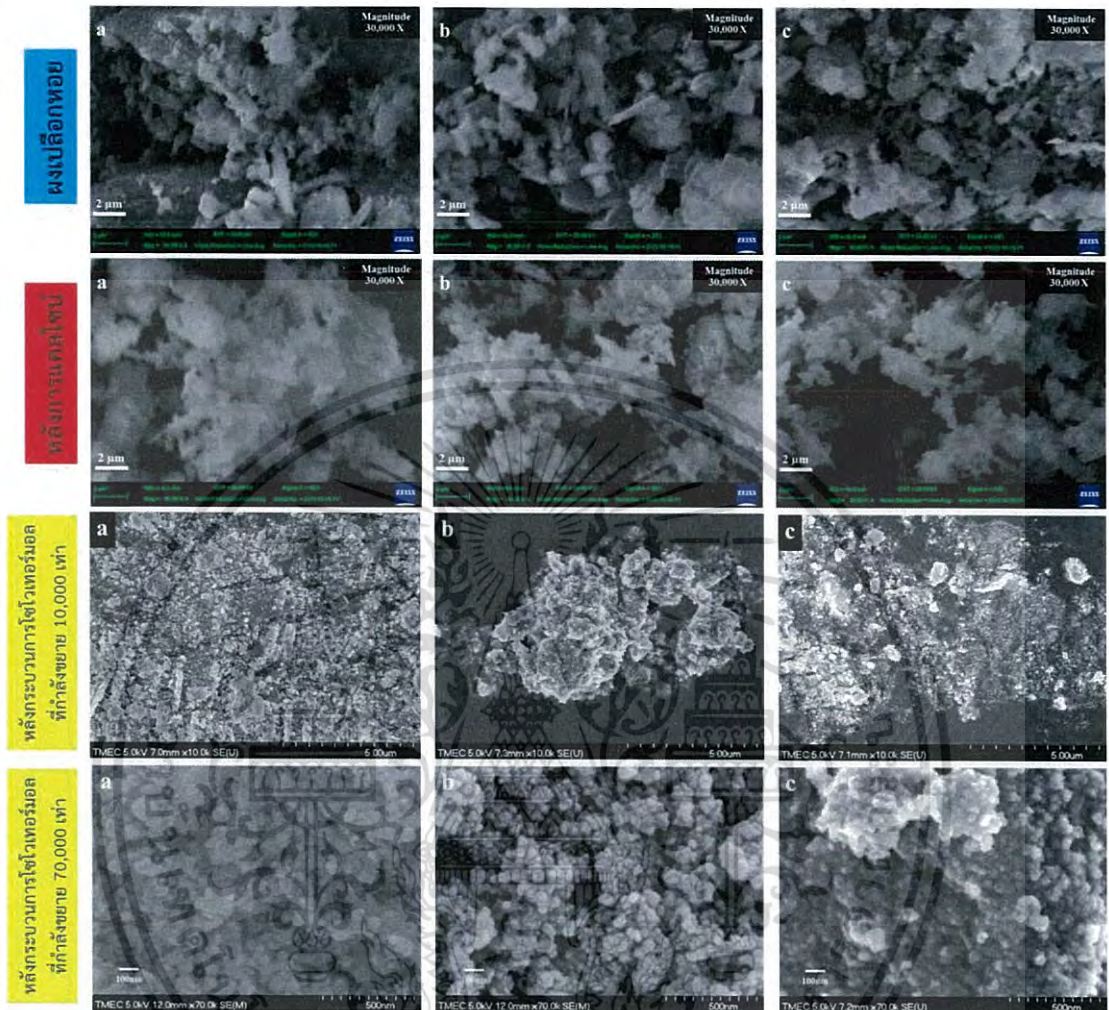


รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยตรง (a) หอยแมลงภู่ (b) และหอยตลับ (c) หลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอล

จากรูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยตรง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ หลังจากทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอล โดยทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้เอทานอลและน้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายตัวกลางในกระบวนการ พบว่า CaCO_3 จากเปลือกหอยในแต่ละชนิดมีลักษณะอนุภาคเป็นก้อนกลม มีขนาดเล็กลงอย่างมากและจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นแผ่น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น จึงทำให้พลังงานที่พื้นผิวมีค่าสูงขึ้นอนุภาคที่ได้จึงจับกันเป็นกลุ่ม ซึ่งภาพที่เห็นมีสเกลบาร์ขนาด 100 นาโนเมตร ที่กำลังขยาย 70,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.10 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค CaCO_3 หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์

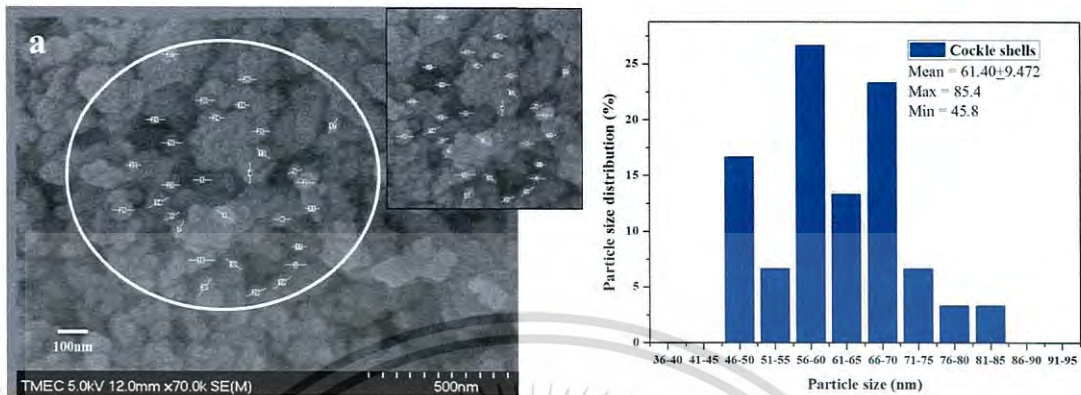


รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของ CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (a) หอยแมลงภู่ (b) หอยตลับ (c) หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์

หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ในขั้นตอนต่างๆพบว่าขนาดอนุภาคของ CaCO_3 จากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด มีขนาดเล็กลง ซึ่งขนาดของอนุภาคจะค่อยๆเล็กลงโดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการเผาแคลไซน์เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์และสารอื่นๆที่มีอุณหภูมิในการสลายตัวต่ำกว่า CaCO_3 จากเปลือกหอยทำให้อนุภาคเกิดการแตกออกหรือแยกออกจากกัน นอกจากนี้แล้วหลังจากที่ทำการลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอลแล้วพบว่าอนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด มีลักษณะกลมและเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเนื่องมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวมากส่งผลให้มีพลังงานที่พื้นผิวสูง จึงทำให้อนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิดจับกลุ่มกันอย่างหนาแน่น

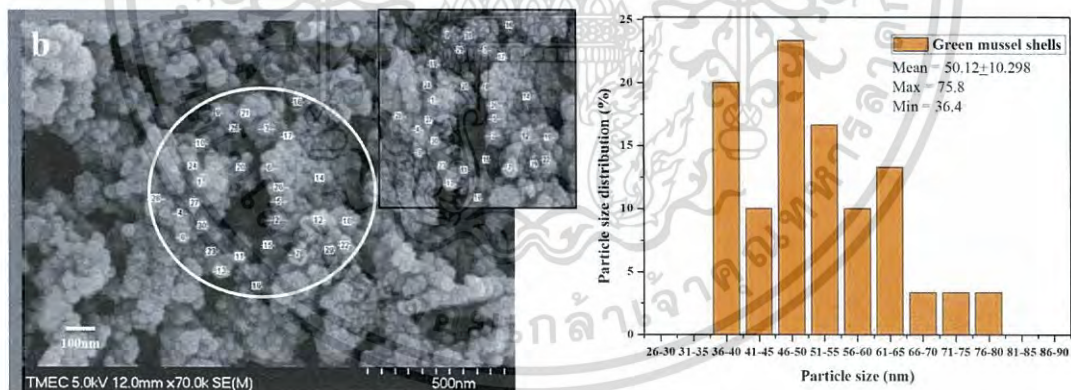
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.11 การหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ หลังจากทำการเผาแคลไซน์และลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอล จากวิธี linear intercept โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง และคำนวณหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย [53]



รูปที่ 4.17 การหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครงหลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแคลไซน์และวิธีโซโวลเทอร์มอล

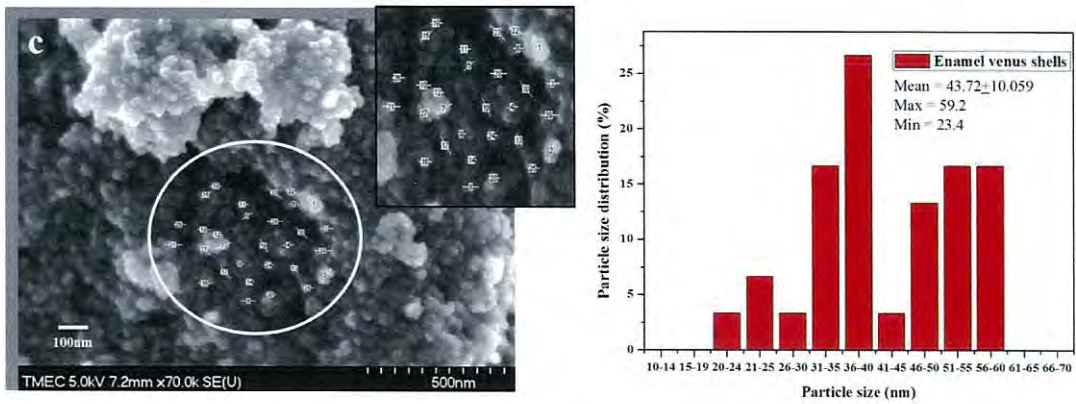
จากรูปที่ 4.17 พบว่าอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 45.8-85.4 นาโนเมตร และพบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 61.40 ± 9.472 นาโนเมตร (ภาคผนวก ข.12 วิธีหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง)



รูปที่ 4.18 การหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่หลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแคลไซน์และวิธีโซโวลเทอร์มอล

จากรูปที่ 4.18 พบว่าอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่ มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 36.4-75.8 นาโนเมตร และพบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50.12 ± 10.298 นาโนเมตร (ภาคผนวก ข.13 วิธีหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

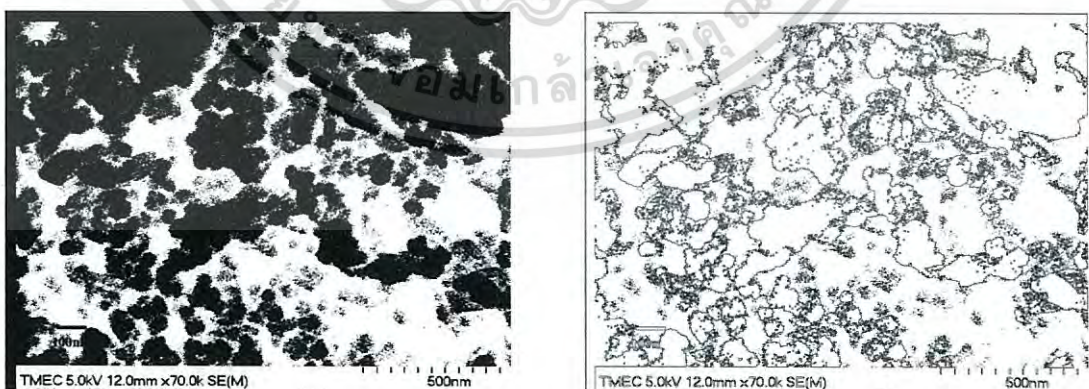


รูปที่ 4.19 การหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับหลังทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีแคลไซน์และวิธีโซโวเทอร์มอล

จากรูปที่ 4.19 พบว่าอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 23.4-59.2 นาโนเมตร และพบว่ามีความหนาอนุภาคเฉลี่ย 43.72 ± 10.059 นาโนเมตร (ภาคผนวก ข.14 วิธีการหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ)

4.1.12 การทำ Binary image เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ หลังจากทำการเผาแคลไซน์และลดขนาดอนุภาคด้วยวิธีโซโวเทอร์มอล

การทำ Binary image จะช่วยทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 ได้ดีและชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับภาพ SEM แบบปกติ โดยภาพที่แสดงจะแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ ภาพในโหมด Contrast และภาพในโหมด Map ซึ่งภาพทั้ง 2 โหมดจะให้ผลที่สอดคล้องกันและช่วยแสดงให้เห็นถึงการกระจายหรือการเกาะกลุ่มกันที่ชัดเจนยิ่งขึ้นของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอย

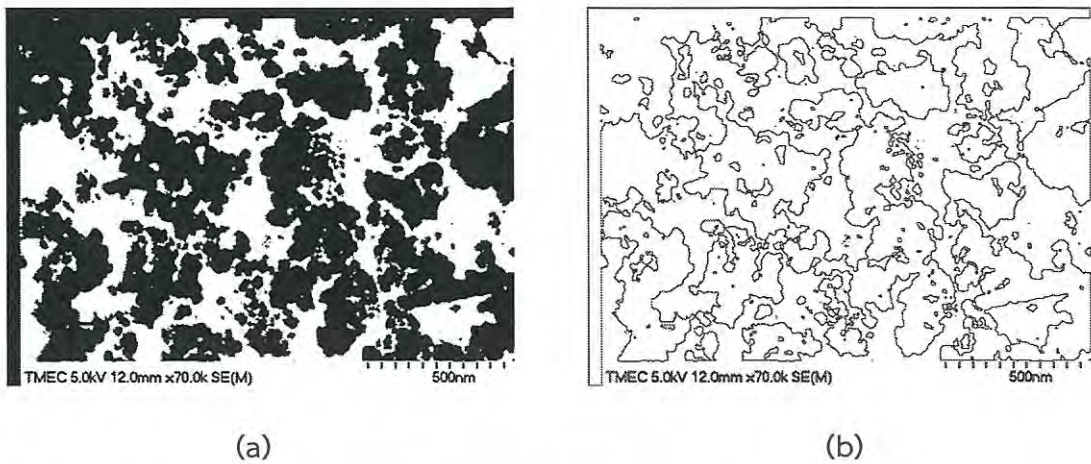


(a)

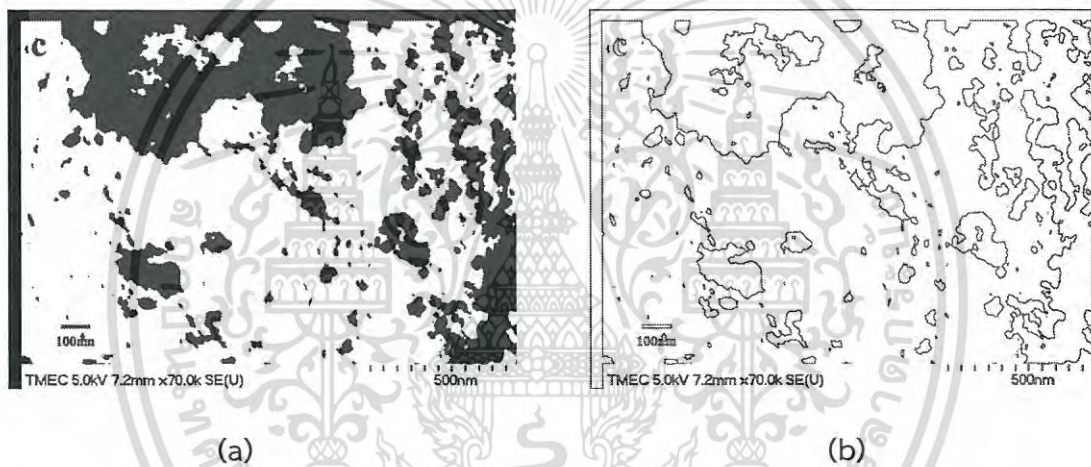
(b)

รูปที่ 4.20 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครงด้วยภาพในโหมด Contrast (a) และภาพในโหมด Map (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่นิวทิวด้วยภาพในโหมด Contrast (a) และภาพในโหมด Map (b)



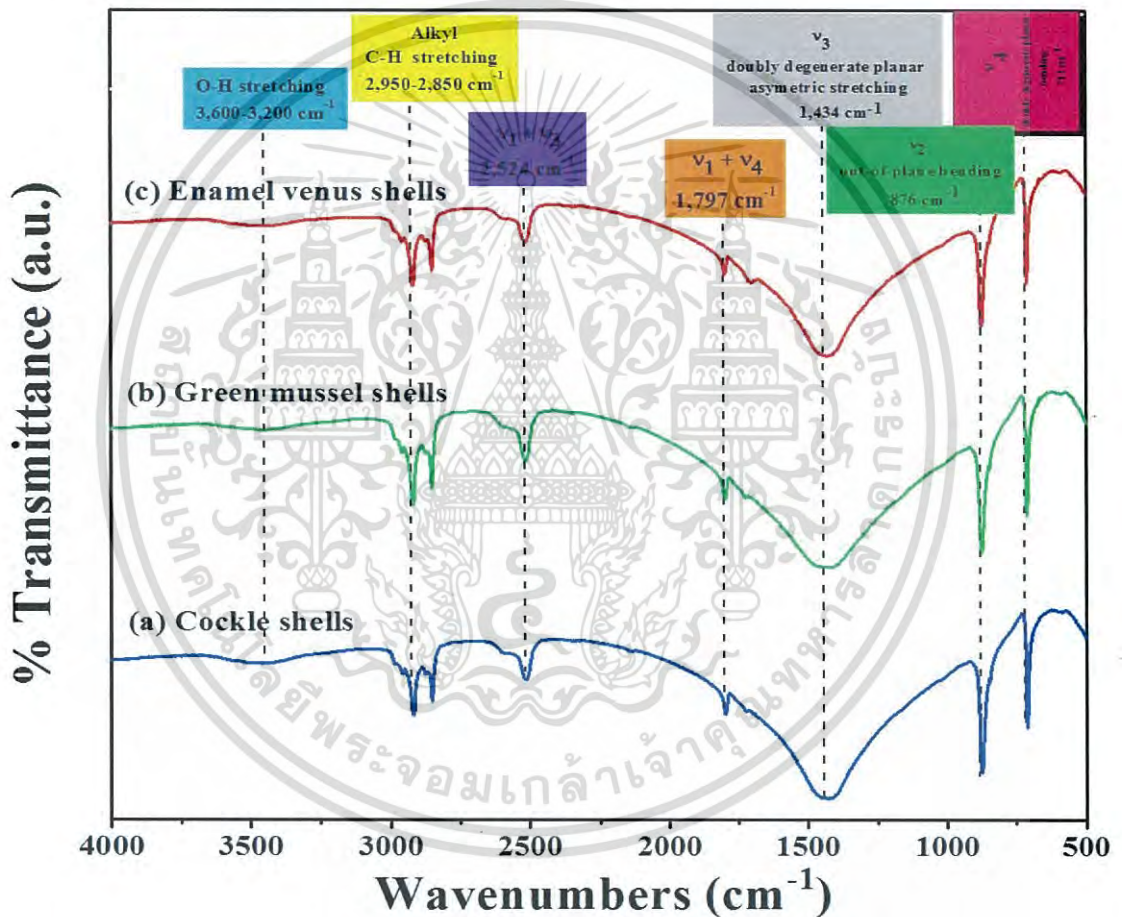
รูปที่ 4.22 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับด้วยภาพในโหมด Contrast (a) และภาพในโหมด Map (b)

จากรูปที่ 4.20-4.22 พบว่าอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด มีการกระจายตัวที่ไม่ดีสังเกตได้จากภาพด้านซ้ายมือในโหมด Contrast (a) พื้นที่สีดำแสดงให้เห็นว่าการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคกันอย่างหนาแน่นและเชื่อมติดกันเป็นแผ่น ลักษณะภาพที่เกิดขึ้นแบบนี้แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาค CaCO_3 เพราะการกระจายตัวที่ดีสำหรับภาพในโหมด Contrast อนุภาคต้องกระจายตัวเป็นจุดสีดำขนาดเล็กไม่เชื่อมติดกัน และเพื่อให้เข้าใจถึงการกระจายตัวของอนุภาคให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.20-4.22 ภาพด้านขวามือในโหมด Map (b) พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคนั้นมีลักษณะเกาะกลุ่มกันและจับกันเป็นก้อนจริง โดยสังเกตได้จากการลากเส้นแบ่งเขตที่มีเส้นเชื่อมต่อกันเป็นวงกว้างไม่กระจายตัวเป็นจุดขนาดเล็กแบบแยกกัน

หลังจากที่ทราบว่าคุณสมบัติของ CaCO_3 จากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด มีการเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นและกระจายตัวได้ไม่ดีทำให้ส่งผลต่อการขึ้นรูปฟิล์ม นอกจากนี้แล้วด้วยความที่มีข้อของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CaCO_3 และความไม่มีขี้ของ LDPE ทำให้การผสมระหว่าง LDPE/ CaCO_3 นั้นจะไม่เข้ากันทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้เนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาคระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 จากเปลือกหอยทั้ง 3 ชนิด ด้วยกรดสเตียริกเพื่อช่วยในการกระจายตัวและช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของ CaCO_3 และ LDPE ซึ่งผลจากการปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริกจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

4.1.13 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของ CaCO_3 จากเปลือกหอยหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทมิเตอร์ Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)



รูปที่ 4.23 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (a) เปลือกหอยแมลงภู (b) และเปลือกหอยตลับ (c) หลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

จากรูปที่ 4.23 พบว่าหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 จากเปลือกหอยด้วยกรดสเตียริก 2 % โดยน้ำหนัก เพื่อช่วยในการกระจายตัวและยึดเกาะได้ดีกับพลาสติก พบว่าจะมีแบนด์เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่ง $2,950\text{-}2,850\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่ Alkyl C-H stretching ในโครงสร้าง และยังพบแบนด์ที่เกิดขึ้นอีกหนึ่งแบนด์ที่ตำแหน่ง $3,600\text{-}3,200\text{ cm}^{-1}$ คือ O-H stretching ซึ่งทั้งสองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบนด์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงการใช้กรดเตตระไฮดรอกซีในการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 [42] ส่วน Fundamental band ของ CaCO_3 ที่อยู่ในรูปแคลไซต์ก็ยังคงพบแบนด์ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมทั้งหมด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้ง ν_2, ν_3, ν_4 และ Combination band

4.2 การผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยกับเม็ดพลาสติก LDPE โดยใช้เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์นอล มิกเซอร์ ชนิดเกลียวหนอนคู่และทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่อง Blow film extruder

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ nano- CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) หอยแมลงภู่ (GS) และหอยตลับ (ES) เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้จากการผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยและ CaCO_3 จากทางการค้า โดย CaCO_3 จากเปลือกหอยนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดเตตระไฮดรอกซี 2% โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นสารช่วยในการกระจายตัวและยึดเกาะของอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอย นอกจากนี้แล้วในกระบวนการผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยจะใช้พาราฟินออยล์ (Parafin oil) 0.5% โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในกระบวนการผสมเพื่อลดแรงเสียดทานของพอลิเมอร์คอมโพสิตในเครื่องอินเตอร์นอล มิกซ์ และทำให้การผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นโดยทำการควบคุมสภาวะที่

อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม	160 องศาเซลเซียส
Screw speed	50 รอบต่อนาที
เวลาที่ใช้ในการผสม	5 นาที

ตารางที่ 4.2 สูตรในการผสมของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย

ชนิด CaCO_3	พอลิเมอร์คอมโพสิต	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	สูตรที่ 6	สูตรที่ 7
หอยแครง (CS)	LDPE:CS	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
หอยแมลงภู่ (GS)	LDPE:GS	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60
หอยตลับ (ES)	LDPE:ES	100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60

นำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากการผสมในเครื่องอินเตอร์นอลมิกเซอร์แล้วมาทำการตัดเม็ดและ

นำมาวัดค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การวัดความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต Melt Flow Index

ดัชนีการไหล (MFI) เป็นค่าที่สามารถใช้อธิบายการไหลของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิและความดันจำเพาะ ซึ่งถ้าค่าดัชนีการไหลมีค่าต่ำหมายความว่าพอลิเมอร์มีความหนืดมากขึ้น สมบัตินี้มีความสำคัญมากในการเลือกสถานะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์ม จากการทดลองหาดัชนีการไหลของไหลที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม จากการทดสอบค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า การผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งน่าจะเกิดจากขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ที่มีขนาดเล็กส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์และ CaCO_3 มีค่ามาก ทำให้เกิดแรงกระทำ (Interaction) มีค่าสูงตามไปด้วยจึงทำให้การไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นน้อยลง [46] ส่งผลให้ค่า MFI ลดลงอย่างชัดเจน (ภาคผนวก ก.5 การคำนวณค่า MFI)

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตสำหรับเตรียมฟิล์ม

LDPE:CS wt%	Melt Flow Index (g/10 min)	LDPE:GS wt%	Melt Flow Index (g/10 min)	LDPE:ES wt%	Melt Flow Index (g/10 min)
100:0	3.89±0.08	100:0	3.89±0.08	100:0	3.89±0.08
90:10	3.25±0.04	90:10	3.24±0.05	90:10	3.26±0.02
80:20	2.69±0.05	80:20	2.69±0.06	80:20	2.70±0.06
70:30	2.00±0.02	70:30	2.08±0.04	70:30	2.10±0.04
60:40	1.32±0.08	60:40	1.09±0.49	60:40	1.32±0.08
50:50	0.69±0.05	50:50	0.71±0.04	50:50	0.70±0.04
40:60	0.19±0.02	40:60	0.19±0.04	40:60	0.21±0.04

จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 60:40, 50:50, และ 40:60 จะให้ค่า MFI ที่ต่ำมากซึ่งเกิดจากการเติม CaCO_3 ในปริมาณที่สูงและอนุภาค CaCO_3 ที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงทำให้พลังงานที่พื้นผิวสูงตามไปด้วยจึงทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่า MFI มีค่าต่ำมากคือปริมาณของ LDPE ที่ลดลงทำให้การไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิตน้อยลงตามไปด้วย สำหรับในอัตราส่วน 60:40, 50:50, และ 40:60 อาจจะไม่เหมาะกับการนำมาเป่าขึ้นรูปฟิล์มเนื่องจากว่าเม็ดพลาสติก LDPE เกรดเป่าถุงของ PTT Chemical ได้ระบุไว้ว่าในการเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่ดีและมีประสิทธิภาพควรมีค่า MFI อยู่ในช่วง 2-4 g/10 นาที ตามข้อกำหนดของบริษัท PTT Chemical [47] แต่ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะเป่าขึ้นรูปฟิล์มในทุกอัตราส่วนเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เปลือกหอยเป็นสารตัวเติม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการขึ้นรูปฟิล์มจากการผสมกับ LDPE : CaCO₃ จากเปลือกหอยในแต่ละสูตรโดยใช้สภาวะของเครื่อง Blown film extruder ในการเป่าขึ้นรูป ทำการควบคุมสภาวะที่

Feed zone	160	องศาเซลเซียส
Metering zone	170	องศาเซลเซียส
Die zone	180	องศาเซลเซียส
Screw speed	40	รอบต่อนาที
ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1	3.0	รอบต่อนาที
ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2	3.2	รอบต่อนาที

4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากเปลือกหอยและการตรวจวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต

ฟิล์มที่ได้จากการเป่ามีลักษณะขาวขุ่นเนื่องมาจากตัว CaCO₃ จากเปลือกหอยที่ใช้เป็นสารตัวเติมในการผสม จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ในแต่ละสูตรมาทำการวัดสมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และ ค่ามอดูลัส (Modulus) และทำการตรวจวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน สมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึก และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต

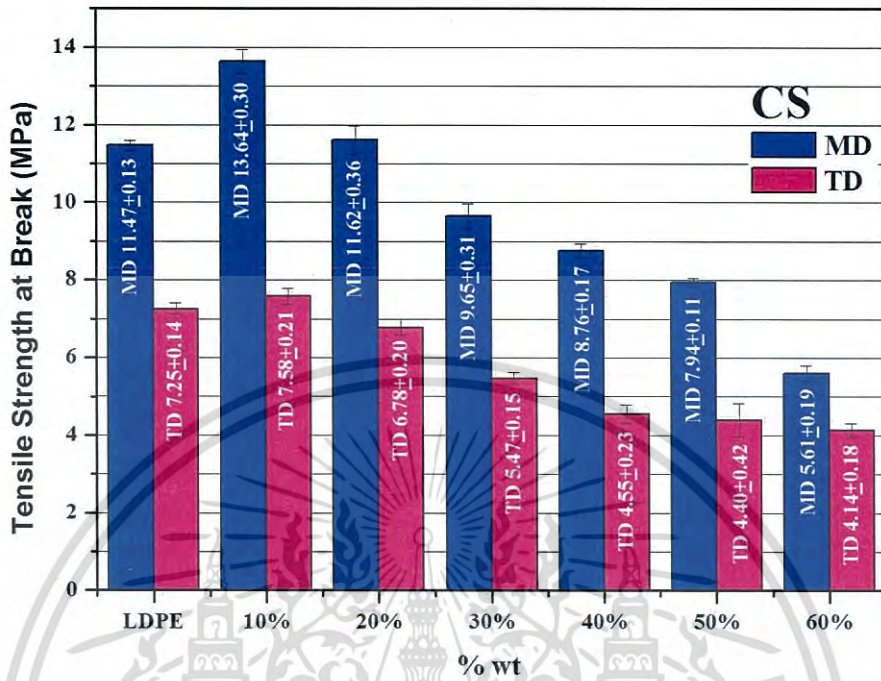
4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาค ปริมาณ และการกระจายตัว ของ CaCO₃ จากเปลือกหอยต่อสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากเปลือกหอย

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้ CaCO₃ จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับเป็นสารตัวเติมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย กรดสเตียริก และทำการผสมกับ LDPE โดยขนาดอนุภาค CaCO₃ จากเปลือกหอยมีขนาด 23.4–85.4 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มจะแสดงสมบัติเชิงกลได้ดังต่อไปนี้

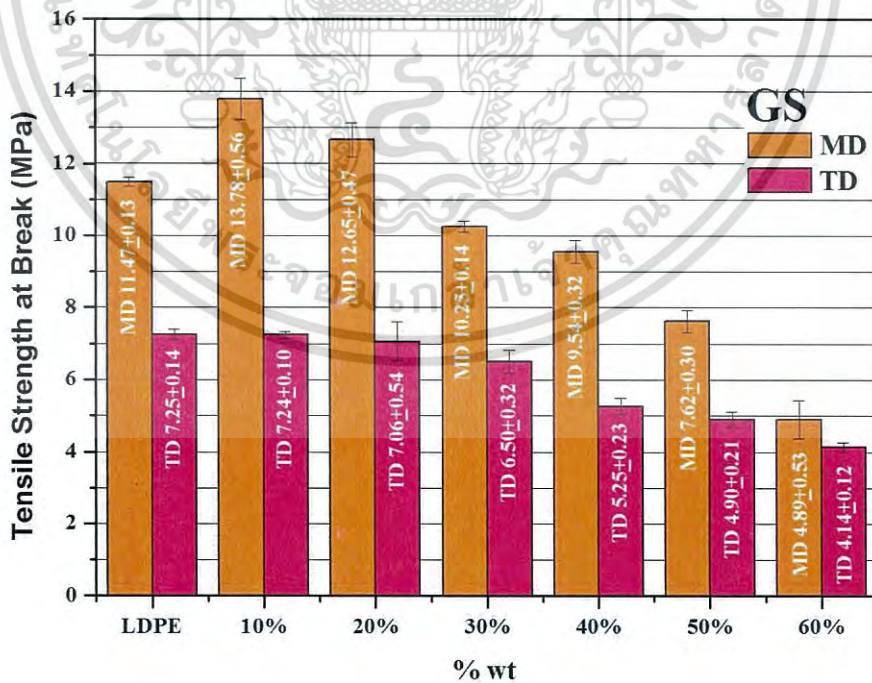
4.3.1.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

พบว่าเมื่อผสม CaCO₃ จากเปลือกหอยในแต่ละชนิด ส่งผลให้ LDPE : CaCO₃ ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรงดึงสูงขึ้นตามแนวเครื่องจักร (Machine direction; MD) ในสูตรที่ 2 (90:10) และสูตรที่ 3 (80:20) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE ที่ไม่ได้มีการผสม CaCO₃ ในสูตรที่ 1 (100:0) โดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่ามากกว่า แต่ในขณะเดียวกันเมื่อปริมาณ CaCO₃ สูงขึ้นในสูตรที่ 4 (70:30) สูตรที่ 5 (60:40) สูตรที่ 6 (50:50) และ สูตรที่ 7 (40:60) จะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึงลดลงโดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงดึงตามแนว MD ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน สำหรับความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) จะมีค่าลดลงตั้งแต่สูตร 2 ถึงสูตรที่ 7 โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากค่าความแข็งแรงดึงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE ที่ไม่ได้มีการผสม CaCO_3 ในสูตรที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.24 – 4.26 (ภาคผนวก ก.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล)

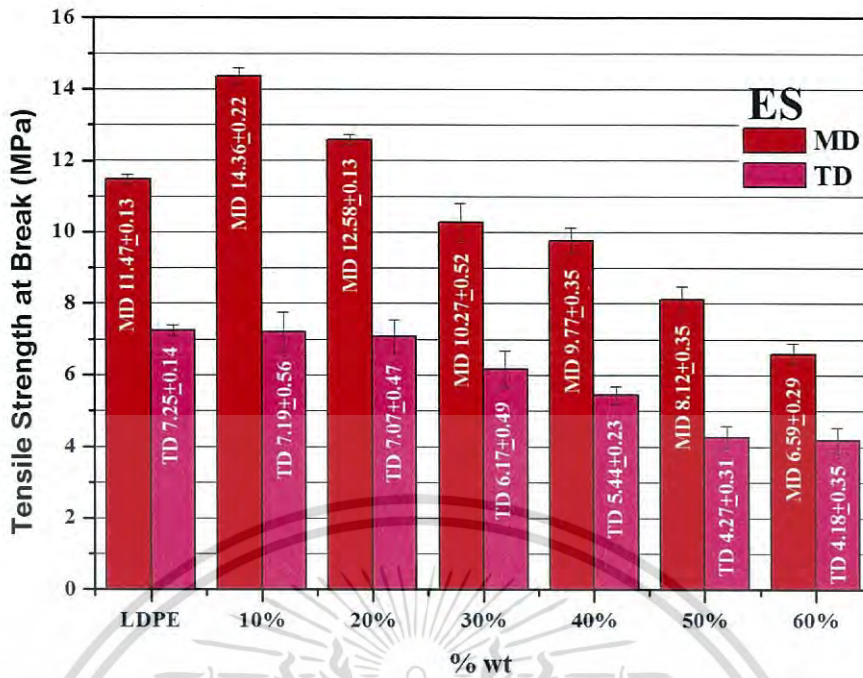


รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) ในแต่ละสูตร



รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่ (GS) ในแต่ละสูตร

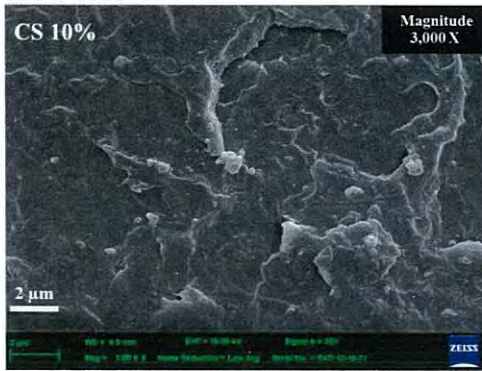
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในแต่ละสูตร

สาเหตุที่ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD มีค่ามากขึ้นในสูตรที่ 2 และ สูตรที่ 3 เนื่องมาจากขนาดอนุภาคของ CaCO_3 จากเปลือกหอยที่มีขนาดเล็ก 23.4–85.4 นาโนเมตร สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix) ของ LDPE ได้ง่าย และยึดเกาะได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงดังรูปที่ 4.27-4.29 ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่ามากขึ้นด้วย นอกจากนี้แล้วการใช้กรดสเตียริกในการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ที่มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) เปลี่ยนเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) จึงสามารถช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัส (Interphase) ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับอนุภาคของ CaCO_3 ได้ดีขึ้นเพราะกรดสเตียริกจะทำหน้าเหมือนกับเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง 2 ภูมิภาคโดยด้านที่มีขั้วของกรดสเตียริกจะจับกับ CaCO_3 และด้านที่ไม่มีขั้วจะจับกับ LDPE ส่งผลให้การยึดเกาะและการผสมระหว่าง 2 ภูมิภาคนั้นมีดีขึ้น นอกจากนี้แล้วกรดสเตียริกยังทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการกระจายตัวทำให้อนุภาค CaCO_3 กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์อีกด้วยจึงเป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งแรงดึงในสูตรที่ 2 และ สูตรที่ 3 เพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมที่ 10 %wt และ 20 %wt [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สูตรที่ 2

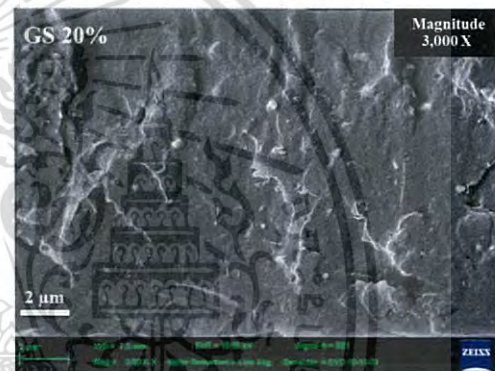


สูตรที่ 3

รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากเปลือกหอยแครง (CS) ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า

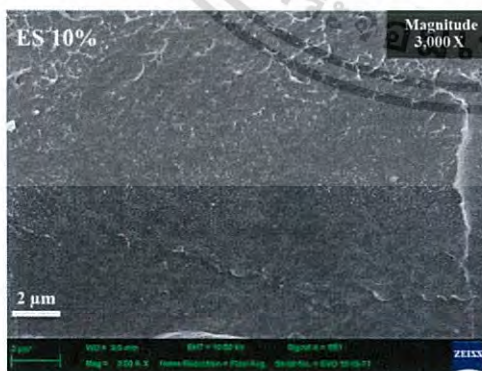


สูตรที่ 2

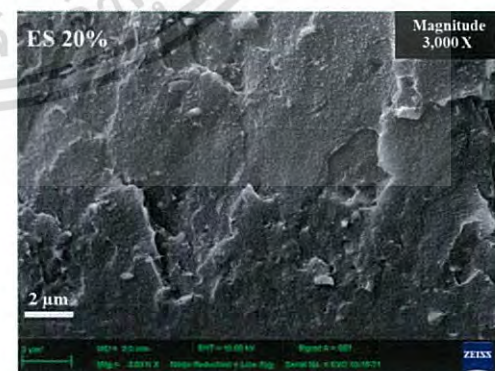


สูตรที่ 3

รูปที่ 4.28 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากเปลือกหอยแมลงภู (GS) ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า



สูตรที่ 2

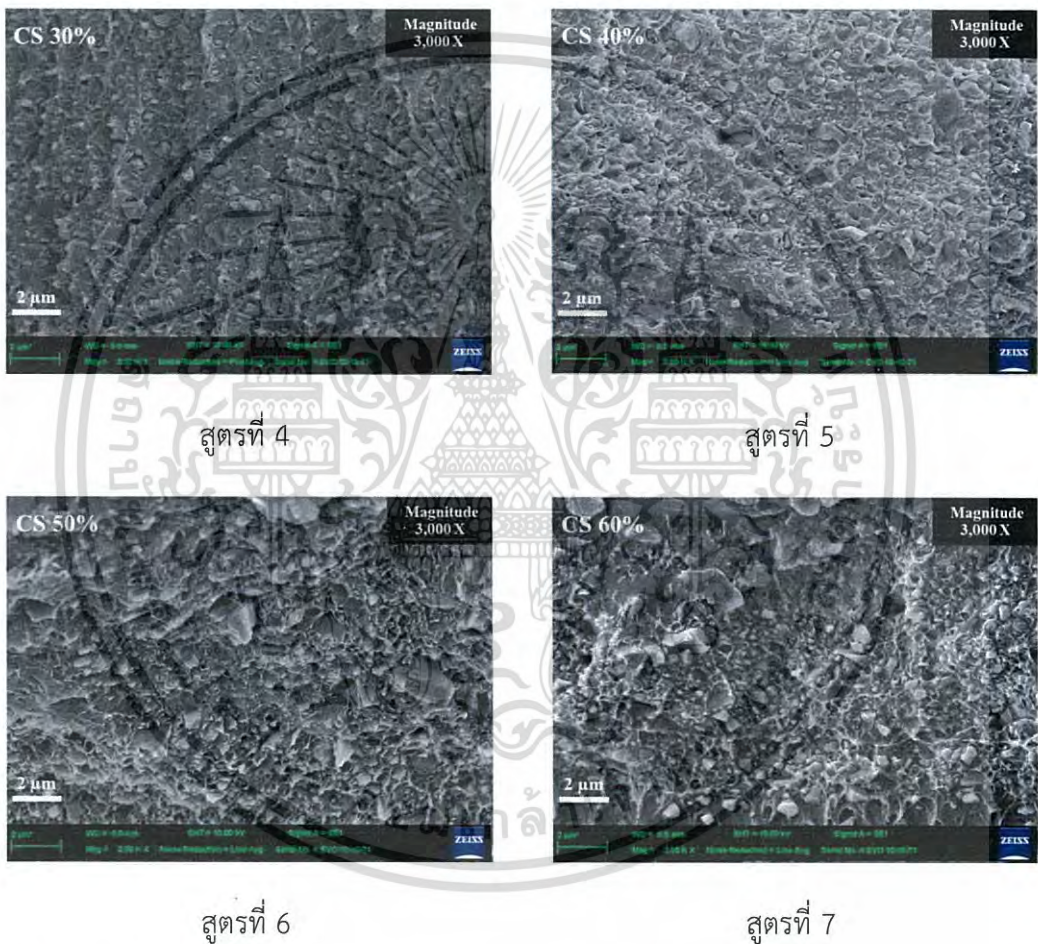


สูตรที่ 3

รูปที่ 4.29 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสาเหตุที่ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD ในสูตรที่ 4 สูตรที่ 5 สูตรที่ 6 และสูตรที่ 7 มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณ CaCO_3 ที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแยกเป็น 2 ภูมิภาคระหว่างและ LDPE และ CaCO_3 สูงขึ้น และเกิดช่องว่าง (Void) ในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก แสดงดังรูปที่ 4.30-4.32 ทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง ซึ่งเมื่อมีการให้แรงดึงจึงรับแรงได้น้อยลงและเกิดการฉีกขาดของฟิล์มได้ง่าย และสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงในแนว TD ตั้งแต่สูตรที่ 2 ถึงสูตรที่ 7 เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในแนว TD นั้นไม่ได้มีการจัดเรียงตัวตามแนวแรงเหมือนกับแนว MD จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึงลดต่ำลงในทุกสูตรที่มีการเพิ่มปริมาณของ CaCO_3

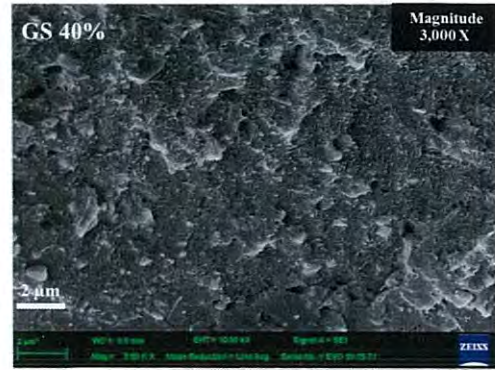


รูปที่ 4.30 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) ในสูตรที่ 4 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า

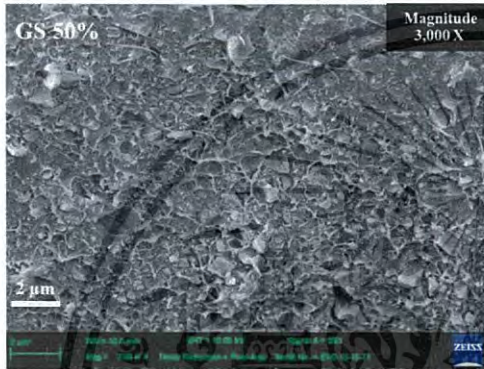
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



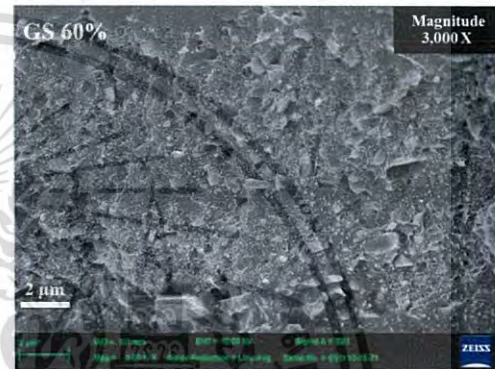
สูตรที่ 4



สูตรที่ 5



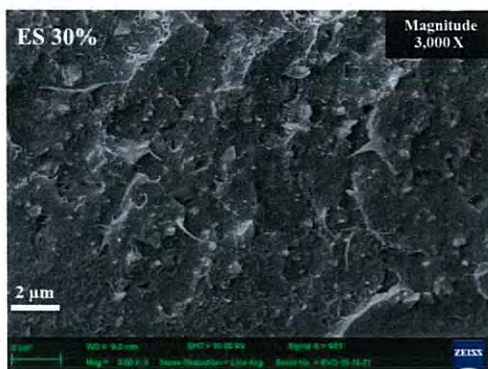
สูตรที่ 6



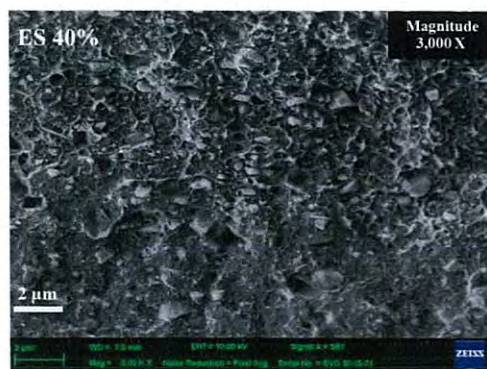
สูตรที่ 7

รูปที่ 4.31 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู (GS) ในสูตรที่ 4 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



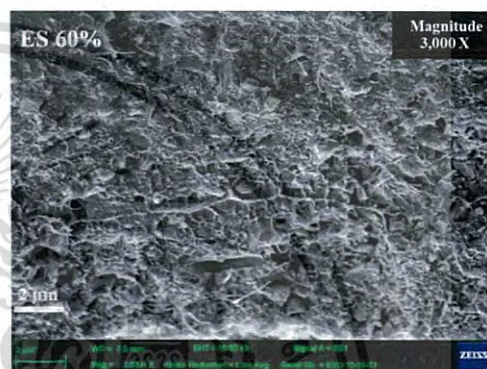
สูตรที่ 4



สูตรที่ 5



สูตรที่ 6



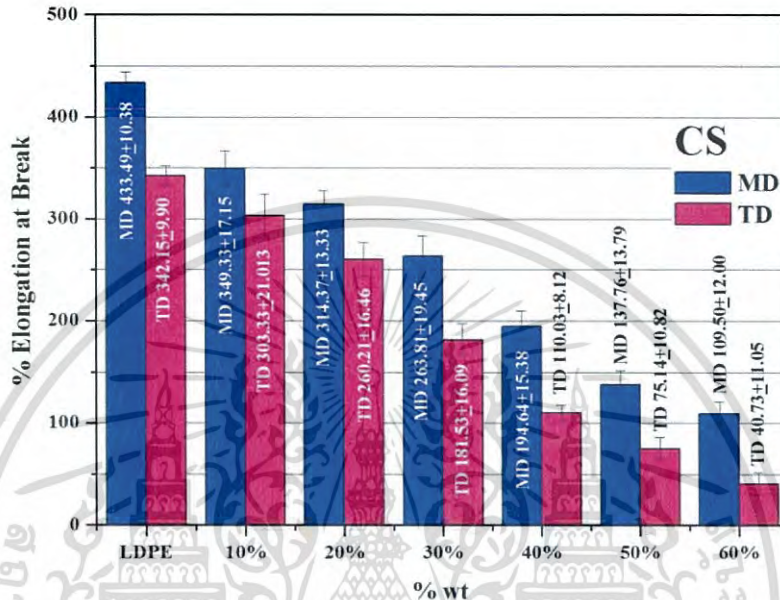
สูตรที่ 7

รูปที่ 4.32 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในสูตรที่ 4 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า

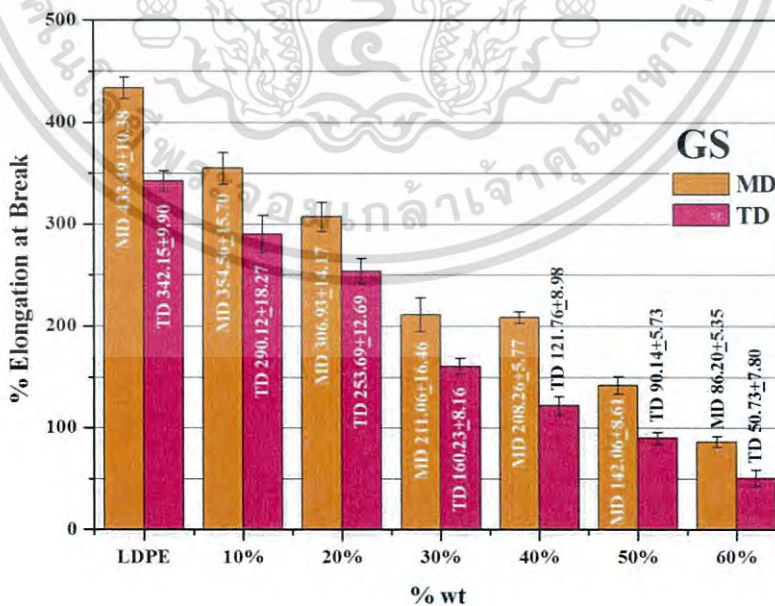
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

พบว่าการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในสูตรที่ 2 ถึง สูตรที่ 7 จะทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ลดต่ำลงทั้งในแนว MD และ TD เมื่อปริมาณ CaCO_3 ในแต่ละสูตรเพิ่มสูงขึ้น แต่จะลดต่ำลงอย่างมาก ในแนว TD ในทุกสูตร เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE ในสูตรที่ 1 ที่ไม่ได้มีการผสม CaCO_3 แสดงดัง รูปที่ 4.33-4.35 (ภาคผนวก ก.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล)

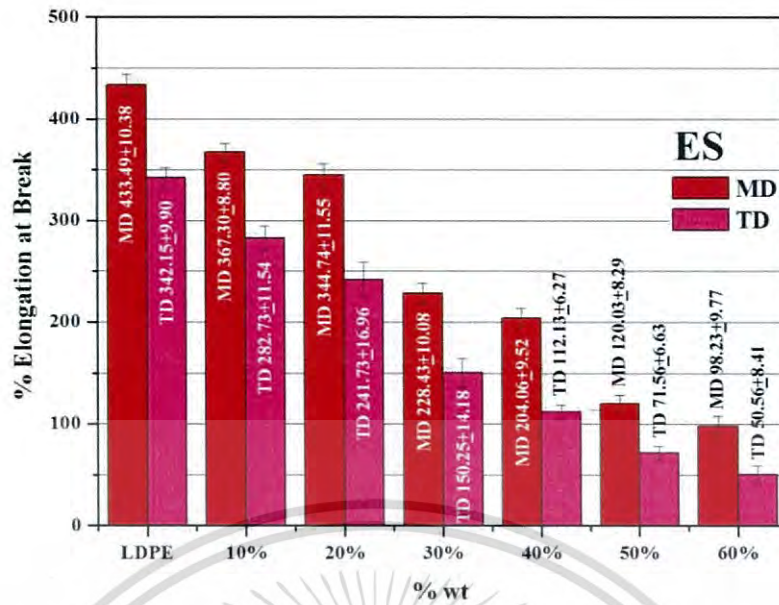


รูปที่ 4.33 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) ในแต่ละสูตร



รูปที่ 4.34 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู (GS) ในแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. ให้ความสำคัญสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

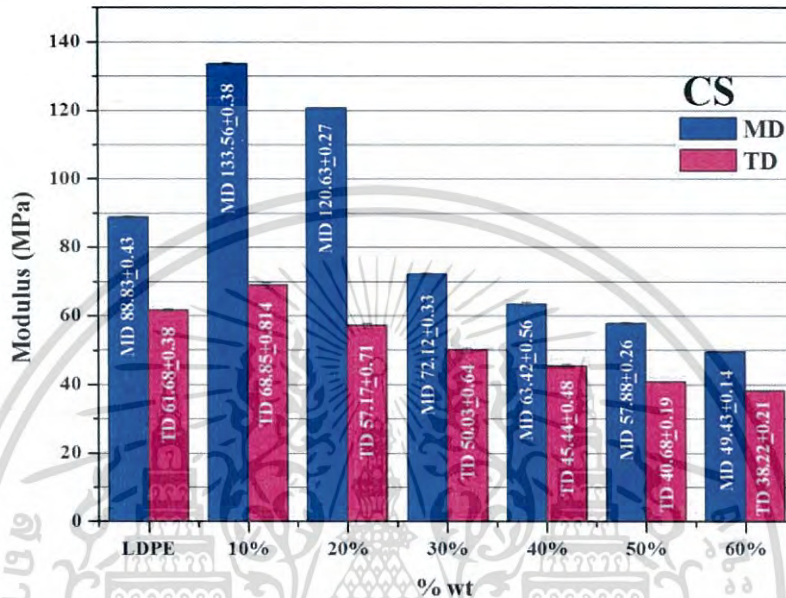


รูปที่ 4.35 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในแต่ละสูตร

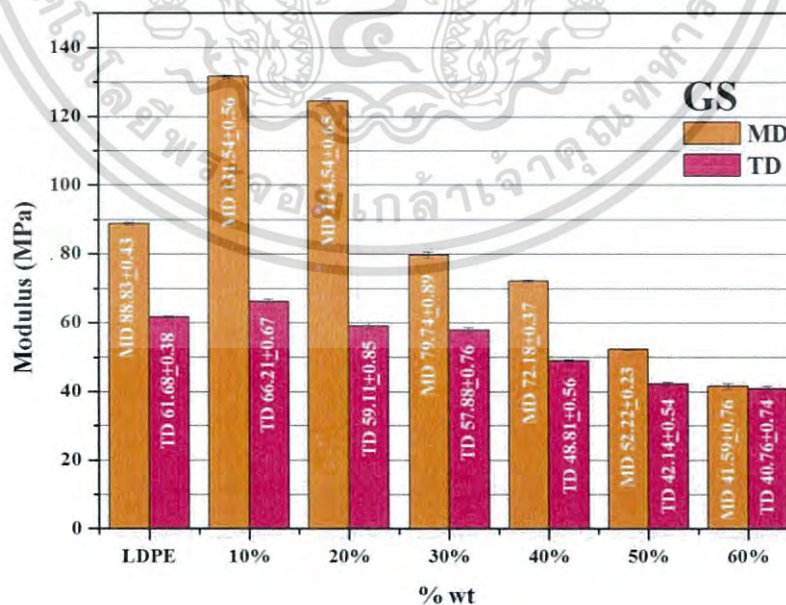
สาเหตุที่ทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตลดต่ำลงตั้งแต่สูตรที่ 2 ถึงสูตรที่ 7 ทั้งแนว MD และ TD เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ CaCO_3 สูงขึ้น เพราะอนุภาคของ CaCO_3 นำจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ขีดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ เป็นสาเหตุให้การเกี่ยวพัน (Entanglement) ระหว่างสายโซ่ลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงจึงเกิดการขาดได้ง่าย [48] และปริมาณ CaCO_3 ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสูตรอาจส่งผลให้โอกาสที่สายโซ่พอลิเมอร์จะเคลื่อนที่หรือเกิดการเกี่ยวพันกันได้น้อยลง จึงทำให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง นอกจากนี้สาเหตุที่ทำให้ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตลดต่ำลง เป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของอนุภาคของแข็ง CaCO_3 ในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ทำหน้าที่เป็นส่วนยืดตัวลดลง แม้ว่าจะมีการปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริกเพื่อช่วยในการกระจายตัวและทำให้อนุภาค CaCO_3 ยึดเกาะได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์แล้วก็ตาม

4.3.1.3 ค่ามอดูลัส (Modulus)

พบว่าการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในสูตรที่ 2 จะทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นทั้งในแนว MD และ TD (หาค่ามอดูลัสในช่วง Elastic stage) และเมื่อปริมาณ CaCO_3 ในสูตรที่ 3 ถึง สูตรที่ 7 เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดูลัสลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE ในสูตรที่ 1 ที่ไม่ได้มีการผสม CaCO_3 แสดงดังรูปที่ 4.36-4.38 (ภาคผนวก ก.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล)

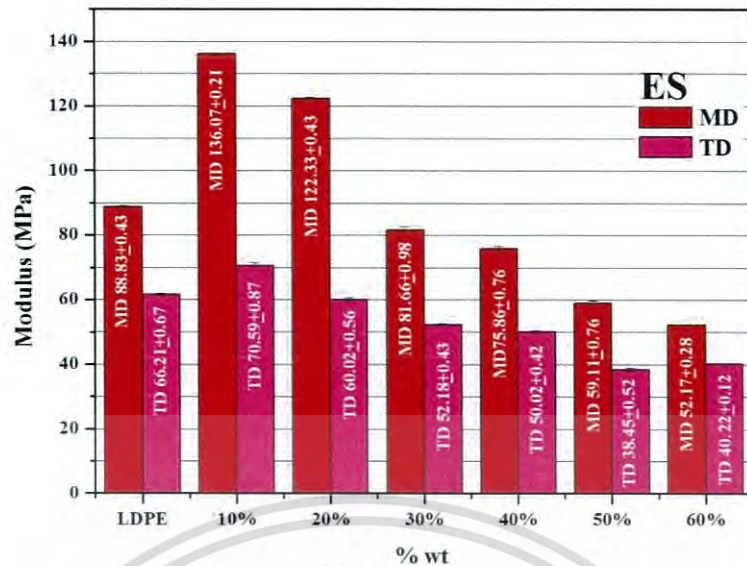


รูปที่ 4.36 ค่ามอดูลัส แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) ในแต่ละสูตร



รูปที่ 4.37 ค่ามอดูลัส แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู (GS) ในแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ค่ามอดูลัส แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในแต่ละสูตร

สาเหตุที่ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นทั้งในแนว MD และ TD ในสูตรที่ 2 เนื่องมาจาก CaCO_3 จากเปลือกหอยนั้นมีการกระจายตัวและยึดเกาะที่ดีไม่เกิดการแยกวัฏภาคกัน ส่วนในสูตรที่ 3 ถึง สูตรที่ 7 ค่ามอดูลัสลดต่ำลงทั้งในแนว MD และ TD เนื่องมาจากปริมาณ CaCO_3 ที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแยกวัฏภาคกันระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอย [50] นอกจากนี้แล้วในสูตรที่ 5 ถึงสูตรที่ 7 อนุภาค CaCO_3 เริ่มที่จะเกิดการเชื่อมติดกัน (connect) ทำให้ไม่มีความแข็งแรงเกิดขึ้นระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต ฟิล์มจึงเกิดการฉีกขาดได้ง่ายเนื่องจากความเปราะของฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น

4.3.1.4 ผลการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย

จากการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.39 - 4.42 พบว่าการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเดียริกเป็นสารตัวเติม ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 แสดงให้เห็นว่า CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ดีบน LDPE เมทริกซ์ ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Agglomerate) และผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ที่สำคัญเมื่อทำการให้แรงดึงจะเห็นได้ชัดว่ามีการยึดเหนี่ยวที่ดีบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์และ CaCO_3 ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าสูงขึ้นไป แต่เมื่อปริมาณ CaCO_3 ในสูตรที่ 4 สูตรที่ 5 สูตรที่ 6 และ สูตรที่ 7 เพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า CaCO_3 เริ่มที่จะมีการกระจายตัวได้ไม่ดีและมีการรวมตัวกันมากยิ่งขึ้นทำให้การยึดเหนี่ยวไม่ดีระหว่างเมทริกซ์และ CaCO_3 เนื่องมาจากเกิดการแยกออกเป็น 2 วัฏภาคระหว่าง CaCO_3 และ LDPE ถึงแม้ว่าจะทำการปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 ด้วยกรดสเดียริกแล้วก็ตาม และยังเกิดช่องว่างในโครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วยจึงยิ่งทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณ CaCO_3 สูงขึ้นในสูตรที่ 4 สูตรที่ 5 สูตรที่ 6 และสูตรที่ 7

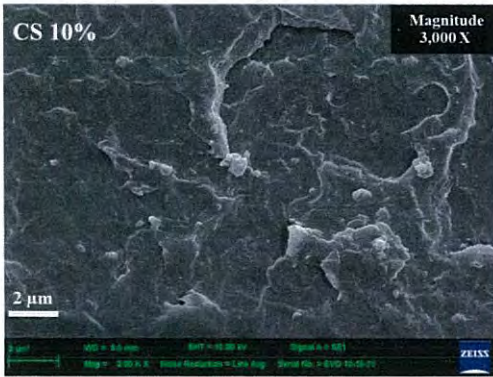
เมื่อพิจารณาถึงการยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างสารตัวเติม CaCO_3 กับ LDPE เมทริกซ์ จะมีการยึดเกาะที่ดีมากในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณพื้นผิวที่ไม่มีช่องว่าง (Void) ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และ CaCO_3 ทั้งนี้เนื่องมาจาก CaCO_3 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกจะมีแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (Chemical adhesion) สูงเนื่องมาจากกรดสเตียริกนั้นมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาว (long chain) ทำให้เกิดการเกี่ยวพันหรือ ยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี และเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บริเวณพื้นผิวของ CaCO_3 จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่าง 2 วัสดุ โดยส่วนที่มีขี้ของกรดสเตียริกจะจับกับ CaCO_3 และส่วนที่ไม่มีขี้จะจับกับ LDPE ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสสูงขึ้นในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 [50] ที่สำคัญด้วยขนาดอนุภาคของ CaCO_3 จากเปลือกหอยที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจึงช่วยในการยึดเกาะได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงและมอดูลัสที่ได้มีค่าสูงขึ้นด้วย



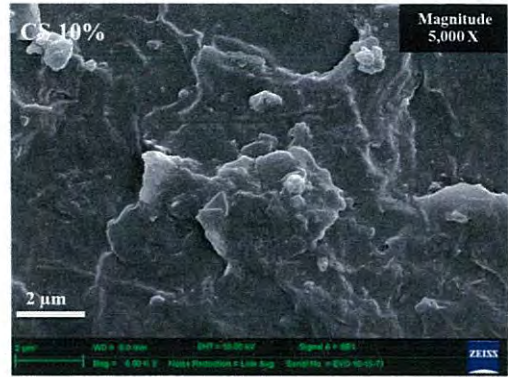
สูตรที่ 1

สูตรที่ 1

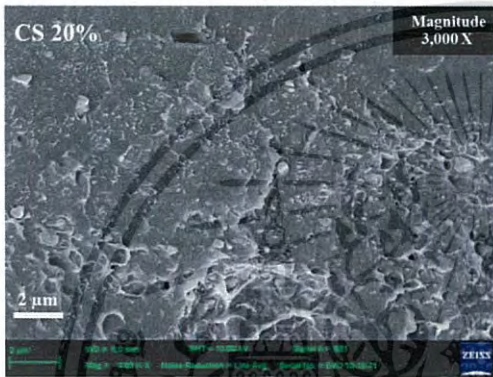
รูปที่ 4.39 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ LDPE Pure ในสูตรที่ 1 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า



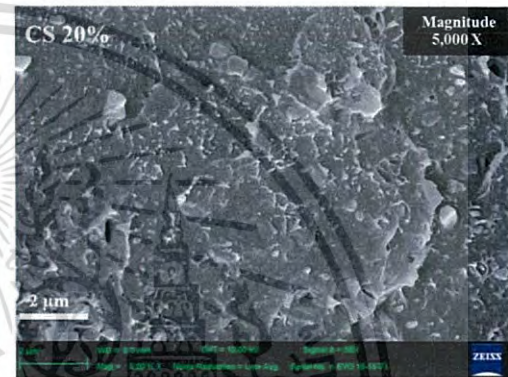
สูตรที่ 2



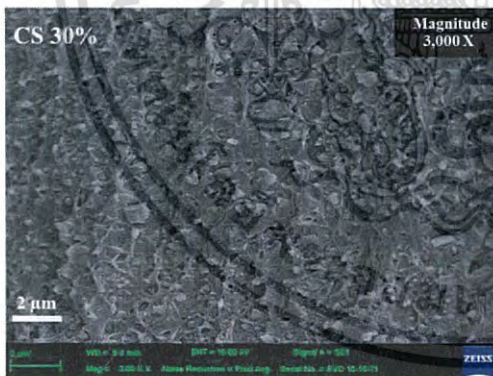
สูตรที่ 2



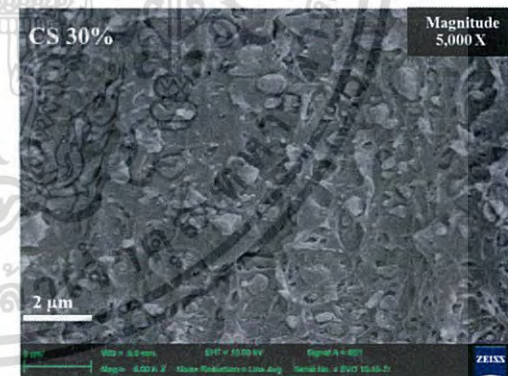
สูตรที่ 3



สูตรที่ 3



สูตรที่ 4

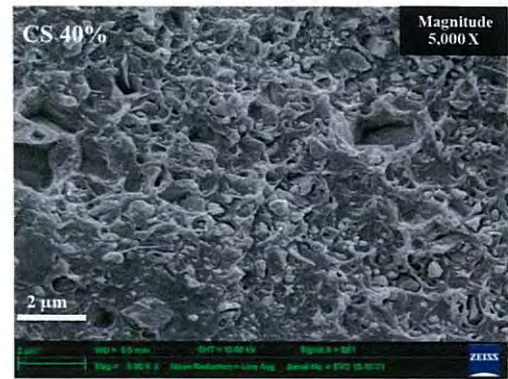


สูตรที่ 4

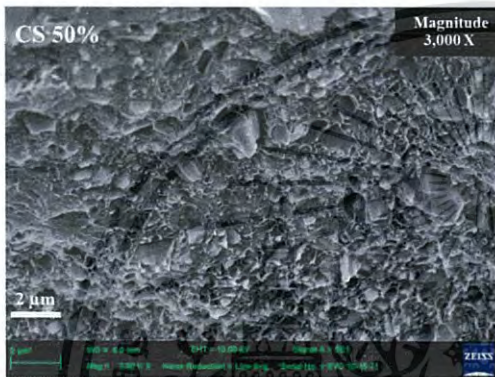
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



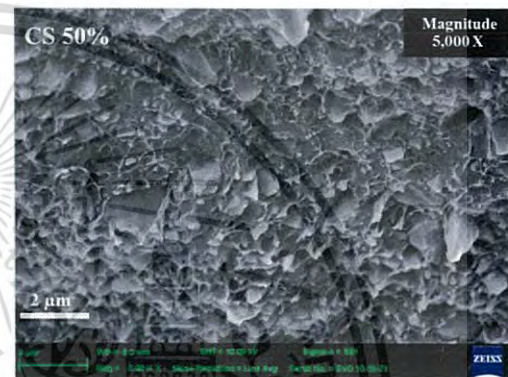
สูตรที่ 5



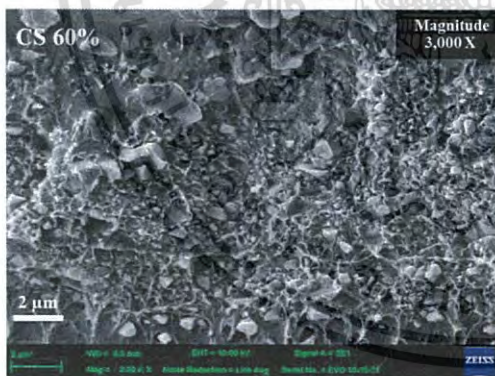
สูตรที่ 5



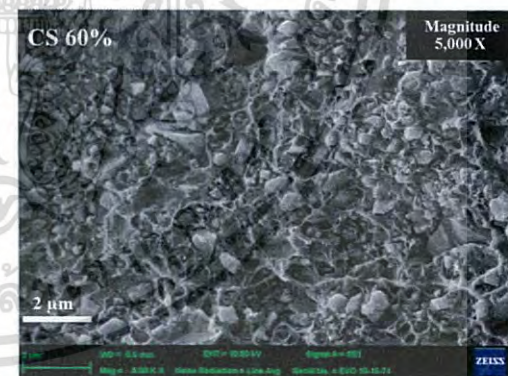
สูตรที่ 6



สูตรที่ 6



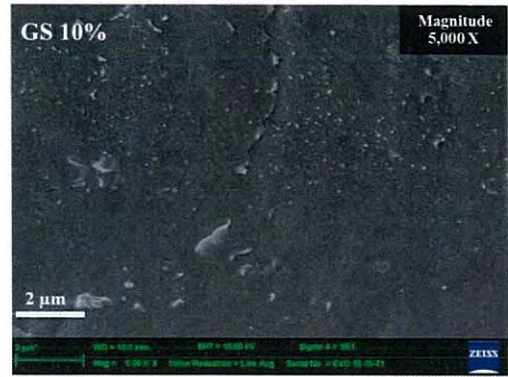
สูตรที่ 7



สูตรที่ 7

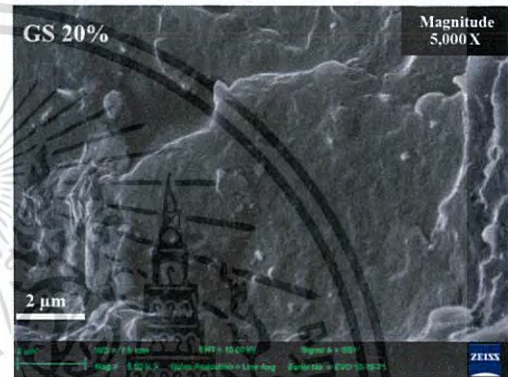
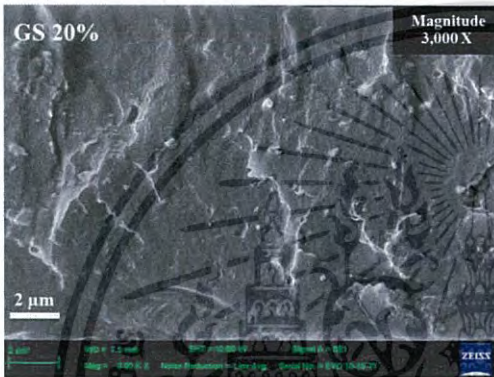
รูปที่ 4.40 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) ในสูตรที่ 2 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



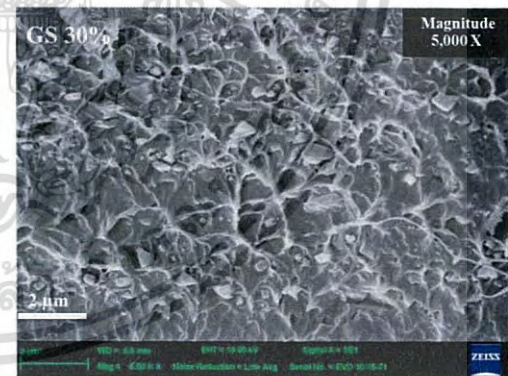
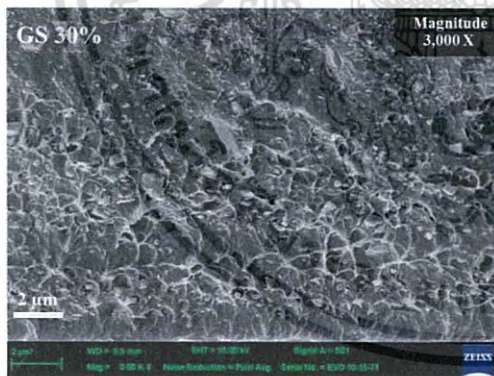
สูตรที่ 2

สูตรที่ 2



สูตรที่ 3

สูตรที่ 3



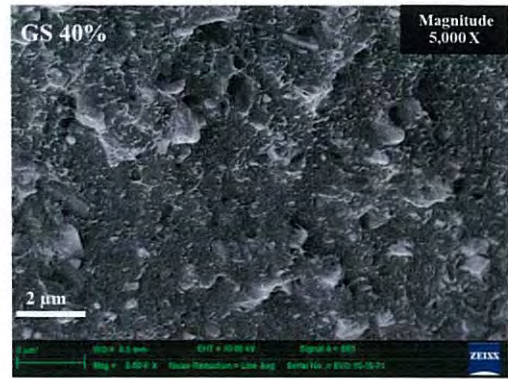
สูตรที่ 4

สูตรที่ 4

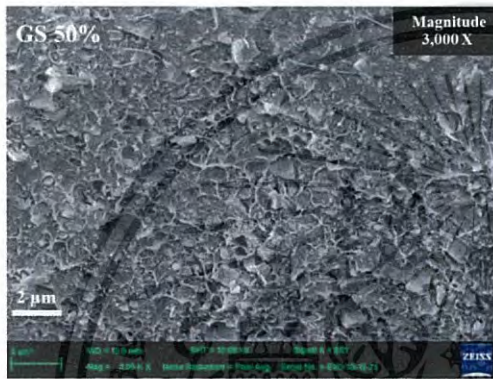
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



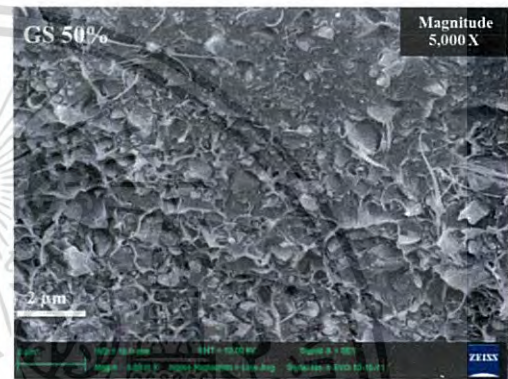
สูตรที่ 5



สูตรที่ 5



สูตรที่ 6



สูตรที่ 6



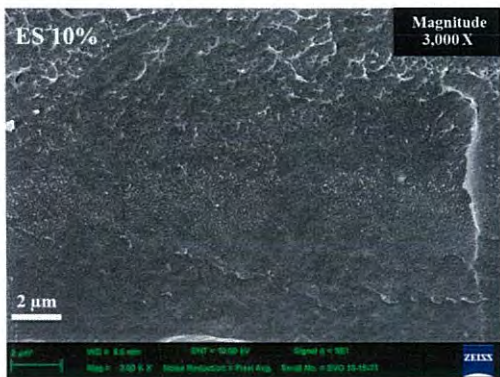
สูตรที่ 7



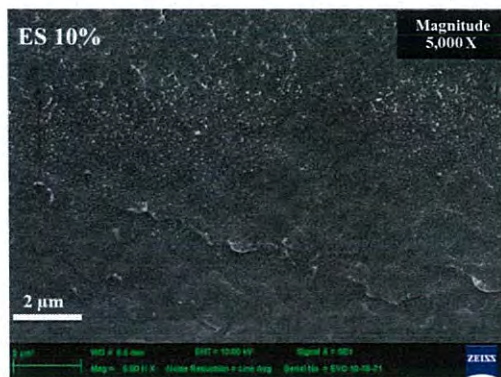
สูตรที่ 7

รูปที่ 4.41 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู่ (GS) ในสูตรที่ 2 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า

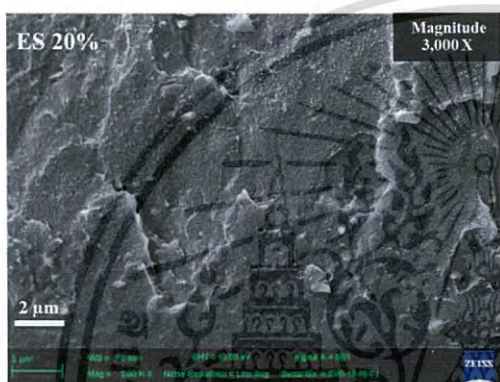
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สูตรที่ 2



สูตรที่ 2



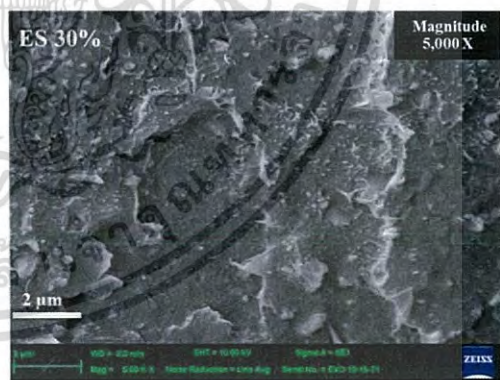
สูตรที่ 3



สูตรที่ 3

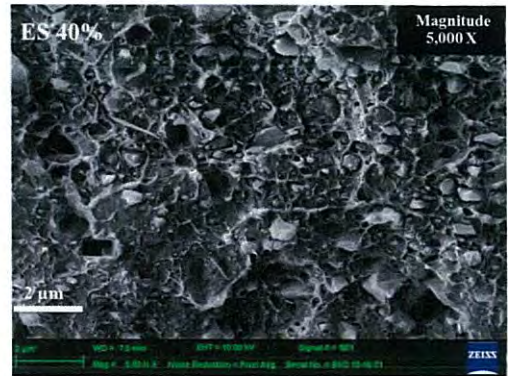
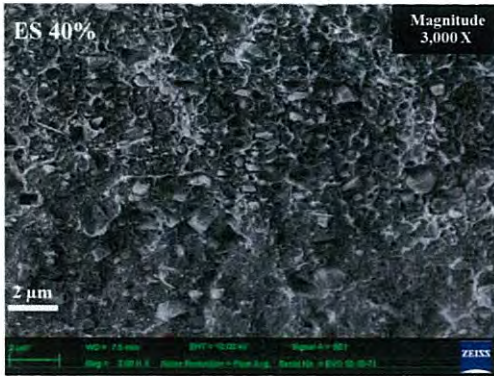


สูตรที่ 4



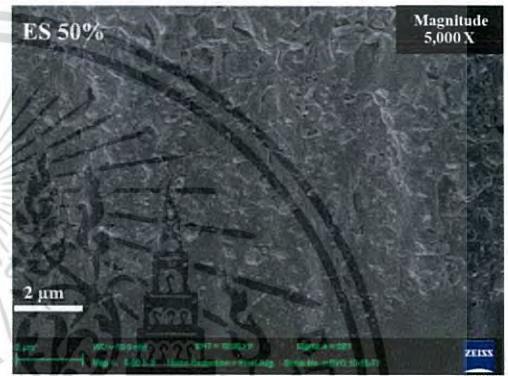
สูตรที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



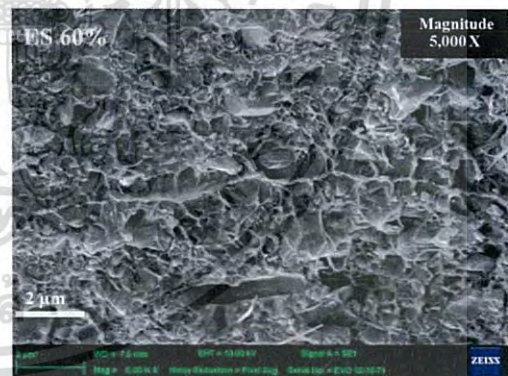
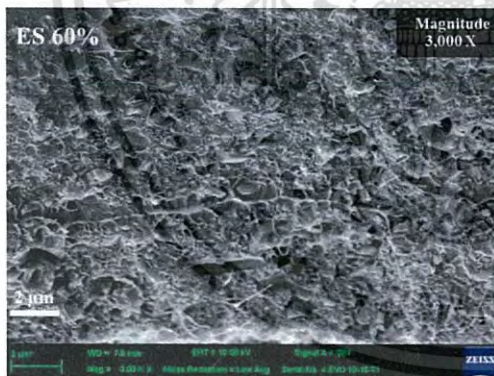
สูตรที่ 5

สูตรที่ 5



สูตรที่ 6

สูตรที่ 6



สูตรที่ 7

สูตรที่ 7

รูปที่ 4.42 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ (ES) ในสูตรที่ 2 ถึงสูตรที่ 7 ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

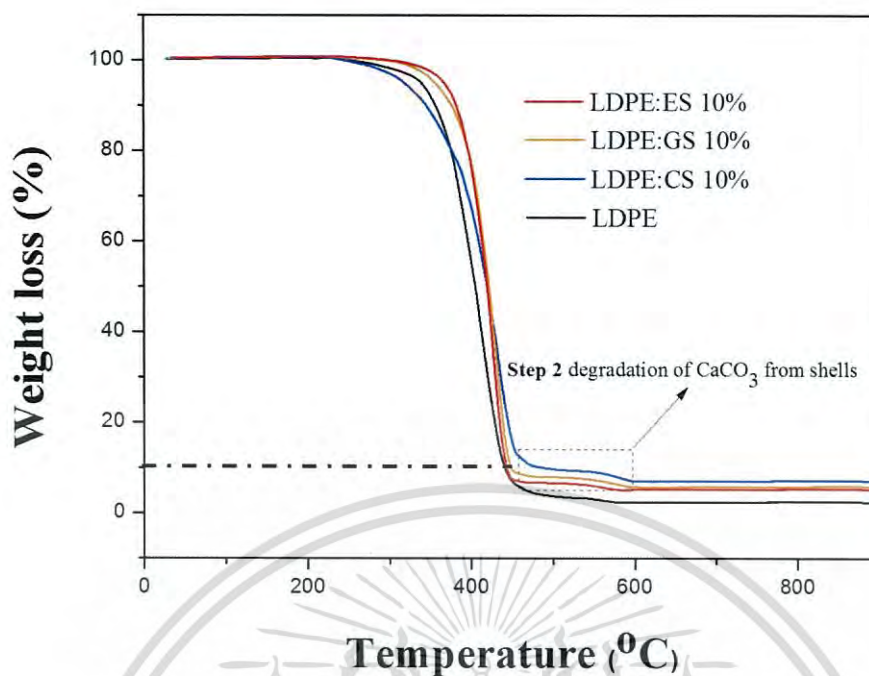
จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต จะเห็นได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ ในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 จะให้ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยสามารถใช้เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้อย่างดี

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตในสูตรที่ 2 คือที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับเป็นสารตัวเติมใน LDPE เนื่องจากให้ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงที่สุด มาทำการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึก การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยากับ CaCO_3 จากทางการค้าที่ใช้เป็นสารตัวเติมใน LDPE

4.3.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย

4.3.2.1 การตรวจสอบการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

จากรูปที่ 4.43 กราฟ TGA ของ LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยในแต่ละชนิด จากกราฟ TGA พบว่าการสลายตัวทางความร้อนฟิล์ม LDPE ที่ไม่ได้ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยจะมีช่วงการสลายตัวเพียงช่วงเดียว คือของ LDPE ขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต LDPE: CaCO_3 จะมีช่วงการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 2 ช่วง [50] ช่วงแรกเป็นการสลายตัวของ LDPE และช่วงที่สองเป็นการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ CaCO_3 ของเปลือกหอยในแต่ละสูตร ที่เติมลงไปจะไม่ส่งผลต่อการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE ที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณ CaCO_3 ไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต และให้ผลในลักษณะเดียวกันทั้ง CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยจะแสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่แตกต่างกันมากนักโดยมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก



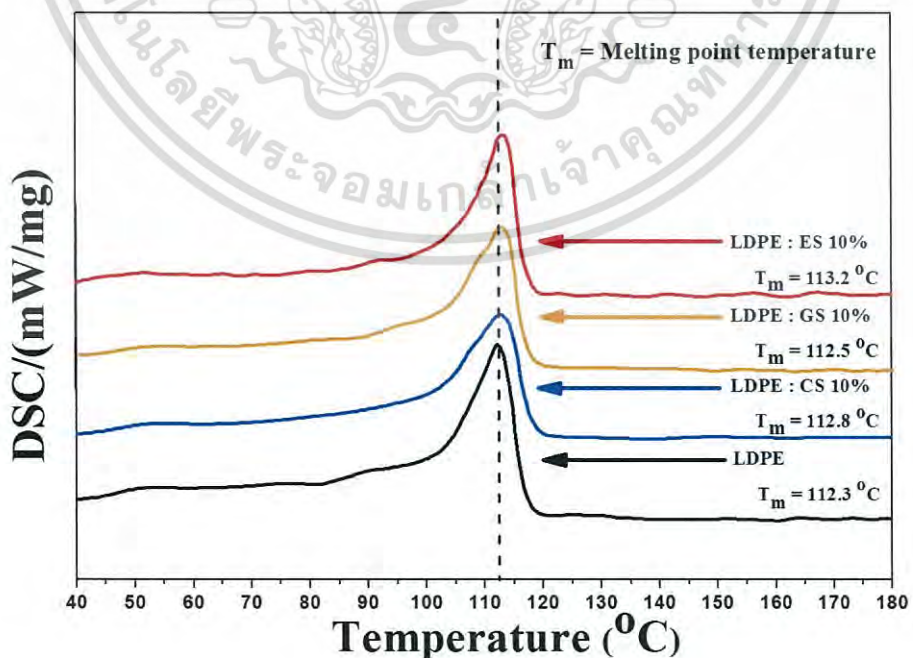
รูปที่ 4.43 การสลายตัวทางความร้อนของ LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย

ตารางที่ 4.4 การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 10 %wt

Sample	Step 1 decomposition of LDPE	Weight loss % of LDPE	Step 2 decomposition of CaCO_3	Weight loss % of CaCO_3
LDPE	233.03-457.68	99.57	-	-
LDPE:CS	243.73-462.94	90.02	462.94-607.59	8.92
LDPE:GS	239.64-464.11	91.54	464.11-601.36	6.54
LDPE:ES	266.98-469.17	92.81	469.17-578.39	6.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย พบว่า รูปที่ 4.44 แสดง DSC thermogram ของ LDPE และ LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย ซึ่งแสดงอุณหภูมิในการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของ LDPE และ LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย พบว่าค่า T_m ของ LDPE มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยลงไป เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมเหลวขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกและความเป็นผลึกของสารตัวเติม โดยการผสม CaCO_3 ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีความเป็นผลึกจากเปลือกหอยจะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวเพิ่มสูงขึ้นด้วยเพราะ CaCO_3 ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกแล้วและมีขนาดที่เล็กระดับนาโนเมตรทำให้การผสมระหว่าง LDPE/ CaCO_3 จากเปลือกหอยที่ 10 %wt สามารถผสมเข้ากันได้ดีทำให้อนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์จึงช่วยทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่า T_m ที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4.5 นั้นมีความแตกต่างกันน้อยมากระหว่าง LDPE และ LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย เนื่องจากปริมาณ CaCO_3 จากเปลือกหอยที่เติมลงไปนั้นมีเพียง 10 %wt ซึ่งถ้าเติม CaCO_3 มากกว่า 10 %wt จะทำให้ค่า T_m ที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น แต่ในการทดลองนี้เราเลือกฟิล์มที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุดมาทำการวิเคราะห์ซึ่งก็คือการเติม CaCO_3 จากเปลือกหอยที่ 10 %wt นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 10 %wt จะทำให้ค่าความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE ที่ไม่มีสารตัวเติม เนื่องจาก CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมที่ก่อผลึก (ภาคผนวก ค.1-ค.4 การสลายตัวทางความร้อนกับการเกิดผลึกของ LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย)



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.44 อุณหภูมิในการหลอมเหลวของ LDPE และ LDPE ที่ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิในการหลอมเหลวของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจากเทคนิค DSC โดยคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ เมื่อค่า ΔH_f^0 (J/g) ของ LDPE มีค่าเท่ากับ 293 (J/g) [52]

Sample	Melting point T_m ($^{\circ}\text{C}$)	Melting endotherm ΔH_f (J/g)	% Crystallinity χ
LDPE	112.3	89.26	30.46
LDPE:CS 10%	112.8	111.0	34.10
LDPE:GS 10%	112.5	121.7	37.38
LDPE:ES 10%	113.2	113.1	34.74

$$\text{จาก Degree of Crystallinity (\%)} = \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0}$$

เมื่อ H_f^* = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (J/g)

H_f^0 = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% สำหรับพอลิเมอร์

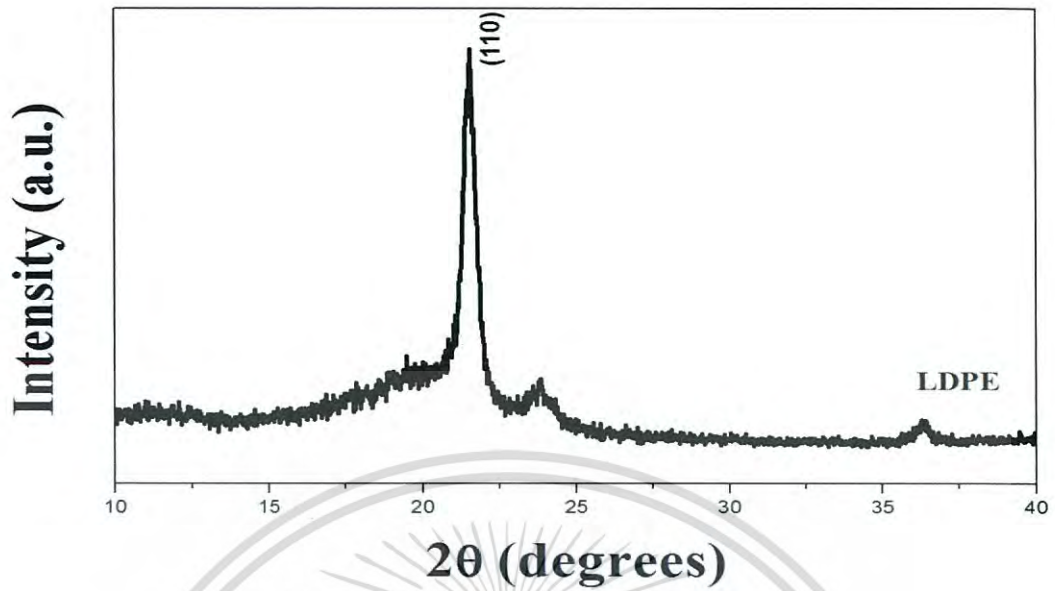
(ภาคผนวก ก.3 วิธีการคำนวณ % Crystallinity; χ)

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมใน LDPE จะทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากว่าสารตัวเติมทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกจึงช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ ซึ่งจะให้ผลที่สอดคล้องกับเทคนิค XRD

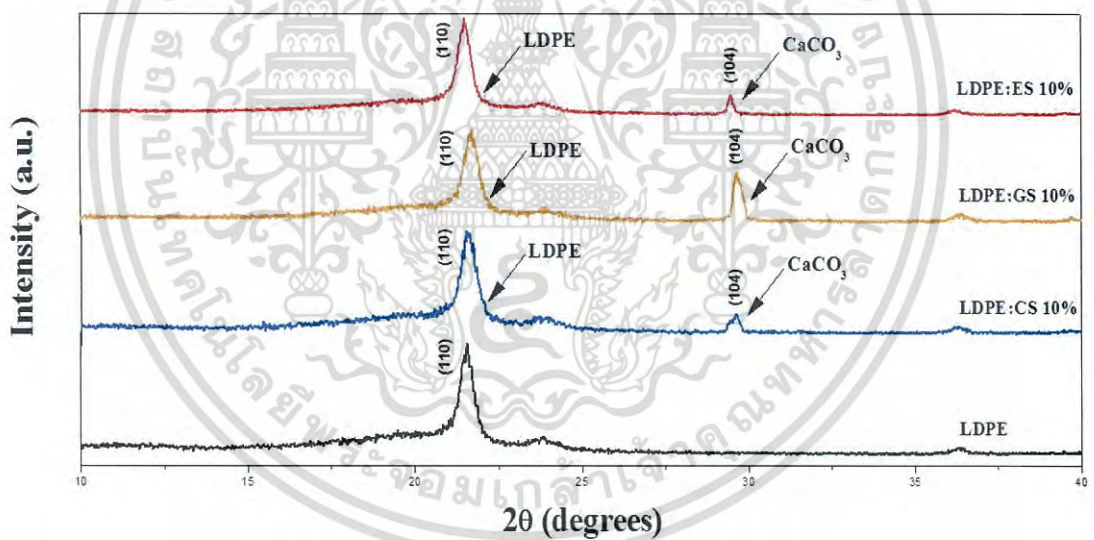
4.3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction (XRD)

ผลการศึกษาการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมในฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย พบว่า LDPE มีโครงสร้างแบบ orthorhombic [52] แสดงดังรูปที่ 4.45 โดยเมื่อทำการผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยพบว่าจะมี diffraction peak ของ CaCO_3 จากเปลือกหอยที่ระนาบ (104) ซึ่งเป็นของแคลไซต์ แสดงดังรูปที่ 4.46 รวมอยู่ด้วย แสดงว่าการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมใน LDPE จะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึก LDPE และไม่รบกวนการเกิดผลึกใน LDPE แต่จะช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้สูงขึ้นโดยสังเกตได้จากพีกของ CaCO_3 พบว่าการใช้ GS 10% จะให้ความสูงของพีก CaCO_3 สูงกว่าที่ CS 10 % และ ES 10% แสดงว่า GS 10% จะมีความเป็นผลึกสูงกว่า ซึ่งจะสอดคล้องกับเทคนิค DSC ที่พบว่าการใช้ GS 10% เป็นสารตัวเติมจะให้ค่าความเป็นผลึกสูงกว่าการใช้ CS 10% และ ES 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม LDPE



รูปที่ 4.46 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากเปลือกหอยแครง (CS) หอยแมลงภู่ (GS) และหอยตลับ (ES) ในสูตรที่ 2

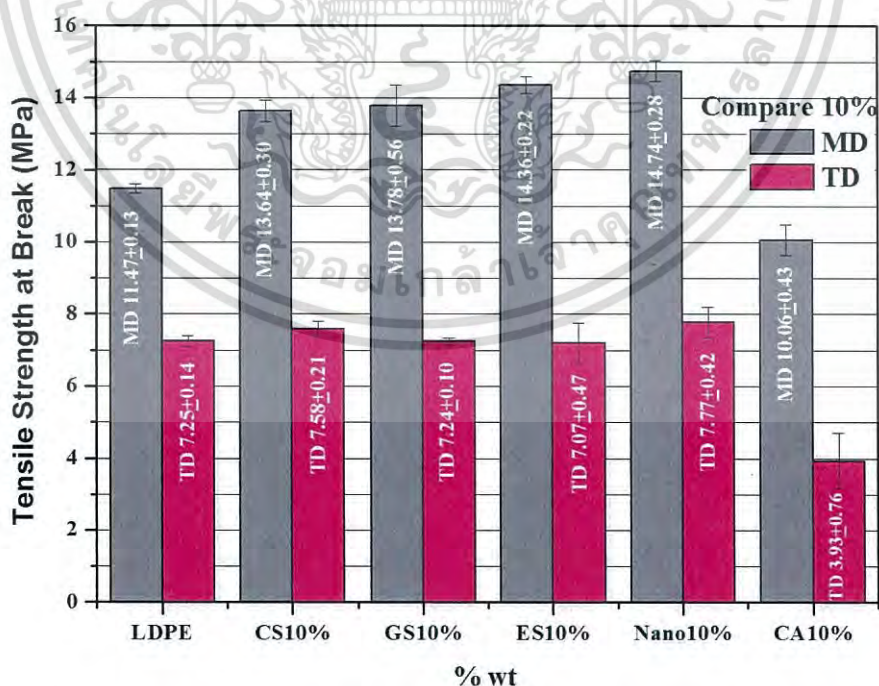
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากทางการค้าเปรียบเทียบกับ CaCO_3 จากเปลือกหอย

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้ CaCO_3 จากทางการค้าเป็นสารตัวเติมโดยที่ขนาดอนุภาคของ CaCO_3 จากทางการค้ามีขนาด 2-3 ไมครอน จากบริษัทสุรินทร์ ออมย่าเคมีคอล ไทยแลนด์ (Surintomya chemicals Thailand Co.Ltd) และขนาดอนุภาค 35-40 นาโนเมตร จากบริษัทไทยโพลีเคมีคอล จำกัด (Thai Poly Chemicals Co.Ltd) โดยทำการผสม LDPE:nano- CaCO_3 และ LDPE: CaCO_3 จากทางการค้าในอัตราส่วนและสภาวะที่ใช้ในการผสมเดียวกับฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือกหอย แครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ คือที่ 10 %wt ของ CaCO_3 จากนั้นทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้สภาวะเดียวกันกับฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือกหอยเพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่สภาวะเดียวกัน

4.4.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ที่ผสม nano- CaCO_3 โดยมีขนาดอนุภาค 35-40 นาโนเมตร จากทางการค้า และที่ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยที่มีขนาดอนุภาค 23.4-85.4 นาโนเมตร ให้ค่าความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงกว่าการใช้ CaCO_3 จากทางการค้าขนาด 2-3 ไมครอน เมื่อทำการเปรียบเทียบกันที่ 10 %wt ของการใช้ CaCO_3 โดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงดึงในแนว MD และ TD ที่มีค่ามากกว่า แสดงดังรูปที่ 4.47 (ภาคผนวก ก.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล)



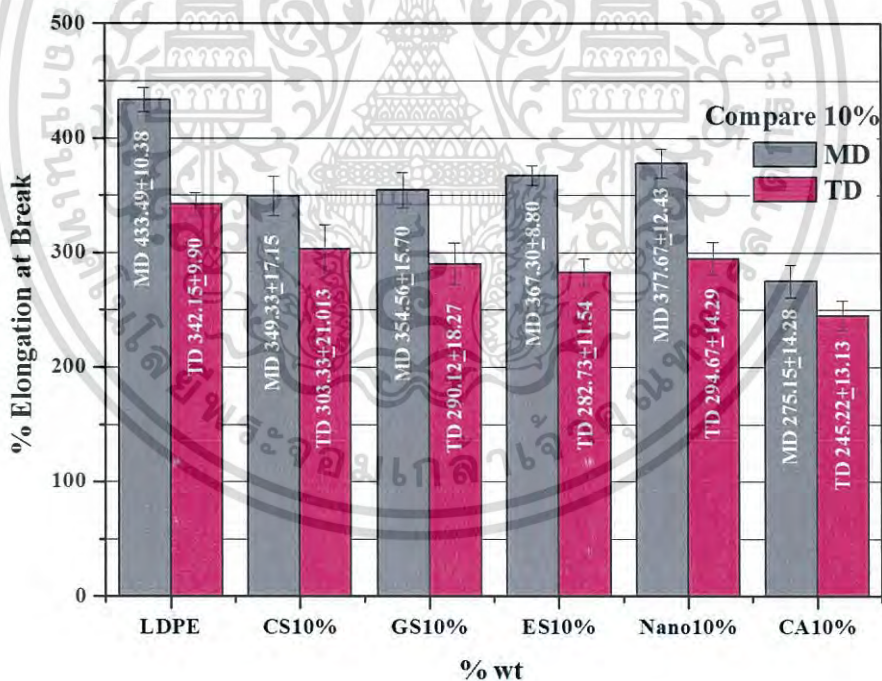
รูปที่ 4.47 ค่าความแข็งแรงดึงแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากทางการค้าและจากเปลือกหอยในแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสม nano-CaCO₃ จากทางการค้าและ CaCO₃ จากเปลือกหอยมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่า CaCO₃ จากทางการค้าขนาด 2-3 ไมครอน เนื่องมาจาก nano-CaCO₃ จากทางการค้า และ CaCO₃ จากเปลือกหอยที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกแล้วมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดของ CaCO₃ ขนาด 2-3 ไมครอนจากการค้า ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์สูงกว่าส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างวัฏภาคนั้นมีการยึดเกาะที่ดีกว่า นอกจากนี้แล้ว nano-CaCO₃ จากทางการค้าและ CaCO₃ จากเปลือกหอยยังกระจายตัวได้ดีกว่าบนพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเหมือนกับการใช้ CaCO₃ จากทางการค้าขนาด 2-3 ไมครอน ซึ่งเมื่อทำการให้แรงดึงจึงสามารถที่จะต้านทานแรงดึงได้สูงกว่าจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าการใช้ CaCO₃ ขนาดอนุภาค 2-3 ไมครอน จากทางการค้าเป็นสารตัวเติม

4.4.2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

พบว่าขนาดอนุภาคของสารตัวเติม CaCO₃ ที่มีอนุภาคแตกต่างกันให้ผลค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ที่ใกล้เคียงกันเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสูตรเดียวกันทั้งในแนว MD หรือ TD แสดงดังรูปที่ 4.48 (ภาคผนวก ก.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล)



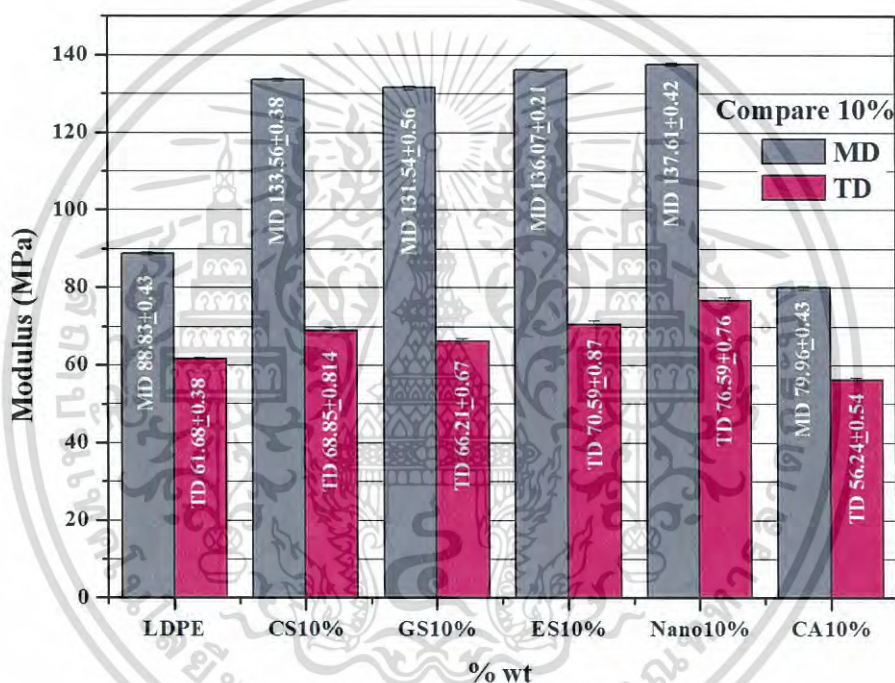
รูปที่ 4.48 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด แนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากทางการค้าและจากเปลือกหอยในแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่ทำให้ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ในแนว MD หรือ TD มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับสูตรเดียวกันโดยใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันนั้นพบว่า ขนาดอนุภาคจะไม่ส่งผลต่อค่าการยึด ณ จุดขาด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารตัวเติม CaCO_3 ที่สัดส่วนเท่ากันจะทำให้สัดส่วนของพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่ยึดตัวลดลง แม้ว่าสารตัวเติมจะมีขนาดแตกต่างกันก็ตาม ส่งผลให้ค่าการยึดตัว ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.4.3 ค่ามอดูลัส (Modulus)

พบว่าขนาดอนุภาคของสารตัวเติม nano- CaCO_3 จากทางการค้า และ CaCO_3 จากเปลือกหอยจะให้ค่ามอดูลัสสูงกว่าการใช้ CaCO_3 จากทางการค้าขนาด 2-3 ไมครอน ทั้งในแนว MD และ TD แสดงดังรูปที่ 4.49 (ภาคผนวก ก.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล)

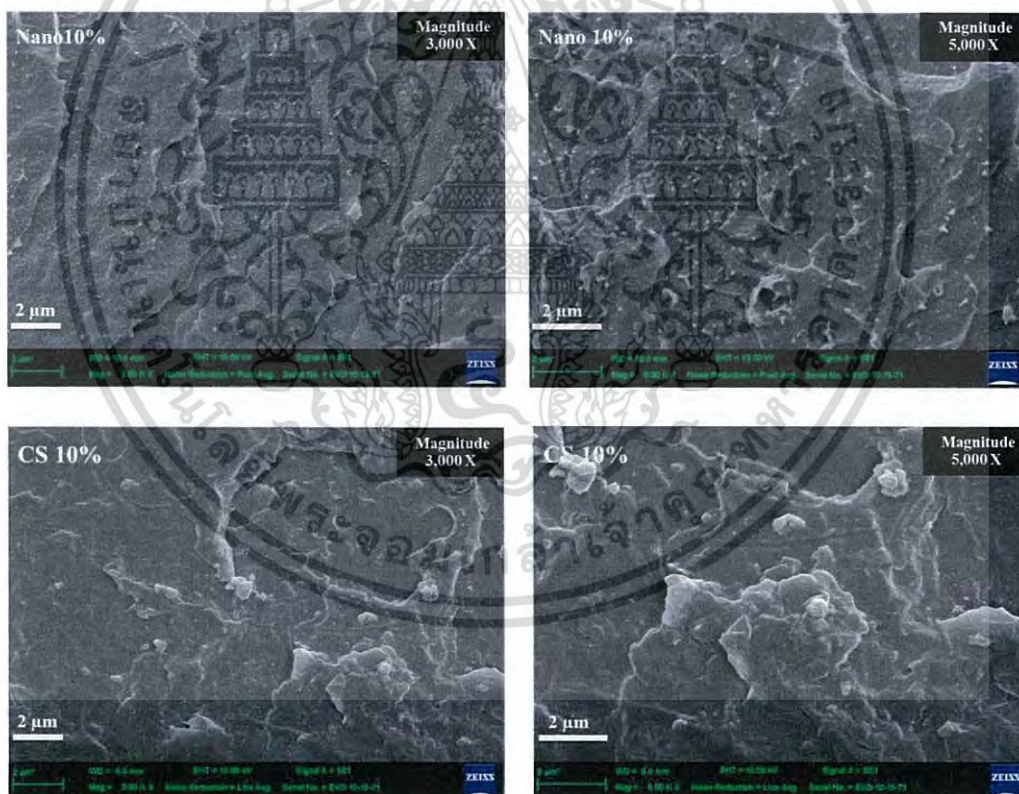


รูปที่ 4.49 ค่ามอดูลัสในแนว MD และ TD ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากทางการค้าและจากเปลือกหอยในแต่ละสูตร

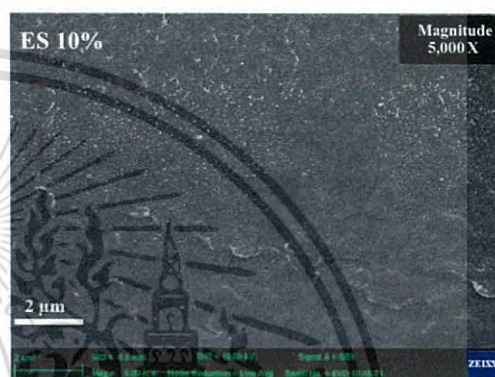
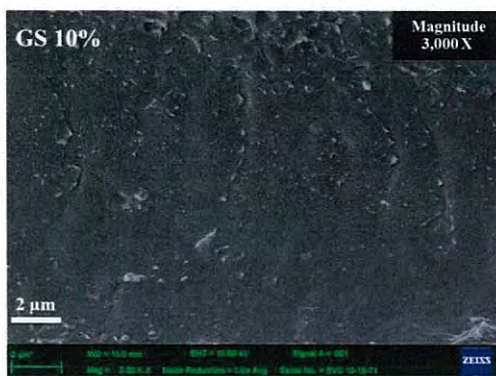
สาเหตุที่ทำให้ค่ามอดูลัสในแนว MD และ TD สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้ nano- CaCO_3 จากทางการค้า และ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมให้ค่ามอดูลัสสูงกว่าการใช้ CaCO_3 จากทางการค้าขนาด 2-3 ไมครอนทั้งในแนว MD และ TD เนื่องมาจากขนาดอนุภาคของ CaCO_3 มีขนาดที่เล็กกว่าและสามารถแทรกตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีที่สำคัญพื้นที่ผิวที่มากกว่าจะทำให้เกิดการยึดเกาะได้ดีกว่า จึงอาจจะเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่ามอดูลัสสูงกว่าการใช้ CaCO_3 ขนาด 2-3 ไมครอนเป็นสารตัวเติม ซึ่งน่าจะสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าสูงกว่าด้วย

4.4.4 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากทางการค้าและจากเปลือกหอย

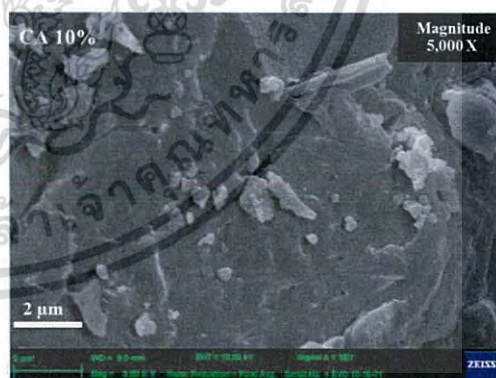
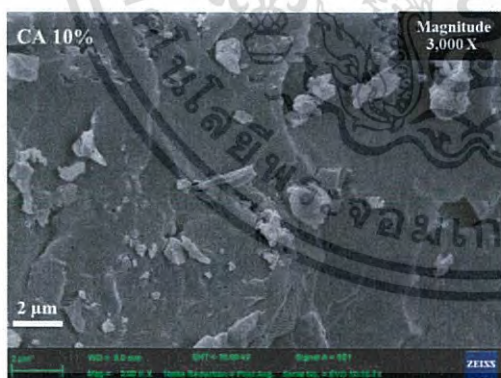
จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.50 พบว่าการใช้ nano- CaCO_3 จากทางการค้าและ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมจะแสดงให้เห็นว่าสารตัวเติมผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ที่สำคัญเมื่อทำการให้แรงดึงจะเห็นได้ชัดว่ามีการยึดเหนี่ยวที่ดีบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติมโดยไม่เกิดการฉีกขาดแบบเปราะ แต่จะเกิดการฉีกขาดแบบเหนียวมากกว่าซึ่งจะให้ผลสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อใช้ CaCO_3 ขนาด 2-3 ไมครอนเป็นสารตัวเติม แสดงดังรูปที่ 4.51 พบว่าบริเวณผิวที่ยึดเกาะกันระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะให้การยึดเกาะกันได้ไม่ค่อยดีเนื่องจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุภาคมีค่าสูงจึงเกิดการฉีกขาดได้ง่ายเมื่อให้แรงดึง ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้ จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าต่ำกว่าการใช้ nano- CaCO_3 จากทางการค้า และ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม nano-CaCO₃ (Nano) จากทางการค้า และจากเปลือกหอยแครง (CS) หอยแมลงภู่ (GS) และหอยตลับ (ES) ในปริมาณ 10 %wt ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า



รูปที่ 4.51 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ (CA) ขนาด 2-3 ไมครอน จากทางการค้าในปริมาณ 10 %wt ที่สเกลบาร์ขนาด 2 ไมครอน กำลังขยาย 3,000 เท่า และ 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีสำหรับการนำวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติอย่างเปลือกหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยตลับ มาทำการเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณขยะจากเปลือกหอย โดยการนำเปลือกหอยเหล่านี้มาทำการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-CaCO₃) เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในกระบวนการเป่าฟิล์ม นอกจากนี้แล้วยังสามารถลดขยะและลดต้นทุนจากการใช้พลาสติกกลงได้อีกด้วย

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอย

1. สามารถสังเคราะห์ nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยให้อยู่ในรูปผลึกของแคลไซต์ได้ด้วยวิธีโซโวลเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความเร็วรอบในการปั่นกวน 2000 รอบต่อนาที โดยใช้เอทานอลและน้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายตัวกลางในระบบ
2. จากผล XRF แสดงให้เห็นว่าปริมาณ CaCO₃ ที่พบในเปลือกหอยมีปริมาณที่สูงมากโดยพบว่าหอยแครงมี CaCO₃ อยู่ถึง 96.20 % หอยแมลงภู่ 96.60 % และหอยตลับ 98.40 % ด้วยเหตุผลนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาเตรียม nano-CaCO₃ เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในกระบวนการเป่าฟิล์ม
3. จากผล TGA แสดงให้เห็นถึงช่วงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของเปลือกหอยในแต่ละชนิด พบว่าจะมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวเกิดขึ้น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการสลายตัวของสารอินทรีย์ ช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของ CaCO₃ ได้ CaO และ CO₂ นอกจากนี้แล้วยังทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาแคลไซน์เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอะราโกไนท์เป็นแคลไซต์ที่สมบูรณ์คือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส
4. จากผล FT-IR แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโดยธรรมชาติของ CaCO₃ จากเปลือกหอยนั้นก่อนทำการเผาแคลไซน์จะมีพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญของโครงสร้างผลึกแบบอะราโกไนท์ แต่เมื่อทำการเผาแคลไซน์แล้วจะพบว่าพีคเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกแบบอะราโกไนท์ได้หายไปและปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญของโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์แทน
5. จากผล XRD พบว่าอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการเผาแคลไซน์ 2 ชั่วโมง และใช้อัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างผลึกอะราโกไนท์เป็นแคลไซต์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No. 72-1937 ของโครงสร้างผลึกแคลไซต์
6. จากผล FE-SEM แสดงให้เห็นว่า CaCO₃ ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีโซโวลเทอร์มอลนั้นให้ขนาดอนุภาคที่เล็กมากและเกาะกลุ่มกัน จากนั้นใช้วิธี linear intercept หาขนาดอนุภาคพบว่า CaCO₃ จากเปลือกหอยแครงมีขนาดอนุภาค 61.40±9.472 นาโนเมตร หอยแมลงภู่มีขนาดอนุภาค 50.12±10.298 นาโนเมตร และหอยตลับมีขนาดอนุภาค 43.72±10.059 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตและการตรวจวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย

1. กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเป่าขึ้นรูปคือที่สภาวะ

Feed zone	160	องศาเซลเซียส
Metering zone	170	องศาเซลเซียส
Die zone	180	องศาเซลเซียส
Screw speed	40	รอบต่อนาที
ความเร็วลูกกลิ้งที่ 1	3.0	รอบต่อนาที
ความเร็วลูกกลิ้งที่ 2	3.2	รอบต่อนาที

2. จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ในสูตรที่ 2 (90:10) ของการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง (CS) หอยแมลงภู่ (GS) และหอยตลับ (ES) เป็นสารตัวเติมจะให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสสูงที่สุดในแนว MD แต่จะทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE ที่ไม่ได้มีการผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยในสูตรที่ 1

ตารางที่ 5.1 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย

ตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด	ค่ามอดูลัส (MPa)
LDPE	11.473±0.131	433.490±10.384	88.830±0.431
LDPE:CS	13.640±0.302	349.332±17.150	133.561±0.387
LDPE:GS	13.783±0.568	354.566±15.704	131.543±0.568
LDPE:ES	14.360±0.227	367.300±8.809	136.076±0.217

3. จากผล TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย พบว่าจะมีช่วงการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงแรกคือช่วงการสลายตัวของ LDPE และช่วงที่ 2 คือช่วงการสลายตัวของ CaCO_3 จากเปลือกหอย

4. จากผล DSC แสดงให้เห็นว่าการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมที่ 10 %wt จะช่วยให้ความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ LDPE ที่ไม่ได้มีการผสม CaCO_3 จากเปลือกหอย โดยพบว่า LDPE:CS10% ให้ความเป็นผลึก 34.10% LDPE:GS10% ให้ความเป็นผลึก 37.38% และ LDPE:ES10% ให้ความเป็นผลึก 34.74% โดยที่ LDPE ให้ความเป็นผลึก 30.46%

5. จากผล XRD แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตจะพบพีคเอกลักษณ์ของ LDPE และ CaCO_3 จากเปลือกหอยรวมอยู่ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการผสมที่ีระหว่าง LDPE และ CaCO_3

6. จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของการใช้ CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติมและการใช้ nano- CaCO_3 (Nano) และ CaCO_3 (CA) ขนาด 2-3 ไมครอนจากทางการค้าเป็นสารตัวเติมที่ 10 %wt พบว่า CaCO_3 จากเปลือกหอยและ nano- CaCO_3 จากทางการค้าจะให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ในแนว MD สูงกว่าการใช้ CaCO_3 ขนาด 2-3 ไมครอน จากทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตผสม CaCO_3 จากเปลือกหอยเปรียบเทียบกับการใช้ CaCO_3 จากทางการค้า

ตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด	ค่ามอดูลัส (MPa)
LDPE:CS	13.640±0.302	349.332±17.150	133.561±0.387
LDPE:GS	13.783±0.568	354.566±15.704	131.543±0.568
LDPE:ES	14.360±0.227	367.300±8.809	136.076±0.217
LDPE:Nano	14.741±0.283	377.672±12.431	137.617±0.421
LDPE:CA	10.060±0.431	275.152±14.282	79.960±0.432

จากผลการทดลองพบว่า CaCO_3 จากเปลือกหอยดัดแปลงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานมากที่สุด เนื่องจากให้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดในเปลือกหอยทั้งหมดที่นำมาสังเคราะห์ที่สภาวะเดียวกัน โดยพบว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสแตียริกแล้วนำมาผสมกับ LDPE เมื่อทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์มจะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ CaCO_3 จากเปลือกหอยชนิดอื่นที่ 10 %wt ของการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม

5.1.3 การคำนวณต้นทุนในการเตรียม nano- CaCO_3 จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติม ปริมาณ 1 กิโลกรัม

ค่าเปลือกหอย

- ค่าขนส่ง (ค่าน้ำมันรถยนต์) 500 บาท
- ปริมาณเปลือกหอย 100 กิโลกรัม

การคำนวณต้นทุนเปลือกหอย

$$\frac{100 \text{ กิโลกรัม}}{500 \text{ บาท}} = 0.2 \text{ กิโลกรัม/บาท}$$

ค่าสารเคมี

- น้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร 10 บาท
- เอทานอล 1 ลิตร 16 บาท
- สแตียริกแอซิด 20 กรัม 7 บาท

ค่าสาธารณูปโภค (ค่าไฟ)

การคำนวณค่าไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้า (วัตต์) \times จำนวนชั่วโมงที่ใช้

$$1000$$

ค่าไฟฟ้าในกระบวนการแคลไซน์

$$\frac{1500 \times 2}{1000} = 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$3 \times 1.1516 = 3.4548 \text{ บาท}$$

ค่าไฟฟ้าในกระบวนการโซโวเทอร์มอล

$$\frac{300 \times 3}{1000} = 0.9$$

ราคาต่อหน่วย 1.1516 บาท

$$0.9 \times 1.1516 = 1.03644$$

รวมเป็นเงินในการเตรียมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอย 37.69 บาท ต่อ กิโลกรัม ซึ่งเป็นต้นทุนในการเตรียม nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น ยังไม่ได้คิดต้นทุนผลผลิตสินค้าหรือองค์ประกอบอื่นๆของราคา เช่น ค่าแรง ผลกำไร ปริมาณการผลิต และค่าเสื่อมของเครื่องจักร

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิว การกระจายตัว เมื่อใช้สารช่วยในการกระจายตัวชนิดอื่นเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรดสเตียริก

5.2.2 ทำการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกหอย เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำมัน และเป็นการลดการนำเข้าสู่สารเคมีในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สอนอง เอกสิทธิ์. 2556. เทคโนโลยีการแปรรูปเปลือกหอยเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม. [Online]. Available : <http://www.research.chula.ac.th/web/congratulation/file/55P22.pdf>.
- [2] Thaipublica. 2556. สถานการณ์ขยะพลาสติกของไทย. [Online]. Available : <http://thaipublica.org/2013/05/weast-1>.
- [3] A. Hassan, K. Rangari, K. Rana, and Jeelani. 2013. "Sonochemical effect on size reduction of CaCO₃ nanoparticles derived from waste eggshells". *Journal of Ultrasonics Sonochemistry*. 20(1) 1308–1315.
- [4] Bin Wang, Qi Wang, and Li Li. 2013 "Morphology and Properties of Highly Talc and CaCO₃-Filled Poly(vinyl alcohol) Composites Prepared by Melt Processing" *Journal of Applied Polymer Science*. 130(1) 3050–3057.
- [5] Bao-Chang Sun Xue-Mei Wang, Jian-Ming Chen, Guang-Wen Chu, Jian-Feng Chen, and Lei Shao. 2011. "Synthesis of nano-CaCO₃ by simultaneous absorption of CO₂ and NH₃ into CaCl₂ solution in a rotating packed bed". *Chemical Engineering Journal*. 168(1) 731–736.
- [6] Norio Wada, Naohiro Horiuchi, Miho Nakamura, Kosuke Nozaki, Tetsuo Hiyama, Akiko Nagai, and Kimihiro Yamashita. 2015. "Controlled calcite nucleation on polarized calcite single crystal substrates in the presence of polyacrylic acid". *Journal of Crystal Growth*. 415(1) 7–14.
- [7] Guo Hongxia, Qin Zhenping, Qian Peng, Yu Peng, Cui Suping, and Wang Wei. 2011. "Crystallization of aragonite CaCO₃ with complex structures". *Journal of Advanced Powder Technology* 22(1) 777–783.
- [8] M.N. Burgess and L. Bryce. 2015. "On the crystal structure of the vaterite polymorph of CaCO₃: A calcium-43 solid-state NMR and computational assessment". *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*. 65(1) 75–83.
- [9] คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2557. ขยะจากเปลือกหอยแครง. [Online]. Available : <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=34&chap=5&page=t34-5-infodetail05.html>.
- [10] โสมฉาย บุญญานันต์. 2557. เปลือกหอยแมลงภู่นำรู้. [Online]. Available : http://www.oocities.org/sumpan2000_th/unit_3/sa_1/sara_14.html ; 10 ตุลาคม 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [11] อเนก สาระอินทร์. 2557. การผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยตลับ. [Online]. Available : <http://www.aquatoyou.com/index.php/2013-02-21-02-30-41/2013-05-11-06-31-54/690-meritrix-meritrix>.
- [12] กองควบคุมวัตถุเสพติด สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาโซเดียม. 2556. การใช้งานไฮโปคโลไรท์. [Online]. Available : <http://narcotic.fda.moph.go.th/welcome>.
- [13] V. Nikulshina, C. Gebald, and A. Steinfeld. 2009. "CO₂ capture from atmospheric air via consecutive CaO-carbonation and CaCO₃-calcination cycles in a fluidized-bed solar reactor" *Chemical Engineering Journal*. 146(1) 244–248.
- [14] ชัยกานต์ เลี้ยวศิริณ. 2556. การผลิตวัสดุนาโน. [Online]. Available : <http://www2.science.cmu.ac.th/ga/ga2556/สมศ-7/หลักฐาน/SCE-7-1-13.pdf>.
- [15] Mingjun Pang, Guohui Long, Shang Jiang, Yuan Ji, Wei Han, Biao Wang, and Xilong Liu, Yunlong Xi, Dongxue Wang, and Fuzhan Xu. 2015. "Ethanol-assisted solvothermal synthesis of porous nanostructured cobalt oxides (CoO/Co₃O₄) for high-performance supercapacitors". *Chemical Engineering Journal*. 280(1) 377–384.
- [16] United Plastic Component. 2558. LDPE (Low Density polyethylene) Properties. [Online]. Available : http://www.blueridgefilms.com/ldpe_physical.html.
- [17] Ming Wang, ZhiWang, NanLi, JiayouLiao, SongZhao, JixiaoWang, and Shichang Wang. 2015. "Relationship between polymer–filler interfaces in separation layers and gas transport properties of mixed matrix composite membranes" *Journal of Membrane Science*. 495(1) 252–268.
- [18] Zhongfeng Tang, Guojun Cheng, Youshuang Chen, Xiuhua Yu, and Honglong Wang. 2014. "Characteristics evaluation of calcium carbonate particles modified by surface functionalization". *Advanced Powder Technology*. 25(1) 1618– 1623.
- [19] Avraham Bar-Hen, Coline Bounioux, Rachel Yerushalmi-Rozen, Estefania Gonzalez Solveyra, and Igal Szleifer. 2015. "The role of steric interactions in dispersion of carbon nanotubes by poly(3-alkyl thiophenes) in organic solvents". *Journal of Colloid and Interface Science*. 452(1) 62–68.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [20] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์พิมพ์ลักษณ์.
- [21] Julien Plattier, Lazhar Benyahia, Michel Dorget, Fred erick Niepceron, Jean-Francois Tassin. 2015. "Viscosity-induced filler localisation in immiscible polymer blends". *Journal of Polymer*. 59(1) 260-269.
- [22] Chareon TUT CO., LTD. 2557. Internal Mixer. [Online]. Available : <http://dict.longdo.com/search/Internal%20mixer>.
- [23] Micro Brick Company. 2558. เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่. [Online]. Available : <http://www.chareontut.com/Default.aspx?lang=th&pageid=8>.
- [24] Bosco Engineering LTD. 2557. เครื่องบดย่อยพลาสติก. [Online]. Available : <http://www.kwengine.com/index.php/product/82-cmac/90-mpastic>.
- [25] ฐานข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์. 2558. เทคโนโลยีการผลิตและการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับกระบวนการเป่าฟิล์ม. [Online]. Available : <http://www.pafa.org.uk/processes-26/blown-film>.
- [26] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2557. การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์. [Online]. Available : http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_3.html.
- [27] ASTM D1238. "Standard Test Method for Melt flow index.", Philadelphia : American Society for Testing and Material (1996).
- [28] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2557. เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/28-x-ray> 11.
- [29] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2557. เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์. [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/bragg-law/bragg-law.htm>.
- [30] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2557. เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/38-thermal-analysis-th>.
- [31] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2557. การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนกับการเกิดผลึก. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/thermal-analysis-instrument-menu/item/112-differential-scanning-calorimeters-dsc.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [32] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2557. การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของสาร. [Online]. Available : http://www.sci.nu.ac.th/slc/tools.php?tool_ID=7 ; 11 พฤศจิกายน 2557.
- [33] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2557. การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>.
- [34] TERC Technique. 2015. Image J User guide IJ 1.46r. [Online]. Available : <http://www.https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>.
- [35] A. Devarajan, M. Abdul Khadar, and K. Chattopadhyay. 2007. “Effect of ball milling on chemically synthesized nanoparticles of CaCO_3 ”. *Materials Science and Engineering A*. 452(1) 395–400.
- [36] Bao-Chang Sun, Xue-Mei Wang, Jian-Ming Chen, Guang-Wen Chu, Jian-Feng Chen, and Lei Shao. 2011. “Synthesis of nano- CaCO_3 by simultaneous absorption of CO_2 and NH_3 into CaCl_2 solution in a rotating packed bed”. *Chemical Engineering Journal*. 168(1) 731–736
- [37] Abdullahi Shafiu Kamba, Maznah Ismail, Tengku Azmi Tengku Ibrahim, and Zuki Abu Bakar Zakaria. 2013. “Synthesis and Characterisation of Calcium Carbonate Aragonite Nanocrystals from Cockle Shell Powder (*Anadara granosa*) ”. *Journal of Nanomaterials*. 11(1) pp. 113-121.
- [38] Hai-Yan Li, Ye-Qiang Tan, Lu Zhang, Yun-Xiang Zhang, Yi-Hu Song, Ying Ye, and Mei-Sheng Xia. 2012. “Bio-filler from waste shellfish shell: Preparation, characterization, and its effect on the mechanical properties on polypropylene composites”. *Journal of Hazardous Materials*. 217– 218(1) 256– 262.
- [39] Yansheng Zheng, Yi He, Yongquan Qing, Chuanbo Hu, and Qian Mo. 2013. “Preparation of superhydrophobic coating using modified CaCO_3 ”. *Applied Surface Science*. 265(1) 532– 536.
- [40] กองควบคุมวัตถุเสพติด สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2556. น้ำยาซักผ้าขาว. [Online]. Available : <http://oldweb.pharm.su.ac.th/chemistry-in-life/d014.htm>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [41] Shanmukhaprasad Gopi, V.K. Subramanian, and K. Palanisamy. 2013. "Aragonite-calcite-vaterite: A temperature influenced sequential polymorphic transformation of CaCO_3 in the presence of DTPA". *Materials Research Bulletin*. 48 (1) 1906–1912.
- [42] K. Phemphet and P. Horanont. 1999. "Influence of Stearic Acid Treatment of Filler Particles on the Structure and Properties of Ternary-Phase Polypropylene Composites". *Journal of Applied Polymer Science*. 74(1) 3445-3454.
- [43] American Standard for testing and materials. 1998. "Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet." ASTM D882. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [44] Mustakimah Mohamed, Nor Adilla Rashidi, Suzana Yusup, Lee Keat Teong, Umer Rashid, and Razol Mahari Ali. 2012. "Effects of experimental variables on conversion of cockle shell to calcium oxide using thermal gravimetric analysis". *Journal of Cleaner Production*. 37(1) 394-397.
- [45] Dae Ju Hwang, Jae Yong Ryu, Young Hwan Yu, Kye Hong Cho, Ji Whan Ahn, Choon Han, and Jong Dae Lee. 2014. "Characteristics of precipitated calcium carbonate by hydrothermal and carbonation processes with mega-crystalline calcite using rotary microwave kiln". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20(1) 2727–2734.
- [46] C. Albano a, J. Gonz_alez, M. Ichazo, C. Rosales, C. Urbina de Navarro, and C. Parra. 2000. "Mechanical and morphological behavior of polyolefin blends in the of CaCO_3 ". *Composite Structures*. 48(1) 49-58.
- [47] PTT Global Chemical. 2557. **Low Density Polyethylene Trade name LD2426K**. [online]. Available :<http://plastics.ulprospector.com/datasheet/e149159/innoplus-ld2426k>.
- [48] Nonni Soraya Sambudi, Madhavi Sathyamurthy, Gyun Min Lee, and Seung Bin Park. 2015. "Electrospun chitosan/poly(vinyl alcohol) reinforced with CaCO_3 nanoparticles with enhanced mechanical properties and biocompatibility for cartilage tissue engineering". *Composites Science and Technology*. 106(1) 76–84.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [49] Fuyou Ke, Xingwen Jiang, Hongyao Xu , Jiliang Ji, and Yu Su. 2012. “Ternary nano-CaCO₃/poly(ethylene terephthalate) fiber/polypropylene composites: Increased impact strength and reinforcing mechanism”. *Composites Science and Technology*. 72(1) 574–579.
- [50] Samson Oluropo Adeosun, Mohammed Awwalu Usman, Wasiu Ajibola Ayoola, and Muyideen Adebayo Bodude. 2013. “Physico-Mechanical Responses of Polypropylene-CaCO₃ Composite”. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 1(1) 145-152.
- [51] Wen-Yi Wang, Xiao-Fei Zeng, Guo-Quan Wang, and Jian-Feng Chen. 2007. “Preparation and Characterization of Calcium Carbonate/ Low-Density-Polyethylene Nanocomposites ”. *Journal of Applied Polymer Science*. 106(1) 1932–1938.
- [52] Samson Oluropo Adeosun¹, Mohammed Awwalu Usman, Emmanuel Isaac Akpan, and Winifred Ifeoma Dibia. 2014. “Characterization of LDPE Reinforced with Calcium Carbonate-Fly Ash Hybrid Filler”. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2(1) 334-345.
- [53] Yanling Zhang, Zhuoqing An, Hao Bai, Qi Li, and Zhancheng Guo. 2015. “Characterization and measurement of apparent viscosity of solid particles in fixed beds under high temperature”. *Powder Technology*. 284(1) 279–288.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ก.1 วิธีการเตรียม STOCK SOLUTION NaOCl

โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium Hypochlorite ;NaOCl) โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งประกอบด้วย NaOCl ร้อยละ 28 ถึง 30 หรือประมาณ 280 ถึง 300 กรัมต่อกิโลกรัมของ Active Chlorine ความหนาแน่น 1000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เตรียมที่ความเข้มข้น 5 ถึง 10% (5 ถึง 10 กิโลกรัมต่อน้ำ 100 ลิตร)

โดยการเตรียมจาก NaOCl ชนิดเหลวมี NaOCl = 28% (Available Chlorine (Cl₂))

หมายถึง NaOCl 100 กรัม มี Cl₂ = 28 กรัม

(ในทางการค้าจะเป็น Cl₂ แต่ในปฏิกิริยา ไม่ใช่ ดังนั้นวิธีการเตรียมเราจะใช้การเตรียมแบบทางการค้า ดังนี้)

Solⁿ สารละลายคลอรีน NaOCl 28% หมายถึง
สารละลาย NaOCl 100 กรัม มีคลอรีน Cl₂ = 28 กรัม

เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการเตรียม Stock Solution คลอรีน Cl₂ 10% (หมายถึงมีคลอรีน Cl₂)

= 10 กิโลกรัม/น้ำ 100 ลิตร

= 100 กรัม/น้ำ 1 ลิตร

จะใช้สารละลายคลอรีนเท่ากับ

จาก คลอรีน (Cl₂) = 28 กรัม มาจากสารละลาย NaOCl = 100 กรัม

เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการคลอรีน (Cl₂) = 100 กรัม จะต้องใช้สารละลาย NaOCl = 357.14 กรัม

นั่นคือจะต้องใช้สารละลายคลอรีน NaOCl = 357.14 กรัม ละลายน้ำ 1 ลิตร

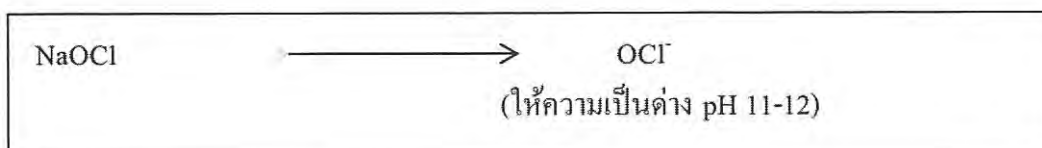
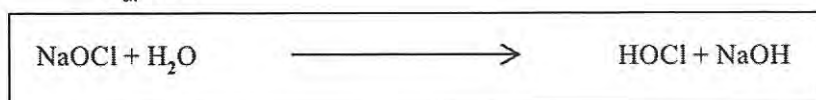
จะได้ความเข้มข้นของคลอรีน (Cl₂) = 10%

ถ้าต้องการเตรียม Stock Solution มีปริมาตร = 100 ลิตร เพราะฉะนั้นจะต้องใช้

สารละลายคลอรีน NaOCl = 35,714 กรัม

หรือ = 35.714 กิโลกรัม

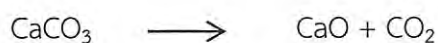
ปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การคำนวณปริมาณ CaCO_3 ในเปลือกหอยจากเทคนิค TGA

ปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 เป็นดังนี้



โดยที่ CaCO_3 จะเปลี่ยนเป็น CaO ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

การคำนวณหาปริมาณ CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง

น้ำหนักของเปลือกหอยแครงบดที่ใช้ 22.4462 mg

น้ำหนักที่หายไปในการทดสอบ 9.649 mg ที่อุณหภูมิ 688.5 องศาเซลเซียส

น้ำหนักที่เหลือ 12.7972 mg

เปรียบเทียบสัดส่วนโดยโมลของ CaO และ CO_2

$$\begin{aligned} \text{CaO} : \text{CO}_2 &= \frac{12.7972}{56} : \frac{9.649}{44} \\ &= 0.2285 : 0.2192 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น = 1 : 1

ดังนั้นการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 ในเปลือกหอยแครงจะได้ CaO และ CO_2 ซึ่งน้ำหนักที่หายไปจากการสลายตัวคือ CO_2

$$\begin{aligned} 9.649 \text{ mg CO}_2 &\times \frac{1 \text{ mmol CO}_2}{44 \text{ mg CO}_2} \times \frac{1 \text{ mmol CaCO}_3}{1 \text{ mmol CO}_2} \times \frac{100 \text{ mg CaCO}_3}{1 \text{ mmol CaCO}_3} \\ &= 21.929 \text{ mg CaCO}_3 \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณ CaCO_3 ในเปลือกหอยแครง

$$\frac{21.929 \text{ mg}}{22.4462 \text{ mg}} \times 100 = 97.69 \%$$

การคำนวณหาปริมาณ CaCO_3 จากเปลือกหอยแมลงภู

น้ำหนักของเปลือกหอยแมลงภูบดที่ใช้ 16.596 mg

น้ำหนักที่หายไปในการทดสอบ 6.7994 mg ที่อุณหภูมิ 673.2 องศาเซลเซียส

น้ำหนักที่เหลือ 9.7966 mg

เปรียบเทียบสัดส่วนโดยโมลของ CaO และ CO_2

$$\begin{aligned} \text{CaO} : \text{CO}_2 &= \frac{9.7966}{56} : \frac{6.7994}{44} \\ &= 0.1750 : 0.1545 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น = 1 : 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 ในเปลือกหอยแมลงภู่มิจะได้ CaO และ CO_2 ซึ่งน้ำหนักที่หายไปจากการสลายตัวคือ CO_2

$$6.7994 \text{ mg CO}_2 \times \frac{1 \text{ mmol CO}_2}{44 \text{ mg CO}_2} \times \frac{1 \text{ mmol CaCO}_3}{\text{mmol CO}_2} \times \frac{100 \text{ mg CaCO}_3}{\text{mmol CaCO}_3}$$

$$= 15.453 \text{ mg CaCO}_3$$

ดังนั้นปริมาณ CaCO_3 ในเปลือกหอยแมลงภู่มิ

$$\frac{15.453 \text{ mg}}{16.596 \text{ mg}} \times 100 = 93.11 \%$$

การคำนวณหาปริมาณ CaCO_3 จากเปลือกหอยตลับ

น้ำหนักของเปลือกหอยตลับบดที่ใช้ 22.4924 mg

น้ำหนักที่หายไปในการทดสอบ 9.5480 mg ที่อุณหภูมิ 686.4 องศาเซลเซียส

น้ำหนักที่เหลือ 12.9444 mg

เปรียบเทียบสัดส่วนโดยโมลของ CaO และ CO_2

$$\text{CaO} : \text{CO}_2 = \frac{12.9444}{56} : \frac{9.5480}{44}$$

$$= 0.2311 : 0.217$$

เพราะฉะนั้น = 1 : 1

ดังนั้นการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 ในเปลือกหอยตลับมิจะได้ CaO และ CO_2 ซึ่งน้ำหนักที่หายไปจากการสลายตัวคือ CO_2

$$9.5480 \text{ mg CO}_2 \times \frac{1 \text{ mmol CO}_2}{44 \text{ mg CO}_2} \times \frac{1 \text{ mmol CaCO}_3}{\text{mmol CO}_2} \times \frac{100 \text{ mg CaCO}_3}{\text{mmol CaCO}_3}$$

$$= 21.7 \text{ mg CaCO}_3$$

ดังนั้นปริมาณ CaCO_3 ในเปลือกหอยตลับ

$$\frac{21.7 \text{ mg}}{22.4924 \text{ mg}} \times 100 = 96.477 \%$$

ก.3 การคำนวณปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มจากเทคนิค DSC

$$\text{จาก Degree of Crystallinity (\%)} = \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0}$$

เมื่อ H_f^* = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึกต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (J/g)

H_f^0 = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก 100% สำหรับพอลิเมอร์

Sample	Melting point T_m ($^{\circ}\text{C}$)	Melting endotherm ΔH_f (J/g)	Onset Temperature	End Temperature	% Crystallinity χ
LDPE	112.3	89.26	100.5	116.8	30.46
LDPE/CS 10%	112.8	111	97.0	118.0	34.09
LDPE/GS 10%	112.5	121.7	98.1	116.7	37.38
LDPE/ES 10%	113.2	113.1	104.5	116.9	34.74

เมื่อค่า ΔH_f^0 (J/g) ของ LDPE มีค่าเท่ากับ 293 (J/g)

วิธีการหาค่า % Crystallinity (χ) ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต
สำหรับ LDPE

$$\begin{aligned} \text{Degree of Crystallinity (\%)} &= \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0} \\ &= \frac{89.26 \times 100}{293} \\ &= 30.46 \% \end{aligned}$$

สำหรับ LDPE:CS 10%

$$\begin{aligned} \text{Degree of Crystallinity (\%)} &= \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0} \\ &= \frac{111 \times 100}{293} \\ &= 37.88 \% \end{aligned}$$

และเนื่องจากมีอัตราส่วนของ LDPE 90% จะได้ความเป็นผลึกคือ

$$37.88 \times 90\% = 34.09 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ LDPE:GS 10%

$$\begin{aligned} \text{Degree of Crystallinity (\%)} &= \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0} \\ &= \frac{121.7 \times 100}{293} \\ &= 41.53 \% \end{aligned}$$

และเนื่องจากมีอัตราส่วนของ LDPE 90% จะได้ความเป็นผลึกคือ

$$41.53 \times 90\% = 37.38 \%$$

สำหรับ LDPE:ES 10%

$$\begin{aligned} \text{Degree of Crystallinity (\%)} &= \frac{H_f^* \times 100}{H_f^0} \\ &= \frac{113.1 \times 100}{293} \\ &= 38.60 \% \end{aligned}$$

และเนื่องจากมีอัตราส่วนของ LDPE 90% จะได้ความเป็นผลึกคือ

$$38.60 \times 90\% = 34.74 \%$$

ก.4 การคำนวณต้นทุนในการเตรียม nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยเป็นสารตัวเติม 1 กิโลกรัม

ค่าเปลือกหอย

- ค่าขนส่ง (ค่าน้ำมันรถยนต์)	500	บาท
- ปริมาณเปลือกหอย	100	กิโลกรัม

การคำนวณต้นทุนเปลือกหอย

$$\frac{100 \text{ กิโลกรัม}}{500 \text{ บาท}} = 0.2 \text{ กิโลกรัม/บาท}$$

ค่าสารเคมี

- น้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร	10	บาท
- เอทานอล 1 ลิตร	8	บาท
- สเตียริกแอซิด 20 กรัม	9	บาท

ค่าสาธารณูปโภค (ค่าไฟ)

การคำนวณค่าไฟฟ้า

$$\frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้}}{1000}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าไฟฟ้าในกระบวนการแคลไซน์

$$\frac{1500 \times 2}{1000} = 3$$

ราคาต่อหน่วย 1.1516 บาท

$$3 \times 1.1516 = 3.4548 \text{ บาท}$$

ค่าไฟฟ้าในกระบวนการโซโวเทอร์มอล

$$\frac{300 \times 3}{1000} = 0.9$$

ราคาต่อหน่วย 1.1516 บาท

$$0.9 \times 1.1516 = 1.03644$$

รวมเป็นเงิน 31.69 บาท ต่อกิโลกรัม

ซึ่ง nano-CaCO₃ จากทางการค้า ราคา 42.25 บาท ต่อกิโลกรัม และ CaCO₃ ขนาด 2-3 ไมครอน ราคา 11 บาท ต่อกิโลกรัม จะเห็นได้ว่า nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยที่เตรียมได้มีราคาถูกกว่า nano-CaCO₃ จากทางการค้า แต่ในราคาที่ยกมานั้นเป็นราคาที่เกิดจากการคำนวณในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น

ก.5 การคำนวณค่า MFI

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM โดยใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 kg อุณหภูมิ 190 °C ทำการตัดตัวอย่างทุก 1 นาที จากนั้นจะได้น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม) นำค่าดังกล่าวมาหาค่า MFI (หน่วย g/10 min) ตัวอย่างเช่น การหา MFI ของ LDPE เมื่อน้ำหนักเฉลี่ยของ LDPE = 0.388 กรัม

$$\begin{aligned} \text{MFI} &= \frac{0.388}{60 \text{ s}} \times \frac{600 \text{ s}}{10 \text{ min}} \\ &= 3.88 \text{ g/10min} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)					น้ำหนักรวม(g)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	MFI(g/10min)
ทดสอบสุตรละ 5 ครั้ง	1	2	3	4	5			
1. LDPE	0.41	0.39	0.38	0.39	0.37	1.94	0.388	3.88
2. LDPE	0.40	0.41	0.39	0.41	0.40	2.01	0.402	4.02
3. LDPE	0.42	0.40	0.37	0.37	0.42	1.98	0.396	3.96
4. LDPE	0.38	0.41	0.37	0.39	0.36	1.91	0.382	3.82
5. LDPE	0.38	0.37	0.36	0.40	0.39	1.90	0.380	3.80
								3.896±0.083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)					น้ำหนักรวม(g)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	MFI (g/10min)
ทดสอบสุทธาระยะ 5 ครั้ง	1	2	3	4	5			
1.LDPE/CS 10%	0.32	0.34	0.33	0.35	0.35	1.69	0.338	3.338
2.LDPE/CS 10%	0.33	0.31	0.31	0.32	0.34	1.61	0.322	3.22
3.LDPE/CS 10%	0.31	0.34	0.33	0.33	0.31	1.62	0.324	3.24
4.LDPE/CS 10%	0.34	0.31	0.31	0.34	0.33	1.63	0.326	3.26
5.LDPE/CS 10%	0.32	0.31	0.32	0.32	0.33	1.60	0.320	3.20
								3.251±0.047
1.LDPE/CS 20%	0.28	0.28	0.27	0.26	0.29	1.38	0.276	2.76
2.LDPE/CS 20%	0.28	0.27	0.27	0.26	0.28	1.36	0.272	2.72
3.LDPE/CS 20%	0.27	0.25	0.28	0.29	0.26	1.35	0.270	2.70
4.LDPE/CS 20%	0.29	0.28	0.24	0.26	0.26	1.33	0.266	2.66
5.LDPE/CS 20%	0.26	0.27	0.23	0.29	0.25	1.30	0.260	2.60
								2.688±0.054
1.LDPE/CS 30%	0.20	0.21	0.20	0.19	0.20	1.00	0.200	2.00
2.LDPE/CS 30%	0.21	0.22	0.19	0.19	0.21	1.02	0.204	2.04
3.LDPE/CS 30%	0.19	0.19	0.19	0.21	0.20	0.98	0.196	1.96
4.LDPE/CS 30%	0.20	0.21	0.21	0.19	0.19	1.00	0.200	2.00
5.LDPE/CS 30%	0.22	0.21	0.21	0.18	0.19	1.01	0.202	2.02
								2.000±0.026
1.LDPE/CS 40%	0.15	0.14	0.11	0.13	0.13	0.66	0.132	1.32
2.LDPE/CS 40%	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.60	0.120	1.20
3.LDPE/CS 40%	0.14	0.14	0.13	0.15	0.12	0.68	0.136	1.36
4.LDPE/CS 40%	0.16	0.15	0.15	0.13	0.13	0.72	0.144	1.44
5.LDPE/CS 40%	0.15	0.11	0.12	0.13	0.12	0.63	0.126	1.26
								1.316±0.082
1.LDPE/CS 50%	0.08	0.07	0.06	0.09	0.07	0.37	0.074	0.74
2.LDPE/CS 50%	0.06	0.07	0.08	0.06	0.06	0.33	0.066	0.66
3.LDPE/CS 50%	0.05	0.09	0.08	0.07	0.06	0.35	0.070	0.70
4.LDPE/CS 50%	0.05	0.08	0.07	0.06	0.05	0.31	0.062	0.62
5.LDPE/CS 50%	0.06	0.08	0.08	0.07	0.09	0.38	0.076	0.76
								0.696±0.051
1.LDPE/CS 60%	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.08	0.016	0.16
2.LDPE/CS 60%	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.09	0.018	0.18
3.LDPE/CS 60%	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.11	0.022	0.22
4.LDPE/CS 60%	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.09	0.018	0.18
5.LDPE/CS 60%	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.12	0.024	0.24
								0.196±0.029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)					น้ำหนักรวม(g)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	MFI (g/10min)
ทดสอบสุทธละ 5 ครั้ง	1	2	3	4	5			
1.LDPE/GS 10%	0.31	0.34	0.32	0.35	0.35	1.67	0.334	3.34
2.LDPE/GS 10%	0.33	0.32	0.31	0.33	0.31	1.60	0.320	3.20
3.LDPE/GS 10%	0.32	0.34	0.34	0.33	0.30	1.63	0.326	3.26
4.LDPE/GS 10%	0.34	0.31	0.32	0.32	0.33	1.62	0.324	3.24
5.LDPE/GS 10%	0.33	0.31	0.31	0.32	0.32	1.59	0.318	3.18
								3.244±0.055
1.LDPE/GS 20%	0.27	0.27	0.27	0.28	0.29	1.38	0.276	2.76
2.LDPE/GS 20%	0.29	0.28	0.27	0.27	0.28	1.39	0.278	2.78
3.LDPE/GS 20%	0.27	0.26	0.28	0.28	0.25	1.34	0.268	2.68
4.LDPE/GS 20%	0.29	0.26	0.25	0.26	0.26	1.32	0.264	2.64
5.LDPE/GS 20%	0.25	0.27	0.25	0.28	0.25	1.30	0.260	2.60
								2.692±0.068
1.LDPE/GS 30%	0.21	0.22	0.20	0.19	0.21	1.03	0.206	2.06
2.LDPE/GS 30%	0.21	0.22	0.20	0.19	0.22	1.04	0.208	2.08
3.LDPE/GS 30%	0.20	0.21	0.19	0.21	0.20	1.01	0.202	2.02
4.LDPE/GS 30%	0.22	0.22	0.23	0.19	0.19	1.05	0.210	2.10
5.LDPE/GS 30%	0.23	0.23	0.21	0.22	0.19	1.08	0.216	2.16
								2.084±0.046
1.LDPE/GS 40%	0.16	0.15	0.11	0.13	0.13	0.68	0.136	1.36
2.LDPE/GS 40%	0.12	0.12	0.13	0.12	0.13	0.62	0.124	1.24
3.LDPE/GS 40%	0.14	0.15	0.12	0.15	0.12	0.68	0.136	1.36
4.LDPE/GS 40%	0.14	0.15	0.16	0.12	0.13	0.7	0.140	1.40
5.LDPE/GS 40%	0.15	0.12	0.12	0.11	0.11	0.61	0.122	0.122
								1.096±0.490
1.LDPE/GS 50%	0.07	0.07	0.08	0.09	0.08	0.39	0.078	0.78
2.LDPE/GS 50%	0.06	0.08	0.08	0.07	0.06	0.35	0.070	0.70
3.LDPE/GS 50%	0.05	0.09	0.07	0.06	0.06	0.33	0.066	0.66
4.LDPE/GS 50%	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.34	0.068	0.68
5.LDPE/GS 50%	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.37	0.074	0.74
								0.712±0.043
1.LDPE/GS 60%	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.07	0.014	0.14
2.LDPE/GS 60%	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.10	0.020	0.20
3.LDPE/GS 60%	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.11	0.022	0.22
4.LDPE/GS 60%	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.07	0.014	0.14
5.LDPE/GS 60%	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.13	0.026	0.26
								0.192±0.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)					น้ำหนักรวม(g)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	MFI(g/10min)
ทดสอบสุทธละ 5 ครั้ง	1	2	3	4	5			
1.LDPE/ES 10%	0.31	0.33	0.32	0.34	0.34	1.64	0.328	3.28
2.LDPE/ES 10%	0.33	0.32	0.34	0.34	0.32	1.65	0.330	3.30
3.LDPE/ES 10%	0.34	0.34	0.32	0.33	0.29	1.62	0.324	3.24
4.LDPE/ES 10%	0.33	0.31	0.34	0.32	0.34	1.64	0.328	3.28
5.LDPE/ES 10%	0.33	0.34	0.32	0.32	0.31	1.62	0.324	3.24
								3.268±0.024
1.LDPE/ES 20%	0.26	0.27	0.29	0.28	0.29	1.39	0.278	2.78
2.LDPE/ES 20%	0.26	0.29	0.28	0.27	0.28	1.38	0.276	2.76
3.LDPE/ES 20%	0.28	0.26	0.28	0.29	0.24	1.35	0.270	2.70
4.LDPE/ES 20%	0.29	0.27	0.27	0.27	0.24	1.34	0.268	2.68
5.LDPE/ES 20%	0.26	0.25	0.25	0.28	0.26	1.30	0.260	2.60
								2.704±0.063
1.LDPE/ES 30%	0.21	0.22	0.20	0.21	0.22	1.06	0.212	2.12
2.LDPE/ES 30%	0.22	0.22	0.22	0.20	0.22	1.08	0.216	2.16
3.LDPE/ES 30%	0.21	0.21	0.19	0.21	0.21	1.03	0.206	2.06
4.LDPE/ES 30%	0.22	0.22	0.23	0.18	0.22	1.07	0.214	2.14
5.LDPE/ES 30%	0.22	0.22	0.21	0.19	0.19	1.03	0.206	2.06
								2.108±0.041
1.LDPE/ES 40%	0.17	0.16	0.11	0.13	0.12	0.69	0.138	1.38
2.LDPE/ES 40%	0.13	0.11	0.14	0.12	0.12	0.62	0.124	1.24
3.LDPE/ES 40%	0.13	0.17	0.16	0.13	0.12	0.71	0.142	1.42
4.LDPE/ES 40%	0.13	0.15	0.16	0.13	0.13	0.7	0.140	1.40
5.LDPE/ES 40%	0.14	0.12	0.11	0.12	0.11	0.6	0.12	1.20
								1.328±0.089
1.LDPE/ES 50%	0.08	0.06	0.08	0.08	0.09	0.39	0.078	0.78
2.LDPE/ES 50%	0.07	0.09	0.06	0.08	0.06	0.36	0.072	0.72
3.LDPE/ES 50%	0.06	0.08	0.08	0.07	0.06	0.35	0.070	0.70
4.LDPE/ES 50%	0.08	0.08	0.06	0.05	0.05	0.32	0.064	0.64
5.LDPE/ES 50%	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.35	0.07	0.70
								0.708±0.044
1.LDPE/ES 60%	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.07	0.014	0.14
2.LDPE/ES 60%	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.10	0.020	0.20
3.LDPE/ES 60%	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.14	0.028	0.28
4.LDPE/ES 60%	0.01	0.02	0.04	0.03	0.02	0.12	0.024	0.24
5.LDPE/ES 60%	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.11	0.022	0.22
								0.216±0.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

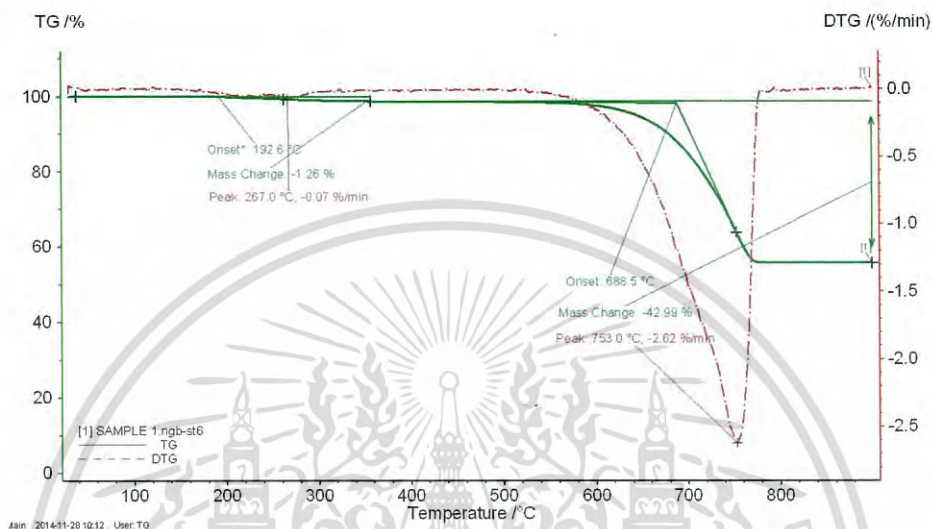
ก.6 ตารางแสดง ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และ ค่ามอดูลัส ของฟิล์ม พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม CaCO₃ จากเปลือกหอย และ CaCO₃ จากทางการค้า

ตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)		% การยืดตัว ณ จุดขาด		ค่ามอดูลัส (MPa)	
	MD	TD	MD	TD	MD	TD
LDPE	11.473±0.131	7.250±0.147	433.490±10.384	342.150±9.900	88.830±0.431	61.680±0.387
LDPE:CS10%	13.640±0.302	7.580±0.216	349.332±17.150	303.333±21.013	133.561±0.387	68.851±0.814
LDPE:CS20%	11.621±0.361	6.781±0.200	314.377±13.339	260.210±16.460	120.633±0.278	57.174±0.714
LDPE:CS30%	9.656±0.317	5.470±0.152	263.812±19.453	181.533±16.093	72.122±0.332	50.033±0.641
LDPE:CS40%	8.760±0.172	4.550±0.238	194.646±15.388	110.033±8.124	63.425±0.562	45.442±0.487
LDPE:CS50%	7.943±0.111	4.403±0.424	137.760±13.794	75.1460±10.824	57.885±0.265	40.680±0.198
LDPE:CS60%	5.610±0.199	4.143±0.180	109.500±12.005	40.736±11.053	49.434±0.143	38.225±0.212
LDPE:GS10%	13.783±0.568	7.240±0.102	354.566±15.704	290.120±18.272	131.543±0.568	66.214±0.672
LDPE:GS20%	12.656±0.471	7.066±0.543	306.933±14.178	253.600±12.695	124.541±0.656	59.113±0.852
LDPE:GS30%	10.253±0.140	6.506±0.322	211.066±16.462	160.233±8.167	79.745±0.892	57.880±0.767
LDPE:GS40%	9.546±0.320	5.250±0.233	208.266±5.776	121.766±8.989	72.186±0.372	48.812±0.562
LDPE:GS50%	7.623±0.306	4.900±0.217	142.066±8.617	90.146±5.737	52.228±0.231	42.144±0.543
LDPE:GS60%	4.896±0.534	4.140±0.123	86.200±5.354	50.733±7.801	41.595±0.767	40.765±0.742
LDPE:ES10%	14.360±0.227	7.193±0.563	367.300±8.809	282.733±11.541	136.076±0.217	70.590±0.878
LDPE:ES20%	12.580±0.139	7.193±0.563	344.746±11.558	241.733±16.968	122.334±0.432	60.021±0.564
LDPE:ES30%	10.270±0.529	6.170±0.498	228.433±10.084	150.253±14.184	81.664±0.985	52.183±0.432
LDPE:ES40%	9.773±0.358	5.440±0.237	204.066±9.525	112.133±6.271	75.869±0.769	50.022±0.423
LDPE:ES50%	8.123±0.359	4.270±0.318	120.033±8.299	71.560±6.639	59.114±0.762	38.454±0.529
LDPE:ES60%	6.590±0.298	4.180±0.355	98.233±9.779	50.566±8.410	52.172±0.284	40.225±0.128
LDPE:nano-CaCO ₃ 10% จากทางการค้า ขนาด 35-40 นาโนเมตร	14.741±0.283	7.770±0.422	377.672±12.431	294.673±14.291	137.617±0.421	76.593±0.767
LDPE:CaCO ₃ 10% จากทางการค้า ขนาด 2-3 ไมครอน	10.060±0.431	3.930±0.768	275.152±14.282	245.224±13.134	79.960±0.432	56.246±0.543

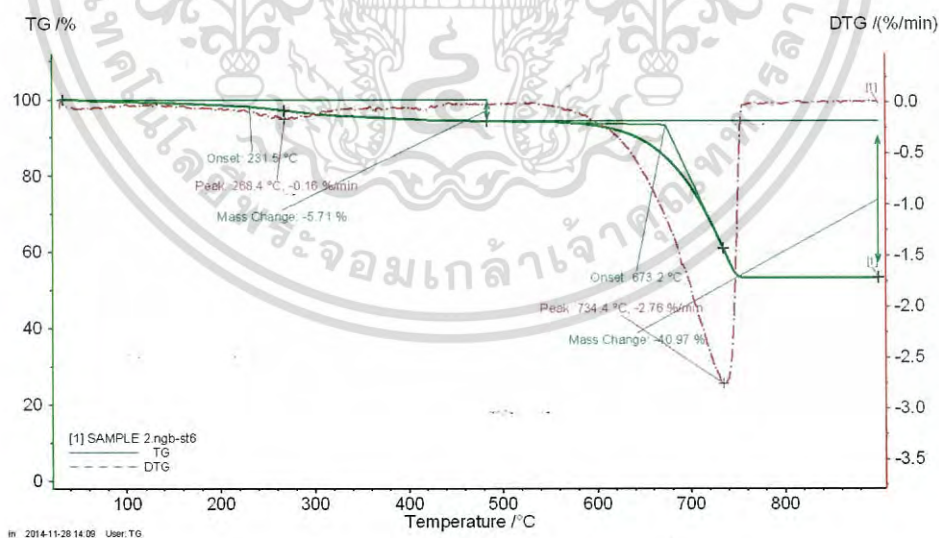
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

กระบวนการสังเคราะห์นาโนเคลือบคาร์บอนจากเปลือกหอย

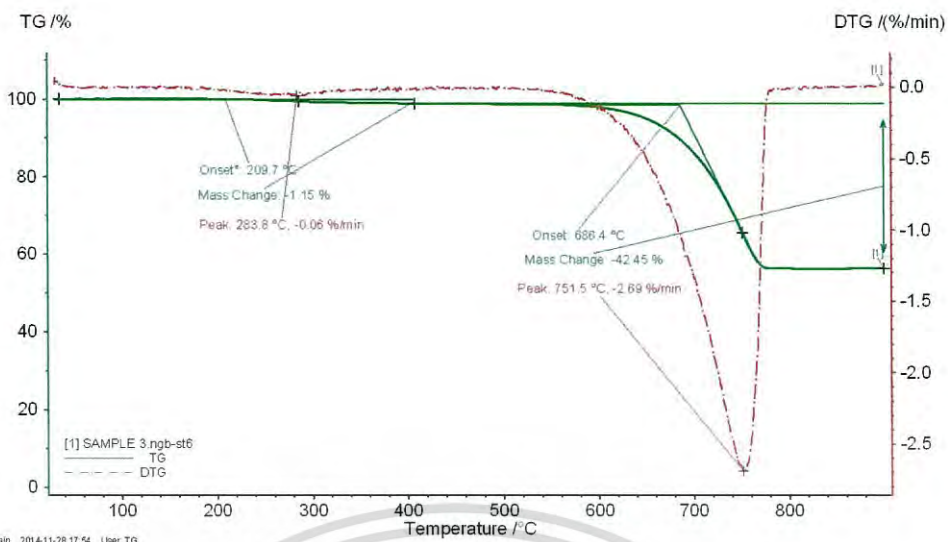


ข.1 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแครง

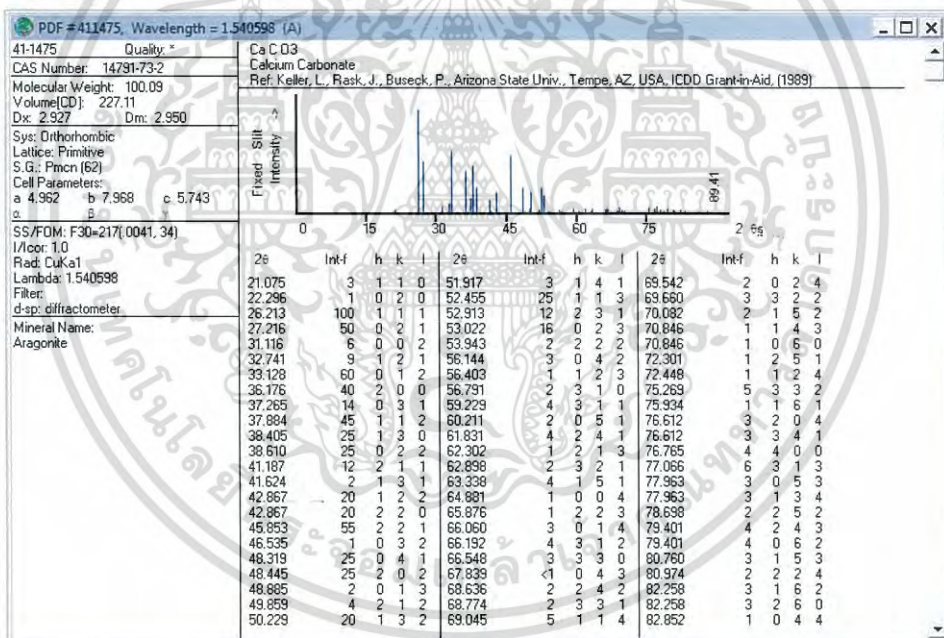


ข.2 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยแมลงภู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

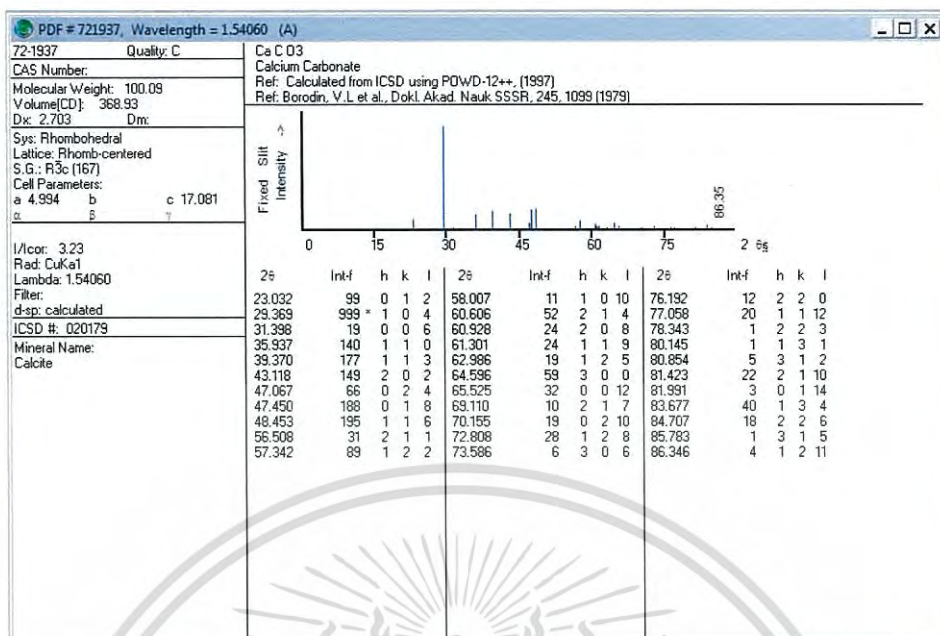


ข.3 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกหอยดัลับ

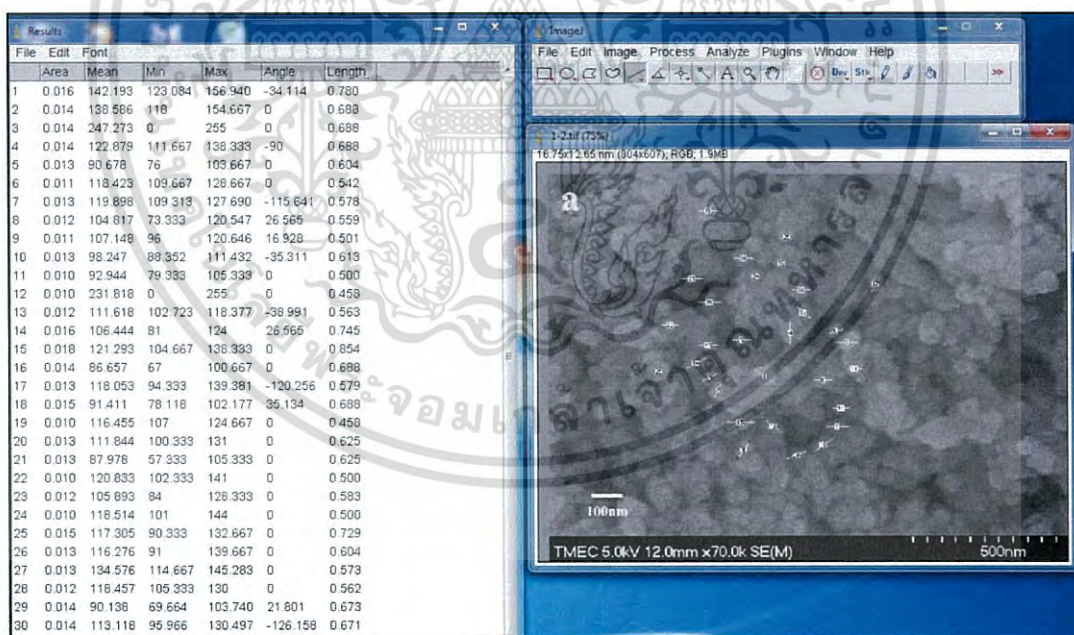


ข.4 ไฟล์ JCPD 41-1475 ของ CaCO₃ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะราโกไนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

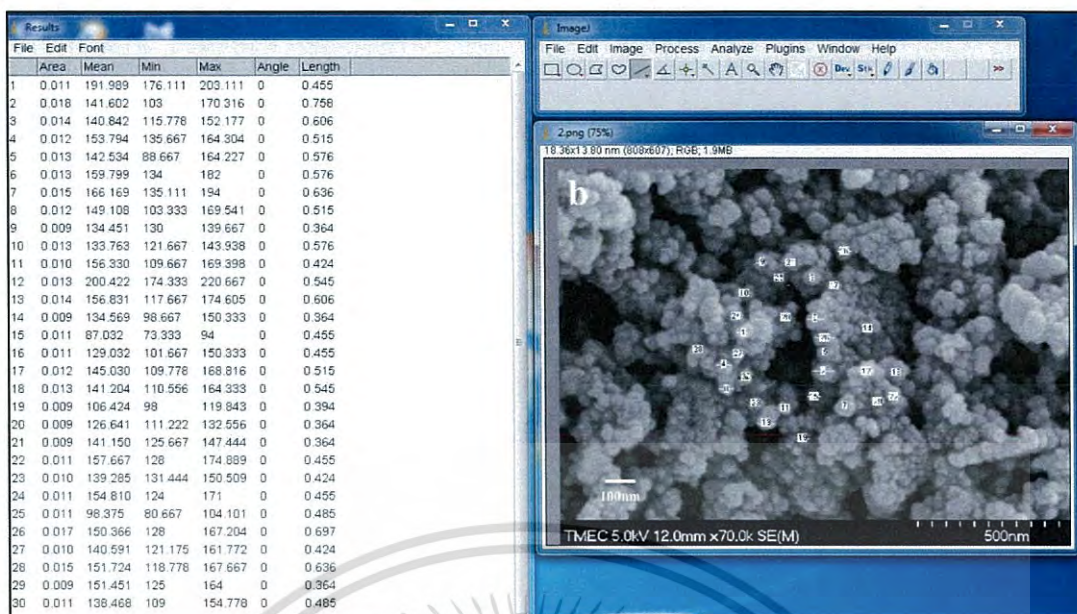


ข.5 ไฟล์ JCPD 72-1937 ของ CaCO_3 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์

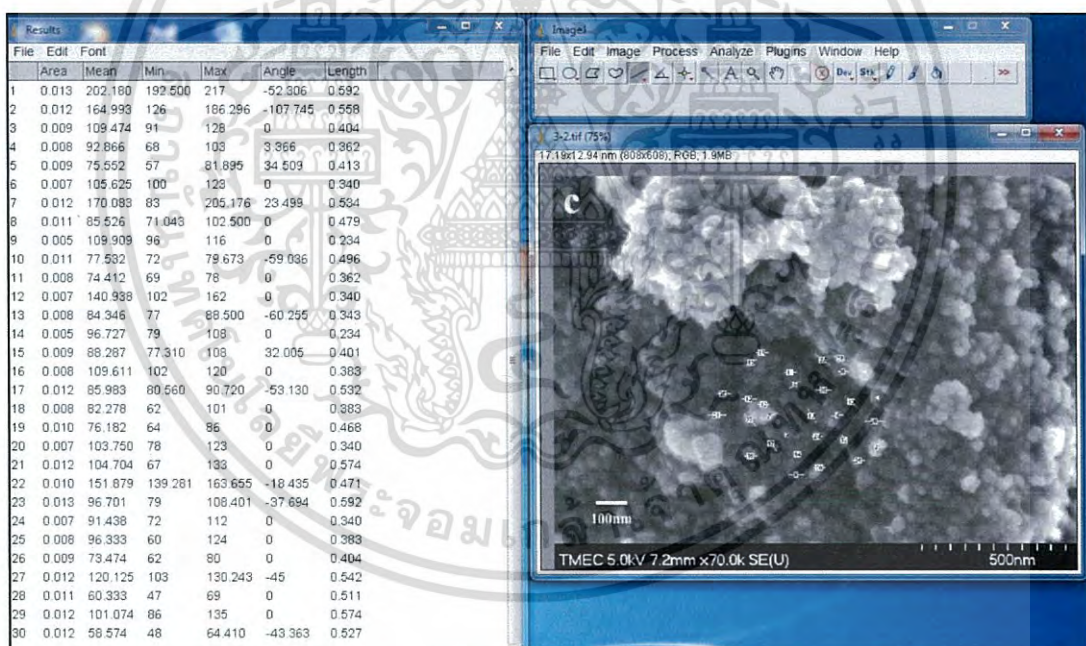


ข.6 วิธีการหาขนาดอนุภาค CaCO_3 จากเปลือกหอยแครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข.7 วิธีการหาขนาดอนุภาค CaCO₃ จากเปลือกหอยแมลงภู



ข.8 วิธีการหาขนาดอนุภาค CaCO₃ จากเปลือกหอยตลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

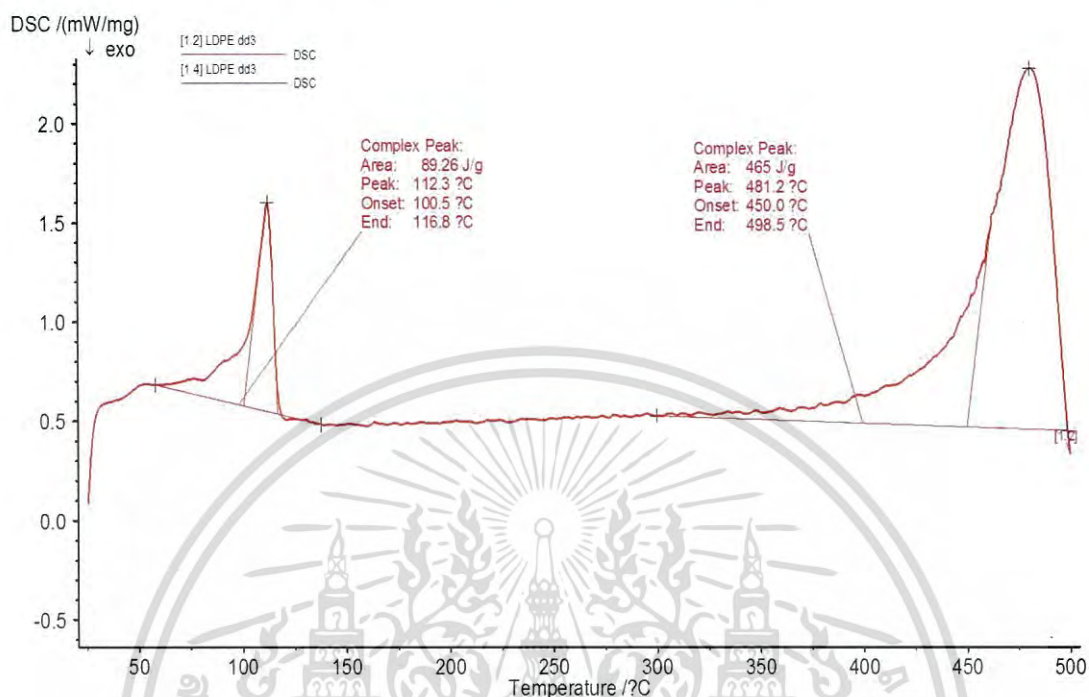


ข.9 ผง CaCO_3 จากเปลือกหอยที่ผ่านกระบวนการต่างๆ และผง CaCO_3 จากทางการค้า

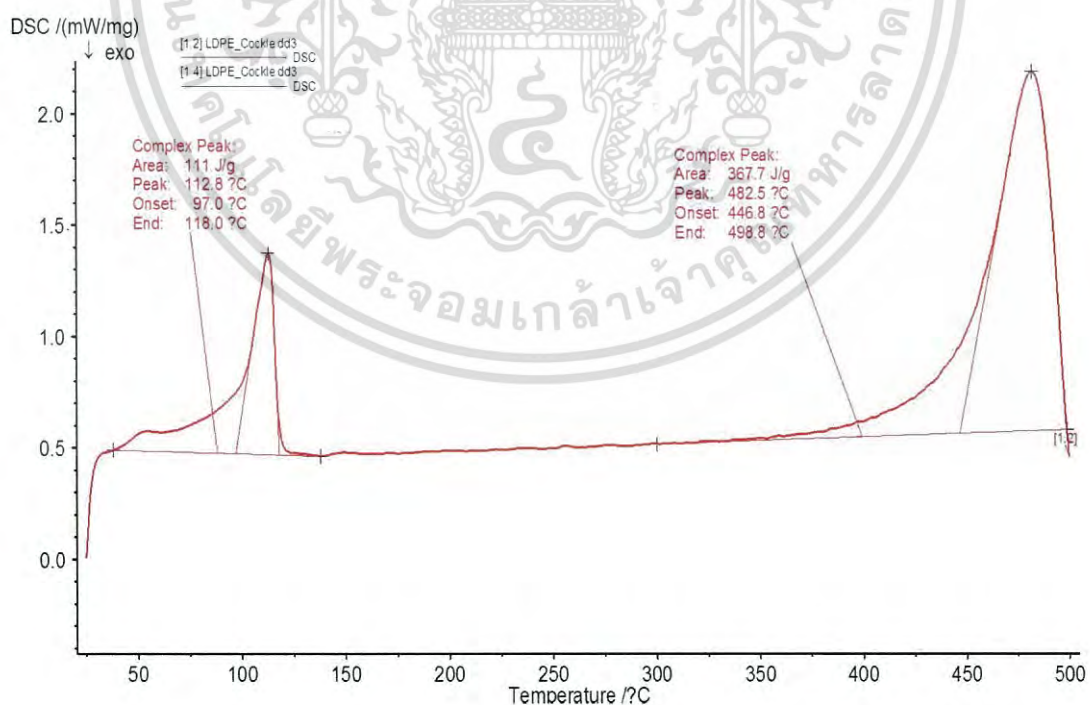
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตของ LDPE ผสม nano-CaCO₃ จากเปลือกหอย

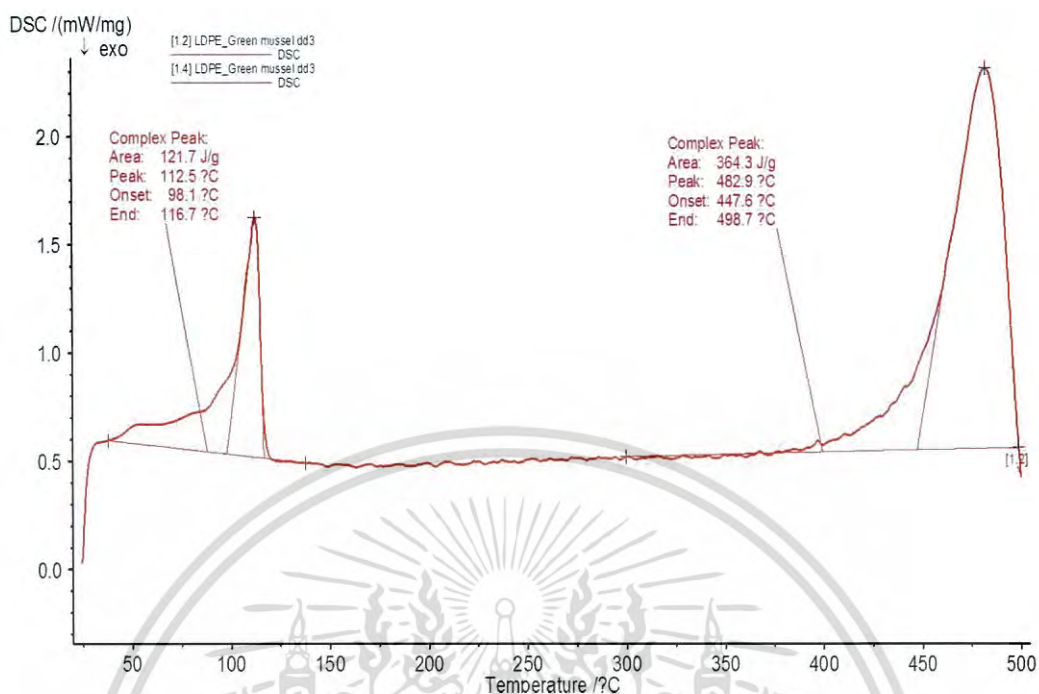


ค.1 การสลายตัวทางความร้อนกับการเกิดผลึกของ LDPE

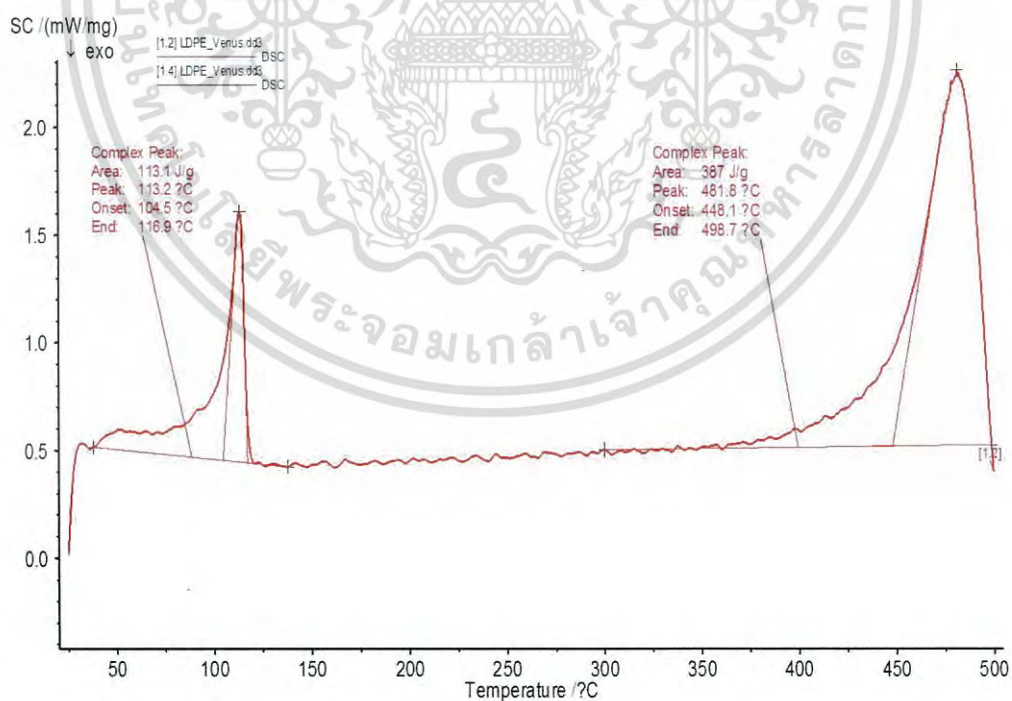


ค.2 การสลายตัวทางความร้อนกับการเกิดผลึกของ LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยแครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



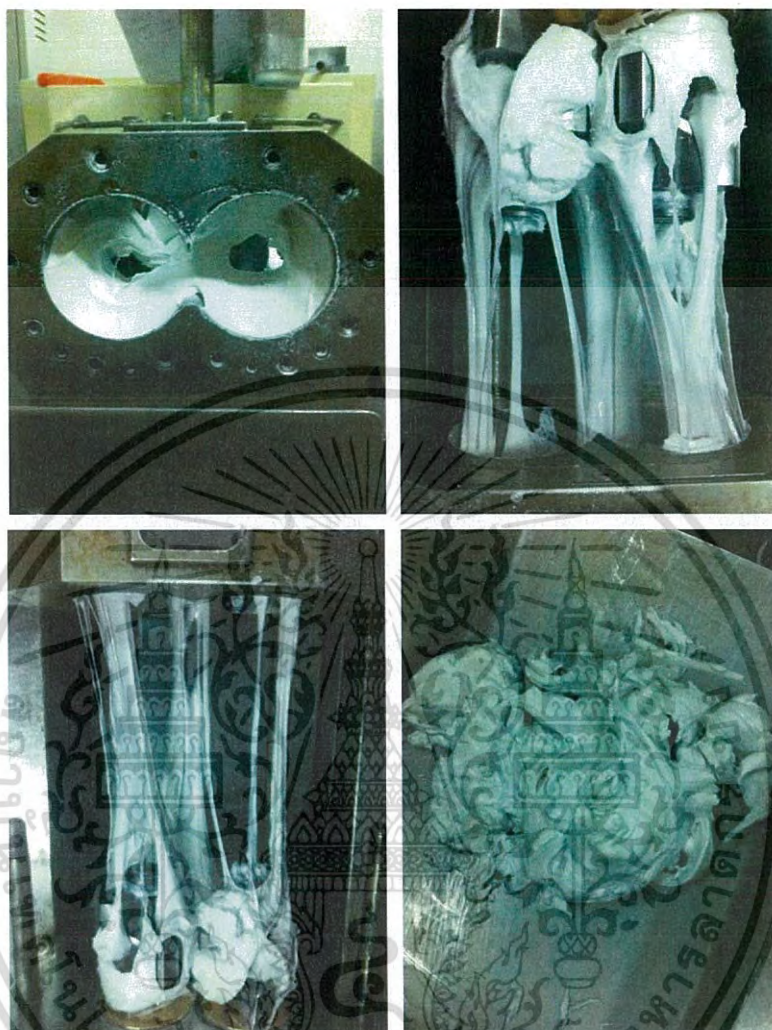
ค.3 การสลายตัวทางความร้อนกับการเกิดผลึกของ LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยแมลงภู



ค.4 การสลายตัวทางความร้อนกับการเกิดผลึกของ LDPE และฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง LDPE ผสม nano-CaCO₃ จากเปลือกหอยตลับ

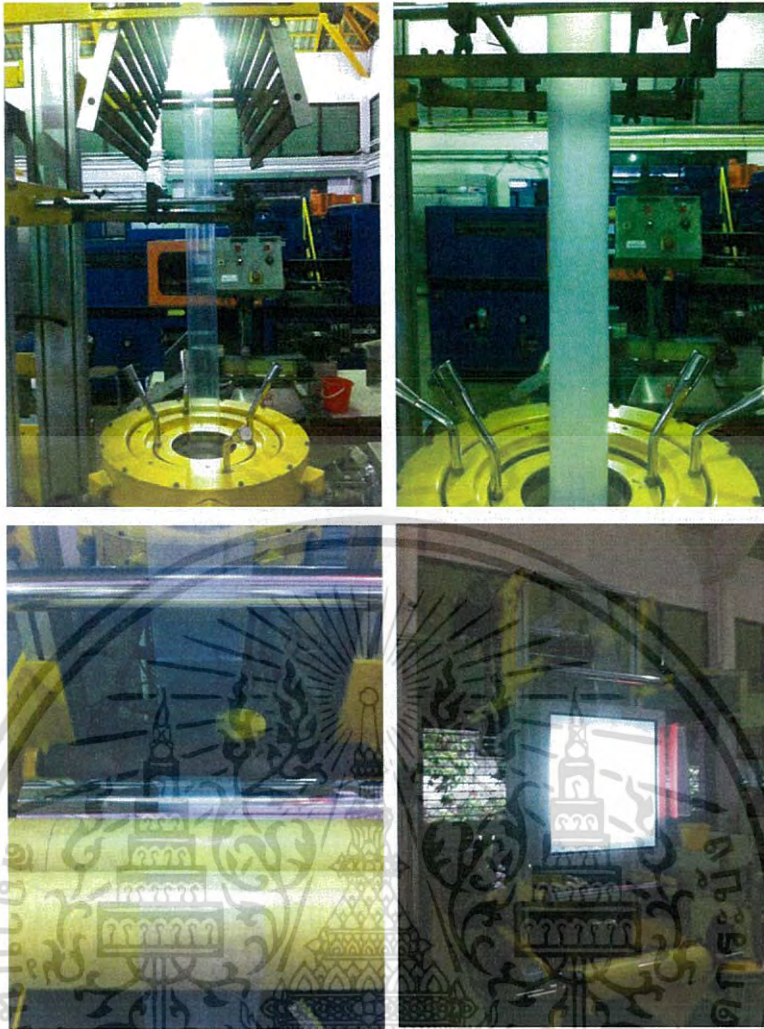
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.



ง.1 การผสม LDPE : nano-CaCO₃ จากเปลือกหอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง.2 การขึ้นรูปฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง.3 फिल्मที่ได้จากการขึ้นรูประหว่าง LDPE/CaCO₃ จากเปลือกหอย และ LDPE/CaCO₃ จากทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้