

การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดตอกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์กับแคลเซียมซิลิเกต



T107721

นางสาวชนมมดี นนทนันทน์ 45050086
นายณัฐนันท์ ฉัตรวิจิตรกุล 45050096
นางสาวธนิศา ควรชัยตระกูล 45050104

26ก.
8136ก
2521ง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....107721
วัน,เดือน,ปี..... 10 พ.ค. 2553

b.....1221093b
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

**The preparation of maleic anhydride grafted polyethylene /calcium
silicate composites**

Miss Chonmadee Nontananun 45050086

Mister Nuttanun Chatvijitkul 45050096

Miss Tanita Kuanchaitakul 45050104

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

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงชนิดต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดรายด์กับแคลเซียมซิลิเกต

นักศึกษา นางสาวชนมมดี นนทนานันท์ รหัสนักศึกษา 45050086
 นายณัฐนันท์ จัตตวิจิตรกุล รหัสนักศึกษา 45050096
 นางสาวธนิตา ควรัชยตระกูล รหัสนักศึกษา 45050104

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี
 ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้ โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร. อธิพิพล แจ่มชัด	
กรรมการ	ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย	
กรรมการ	ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดตึงด้วยมาลิกิกแอนไฮดรายด์กับแคลเซียมซิลิเกต
นักศึกษา	นางสาวชนมมดี นนทนันทน์ รหัสประจำตัวนักศึกษา 45050086 นายณัฐนันท์ ฉัตรวิจิตรกุล รหัสประจำตัวนักศึกษา 45050096 นางสาวธนิศา ควรชัยตระกูล รหัสประจำตัวนักศึกษา 45050104
คณะ	วิทยาศาสตร์
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุภรัตน์ รักชลธิ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ตึงด้วยมาลิกิกแอนไฮดรายด์ (HDPE-g-MA) กับแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) โดยเตรียม CaSiO_3 จากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กับซิลิกา (SiO_2) ในอัตราส่วน 1:1 โดยโมล จากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง แล้วนำสารที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และ XRF ทำการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/ CaSiO_3 25% โดยปริมาตร โดยใช้เครื่องผสมแบบนบุรี ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการผสมที่ 180 หรือ 200 °C และมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ใช้ในการผสมที่ 40 60 และ 80 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการผสม 20 นาที จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปร้อน แล้วทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่เตรียมได้ พบว่าในด้านความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ โมดูลัสกดอัดและความแข็งกดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ HDPE-g-MA และพบว่า CaSiO_3 ไม่มีผลต่อสมบัติทางร้อนและความเป็นผลึกของวัสดุประกอบ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (180-200 °C) และความเร็วรอบในการผสม (40-80 rpm) ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยรวม แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย รวมทั้งยังมีการศึกษาถึงสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ โดยให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของ CaSiO_3 ในพอลิเมอร์ค่อนข้างดีในทุกๆสภาวะในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	The preparation condition of maleic anhydride grafted polyethylene/calcium silicate composites
Name	Miss Chonmadee Nontananun Mister Nuttanun Chatvijitkul Miss Tanita Kuanchaitrakul
Faculty	Science
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2005
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee Asst. Prof. Dr. Punnama Siriphanone

ABSTRACT

This project studied the preparation of polyethylene graft maleic anhydride/calcium silicate composites (PE-g-MA/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. PE-g-MA were compounded with 25% vol. CaSiO₃ by a banbury mixer with 20 mins mixing time. Mixing conditions were varied; mixing temperatures of 180 and 200^oC and mixing speed of 40, 60 and 80 rpm. Test specimens were and shaped by a compression molding machine. The mechanical properties of composites were determined. It was found that flexural strength, flexural modulus, compressive modulus and hardness of composites increased while impact strength decreased, compared with PE-g-MA. The results from thermal testing showed that the thermal properties and % crystallinity of PE-g-MA were hardly changed with the addition of CaSiO₃. Moreover, the mechanical properties were not significantly altered with increasing temperature (180-200^oC) and mixing screw speed (40-80 rpm). Except, compressive modulus increased when temperature increased from 180 to 200^oC. In addition, morphology study revealed that CaSiO₃ can disperse efficiently in every conditions of mixing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ผศ. ดร. สุภารัตน์ รักชลธี ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ตะวัน สุขน้อย และ รศ. ดร. อธิพิล แจ่มชัด อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณบิดามารดาผู้ให้กำเนิดและให้การอบรมสั่งสอน รวมทั้งสนับสนุนด้านการศึกษาตลอดเรื่อยมา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกฝ่าย ที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ซึ่งไม่ได้กล่าวถึงที่นี่ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ชนม์มดี นนทนานันท์
ณัฐนันท์ ฉัตรวิจิตรกุล
ธนิตา ควรชัยตระกูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญ(รูป).....	VII
สารบัญ (ตาราง).....	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 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุชีวภาพ.....	3
2.1.1 ประวัติความเป็นมาของวัสดุชีวภาพ.....	3
2.1.2 การจำแนกประเภทวัสดุชีวภาพตามประเภทของวัสดุที่ใช้.....	5
2.1.3 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามกลไกการยึดติดระหว่าง วัสดุชีวภาพและเนื้อเยื่อข้างเคียงที่อยู่ล้อมรอบ.....	6
2.2 วัสดุประกอบ.....	9
2.2.1 การแบ่งชนิดของวัสดุประกอบ.....	10
2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต.....	11
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานวัสดุประกอบ.....	12
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนตอกิ่ง ด้วยมาลิกแอโนไฮดรไรต์.....	12
2.3.1 สมบัติทั่วไป.....	12
2.3.2 สารช่วยผสม.....	14
2.3.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตอกิ่งด้วยมาลิกแอโนไฮดรไรต์.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	16
2.4.1 โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	16
2.4.2 สมบัติของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	17
2.4.3 การประยุกต์ใช้งานของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	20
2.4.4 การเตรียมแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 การทดลอง.....	29
3.1 สารเคมี.....	29
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	30
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	31
3.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	31
3.3.2 การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนต่อกิ่งกับ มาลิกอิกแอนไฮดรายด์กับแคลเซียมซิลิเกต.....	34
3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	34
3.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ PE-g-MA/CaSiO ₃	35
3.3.4.1 สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ.....	35
3.3.4.2 สมบัติความแข็งแรงกระแทก.....	36
3.3.4.3 สมบัติมอดุลัสกดอัด.....	37
3.3.4.4 สมบัติความแข็งกด.....	38
3.3.5 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ PE-g-MA/CaSiO ₃	38
3.3.6 ศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ PE-g-MA/CaSiO ₃	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	39
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่เตรียมได้.....	39
4.2 สมบัติเชิงกล.....	41
4.2.1 มอดุลัสกดอัด.....	41
4.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ.....	42
4.2.3 ความแข็งแรงกระแทก.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ความแข็งกด.....	47
4.2.5 สมบัติทางความร้อน.....	48
4.3 สัณฐานวิทยา.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก ก.....	58
1. อัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของสารที่เตรียมได้.....	58
2. การคำนวณอัตราส่วนโมลของแคลเซียมต่อซิลิกอน.....	58
3. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมซิลิเกตจากฐานข้อมูล JCPDS.....	59
ภาคผนวก ข.....	60
โครงสร้างระดับจุลภาคบริเวณพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ PE-g-MA/CaSiO ₃	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความว่องไวทางชีวภาพของเซรามิกส์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิด.....	8
รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายโซ่ตรงของ HDPE.....	13
รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA.....	16
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของผลึกแคลเซียมซิลิเกต.....	17
รูปที่ 2.5 ผลึกของ Wollastonite ที่พบได้ในธรรมชาติ.....	17
รูปที่ 2.6 รูปร่างของผลึกที่มีลักษณะเหมือนเข็ม.....	18
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite.....	33
รูปที่ 3.2 การทดสอบสมบัติความโค้งงอ.....	35
รูปที่ 3.3 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกระแทก.....	36
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบมอดุลัสกดอัด.....	37
รูปที่ 4.1 การเลี้ยงเบนรังสีเอกซ์ของ CaSiO_3 ที่เตรียมได้ จากแคลไซต์อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	40
รูปที่ 4.2 มอดุลัสกดอัดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/ CaSiO_3 (a) ผลของอุณหภูมิการผสม.....	41
(b) ผลของความเร็วยอบการผสม.....	42
รูปที่ 4.3 (a) สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ; ผลของอุณหภูมิการผสม.....	43
(b) มอดุลัสโค้งงอ; ผลของอุณหภูมิการผสม.....	44
รูปที่ 4.4 (a) สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ; ผลของความเร็วยอบการผสม.....	44
(b) มอดุลัสโค้งงอ; ผลของความเร็วยอบการผสม.....	45
รูปที่ 4.5 ความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/ CaSiO_3 (a) ผลของอุณหภูมิการผสม.....	46
(b) ผลของความเร็วยอบการผสม.....	46
รูปที่ 4.6 ความแข็งกดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/ CaSiO_3 (a) ผลของอุณหภูมิการผสม.....	47
(b) ผลของความเร็วยอบการผสม.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO ₃ ในแต่ละสภาวะการผสมที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	50
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO ₃ ที่อุณหภูมิการผสม 200°C และความเร็วรอบ 40 rpm ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	53
รูปที่ ข-1 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO ₃ ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	62



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต.....	5
ตารางที่ 2.2 ประเภทของวัสดุค่อนข้างเฉื่อย.....	7
ตารางที่ 2.3 ชนิดของวัสดุตามกลไกการยึดติดและตัวอย่างของวัสดุแต่ละประเภท.....	9
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียม ชนิด Wallastonite.....	19
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA.....	29
ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการผสม.....	34
ตารางที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ CaSiO_3	40
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบและ HDPE-g-MA.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันนี้วัสดุประกอบได้เข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมาย และการนำไปใช้ประโยชน์ในทางด้านการแพทย์ก็เป็นอีกด้านหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยวัสดุสังเคราะห์ที่นำมาใช้ทางการแพทย์ เรียกว่า วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ซึ่งวัสดุชีวภาพเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นวัสดุทางการแพทย์และอวัยวะเทียมหลายชนิดเพื่อใช้ทดแทนอวัยวะที่มีความบกพร่องได้ วัสดุประกอบระหว่างพอลิเมอร์และเซรามิกส์เป็นกลุ่มวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายที่จะศึกษาพัฒนาเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชีวภาพ โดยวัสดุประกอบที่มีการพัฒนาจนมีการผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว ได้แก่ วัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) [1-4] การที่นิยมใช้ HDPE เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง (Matrix) เนื่องจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่น แข็งแรง เหนียว หาง่าย ราคาถูก แต่พบว่าไม่มีสมบัติด้านความว่องไวทางชีวภาพ ดังนั้นจึงนำ HAp มาใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforced phase) อีกทั้งยังเป็นสารที่มีองค์ประกอบหลักคล้ายคลึงกับองค์ประกอบหลักของกระดูกและฟันของมนุษย์จึงมีส่วนช่วยพัฒนาด้านสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบ อย่างไรก็ตาม HAp มีข้อเสียหลายประการได้แก่ แตกหักง่ายและมีความว่องไวไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับวัสดุเซรามิกส์ชนิดอื่นๆ เช่น แคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) [5] โดยการนำ CaSiO_3 มาใช้แทน HAp [6,7] เนื่องจาก CaSiO_3 เป็นเซรามิกส์ที่มีความแข็งแรงและสมบัติความว่องไวสูงกว่า HAp

โครงการพิเศษของ เกตุดาว ขวลิขิตดำรง, สาลิภัก บัวเจริญ และ สิญญาภา เอมแหยม [8] ได้เตรียมวัสดุประกอบระหว่าง HDPE และ CaSiO_3 เนื่องจาก CaSiO_3 มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า และมีกระบวนการสังเคราะห์ที่ง่ายกว่า HAp แต่จากผลการทดลอง เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อเติม CaSiO_3 ลงใน HDPE สมบัติเชิงกลบางประการมีค่าลดลง ผลดังกล่าวสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากวัสดุประกอบที่เตรียมได้จากความแตกต่างทางขั้วระหว่าง CaSiO_3 และ HDPE เป็นผลให้การกระจายตัวของ CaSiO_3 ใน HDPE ไม่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ โดยใช้วัสดุภาคต่อเนื่องเป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ต่อกิ่งด้วยมาลิกอิกแอนไฮดไรต์ (HDPE-g-MA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของวัสดุ HDPE-g-MA และอนุภาคของ CaSiO_3 นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงกระบวนการเตรียมวัสดุ ประกอบโดยจะใช้เครื่องผสมแบบนรีแทนเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ โดยทำการศึกษาเพื่อหา สภาวะที่เหมาะสมในการผสมวัสดุดิบ HDPE-g-MA กับ CaSiO_3 เพื่อให้ได้วัสดุประกอบที่มีการ กระจายตัวของ CaSiO_3 และสมบัติเชิงกลที่ดี

1.2 วัตถุประสงค์

เตรียมวัสดุประกอบระหว่าง HDPE-g-MA/ CaSiO_3 ซึ่งใช้ CaSiO_3 25% โดยปริมาตร เพื่อ ศึกษาหาสภาวะในการผสมที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุประกอบ โดยศึกษาสมบัติด้านความ แข็งแรงโค้งงอ การรับแรงกด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกดของวัสดุประกอบ

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้เริ่มต้นจากการสังเคราะห์ CaSiO_3 ด้วยวิธีบดผสมทางเชิงกลจากนั้นนำ CaSiO_3 ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) จากนั้นเตรียมวัสดุประกอบจาก HDPE-g-MA กับ CaSiO_3 25% โดยปริมาตร ซึ่งใช้เครื่องผสมแบบนรี โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการผสมที่ 180 และ 200°C และมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ใช้ในการผสมที่ 40 60 และ 80 รอบต่อนาที จากนั้น ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูป แล้วทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบที่เตรียมได้ ในด้านความแข็งแรงโค้งงอ การรับแรงกด ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/ CaSiO_3 ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เพื่อจะได้วัสดุประกอบ ที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้งานได้มากขึ้น
2. ได้ข้อมูลในด้านการเตรียมและสมบัติเบื้องต้นที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในด้านการแพทย์ ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุชีวภาพ

2.1.1 ประวัติความเป็นมาของวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม

ในอดีตการบำบัดรักษาเมื่ออวัยวะและเนื้อเยื่อต่างๆในร่างกายเกิดการติดเชื้อหรือถูกทำลายเนื่องจากโรคภัยไข้เจ็บและอุบัติเหตุคือตัดเนื้อเยื่อส่วนนั้นทิ้งไป การรักษาวิธีนี้มีส่วนช่วยลดการติดเชื้อและการแพร่กระจายของโรคไปยังอวัยวะส่วนอื่นๆ แต่จะก่อให้เกิดความบกพร่องของร่างกายและมีโอกาสจะเกิดโรคแทรกซ้อนอื่นตามมา หลังจากที่มีการคิดค้นและพัฒนาความรู้ทางการแพทย์และวิทยาศาสตร์ แนวทางการรักษาในปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น การค้นพบการฆ่าเชื้อโรค การให้วัคซีนป้องกันโรค ฯลฯ วิวัฒนาการดังกล่าวนำไปสู่การรักษาโดยการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะและการใช้อวัยวะเทียมมาแทนที่อวัยวะและเนื้อเยื่อที่ติดเชื้อหรือบกพร่องในร่างกายมนุษย์ ซึ่งแนวคิดในการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะทางการแพทย์นี้เสนอว่าถ้าโรคที่เป็นอยู่เป็นมาจนไม่สามารถรักษาให้หายได้ วิธีการนำเอาวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมมาใช้ในการเปลี่ยนถ่ายแทนที่อวัยวะที่ทำหน้าที่ได้น้อยหรือทำหน้าที่ไม่ได้เลยจะสามารถรักษาโรคดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าที่จะพยายามรักษาโรคของอวัยวะนั้นๆโดยตรงด้วยยาหรือการผ่าตัดตัดตั้งนั้น วิธีการรักษาประเภทนี้จึงเริ่มมีบทบาทสำคัญในทางการแพทย์โดยเฉพาะในช่วงระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา

การรักษาโดยการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ [9,10] แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆได้แก่

1. การปลูกถ่ายอวัยวะจากธรรมชาติ (Transplantation)

การปลูกถ่ายอวัยวะตามธรรมชาตินั้นได้มีการนำเอาอวัยวะของมนุษย์ที่ได้จากการบริจาคมาผ่านตัดแทนที่อวัยวะที่บกพร่องในตัวผู้ป่วย แต่การปลูกถ่ายอวัยวะวิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ขาดแคลนผู้บริจาคและเนื้อเยื่อคุณภาพดี นอกจากนี้เนื้อเยื่อที่ได้จากการบริจาคมักจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องภูมิคุ้มกันที่ร่างกายสร้างขึ้นเพื่อต่อต้านเมื่อมีเนื้อเยื่อแปลกปลอมเข้าไปในร่างกายดังนั้นจึงมีผู้ป่วยจำนวนน้อยที่ได้รับประโยชน์จากวิธีการรักษา

2. การเปลี่ยนถ่ายโดยใช้วัสดุสังเคราะห์ที่มนุษย์ผลิตขึ้นมาเอง (Implantation)

วัสดุประเภทนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการคือ ไม่มีข้อจำกัดในด้านปริมาณ สามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้และไม่มีปัญหาด้านคุณภาพของวัสดุ เนื่องจากกระบวนการผลิตจะถูกควบคุมให้มี

ประสิทธิภาพและมีการทดสอบซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมมาตรฐานเพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้สามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกายหรือไม่ สร้างสารที่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อหรือไม่ ถ้าวัสดุประเภทนั้นถูกพบว่ามีก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกายแพทย์ผู้ทำการรักษาสามารถเลือกใช้วัสดุอื่นมาทดแทนได้ ทำให้โอกาสเกิดความล้มเหลวเชิงกลของวัสดุประเภทนี้น้อยลง อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่มีความซับซ้อนและทำหน้าที่ได้ไม่ดีเท่ากับอวัยวะของร่างกายที่มนุษย์สร้างขึ้น วัสดุประเภทนี้มีอายุการใช้งานจำกัด และปัญหาสำคัญที่พบคือ วัสดุชีวภาพในปัจจุบันยังขาดสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ ได้แก่ ขาดความสามารถในการซ่อมแซมตัวเอง และขาดความสามารถในการปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติของตนเองให้เหมาะสมเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของร่างกาย เช่น การรับแรงเชิงกล ฯลฯ

วิวัฒนาการของอวัยวะเทียม [11]

การใช้อวัยวะเทียมในทางการแพทย์ถูกพบในช่วงก่อนปี ค.ศ. 1950 โดยเทคโนโลยีการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะเทียมในระยะแรกยังใช้เทคนิคไม่สูงมาก ได้แก่ การใช้ไม้มาทำขาเทียมหรือการใช้ลูกตาเทียมเพื่อช่วยป้องกันเนื้อเยื่อที่อยู่ภายในและช่วยไม่ให้เกิดความน่าเกลียด เป็นต้น การพัฒนาทางด้านนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วภายในเวลาเพียงศตวรรษเดียว ซึ่งในปัจจุบันวิวัฒนาการที่โดดเด่นทางด้านนี้ เช่น ได้มีการสร้างเครื่องไตเทียม เครื่องหัวใจ-ปอดเทียม ลิ้นหัวใจเทียมและข้อสะโพกเทียม เป็นต้น

วัสดุที่นำมาใช้สร้างเป็นอวัยวะเทียมในปัจจุบันนี้ได้นำเอาวัสดุมาตรฐานทางพลาสติกและวัสดุในอุตสาหกรรมมาใช้ในการผลิต โดยมีการตระหนักถึงข้อจำกัดของวัสดุที่นำมาใช้ด้วยนั่นคือ เมื่อนำวัสดุนั้นมาสร้างเป็นอวัยวะเทียมและได้มีการฝังเข้าไปในร่างกาย พบว่าอาจทำให้คุณสมบัติของวัสดุที่สังเคราะห์นั้นเปลี่ยนแปลงไปเมื่อวัสดุได้สัมผัสกับเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกายเป็นเวลานาน สมบัติดังกล่าว ได้แก่ ความแข็งแรงทางเชิงกล ความสามารถในการโค้งงอ หรือความสามารถในการให้น้ำหรือก๊าซผ่านไปได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงและทำให้เกิดข้อจำกัดดังกล่าวพบว่า วัสดุที่นำมาศึกษามากกว่า 1.5 ล้านชนิด จะเหลือสารประกอบทางเคมีเพียง 20 ชนิด เท่านั้นที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ดีในทางคลินิก เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมฟอสเฟต เป็นต้น

การตอบสนองของร่างกายต่อวัสดุชีวภาพ [12] แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

1. การตอบสนองเมื่อวัสดุนั้นเป็นพิษต่อร่างกาย (Toxic) จะทำให้เนื้อเยื่อเกิดความผิดปกติ กลายเป็นมะเร็ง และเนื้อเยื่อตาย
2. เนื้อเยื่อสร้างถุงเส้นใยที่ไม่ยึดติดกัน (Non-adherent fibrous capsule) ขึ้นมาห่อหุ้มวัสดุชีวภาพเอาไว้เพื่อแยกวัสดุออกจากสภาวะแวดล้อมของร่างกาย
3. เนื้อเยื่อสร้างพันธะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุทางชีวภาพ (Bioactive)
4. เนื้อเยื่อสร้างตัวเองแทนที่วัสดุทางชีวภาพ (Dissolution of implant)

2.1.2 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามประเภทของวัสดุที่ใช้ในการผลิต [13]

วัสดุชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามวัสดุที่ใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ เซรามิก และวัสดุประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต [13]

วัสดุที่ใช้	ข้อดี	ข้อเสีย	ตัวอย่างการใช้งานทางการแพทย์
1. พอลิเมอร์ (Polymers) ได้แก่ ยางซิลิโคน เทฟลอน ไนลอน ฯลฯ	-มีความยืดหยุ่น -ความหนาแน่นต่ำ -สามารถผลิตได้ง่าย	-ไม่แข็งแรง -สามารถเกิดการเสียดสี สภาพได้เมื่อใช้เป็นเวลานาน	-การเย็บตอกแต่ง (Sutures) -เส้นเลือดเทียม (Arteries) -สะโพก (Hip) -หู (Ear) -จมูก (Nose) -เนื้อเยื่ออ่อนต่างๆ (Soft tissues)
2. โลหะ (Metal) ได้แก่ ไททาเนียม โลหะผสมสแตนเลส ทองคำ เงิน แพลทินัม ฯลฯ	-มีค่าความแข็งแรงสูงและความทนทานต่อแรงกระแทกสูง -เหนียว	-เกิดการสึกกร่อนและปล่อยสารที่เป็นพิษต่อร่างกายได้ -ยากต่อการขึ้นรูป -ความหนาแน่นสูง	-ข้อต่อ (Joint replacement) -รากฟันเทียม (Dental root implantation) -กระดูกเทียมและสกรูยึดกระดูก (Bone plates and screws)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต [13]

วัสดุที่ใช้	ข้อดี	ข้อเสีย	ตัวอย่างการใช้งานทางการแพทย์
3.เซรามิกส์ (Ceramic) ได้แก่ อลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมฟอสเฟต ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ ฯลฯ	-ความเข้ากันได้กับร่างกาย -ทนทานต่อการกัดกร่อน -ทนทานต่อการกดอัด -มีทั้งที่เฉื่อยและว่องไวทางชีวภาพ	-เพราะไม่มีความยืดหยุ่น	-ฟันปลอม (Dental) -ข้อต่อ (Joint replacement) -สารเคลือบกระดูกและฟัน
4.วัสดุประกอบ (Composite) ได้แก่ โลหะเคลือบผิวด้วยเซรามิกส์ วัสดุเคลือบผิวด้วยคาร์บอน	-แข็งแรง -มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมแก่การใช้งาน -ทนทานต่อการกัดกร่อน	-ยากในการผลิต	-ข้อต่อ (Joint replacement) -ลิ้นหัวใจเทียม (Artificial heart valve)

2.1.3 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพตามกลไกการยึดติดระหว่างวัสดุชีวภาพและเนื้อเยื่อข้างเคียงที่อยู่ล้อมรอบ

วัสดุชีวภาพสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ดังนี้ [10,14]

1. วัสดุค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert materials)

วัสดุประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะในร่างกายเป็นระยะเวลาอันยาวนาน เนื้อเยื่อภายในร่างกายจะสร้างเส้นใยขึ้นห่อหุ้มวัสดุชีวภาพเพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างของวัสดุชีวภาพกับเนื้อเยื่อของร่างกาย เมื่อเส้นใยมีความหนามากขึ้นเนื่องมาจากการเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อจะทำให้เกิดการเคลื่อนหลุดของวัสดุชีวภาพได้ วัสดุค่อนข้างเฉื่อย แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ประเภทของวัสดุค่อนข้างเฉื่อย [10]

วัสดุ	ข้อดีของวัสดุ	ข้อด้อยของวัสดุ	การประยุกต์ใช้งาน
<u>โลหะและโลหะอัลลอยด์</u> Stainless steel	-ราคาถูก	-เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย	-ศัลยกรรมกระดูกที่แตก อวัยวะเทียม
Ti-Al-V	มีความเข้ากันได้กับ ระบบชีวภาพของ ร่างกาย	-ราคาแพง	-ศัลยกรรมกระดูกที่แตก
<u>พอลิเมอร์</u> Polyacetal	-ราคาถูก ง่ายต่อการ ฆ่าเชื้อ	-มีการเกิดพอร์มีลดีไฮด์ขึ้น -ความทนทานต่อการขีดสีต่ำ	-วัสดุยึดติดฟันเทียม
PMMA cement	-มีการใช้งานอย่าง แพร่หลาย	-เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน	-วัสดุอุดช่องว่าง
<u>เซรามิกส์</u> Al ₂ O ₃	-มีความสามารถในการ เข้ากันได้กับชีวภาพ ของร่างกาย	-ราคาแพง -เทคนิคการผลิตค่อนข้างยาก	-วัสดุยึดติดฟันเทียม
ZrO ₂ -TZP	-ความแข็งแรง		-วัสดุยึดติดฟันเทียม

2. วัสดุที่มีรูพรุน (Porous materials)

วัสดุประเภทนี้โดยส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีรูพรุนซึ่งเคลือบผิวด้วยสารประเภท HAp วัสดุประเภทนี้จะช่วยลดปัญหาการเลื่อนหลุดภายหลังการใช้งานได้โดยจะมีการสร้างกระดูกมาจากเนื้อเยื่อบริเวณข้างเคียงซึ่งจะเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนที่พื้นผิวของวัสดุ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อข้างเคียง การเลือกวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเซรามิกส์ประเภทนี้จะต้องเลือกวัสดุที่มีขนาดของรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยสามารถเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

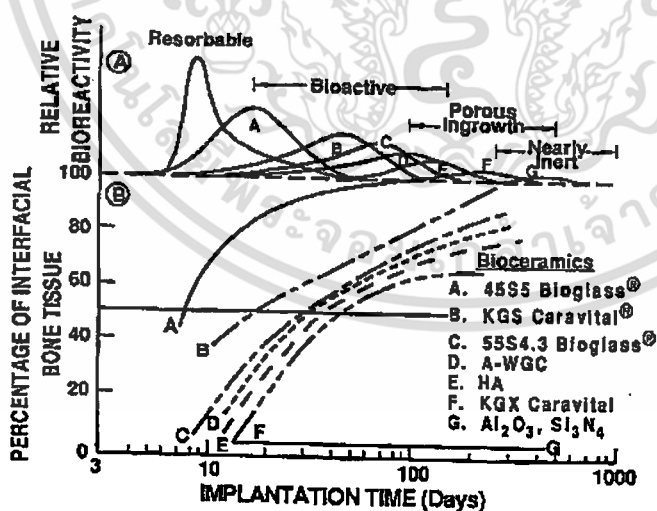
เข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อกระดูกในรูพรุนได้ อย่างไรก็ตามถ้ามีการเคลื่อนที่โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุชีวภาพและเนื้อเยื่อจะทำให้เส้นเลือดฝอยขาดซึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อที่อยู่ในรูพรุนตายเกิดการอักเสบ และติดเนื้อตามมา

3. วัสดุที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive materials)

วัสดุประเภทนี้มีสมบัติกึ่งกลางระหว่างวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อยและวัสดุที่สามารถถูกดูดซับภายใต้สภาวะร่างกาย โดยจะมีลักษณะที่สำคัญคือ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของวัสดุ ภายใต้สภาวะทางสรีระทางวิทยาซึ่งจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างกระดูกและวัสดุนั้น ดังนั้นจึงช่วยลดปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุได้

4. วัสดุสามารถถูกดูดซับหรือกีดเซาะภายใต้สภาวะของสรีระวิทยา (Resorbable materials)

วัสดุประเภทนี้ถูกออกแบบให้ค่อยๆเกิดการสลายตัวเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมทางสรีระวิทยาและจะถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อที่ร่างกายสร้างขึ้นมา การเลือกวัสดุประเภทนี้มีข้อกำหนดที่สำคัญได้แก่ ปริมาณและองค์ประกอบของวัสดุประเภทนี้จะต้องสามารถถูกย่อยสลายด้วยระบบเมตาบอลิซึมของร่างกาย และอัตราการดูดซับของวัสดุจะต้องสอดคล้องกับอัตราการซ่อมแซมของเนื้อเยื่อโดยสารที่ปลดปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อร่างกายและสามารถถูกกำจัดได้ด้วยระบบของร่างกาย ดังนั้นจึงมีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถครอบคลุมข้อกำหนดทุกข้อได้และทำให้การออกแบบของวัสดุประเภทนี้มีความยากลำบาก



รูปที่ 2.1 ความว่องไวทางชีวภาพของเซรามิกส์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิด [15] โดยที่วัสดุเซรามิกส์ที่ใช้ได้แก่ (A) 45S5 Bioglass ® (B) KGC caravital ® (C) 55S4.3 Bioglass ® (D) AW Glass-ceramic ® (E) HA (F) KGX Ceravital ® และ (G) $Al_2O_3-Si_3N_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ชนิดของวัสดุตามกลไกการยึดติดและตัวอย่างของวัสดุแต่ละประเภท [14]

ชนิดของวัสดุ	ชนิดกลไกการยึดติด	ตัวอย่าง
1. วัสดุค่อนข้างแข็ง	ยึดติดด้วยโครงสร้างทางกายภาพ	อะลูมินา เซอร์โคเนีย
2. วัสดุที่มีรูพรุน	ยึดติดด้วยการเติบโตของเนื้อเยื่อเข้าไปในรูพรุน	ไฮดรอกซีแอปตาไทต์ โลหะที่มีรูพรุนเคลือบด้วยไฮดรอกซี-แอปตาไทต์
3. วัสดุที่สามารถดูดซับหรือกักเซาะภายใต้สภาวะของสรีระวิทยา	ถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อ	ไทเทเนียมฟอสเฟต Bioactive glasses ®
4. วัสดุที่วางไว้ทางชีวภาพ	ยึดติดพื้นผิวด้วยพันธะเคมี	Bioactive glasses ® Bioactive glasses-ceramics HA ®

2.2 วัสดุประกอบ [16]

วัสดุประกอบ คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดอยู่ด้วยกัน องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิต คือ

ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมีค่ามอดุลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใย (fiber) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fibers) ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (Continuous fibers) หรือเส้นใยสั้น (Discontinuous or chopped short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆและมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆได้ ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต

เมตริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสูง เป็นต้น เมตริกซ์มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Polymer Composites” สามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset)
- โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Metal Composites”
- เซรามิกส์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Ceramic Composites”

2.2.1 การแบ่งชนิดของวัสดุประกอบ [16]

การแบ่งชนิดของวัสดุคอมโพสิตมีได้หลายแบบ อาจแบ่ง ชนิดของคอมโพสิตตามลักษณะของส่วนเสริมแรง หรือแบ่งตามลักษณะของการเกิดคอมโพสิต โดยทั่วไปสามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

2.2.1.1 ชนิดของวัสดุประกอบที่แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง มีดังนี้

1. วัสดุประกอบแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ วัสดุประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็กมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้วัสดุประกอบมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. วัสดุประกอบแบบแผ่น (Laminate composites) คือ วัสดุประกอบที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบหรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. วัสดุประกอบแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ วัสดุประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) เป็นผง (Powder) ที่มีขนาดเล็กซึ่งมักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน

2.2.1.2 ชนิดของวัสดุประกอบที่แบ่งตามลักษณะการเกิดของวัสดุประกอบมีดังนี้

1. วัสดุประกอบจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ ฟัน และกระดูก โดยไม้เป็นวัสดุประกอบที่ประกอบด้วยส่วนเสริมแรง คือ เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) และมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นวัสดุประกอบของผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ซึ่งอยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2. วัสดุประกอบจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุประกอบที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต [16]

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าวัสดุประกอบมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติเด่นหลายประการ การเลือกวัสดุประกอบมาใช้งานขึ้นอยู่กับสมบัติที่เป็นจุดเด่นและจุดด้อยของวัสดุคอมโพสิตนั้นๆ

2.2.2.1 ข้อดีของวัสดุประกอบ

วัสดุประกอบมีข้อดีหลายประการดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่นสูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) ความเหนียวจำเพาะ (Specific toughness) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุประกอบมีความหนาแน่นต่ำและมีน้ำหนักเบาช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุประกอบให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง
- มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion : CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น โลหะ

2.2.2.2 ข้อเสียของวัสดุประกอบ

สำหรับข้อเสียของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิตสูง
- มักมีสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากันหรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic properties) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงไม่เหมือนกันในทุกทิศทาง เป็นเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse direction)
- ยากในการต่อหรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
- ยากในการตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต
- ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานวัสดุประกอบ [16]

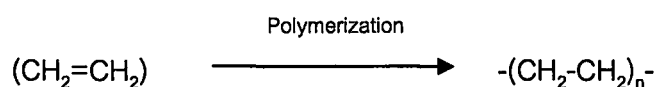
ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุประกอบ นอกจากจะต้องพิจารณาจากข้อดีและข้อเสียของวัสดุประกอบแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของวัสดุประกอบซึ่งสามารถนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศและอุปกรณ์กีฬา ฯลฯ วัสดุประกอบสามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์วัสดุประกอบมีชิ้นส่วนน้อยชิ้น ไม่ต้องการการประกอบมากและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดราไซด์

จากงานวิจัยหลายงานพบว่านิยมใช้ HDPE เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง เนื่องจาก HDPE มีสมบัติดังนี้

2.3.1 สมบัติทั่วไป [17]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟินส์ที่ได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงอาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนเชิงเส้น (Linear-Polyethylene) เนื่องจากพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงเกือบตลอด หรืออาจมีกิ่งบ้างแต่น้อยมาก ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายโซ่ตรงของ HDPE [17]

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีข้อบกพร่องด้านทานทางเคมีสูงและไม่ดูดซึมของผสม ซึ่งจัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี โดยทำการประยุกต์ใช้ในเรื่องของบรรจุภัณฑ์ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลางถึงสูง จะมีสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกดีมาก

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

1. ความหนาแน่น

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

2. น้ำหนักโมเลกุล

ถ้า HDPE มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความทนทานต่อการหลอมเหลว ความเหนียว และ ESCR สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงก็จะต้องการอุณหภูมิและความดันในกระบวนการแปรรูปสูงเช่นกัน

3. การกระจายน้ำหนักโมเลกุล

การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงแคบ-กว้าง ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่าถ้ามี MWD กว้างจะทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายเพราะส่วนที่เป็นโมเลกุลเล็กๆ จะเข้ามาช่วยหล่อลื่น ขณะเดียวกันทำให้การหดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่สั้นและยาวอยู่ด้วยกัน เมื่อขึ้นงานได้รับความเย็นการตกผลึกจะไม่เท่ากัน ความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงและ ESCR เพิ่มขึ้น โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องอาศัย MWD กว้างมากมาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มี MWD ที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมารวมกัน

4. สารเติมแต่ง

พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเคมีหรือสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียว เติมเส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น เติมสารเสถียรภาพเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต เติมสารเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต เติมสารให้สีเพื่อทำให้มีสีสวย และอื่นๆ เป็นต้น

แต่เนื่องจากในโครงการพิเศษก่อนหน้า [8] พบว่าเมื่อนำ HDPE มาผสมกับ CaSiO_3 จะพบว่า CaSiO_3 มีการกระจายตัวที่ไม่ดี ทั้งนี้เกิดจาก HDPE ไม่มีขั้ว ในขณะที่ CaSiO_3 มีความมีขั้ว ทำให้การผสมเข้ากันเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ของทั้ง 2 วัสดุ โดยการนำสารช่วยผสมมาใช้

2.3.2 สารช่วยผสม [18]

จากศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่องดังนี้

1. มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัสดุ (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดี
2. มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัสดุ (Interfacial tension) สูง
3. มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป
4. สมบัติเชิงกลต่ำ

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ โดยมีการนำสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) โดยความสามารถในการเข้ากันได้ หมายถึงความสามารถในการเกี่ยวพัน หรือ

การทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสมกันของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน แต่ไม่ใช่ความสามารถในการละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสถานะวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็ก และทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

1. Non-reactive Blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม [19] ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสถูกรโครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม โดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์แบบไดบล็อค แบบไตรบล็อค แบบกราฟท์ หรือแบบสุม ตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีนกับบิวทาไดอีนแบบไดบล็อคเป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน เป็นต้น

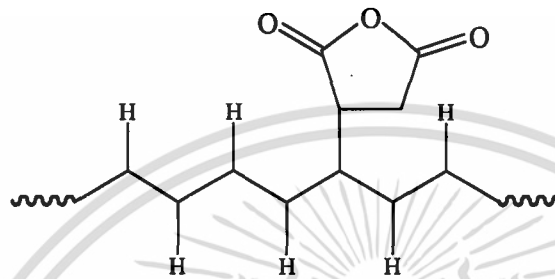
2. Reactive Blending เป็นวิธีการที่ไม่มีการแยกขั้นตอนของการเติมสารช่วยผสม [19] เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม เช่น พอลิเมอร์ผสมของพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเตอ์ หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งตัวอย่าง เช่น การกราฟท์พอลิเอทิลีนด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรือกรดอะคริลิก (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเอไมด์

ดังนั้นโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเพิ่มความเข้ากันได้ของทั้ง 2 วัฏภาคโดยการใช้ HDPE-g-MA ซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่องที่มีทั้งหมู่ที่มีขั้วและไม่ขั้วอยู่ด้วยกัน ซึ่งจะทำให้สามารถเข้ากันได้กับ CaSiO_3 ที่มีความขั้วได้ดีขึ้นโดย HDPE-g-MA มีลักษณะดังนี้

2.3.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตอกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่เป็นการยากที่จะทำการผลิตเป็นพอลิเมอร์ผสมหรือคอมโพสิต เนื่องจาก HDPE มีลักษณะที่ไม่มีขั้วทำให้ผลการทดลองที่ได้จากการผสม HDPE กับวัสดุชนิดอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวที่ไม่ดี แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเติมวัสดุตัวที่สามที่ใช้ในการเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ยกตัวอย่างเช่น ในการผลิตคอมโพสิตนั้นสารตัวเติมได้รับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ (Coupling agents) ซึ่งสารคู่ควบนั้นช่วยสนับสนุนการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ และสารเสริมแรงอนินทรีย์ ทำให้สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้น และสำหรับกรณี

ของพอลิเมอร์ผสมมีการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ลงไป เช่น พอลิโอลิฟินส์ที่มีการต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮดรายด์ (MA) ได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในรูปของสารช่วยผสมสำหรับการผสมระหว่างพอลิโอลิฟินส์กับพอลิเอไมด์ โดย MA สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่เอมีนของพอลิเอไมด์ทำให้การผสมเกิดการเข้ากันได้ดีขึ้น [20]



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA

2.4 แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [21]

แคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ชนิด Wollastonite ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1822 และมีการตั้งชื่อตามผู้ค้นพบ ซึ่งเป็นนักธรณีวิทยาชาวอังกฤษชื่อ William Hyde Wollaston แร่ Wollastonite มีการนำมาใช้ในทางการค้าในปี ค.ศ. 1993 ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงลักษณะ รูปร่าง วิธีการผลิต และการพัฒนาเพื่อการนำแร่ชนิดนี้มาใช้

Wollastonite มีลักษณะเฉพาะคือ มีสีขาว รูปร่างของผลึกเป็นแท่งยาวคล้ายเข็ม และมีความเป็นต่าง Wollastonite จะมีธาตุอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย เช่น ควอตซ์ (Quartz) แคลไซต์ (Calcite, Calcium carbonate) ไดออปไซต์ (Diopside magnesium silicate) การ์เน็ต (Garnet, Calcium iron silicate, Calcium aluminium silicate) และพรีไนท์ (Prehnite, Calcium aluminium silicate) ซึ่งธาตุเหล่านี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเกิด Wollastonite ปฏิกิริยาการเกิด Wollastonite แสดงดังสมการ

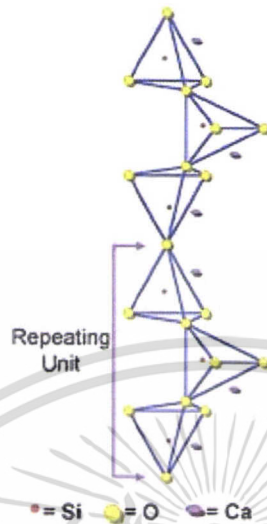


2.4.1 โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกต [21]

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของ CaSiO_3 ซึ่งมีลักษณะเป็นหน่วยซ้ำๆ (Repeating unit) สายโซ่ของ Wollastonite เกิดจากซิลิกา 3 หมู่ที่จัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) มาเชื่อมต่อกันโดยมีแคลเซียมอยู่ในช่องออกตะฮีดรอล (Octahedral) และจากการที่มืองค์ประกอบหลักเป็นสายโซ่ของซิลิกา จึงทำให้ Wollastonite เป็นแร่ที่มีความแข็งแรงสูง 5-5.5 mohs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของผลึกแคลเซียมซิลิเกต [21]



รูปที่ 2.5 ผลึกของ Wollastonite ที่พบได้ในธรรมชาติ [22]

2.4.2 สมบัติของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite

2.4.2.1 สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [23,24]

1. รูปร่างของผลึก (Crystal shape)

รูปร่างผลึกของ Wollastonite มีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเข็ม (Acicular) แสดงดัง

รูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

107721



รูปที่ 2.6 รูปร่างของผลึกที่มีลักษณะเหมือนเข็ม [21]

2. อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของผลึก (Aspect ratio)
ผลึกของ Wollastonite มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างตั้งแต่ 2:1 ถึง 20:1
3. สี (Color)
Wollastonite บริสุทธิ์จะมีสีขาวสว่าง แต่สีอาจจะเปลี่ยนเป็นสีครีม เทา ชมพู น้ำตาลหรือแดง ถ้ามีสิ่งเจือปนประเภทโลหะ เช่น เหล็ก และสีจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในพื้นผิวของ ผลึกหรือโครงสร้างของผลึก
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 อะลูมิเนียม เหล็ก แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียมที่มาแทนที่แคลเซียมในโครงสร้างผลึก
7. จุดหลอมเหลว (Melting point)
Wollastonite บริสุทธิ์จะมีจุดหลอมเหลว 1540°C
8. การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion)
Wollastonite จะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำและมีลักษณะเฉพาะของอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง จึงทำให้ Wollastonite มีความต้านทานต่อการเสียสภาพสูง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และยังคงรูปร่างเดิมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีที่อุณหภูมิสูง Wollastonite มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 6.5×10^{-6} mm/mm/ $^{\circ}$ C

9. ความแข็งกุด (Hardness)

Wollastonite จะมีค่าความแข็งกุดอยู่ในช่วง 5-5.5 mohs

10. ลักษณะเฉพาะอื่นๆ (Other Characteristics)

Wollastonite ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และ Wollastonite บางชนิดสามารถเรืองแสงได้

2.4.2.2 สมบัติทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [25]

Wollastonite เป็นแร่ที่ประกอบด้วยแคลเซียม ซิลิกอน และออกซิเจน มีสูตรโมเลกุลเป็น CaSiO_3 หรือ $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ มวลโมเลกุลเท่ากับ 116 และมี pH 8-10 Wollastonite จะมีองค์ประกอบตามทฤษฎีของ CaO 48.28% และ SiO_2 51.72% โดยน้ำหนัก ซึ่ง Wollastonite ธรรมชาติจะมีโลหะไอออนปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก แมงกานีส โพแทสเซียมและโซเดียม ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite แสดงดังตารางที่ 2.4

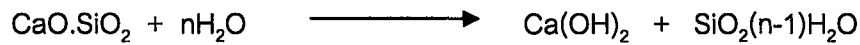
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [25]

ส่วนประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
CaO	47.00
SiO_2	50.00
Fe_2O_3	1.00
Al_2O_3	0.30
K_2O	0.10
MnO	0.10
MgO	0.30
TiO_2	0.05
P_2O_5	0.04
Moisture	0.20
Loss on ignition	0.20
Undermined	0.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความว่องไวทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกต

Wollastonite ค่อนข้างเฉื่อยและละลายน้ำได้เล็กน้อย โดยเมื่อ Wollastonite ทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น โดยมีขึ้น pH ประมาณ 10 เนื่องจากเกิด Ca(OH)_2 เกิดขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



Wollastonite จะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกรดไฮโดรคลอริก นอกเหนือจากกรดไฮโดรคลอริกยังมีกรดอื่นที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ คือ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดแอสติค กรดซิดริก กรดแลกติก และกรดฟอร์มิก การเกิดปฏิกิริยาของ Wollastonite กับกรดฟอสฟอริกแสดงดังสมการ



Wollastonite ทำปฏิกิริยากับเบสและเกลือได้ที่อุณหภูมิจำกัดคือ อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) ซึ่งถ้าทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิแวดล้อมจะมีผลของการแลกเปลี่ยนไอออน เช่น โซเดียมและโพแทสเซียมเกิดขึ้น

2. ปริมาณการระเหยของเนื้อสารเมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1000°C

(Loss on ignition, LO1)

Wollastonite จะมีปริมาณการระเหยของเนื้อสารเมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1000°C (LO1) อยู่ในช่วง 0.5-2.0% โดยน้ำหนัก

2.4.3 การประยุกต์ใช้งานของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [23,24]

แคลเซียมซิลิเกตจัดเป็นวัสดุเซรามิกส์ที่สามารถนำมาใช้แทนที่แร่ใยหินในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระเบื้องหลังคา และในงานอุตสาหกรรมสีจะใช้เป็นตัวทำให้แข็ง เป็นตัวลดการดูดซึมน้ำมัน เป็นต้น ส่วนในงานอุตสาหกรรมเซรามิกส์ แคลเซียมซิลิเกตจะเป็นตัวช่วยลดการโค้งงอ ลดการแตกหักในระหว่างการเผา และช่วยเพิ่มความแข็งแรง นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวเติม ในพอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติ ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงกดอัด ความแข็งแรงกระแทก และยังใช้ในการทำเป็นวัสดุเซรามิกส์ ชีวภาพที่ใช้ในทางการแพทย์อีกด้วย

2.4.4 การเตรียมแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วิธีตกตะกอนร่วม [26]

เทคนิคการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมวิธีหนึ่งที่ได้ผงเซรามิกส์ที่มีคุณภาพ ทำโดยนำสารละลายที่มีแคทไอออนของสารที่ต้องการตกตะกอนร่วมกันไปผสมกับสารละลายตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ตะกอนร่วมของสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการตกตะกอนแล้วไปกรองเพื่อแยกตะกอนออกมาและนำไปอบแห้ง

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

2. วิธีโซล-เจล [11]

โซล (Sol) คืออนุภาคของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร ที่กระจายอยู่ตัวในวัฏภาคของเหลว ถ้าหากทำให้อนุภาคของโซลแน่นขึ้นจะเปลี่ยนเป็นอนุภาคเจล (Gel) ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งที่เกิดการเชื่อมโยงจนมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้นซึ่งล้อมรอบในวัฏภาคที่เป็นของเหลวไว้

เทคนิคการสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจล จะได้สารประกอบออกไซด์ผสมซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเทคนิคนี้สามารถผลิตร่างแหสารอนินทรีย์ได้หลากหลาย โดยร่างแหสารอนินทรีย์จะเกิดจากการรวมของอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว และการแข็งตัวของโซลกลายเป็นโครงสร้างร่างแห สารตั้งต้นที่นิยมใช้คือพวกโลหะคอกไซด์ (Metal alkoxides) เพราะสามารถเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วกับน้ำ ตัวอย่างของโลหะอัลคอกไซด์ที่นิยมใช้ เช่น เตตระเมทอกซี ไทเลน (TMOS) และเตตระเอทิลอซิเลท (TEOS) และอัลคอกไซด์ (Alkoxide) อื่นๆ เช่น อะลูมิเนียม ทิทาเนต และบอเรต ซึ่งมักนิยมผสมกับ TEOS

วิธีโซล-เจล เริ่มจากการเตรียมสารละลายตั้งต้นจากสารประกอบประเภทอัลคอกไซด์ (Alkoxide) ในตัวทำละลายที่เหมาะสมซึ่งส่วนใหญ่มักจะเป็นพวกอัลกอฮอล์ จากนั้นจะเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิริยารวมตัว (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. วิธีบดเชิงกล [26,27]

การเตรียมสารประกอบออกไซด์เซรามิกส์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีพื้นฐานที่ง่ายที่สุด ราคาถูก และไม่ยุ่งยากซับซ้อน ทำโดยการนำเอาสารตั้งต้นซึ่งเป็นของแข็งมาบดด้วยกันในหม้อบดผสมเชิงกล

(Ball mill) ซึ่งการบดผสมเชิงกลนี้จะทำให้ได้อนุภาคค่อนข้างใหญ่ โดยมีขนาดอนุภาคมากกว่า 1 ไมครอน มีการกระจายตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนจากขั้นตอนการบดผสมทำให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ำ ซึ่งเป็นข้อดีของการบดผสมเชิงกล หลังจากได้ส่วนที่เป็นสารประกอบออกไซด์ผสมจากการบดแล้ว นำเอาส่วนที่ได้ไปผ่านการเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1000-1500^{\circ}\text{C}$ จะได้สารประกอบเซรามิกส์

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของนาย Joseph R. และคณะ [1] ได้ศึกษาถึงผลของสัณฐานวิทยาและพื้นที่ผิวของ Hydroxyapatite เพื่อลดอิทธิพลของขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติการไหลและความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุประกอบ โดยเลือกใช้ HA-HDPE composites ที่มี HA filler ซึ่งมี Specific surface areas และลักษณะบริเวณพื้นที่ผิวแตกต่างกัน ทำการศึกษาโดยใช้ Twin screw compounding ทำการขึ้นรูปพบว่า HA ที่มี Specific surface areas น้อยและมีลักษณะพื้นผิวเรียบจะใช้อุณหภูมิและความดัน (temp barrel & die pressure) ในการผสมต่ำกว่า ในขณะที่การขึ้นรูปโดย Injection moulding ก็จะใช้ Injection pressure ที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าสัณฐานวิทยาของพื้นที่ผิว HA มีอิทธิพลต่อสมบัติการไหลและความสามารถในการขึ้นรูปของ HA-HDPE composite โดยการลดลงของ specific surface areas เป็นการลดความหนืดเฉือน และพลังงานในการขึ้นรูป โดยเราสามารถปรับปรุง Specific surface areas ของ HA ได้โดยการควบคุมกระบวนการ Sintering

งานวิจัยของ Fang L. และคณะ [28] ได้ทำการศึกษากระบวนการเสริมแรงของ HAp ที่มีพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (UHMWPE) เพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีใหม่ของการผลิตวัสดุประกอบ HAp/UHMWPE ซึ่งจะใช้วิธี Wet ball mill และ Swelling ในตัวทำละลายที่ไม่เป็นพิษ โดยจะมีการนำตัวอย่างของวัสดุประกอบ HAp/UHMWPE มาเตรียมต่างกันถึง 4 วิธี วิธีแรกจะไม่มีการทำ Swollen treated วิธีที่สองมีการทำ Ball mill แต่ไม่ได้ทำ Swollen treated วิธีที่สามมีการทำ Swollen treated เพียงอย่างเดียว วิธีสุดท้ายจะมีการทำทั้ง Ball mill และ Swollen treated การทำ Ball mill จะทำในเอทานอลซึ่งจะทำให้อนุภาคของ HAp มีขนาดลดลงเหลือประมาณ 50 nm และจะไปแยกอนุภาคของ HAp ที่อยู่รวมกันให้แบ่งออกเป็นส่วนๆ การที่ไม่ทำ Ball mill จะทำให้อนุภาค HAp ที่มีขนาดเล็กจะไม่สามารถแพร่กระจายอยู่ภายในสายโซ่ UHMWPE ในระหว่างการ Swelling และการทำ Swelling ของวัสดุประกอบ

HAp/UHMWPE ใน Paraffin oil จะไปเพิ่มการเคลือบที่ของสายโซ่ UHMWPE และยังคงเกิดการซึมผ่านในโครงสร้างอีกด้วย ขั้นตอนสุดท้ายได้แสดงถึงวัสดุประกอบ HAp/UHMWPE ที่มีโครงสร้าง 2 บริเวณในวัสดุประกอบที่เป็นเนื้อเดียวของ HAp/UHMWPE โดยมี UHMWPE เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง (Matrix) จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ HAp/UHMWPE เมื่อมีการทำ Ball mill และ Swelling จะทำให้วัสดุประกอบมีค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) สูงขึ้น 90% และ yield strength เพิ่มขึ้นประมาณ 45% เมื่อเทียบกับ UHMWPE ที่บริสุทธิ์ การทำ Swelling จะไปเพิ่มค่ามอดุลัสของวัสดุประกอบประมาณ 20-30% แต่จะมีอิทธิพลต่อค่า yield strength น้อย ดังนั้นกระบวนการที่มีการทำ Ball mill และ Swelling จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ดีกว่าการใช้กระบวนการทำ Ball mill หรือ Swelling เพียงอย่างเดียว

งานวิจัยของ Wang M. และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุประกอบ Hydroxyapatite-polyethylene และศึกษาถึงกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ ที่ผ่านมาวัสดุประกอบ Hydroxyapatite-polyethylene ยังคงมีปัญหาในเรื่องการรองรับน้ำหนักเมื่อนำไปใช้งานจริงจึงปรับปรุงโดยนำ Silane coupling agent มาใช้เพื่อเพิ่มสมบัติเพิ่มความแข็งแรงเชื่อมต่อระหว่าง 2 วัสดุ ซึ่งมี Hydroxyapatite เป็นวัสดุภาคกระจายตัว HDPE เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง และ Silicone เป็นตัวเชื่อมต่อบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 วัสดุ และอีกวิธีโดยการทำ Acrylic acid graft of polyethylene ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่าง 2 วัสดุ โดยวิธีทั้ง 2 ช่วยปรับปรุงให้สมบัติเชิงกลของ Hydroxyapatite-polyethylene ดีขึ้น

งานวิจัยของ Ono I. และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการประเมินค่าของ HDPE เมื่อมี HAp ผังอยู่โดยการใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงในการดึงออก จะมี 3 แบบคือ Mini ROC fastener system, Martin Drill free screw สำหรับระบบ Microplate และแบบ Mini ROC fastener system ร่วมกับ Martin Drill free screw ในการศึกษาเบื้องต้นได้มีการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูสว่าน ความลึก และถ้ารูพูนของ HAp มี 40% จะต้องมีการเพิ่มความหนาของบล็อก HAp เป็น 3 มิลลิเมตร ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มประมาณ 2 เท่า ถ้าลักษณะที่เป็นรูพูนเพิ่มจาก 40% ไปถึง 50% หรือจาก 50% ไปถึง 60% ความหนาของบล็อกต้องเพิ่มประมาณ 2 มิลลิเมตร เพื่อชดเชยสำหรับการที่ค่าความแข็งแรงลดลง ในการหาค่าความแข็งแรงในการดึงออกของระบบขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูเส้นผ่านศูนย์กลาง และความลึกที่ได้ใส่ไว้ วัสดุจะมีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อใช้อุปกรณ์ที่รูของเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.10 มิลลิเมตร และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลึก 6 มิลลิเมตร โดยอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดคือ Mini ROC fastener system ซึ่งเหมาะกับคนไข้ที่มีการใช้งานด้านความแข็งแรงในการดึงมากกว่า 7 kgf ส่วนที่มีการใช้ Drill free screw ร่วมกับ Mini ROC fastener system จะมีความแข็งแรงในการดึงออกประมาณ 10 kgf ซึ่งจะดีกว่าการใช้ Mini ROC fastener system เพียงอย่างเดียว แต่ Mini ROC fastener system จะเหมาะสมที่สุดในการกำหนด HAp เพื่อปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ เช่น กล้ามเนื้อ, เอ็น, เยื่อหุ้มกระดูก ส่วน Drill free screw มีความสามารถในการซ่อมแซมตัวเมื่อใช้อยู่เพียงอย่างเดียว การประเมินใช้ Drill free screw เกี่ยวข้องกับสิ่งที่เข้าไปข้างในโดยตรงถึงกระดูก ดังนั้นเป็นไปได้ที่จะใส่ screw กับรูที่นำร่องและมันสามารถใช้ได้แค่เส้นผ่านศูนย์กลางรู 1 มิลลิเมตร ใน HAp ที่ปลูกฝังในร่างกาย นอกจากนี้รูปร่างแหลมๆของ screw จะทำให้รู้สึกไวต่อความเค้นในการดึงออก ผลที่ได้จากการทดลองจะช่วยให้เพิ่มความก้าวหน้าทางด้านการรักษาและเป็นประโยชน์ในการทำ HAp ที่ใช้ในการปลูกฝัง

งานวิจัยของ Juhasz J.A. และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ และขนาดของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบระหว่าง PE กับ A-W (AWPEX) โดย A-W คือสารประกอบระหว่าง HAp และ CaSiO_3 ชนิด Wollastonite และทำการเทียบผลกับวัสดุประกอบระหว่าง PE กับ HAp (HAPEX™) ที่ปริมาณของสารตัวเติม 40 % โดยปริมาตร ในงานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณของสารตัวเติมในช่วง 10-50 % โดยปริมาตร จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า HAPEX มีความเครียดของการแตกหักที่ต่ำกว่า AWPEX ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง HAp กับ PE แข็งแรงกว่า A-W กับ PE ส่วนผลของขนาดของสารตัวเติมพบว่าขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ แต่มีความเครียดของการแตกหักต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นผิวสัมผัสมากกว่า ทำให้มีอันตรกิริยาและการยึดติดระหว่างอนุภาคกับพอลิเมอร์ที่ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีพื้นผิวสัมผัสน้อยกว่า และอนุภาคขนาดเล็กจะส่งผลให้การเสริมแรงมีประสิทธิภาพมากขึ้น วัสดุประกอบมีความแข็งแรงขึ้น และเมื่อมีปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีค่าสูงขึ้น แต่มีความเครียดของการแตกหักลดลง เนื่องมาจากปริมาณของพอลิเมอร์ระหว่างอนุภาคลดลง ก็คือพฤติกรรมความเหนียวของ PE ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ Wang M. และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของ HAp ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE โดย HAp ที่นำมาใช้มี 2 เกรด คือ P88 HA และ P81B HA ซึ่งมีขนาดอนุภาค 4.14 μm และ 7.32 μm ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองเกรดมีการอัดแน่นของผลึก แต่ใน P81B HA มีความเป็นระเบียบและขนาดใหญ่กว่า P88 HA และเมื่อตรวจด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันอย่างทั่วถึง ได้มีการศึกษาถึงมวลโมเลกุลของ PE matrix ในแต่ละชั้นตอนของกระบวนการ พบว่าเมื่อทำการผสมและผ่านกระบวนการทางความร้อนมวลโมเลกุลเฉลี่ยลดลง และเมื่อเติม HAp จะทำให้มวลโมเลกุลเฉลี่ยลดลงด้วย จากการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลพบว่า การเพิ่มขึ้นของ HA volume fractions ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของ HAPEXTM เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเครียดแตกหักลดลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อมี HA น้อยกว่า 20% จะเกิด necking ที่ตัวอย่างระหว่างทดสอบค่าการดึงยืดแล้วถ้ามี HA volume สูง (มากถึง 30%) จะเกิดสภาพยืดหยุ่นได้ดีด้วย ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของ HA มีผลอย่างยิ่งต่อสมบัติเชิงกลของ HAPEXTM อนุภาค HA ที่มีขนาดใหญ่จะลดค่าความแข็งแรงและมอดูลัสลง แต่จะเพิ่มค่าความยืดหยุ่นขึ้น เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค DMA สามารถใช้ศึกษาถึง viscoelastic behaviour ของ HAPEXTM ได้ โดยพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเติม HA ค่ามอดูลัสเชิงพลวัตจะสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ค่ามอดูลัสเชิงพลวัตจะลดลง โดยการทดลองนี้จะขึ้นอยู่กับ HA volume fractions

งานวิจัยของ Di Silvio L. และคณะ [2] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของเซลล์สร้างกระดูกบนพื้นผิวของวัสดุผสม HA/PE เมื่อปริมาณของ HA แตกต่างกัน โดยได้ใช้ปริมาณของ HA ระหว่าง 20-40% vol. ใน PE matrix พบว่าเมื่อใส่วัสดุที่ปลูกฝังในร่างกายจะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านคุณสมบัติของพื้นผิวทันที เพราะผลของสิ่งแวดล้อมในร่างกาย ดังนั้นจึงศึกษาถึงผลการตอบสนองทางชีวภาพของกระดูกในวัสดุชีวภาพ สิ่งสำคัญที่สุดคือปฏิกิริยาเริ่มต้นของเซลล์กระดูกกับวัสดุซึ่งก็คือ การยึดติดของเซลล์ ได้มีการศึกษาถึง H-Tdr incorporation/DNA สำหรับ HOB cell (primary human osteoblasts) บน TMX 20%vol. และ 40%vol. HA/PE เพาะเลี้ยง 14 วันพบว่าตอนแรกการแพร่พันธุ์ของ 40%vol. HA/PE สูงกว่า 20%vol. แต่อัตราการแพร่พันธุ์ต่ำกว่า TMX อย่างชัดเจน อัตราการแพร่พันธุ์จะลดลงไปตามเวลาทั้ง 3 แบบ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเซลล์โดยใช้ SEM แสดงให้เห็นถึงการปกคลุมของเซลล์บนวัสดุประกอบทั้งสองอย่างต่อเนื่องไปตามโครงสร้างของเซลล์สร้างกระดูกปกติ ซึ่งเซลล์จำนวนมากอยู่ในกระบวนการแบ่งเซลล์ โดยสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นบน 40%vol. HA/PE การสังเกต CLSM ของ HA/PE ที่ปริมาตรต่างกัน แสดง

ให้เห็นว่า 72 ชั่วโมง actin stress fibers เห็นได้ในเซลล์บนวัสดุทั้งสอง แต่ 20%vol. HA/PE มีการกระจายของ Actin cytoskeleton มากกว่า แต่มีการเกิด Stress fiber น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ 40%vol. การจำกัดของจุดเชื่อมต่อนของเซลล์สร้างกระดูกบนวัสดุทดสอบถูกทำให้มองเห็น ด้วย Vinculin immunostaining การติดสีของ Vinculin บน 40%vol. HA/PE มีความหนาแน่นสูงและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่า ซึ่งแสดงถึงระดับที่สูงกว่าของการยึดติดของเซลล์บน 40%vol. ส่วนผลของ TEM พบว่า Collagen matrix บน 40%vol. HA/PE ปรากฏเป็นระเบียบมากกว่าและแสดงถึงระดับที่สูงของ ALP activity ซึ่งทำให้วัสดุประกอบมีการผลิตพื้นผิวที่ดีที่สุดสำหรับลักษณะทางกายวิภาคและสรีรวิทยาของเซลล์สร้างกระดูก การสังเกตทั้งด้านคุณภาพและปริมาณ แสดงให้เห็นว่าลักษณะของพื้นผิวเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการยึดติดของเซลล์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาตรของ HA เพิ่มการตอบสนองของเซลล์ การศึกษาโครงสร้างกระดูกได้เสนอว่าอนุภาค HA ทำให้เกิดที่ยึดเหนี่ยวสำหรับเซลล์สร้างกระดูกและส่งเสริมให้เป็นพื้นที่เหมาะสมสำหรับการยึดติดเซลล์และมีลักษณะพื้นผิวเช่นเดียวกับวัสดุประกอบชี้ให้เห็นถึงความสามารถของวัสดุที่คำนวณการงอกเข้าด้านในของกระดูกหรือแสดงฐานะเป็น Biological template

งานวิจัยของ Wang M. และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ HAp และ HDPE เพื่อพัฒนาให้วัสดุประกอบมีการยึดติด (Bonding) ที่ดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้ใช้ไซเลน(3-ไตรเมทอกซีอิลโพรพิลเมทาครีเลต) ในการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ HAp และใช้กรดอะคริลิก (Acrylic acid AA) ต่อกิ่ง (Grafting) บน HDPE ในกระบวนการผลิตวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ได้ทำการแบ่งการผลิตออกเป็น 3 ประเภท โดย ประเภทแรกเป็นวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ส่วนประเภทที่สองเป็นวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่มีการใช้ไซเลนเพียงอย่างเดียว และประเภทที่สามเป็นวัสดุประกอบระหว่าง HAp และ HDPE ที่มีทั้งกานใช้ไซเลนและการต่อกิ่งด้วย AA โดยปริมาณของ HAp ที่ใช้คือ 20 และ 40% โดยปริมาตร จากเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) พบว่าปริมาณของ HAp ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) แต่เมื่อมีการใช้ไซเลนจะทำให้ T_m ลดลงและจะลดลงอีกเมื่อมีการต่อกิ่งบน HDPE รวมด้วย ที่เป็นเช่นนั้นเพราะสายไซของ HDPE มีการยึดขยายออก สายไซจึงมีที่ว่างเพิ่มขึ้นมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ทำให้สายไซเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อมีการต่อกิ่งด้วย AA จะทำให้การกระจายขนาดของผลึกมากกว่าการใช้ไซเลนเพียงอย่างเดียว เพราะการต่อกิ่งทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียสลดลง นอกจากนี้ปริมาณการเพิ่มขึ้นของ HAp ที่มีการใช้ไซเลนทำให้องศาความเป็นผลึกของวัสดุ

ประกอบเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีการตอกิ่งร่วมด้วย องค์ความเป็นผลึกของวัสดุประกอบจะลดลง จากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (FT-IR) พบว่ามีการยึดติดของวัสดุ HAp กับ HDPE เมื่อมีการใช้ไซเลน เพราะความเข้มของพีก คาร์บอนิลที่ความยาวคลื่น $1650 - 1740 \text{ cm}^{-1}$ สูงขึ้น และจะมีความเข้มของพีกสูงขึ้นอีก เมื่อมีปริมาณของ HAp มากขึ้น ซึ่งปริมาณของ HAp ที่เพิ่มมากขึ้นจะมี ไซเลนมากขึ้นด้วย

งานวิจัยของ Siriphannon P. และคณะ [7] ทำการศึกษาถึงผลของโครงสร้างของ CaSiO_3 ที่มีต่อการก่อตัวของ HAp เมื่อทำการแช่ CaSiO_3 ในสารละลาย SBF โดยในงานวิจัยนี้ใช้ CaSiO_3 3 ชนิดคือ ชนิดออสติท $\beta\text{-CaSiO}_3$ และ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ เมื่อนำตัวอย่างทั้ง 3 ตรวจสอบวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ก่อนการแช่ตัวอย่าง จากเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของ CaSiO_3 ชนิดออสติท และ $\beta\text{-CaSiO}_3$ มีลักษณะขรุขระแต่ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ จะมีพื้นผิวเรียบ โดยจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 12.2 , 7.9 และน้อยกว่า $1 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้อนุภาคของ CaSiO_3 มีความหนาแน่นมากขึ้น และจากเทคนิค XRD พบว่า CaSiO_3 ชนิดออสติท มีพีกที่แสดงถึงความเป็นออสติท ส่วน $\beta\text{-CaSiO}_3$ และ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ มีพีกที่แสดงความเป็นผลึก จากผลการวิเคราะห์ภายหลังการแช่ตัวอย่างในสารละลาย SBF เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของ CaSiO_3 ชนิดออสติท ที่ทำการแช่ 2 ชั่วโมง มีอนุภาคกลมๆขนาดเล็กเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อแช่นานขึ้นจำนวนกลุ่มก้อนจะเพิ่มขึ้น โดยมีการก่อตัวของอนุภาคใหม่แบบหลวมๆ ทำให้พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ส่วน β และ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ จะมีอนุภาคกลมๆขนาดเล็กเกาะรวมตัวกันอย่างหนาแน่นหลังจากแช่เป็นเวลา 1 วัน และเมื่อระยะเวลาขึ้นขนาดอนุภาคจะใหญ่ขึ้น พร้อมทั้งมีการก่อตัวของอนุภาคใหม่ร่วมด้วย เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า CaSiO_3 ชนิดออสติท มีพีกที่แสดงถึงผลึกของ HAp ภายหลังการแช่ 1 วัน และพบพีกของผลึกแคลไซต์รวมอยู่ด้วย เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาต่ำทำให้วัฏภาคออสติทของ CaCO_3 ยังคงเหลืออยู่ ส่วน $\beta\text{-CaSiO}_3$ พบผลึกของ HAp ภายหลังจากการแช่ 1 วัน และยังมีพีกของ $\beta\text{-CaSiO}_3$ เหลืออยู่ ถึงแม้จะแช่เป็นเวลานาน ส่วน $\alpha\text{-CaSiO}_3$ พบพีกแสดงความเป็นผลึกของคริสโตบอลไลต์ และ HAp ซึ่งเกิดขึ้นทับกับผลึกของ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ หลังจากแช่เป็นเวลา 1 วัน และเมื่อแช่เป็นเวลานานจะไม่พบผลึกของ $\alpha\text{-CaSiO}_3$ เนื่องจากมันถูกปกคลุมด้วยชั้นผลึกของ HAp หมด แต่ยังคงพบผลึกคริสโตบอลไลต์อยู่ สุดท้ายผลการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Ca Si และ P ในสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่ตัวอย่างทั้ง 3 ด้วยเทคนิค ICP พบว่า ความเข้มข้นของ Ca และ Si เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรก แต่ความเข้มข้นของ P ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ CaSiO_3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อสังฐาน สามารถปลดปล่อย Ca ได้สูงกว่าอีก 2 ตัวอย่าง แต่สามารถปลดปล่อย Si ได้น้อยกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาที่ 500°C ไม่เพียงพอที่จะทำให้ CaCO_3 และ SiO_2 ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็น CaSiO_3 ได้ ผลของการปลดปล่อย Ca ได้เร็วทำให้ pH ของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดการตกตะกอนของ HAp ได้อย่างรวดเร็วกว่าตัวอย่างอื่น ความเข้มข้นของสารละลายหลังจากการแช่ตัวอย่างเป็นเวลานาน จะเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างการละลายของสารตัวอย่างและการก่อตัวของ HAp

โครงการพิเศษของ เกตุดาว ขวลิขิตดำรง, สาลิภัค บัวเจริญ และ สิญาภา เอมแหยม [8] เป็นการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) โดยสังเคราะห์ CaSiO_3 จากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) กับซิลิกา (SiO_2) ในอัตราส่วน 1:1 โดยโมล จากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง แล้วนำสารที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และ XRF ทำการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ใช้ CaSiO_3 ในช่วง 0-20% โดยปริมาตร แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อปริมาณของ CaSiO_3 เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่ามอดุลัสโค้งงอ มอดุลัสกดอัด และค่าความแข็งกดของวัสดุประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง จากสมบัติทางความร้อนพบว่า CaSiO_3 ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ HDPE มีค่าลดลงแต่ CaSiO_3 ไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก จากฐานฐานวิทยาพบว่า เมื่อปริมาณ CaSiO_3 เพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของ CaSiO_3 ใน HDPE เป็นไปได้ยากขึ้น สุดท้ายเมื่อนำวัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 ไปแช่ในสารละลายจำลองของเหลวในร่างกายมนุษย์ (SBF) พบการก่อตัวของชั้นไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมคล้ายดอกกะหล่ำรวมกันเป็นกลุ่มบนพื้นผิวของวัสดุประกอบ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า วัสดุประกอบ HDPE/ CaSiO_3 เป็นวัสดุที่มีความว่องไวทางชีวภาพ

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งมาลิกแอนไฮด์ดรายด์ (HDPE-g-MA) เกรด Fusabond® E MB100D บริษัท duPont de Nemours and Company.Inc สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA แสดงดังตารางที่ 3.1
2. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกรด OMYACARB-2 บริษัท สุรินทร์ออมยา เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด
3. ซิลิกา (SiO_2) เกรด HI-SIL(R) 255-S บริษัท พีพีจี สยามซิลิกา จำกัด
4. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เกรดการค้า โรงงานสุรา องค์การสุรา กรมสรรพสามิต

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA [30]

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	HDPE-g-MA(E MB100D)
ดรรชนีการไหล	g/10 min	ASTM D1238	2
ความหนาแน่น	g/cm^3	ASTM D1505	0.96
ความต้านทานแรงดึง	MPa	ASTM D 638	26
ความต้านทานแรงดึงขาด	MPa	ASTM D 638	29
%การดึงยืด ณ จุดขาด	%	ASTM D638	1250
ความแข็ง, SHORE D	-	ASTM D2240	70
จุดหลอมเหลว	$^{\circ}\text{C}$	ASTM D3418	134

หมายเหตุ HDPE-g-MA มี MA อยู่ 1% โดยน้ำหนัก

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวิเคราะห์การคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence, XRF) บริษัท BRUKER AG รุ่น SRS 3400
2. เครื่องบดผสมตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท ROCK LAB รุ่น BENCHMILL MODEL A
3. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท HERZOG รุ่น TP/2D
4. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractor meter, XRD) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP
6. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) บริษัท PERKIN ELMER รุ่น DSC7
7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท LLOYD INSTRUMENT รุ่น LR 30K
8. เครื่องผสมชนิดแบนบูรี (Brabender Rheometer) บริษัท C. MELCHERS & CO. (THAILAND) LTD รุ่น PL 2000
9. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) บริษัท LAB TECH ENGINEERING รุ่น LP 20
10. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) บริษัท BOSCO ENGINEERING รุ่น A600
11. เครื่องวัดแรงกระแทก (Impact tester) บริษัท YASUDA SEIKI SEISAKUSHO รุ่น 7697
12. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer ชนิด Shore D) บริษัท INTRO ENTERPRISE
13. เตาเผาสารบริษัท THERMOLYNE รุ่น FURNACE 6000
14. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท DENVER INSTRUMENT รุ่น TC-254
15. หม้อบดผสมเชิงกลเซรามิกส์ (Ball mill) ขนาด 500 มิลลิเมตร
16. ลูกบดผสมเชิงกลเซรามิกส์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.05 12.55 และ 9.45 มิลลิเมตร
17. ครุชิลเบลชนิดอะลูมินา
18. ชามระเหยชนิดพอร์ตแลนด์
19. พิกโนมิเตอร์ ขนาด 25 มิลลิเมตร
20. ตะแกรงร่อนคัดขนาดอนุภาค ขนาด 230 เมช
21. เครื่องหาขนาดอนุภาค (Mastersizer x) บริษัท MALVERN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite

1. ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 100 กรัม และซิลิกา (SiO_2) 60 กรัม ในอัตราส่วน 1:1 โดยโมล ลงในหม้อบดผสม ใส่ลูกบดปริมาณ 412 กรัม
2. เติมน้ำตาลลงในหม้อบดผสมให้ท่วมสารเล็กน้อย
3. ทำการบดผสมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยให้ความเร็วรอบในการบด 60 รอบต่อนาที
4. เมื่อครบกำหนด 4 ชั่วโมงตักสารในหม้อบดใส่ลงในชามระเหย จากนั้นนำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ทำการบดสารที่อบได้ด้วยโถรงบดสาร และนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. ตรวจสอบคุณสมบัติของสารที่ได้โดย
 - 6.1 หางงศ์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค XRF

การเตรียมตัวอย่าง

 - นำสารตัวอย่างมาบดด้วยครกจนละเอียด จากนั้นนำไปชั่งให้มีน้ำหนัก 2.5 กรัม ผสมกับกรดบอริก 2.5 กรัม เพื่อให้น้ำหนักรวมเป็น 5 กรัม
 - นำสารตัวอย่างและกรดบอริกใส่ลงในถ้วยบดของเครื่องบดผสมตัวอย่าง เพื่อบดผสมให้สารทั้ง 2 เป็นเนื้อเดียวกัน
 - ตักสารที่ผสมแล้วใส่ลงในที่ใส่ตัวอย่าง (Sample holder)
 - นำ Sample holder ที่ใส่สารตัวอย่างแล้ว นำมาอัดด้วยเครื่องอัด โดยตั้งแรงอัดไว้ที่ 150 kN ประมาณ 5 นาที
 - นำสารตัวอย่างที่อัดเรียบร้อยแล้วไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF
 - 6.2 วัฏภาคที่เป็นผลึกโดย XRD
 - นำสารตัวอย่างมาบดด้วยครกจนละเอียด
 - อัดสารให้แน่นบน Sample holder โดยให้มีพื้นที่ผิวระดับเดียวกันกับขอบของ Sample holder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ความหนาแน่นของ CaSiO_3 ที่สังเคราะห์โดยใช้พิกโนมิเตอร์

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่น

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

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

D_A = ความหนาแน่นของอากาศ (g/cm^3)

D_L = ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3)

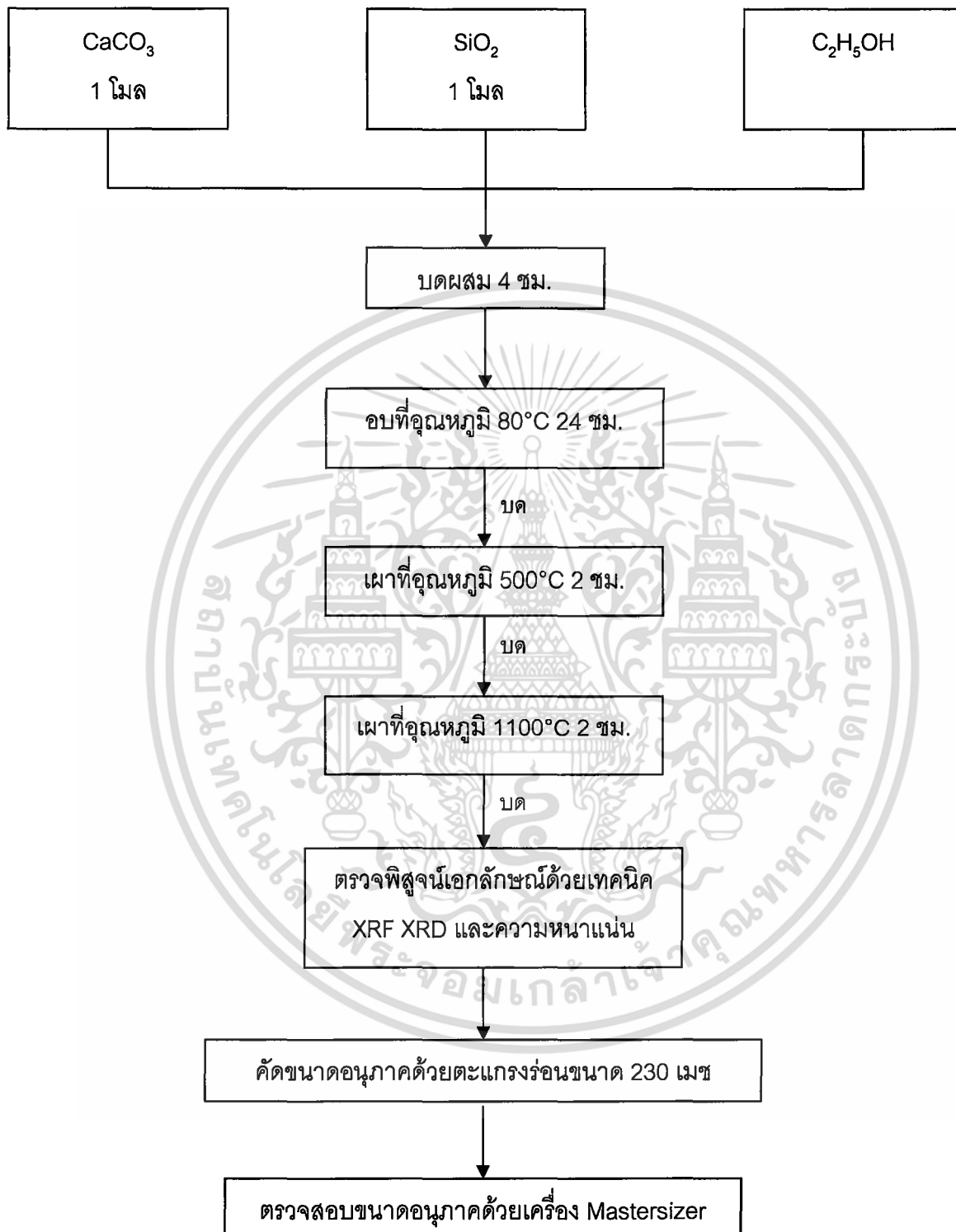
W_0 = น้ำหนักพิกโนมิเตอร์เปล่า (g)

W_1 = น้ำหนักรวมของพิกโนมิเตอร์และ CaSiO_3 (g)

W_2 = น้ำหนักรวมของพิกโนมิเตอร์ CaSiO_3 และน้ำกลั่น (g)

W_3 = น้ำหนักรวมของพิกโนมิเตอร์ และน้ำกลั่น (g)

7. ทำการคัดขนาดอนุภาคของสารที่เผาได้ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 230 เมช
8. หาขนาดอนุภาคด้วยเครื่องหาขนาดอนุภาค (Mastersizer x)



รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO₃

1. ตั้งอุณหภูมิเครื่องผสมแบบนุรีที่ 180 หรือ 200 °C
2. เมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการ ค่อยๆเทส่วนผสม HDPE-g-MA กับ 25%vol.CaSiO₃ เตรียมไว้ลงในเครื่องผสมแบบนุรี โดยใช้เวลาในการผสม 20 นาที ซึ่งความเร็วรอบและอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการผสม

สูตรที่	อุณหภูมิในการผสม (°C)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
1	180	40
2	180	60
3	180	80
4	200	40
5	200	60
6	200	80

3. หลังจากของผสมที่เตรียมได้เย็นตัวแล้ว นำไปตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ด
4. ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ 100%HDPE-g-MA ผสมที่ความเร็วและเวลาค่าหนึ่ง (โดยเลือกหลังจากทราบสมบัติของ HDPE-g-MA/CaSiO₃ แล้ว)

3.3.3 การขึ้นรูปชิ้นงาน

1. ตั้งอุณหภูมิที่เครื่องอัดขึ้นรูป 200 °C
2. นำของผสมที่ตัดเป็นเม็ดเรียบร้อยแล้วใส่ลงในแม่แบบ (Mold) ที่ต้องการใช้ในการ ทดสอบ
3. นำแม่แบบใส่เครื่องอัดขึ้นรูป เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการอัดเย็นต่อเป็นเวลา 5 นาที

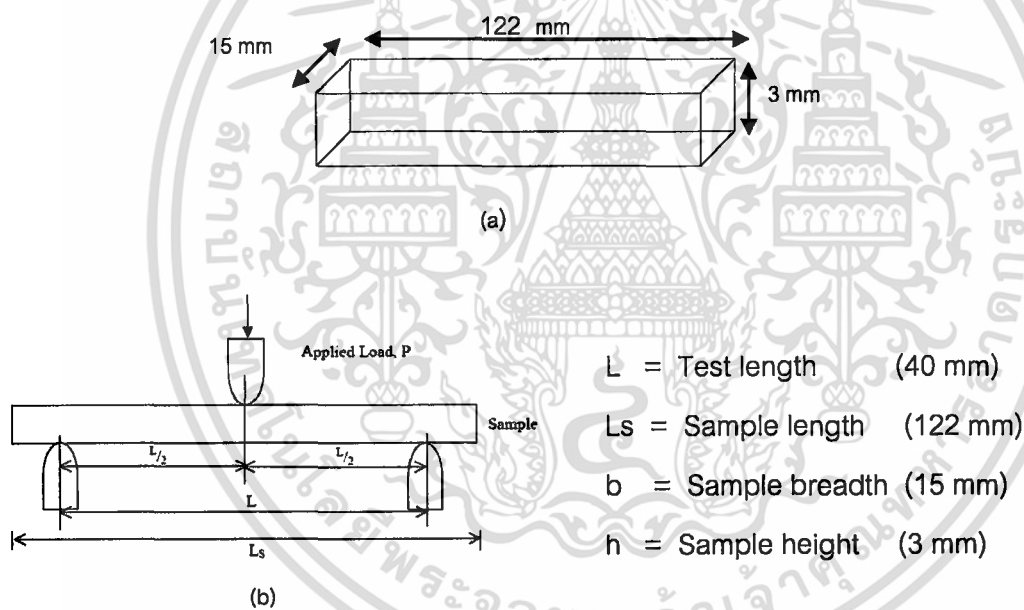
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃

3.3.4.1 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ [4]

การทดสอบหาความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ และใช้ระบบการให้แรง 3 จุด (Three-point loading system) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นงานตัวอย่างละ 6 ชิ้น ขนาดประมาณ $3 \times 15 \times 122 \text{ mm}^3$ ภาวะที่ใช้ทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 5 kN
- ความเร็วในการกด (Compression speed) 5 mm/min
- ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length) 40 mm



รูปที่ 3.2 การทดสอบสมบัติความโค้งงอ

(a) ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบสมบัติความโค้งงอ

(b) ระบบการทดสอบสมบัติความโค้งงอโดยระบบการให้แรง 3 จุด [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

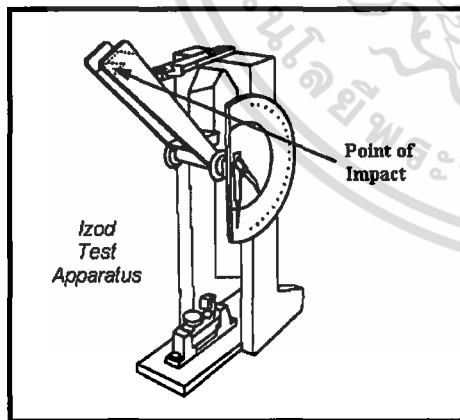
สูตรที่ใช้ในการคำนวณความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)} &= \frac{3FL}{2bh^3} \\ \text{มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)} &= \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d} \end{aligned}$$

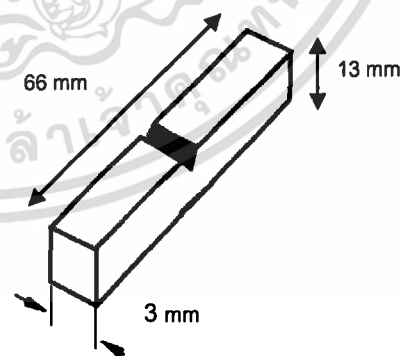
เมื่อ	F	คือ	แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานโค้งงอ (N)
	L	คือ	ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (mm)
	b	คือ	ความกว้างของตัวอย่าง (mm)
	h	คือ	ความหนาของตัวอย่าง (mm)
	ΔF	คือ	ผลต่างของแรงกดในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (N)
	Δd	คือ	ระยะกดโค้งงอในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (mm)

3.3.4.2 ความแข็งแรงกระแทก [4]

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) แบบ Notch Izod โดยใช้เครื่องวัดแรงกระแทกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างอย่างละ 6 ชิ้นงาน ขนาดประมาณ $3 \times 13 \times 60 \text{ mm}^3$ และมีความลึกของรอยบาก 2.54 mm



(a)



(b)

รูปที่ 3.3 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกระแทก

(a) การทดสอบแบบ Notch Izod Impact [31]

(b) ตัวอย่างชิ้นงาน Izod ที่มีรอยบาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ IS คือ ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)

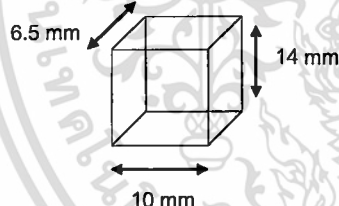
W คือ พลังงานกระแทก (kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2)

3.3.4.3 มอดุลัสกดอัด [4]

การทดสอบมอดุลัสกดอัด (Compressive modulus) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D695 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 6 ชิ้นงาน ขนาดประมาณ $14 \times 6.5 \times 10 \text{ mm}^3$ ภาวะที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 30 กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการกด (Compression speed) 1 มิลลิเมตร/นาที (mm/min)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบมอดุลัสกดอัด

สูตรที่ใช้ในการคำนวณมอดุลัสกดอัด

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

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

L_0 คือ ความหนาเริ่มต้นของตัวอย่าง (mm)

ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (N)

ΔL คือ ระยะกดอัดในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.4 ความแข็งกด [4]

การทดสอบความแข็งกด (Hardness) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D785 โดยในการทดสอบใช้มาตรฐาน shore D ซึ่งวัสดุที่นำมาทดสอบจะต้องมีผิวเรียบ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 mm ใช้เวลาทดสอบ 5 วินาที จึงอ่านค่าที่ได้ โดยทำการทดสอบ 20 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง

3.3.5 สมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃

นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 200 °C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 20°C/min จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้นตามมาตรฐาน ASTM D3417 ศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของชิ้นงาน

การคำนวณหา Heat of melting (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_{f_0}}$$

เมื่อ ΔH_f คือ พื้นที่ใต้กราฟของ T_m
 ΔH_{f_0} คือ Heat of fusion ของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า 293 J/g

3.3.6 สัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃

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

บทที่ 4

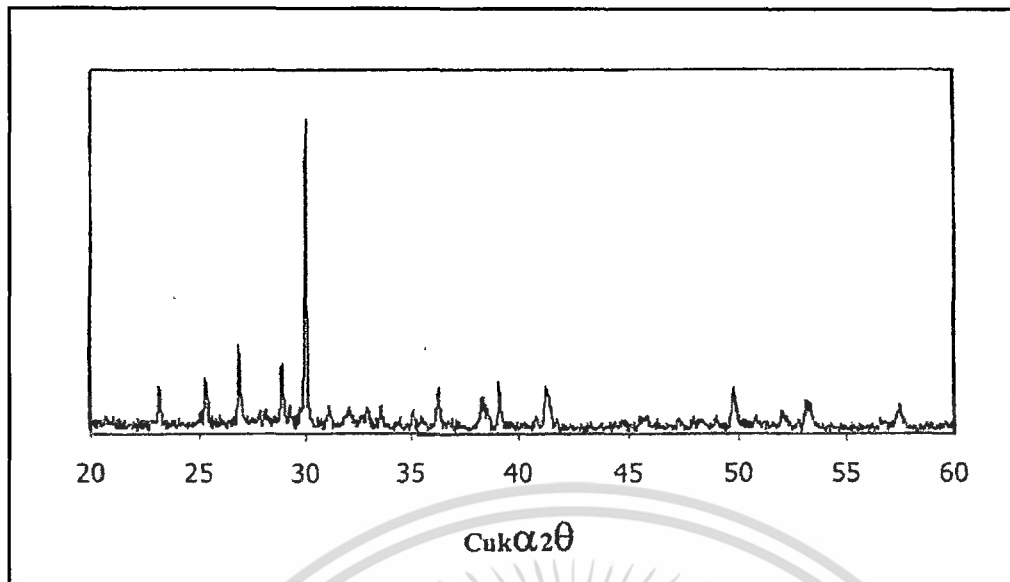
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการผสมที่ 180 และ 200°C และมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ใช้ในการผสมที่ 40 60 และ 80 รอบต่อนาที ในแต่ละอุณหภูมิการผสม สารตัวอย่างที่เตรียมได้ถูกนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD XRF และ SEM และทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา ได้ผลทดลองดังต่อไปนี้

4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่เตรียมได้

เมื่อนำ CaSiO₃ ที่เตรียมได้จากบดผสมเชิงกล และผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค XRF พบว่า CaSiO₃ ที่เตรียมได้มีองค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วย CaO 53-56% โดยน้ำหนัก และ SiO₂ 43-47% โดยน้ำหนัก คิดเป็นอัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca:Si) มีค่าเฉลี่ยเป็น 1.29 (ดังตารางในภาคผนวก ก) โดยตามทฤษฎีอัตราส่วนโมลระหว่าง Ca:Si จะเท่ากับ 1 ดังนั้นการที่อัตราส่วนที่ได้จริงมากกว่าทฤษฎี สันนิษฐานว่า SiO₂ ที่ใช้มีการเคลือบสารประกอบอินทรีย์ไว้ เมื่อนำไปเผาแล้วสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้จะสลายตัวไป ดังนั้นน้ำหนักที่ชั่งก่อนบดผสมจะมีเนื้อ SiO₂ น้อยกว่าที่ต้องการ

เมื่อนำ CaSiO₃ ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิค XRD พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุที่เป็นผลึกของ CaSiO₃ ที่สังเคราะห์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มีพิกสำคัญที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 23.2, 25.3, 26.8, 28.9, 30, 36.2, 39.1, 41.3 และ 49.8 องศา ที่เตรียมได้มีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.87 g/cm³ ซึ่งได้ตรงตามทฤษฎี คือ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.87-3.09 g/cm³



รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CaSiO_3 ที่เตรียมได้จากแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อนำ CaSiO_3 ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $5.66 \mu\text{m}$ โดยมีการกระจายขนาดอนุภาคดังตาราง

ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของ CaSiO_3

ช่วงขนาดอนุภาคของ CaSiO_3 (μm)	เปอร์เซ็นต์โดยประมาณของ CaSiO_3
ต่ำกว่า 10.00	58.1
10.01 - 20.00	20.5
20.01 - 30.00	10.0
30.01 - 40.00	7.8
40.01 - 50.00	2.29
50.01 - 60.00	1.15
60.01 - 64.00	0.16

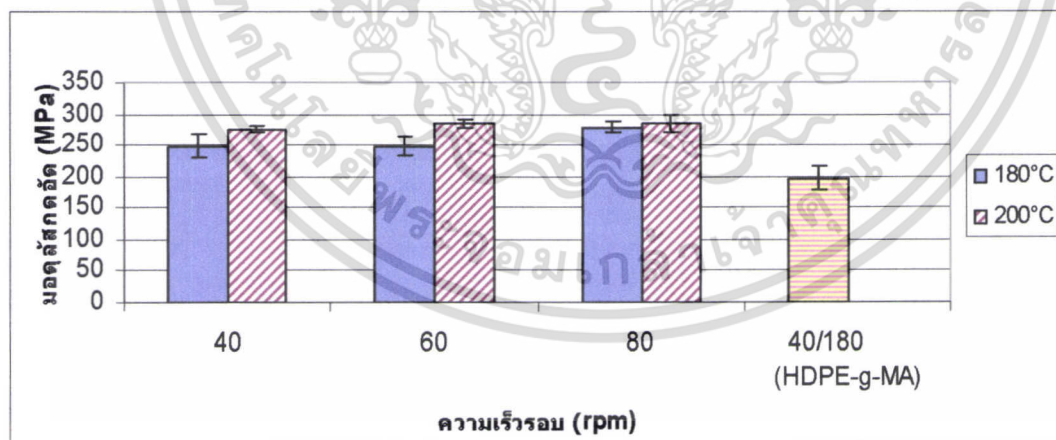
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สมบัติเชิงกล

4.2.1 มอดุลัสกดอัด

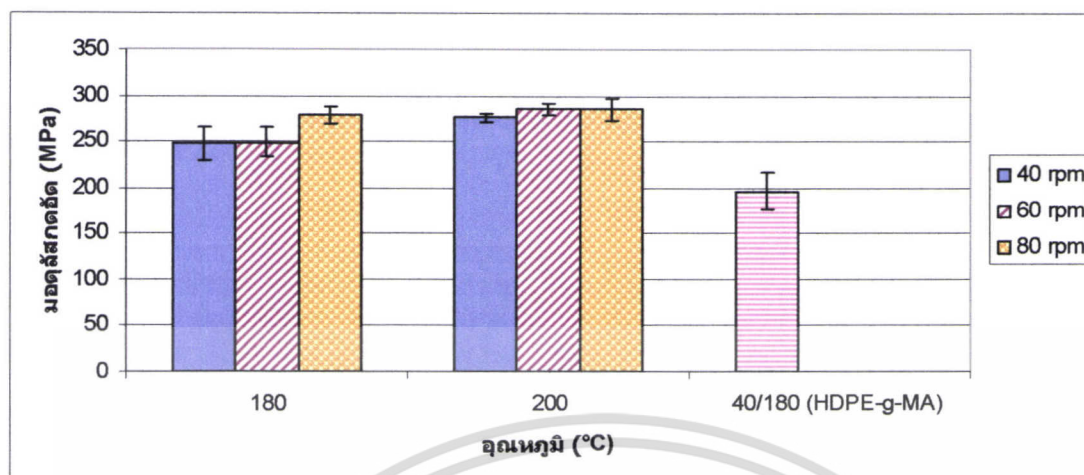
จากรูปที่ 4.2 แสดงค่ามอดุลัสกดอัดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ และ HDPE-g-MA พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสกดอัดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ จะมีค่าสูงกว่าค่ามอดุลัสกดอัดของ HDPE-g-MA ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก CaSiO₃ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีความแข็งสูง เมื่อให้แรงกดอัดซึ่งเป็นการให้แรงทางเดียวโดยแรงจะส่งผ่านจาก HDPE-g-MA ไปยังอนุภาค CaSiO₃ ซึ่งมีความแข็งสูงและมีการกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ดี ทำให้สามารถรับแรงได้ดีและส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างได้ยากขึ้น ทำให้ต้องใช้ความเค้นสูงในการทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียดหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

จากรูปที่ 4.2 (a) แสดงค่ามอดุลัสกดอัดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิในการผสม เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสกดอัดของวัสดุประกอบที่เตรียมโดยใช้ความเร็วรอบเท่ากัน พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการผสม 200 °C ค่ามอดุลัสกดอัดมีแนวโน้มสูงกว่าที่อุณหภูมิ 180 °C เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความเหนียวของพอลิเมอร์จะลดลง ความสามารถในการกระจายตัวของ CaSiO₃ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้เกิดการส่งต่อแรงระหว่างอนุภาค CaSiO₃ กันได้ดีขึ้น ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากขึ้น



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 มอดูลัสกดอัดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃

(a) ผลของอุณหภูมิการผสม

(b) ผลของความเร็วรอบการผสม

จากรูปที่ 4.2 (b) แสดงถึงค่ามอดูลัสของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการผสม เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างวัสดุประกอบที่เตรียมโดยใช้ความเร็วรอบต่างกัน แต่มีอุณหภูมิเท่ากัน พบว่าเมื่อดูจากที่อุณหภูมิ 200 °C ค่ามอดูลัสที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าจะให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้การกระจายตัวของ CaSiO₃ ในแต่ละความเร็วรอบมีความสามารถในการกระจายตัวใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดการส่งต่อแรงระหว่างอนุภาค CaSiO₃ อย่างต่อเนื่องในทุกๆ ความเร็วรอบ แต่เมื่อดูจากที่อุณหภูมิ 180 °C จะพบว่าที่ความเร็วรอบ 80 rpm จะมีค่ามอดูลัสกดอัดที่สูงกว่าที่ความเร็วรอบ 40 และ 60 rpm ทั้งนี้อาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิต่ำลงความหนืดจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 80 rpm จะเกิดแรงเฉือนสูงกว่า ทำให้ CaSiO₃ สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น

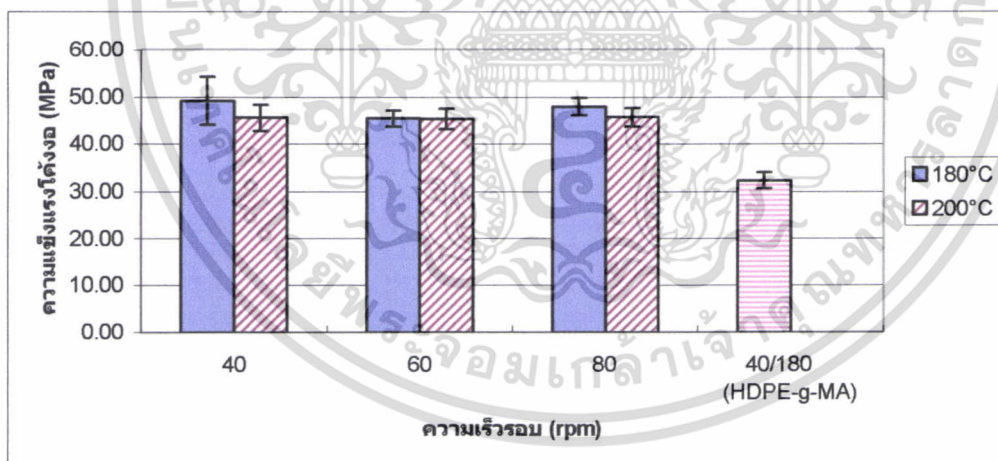
4.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดูลัสโค้งงอ

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 ที่แสดงถึงค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ และ HDPE-g-MA ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

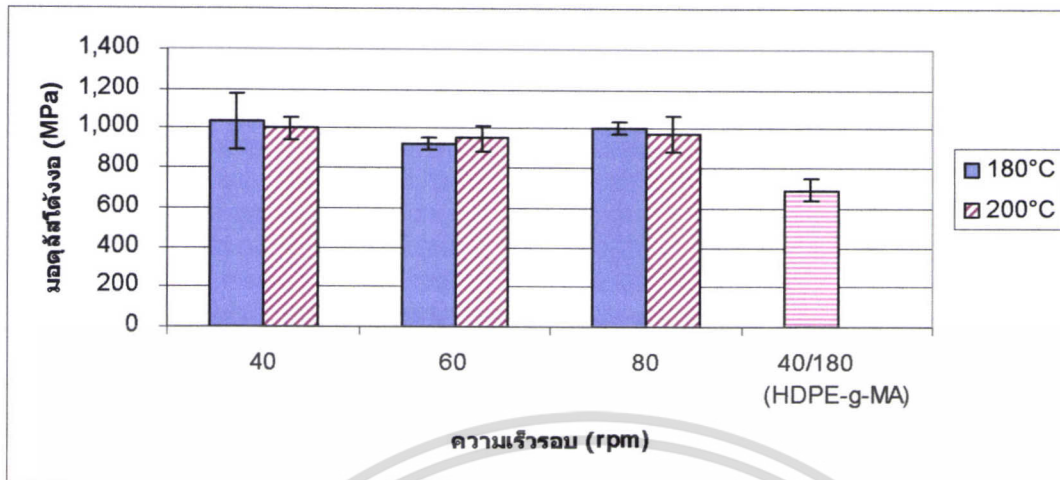
ความเร็วรอบในการผสมตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอระหว่างวัสดุประกอบกับ HDPE-g-MA พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของวัสดุประกอบสูงกว่าวัสดุ HDPE-g-MA เนื่องจากเมื่อเติม CaSiO_3 ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็งแรงสูงลงในเนื้อพอลิเมอร์แล้วทำการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ ซึ่งเป็นการให้ทั้งแรงกดอัดและแรงดึงพร้อมกัน โดย CaSiO_3 ที่เติมลงไปจะช่วยเสริมแรง ทำให้ชิ้นงานรับแรงได้มากขึ้น เกิดการเปลี่ยนรูปร่างยากขึ้น และเกิดจากการที่ CaSiO_3 มีการกระจายตัวดีทำให้สามารถส่งแรงได้ดีขึ้นอีกด้วย

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 ที่แสดงถึงค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/ CaSiO_3 ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสมตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสม พบว่าอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอเป็นการให้ทั้งแรงกดอัดและแรงดึงพร้อมกัน ซึ่งอาจเกิดการหักล้างของแรง 2 แบบ และอาจเกิดจากช่วงอุณหภูมิที่นำมาทดสอบมีความแตกต่างกันไม่มากพอที่จะให้เห็นผลการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน

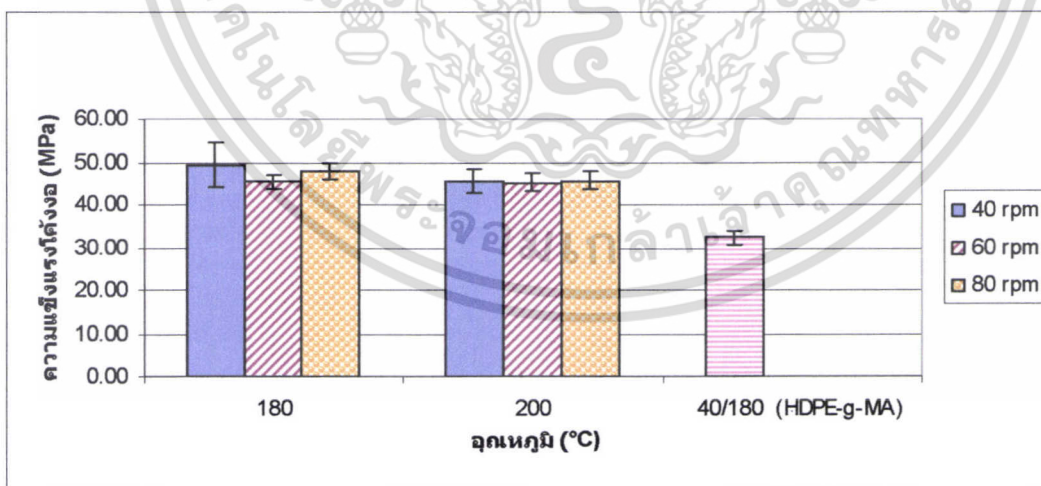


(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

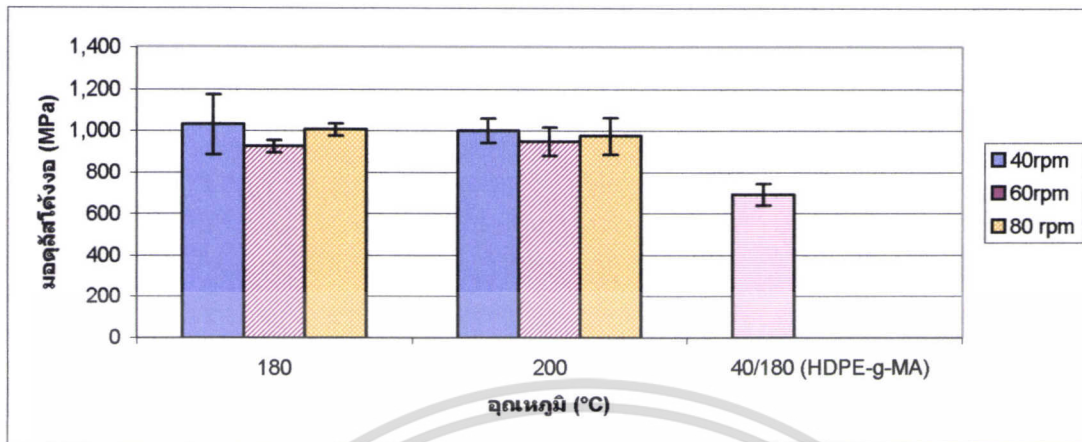


(b)
รูปที่ 4.3 (a) สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ; ผลของอุณหภูมิการผสม
(b) มอดุลัสโค้งงอ; ผลของอุณหภูมิการผสม



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



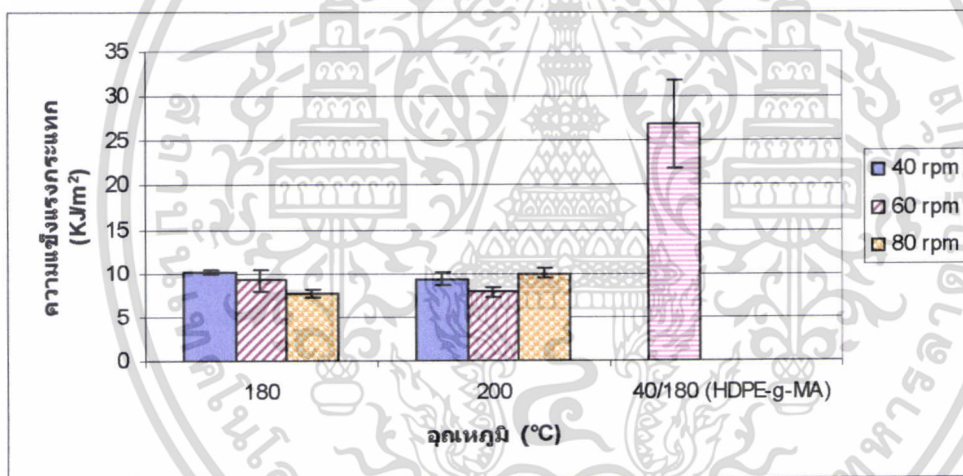
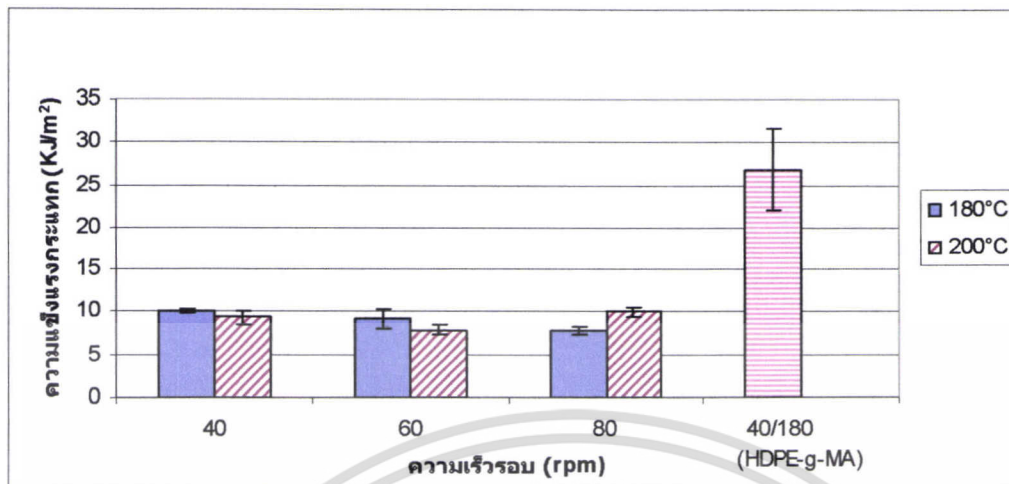
(b)
รูปที่ 4.4 (a) สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ; ผลของความเร็วยรอบการผสม
(b) มอดุลัสโค้งงอ; ผลของความเร็วยรอบการผสม

4.2.3 ความแข็งแรงกระแทก

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ และ HDPE-g-MA พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ จะมีค่าน้อยกว่า HDPE-g-MA เนื่องจากการทดสอบความแข็งแรงกระแทกเป็นการให้แรงกระทำที่ความเร็วสูง ดังนั้นเมื่อวัสดุประกอบได้รับแรงกระทำจะมีโอกาสน้อยที่จะเปลี่ยนรูปในเวลาอันสั้น ส่งผลให้ไม่สามารถถ่ายเทแรงได้อย่างต่อเนื่องจึงทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้ทันทีเหมือน HDPE-g-MA ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำอย่างรวดเร็วของวัสดุประกอบลดลง

จากรูปที่ 4.5 (a) และ (b) แสดงถึงค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วยรอบในการผสมตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วยรอบในการผสม ค่าความแข็งแรงกระแทกที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดมากนัก เนื่องจากในแต่ละสูตรมีปริมาณ CaSiO₃ 25% โดยปริมาตรเท่ากัน และ CaSiO₃ มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอส่งผลให้ความสามารถในการส่งผ่านแรงมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความแข็งแรงกระแทกของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃

(a) ผลของอุณหภูมิการผสม

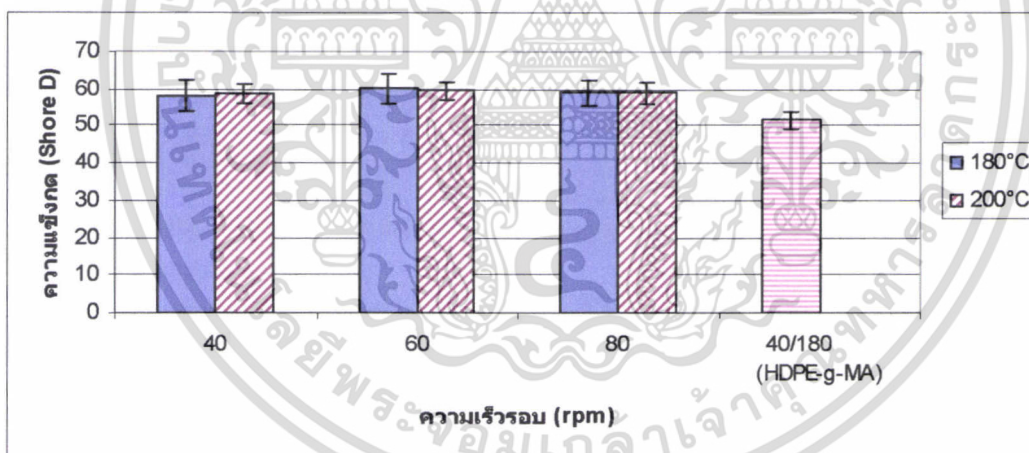
(b) ผลของความเร็วยรอบการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ความแข็งกด (Shore D)

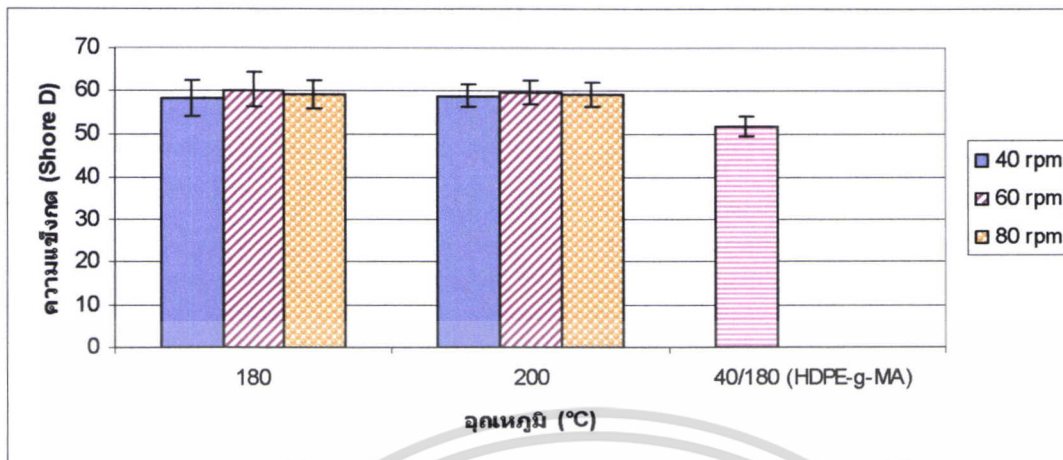
จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงค่าความแข็งกดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ กับ HDPE-g-MA พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งกดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ จะมีค่าสูงกว่า HDPE-g-MA ทั้งนี้เนื่องจาก CaSiO₃ จัดเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงและเนื่องจากมีการเติม CaSiO₃ ปริมาณมากจึงทำให้มีโอกาสในการลดเจอนภาค CaSiO₃ ที่บริเวณพื้นผิวได้มาก ส่งผลให้ค่าความแข็งกดโดยรวมของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.6 (a) และ (b) แสดงถึงค่าความแข็งกดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสมตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสมไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งกด เนื่องจากในแต่ละสูตรมีปริมาณของ CaSiO₃ 25% โดยปริมาตรเหมือนกันและมีการกระจายตัวของ CaSiO₃ ในเนื้อพอลิเมอร์ดีเช่นเดียวกัน



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)
รูปที่ 4.6 ความแข็งกดของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA/CaSiO₃
 (a) ผลของอุณหภูมิการผสม
 (b) ผลของความเร็วรอบการผสม

4.2.5 สมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการผสม CaSiO₃ ลงใน HDPE-g-MA ทำให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และค่าอุณหภูมิในการตกผลึก (T_c) ไม่เปลี่ยนแปลงจาก HDPE-g-MA บริสุทธิ์และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสม ไม่ส่งผลต่อ T_m และ T_c แต่อย่างใด ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ทุกตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงจึงทำให้สรุปได้ว่า ความแตกต่างในเรื่องสมบัติเชิงกลที่ได้พบในสารตัวอย่างไม่ได้เกิดขึ้นจากผลของความเป็นผลึก

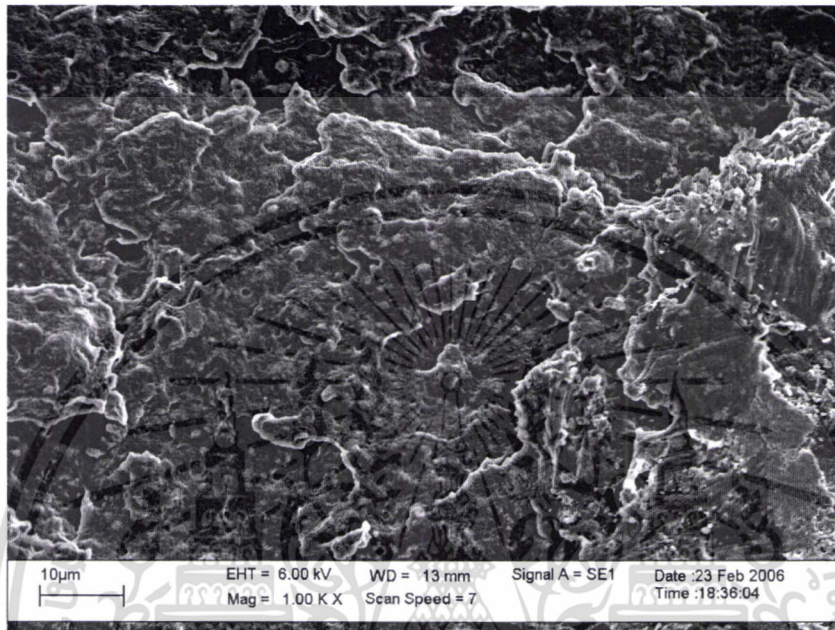
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบและ HDPE-g-MA

วัสดุที่ทำการทดสอบ	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_f (J/g) (Normalised)	เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crys)
HDPE-g-MA	134.11	108.39	139.96	47.8
HDPE-g-MA / CaSiO ₃ 180°C,60rpm	136.30	111.37	151.79	51.8
HDPE-g-MA/ CaSiO ₃ 200°C,60rpm	133.64	112.09	151.95	51.9

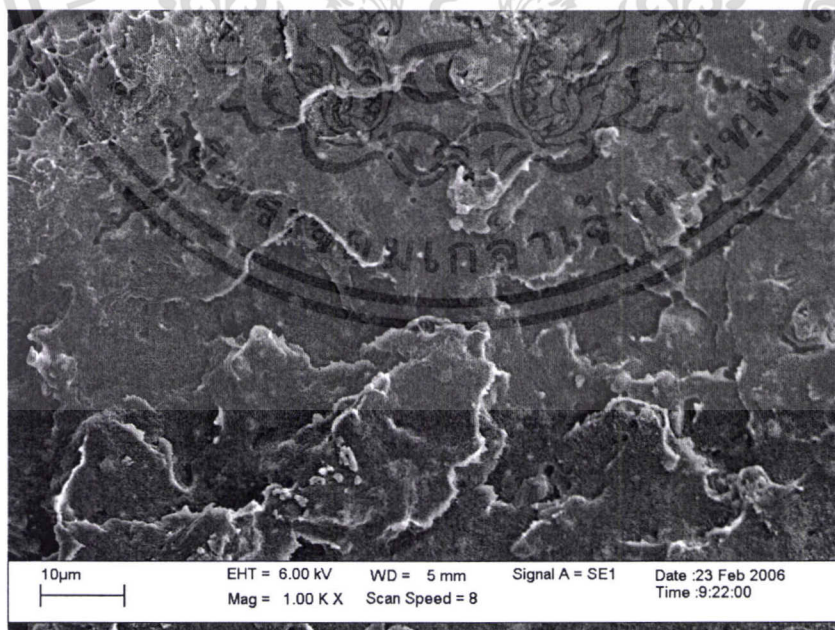
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO₃ เพื่อศึกษาดูการกระจายตัวของ CaSiO₃ ได้ผลการทดลองดังรูป

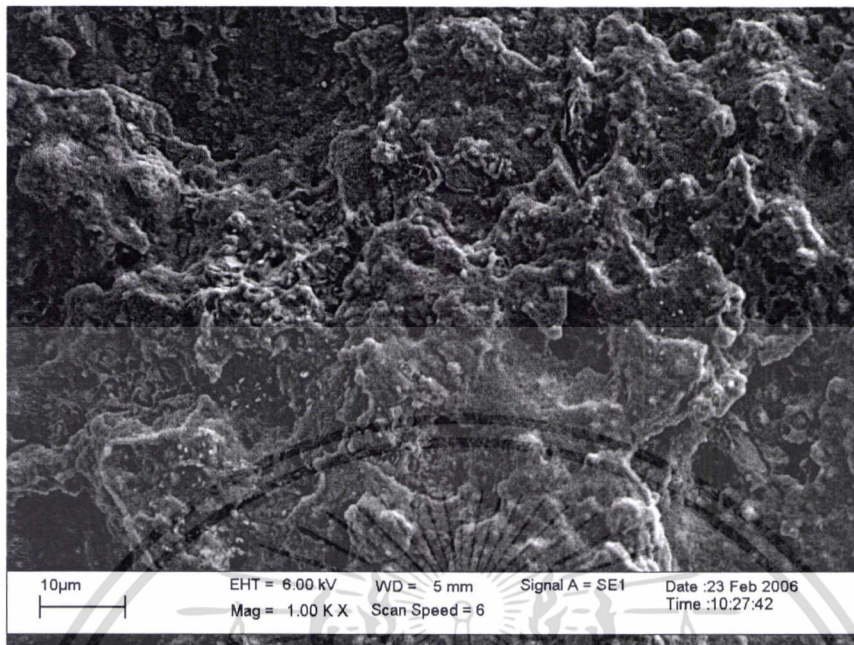


(a) อุณหภูมิ 180°C และความเร็วรอบ 40 rpm

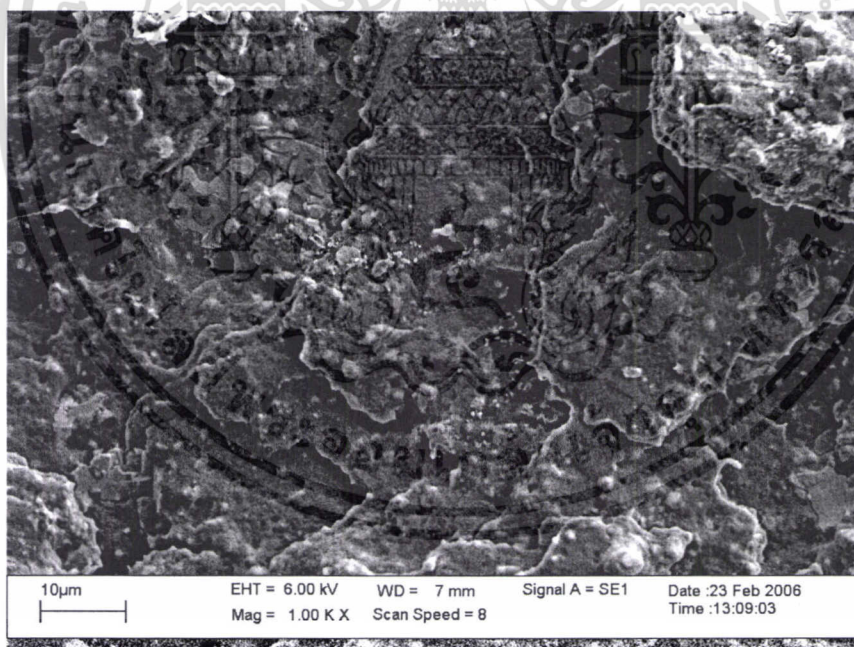


(b) อุณหภูมิ 180°C และความเร็วรอบ 60 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

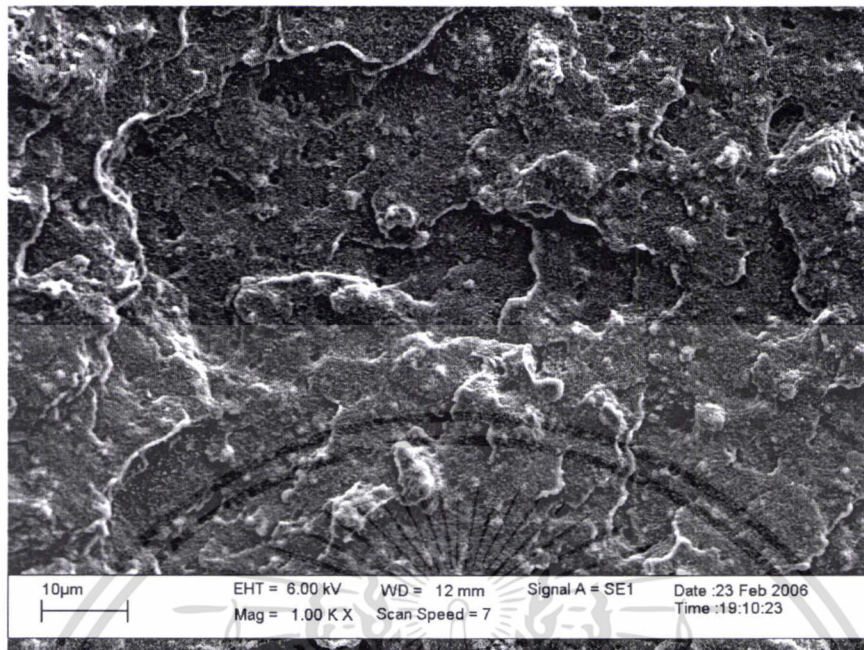


(c) อุณหภูมิ 180°C และความเร็วรอบ 80 rpm

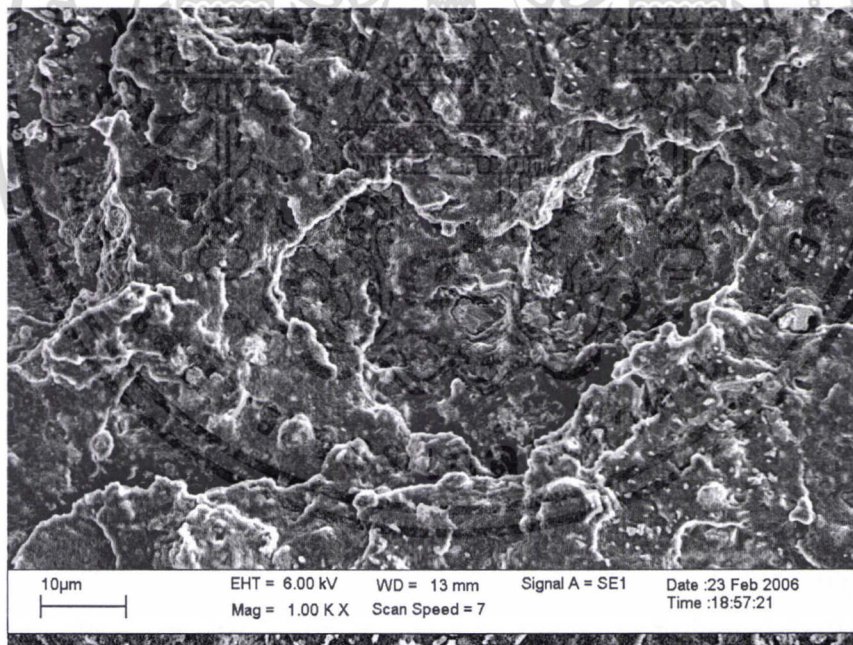


(d) อุณหภูมิ 200°C และความเร็วรอบ 40 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) อุณหภูมิ 200°C และความเร็วรอบ 60 rpm

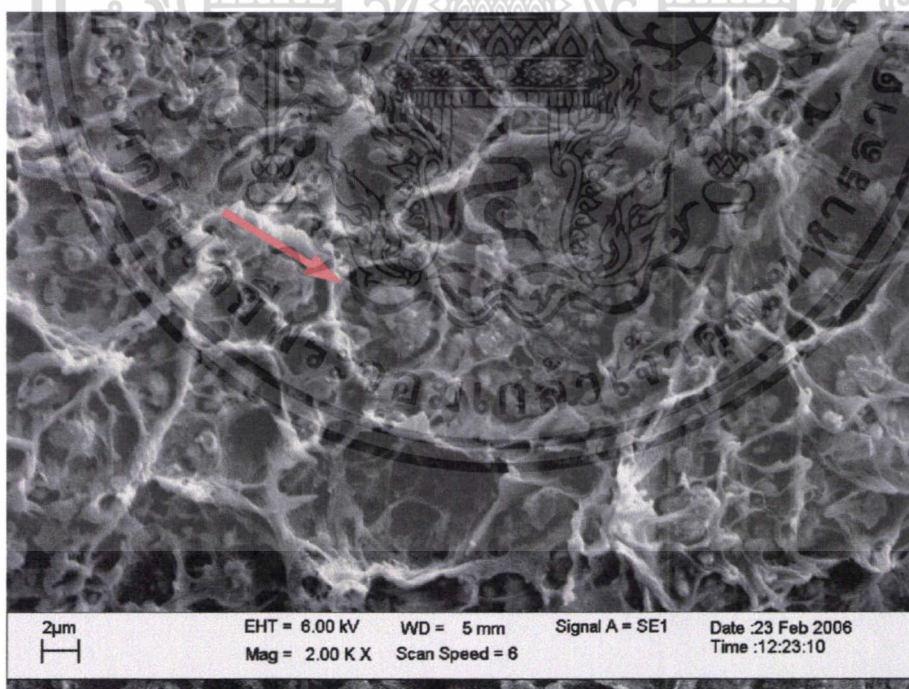


(f) อุณหภูมิ 200°C และความเร็วรอบ 80 rpm

รูปที่ 4.7 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO₃
ในแต่ละสภาวะการผสมที่กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของอนุภาค CaSiO_3 ใน HDPE-g-MA พบว่า CaSiO_3 มีการกระจายตัวดี อาจเกิดจากการใช้ HDPE-g-MA เป็นเมตริกซ์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ส่วน CaSiO_3 เป็นวัสดุที่มีความมีขั้ว สันนิษฐานว่ามีโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างทั้งสองวัสดุได้ ทำให้เพิ่มความเข้ากันได้ของทั้งสองวัสดุ โดยจากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าไม่เห็นรอยต่อระหว่างอนุภาค CaSiO_3 กับพอลิเมอร์ และจากภาพจะพบว่าเวลาเกิดการแตกหักของชิ้นงานจะเกิดแต่บริเวณที่เป็นเนื้อพอลิเมอร์นั้น ไม่เกิดการแตกที่รอยต่อระหว่างอนุภาค CaSiO_3 กับเนื้อพอลิเมอร์ นอกจากนี้อาจเกิดจากการใช้เครื่องผสมแบบนურიในการผสมโดยมีการใช้ความเร็วรอบในการผสมสูง ทำให้เกิดแรงเฉือนได้มาก ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของ CaSiO_3 ดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ HDPE-g-MA และพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสมไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของ CaSiO_3 โดยจากแต่ละรูปในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า CaSiO_3 มีการกระจายตัวดีไม่แตกต่างกันมากนักในทุกสภาวะการผสม เนื่องจากที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่ำสุดที่ใช้สามารถทำให้ CaSiO_3 มีการกระจายตัวได้ดีอยู่แล้ว ด้วยเหตุนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบจึงไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลด้วย



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO_3 ที่อุณหภูมิการผสม 200°C และความเร็วรอบ 40 rpm ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO₃ ที่ 25% โดยปริมาตร ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสม และทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO₃ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อมีการผสม CaSiO₃ ลงใน HDPE-g-MA ทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ โมดูลัสกดอัด และค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ HDPE-g-MA แต่เมื่อเปรียบเทียบสารตัวอย่างที่เตรียมโดยที่ใช้เวลาในการผสม 20 นาที และใช้อุณหภูมิ 180°C หรือ 200°C โดยเปลี่ยนความเร็วรอบที่ 40 60 และ 80 รอบต่อนาที พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมในแต่ละสูตรไม่ได้ให้ความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE-g-MA / CaSiO₃ ที่ 25% โดยปริมาตร ควรใช้ที่อุณหภูมิ 180°C และที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เพื่อประหยัดพลังงานในการผสม แต่ในกรณีที่วัสดุประกอบต้องรับแรงกดอัดมากขึ้น อาจใช้สภาวะในการผสมที่อุณหภูมิ 180°C และที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที ได้และจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบที่เตรียมได้พบว่า CaSiO₃ มีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็ก และทั่วถึง โดยอุณหภูมิ และความเร็วรอบการผสมที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของ CaSiO₃ ในแต่ละสูตรมากนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการเตรียมวัสดุประกอบระหว่าง HDPE และ CaSiO₃ ที่ 25% โดยปริมาตร โดยใช้เครื่องผสมแบบนรีในการผสม เพื่อที่จะได้สามารถเปรียบเทียบผลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น
2. ทำการเตรียมวัสดุประกอบ HDPE-g-MA และ CaSiO₃ ที่ 25% โดยปริมาตร โดยเพิ่มช่วงห่างของอุณหภูมิที่นำมาใช้ เพื่อที่จะได้เห็นถึงความแตกต่างของผลการทดลองชัดเจนขึ้น และได้ผลที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น
3. สามารถนำวิธีการที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุประกอบที่เป็นวัสดุชีวภาพชนิดอื่นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Joseph, R., McGregor, W.J., Martyn, M.T., Tanner, K.E. and Coates, P.D. Effect of hydroxyapatite morphology/surface area on the rheology and processability of hydroxyapatite filled polyethylene composites, **Biomaterials** 23 (2002) 4295-4302
- [2] Di Silvio, L., Dalby, M.J. and Bonfield, W. Osteoblast Behaviour on HA/PE composite surfaces with different HA volumes, **Biomaterials** 23 (2002) 101-107
- [3] Wang, M. and Bonfield, W. Chemically coupled hydroxyapatite-polyethylene composite: structure and properties. **Biomaterials** 22 (2001) 1311-1320
- [4] Shah, V. 1998 **Handbook of plastics testing technology**, 2nded. John Wiley & Sons, Inc. Canada
- [5] Ono, I., Tateshita, T. and Nakajima, T. Evaluation of a high density polyethylene fixing system for hydroxyapatite ceramic implants. **Biomaterials** 21 (2000) 143-151
- [6] Juhasz, J.A. Mechanical properties of glass-ceramics A-W-polyethylene composites: effect of filler content and particle size. **Biomaterials** 25 (2004) 949-55
- [7] Siripannon, P., Kameshima, Y. and Yasumori, A., Okada, K. and Hayashi, S. Formation of hydroxyapatite on CaSiO₃ powders in simulated body fluid. **J.Europ. Cerami.Soc.** 22 (2002) 511-20
- [8] เกตุดาว ขวลิขิตดำรง สาลิกัด บัวเจริญ และ สิญญาภา เอ็มแฮมม, **โครงการพิเศษการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแคลเซียมซิลิเกต**, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [9] ชูศักดิ์ เวชแพศย์ และ สมศรี ดาวฉาย, **อวัยวะเทียม**, **โครงการวิจัย และพัฒนาอุปกรณ์ทางชีวภาพทางการแพทย์** สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล, 2543, หน้า1-12
- [10] ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, **เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [11] Brinker C.J. and Scherer G.W. 1990. **Sol-gel Science-The Physics and chemistry of Sol-gel processing**, Academic Press, New York.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Hence L. L. and Wilson J., An introduction to **Bioceramics** : Advance series in ceramics-Vol.1, Florida; World Scientific Publishing ,1993 ,pp. 1-24
- [13] Joon. P.B. 1979 **Biomaterial An Introduction**, Plenum Press, New York.
- [14] Hench, L.L and Wilson, J. 1993. **An Introduction To Bioceramics**, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd, Singapore
- [15] Hench, L.L 2002. **Biocomposites**. [Online].
Available:<http://www.bg.ic.ac.uk/Lectures/Hench/Biocomp/chap3.html>
- [16] อธิพิพล แจ่มชัด, เอกสารประกอบการสอนพอลิเมอร์คอมโพสิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2544
- [17] Petrochemnext, 2001. High density polyethylene (HDPE). [Online]. Available: <http://www.petrochemnext.com/html files/HDPE.html>
- [18] ชลลดา ฤตวิรุฬห์ " ปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม 2 " คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, 2537
- [19] Abdullah I., Ahmad S. and Sulaman C.S., J. Appl. Polymer Sci., Vol.58, 1125-1133, 1995
- [20] Kim G.I., Ryn S.H. and Chang Y.W., J. Appl. Polymer Sci., Vol.77, 2595-2602, 2000
- [21] Peter, Ciullo A. 2002. Award and recognition wollastonite a versatile functional filler. [Online]. Available: http://www.rtvanderbilt.com/awards_6.html
- [22] Lou, P. 2004 Wollastonite -1A Image. [Online]. Available: <http://www.webmineral.com/spicemen/picshow.Php?id=1104>
- [23] Amethyst Galleries, Inc. 1995-2004. The mineral wollastonite.[Online]. Available:<http://mineral.galleries.com/minerals/silicate/wollasto/wollasto.html>
- [24] Nyco premium quality wollastonite. 1997-2004. Physical properties. [Online]. Available: http://www.nycominerals.com/cache/page_1048-1052.html
- [25] Nyco premium quality wollastonite. 1997-2004. Chemical properties. [Online]. Available: http://www.nycominerals.com/cache/page_1048-1051.html
- [26] Nowotony, J. 1992. **Electronic ceramic Materials**, Trans Tech Publication, Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] Cousin P. and Ross R.A. 1990. **Material Science and Engineering**, Academic Press, New York.
- [28] Fang, L., Leng, Y. and Gao, P. Processing of hydroxyapatite reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene for biomedical applications, **Biomaterials** 26 (2005) 3471-3478
- [29] Wang, M., Joseph, R. and Bonfield, W. Hydroxyapatite-polyethylene composites for bone substitution: effects of ceramic particle size and morphology, **Biomaterials** 19 (1998) 2357-2366
- [30] Dupont the miracles of science.1995-2004. Dupont **Packaging & Industrial Polymers** [Online]. Available: <http://www.dupont.com/industrial-polymers/plastics/polymers/fusabond /pdfs/mb100d.pdf>
- [31] MatWeb material property data. 1996-2005. **Izod Impact Strength Testing of Plastics**. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/reference/izod-impact.asp>

ภาคผนวก ก

1. อัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของสารที่เตรียมได้

ตาราง ก-1 อัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของสารที่เตรียมได้

สาร	องค์ประกอบทางเคมี (%wt)		อัตราส่วนโมล Ca : SiO ₂
	CaO	SiO ₂	
1	53.1	45.0	1.26
2	53.5	46.3	1.25
3	55.4	43.5	1.36
ค่าเฉลี่ย			1.29
ค่าทางทฤษฎี			1.00

2. การคำนวณอัตราส่วนโมลของแคลเซียมต่อซิลิกอน

แคลเซียมที่ตรวจวัดได้อยู่ในรูปสารประกอบ CaO ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ

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

ซิลิกอนที่ตรวจวัดได้อยู่ในรูปสารประกอบ SiO₂ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ

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

นำค่า % โดยน้ำหนักของ CaO และ SiO₂ ที่ได้จากเครื่อง XRF มาคำนวณ

เช่น ตัวอย่างที่ 1

สารประกอบ CaO 56 g มี Ca 1 mol

ถ้า CaO ที่วัดได้ 53.1 g มี Ca $\frac{1 \times 53.1}{56} = 0.948$ mol

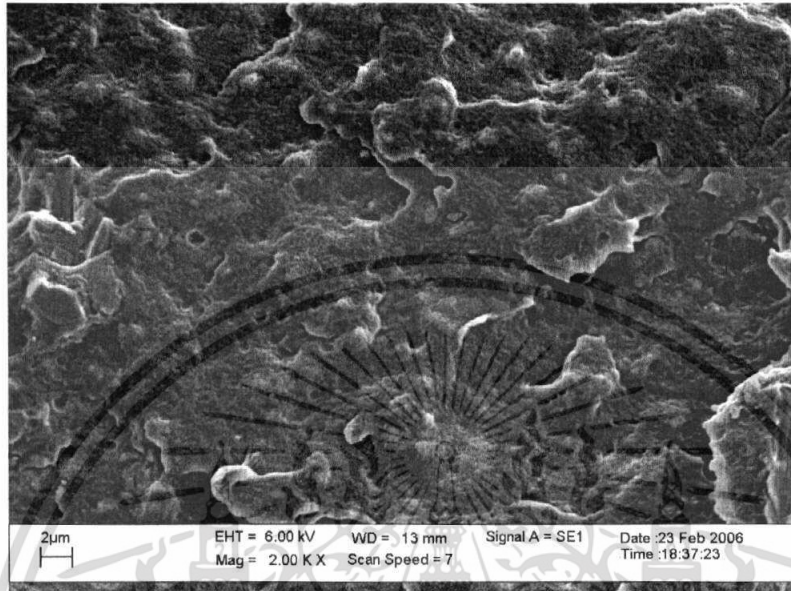
สารประกอบ SiO₂ 60 g มี Si 1 mol

ถ้า SiO₂ ที่วัดได้ 45.0 g มี Si $\frac{1 \times 45.0}{60} = 0.75$ mol

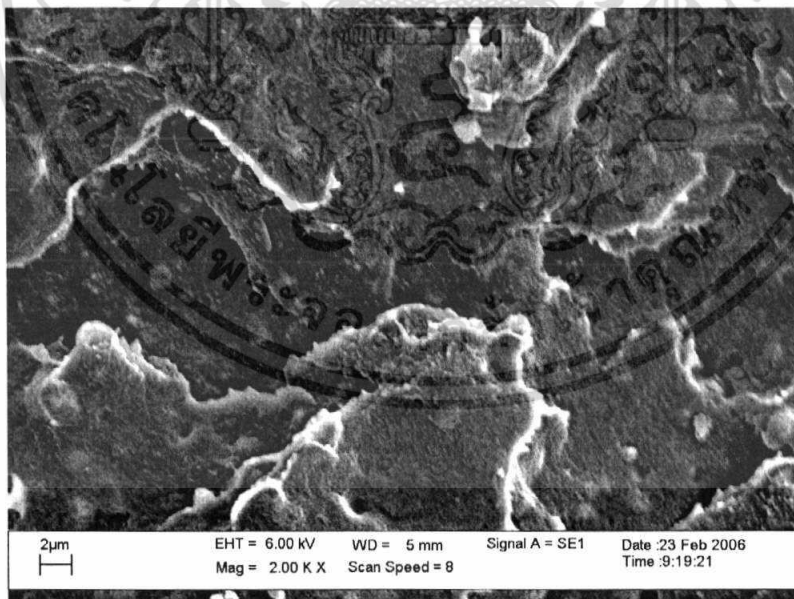
เพราะฉะนั้นอัตราส่วน Ca :Si เท่ากับ $0.948 / 0.75 = 1.26$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

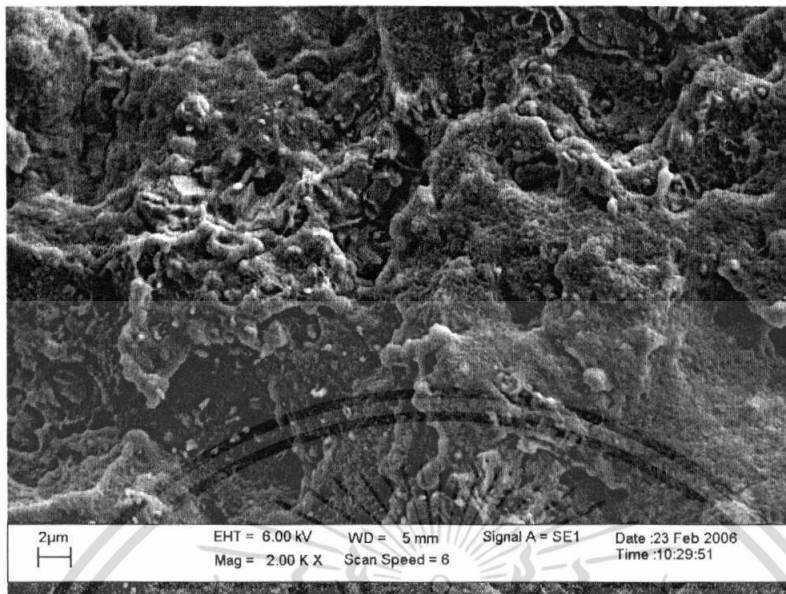


(a) อุณหภูมิ 180°C และความเร็วรอบ 40 rpm

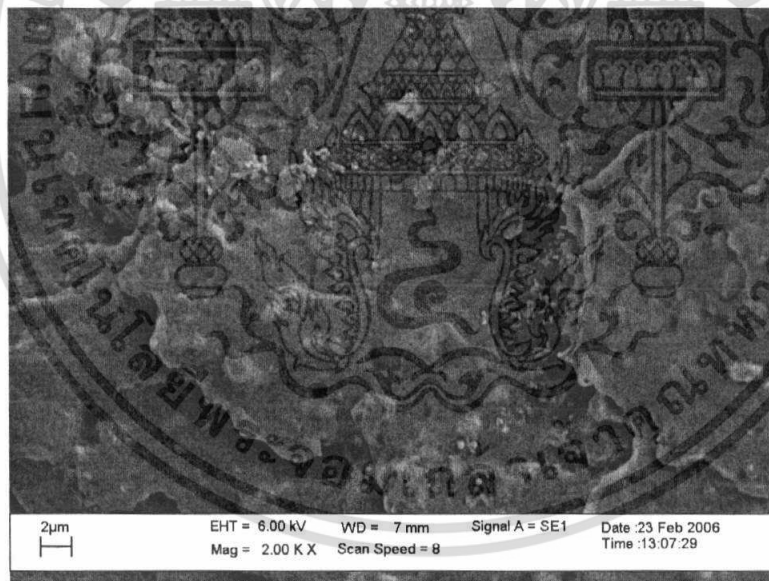


(b) อุณหภูมิ 180°C และความเร็วรอบ 60 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

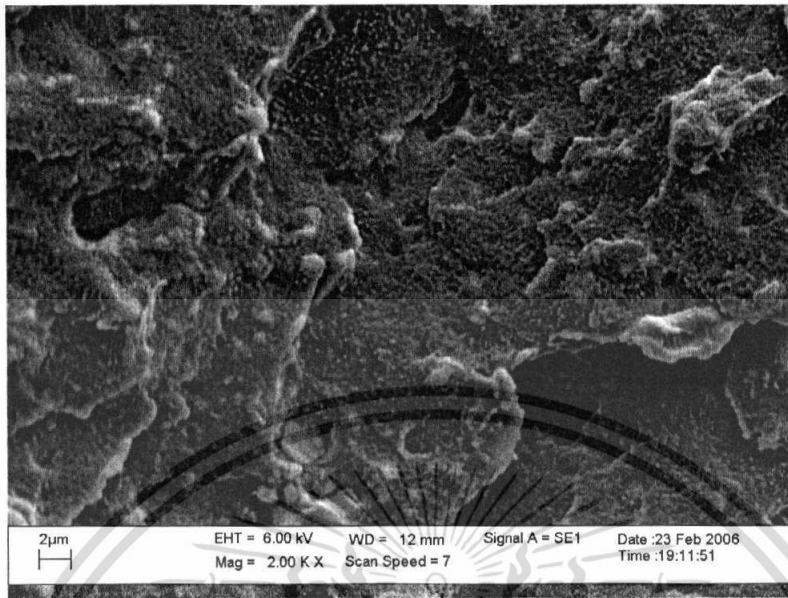


(c) อุณหภูมิ 180°C และความเร็วรอบ 80 rpm

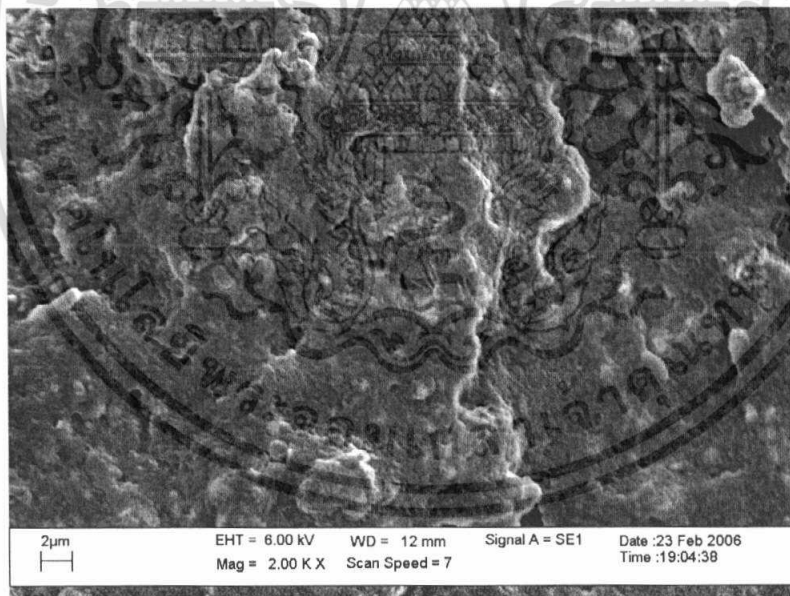


(d) อุณหภูมิ 200°C และความเร็วรอบ 40 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) อุณหภูมิ 200°C และความเร็รรอบ 60 rpm



(f) อุณหภูมิ 200°C และความเร็รรอบ 80 rpm

รูปที่ ข-1 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุประกอบ
HDPE-g-MA / CaSiO₃ ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้