

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแคลเซียมซิติเกต



นางสาวเกตุดาว ชวลิตดำรง
นางสาวสาธิตภัค บัวเจริญ
นางสาวสิญญา เอ็มแหยม

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

62081

27 ก.ค. 2549



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of High density polyethylene/Calcium Silicate



**A Special Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science**

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแคลเซียมซัลไฟด์

นักศึกษา

นางสาวเกตุดาว ชวลิตคำรงค์
นางสาวสาวิภักดิ์ บัวเจริญ
นางสาวสิริญาภา เอ็มแหยม

ภาควิชา

เคมี

สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์ โนน

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ.ดร.ศุภารัตน์ รัชชสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ตะวัน กุญน้อย
กรรมการ	ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ
กรรมการ	ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์ โนน

(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแคลเซียมซิลิเกต		
นักศึกษา	นางสาวเกตุดาว ชวลิตดำรง	รหัสประจำตัวนักศึกษา	44050068
	นางสาวสาทิภัค บัวเจริญ	รหัสประจำตัวนักศึกษา	44050134
	นางสาวสิญาภา เอ็มแฮมม	รหัสประจำตัวนักศึกษา	44050135
คณะ	วิทยาศาสตร์		
ภาควิชา	เคมี		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2547		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน ผศ.ดร. สุภารัตน์ รัชชลธิ		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) โดยเตรียม CaSiO_3 จากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กับซิลิกา (SiO_2) ในอัตราส่วน 1:1 โดยโมล จากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง แล้วนำสารที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และ XRF ทำการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่ ใช้ CaSiO_3 ในช่วง 0 – 20 % โดยปริมาตร แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณของ CaSiO_3 เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่ามอดูลัสโค้งงอ มอดูลัสกดอัด และค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากสมบัติทางความร้อนพบว่า CaSiO_3 ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ HDPE มีค่าลดลง แต่ CaSiO_3 ไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก จากลักษณะวิทยาพบว่า เมื่อปริมาณ CaSiO_3 เพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของ CaSiO_3 ใน HDPE เป็นไปได้ยากขึ้น สุดท้ายเมื่อนำวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 ไปแช่ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายมนุษย์ (SBF) พบการก่อตัวของชั้นไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมคล้ายดอกกะหล่ำรวมตัวกันเป็นกลุ่มบนพื้นผิวของวัสดุประกอบ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า วัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 เป็นวัสดุที่มีสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Preparation of High density polyethylene/Calcium Silicate Composites

Name Miss Katedao Chawalitdamrong
Miss Salipak Buacharoen
Miss Siyapa Aemyam

Faculty Science

Department Chemistry

Program Industrial Chemistry

Academic Year 2004

Special Project Advisor Asst. Prof. Dr. Punnama Siriphannon
Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee

ABSTRACT

This project studied the preparation of high density polyethylene/calcium silicate composites (HDPE/CaSiO₃). CaSiO₃ powders were synthesized from calcium carbonate and silica with 1:1 molar ratio by solid-state reaction. The powders were then characterized by XRD and XRF techniques. HDPE were compounded with CaSiO₃ (0-20% by volume) by twin-screw extruder and shaped by compression molding machine. The mechanical properties of composites were determined, it was found that flexural modulus, compressive modulus and hardness of HDPE/CaSiO₃ composites increased while impact strength decreased and flexural strength was not significantly affected when CaSiO₃ increased. The results from thermal testing showed that the crystalline melting temperature (T_m) of HDPE was declined with an addition of CaSiO₃ but the recrystallisation temperature (T_c) and % crystallinity were hardly changed. Morphology study revealed that the difficulty of CaSiO₃ dispersion in the compounds increases with increasing of CaSiO₃ content. Finally, the bioactivity of HDPE/CaSiO₃ composites was examined by soaking in simulated body fluid (SBF). It was observed that hydroxyapatite (HAp) layer composed of the clusters of cauliflower-liked grains formed on the surfaces of the composites, indicating the bioactivity of the HDPE/CaSiO₃ composites.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ผศ. ดร. สุภรัตน์ รัชลธิ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ตะวัน สุขน้อย และ ผศ. ดร. ภัทรารุช มนต์วิเศษ อาจารย์คณะกรรมาการ ตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบังที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกๆ ฝ่าย ที่เอื้อเพื่อความสะดวกในเรื่อง อุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ซึ่งไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เกตุดาว ชวลิตดำรง
สาทิภัค บัวเจริญ
สิญาภา เอมแฮม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 วัสดุชีวภาพ.....	3
2.1.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามประเภทของวัสดุที่ใช้ในการผลิต.....	3
2.1.2 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามกลไกการยึดติดระหว่างวัสดุชีวภาพและเนื้อเยื่อข้างเคียงที่อยู่ล้อมรอบ.....	4
2.2 วัสดุประกอบ.....	8
2.3 แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	8
2.3.1 โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกต.....	9
2.3.2 สมบัติของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	10
2.3.2.1 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	10
2.3.2.2 สมบัติทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	11
2.3.3 การประยุกต์ใช้งานของแคลเซียมซิลิเกต.....	13
2.3.4 การเตรียมแคลเซียมซิลิเกต.....	13
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	14
2.4.1 สมบัติทั่วไป.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16
2.4.3 กระบวนการ และการประยุกต์การใช้งาน.....	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 การทดลอง.....	22
3.1 สารเคมี.....	22
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	23
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	24
3.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	24
3.3.2 การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO ₃) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE).....	27
3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	27
3.3.4 การหาปริมาณของแคลเซียมซิลิเกต ในวัสดุประกอบที่เตรียมได้.....	27
3.3.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO ₃	28
3.3.5.1 สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัส โค้งงอ.....	28
3.3.5.2 สมบัติความแข็งแรงกระแทก.....	29
3.3.5.3 สมบัติมอดุลัสกดอัด.....	30
3.3.5.4 สมบัติความแข็งกด.....	31
3.3.6 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบระหว่าง แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	31
3.3.7 ศึกษาพื้นฐานวิทยาของวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมซิลิเกต กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.8 ทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบHDPE/CaSiO ₃ ที่สังเคราะห์ได้ในระบบจำลองร่างกาย.....	32
3.3.8.1 การเตรียมสารละลายที่มีองค์ประกอบ ความเข้มข้นของอนินทรีย์ไอออน และค่าความเป็นกรด-เบส ใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์ (Simulated Body Fluid, SBF).....	32
3.3.8.2 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในระบบสภาวะคงที่ (Static system).....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่เตรียมได้.....	35
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของสารที่เตรียมได้และวัฏภาคที่เป็นผลึกของสารที่เตรียมได้.....	35
4.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณที่แน่นอนของ CaSiO ₃ ในวัสดุประกอบ.....	36
4.2 สมบัติเชิงกล.....	36
4.2.1 สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ และ มอดุลัสโค้งงอ.....	36
4.2.2 สมบัติความแข็งแรงกระแทก.....	38
4.2.3 สมบัติมอดุลัสกดอัด.....	38
4.2.4 สมบัติความแข็งกด.....	39
4.3 สมบัติทางความร้อน.....	40
4.4 สัณฐานวิทยา.....	41
4.5 ความว่องไวทางชีวภาพ.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก ก.....	52
1. อัตราส่วน โมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของสารที่เตรียมได้.....	52
2. การคำนวณอัตราส่วน โมลของแคลเซียมต่อซิลิกอน.....	52
3. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมซิลิเกตจากฐานข้อมูล JCPDS.....	53
ภาคผนวก ข	
การคำนวณความเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE.....	54
ภาคผนวก ค	
โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบหลังการแช่ในสารละลาย SBF ที่มี CaSiO_3 ในปริมาณต่างๆ กัน.....	55
ภาคผนวก ง	
รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 ภายหลังการแช่ สารละลาย SBF.....	61
ภาคผนวก จ	
การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลาย SBF หลังการแช่วัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3	63

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต.....	3
ตารางที่ 2.2 ประเภทของวัสดุค่อนข้างเนื้อ.....	5
ตารางที่ 2.3 ชนิดของวัสดุตามกลไกการยึดติดและตัวอย่างของวัสดุแต่ละประเภท.....	7
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	11
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE	23
ตารางที่ 3.2 สูตรผสมของ CaSiO ₃ และ HDPE.....	27
ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SBF.....	32
ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของอินทรีย์ไอออนในสารละลาย SBF และ Blood plasma.....	33
ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ CaSiO ₃ ในวัสดุประกอบ.....	36
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T _m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T _c) เอนทัลปี และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO ₃	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความว่องไวทางชีวภาพของเซรามิกส์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิด.....	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของผลึกแคลเซียมซิลิเกต.....	9
รูปที่ 2.3 ผลึกของ Wollastonite ที่พบได้ในธรรมชาติ.....	9
รูปที่ 2.4 รูปร่างของผลึกที่มีลักษณะเหมือนเข็ม.....	10
รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายโซ่ของ HDPE.....	14
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	26
รูปที่ 3.2 (a) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ	
(b) ระบบการทดสอบสมบัติความโค้งงอ โดยระบบการให้แรง 3 จุด.....	28
รูปที่ 3.3 (a) ตัวอย่างชิ้นงาน Izod ที่มีรอยบาก	
(b) การทดสอบแบบ Notch Izod Impact.....	29
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบมอดูลัสกดอัด.....	30
รูปที่ 3.5 แผนงานการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบที่	
สังเคราะห์ได้ในระบบสถานะคงที่ (Static system).....	34
รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CaSiO_3 ที่เตรียมได้จากการเผาที่	
อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	35
รูปที่ 4.2 สมบัติทางการโค้งงอของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3	
(a) ความแข็งแรงโค้งงอ (b) มอดูลัสโค้งงอ.....	37
รูปที่ 4.3 ความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3	38
รูปที่ 4.4 มอดูลัสกดอัดของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3	39
รูปที่ 4.5 ความแข็งกดของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3	40
รูปที่ 4.6 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3	
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	41
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 (20% โดยปริมาตร)	
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า.....	42
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุ HDPE ภายหลังจากแช่ในสารละลาย SBF	
เป็นเวลา 28 วัน ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบหลังการแช่ในสารละลาย SBF (a) CaSiO_3 10 % โดยปริมาตร, (b) CaSiO_3 15 % โดยปริมาตร และ (c) CaSiO_3 20 % โดยปริมาตร โดยใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	44
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF (a) CaSiO_3 10% โดยปริมาตร, (b) CaSiO_3 15% โดยปริมาตร และ (c) CaSiO_3 20% โดยปริมาตร โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันวัสดุสังเคราะห์ที่ผลิตจากโลหะ เซรามิกส์ พอลิเมอร์ และวัสดุประกอบถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในทางการแพทย์เป็นอย่างมาก จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์และอวัยวะเทียมหลายชนิด เพื่อใช้ในการรักษาซ่อมแซมหรือทดแทนเนื้อเยื่อในร่างกายที่บกพร่อง ซึ่งวัสดุสังเคราะห์เหล่านี้รวมเรียกว่า “วัสดุชีวภาพ” ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์แม้จะถูกฝังอยู่ในร่างกาย ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาผลิตวัสดุชีวภาพกันมากขึ้น พอลิเอทิลีน (PE) ก็เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ในวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์หลายชนิด PE ที่ใช้นี้จะมีความแข็งแรง มีความเหนียว และราคาถูก แต่มีข้อเสียคือไม่มีความว่องไวทางชีวภาพและมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเนื้อเยื่อบางส่วนในร่างกาย โดยเฉพาะกระดูก ซึ่งมีลักษณะแข็ง และมีความยืดหยุ่นต่ำ [1] ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงข้อด้อยของ PE โดยนำวัสดุที่มีสมบัติความว่องไวทางชีวภาพและมีความแข็งแรงมาทำเป็นวัสดุประกอบร่วมกับ PE หนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจจากกลุ่มวิจัยต่างๆ ได้แก่ ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) เพราะ HAp เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับองค์ประกอบหลักที่พบในกระดูกและฟันของมนุษย์ [2] มีความเข้ากันได้กับระบบชีวภาพของร่างกาย อีกทั้ง HAp ยังช่วยก่อให้เกิดการเชื่อมต่องระหว่างวัสดุชีวภาพกับเนื้อเยื่อของร่างกาย แต่จากหลายงานวิจัย เสนอว่า HAp ที่สังเคราะห์ได้โดยทั่วไปมีสมบัติความว่องไวทางชีวภาพไม่สูงมากนัก เป็นผลให้การเชื่อมต่องระหว่างวัสดุชีวภาพ และเนื้อเยื่อใช้เวลานาน ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกใช้ แคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ซึ่งเซรามิกส์ที่มีสมบัติความว่องไวทางชีวภาพสูงกว่า HAp [3] มาใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบร่วมกับ PE อีกทั้ง CaSiO_3 ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า [4] และกระบวนการสังเคราะห์ที่ง่ายกว่า HAp

โครงการพิเศษนี้จึงได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 โดยใช้ CaSiO_3 และ HDPE ที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งมีสมบัติเชิงกล และสมบัติความว่องไวทางชีวภาพที่สามารถนำไปใช้งานทางการแพทย์ โดยทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบในระบบจำลองของร่างกายที่ระยะเวลาต่างๆ ผลการทดสอบที่ได้จะเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 ไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ต่อไป

1.2 วัสดุประสงค์

เตรียมวัสดุประกอบระหว่าง HDPE/CaSiO₃ ที่อัตราส่วนต่างๆ และศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรง โค้งงอ การรับแรงกด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกดและความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบในระบบจำลองของร่างกาย

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เริ่มต้นจากการสังเคราะห์ CaSiO₃ ด้วยวิธีบดผสมทางเชิงกล แล้วนำ CaSiO₃ ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) จากนั้นเตรียมวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปร้อน โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของ CaSiO₃ ในช่วง 0 – 20 % โดยปริมาตรแล้วทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่เตรียมได้ในด้านความแข็งแรง โค้งงอ การรับแรงกด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด รวมทั้งศึกษาสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบที่เตรียมได้ในระบบจำลองของร่างกาย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงสมบัติการรับแรงเชิงกลและความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ ที่อัตราส่วนต่างๆ
2. สามารถทราบถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้มาใช้กับร่างกายมนุษย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วัสดุชีวภาพ [4, 5]

วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ติดล้าอวัยวะธรรมชาติ ที่เข้าไปมีส่วนเกี่ยวข้องกับเนื้อเยื่อ เลือดและของเหลวในร่างกายแล้วไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกาย ถูกกำหนดไว้ใช้งานทางศัลยกรรม การวินิจฉัยโรค และการเขี่ยวการรักษาโรค

วัสดุชีวภาพแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1. วัสดุธรรมชาติ (Biological materials) ได้แก่ เนื้อเยื่อและวัสดุธรรมชาติต่าง ๆ
2. วัสดุสำหรับการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ (Implants materials) ได้แก่ วัสดุสังเคราะห์ที่สามารถทำหน้าที่ทดแทนวัสดุและเนื้อเยื่อธรรมชาติได้

สมบัติเด่นของวัสดุชีวภาพ สำหรับการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะที่มีเหนือประเภทวัสดุธรรมชาติ คือ วัสดุชีวภาพมีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการนำไปใช้งาน (Availability) สามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้เรื่อยๆ (Reproductivity) และไม่มีปัญหาด้านคุณภาพของวัสดุ (Reliability)

2.1.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามประเภทของวัสดุที่ใช้ในการผลิต [5]

วัสดุชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามวัสดุที่ใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ เซรามิกส์ และวัสดุประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต [5]

วัสดุที่ใช้	ข้อดี	ข้อเสีย	ตัวอย่างการใช้งานทางการแพทย์
1. พอลิเมอร์ (Polymers) ได้แก่ ยาง ซิลิโคน เทฟลอน ไนลอน ฯลฯ	- มีความยืดหยุ่น - ความหนาแน่นต่ำ - สามารถผลิตได้ง่าย	- ไม่แข็งแรง - สามารถเกิดการเสียดสี สภาพได้เมื่อใช้เป็น ระยะเวลาาน	- การเย็บตดกแต่ง (Sutures) - เส้นเลือดเทียม (Arteries) - สะโพก (Hip) - หู (Ear) - จมูก (Nose) - เนื้อเยื่ออ่อนต่างๆ (Soft tissues)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต (ต่อ)

วัสดุที่ใช้	ข้อดี	ข้อเสีย	ตัวอย่างการใช้งานทางการแพทย์
2. โลหะ (Metals) ได้แก่ ไททาเนียม โลหะผสมสแตนเลส ทองคำ เงิน แพลทินัม ฯลฯ	-มีค่าความแข็งแรงดึงและความทนทานต่อแรงกระแทกสูง -เหนียว	-เกิดการสึกกร่อนและปล่อยสารที่เป็นพิษต่อร่างกายได้ -ยากต่อการขึ้นรูป -ความหนาแน่นสูง	-ข้อต่อ (Joint replacement) -รากฟันเทียม (Dental root implantation) -กระดูกและส่วนยึดกระดูก (Bone plates and screws)
3. เซรามิกส์ (Ceramics) ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมฟอสเฟต ไฮดรอกซีแอปพาไทด์ ฯลฯ	-มีความเข้ากันได้ดีกับร่างกาย -ทนต่อการกัดกร่อน -ทนทานต่อการกดอัด -มีทั้งที่เนื้อเยื่อและว่องไวทางชีวภาพ	-เปราะ -ไม่มีความยืดหยุ่น	-ฟันปลอม (Dental) -ข้อต่อ (Joint replacement) -สารเคลือบกระดูกและฟัน
4. วัสดุประกอบ (Composites) ได้แก่ โลหะเคลือบผิวด้วยเซรามิกส์ วัสดุเคลือบผิวด้วยคาร์บอน	-แข็งแรง -มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน -ทนทานต่อการกัดกร่อน	-ยากในการผลิต	-ข้อต่อ (Joint replacement) -ลิ้นหัวใจเทียม (Artificial heart valve)

2.1.2 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามกลไกการยึดติดระหว่างวัสดุชีวภาพและเนื้อเยื่อข้างเคียงที่อยู่ล้อมรอบ

วัสดุชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้ [4, 6]

1. วัสดุค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert materials)

วัสดุประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะในร่างกายเป็นระยะเวลานาน เนื้อเยื่อภายในร่างกายจะสร้างเส้นใยขึ้นห่อหุ้มวัสดุชีวภาพ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างของวัสดุชีวภาพกับเนื้อเยื่อของร่างกาย เมื่อเส้นใยมีความหนาแน่นขึ้นเนื่องมาจากการเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อจะทำให้เกิดการเลื่อนหลุดของวัสดุชีวภาพได้ วัสดุค่อนข้างเฉื่อย แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ประเภทของวัสดุค้ำข้างเนื้อ [4]

วัสดุ	ข้อดีของวัสดุ	ข้อด้อยของวัสดุ	การประยุกต์ใช้งาน
<u>โลหะและโลหะอัลลอยด์</u> Stainless steel	-ราคาถูก	-เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย	-สัลยกรรมกระดูกที่แตก อวัยวะเทียม
Ti-Al-V	-มีความสามารถในการเข้ากันได้กับระบบชีวภาพของร่างกาย	-ราคาแพง	-สัลยกรรมกระดูกที่แตก
<u>พอลิเมอร์</u> Polyacetal	-ราคาถูก ง่ายต่อการฆ่าเชื้อ	-มีการเกิดพอร์มีลดีไฮด์ขึ้น -ความทนทานต่อการขีดข่วนต่ำ	-วัสดุยึดติดฟันเทียม
PMMA cement	-มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย	-เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน	-วัสดุอุดช่องว่าง
<u>เซรามิกส์</u> Al_2O_3	-มีความสามารถในการเข้ากันได้กับระบบชีวภาพของร่างกาย	-ราคาแพง -เทคนิคการผลิตค่อนข้างยาก	-วัสดุยึดติดฟันเทียม
ZrO_2 -TZP	-ความแข็งแรง		-วัสดุยึดติดฟันเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุที่มีรูพรุน (Porous materials)

วัสดุประเภทนี้โดยส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนซึ่งเคลือบผิวด้วยสารประเภท HAP วัสดุประเภทนี้จะช่วยลดปัญหาการเลื่อนหลุดภายหลังการใช้งานได้โดยจะมีการสร้างกระดูกจากเนื้อเยื่อบริเวณข้างเคียงซึ่งจะเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนที่พื้นผิวของวัสดุ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อข้างเคียง การเลือกวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเซรามิกสัปรเภทนี้จะต้องเลือกวัสดุที่มีขนาดของรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยสามารถเจริญเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อกระดูกในรูพรุนได้ อย่างไรก็ตามถ้ามีการเคลื่อนที่โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุชีวภาพและเนื้อเยื่อจะทำให้เส้นเลือดฝอยขาดซึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อที่อยู่ในรูพรุนตาย เกิดการอักเสบ และติดเชื้อตามมา

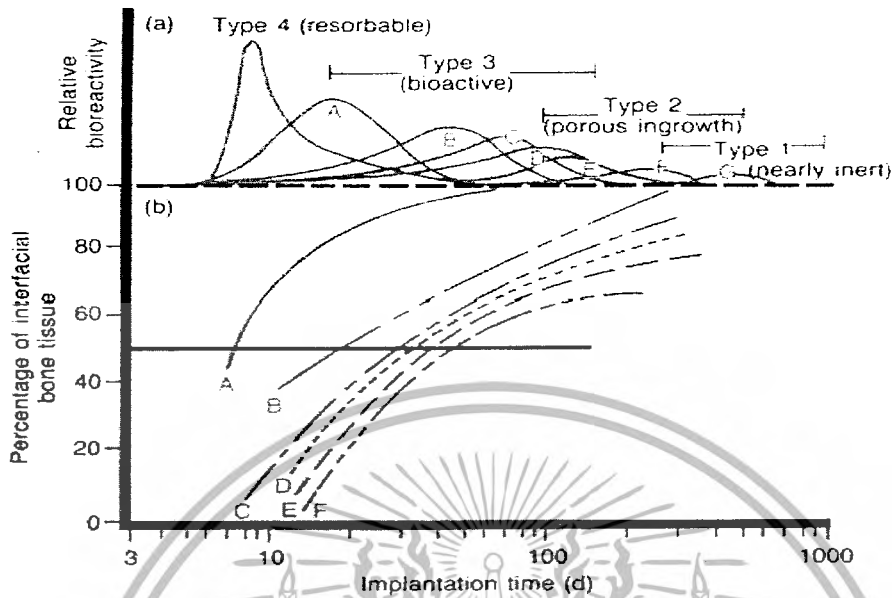
3. วัสดุที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive materials)

วัสดุประเภทนี้มีสมบัติกึ่งกลางระหว่างวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อยและวัสดุที่สามารถถูกดูดซับภายใต้สภาวะร่างกาย โดยจะมีลักษณะที่สำคัญคือจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของวัสดุ ภายใต้สภาวะทางสรีระทางวิทยาซึ่งจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างกระดูกและวัสดุนั้น ดังนั้นจึงช่วยลดปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุได้

4. วัสดุสามารถถูกดูดซับหรือกักเซาะภายใต้สภาวะของสรีระวิทยา

(Resorbable materials)

วัสดุประเภทนี้ถูกออกแบบให้ค่อยๆเกิดการสลายตัวเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมทางสรีระวิทยาและจะถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อที่ร่างกายสร้างขึ้นมา การเลือกวัสดุประเภทนี้มีข้อกำหนดที่สำคัญได้แก่ ปริมาณและองค์ประกอบของวัสดุประเภทนี้จะต้องสามารถถูกย่อยสลายด้วยระบบเมตาบอลิซึมของร่างกาย และอัตราการดูดซับของวัสดุจะต้องสอดคล้องกับอัตราการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อโดยสารที่ปลดปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อร่างกายและสามารถถูกกำจัดได้ด้วยระบบของร่างกาย ดังนั้นจึงมีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถครอบคลุมข้อกำหนดทุกข้อได้และทำให้การออกแบบของวัสดุประเภทนี้มีความยากลำบาก



รูปที่ 2.1 ความว่องไวทางชีวภาพของเซรามิกส์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิด [7] โดยที่วัสดุเซรามิกส์ที่ใช้ได้แก่ (A) 45S5 Bioglass[®] (B) KGC ceravital[®] (C) 55S4.3 Bioglass[®] (D) A / W Glass-ceramic[®] (E) HA (F) KGX Ceravital[®] และ (G) $Al_2O_3-Si_3N_4$

ตารางที่ 2.3 ชนิดของวัสดุตามกลไกการยึดติดและตัวอย่างของวัสดุแต่ละประเภท [6]

ชนิดของวัสดุ	ชนิดกลไกการยึดติด	ตัวอย่าง
1. วัสดุค่อนข้างเหนียว	ยึดติดด้วยโครงสร้างทางกายภาพ	อะลูมินา เซอร์โคเนีย
2. วัสดุที่มีรูพรุน	ยึดติดด้วยการเติบโตของเนื้อเยื่อเข้าไปในรูพรุน	ไฮดรอกซีอะปาทิต โลหะที่มีรูพรุนเคลือบด้วยไฮดรอกซีอะปาทิต
3. วัสดุที่สามารถดูดซับหรือกักเซาะภายใต้สภาวะของสรีระวิทยา	ถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อ	ไทเทเนียมฟอสเฟต [®] Bioactive glasses [®]
4. วัสดุที่ว่องไวทางชีวภาพ	ยึดติดพื้นผิวด้วยพันธะเคมี	Bioactive glasses [®] Bioactive glasses-ceramics [®] HA [®]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วัสดุประกอบ

วัสดุประกอบคือ วัสดุที่ประกอบด้วยหลายวัสดุที่สามารถแบ่งแยกได้อย่างชัดเจน ซึ่งแต่ละวัสดุจะมีความแตกต่างกันทางกายภาพ และทางเคมี [4]

วัสดุประกอบจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

1. วัสดุเสริมแรง (Reinforced phase) คือ วัสดุที่ทำให้ความแข็งแรงแก่วัสดุประกอบ ซึ่งวัสดุที่เป็นวัสดุเสริมแรงนี้ จะมีความแข็งแรงสูง เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้วหรือเซรามิกส์ เป็นต้น

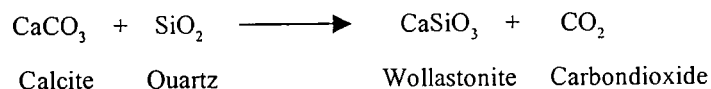
2. เมทริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน โดยจะล้อมรอบและปกป้องวัสดุเสริมแรง และเมทริกซ์จะทำหน้าที่ถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่วัสดุเสริมแรง วัสดุที่เป็นเมทริกซ์ เช่น พอลิเมอร์ เป็นต้น

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโดยการนำเอาวัสดุประกอบ (Composites) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการนำเอาวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดมาประกอบรวมกันเพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานแทนวัสดุชีวภาพที่ผลิตมาจาก โลหะ พอลิเมอร์หรือเซรามิกส์เพียงอย่างเดียวซึ่งวัสดุชีวภาพเหล่านี้มีสมบัติบางประการที่ไม่ดี

2.3 แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [8]

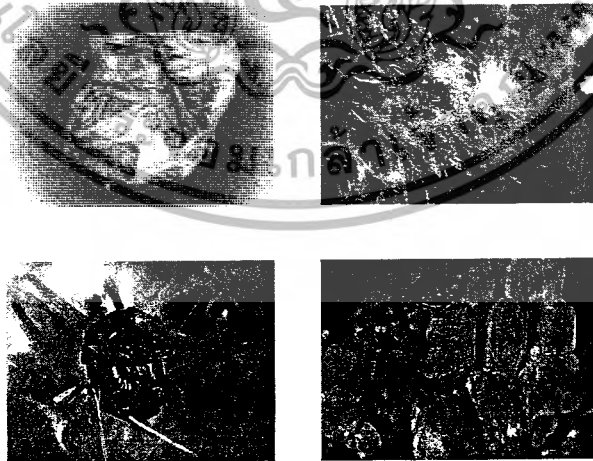
แคลเซียมซิลิเกต (CaSiO₃) ชนิด Wollastonite ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1822 และมีการตั้งชื่อตามผู้ค้นพบ ซึ่งเป็นนักธรณีวิทยาชาวอังกฤษชื่อ William Hyde Wollaston แร่ Wollastonite มีการนำมาใช้ในทางการค้าในปี ค.ศ. 1993 ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงลักษณะ รูปร่าง วิธีการผลิต และการพัฒนาเพื่อนำแร่ชนิดนี้มาใช้

Wollastonite มีลักษณะเฉพาะคือ มีสีขาว รูปร่างของผลึกเป็นแท่งยาวคล้ายเข็ม และมีความเป็นด่าง Wollastonite จะมีธาตุอื่นๆ รวมอยู่ด้วย เช่น ควอตซ์ (Quartz) แคลไซต์ (Calcite, Calcium carbonate) ไดออปไซด์ (Diopside, Calcium magnesium silicate) การ์เน็ต (Garnet, Calcium iron silicate, Calcium aluminium silicate) และ พรินท์ (Prehnite, Calcium aluminium silicate) ซึ่งธาตุเหล่านี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเกิด Wollastonite ปฏิกิริยาการเกิด Wollastonite แสดงดังสมการ



2.3.1 โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกต [8]

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของ CaSiO_3 ซึ่งมีลักษณะเป็นหน่วยซ้ำ ๆ (Repeating unit) สายโซ่ของ Wollastonite เกิดจากซิลิกา 3 หมู่ที่จัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) มาเชื่อมต่อกัน โดยมีแคลเซียมอยู่ในช่องออกตะฮีดรอล (Octahedral) และจากการที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสายโซ่ของซิลิกา จึงทำให้ Wollastonite เป็นแร่ธาตุที่มีความแข็งสูง 5 – 5.5 mohs



รูปที่ 2.3 ผลึกของ Wollastonite ที่พบได้ในธรรมชาติ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สมบัติของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite

2.3.2.1 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [10, 11]

1. รูปร่างของผลึก (Crystal shape)

รูปร่างผลึกของ Wollastonite มีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเข็ม (Acicular) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปร่างของผลึกที่มีลักษณะเหมือนเข็ม [8]

2. อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของผลึก (Aspect ratio)

ผลึกของ Wollastonite มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวตั้งแต่ 2 : 1 ถึง 20 : 1

3. สี (Color)

Wollastonite บริสุทธิ์จะมีสีขาวสว่าง แต่สีอาจจะเปลี่ยนเป็นสีครีม เทา ชมพู น้ำตาลหรือแดง ถ้ามีสิ่งเจือปนประเภทโลหะ เช่น เหล็ก และสีจะเป็นตัวบอกถึงสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในพื้นผิวของ ผลึกหรือ โครงสร้างของผลึก

4. ความมันวาว (Luster)

Wollastonite จะมีความมันวาวเหมือนแก้วจนถึงมันวาวคล้ายไข่มุก

5. ความสว่าง (Brightness)

Wollastonite จะมีความขาวสว่างอยู่ในช่วง 80 ถึง 95

6. ความหนาแน่น (Specific gravity)

Wollastonite จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $2.87 - 3.09 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตาม ปริมาณของโลหะที่เจือปน เช่น อะลูมินัม เหล็ก แมกนีเซียม โพแทสเซียม และ โซเดียมที่มาแทนที่แคลเซียมใน โครงสร้างผลึก

7. จุดหลอมเหลว (Melting point)

Wollastonite บริสุทธิ์จะมีจุดหลอมเหลว 1540 °C

8. การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion)

Wollastonite จะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำและมีลักษณะเฉพาะของอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง จึงทำให้ Wollastonite มีความต้านทานต่อการเสียดสีสูง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และยังคงรูปร่างเดิมได้ดีที่อุณหภูมิสูง Wollastonite มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 6.5×10^{-6} mm/mm/°C

9. ความแข็งกด (Hardness)

Wollastonite จะมีค่าความแข็งกดอยู่ในช่วง 5 — 5.5 mohs

10. ลักษณะเฉพาะอื่นๆ (Other Characteristics)

Wollastonite ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และ Wollastonite บางชนิดสามารถเรืองแสงได้

2.3.2.2 สมบัติทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [12]

Wollastonite เป็นแร่ที่ประกอบด้วยแคลเซียม ซิลิกอน และออกซิเจน มีสูตรโมเลกุลเป็น CaSiO₃ หรือ CaO·SiO₂ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 116 และมี pH 8 — 10 Wollastonite จะมีองค์ประกอบตามทฤษฎีของ CaO 48.28 % และ SiO₂ 51.72 % โดยน้ำหนัก ซึ่ง Wollastonite ธรรมชาติจะมีโลหะไอออนปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [12]

ส่วนประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
CaO	47.00
SiO ₂	50.00
Fe ₂ O ₃	1.00
Al ₂ O ₃	0.30
K ₂ O	0.10
MnO	0.10

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite (ต่อ)

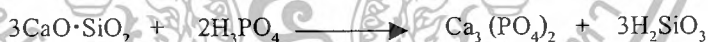
ส่วนประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
MgO	0.30
TiO ₂	0.05
P ₂ O ₅	0.04
Moisture	0.20
Loss on ignition	0.20
Undermined	0.71

1. ความว่องไวทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกต

Wollastonite ค่อนข้างเฉื่อยและละลายน้ำได้เล็กน้อย โดยเมื่อ Wollastonite ทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น โดยมีค่า pH ประมาณ 10 เนื่องจากเกิด Ca(OH)₂ เกิดขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



Wollastonite จะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกรดไฮโดรคลอริก นอกเหนือจากกรดไฮโดรคลอริกยังมีกรดอื่นที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้คือ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดแอซติก กรดซิตริก กรดแลคติก และกรดฟอร์มิก การเกิดปฏิกิริยาของ Wollastonite กับกรดฟอสฟอริกแสดงดังสมการ



Wollastonite ทำปฏิกิริยากับเบสและเกลือได้ที่อุณหภูมิจำกัดคือ อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) ซึ่งถ้าทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมจะมีผลของการแลกเปลี่ยนไอออน เช่น โซเดียม และ โพแทสเซียมเกิดขึ้น

2. ปริมาณการระเหยของเนื้อสารเมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1000 °C

(Loss on ignition , LOI)

Wollastonite จะมีปริมาณการระเหยของเนื้อสารเมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1000 °C (LOI) อยู่ในช่วง 0.5 – 2.0 % โดยน้ำหนัก

2.3.3 การประยุกต์ใช้งานของแคลเซียมซิลิเกต [10, 11]

แคลเซียมซิลิเกตจัดเป็นวัสดุเซรามิกส์ที่สามารถนำมาใช้แทนที่แร่ใยหินในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระเบื้องผนังหลังคา และในงานอุตสาหกรรมสีจะใช้เป็นตัวทำให้แข็ง เป็นตัวลดการดูดซึมน้ำมัน เป็นต้น ส่วนในงานอุตสาหกรรมเซรามิกส์ แคลเซียมซิลิเกตจะเป็นตัวช่วยลดการโค้งงอ ลดการแตกหักในระหว่างการเผา และช่วยเพิ่มความแข็งแรง นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติ ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงกดอัด ความแข็งแรงกระแทก และยังใช้ในการทำเป็นวัสดุเซรามิกส์ ชีวภาพที่ใช้ในทางการแพทย์อีกด้วย

2.3.4 การเตรียมแคลเซียมซิลิเกต

ปัจจุบันมีวิธีการเตรียมแคลเซียมซิลิเกตที่นิยมใช้กันอยู่ 3 วิธี ได้แก่ วิธีตกตะกอนร่วม (Coprecipitation method) วิธี โซล-เจล (Sol-gel synthesis) และวิธีบดผสมเชิงกล (Mechanical mixing) ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

1. วิธีตกตะกอนร่วม [13]

เทคนิคการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมวิธีหนึ่งที่ได้ผงเซรามิกส์ที่มีคุณภาพ ทำโดยนำสารละลายที่มีแคทไอออนของสารที่ต้องการตกตะกอนร่วมกันไปผสมกับสารตกตะกอน (Precipitating agent) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ตะกอนร่วมของสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการตกตะกอนแล้วไปกรองเพื่อแยกตะกอนออกมาและนำไปอบแห้ง

ในการเตรียม CaSiO_3 จากวิธีนี้สารตั้งต้นที่ใช้ คือ เตตระเอทิลอซิโตนซิลิเกต ($(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$, TEOS) และแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรท ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

2. วิธีโซล-เจล [14]

โซล (Sol) คือ อนุภาคของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร ที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของเหลว ถ้าหากทำให้อนุภาคของโซลแน่นขึ้นจะเปลี่ยนเป็นอนุภาคเจล (Gel) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของแข็งที่เกิดการเชื่อมโยงจนมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้นซึ่งล้อมรอบในวัฏภาคที่เป็นของเหลวไว้

เทคนิคการสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจล จะได้สารประกอบออกไซด์ผสมซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเทคนิคนี้สามารถผลิตร่างแหสารอนินทรีย์ได้หลากหลาย โดยร่างแหสารอนินทรีย์จะเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว และการแข็งตัวของโซลกลายเป็นโครงสร้างร่างแห สารตั้งต้นที่นิยมใช้คือพวกโลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) เพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วกับ

น้ำ ตัวอย่างของโลหะอัลคอกไซด์ที่นิยมใช้ เช่น เตตระเมทอกซี ไซเลน (TMOS) และเตตระเอทิลอ็อกซิไลด์ (TEOS) และอัลคอกไซด์ (Alkoxide) อื่นๆ เช่น อะลูมินา ทิทาเนต และบอเรต ซึ่งมักนิยมผสมกับ TEOS

วิธีโซล-เจล เริ่มจากการเตรียมสารละลายตั้งต้นจากสารประกอบประเภทอัลคอกไซด์ (Alkoxide) ในตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเป็นพวกอัลกอฮอล์ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยารวมตัว (Condensation)

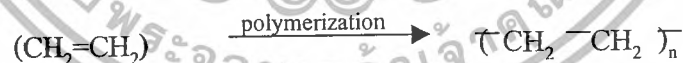
ในการเตรียม CaSiO_3 โดยวิธีโซล-เจลนี้สารตั้งต้นที่ใช้คือ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และโลหะอัลคอกไซด์ เช่น TEOS หรือ TMOS โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย

3. วิธีบดผสมเชิงกล [13, 15]

การเตรียมสารประกอบออกไซด์เซรามิกส์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีพื้นฐานที่ง่ายที่สุด ราคาถูก และไม่ยุ่งยากซับซ้อน ทำโดยนำเอาสารตั้งต้นซึ่งเป็นของแข็งมาบดเข้าด้วยกันในหม้อบดผสมผสมเชิงกล (Ball mill) ซึ่งการบดผสมเชิงกลนี้จะทำให้ได้อนุภาคของสารค่อนข้างใหญ่ โดยมีขนาดอนุภาคมากกว่า 1 ไมครอน มีการกระจายตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนจากขั้นตอนการบดผสมทำให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ำ ซึ่งเป็นข้อด้อยของการบดผสมเชิงกล หลังจากได้ส่วนที่เป็นสารประกอบออกไซด์ผสมจากการบดแล้ว นำเอาส่วนผสมที่ได้ไปผ่านการเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1000-1500^\circ\text{C}$ จะได้สารประกอบออกไซด์เซรามิกส์

2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟินส์ ที่ได้จากการบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนดังสมการ



พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงอาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนเชิงเส้น (Linear-Polyethylene) เนื่องจากพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงเกือบตลอด หรืออาจมีกิ่งข้างแต่น้อยมาก ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างสายโซ่ของ HDPE [16]

2.4.1 สมบัติทั่วไป [16]

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานทางเคมีสูงและไม่ดูดซึมของผสม ซึ่งจัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี โดยทำการประยุกต์ใช้ในเรื่องของบรรจุภัณฑ์ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง — สูง จะมีสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกดีมาก

สิ่งที่เป็นตัวกำหนดสมบัติของ HDPE จะขึ้นอยู่กับ 4 ตัวแปรคือ ความหนาแน่น (Density) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, Mw) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution, MWD) และสารเติมแต่ง (Additive)

1. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของ HDPE จะขึ้นอยู่กับปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น โดย HDPE จะมีความหนาแน่นประมาณ $0.940 - 0.965 \text{ g/cm}^3$ และพบว่าถ้ามีความหนาแน่นสูงกว่าค่านี้ จะทำให้มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติป้องกันการซึมผ่านดีขึ้น และถ้ามีความหนาแน่นต่ำกว่าค่านี้ทำให้มีค่าความทนทานต่อแรงกระแทก และความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (Resistance to environment stress cracking, ESCR) ต่ำลง ESCR จะเป็นความสามารถในการต้านทานรอยแตกที่เกิดจากแรงเค้นเชิงกลและเคมี

2. น้ำหนักโมเลกุล

ถ้า HDPE มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความทนทานต่อการหลอมเหลว ความเหนียว และ ESCR สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงก็ต้องการอุณหภูมิและความดันในกระบวนการแปรรูปสูงเช่นกัน

3. การกระจายน้ำหนักโมเลกุล

การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงแคบ- กว้าง ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่า ถ้ามี MWD กว้าง จะทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย เพราะส่วนที่เป็นโมเลกุลเล็กๆ จะเข้ามาช่วยหล่อลื่น ขณะเดียวกันจะทำให้การหดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่แบบสั้นและยาวอยู่ด้วยกัน เมื่อขึ้นงานได้ รับความเค้นการตกผลึกจะไม่เท่ากัน ความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง และ ESCR เพิ่มขึ้น โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปยาก ดังนั้นจึงต้องอาศัย MWD กว้าง มาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มี MWD ที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมาร่วมกัน

4. สารเติมแต่ง

พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเคมีหรือสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียว เติมเส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น เติมสารเสถียรภาพเพื่อเพิ่มความทนทาน ต่อแสงอัลตราไวโอเลต เติมสารเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต เติมสารให้สีเพื่อทำให้มีสีสน และอื่นๆ เป็นต้น

2.4.2 กระบวนการผลิต และตัวเร่งปฏิกิริยา [17]

การผลิต HDPE ได้พัฒนามาเป็นลำดับขั้น ในปัจจุบันมีการใช้อยู่ 3 กระบวนการคือ

1. กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งของซีเกลอร์แนตตา (Ziegler - Natta catalyst) ซึ่งทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ออลูมิเนียมอัลกิลที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย (2-4 บรรยากาศ) และอุณหภูมิ 50-70 °C ในตัวกลางเฉื่อยเช่น น้ำมันดีเซล เฮปเทน หรือโทลูอีน และในบรรยากาศเฉื่อย เช่น บรรยากาศไนโตรเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายในตัวกลางเฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้วจะตกตะกอนออกมา หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสิ้นสุดลง ตัวเร่งซีเกลอร์แนตตาจะถูกทำลายลงโดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เอทานอล หรือโพรพานอล สารทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ยกเว้นพอลิเมอร์) สามารถถูกสกัดไปโดยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์ แล้วนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปเหวี่ยงให้ตกตะกอน (Centrifugation) และทำให้แห้ง

โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ได้จะมีหมู่เอทิลเพียง 5-7 หมู่ต่ออะตอมของคาร์บอน 1000 อะตอม และไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่บิวทิล โดยพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.945 g/cm^3

2. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillip process)

กระบวนการนี้ใช้โครเมียมออกไซด์ที่มีซิกลา หรืออะลูมินาเป็นตัวเร่งในตัวกลางเฉื่อย เช่น ไซโคลเฮกเซน สภาวะของปฏิกิริยาอยู่ระหว่างกลางของกระบวนการความดันสูงที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ และกระบวนการซีเกลอร์ ความดันที่ใช้ทั่วไป 30-40 บรรยากาศและอุณหภูมิ 90 – 160 °C พบว่าพอลิเอทิลีนที่ได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

3. กระบวนการสแตนด์ราร์ด ออยล์ (Standard oil process)

กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์บนตัวพุง เช่น อะลูมินา ไททานเนียมไดออกไซด์ หรือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ความดันที่ใช้ 40 – 100 บรรยากาศ และอุณหภูมิของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง

200 -300 °C พอลิเมอร์ที่ได้จะเป็นเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์คือ มีโครงสร้างเชิงเส้นเกือบสมบูรณ์

2.4.3 กระบวนการ และการประยุกต์การใช้งาน [16]

HDPE ถูกนำมาแปรรูปให้ได้รูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ใช้ทำภาชนะ รองเท้า เครื่องใช้ ในครัวเรือน ประตู และหน้าต่าง เป็นต้น โดยกระบวนการแปรรูปที่มีการใช้ HDPE มีด้วยกันหลายกระบวนการ เช่น ทำแผ่นฟิล์ม (Film) ฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป่าขึ้นรูป (Blow molding) ทำท่อ (Pipe Extrusion) ทำแผ่น (Sheet extrusion) และเคลือบผิว (Coating) เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Wang M. และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาขนาดอนุภาคและดัชนีทางวิทยาของ HAp ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE โดยใช้ HAp 2 เกรด ได้แก่ P88HAp และ P81BHAp ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมและส่วนเสริมแรงให้กับ HDPE ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ทำการผสม HAp กับ HDPE หลอมเหลว จากนั้นนำวัสดุที่ได้มาบดเป็นเม็ดแล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากนั้นนำมาตัดเตรียมเป็นชิ้นงานตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเมื่อมีปริมาณของ HAp มากขึ้นจะมีค่า มอดุลัสการบิดตัว (Torsional modulus) และ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น แต่มีค่า ความเครียดของการแตกหัก (Fracture strain) ลดลง และพบว่าอนุภาคของ HAp ทั้ง 2 เกรด มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลที่เหมือนกันแต่ค่าที่ได้จะแตกต่างกัน โดยวัสดุประกอบที่ได้จาก P88HAp ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า P81BHAp จะมีค่า มอดุลัสการบิดตัว และค่าความแข็งแรงดึงมากกว่า แต่มีค่าความเครียดของการแตกหักน้อยกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณ HAp เท่ากัน จะเห็นว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีจำนวนอนุภาคน้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็ก จึงมีแรงต้านการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลได้น้อยกว่าทำให้รับแรงได้น้อยกว่า และจากผลการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่า HAp ทั้ง 2 เกรด มีการกระจายตัวที่ดี แต่มีค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ของวัสดุประกอบลดลง และเมื่อมีปริมาณของ HAp เพิ่มขึ้น จะมีค่ามอดุลัสเชิงพลวัตสูงขึ้น แต่เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะมีค่ามอดุลัสเชิงพลวัตลดลง

งานวิจัยของ Wang M. และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ HAp และ HDPE เพื่อพัฒนาให้วัสดุประกอบมีการยึดติด (Bonding) ที่ดีขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้ไซเลน (3-ไตรเมทอกซีไซลิลโพรพิลเมทาคริเลต) ในการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ HAp และ ใช้กรดอะคริลิก (Acrylic acid, AA) ต่อกิ่ง (Grafting) บน HDPE

ในกระบวนการผลิตวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ได้ทำการแบ่งการผลิตออกเป็น 3 ประเภท โดยประเภทแรกเป็นวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ส่วนประเภทที่สองเป็นวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่มีการใช้ไซเลนเพียงอย่างเดียว และประเภทที่สามเป็นวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่มีทั้งการใช้ไซเลนและการต่อกึ่งด้วย AA โดยปริมาณของ HAp ที่ใช้คือ 20 และ 40 % โดยปริมาตร จากเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) พบว่าปริมาณของ HAp ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) แต่เมื่อมีการใช้ไซเลนจะทำให้ T_m ลดลงและจะลดลงอีกเมื่อมีการต่อกึ่งกับ HDPE ร่วมด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะสายโซ่ของ HDPE มีการยืดขยายออก สายโซ่จึงมีที่ว่างเพิ่มขึ้นมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อมีการต่อกึ่งด้วย AA จะทำให้มีการกระจายขนาดของผลึกมากกว่าการใช้ไซเลนเพียงอย่างเดียว เพราะการต่อกึ่งทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียสลดลง นอกจากนี้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ HAp ที่มีการใช้ไซเลนทำให้องศาความเป็นผลึกของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีการต่อกึ่งร่วมด้วย องศาความเป็นผลึกของวัสดุประกอบจะลดลง จากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) พบว่ามีการยึดติดกันของวัสดุ HAp กับ HDPE เมื่อมีการใช้ไซเลน เพราะความเข้มของพีก คาร์บอนิลที่ความยาวคลื่น $1650 - 1740 \text{ cm}^{-1}$ สูงขึ้น และจะมีความเข้มของพีกสูงขึ้นอีก เมื่อมีปริมาณของ HAp มากขึ้น ซึ่งปริมาณของ HAp ที่เพิ่มมากขึ้นจะมี ไซเลนมากขึ้นด้วย

งานวิจัยของ Wang M. และ Bonfield W. [20] ต่อเนื่องมาจากข้างต้นโดยทำการศึกษา โครงสร้างและสมบัติของวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ HAp และ HDPE จากเทคนิค SEM พบว่าถ้านำคอมพาวด์ (Compound) ไปทำเป็นผง ค้อนนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปจะช่วยให้ HAp กระจายตัวในวัสดุประกอบได้ดีขึ้นและไม่มีรูพรุน เนื่องจากการทำให้เป็นผง เป็นการทำให้กลุ่มก้อนของ HAp แยกออก วัสดุประกอบที่มีทั้งการใช้ไซเลนและการต่อกึ่งด้วย AA จะมีรูพรุนน้อยและมีขนาดเล็กกว่าวัสดุประกอบที่มีการใช้ไซเลนเพียงอย่างเดียว แต่วัสดุประกอบที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวมีการกระจายของ HAp ที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าวัสดุประกอบที่มีการปรับปรุงพื้นผิว จากการทดสอบแรงดึงพบว่า การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ HAp และ HDPE หรือ HAp เพียงอย่างเดียวทำให้สมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความเครียดของการแตกหัก (Fracture strain) มีค่าเพิ่มขึ้นแต่โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ลดลง การปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนทำให้วัสดุประกอบมีความเหนียว (Ductility) มากขึ้นเนื่องจาก HAp มีการกระจายตัวและยึดติดกับ HDPE ได้ดีขึ้น เมื่อปริมาณของ HAp เพิ่มขึ้นสมบัติความแข็งแรงดึง และโมดูลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความเครียดของการแตกหักลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อปริมาณของ HAp เพิ่มขึ้น ความเค้นตกค้าง (Stress concentration) ในชิ้นงานมีมากขึ้นทำให้ชิ้นงานแตกหักอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วเมื่อได้รับความเค้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลโดยรวม พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุประกอบที่มีทั้งการใช้โซเลนและการต่อกิ่งด้วย AA ดีกว่าการใช้โซเลนเพียงอย่างเดียว

งานวิจัยของ Siriphannon P. และคณะ [21] ทำการศึกษาถึงผลของโครงสร้างของ CaSiO_3 ที่มีต่อการก่อตัวของ HAp เมื่อทำการแช่ CaSiO_3 ในสารละลาย SBF โดยในงานวิจัยนี้ทำการเตรียม CaSiO_3 ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมไนเตรตเตรไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และ เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, TEOS) โดยใช้สารละลาย NaOH เป็นตัวตกตะกอน และทำการเผาแคลไซน์ (Calcined) ที่อุณหภูมิ 500°C 2 ชม. ซึ่ง CaSiO_3 ที่ได้นี้เรียกว่า CaSiO_3 ชนิด อัดฐาน จากนั้นนำบางส่วนของ CaSiO_3 ที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 1000°C และ 1400°C 2 ชม. ซึ่ง CaSiO_3 ที่ได้จากการเผาที่ 1000°C เรียกว่า $\beta\text{-CaSiO}_3$ และที่ 1400°C เรียกว่า $\alpha\text{-CaSiO}_3$ จากนั้นนำตัวอย่างทั้ง 3 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM และเทคนิค XRD แล้วนำตัวอย่างทั้ง 3 มาแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลาต่างๆตั้งแต่ 2 ชั่วโมง - 30 วัน ที่อุณหภูมิ 36.5°C และทำการเขย่าสารละลายตลอดเวลา จากนั้นนำตัวอย่างทั้ง 3 ที่แช่ครบตามระยะเวลาที่ตั้งไว้ไปตรวจวิเคราะห์การก่อตัวของ HAp ด้วยเทคนิค SEM XRD และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของ Ca Si และ P ในสารละลาย SBF ด้วยเทคนิคอินดักทีฟฟิวส์ฟอสฟอรัสอะตอมมิกอิมิตชันสเปกโทรสโกปี (ICP) ผลการวิเคราะห์ก่อนการแช่ตัวอย่าง จากเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของ Amorphous CaSiO_3 และ $\beta\text{-CaSiO}_3$ มีลักษณะขรุขระแต่ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ จะมีพื้นผิวเรียบและตัวอย่างทั้ง 3 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ที่หาจากวิธีการดูดซับก๊าซ (BET method) ได้ 12.2, 7.9 และน้อยกว่า $1 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ว่าที่อุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิของ CaSiO_3 มีความหนาแน่นมากขึ้น และจากเทคนิค XRD พบว่า Amorphous CaSiO_3 จะมีพีคฐานกว้างที่ $30^\circ 2\theta$ ส่วน $\beta\text{-CaSiO}_3$ และ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ พีคที่ได้ยืนยันว่าเป็น CaSiO_3 ที่มีความเป็นผลึก ผลการวิเคราะห์ภายหลังการแช่ตัวอย่างในสารละลาย SBF จากเทคนิค XRD พบว่า Amorphous CaSiO_3 จะเกิดพีคของผลึก HAp ที่ $31.7^\circ 2\theta$ ภายหลังการแช่ 1 วัน และพบว่าใน Amorphous CaSiO_3 จะพบพีคของผลึกแคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) รวมอยู่ด้วย เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาต่ำทำให้วัฏภาคอัดฐานของ CaCO_3 ยังคงหลงเหลืออยู่ ส่วน $\beta\text{-CaSiO}_3$ เริ่มปรากฏพีค HAp หลังจากแช่เป็นเวลา 1 วัน และยังคงมีพีคของ $\beta\text{-CaSiO}_3$ ที่ $30^\circ 2\theta$ ซึ่งแสดงถึงความเป็น อัดฐานของสารตัวอย่าง ส่วน β และ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ พบองค์ประกอบหลักของ CaSiO_3 ที่มีความเป็นผลึก เมื่อทำการแช่ตัวอย่างในสารละลาย SBF จากเทคนิค XRD พบว่า Amorphous CaSiO_3 เกิดผลึกของ HAp ร่วมกับผลึกของแคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) เนื่องจากในการเผาใช้อุณหภูมิต่ำทำให้วัฏภาคอัดฐานของ CaSiO_3 ยังคงเหลืออยู่ ส่วน $\beta\text{-CaSiO}_3$ พบผลึกของ HAp ภายหลังจากการแช่ 1 วัน และยังคงมี $\beta\text{-}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CaSiO₃ เหลืออยู่ ถึงแม้จะแช่เป็นระยะเวลานาน ส่วน α -CaSiO₃ พบผลึกของคริสโตบอลไลต์ และ HAp ซึ่งเกิดขึ้นทับกับผลึกของ α -CaSiO₃ หลังจากแช่เป็นเวลา 1 วัน และเมื่อแช่เป็นเวลานานจะไม่พบผลึกของ α -CaSiO₃ เนื่องจากมันเปลี่ยนเป็นผลึก HAp หหมด แต่ยังคงพบผลึกคริสโตบอลไลต์อยู่ และจากเทคนิค SEM พบว่า พื้นผิวของ Amorphous CaSiO₃ ที่ทำการแช่ 2 ชั่วโมง มีอนุภาคกลมๆขนาดเล็กเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อแช่นานขึ้นจำนวนกลุ่มก้อนจะเพิ่มขึ้น โดยมีการก่อตัวของอนุภาคใหม่ขึ้นมา และกลุ่มก้อนเหล่านี้จะเกาะกันแบบหลวมๆ ทำให้พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ส่วนพื้นผิวของ β และ α -CaSiO₃ มีอนุภาคกลมๆขนาดเล็กเกาะรวมตัวกันหลังจากแช่เป็นเวลา 1 วัน และอนุภาคจะเกาะรวมตัวกันอย่างหนาแน่น และเมื่อระยะเวลาแช่ขึ้นขนาดอนุภาคจะใหญ่ขึ้น พร้อมทั้งมีการก่อตัวของอนุภาคใหม่ร่วมด้วย

สุดท้ายผลการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Ca Si และ P ในสารละลาย SBF ภายหลังจากการแช่ตัวอย่างทั้ง 3 ด้วยเทคนิค ICP พบว่า ความเข้มข้นของ Ca และ Si เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรก และความเข้มข้นของ P ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยที่ Amorphous CaSiO₃ สามารถปลดปล่อย Ca ได้สูงกว่าอีก 2 ตัวอย่าง แต่สามารถปลดปล่อย Si ได้น้อยกว่า ซึ่งแสดงได้ว่าการเผาที่ 500 °C ไม่เพียงพอที่จะทำให้ CaCO₃ และ SiO₂ ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็น CaSiO₃ ได้ ผลของการปลดปล่อย Ca ได้เร็วทำให้ pH ของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดการตกตะกอนของ HAp ได้รวดเร็วกว่าตัวอย่างอื่น ความเข้มข้นของสารละลายหลังจากทำการแช่ตัวอย่างเป็นเวลานาน พบว่าเริ่มจะคงที่เนื่องจากเข้าสู่สภาวะสมดุลของการละลายของตัวอย่างและการก่อตัวของ HAp

งานวิจัยของ Liu X. และ Ding C. [22] ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของ HAp บนพื้นผิวของวัสดุประกอบ CaSiO₃ กับ Ti-6Al-4V เมื่อแช่สารละลาย SBF โดยในงานวิจัยนี้ใช้ CaSiO₃ ที่เป็นผง และเป็นเกรดการค้า ขนาด 10-60 μ m เคลือบลงบน Ti-6Al-4V ขนาด 20×10×4 mm จากนั้นทำการแช่ตัวอย่างลงในสารละลาย SBF ที่อุณหภูมิ 36.5°C ในระบบสภาวะคงที่ จากเทคนิค SEM พบว่า แอปลาไทด์ที่ก่อตัวอยู่บนพื้นผิวของ CaSiO₃ มีลักษณะอนุภาคกลม ซึ่งประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กลักษณะยาวรี และอนุภาคทรงกลมของ HAp จะเติบโตมาเชื่อมต่อกันลักษณะคล้ายตัวหนอน ผลึกดังกล่าวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 nm และความยาว 100-300 nm จากเทคนิค XRD พบว่าชั้นของแอปลาไทด์ที่ก่อตัวบนพื้นผิวของ CaSiO₃ จะประกอบด้วยผลึกขนาดเล็ก และอาจมีอนุภาคซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์รวมอยู่ด้วย และเทคนิค TEM พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของแอปลาไทด์มีลักษณะคล้ายเข็ม และจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นพบว่าผลึกแอปลาไทด์มีการจัดเรียงตัวในทิศทาง (002) แต่ไม่พบฟีก (002) ใน XRD การจัดเรียงตัวในทิศทาง (002) จะเกิดขึ้นเฉพาะบางบริเวณ

งานวิจัยของ Juhasz J.A. และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ และขนาดของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบระหว่าง PE กับ A-W (AWPEX) โดย A-W คือสารประกอบระหว่าง HAp และ CaSiO_3 ชนิด Wollastonite และทำการเทียบผลกับวัสดุประกอบระหว่าง PE กับ HAp (HAPEXTM) ที่ปริมาณของสารตัวเติม 40 % โดยปริมาตร ในงานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณของสารตัวเติมในช่วง 10 -50 %โดยปริมาตร จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า HAPEX มีความเครียดของการแตกหักที่ต่ำกว่า AWPEX ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง HAp กับ PE แข็งแรงกว่า A-W กับ PE ส่วนผลของขนาดของสารตัวเติมพบว่าขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ แต่มีความเครียดของการแตกหักต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ทำให้มีอันตรกิริยาและการยึดติดระหว่างอนุภาคกับพอลิเมอร์ที่ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า และอนุภาคขนาดเล็กจะส่งผลให้การเสริมแรงมีประสิทธิภาพมากขึ้น วัสดุประกอบมีความแข็งแรงขึ้น และเมื่อมีปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงโค้งงอ และโมดูลัสโค้งงอมีค่าสูงขึ้น แต่มีความเครียดของการแตกหักลดลง เนื่องมาจากปริมาณของพอลิเมอร์ระหว่างอนุภาคลดลง ก็คือพฤติกรรมความเหนียวของ PE ลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดชนิดขึ้นรูป (H6007JU) บริษัท ค้าเคมีภัณฑ์สยาม จำกัด สมบัติบางประการของ HDPE แสดงดังตารางที่ 3.1
2. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกรด OMYACARB-2 ชนิดไม่มีกรดเกลือปนัว บริษัท สุรินทร์ ออมย่า เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด
3. ซิลิกา (SiO_2) เกรด HI-SIL(R)255-S บริษัท พีพีซี สยามซิลิกา
4. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เกรดการค้า บริษัท โรงงานสุรา องค์การสุรา กรมสรรพสามิต
5. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
6. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
7. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
8. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไตรไฮเดรต ($\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
9. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
10. กรดไฮโดรคลอริก 1 โมล (1M HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
11. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
12. แอนไฮดรัส โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
13. ทริสไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทน ($(\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNH}_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	HDPE (H6007JU)
ครรชนีการไหล	g/10 min	ASTM D1238	7.5
ความหนาแน่น	g/cm ³	ASTM D1505	0.967
ความต้านทานแรงดึง	kg/cm ²	ASTM D 638	310
ความต้านทานแรงดึงขาด	kg/cm ²	ASTM D 638	220
มอดูลัสการโค้งงอ	kg/cm ²	ASTM D 790	13,500
ความต้านทานแรงกระแทก	kg/cm ²	ASTM D 256	3.5
ความแข็ง, SHORE D	-	ASTM D2240	68
จุดหลอมเหลว	^o C	ASTM D2117	133

* ข้อมูลจากบริษัท ค้าเคมีภัณฑ์สยาม จำกัด

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวิเคราะห์การคายรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence, XRF) บริษัท BRUKER AG รุ่น SRS 3400
2. เครื่องบดผสมสารตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท ROCK LAB รุ่น BENCHMILL MODEL 1A
3. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท HERZOG รุ่น TP60/2D
4. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP
6. เครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) บริษัท PERKIN ELMER รุ่น DSC 7
7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท LLOYD INSTRUMENT รุ่น LR 30K
8. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) บริษัท INTRO ENGINEERING รุ่น PL-200
9. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) บริษัท LAB TECH ENGINEERING รุ่น LP 20
10. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท BOSCO ENGINEERING รุ่น A600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เครื่องวัดแรงกระแทก (Impact tester) บริษัท YASUDA SEIKI SEISAKUSHO รุ่น 7697
12. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer ชนิด Shore D) บริษัท INTRO ENTERPRISE
13. เตาเผาสาร บริษัท THERMOLYNE รุ่น FURNACE 6000
14. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท DENVER INSTRUMENT รุ่น TC-254
15. หม้อบดผสมเชิงกลเซรามิกส์ (Ball mill) ขนาด 500 มิลลิลิตร
16. ลูกบดผสมเชิงกลเซรามิกส์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.05 12.55 และ 9.45 มิลลิเมตร
17. ครูชีเบิลชนิดอะลูมินา
18. ครูชีเบิลชนิดพอร์ทเลนซ์
19. พิกโนมิเตอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร
20. ตะแกรงร่อนคัดขนาดอนุภาค ขนาด 230 เมช
21. ตะเกียงบุนเซน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์ที่เคลือบเชื่อมซิลิเกตชนิด Wollastonite

1. ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 100 กรัม และซิลิกา (SiO_2) 60 กรัม ในอัตราส่วน 1: 1 โดยโมล ลงในหม้อบดผสม ใส่ลูกบดปริมาตร 412 กรัม
2. เติมน้ำในหม้อบดผสมให้ท่วมสารเล็กน้อย
3. ทำการบดผสมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้ความเร็วรอบในการบด 60 รอบต่อนาที
4. เมื่อครบกำหนด 4 ชั่วโมง ตักสารในหม้อบดใส่ลงในชามระเหย จากนั้นนำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ทำการบดสารที่อบได้ด้วยโกรงบดสาร และนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. ตรวจสอบลักษณะของสารที่ได้โดย

6.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค XRF

การเตรียมตัวอย่าง

- นำสารตัวอย่างมาบดด้วยครกบดจนละเอียด จากนั้นนำไปชั่งให้มีน้ำหนัก 2.5 กรัม ผสมกับกรดบอริก 2.5 กรัม เพื่อให้น้ำหนักรวมเป็น 5 กรัม
- นำสารตัวอย่างและกรดบอริกใส่ลงในถ้วยบดของเครื่องบดผสมตัวอย่าง เพื่อบดผสมให้สารทั้ง 2 เป็นเนื้อเดียวกัน
- ตักสารที่ผสมแล้วใส่ลงในที่ใส่ตัวอย่าง (Sample holder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำ Sample holder ที่ใส่สารตัวอย่างแล้ว นำมาอัดด้วยเครื่องอัด โดยตั้งแรงอัดไว้ที่ 150 kN ประมาณ 5 นาที
- นำสารตัวอย่างที่อัดเรียบร้อยแล้วไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF

6.2 วัสดุภาคที่เป็นผลึกโดยเทคนิค XRD

- นำสารตัวอย่างมาบดด้วยครกบดจนละเอียด
- อัดสารให้แน่นบน Sample holder โดยให้มีผิวหน้าที่มีระดับเดียวกันกับขอบของ Sample holder

6.3 ความหนาแน่นของ CaSiO_3 ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ฟิสิกโนมิเตอร์

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่น [24]

$$D_s = \left[\frac{W_1 - W_0}{(W_3 - W_0) - (W_2 - W_1)} \right] (D_L - D_A) + D_A$$

โดย D_s = ความหนาแน่นของ CaSiO_3 (g/cm^3)

D_A = ความหนาแน่นของอากาศ (g/cm^3)

D_L = ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3)

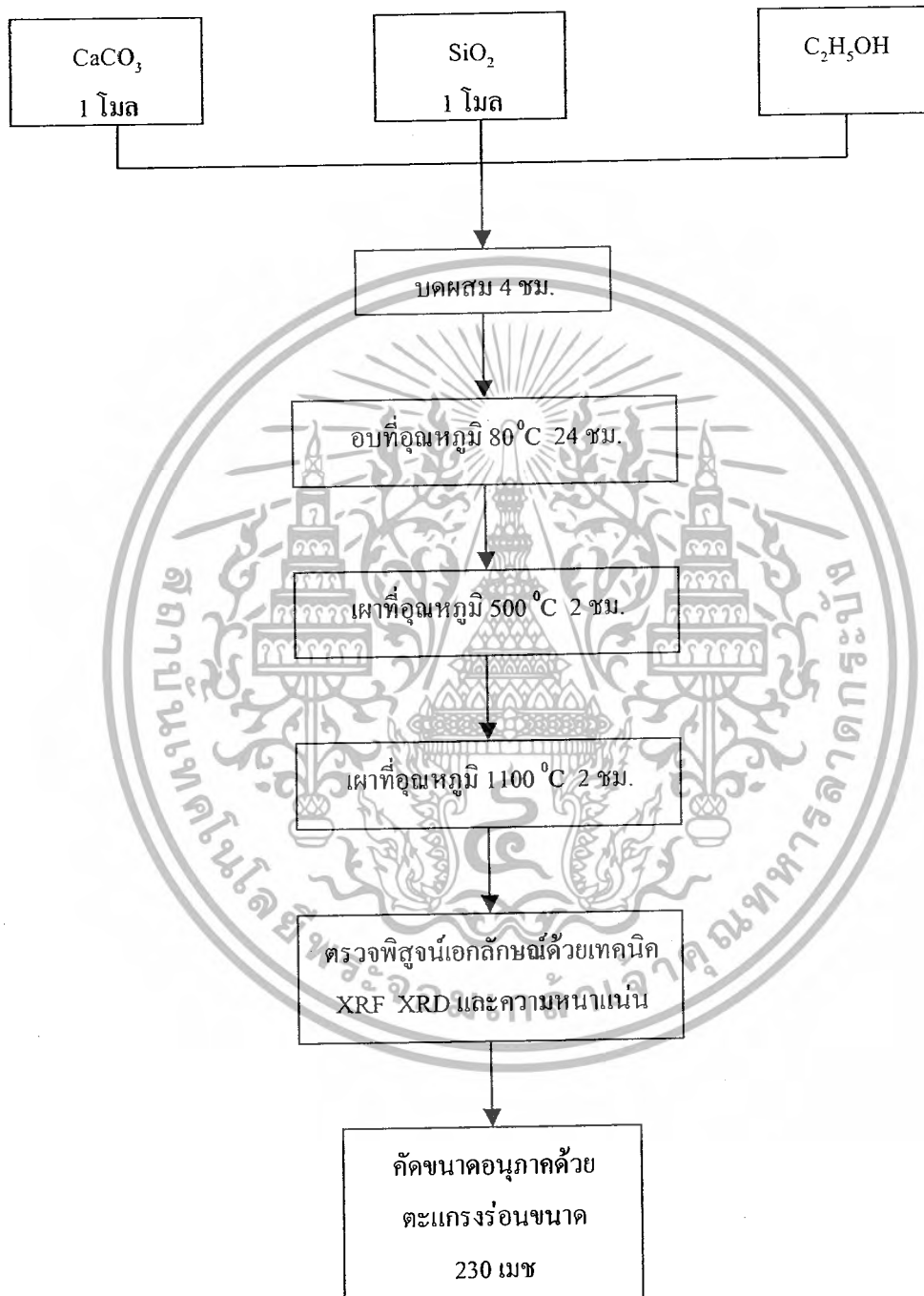
W_0 = น้ำหนักฟิสิกโนมิเตอร์เปล่า (g)

W_1 = น้ำหนักรวมของฟิสิกโนมิเตอร์และ CaSiO_3 (g)

W_2 = น้ำหนักรวมของฟิสิกโนมิเตอร์ CaSiO_3 และน้ำกลั่น (g)

W_3 = น้ำหนักรวมของฟิสิกโนมิเตอร์ และน้ำกลั่น (g)

7. ทำการตัดขนาดอนุภาคของสารที่เผาได้ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 230 เมช



รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2. การเตรียมวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃

สัดส่วนการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO₃) ในถังพลาสติก แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรผสมของ HDPE กับ CaSiO₃

สูตรที่	สัดส่วนในการผสม (โดยปริมาตร)
1	100%HDPE
2	HDPE + 10%CaSiO ₃
3	HDPE + 15%CaSiO ₃
4	HDPE + 20%CaSiO ₃

- ตั้งอุณหภูมิเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอยู่ที่ 185-200 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นโซนละ 5 °C
- เมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการ ค่อยๆเทส่วนผสมที่เตรียมดังตารางที่ 3.2 ลงในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน โดยใช้ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที
- หลังจากของผสมที่เตรียมได้เย็นตัวแล้ว นำไปตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ด

3.3.3. การขึ้นรูปชิ้นงาน

- ตั้งอุณหภูมิที่เครื่องอัดขึ้นรูป 200 °C
- นำของผสมที่ตัดเป็นเม็ดเรียบร้อยแล้วใส่ลงในแม่แบบ (Mold) รูปสี่เหลี่ยมตามขนาดที่ต้องการใช้ในการทดสอบ
- นำแม่แบบใส่เครื่องอัดขึ้นรูป เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการอัดเย็นต่อเป็นเวลา 5 นาที

3.3.4 การหาปริมาณของแคลเซียมซิลิเกต ในวัสดุประกอบที่เตรียมได้

- นำครุชิวีลพอร์ทเลนซ์เปล่ามาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักครุชิวีลด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- นำวัสดุประกอบที่เตรียมได้ ใส่ในครุชิวีลแล้วชั่งน้ำหนัก
- นำครุชิวีลที่มีชิ้นงานอยู่มาเผาด้วยตะเกียงเบนเซนเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

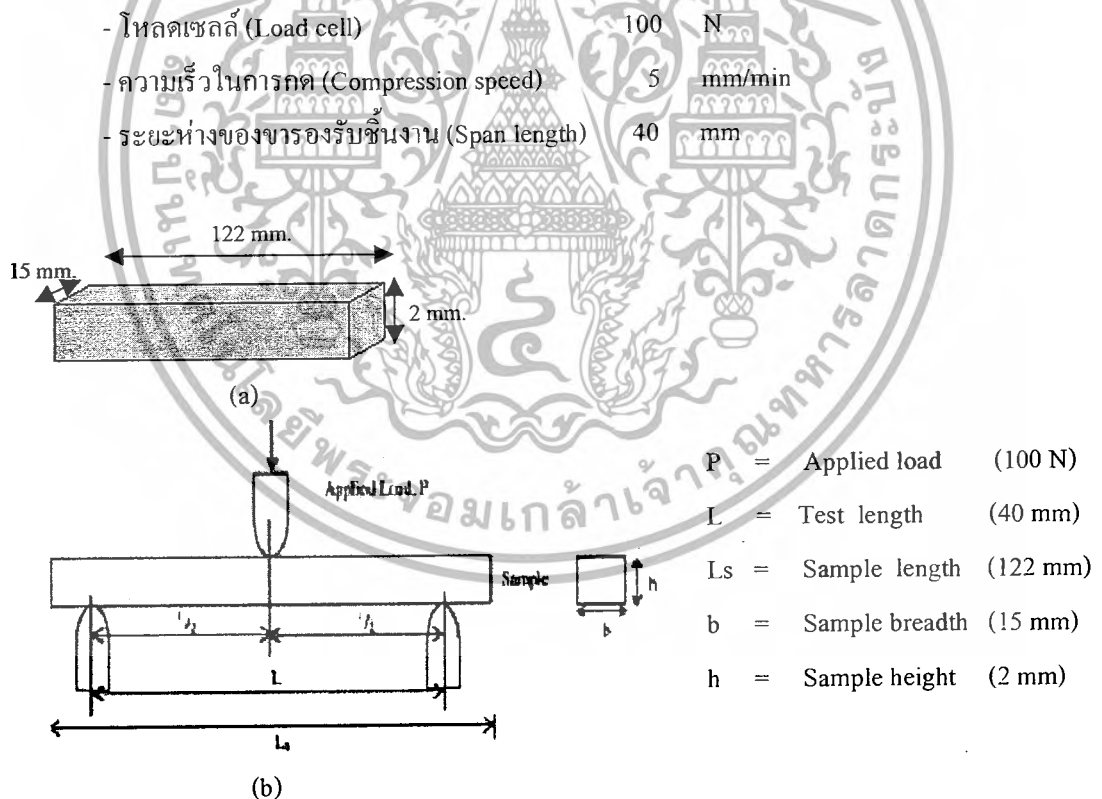
4. คำนวณหาปริมาณที่แน่นอนของ CaSiO_3 ดังนี้

$$\frac{\text{น้ำหนักหลังเผา (g)}}{\text{น้ำหนักก่อนเผา (g)}} \times 100 = \text{ปริมาณสารที่เหลืออยู่}$$

3.3.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3

3.3.5.1 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ [25]

การทดสอบหาความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) โดยใช้เครื่องทดสอบบนเนกประสงค์ และใช้ระบบการให้แรง 3 จุด (Three — point loading system) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นงานตัวอย่างละ 8 ชิ้น ขนาดประมาณ $2 \times 15 \times 122 \text{ mm}^3$ ภาวะที่ใช้ทดสอบเป็นดังนี้



รูปที่ 3.2 (a) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบสมบัติความโค้งงอ

(b) ระบบการทดสอบสมบัติความโค้งงอโดยระบบการให้แรง 3 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่ใช้ในการคำนวณความแข็งแรงโค้งงอ และโมดูลัสโค้งงอมีดังนี้

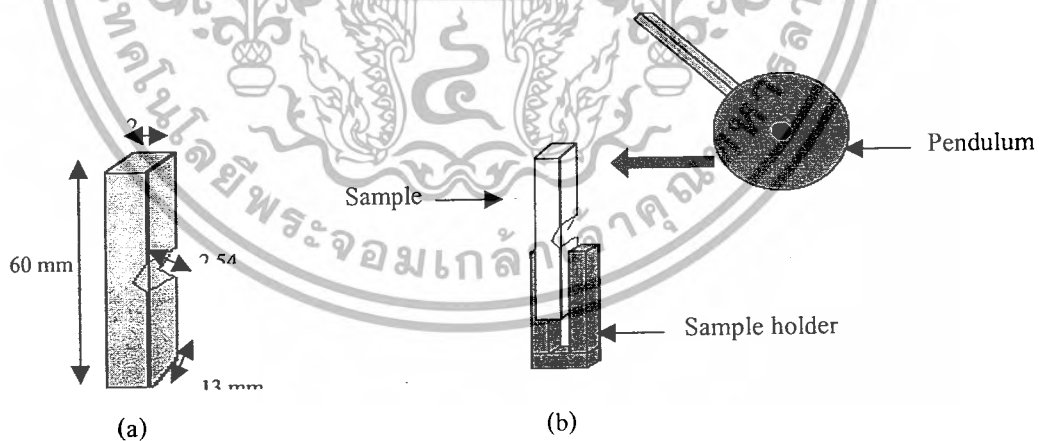
$$\text{ความแข็งแรงโค้งงอ} = \frac{1.5FL}{bh^3}$$

$$\text{โมดูลัสโค้งงอ} = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

- เมื่อ F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงาน โค้งงอ (N)
 L คือ ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (mm)
 B คือ ความกว้างของตัวอย่าง (mm)
 H คือ ความหนาของตัวอย่าง (mm)
 ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (N)
 Δd คือ ระยะกดโค้งงอในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (mm)

3.3.5.2 ความแข็งแรงกระแทก [25]

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) แบบ Notch Izod โดยใช้เครื่องวัดแรงกระแทก เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 8 ชิ้นงาน ขนาดประมาณ $2 \times 13 \times 60 \text{ mm}^3$ และมีความลึกของรอยบาก 2.54 mm



รูปที่ 3.3 (a) ตัวอย่างชิ้นงาน Izod ที่มีรอยบาก

(b) การทดสอบแบบ Notch Izod Impact

ความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (IS)} = W / A$$

เมื่อ IS คือ ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)

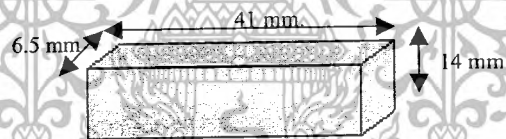
W คือ พลังงานกระแทก (kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2)

3.3.5.3 มอดูลัสกดอัด [25]

การทดสอบมอดูลัสกดอัด (Compressive modulus) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D695 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 8 ชิ้นงาน ขนาดประมาณ $14 \times 6.5 \times 41 \text{ mm}^3$ ภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 30 กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการกด (Compression speed) 2 มิลลิเมตร/นาที (mm/min)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบมอดูลัสกดอัด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณมอดูลัสกดอัด มีดังนี้

$$\text{มอดูลัสกดอัด} = \frac{\Delta F / A}{\Delta L / L_0}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

L_0 คือ ความหนาเริ่มต้นของตัวอย่าง (mm)

ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (N)

ΔL คือ ระยะกดอัดในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.4 ความแข็งกด [25]

การทดสอบความแข็งกด (Hardness) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D785 โดยในการทดสอบใช้มาตรฐาน Shore D ลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีความเรียบ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 mm ใช้เวลากด 5 s จึงอ่านค่าได้ โดยทำการทดสอบ 20 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง

3.3.6 สมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ HDPE / CaSiO₃

นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 200 °C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 20 °C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้นตามมาตรฐาน ASTM D 3417 [25] ศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของชิ้นงาน

การคำนวณหา Heat of melting (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\Delta H_{\text{normalise}} = \frac{\Delta H_f \times 100}{100 - \% \text{ โดยน้ำหนักของ CaSiO}_3}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_{\text{normalised}} \times 100}{\Delta H_f^0}$$

เมื่อ ΔH_f คือ Heat of fusion ของ HDPE ที่ได้จากเครื่อง
 $\Delta H_{\text{normalised}}$ คือ Heat of fusion ของ HDPE เมื่อมีปริมาณของ HDPE 100% โดยน้ำหนัก
 ΔH_f^0 คือ Heat of fusion ของ PE 100% โดยน้ำหนัก มีค่า 293 J/g

3.3.7 สัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาศึกษาสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลวและทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทอง และนำมาส่อง SEM ต่อไป เพื่อศึกษาการกระจายตัวของ CaSiO₃

3.3.8 ทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ ที่

สังเคราะห์ได้ในระบบจำลองร่างกาย [26, 27]

3.3.8.1 การเตรียมสารละลายที่มีองค์ประกอบ ความเข้มข้นของอนินทรีย์ไอออน และค่าความเป็นกรด-เบส ใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์ (Simulated Body Fluid, SBF)

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SBF ประกอบด้วย NaCl, NaHCO₃, KCl, K₂HPO₄ • 3H₂O, MgCl₂ • 6H₂O, 1M HCl, CaCl₂, Na₂SO₄ และ (CH₂OH)₃CNH₂ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SBF [24, 25]

สารเคมี	ปริมาณ
1. NaCl	15.992 g
2. NaHCO ₃	0.700 g
3. KCl	0.448 g
4. K ₂ HPO ₄ • 3H ₂ O	0.456 g
5. MgCl ₂ • 6H ₂ O	0.612 g
6. 1M HCl	80 ml
7. CaCl ₂	0.556 g
8. Na ₂ SO ₄	0.144 g
9. (CH ₂ OH) ₃ CNH ₂	12.116 g

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายมีดังนี้

1. จุ่มบีกเกอร์พลาสติกขนาด 3000 มิลลิลิตร ที่บรรจุน้ำกลั่น 1400 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 36-37 °C ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
2. ค่อยๆ ละลายสารเคมีที่ละลายลงในน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ ตั้งแต่สารตัวที่ 1 จนถึงสารตัวที่ 8 แต่ใส่สารตัวที่ 6 เพียงครั้งเดียว พร้อมวัดค่า pH ของสารละลายในระหว่างการผสม (ค่า pH ควรอยู่ประมาณ 1-2)
3. เติมสารตัวที่ 9 ลงไปที่ละน้อย จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH ประมาณ 7.3-7.4 จากนั้นจึงเติมสารตัวที่ 6 ที่เหลือเพื่อปรับค่า pH เป็น 7.3 (ค่า pH ไม่ควรเกิน 7.5 เพราะจะทำให้เกิดการตกตะกอน) ทำเช่นนี้สลับกันจนกระทั่งสารตัวที่ 9 หมด ค่า pH ควรสูงกว่า 7.3
4. ปรับ pH ให้เป็น 7.4 ด้วย 1M HCl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ล้าง pH electrode ด้วยน้ำกลั่น โดยให้น้ำล้างไหลลงไปนบีกเกอร์ข้างต้น
6. นำสารละลายที่เตรียมได้ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร ล้างบีกเกอร์และปรับปริมาตรสารละลายในขวดวัดปริมาตรให้เป็น 2 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น
7. เก็บสารละลาย SBF ที่ได้ไว้ในตู้เย็น (อุณหภูมิประมาณ 5 °C)

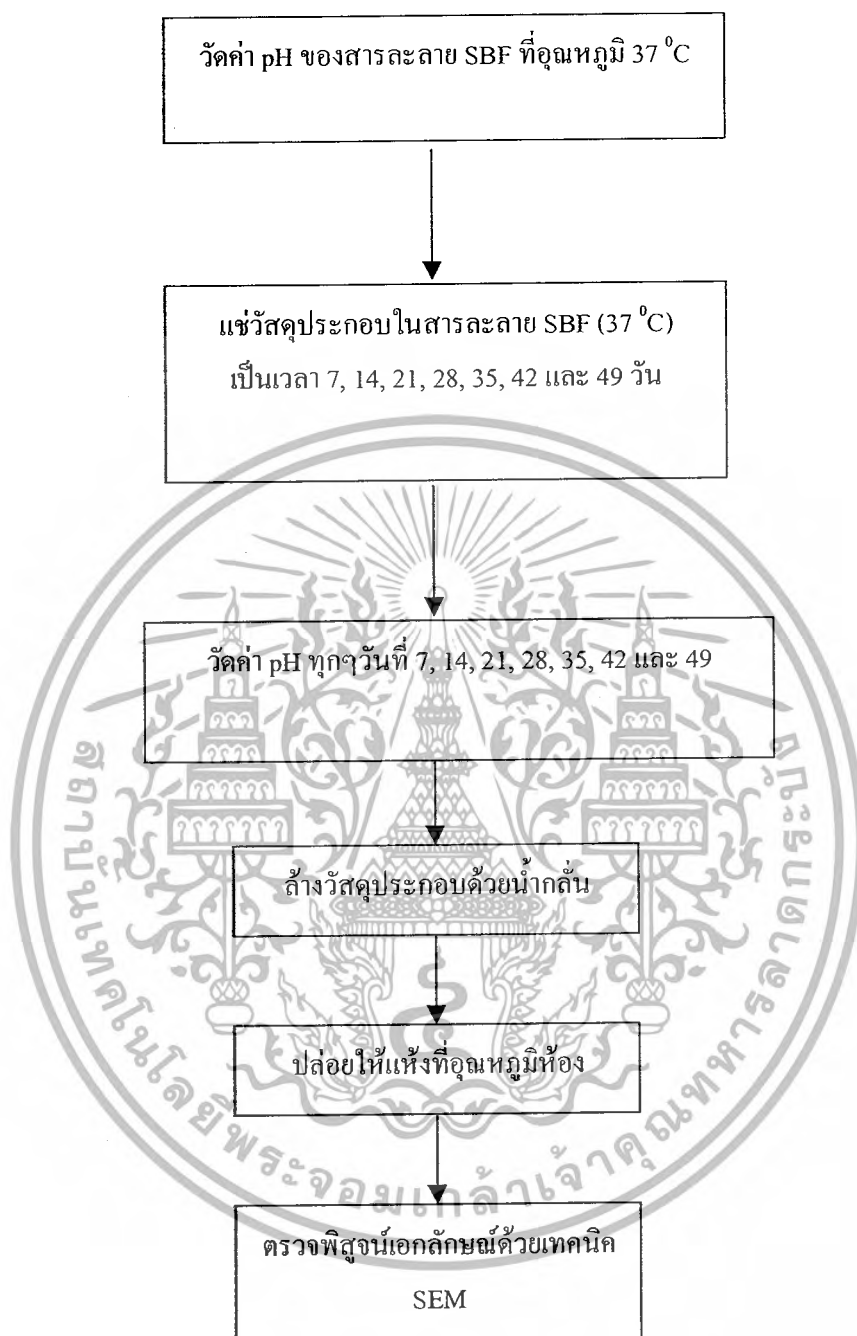
ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของอนินทรีย์ไอออนในสารละลาย SBF และ Blood plasma [1]

สารละลาย	Ion concentration (mM)						
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ³⁻	HPO ₄ ²⁻
SBF	142.0	5.0	1.5	2.5	148.8	4.2	1.0
Blood plasma	142.0	5.0	1.5	2.5	103.0	27.0	1.0

3.3.8.2 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ ในระบบสถานะคงที่ (Static system)

1. ขัดผิวหน้าของวัสดุประกอบระหว่าง HDPE/CaSiO₃ ที่มีขนาด 1.7 x 1 x 1 mm. โดยใช้กระดาษทรายขนาด 220 400 600 800 และ 1000 ตามลำดับ
2. วัดค่า pH ของสารละลาย SBF ที่อุณหภูมิ 37 °C (อุณหภูมิร่างกาย)
3. แช่วัสดุประกอบลงในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7 14 21 28 35 42 และ 49 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 37 °C และทำการวัดค่า pH ของสารละลายเมื่อครบกำหนดตามวันแช่
4. เมื่อครบกำหนดแยกวัสดุประกอบออกจากสารละลาย SBF และวัดค่า pH ของสารละลาย
5. ล้างวัสดุประกอบด้วยน้ำกลั่น ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
6. นำวัสดุประกอบไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผนงานการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้ในระบบสถานะคงที่ (Static system)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

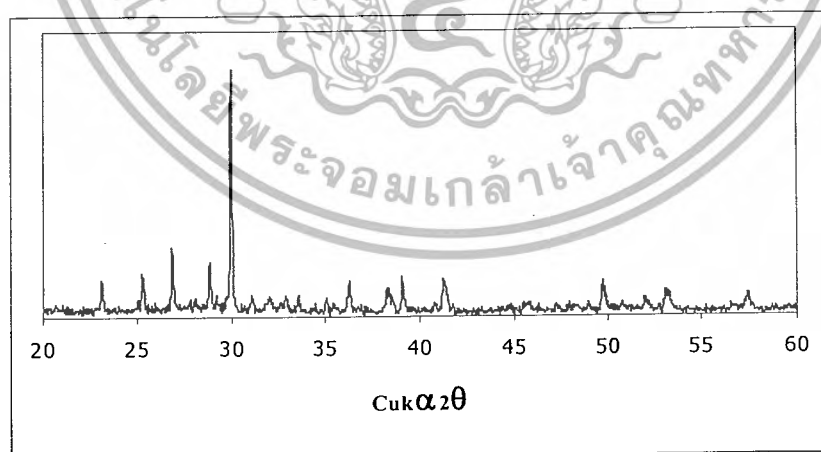
โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของ CaSiO₃ ในช่วง 0 – 20% โดยปริมาตร ซึ่งสมบัติที่ทดสอบได้แก่ การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่เตรียมได้ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และสมบัติความว่องไวทางชีวภาพได้ ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่เตรียมได้

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและวิฤภาคที่เป็นผลึกของสารที่เตรียมได้

เมื่อนำ CaSiO₃ ที่เตรียมได้จากการบดผสมเชิงกล และผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค XRF พบว่า CaSiO₃ ที่เตรียมได้มี CaO และ SiO₂ อยู่ในช่วง 52-56% และ 43-48% โดยน้ำหนักตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนมีค่าเฉลี่ยเป็น 1.28 (ดังตารางในภาคผนวก ก)

เมื่อนำ CaSiO₃ ที่เตรียมได้นี้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าได้พิก CaSiO₃ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มีพิกสำคัญที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 23.2, 25.3, 26.8, 28.9, 30, 36.2, 39.1, 41.3 และ 49.8 องศา ซึ่งเป็นพิกของ CaSiO₃ ชนิด β-wollastonite



รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CaSiO₃ ที่เตรียมได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณที่แน่นอนของ CaSiO_3 ในวัสดุประกอบ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ CaSiO_3 ในวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3

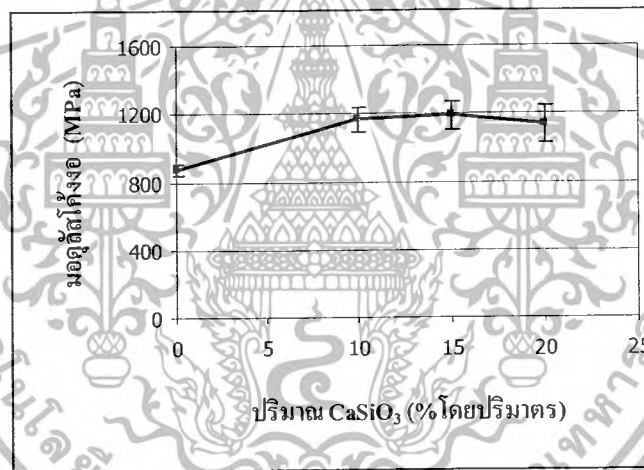
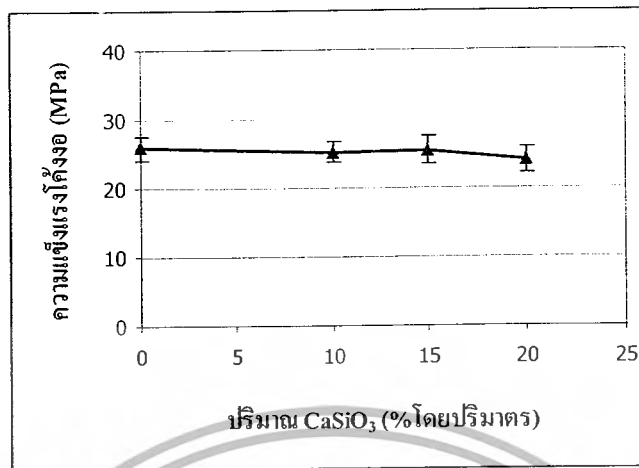
ปริมาณ CaSiO_3 ในวัสดุประกอบ		ปริมาณ CaSiO_3 ที่แน่นอนในวัสดุประกอบ (%โดยน้ำหนัก)
% โดยปริมาตร	% โดยน้ำหนัก	
0	0	0
10	24	24
15	33	31
20	42	42

จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงปริมาณ CaSiO_3 ที่แน่นอนในวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 ที่ได้จากการเผา จะเห็นว่าปริมาณของ CaSiO_3 ที่มีอยู่จริงในวัสดุประกอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ แสดงว่าสถานะในการผสม ทั้งอุณหภูมิ และความเร็วรอบในการผสมของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ เป็นสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุประกอบ

4.2 สมบัติเชิงกล

4.2.1 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดูลัสโค้งงอ

รูปที่ 4.2 (a) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงโค้งงอ และมอดูลัสโค้งงอของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 ตามลำดับ พบว่าการเติม CaSiO_3 ในปริมาณ 0- 20% โดยปริมาตร ไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก แสดงว่าวิฤภาคต่อเนื่องของระบบซึ่งก็คือ HDPE ยังคงมีความต่อเนื่องอยู่ ทำให้สามารถส่งถ่ายแรงได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนการเติม CaSiO_3 ลงใน HDPE บริสุทธิ์มีผลทำให้ค่ามอดูลัสโค้งงอเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า CaSiO_3 ซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีความแข็งแรงสูง เป็นผลให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงานยากขึ้น ค่ามอดูลัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ CaSiO_3 เป็น 10-20% โดยปริมาตร ค่ามอดูลัสมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งตามทฤษฎีค่ามอดูลัสของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่ง จากนั้นค่ามอดูลัสจะลดลง แต่จากผลการทดลองยังไม่เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ HDPE ผสมกับ CaSiO_3 ได้ยาก การกระจายตัวของ CaSiO_3 ใน HDPE ไม่ได้โดย CaSiO_3 มีแนวโน้มที่จะจับกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) มากกว่าเป็นอนุภาคเดี่ยว (ดังรูปที่ 4.6) จากผลดังกล่าวจึงยังไม่สรุปถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสได้

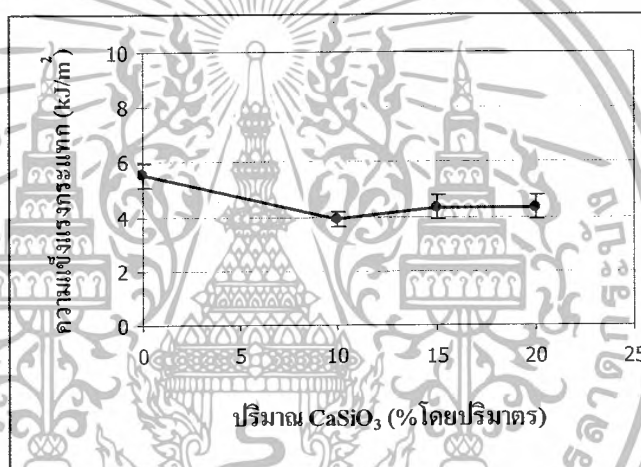


รูปที่ 4.2 สมบัติทางการโค้งงอของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3
 (a) ความแข็งแรงโค้งงอ (b) มอดูลัสโค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความแข็งแรงกระแทก

รูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2) กับปริมาณ CaSiO_3 พบว่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบมีค่าลดลง เมื่อมีการผสม CaSiO_3 ใน HDPE เนื่องจากการวัดความแข็งแรงกระแทกเป็นการให้แรงกระทำที่ความเร็วสูง ดังนั้นโอกาสที่วัสดุประกอบจะเปลี่ยนรูปในเวลาอันสั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจึงมีน้อย ซึ่งในที่นี้สารที่รับแรง และสามารถถ่ายเทแรงไปได้ คือ HDPE การมี CaSiO_3 ซึ่งเปลี่ยนรูปได้ยากต่างจาก HDPE ทำให้ HDPE ไม่สามารถถ่ายเทแรงได้อย่างต่อเนื่อง ความสามารถในการรับแรงกระทำอย่างรวดเร็วมีค่าน้อยลงด้วย แต่การใช้ CaSiO_3 อยู่ในช่วง 10-20 % โดยปริมาตร ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ

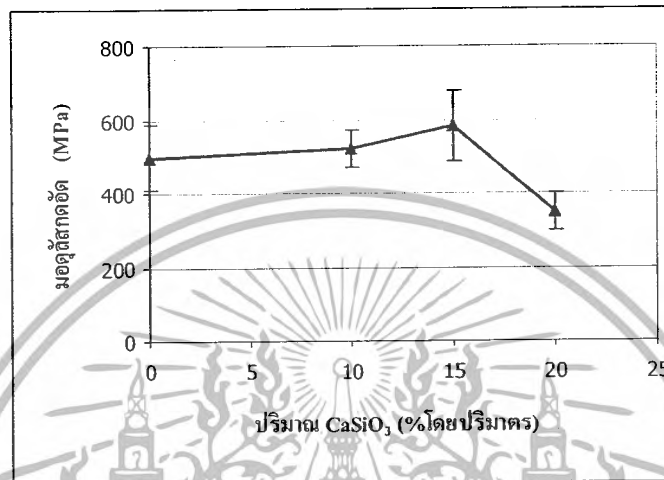


รูปที่ 4.3 ความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3

4.2.3 มอดุลัสกดอัด

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกดอัด กับปริมาณ CaSiO_3 พบว่าค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีค่าเบี่ยงเบนค่อนข้างกว้างเมื่อมี CaSiO_3 0-15% โดยปริมาตร เนื่องจาก CaSiO_3 ที่เติมลงไปนั้นเป็นอนุภาคของแข็งจึงทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุประกอบเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้ต้องใช้ความเค้นสูงในการทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียดหรือเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง ค่ามอดุลัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ CaSiO_3 15% เป็น 20% โดยปริมาตร มอดุลัสมีค่าลดลง ซึ่งตามทฤษฎีค่ามอดุลัสของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งจากนั้นค่ามอดุลัสจะลดลง และจากผลการทดลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่สังเกตได้ว่าผลการทดลองในทุกตัวอย่างมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วงที่กว้าง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการผสม HDPE กับ

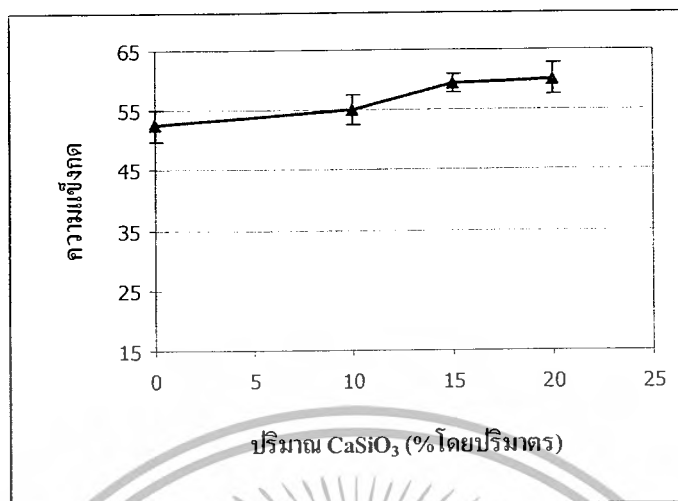
CaSiO₃ ที่เกินไปได้ยาก ทำให้อาจมีช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อนของ CaSiO₃ ด้วยตัวเองและช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อนของ CaSiO₃ กับ HDPE ซึ่งช่องว่างนี้อาจมีผลทำให้ค่าความเค้นและความเครียดที่หาได้ไม่สม่ำเสมอ ค่ามอดูลัสที่ได้จึงมีความเบี่ยงเบนสูง



รูปที่ 4.4 มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃

4.2.4 ความแข็งกด

รูปที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งกด (Hardness) ของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ โดยค่าความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติม CaSiO₃ ลงไปใน HDPE เนื่องจากการทดสอบความแข็งกดเป็นการออกแรงกระทำที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งที่ผิวหน้ามีเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ปกคลุมอยู่ เมื่อให้แรงกระทำกับชิ้นงานสูตรที่มี CaSiO₃ มากขึ้นจึงมีโอกาสกดพบบริเวณที่มี CaSiO₃ มากขึ้น ค่าความแข็งกดจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่จากการทดลองไม่เห็นการเพิ่มขึ้นที่ชัดเจนจากที่ CaSiO₃ 15% เป็น 20% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการผสมและการกระจายตัวของ CaSiO₃ เพราะเมื่อมี CaSiO₃ มาก CaSiO₃ จะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนการกระจายตัวไม่ดี ดังนั้นการกดพบกลุ่มก้อนของ CaSiO₃ ที่พื้นผิวชิ้นงาน จึงมีโอกาสลดลง ค่าความแข็งกดที่มี CaSiO₃ 15% และ 20% จึงไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.5 ความแข็งแรงของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃

4.3 สมบัติทางความร้อน

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ เพื่อศึกษาผลของปริมาณ CaSiO₃ ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของ HDPE จะได้ค่า อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃

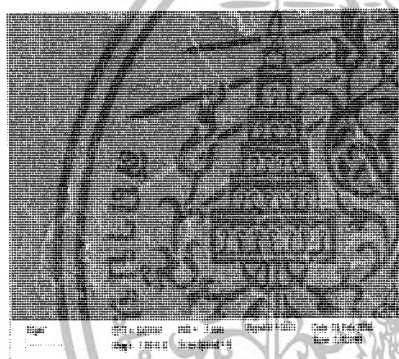
HDPE/ CaSiO ₃ (% โดยปริมาตร)	T_m (°C)	T_c (°C)	เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก
100/0	134	116	59
90/10	126	117	66
85/15	126	117	62
80/20	125	117	60

การผสม CaSiO₃ ลงใน HDPE ทำให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ HDPE ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าอนุภาคของ CaSiO₃ ที่เติมลงไปจะทำให้ HDPE เกิดผลึกที่มีขนาดเล็กพร้อมกัน ผลึกที่ได้มีความสมบูรณ์ลดลง ส่วนค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) ที่มี CaSiO₃ ผสมอยู่มิค่าไม่เปลี่ยนแปลงจาก HDPE บริสุทธิ์ นอกจากนั้นปริมาณของ CaSiO₃ ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อ T_m

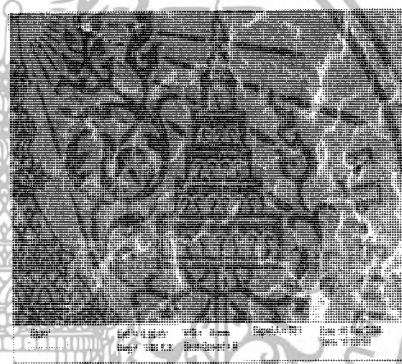
และ T_c แต่อย่างไรก็ตาม ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในทุกตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการใช้ CaSiO_3 ทำให้ได้ผลึกขนาดเล็กแต่มีจำนวนผลึกมาก ในขณะที่ 100%HDPE จะได้ผลึกขนาดใหญ่ แต่มีจำนวนผลึกน้อยกว่า จึงทำให้สรุปได้ว่า ความแตกต่างในเรื่องสมบัติเชิงกลที่พบในสารตัวอย่าง ไม่ได้เกิดขึ้นจากผลของความเป็นผลึก แต่ในสูตร 90/10 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกแตกต่างจากสูตรอื่น คาดว่าเป็นผลของชิ้นตัวอย่างที่นำไปทดสอบ โดยบริเวณที่นำไปทดสอบอาจมี CaSiO_3 อยู่ในปริมาณน้อยกว่าที่คาดไว้ ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ได้จึงคลาดเคลื่อน

4.4 สัณฐานวิทยา

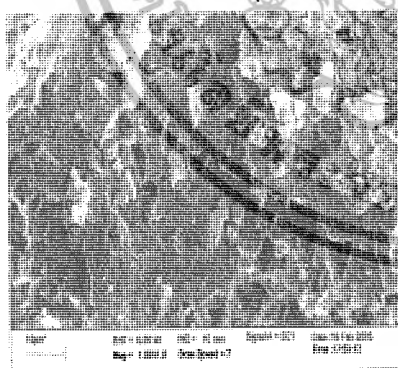
การศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 เพื่อศึกษาการกระจายตัวของ CaSiO_3 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



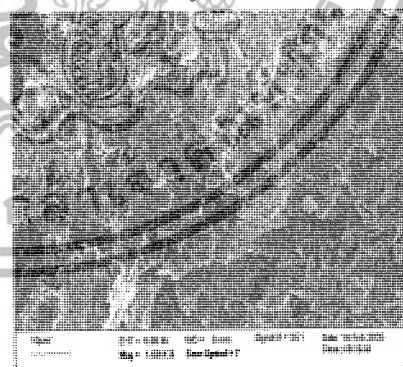
(a) HDPE บริสุทธิ์



(b) CaSiO_3 10% โดยปริมาตร



(c) CaSiO_3 15% โดยปริมาตร

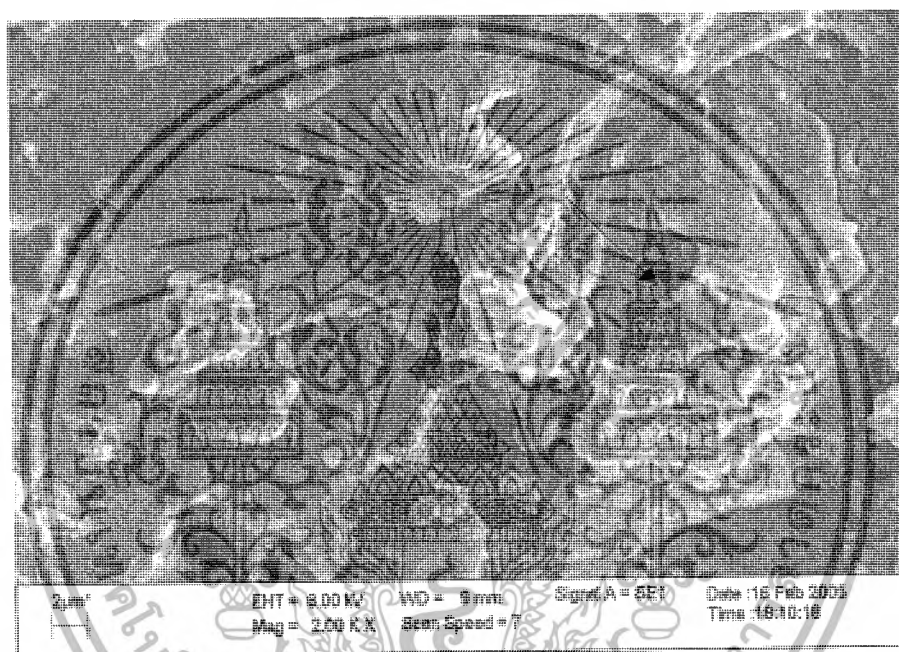


(d) CaSiO_3 20% โดยปริมาตร

รูปที่ 4.6 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 เมื่อปริมาณ CaSiO_3 เพิ่มขึ้น พบว่า CaSiO_3 มีแนวโน้มที่จะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก CaSiO_3 เป็นสารอนินทรีย์ที่มีขั้วจึงมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค CaSiO_3 ค้ำยันกันมากกว่าแรงดึงดูดระหว่าง HDPE/ CaSiO_3 ซึ่งเป็นวัสดุภาคที่ไม่มีขั้ว ทำให้ CaSiO_3 กระจายตัวใน HDPE ได้ค่อนข้างยาก นอกจากนี้ในบางตำแหน่งของภาพ SEM ยังพบพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นหลุม ซึ่งเกิดจากการหลุดออกของอนุภาค CaSiO_3 จากลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า CaSiO_3 และ HDPE ไม่มีแรงกระทำระหว่างวัสดุภาค เนื่องจากความแตกต่างในเรื่องขั้วดังที่กล่าวมา



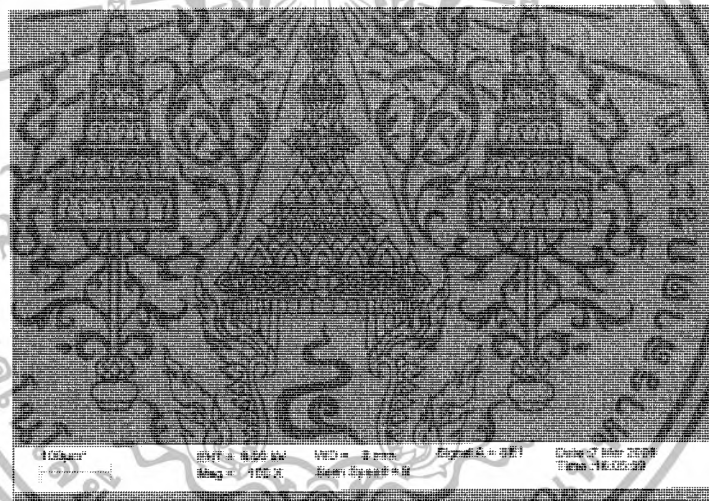
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 (20 % โดยปริมาตร) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้น (ดังรูปที่ 4.7) จะสังเกตเห็นรอยต่อระหว่างวัสดุภาค HDPE และ CaSiO_3 ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นจุดอ่อนแอของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงกระทำได้น้อยลง

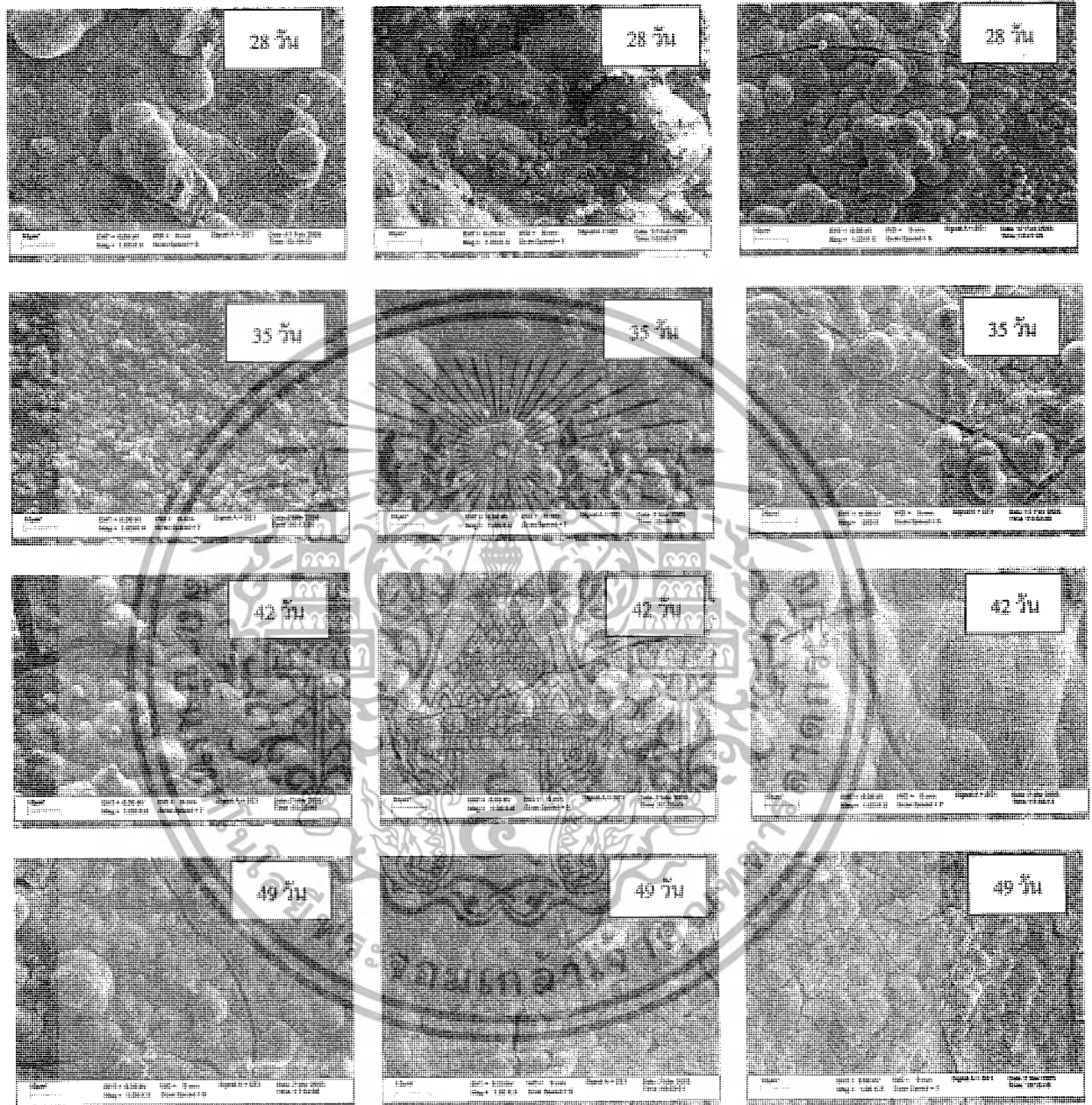
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สมบัติความว่องไวทางชีวภาพ

ในการศึกษาสมบัติความว่องไวทางชีวภาพทำโดยการแช่สารตัวอย่างในระบบสภาวะคงที่ของสารละลาย SBF ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นระยะเวลาต่างๆ เมื่อแช่ชิ้น HDPE บริสุทธิ์ เป็นเวลา 28 วัน ไม่พบการก่อตัวของ HAp บนพื้นผิวของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทั้งนี้เนื่องจาก HDPE เป็นวัสดุที่มีสมบัติเฉื่อยในระบบจำลองของร่างกาย แต่เมื่อแช่วัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ ในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7, 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 พบว่าที่พื้นผิวของวัสดุประกอบภายหลังการแช่สารละลาย SBF มีการก่อผลึก HAp ซึ่งเกรนมีรูปร่างทรงกลมคล้ายดอกกะหล่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะของผลึก ที่ก่อตัวขึ้นจากสารละลาย SBF



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุ HDPE ภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา 28 วัน ที่กำลังขยาย 100 เท่า



(a)

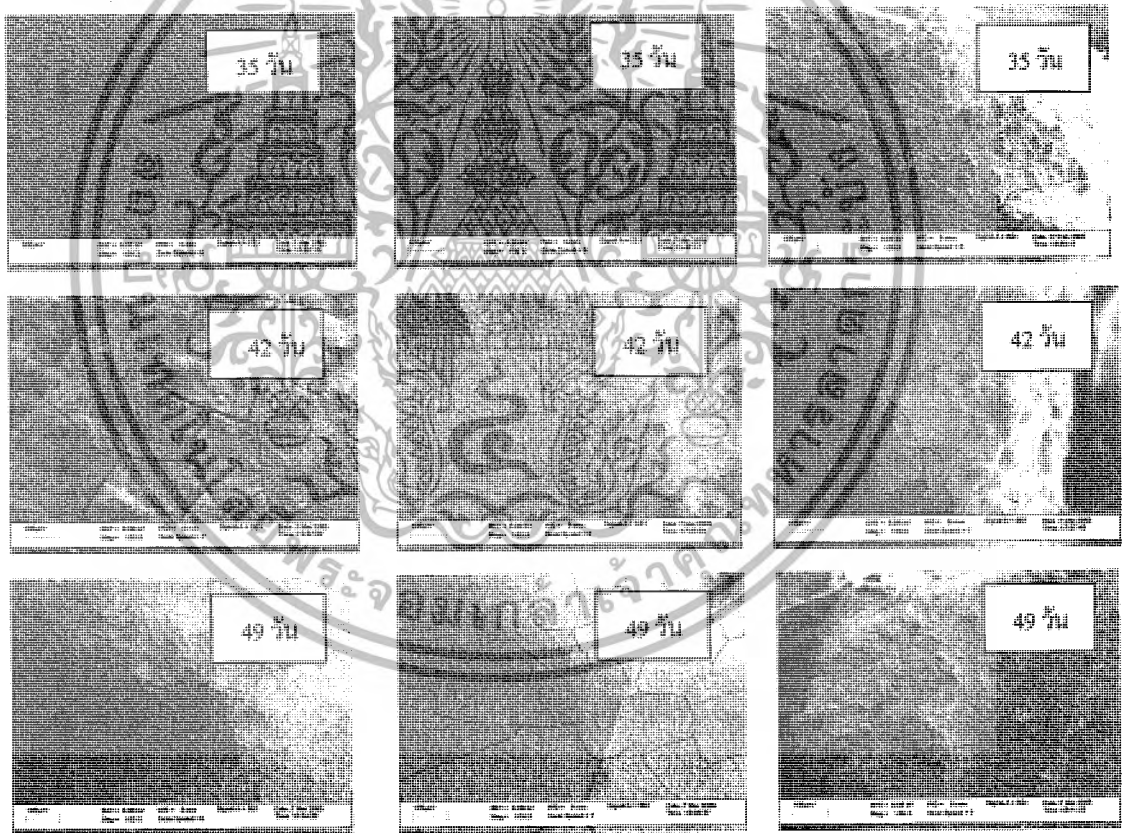
(b)

(c)

รูปที่ 4.9 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปริมาณ CaSiO_3 ในวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการก่อตัวของ HAp สูงขึ้น โดยสังเกตได้จากในช่วง 7 วันแรก การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค บนพื้นผิวสารตัวอย่างทั้งสามชิ้นยังไม่ชัดเจนนัก เมื่อแช่ SBF เป็นเวลา 14 วัน พบว่ามีการก่อตัวของชั้น HAp บนพื้นผิวของวัสดุประกอบที่มี CaSiO_3 15 และ 20% โดยปริมาตร ในขณะที่ไม่พบการก่อตัวของ HAp บนวัสดุประกอบที่มี CaSiO_3 10% โดยปริมาตร แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการแช่เป็น 21 วัน จะสังเกตเห็นการก่อตัวของ HAp บนวัสดุประกอบที่มี CaSiO_3 10% โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่วัสดุประกอบจะมีการก่อตัวของ HAp เพิ่มขึ้น โดยจะมีการก่อตัวของอนุภาคใหม่ของ HAp บนพื้นผิวของชั้น HAp เดิม ดังจะเห็นได้จากวัสดุประกอบที่มี CaSiO_3 15 และ 20% โดยปริมาตร ภายหลังจากแช่เป็นเวลา 28 วัน และเมื่อแช่วัสดุประกอบเป็นระยะเวลานานขึ้น (35-49 วัน) จะพบชั้นของ HAp ปกคลุมพื้นผิวของวัสดุประกอบเกือบทั่วทั้งชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.10



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบภายหลังจากแช่ในสารละลาย SBF

รูป (a) CaSiO_3 10% โดยปริมาตร, (b) CaSiO_3 15% โดยปริมาตร และ (c) CaSiO_3 20% โดยปริมาตร โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ พบว่า CaSiO₃ สามารถเหนี่ยวนำให้วัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ เป็นวัสดุที่มีสมบัติความว่องไวทางชีวภาพได้ นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ กับเนื้อเยื่อกระดูก เมื่อนำวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ ไปใช้ในร่างกายมนุษย์ ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุคิบบในการผลิตวัสดุชีวภาพ สำหรับงานทางการแพทย์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของ CaSiO₃ ในช่วง 0-20% โดยปริมาตร และทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบในระบบจำลองของร่างกาย สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อมีการผสม CaSiO₃ ที่ 0-10% โดยปริมาตรลงใน HDPE ทำให้ค่ามอดูลัสโค้งงอ มอดูลัสกดอัด ความแข็งกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง และค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับวัสดุ HDPE ส่วนการเพิ่มปริมาณ CaSiO₃ 10-20% โดยปริมาตร ทำให้ค่าความแข็งกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงโค้งงอ มอดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ค่ามอดูลัสกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมี CaSiO₃ 10-15% โดยปริมาตร และมอดูลัสมีค่าลดลงเมื่อมี CaSiO₃ 20% โดยปริมาตร

2. จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบพบว่า การผสม CaSiO₃ 0-10% โดยปริมาตร ลงใน HDPE ทำให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ลดลง เปรอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และอุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ HDPE ส่วนการเพิ่มปริมาณ CaSiO₃ เป็น 10-20% โดยปริมาตร ทำให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ ความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลง

3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบที่เตรียมได้ พบว่า CaSiO₃ จะเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน มากกว่าที่จะกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว และที่ปริมาณ CaSiO₃ มากขึ้น การเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมีขนาดใหญ่มากขึ้น

4. จากการทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃ ที่เตรียมได้ พบว่าวัสดุประกอบสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อตัวของผลึก HAp และจากการก่อตัวของ HAp นี้ แสดงได้ว่าวัสดุมีสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงการเตรียมวัสดุประกอบโดยมีการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เช่น สารช่วยกระจายตัว สารช่วยผสม หรือสารคู่ควบ เพื่อปรับปรุงด้านสมบัติเชิงกล
2. ทำการเปลี่ยน HDPE จากแบบเม็ดให้เป็นแบบผง เพื่อให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันกับสัรตัวเติม ซึ่งจะส่งผลให้สารตัวเติมกระจายตัวใน HDPE ได้ดีขึ้น
3. ทำการเปลี่ยนเครื่องผสมให้เป็นเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูงๆ เพื่อให้มีการผสมที่ดีขึ้น
4. นำสารละลาย SBF ภายหลังการแช่วัสดุประกอบไปตรวจวิเคราะห์ เพื่อดูปริมาณการเปลี่ยนแปลงแคลเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออน เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของไอออนเนื่องจากวัสดุประกอบ
5. สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุประกอบ ภายหลังจากการแช่สารละลาย SBF ควรใช้เทคนิค EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy) ร่วมกับ SEM เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิวของวัสดุประกอบ เพื่อยืนยันได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่ามี HAp เกิดขึ้นจริงหรือไม่



เอกสารอ้างอิง

1. Rather, B.D. 1996. **Biomaterials Science: An Introduction To Materials In Medicine**, CA: Academic Press San Diego, California.
2. Aoki, H. 1994. **Medical Application of Hydroxyapatite**. Ishiyaky Euro America, Tokyo.
3. Liu , X , Ding ,C. and Paul ,K. Mechanism of apatite formation on Wollastonite coatings insimulated body fluids. **Biomaterials** 25 (2004) 1755-61.
4. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
5. Joon. P.B. 1979 **Biomaterial An Introduction**, Plenum Press, New York.
6. Hench , L.L and Wilson, J. 1993. **An Introduction To Bioceramics**, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd., Singapore.
7. Hench , L.L. 2002. **Biocomposites**. [Online]. Available: <http://www.bg.ic.ac.uk/Lectures/Hench/BioComp/chap3.html>
8. Peter, A.Ciullo. 2002. **Award and recognition wollastonite a versatile functional filler**. [Online]. Available: http://www.rtvanderbilt.com/awards_6.html
9. Lou, P. 2004. **Wollastonite – 1A Image**. [Online]. Available: <http://www.webmineral.com/specimens/picshow.Php?id=1104>
10. Nyco premium quality wollastonite. 1997-2004. **Physical properties**. [Online]. Available: http://www.nycominerals.com/cache/page_1048-1052.html
11. Amethyst Galleries, Inc. 1995 – 2004. **The mineral wollastonite**. [Online]. Available: <http://mineral.galleries.com/minerals/silicate/wollasto/wollasto.html>
12. Nyco premium quality wollastonite. 1997-2004. **Chemical properties**. [Online]. Available: http://www.nycominerals.com/cache/page_1048-1051.html
13. Nowotony, J. 1992. **Electronic ceramic Materials**, Trans Tech Publication, Switzerland.
14. Brinker C.J. and Scherer G.W. 1990. **Sol-gel Science-The Physics and chemistry of Sol-gel processing**, Academic Press, New York.
15. Cousin P. and Ross R.A. 1990. **Material Science and Engineering**, Academic Press, New York.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. Petrochemnext. 2001. **High density polyethylene (HDPE)**. [Online].Available:
<http://www.petrochemnext.Com/html files/HDPE.html>
17. Feldman, D. and Barbalata, A. 1996. **Synthetic Polymer : Technology, properties and application**. Chapman & Hall, London.
18. Wang, M. , Joseph, R. and Bonfield, W. Hydroxyapatite-polyethylene composite for bone substitution: effects of ceramic particle size and morphology. **Biomaterials** 19 (1998) 2357-66
19. Wang, M. , Deb, S. and Bonfield, W. Chemically coupled Hydroxyapatite-polyethylene composite:processing and characterization. **Mater Lett** 44 (2000) 119-24
20. Wang, M.,Bonfield, W. Chemically coupled hydroxyapatite-polyethylene composite: structure and properties. **Biomaterials** 22 (2001) 1311-1320
21. Siripannon, P. , Kameshima, Y. , Yasumori, A. , Okada, K. and Hayashi, S. Formation of hydroxyapatite on CaSiO_3 powders in simulated body fluid. **J. European Ceramic Society** 22 (2002) 511-20
22. Liu, X. and Ding, C. Morphology of apatite formed on surface of Wollastonite coating soaked insimulated body fluid. **Mater Lett** 57 (2002) 652-5
23. Juhasz, J.A. Mechanical properties of glass-ceramics A-W-polyethylene composites: effect of filler content and particle size. **Biomaterials** 25 (2004) 949-55
24. Reed, J.S. 1998. **Introduction To The Principles Of Ceramics Processing**. John Wiley & Sons, Inc. Singapore.
25. Shah, V. 1998. **Handbook of Plastics Testing Technology**, 2nd ed. Jonh Wiley & Sons, Inc. Canada.
26. Kokubo, T. 1993. **An Introduction to Bioceramics**, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd, Singapore.
27. Cho, S.B., Nakanishi, K., Kokubo, T., Soca, N., Ohtsuki, C., Nakamura, T., Kitsuki, T. and Yamamura, T. **J. AM. Ceram. Soc.** 78 (1995) 1769

ภาคผนวก ก

1. อัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของสารที่เตรียมได้

ตาราง ก-1 อัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของสารที่เตรียมได้

สาร	องค์ประกอบทางเคมี (%wt)		อัตราส่วนโมล Ca : SiO ₂
	CaO	SiO ₂	
1	55.9	43.4	1.38
2	53.5	46.3	1.25
3	51.9	47.8	1.16
4	55.4	43.5	1.36
	ค่าเฉลี่ย		1.28
	ค่าทางทฤษฎี		1.00

2. การคำนวณอัตราส่วนโมลของแคลเซียมต่อซิลิกอน

แคลเซียมที่ตรวจวัดได้อยู่ในรูปสารประกอบ CaO ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ

$$40.1 + 16 = 56.1 \sim 56$$

ซิลิกอนที่ตรวจวัดได้อยู่ในรูปสารประกอบ SiO₂ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ

$$28.1 + (16 \times 2) = 60.1 \sim 60$$

นำค่า % โดยน้ำหนักของ CaO และ SiO₂ ที่ได้จากเครื่อง XRF มาคำนวณ

เช่น CaSiO₃ ตัวอย่างที่ 1

สารประกอบ CaO	5 g	มี Ca	1 mol		
ถ้า CaO ที่วัดได้	55.9 g	มี Ca	$\frac{1 \times 55.9}{56}$	=	0.996 mol

สารประกอบ SiO ₂	60 g	มี P	1 mol		
----------------------------	------	------	-------	--	--

ถ้า SiO ₂ ที่วัดได้	43.4 g	มี P	$\frac{1 \times 43.4}{60}$	=	0.723 mol
--------------------------------	--------	------	----------------------------	---	-----------

60

เพราะฉะนั้นอัตราส่วน Ca : Si เท่ากับ $0.996 / 0.723 = 1.38$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

1. การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE

ตาราง ข-1 อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) เอนทัลปี และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของวัสดุประกอบ HDPE/CaSiO₃

HDPE/ CaSiO ₃		T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_f (J/g) (จากเครื่อง)	ΔH_n (J/g) (Normalised)	เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crys)
%โดยปริมาตร	% โดยน้ำหนัก					
100/0	100/0	134	116	173.37	173.37	59
90/10	76/24	126	117	147.74	194.42	66
85/15	67/33	126	117	120.51	181.00	62
80/20	58/42	125	117	103.47	177.08	60

$$\Delta H_{\text{normalised}} = \frac{\Delta H_f \times 100}{100 - \% \text{ โดยน้ำหนักของ CaSiO}_3}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_{\text{normalised}} \times 100}{\Delta H_f^0}$$

ตัวอย่างการคำนวณในสูตร 100/0

$$\Delta H_{\text{normalised}} = \frac{173.37 \times 100}{100 - 0} = 173.37$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{173.37 \times 100}{293} = 59$$

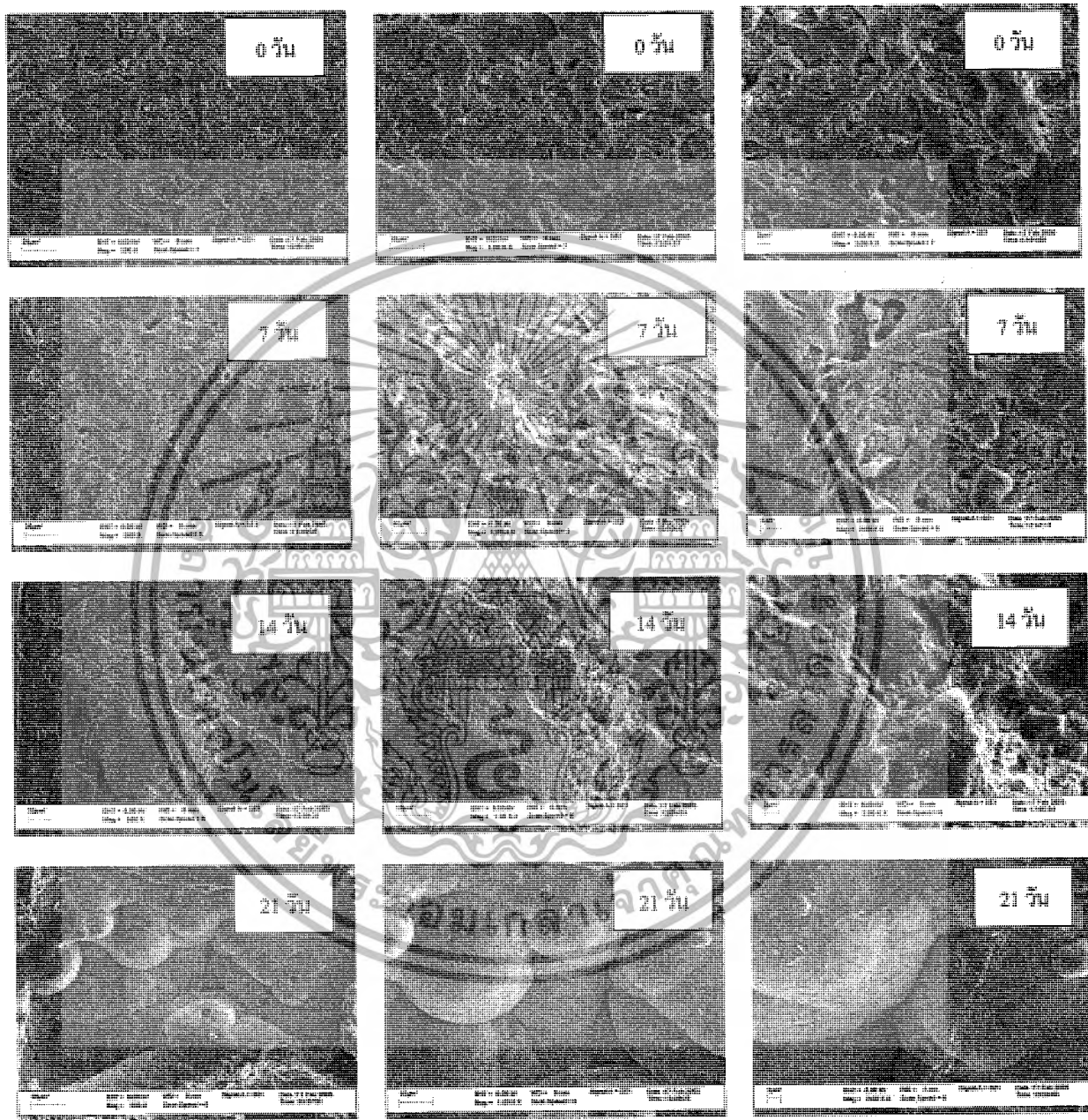
ตัวอย่างการคำนวณในสูตร 90/10

$$\Delta H_{\text{normalised}} = \frac{147.74 \times 100}{100 - 24} = 194.42$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{194.42 \times 100}{293} = 66$$

293

ภาคผนวก ค



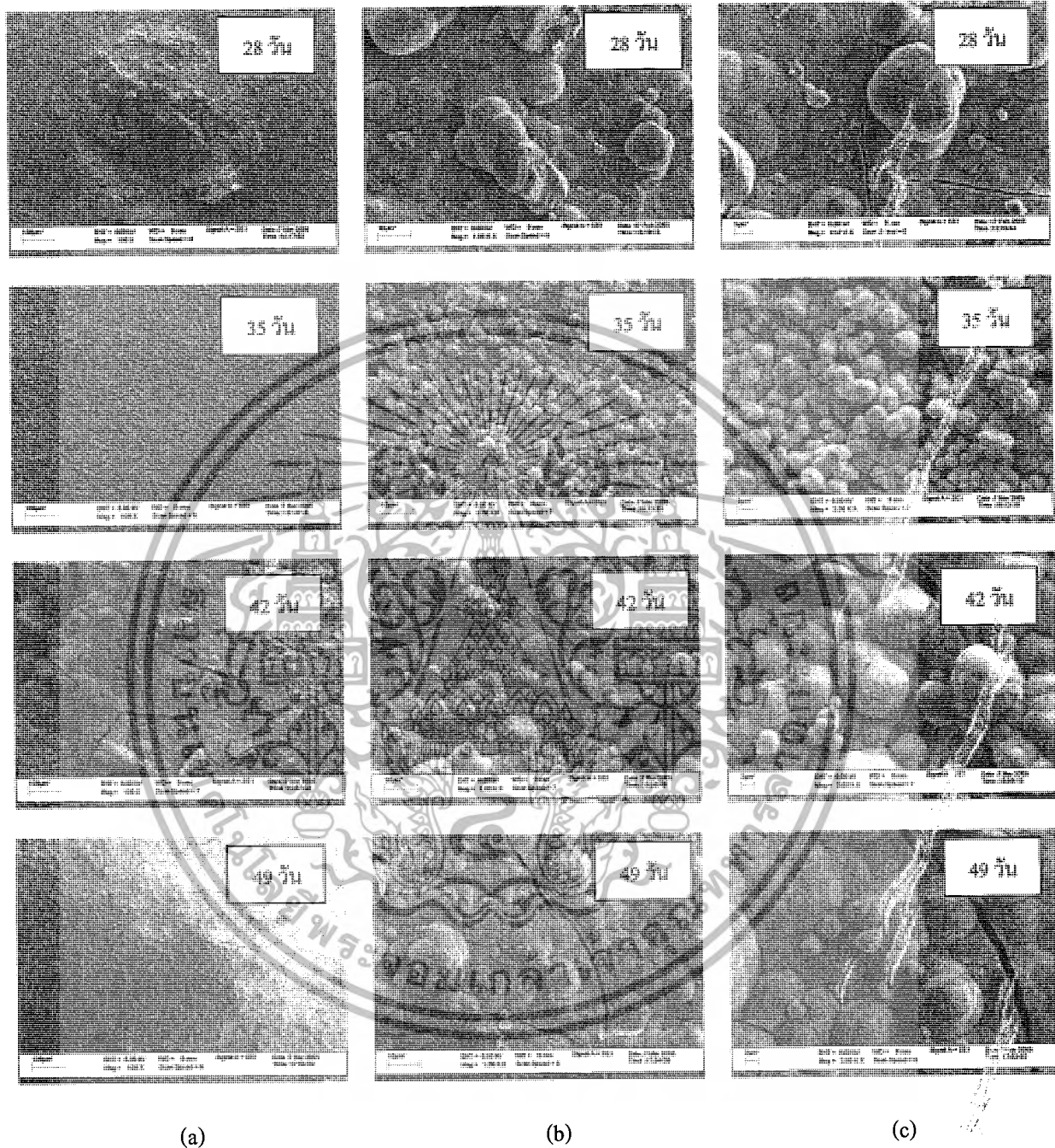
(a)

(b)

(c)

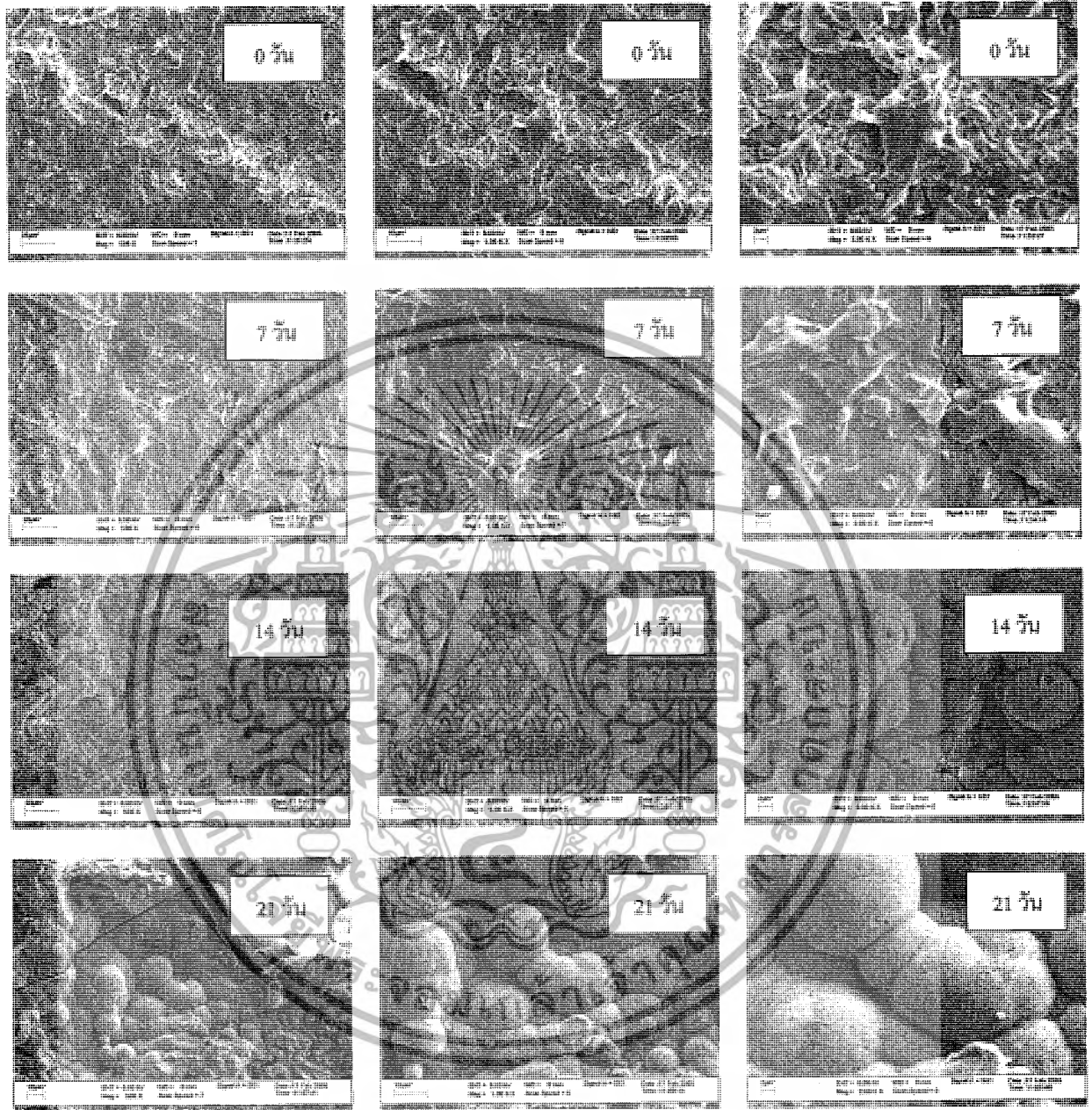
รูปที่ ข-1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบหลังการแช่ในสารละลาย SBF ที่มี CaSiO_3 10% โดยปริมาตร รูป (a) กำลังขยาย 500 เท่า, (b) 1,000 เท่า และ (c) 2,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



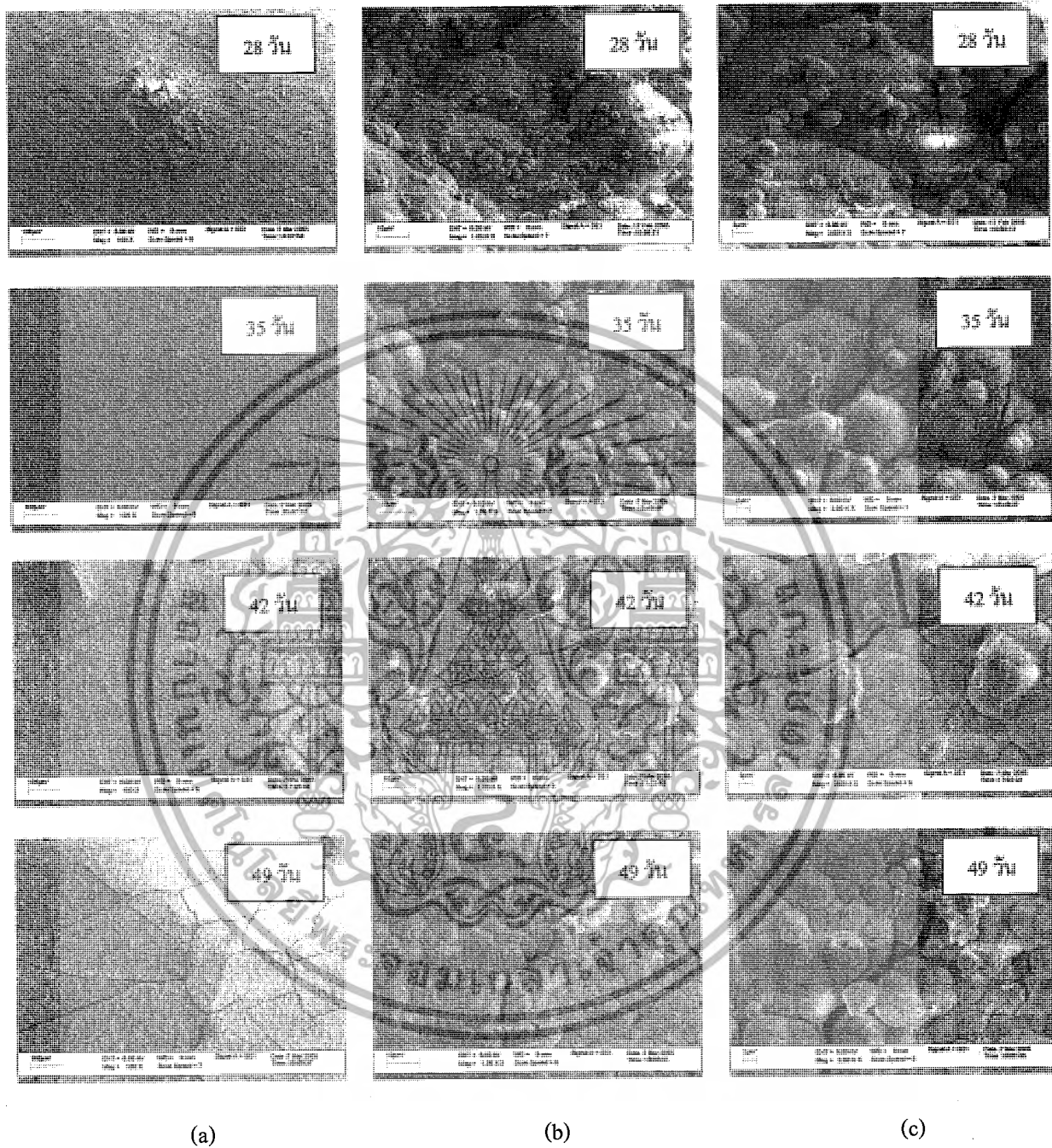
(a)

(b)

(c)

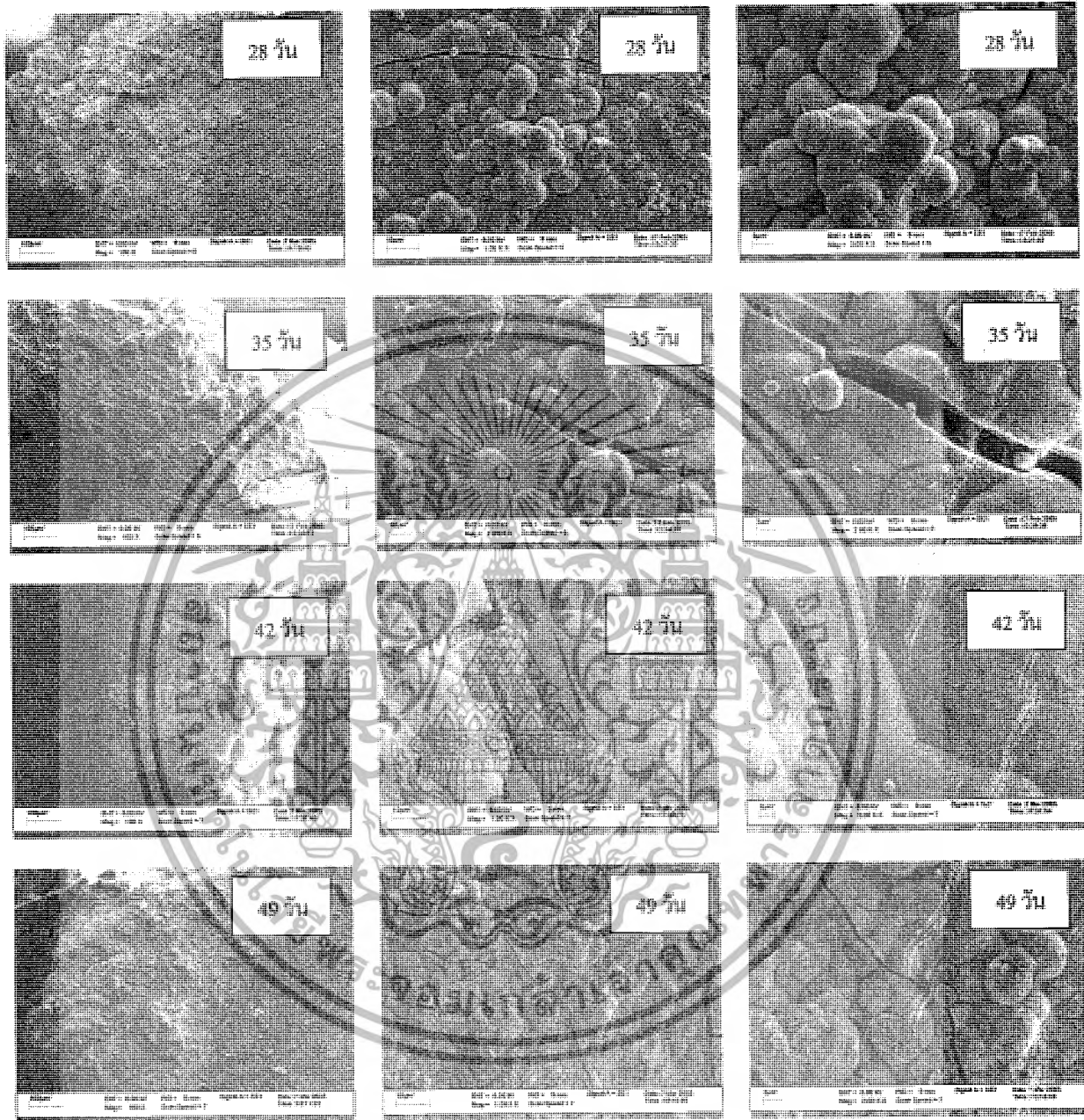
รูปที่ ข-2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบหลังการแช่ในสารละลาย SBF ที่มี CaSiO_3 , 15% โดยปริมาตร
รูป (a) กำลังขยาย 500 เท่า, (b) 1,000 เท่า และ (c) 2,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-2 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

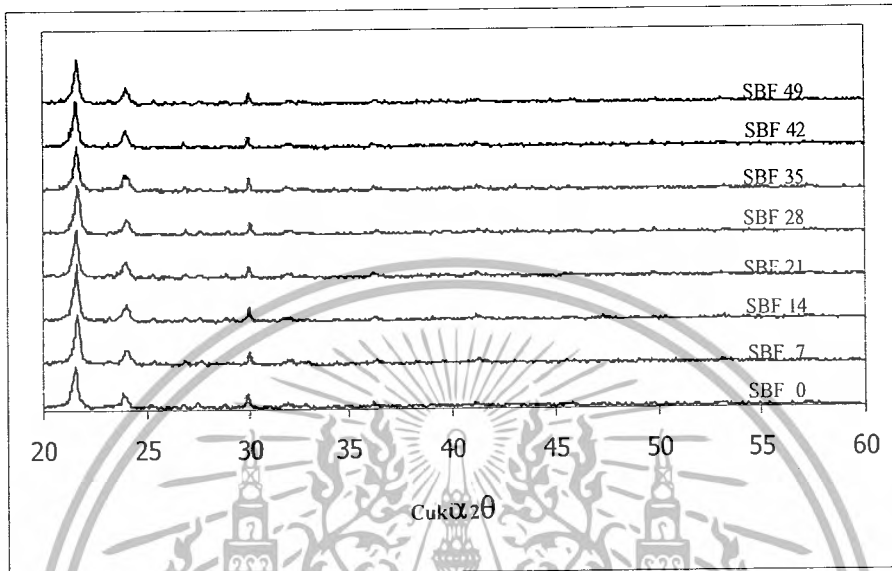
(c)

รูปที่ ข-3 (ต่อ)

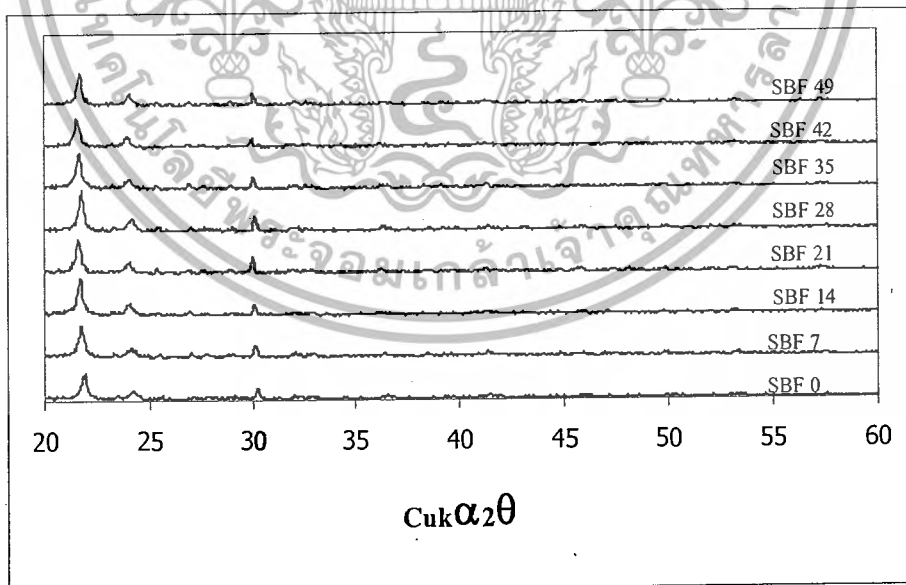
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

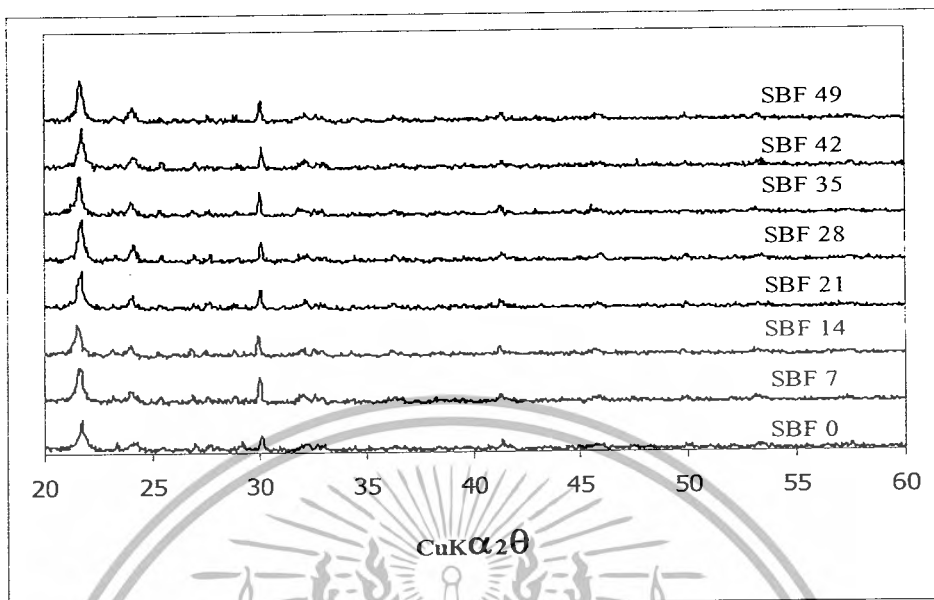
1. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบภายหลังการแช่สารละลาย SBF



รูปที่ ก-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบที่มี CaSiO₃, 10% โดยปริมาตร ภายหลังจากการแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7, 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 ในระบบสภาวะคงที่



รูปที่ ก-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบที่มี CaSiO₃, 15% โดยปริมาตร ภายหลังจากการแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7, 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 ในระบบสภาวะคงที่



รูปที่ ค-3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบที่มี CaSiO_3 , 20% โดยปริมาตร ภายหลังจากการแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7, 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 ในระบบสภาวะคงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

1. การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลาย SBF หลังการแช่วัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO₃

ตาราง ง-1 ค่า pH หลังการแช่วัสดุประกอบที่ปริมาณ CaSiO₃ ต่างๆ กัน

เวลาในการแช่ SBF (วัน)	ค่า pH หลังการแช่วัสดุประกอบที่ปริมาณ CaSiO ₃ ต่างๆ กัน		
	10% โดยปริมาตร.	15% โดยปริมาตร.	20% โดยปริมาตร.
0	7.4	7.4	7.4
7	7.59	7.58	7.57
14	7.23	7.26	7.19
21	7.65	7.68	7.61
28	7.63	7.61	7.61
35	7.69	7.73	7.61
42	7.68	7.72	7.68
49	7.35	7.64	7.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้