



ศึกษาผลกระทบของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อสมบัติความ
ต้านทานแรงกดของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกสัตว์
STUDY THE EFFECT OF POLY (METHYL METHACRYLATE) ON THE
COMPRESSIVE STRENGTH OF HYDROXY APATITE SYNTHESIZED
FROM ANIMAL BONE

นายภัทรารุณ สมหารวงศ์
นายสาริน สุขสุวรรณ

รหัส 51362435

รหัส 51365191

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... ๑๐ ก.ค. ๒๕๕๕
เลขทะเบียน..... ๑๖๔๔๖๖๑
เลขเรียกหนังสือ..... ฟร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร กว ๗๘

๒๕๕๔

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา ๒๕๕๔



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	ศึกษาผลกระทบของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกดของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกสัตว์
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายภัทรารุณี สมหารวงศ์ รหัส 51362435 นายสาริน สุขสุวรรณ รหัส 51365191
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการงาน
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

ส.ก.โกเมธ ฐชโย.....กรรมการ
(อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

.....กรรมการ
(อาจารย์ทศพล ตีร์จุริภาพงศ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ศึกษาผลกระทบของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกดของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกสัตว์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายภัทรารุณี	สมหารวงศ์	รหัส 51362435
	นายสาริน	สุขสุวรรณ	รหัส 51365191
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์ 2 ประการคือ ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวโดยทำการศึกษาวัฏภาคโดยใช้เทคนิค XRD วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FTIR และศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิค SEM จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการหล่อแบบ Slip Casting เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกดของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว จากการศึกษาลักษณะของสัณฐานวิทยาโดยใช้เทคนิค SEM ของวัสดุเชิงประกอบเพื่อดูการกระจายตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากการทดลองพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวสามารถยืนยันความเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ด้วยเทคนิค XRD ตามมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 74-0565 และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวมีแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระดูกปะปนอยู่ ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวมีรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม ผิวไม่เรียบ จากนั้นทำการศึกษาความต้านทานแรงกด และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าเมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทาเมทิลคริเลตมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงอัตราส่วนระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก จากนั้นค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบลดลง เมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้ จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่ามีการกระจายตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สม่ำเสมอ

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ และอาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ร่วม ที่สละเวลาของท่านเพื่อมาเป็นที่ปรึกษาพร้อมทั้งให้คำแนะนำและวิธีการแก้ปัญหาตลอดระยะเวลาการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และอาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราย ครูช่างธวัชชัย ชูลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัฒนภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ รวมไปถึงการแนะนำใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้ทำโครงการ จนงานลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณอาคารปฏิบัติการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Universal Testing Machine เตาเผา ตะแกรงร่อน และเครื่องมือต่างๆ ภายในอาคาร

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่าย และกำลังใจ จนสามารถศึกษา ทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจ ในการทำโครงการนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ผู้ดำเนินโครงการ

นายภัทรารุณี สมหารวงศ์

นายสาริน สุขสุวรรณ

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญสารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	1
1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 วัสดุเชิงประกอบ.....	4
2.2 วัสดุชีวภาพ.....	5
2.3 ไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	6
2.4 พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	8
2.5 การตรวจสอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ และวัสดุเชิงประกอบ.....	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 การดำเนินโครงการ.....	16
3.1 สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในโครงการ.....	16
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงการ.....	17
3.3 วิธีการทดลอง.....	19
3.4 วิธีการทดสอบ.....	20
3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	21
3.6 สรุปผลการทดลอง.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	22
4.1 ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว.....	22
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติความต้านทานแรงกด (Compressive strength) และ ฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิล- เมทาคริเลต.....	26
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	30
5.1 บทสรุป.....	30
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	30
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข.....	30
เอกสารอ้างอิง.....	32
ภาคผนวก ก.....	34
ภาคผนวก ข.....	37
ภาคผนวก ค.....	40
ภาคผนวก ง.....	42
ภาคผนวก จ.....	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ	3
2.1 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	7
3.1 สมบัติของพอลิเมทิลเมทาคริเลต เกรด MD001.....	16
3.2 แสดงอัตราส่วนระหว่าง HA กับ PMMA ในสภาวะของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ต่างๆ.....	19
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิค FTIR.....	24
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิค FTIR.....	25



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HA ที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca:P เท่ากับ 1.67	6
2.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสกับสมบัติเชิงกล.....	7
2.3 สูตรโครงสร้างเคมีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	9
2.4 กระบวนการสังเคราะห์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	9
2.5 ลักษณะและหลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน.....	11
2.6 ลักษณะและหลักการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	18
3.2 ลักษณะทรงกระบอกที่นำชิ้นงานมาทดสอบ.....	21
4.1 ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว ด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบกับแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 74-0565.....	22
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว.....	23
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว โดยการนำไปเผา ที่อุณหภูมิ 800 °C.....	24
4.4 สัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว.....	25
4.5 วัสดุเชิงประกอบในอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 90:10 ร้อยละโดยน้ำหนัก.....	26
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบ และอัตรา ส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	28
4.7 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จาก กระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	29
4.8 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จาก กระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	29

สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

HA	=	ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite)
PMMA	=	พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly (methyl methacrylate))
XRD	=	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)
FTIR	=	อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
SEM	=	จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
UTM	=	เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
GPa	=	จิกะปาสคาล
MPa	=	เมกกะปาสคาล
Force	=	แรงที่ใช้ในการทดสอบ (แรงกด) หน่วยเป็นนิวตัน
N	=	นิวตัน
°C	=	องศาเซลเซียส
Pa	=	ปาสคาล
N/m ²	=	นิวตันต่อตารางเมตร
g/10 min	=	กรัมต่อ 10 นาที
kg/cm ²	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
kV/mm	=	กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร
% wt	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
MMC	=	วัสดุเชิงประกอบโลหะ
CMC	=	วัสดุเชิงประกอบเซรามิก
PMC	=	วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในปัจจุบันทางการแพทย์นิยมใช้วัสดุเชิงประกอบ เพื่อนำมาทำเป็นวัสดุชีวภาพ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบเป็นการนำสมบัติเด่นของวัสดุแต่ละชนิดมาปรับปรุงหรือเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น วัสดุเชิงประกอบนั้นประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบสามารถผลิตได้จากวัสดุทั่วไปไม่ว่าจะเป็น โลหะกับ เซรามิก หรือเซรามิกกับพอลิเมอร์ วัสดุเซรามิกที่นิยมนำมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบเพื่อนำมาเป็น วัสดุชีวภาพคือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite : HA) มีสูตรทางเคมี คือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ เป็นวัสดุที่มีสมบัติที่สามารถเข้ากันได้ดีกับร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) เนื่องจาก HA มี องค์ประกอบหลักคือแคลเซียม (Calcium : Ca) ซึ่งเหมือนกับองค์ประกอบหลักของกระดูกมนุษย์จึง ไม่เกิดการต่อต้าน หรือความเสียหายแก่ร่างกาย อีกทั้ง HA ยังมีสมบัติที่สามารถเสื่อมสภาพทาง ชีวภาพ (Biodegradation) โดยไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษในร่างกาย อีกทั้งยังง่ายต่อการเกิดกระดูก ใหม่ (Bioactive) เพื่อรักษากระดูกส่วนที่เสียหายได้ แต่ HA มีข้อเสียคือ มีความแข็งแรงต่ำ จึงไม่ เหมาะสำหรับการซ่อมแซมกระดูกส่วนที่ต้องใช้ในการรับน้ำหนัก เช่น กระดูกแขน หรือ กระดูกขา ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกด โดยการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) ระหว่างพอลิเมอร์ ชนิดพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate : PMMA) เนื่องจาก PMMA มีสมบัติด้านความแข็ง และความเหนียว จึงนำมา ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ HA ที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้นของวัสดุเชิงประกอบให้เหมาะสำหรับการ นำไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างตามจุดประสงค์รักษา

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของ PMMA ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกด ของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับ PMMA ที่อัตราส่วนต่างๆ เนื่องจาก PMMA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทนความต้านทานแรงกดได้ดี และยังเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเป็นวัสดุ ชีวภาพ เช่น ซีเมนต์เชื่อมกระดูก (Bone cement)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาวิฤภาค วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของ HA ที่สังเคราะห์ได้จาก กระดูกวัว

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานแรงกด และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว กับ PMMA ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

วัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัวกับ PMMA ที่อัตราส่วนร้อยละ 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 ลักษณะของวิฤภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของ HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

1.4.2 สมบัติความต้านทานแรงกด และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัวกับ PMMA ที่อัตราส่วนร้อยละ 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ตัวแปรควบคุม

1.5.1.1 วัสดุดิบ

- ก. HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว
- ข. PMMA เกรด MD001
- ค. สารละลายอะซีโตน
- ง. น้ำกลั่น

1.5.1.2 กระบวนการขึ้นรูปโดยเทคนิคการหล่อแบบ (Slip Casting) โดยกำหนดให้ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร มีความสูง 12 มิลลิเมตร

1.5.2 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

ปริมาณของ PMMA ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกดในวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกสัตว์กับ PMMA ที่อัตราส่วนร้อยละ 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก

1.5.3 ศึกษาวิภาค และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

1.5.4 ศึกษาสมบัติความต้านทานแรงกด และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัวกับ PMMA

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

เดือน กรกฎาคม 2554 – เมษายน 2555

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน โดยไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสที่กระจาย หรือ ตัวเสริมแรง (Reinforcement) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อพื้น จะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่ม หรือ ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อพื้นให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือ เกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อพื้น (Base Materials) อย่างโลหะ เซรามิก หรือ พอลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรง ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้ และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว

2.1.1 วัสดุเชิงประกอบออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.1.1.1 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix Composite : MMC)

วัสดุเชิงประกอบที่มีเนื้อพื้นเป็นโลหะ ส่วนที่เป็นเนื้อพื้นมักจะใช้ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองแดง นิกเกิล และโลหะผสม ใช้เสริมแรงร่วมกับโลหะและเซรามิก นิยมใช้กับชิ้นส่วนยานอวกาศ และชิ้นส่วนยานยนต์ที่รู้จักกันในนามของวัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (MMC) สมบัติที่ดีของ MMC คือความแข็งแรง ความแข็ง ความยืดหยุ่น การทนอุณหภูมิ ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ๆ แต่กระบวนการผลิตนั้นค่อนข้างยาก มีน้ำหนักมาก และมีราคาแพงโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับวัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ ตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้ได้แก่ ทังสเตนคาร์ไบด์ ที่ใช้ทำเครื่องมือคมตัดในงานกัดแต่งต่าง ๆ ซึ่งมีสมบัติที่แข็ง และจุดหลอมเหลวสูงหากต้องการเพิ่มความเหนียวให้กับทังสเตนคาร์ไบด์ จะใช้วิธีการนำผงของทังสเตนคาร์ไบด์ผสมกับผงของโคบอลต์ และอัดด้วยแรงดันสูงให้เป็นรูปทรงที่ต้องการจากนั้นให้ความร้อนจนโคบอลต์หลอมละลายกลายเป็นเนื้อพื้นที่ยึดเหนี่ยวเม็ดของทังสเตนคาร์ไบด์ เมื่อปล่อยให้แข็งตัว โคบอลต์จะช่วยให้มีสมบัติต้านทานแรงกระแทกได้ดีขึ้น

2.1.1.2 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic Matrix Composite : CMC)

วัสดุเชิงประกอบที่มีเนื้อพื้นเป็นเซรามิก ใช้งานได้ดีมากที่อุณหภูมิสูง และมีน้ำหนักเบากว่ากลุ่มโลหะ มีความต้านทานแรงกดอัดที่ดี แต่ข้อจำกัดของเซรามิก คือมีความเปราะ และใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย วัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น กระดุกเตียม ฟันปลอม เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบระหว่างเซรามิกกับพอลิเมอร์กำลังมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง สำหรับการนำไปใช้ทางการแพทย์ที่หลากหลาย เช่น การเคลือบวัสดุเพื่อใช้งานบริเวณที่ต้องการรับน้ำหนัก ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพ เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิซิลิโพนีต พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน และอีพอกซี งานวิจัยส่วนมากที่มักใช้ทำวัสดุเชิงประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ใช้พอลิแลกติกแอซิด พอลิไกลคอลิกแอซิด และโคพอลิเมอร์ของตัวเอง

2.1.1.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite : PMC)

วัสดุเชิงประกอบที่มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์ ทั้งที่เป็นเทอร์โมเซตติง และเทอร์โมพลาสติก ข้อจำกัดของพอลิเมอร์ คือ ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีสมบัติเด่นในเรื่องของความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรง ความต้านทานแรงเสียดสี ความต้านทานการกัดกร่อน ยกตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น การผลิตเรือจากไฟเบอร์กลาส ยางรถยนต์ และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น พอลิเมอร์บางชนิด เช่น อีพ็อกซี และพอลิเอสเทอร์ มักมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้มีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ เป็นต้น แต่พอลิเมอร์มีจุดเด่นเรื่องขึ้นรูปง่าย สามารถขึ้นรูปทรงที่มีรายละเอียดซับซ้อนได้ง่าย และมีน้ำหนักเบาขณะที่วัสดุเช่น แก้ว อะรามิด (Aramide) และโบรอน (Boron) มีจุดเด่นเรื่องความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) และความแข็งแรงต่อแรงกด (Compressive Strength) สูง แต่ว่าวัสดุที่กล่าวมานั้นเมื่อปรากฏในรูปของของแข็ง แล้วสมบัติเด่นเหล่านี้ปรากฏออกมาได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากวัสดุสามารถแตกหักจาก ความเค้น (Stress) ได้ง่ายเพียงแค่ผิวของวัสดุมีรอยตำหนิขนาดเล็กเท่านั้น

ดังนั้นการผสมพอลิเมอร์กับส่วนเสริมแรงที่เป็นอนุภาค ทำให้วัสดุมีสมบัติดีขึ้น เพราะเป็นการรวมเอาจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์ กับจุดเด่นของเซรามิกเข้าไว้ด้วยกัน โดยเนื้อพื้นของพอลิเมอร์ทำหน้าที่กระจายแรง ที่กระทำต่อวัสดุลงไประหว่างส่วนเสริมแรงที่เป็นอนุภาค และพอลิเมอร์ยังทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงที่เป็นอนุภาคไม่ให้เสียหาย เนื่องจากการเสียดสีและการกระแทก ผลของการรวมพอลิเมอร์กับส่วนเสริมแรงที่เป็นอนุภาค ทำให้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มีจุดเด่นหลายอย่าง ได้แก่ มีค่าความแข็งแรงและความแข็งตึง (Stiffness) สูง สามารถขึ้นรูปง่าย น้ำหนักเบา และทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

2.2 วัสดุชีวภาพ

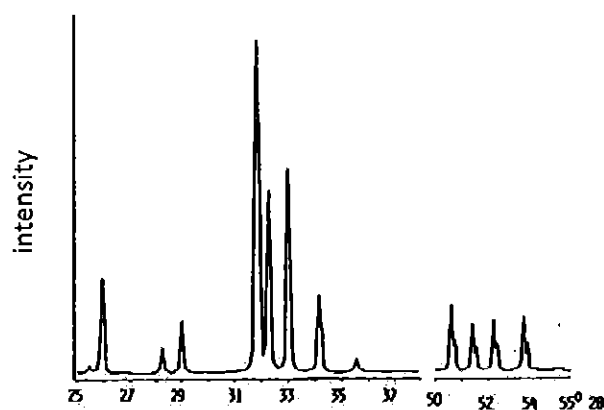
ในงานวิจัยนี้สนใจวัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพเพื่อไปประยุกต์การใช้งานทางด้านวัสดุชีวภาพ ซึ่งวัสดุชีวภาพ หมายถึงวัสดุที่สามารถใช้แทนส่วนหนึ่งส่วนใดของเนื้อเยื่อในอวัยวะ ส่วนหนึ่งส่วนใดในร่างกายมนุษย์ที่เสื่อมสภาพโดยไม่เกิดปฏิกิริยาจากร่างกายมนุษย์ วัสดุชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัสดุทั่วไปไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบ หรือ สารกึ่งตัวนำ (William, 2551) คำว่าวัสดุชีวภาพจำพวกวัสดุเชิงประกอบ หมายถึงสิ่งที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน 2 ส่วนขึ้นไป โดยทั่วไปแล้วในทางวิศวกรรม หรือ วัสดุศาสตร์เราใช้คำว่า วัสดุเชิงประกอบ กับวัสดุที่

ประกอบด้วยองค์ประกอบที่ต่างกันในระดับมหภาค และมีสมบัติที่เป็นผลมาจากสมบัติของแต่ละองค์ประกอบมารวมกัน วัสดุเชิงประกอบมีหลากหลายประเภทด้วยกัน

2.3 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite : HA)

ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งมีทั้งประจุบวก และประจุลบบนผิวโมเลกุลเดียวกันมีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นแคลเซียมฟอสเฟต ไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์เป็นปริมาณสารสัมพันธ์ และมีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ประกอบด้วย Ca^{2+} , PO_4^{3-} และ OH^- ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ชีวภาพที่พบได้ในสิ่งมีชีวิตตามแหล่งธรรมชาติทั่วไป ซึ่งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์มีองค์ประกอบทางทฤษฎีคือ มี Ca อยู่ร้อยละ 39.68 โดยน้ำหนัก และ P ร้อยละ 18.45 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca:P) คือ 2.151 โดยน้ำหนัก หรือ 1.67 โดยโมล ถ้าอัตราส่วนโดยโมลมีค่าเท่ากับ 1.67 ลักษณะของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเป็นดังภาพที่ 2.1 ถ้าอัตราส่วนระหว่าง Ca:P น้อยกว่า 1.67 โดยโมล จะได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีเฟสอื่นปนอยู่ เช่น เบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (beta tricalcium phosphate : β -TCP, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) หรือ เฟสอื่น เช่น ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tetracalcium phosphate : TTCP, $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$) ถ้าอัตราส่วนระหว่าง Ca:P มากกว่า 1.67 โดยโมล จะได้เฟสของ CaO ปนอยู่กับเฟสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยในเชิงพาณิชย์อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca:P ของวัสดุผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ค่าที่ยอมรับได้จะอยู่ในช่วง 1.57-1.70

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งเป็นชีววัสดุที่เร่งปฏิกิริยาการสร้างเนื้อเยื่อ (Bioactive Material) นิยมนำมาผลิตข้อกระดูกเทียม รากฟันเทียม เพราะสามารถเร่งการสร้างเซลล์กระดูก และเซลล์เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective Tissue) ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างวัสดุปลูกถ่าย และเนื้อเยื่อประสานกันอย่างรวดเร็วมีความแข็งแรงโดยเฉพาะวัสดุชนิดพูนที่มีรูพูนขนาดใหญ่มากกว่า 100-150 ไมครอน เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้เลือด และสารเคมีที่จำเป็นในการสร้างเนื้อเยื่อสามารถผ่านเข้าออกได้ดีช่วยย่นระยะเวลาในการรักษาให้ลดลงได้ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการพัฒนานำไฮดรอกซีอะพาไทต์มาใช้ประโยชน์ในหลายด้านโดยเฉพาะการใช้เป็นสารทดแทนกระดูก หรือ ใช้เป็นสารดูดซับ และแยกอนุภาคที่มีประจุ



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ HA ที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca:P เท่ากับ 1.67
ที่มา : Weiner (1998)

2.3.1 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์

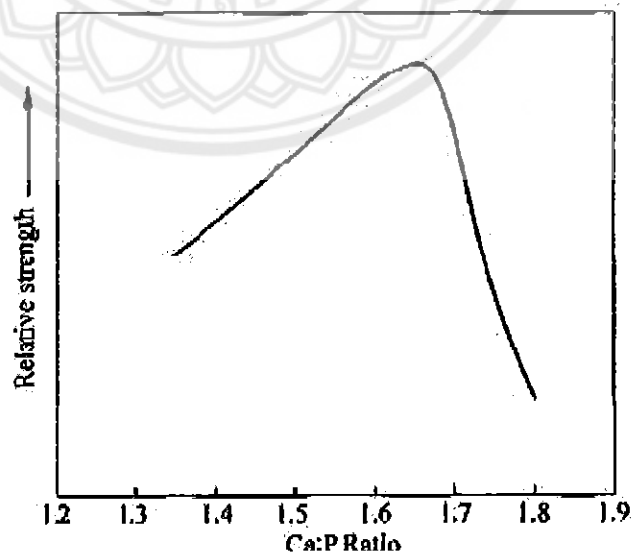
ค่าสมบัติเชิงกลขึ้นกับเทคนิคการวัดขนาดเกรน และสิ่งปนเปื้อนในไฮดรอกซีอะพาไทต์ ปัจจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลโดยตรง แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์

คุณสมบัติ	ค่าของสมบัติ	หน่วย
ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น	35-120	GPa
ค่าการทนต่อการบิดงอ	44-115	GPa
ค่าความต้านทานแรงกด	120-900	MPa
ค่าความต้านทานแรงดึง	38-300	MPa
ค่าความทนทานต่อการดัดโค้ง	38-350	MPa

ที่มา : รังสฤษฎ์ (2553)

การกระจายตัวของข้อมูลจะเป็นผลมาจากธรรมชาติทางสถิติของการกระจายข้อมูลของค่าความแข็ง ผลของการมีขนาดของเกรน สิ่งแปลกปลอม ซึ่งเมื่อไฮดรอกซีอะพาไทต์มีอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P เพิ่มขึ้นความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น และจะมีความแข็งแรงที่สุด เมื่อค่าอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P เท่ากับ 1.67 และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P มากกว่า 1.67 เนื่องจากค่าอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P เท่ากับ 1.67 เป็นค่าที่มีความเสถียรมากที่สุด และมีการสลายตัวช้าที่สุด ถ้าปริมาณของ Ca มากขึ้นความแข็งแรงจะลดลงเป็นลักษณะเส้นโค้ง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสกับสมบัติเชิงกล

ที่มา : Yasuda (2000)

การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นสามารถเตรียมได้จากสามแหล่ง คือ

2.3.1.1 จากสารเคมี เช่น แคลเซียมไนเตรต และแอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้นโดยสามารถทำโดยปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาการตกตะกอน เป็นต้น

2.3.1.2 จากปะการัง โดยนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ แต่ปะการังมีปริมาณน้อย และเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจึงไม่นิยมนำมาใช้

2.3.1.3 จากการให้ความร้อนสามารถเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยการให้ความร้อนแก่กระดูกสัตว์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอื่น เช่น กระดูกปลา กระดูกวัว ฟัน และกระดูกหมู หรือจากปะการัง เป็นต้น โดยมากจะนิยมใช้กระดูกวัว และกระดูกหมูมากกว่า เนื่องจากมีปริมาณมาก และเป็นสัตว์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์อยู่แล้วทั้งการใช้แรงงาน และการบริโภค การสกัดสารอินทรีย์ออกจากเนื้อของกระดูกสัตว์ทำได้หลายวิธี เช่น

ก. การเตรียมด้วยกระบวนการสกัดโดยใช้การต้มในน้ำเดือด (Subcritical water) เป็นการเตรียมปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ในหม้อไอน้ำแรงดันสูง (Autoclave) และอบด้วยเตาไมโครเวฟ

ข. การเตรียมด้วยกระบวนการทางเบส (Alkaline hydrothermal hydrolysis) เป็นการเตรียมปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีนด้วยความร้อนโดยการเติมเบสเข้าช่วยเพื่อสกัดสารอินทรีย์ออกจากเนื้อของกระดูกสัตว์

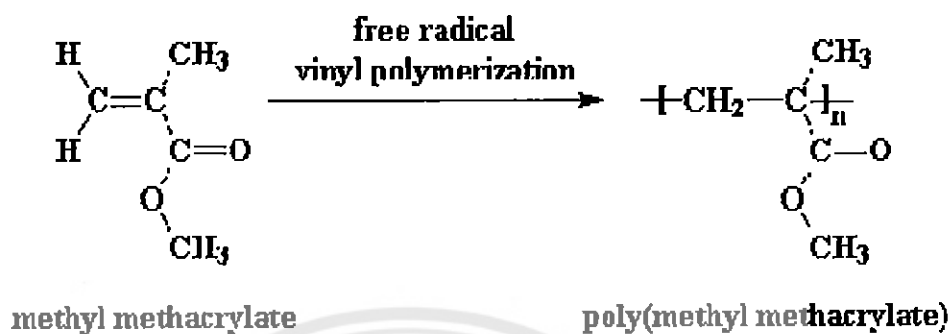
ค. การเตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อน (Thermal decomposition) เป็นการเตรียมปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีนด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยการต้มด้วยน้ำ ณ อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำเพื่อเป็นการย่อยสลายโปรตีน ไขมัน หรือ สารอินทรีย์ที่อยู่ในเนื้อกระดูกสัตว์ หลังจากนั้นนำกระดูกที่ได้ไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และนำไปบดละเอียด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากกระดูกสัตว์โดยการเตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อน เนื่องจากกระบวนการเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นกระบวนการทางความร้อนโดยเทคนิคที่ค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อนมาก และได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความบริสุทธิ์เนื่องจากผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง

2.4 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly (methyl methacrylate) : PMMA)

พอลิเมทิลเมทาคริเลต หรือ มีชื่อเรียกทั่วไปเรียกว่า เรซินอะคริลิก จัดเป็นกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) สูง ความไม่เป็นผลึก หรือ ความเป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์จะส่งผลทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมีสมบัติแข็ง ใส และโปร่งแสงเหมือนแก้ว สมบัติเด่นของพอลิเมทิลเมทาคริเลต คือ แข็ง เหนียว และมีความโปร่งใสสูงยอมให้แสงผ่านได้ถึงร้อยละ 92 ทั้งยังสามารถนำไปย้อมสีได้ง่าย การประยุกต์ใช้งานของพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยส่วน

ใหญ่มักจะนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบของรถยนต์ ทำเลนส์ ทำเครื่องประดับ กระเบื้องมุงหลังคา ชนิดใส และยังนำไปทำเป็นวัสดุชีวภาพ เช่น ซีเมนต์เชื่อมกระดูก สูตรโครงสร้างเคมีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต แสดงดังรูปที่ 2.3

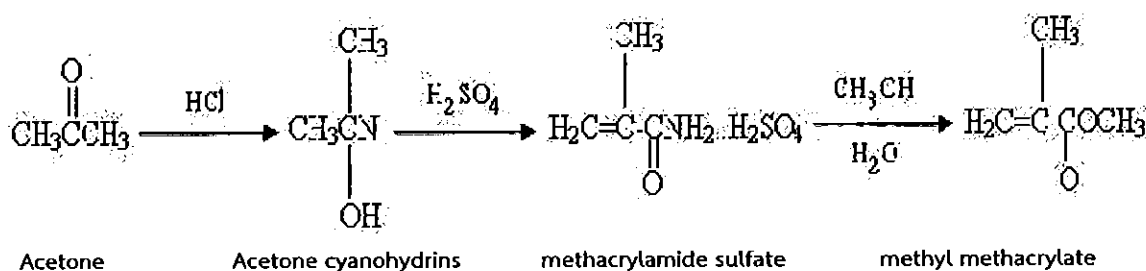


รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างเคมีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ที่มา : Billmeyer (1984)

2.4.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลต

กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถทำได้หลายวิธีทั้งกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution Polymerization) แบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization) แบบแขวนลอย (Suspension Polymerization) และแบบบัลค์ (Bulk polymerization) ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์เป็นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ง่ายที่สุด ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างต่ำ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสิ่งเจือปนน้อยที่สุด ในขณะที่กระบวนการขึ้นรูปแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานนั้น นิยมผลิตด้วยกระบวนการหล่อ (Casting Process) ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ง่าย และผลิตภัณฑ์แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นที่มีคุณสมบัติความโปร่งใสสูงกว่ากระบวนการผลิตแบบอื่น โดยกระบวนการสังเคราะห์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนอะซิโตนเป็นไซยาโนไฮไดรินด้วยการเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 100 องศาเซลเซียส และสารละลายเมทานอลในน้ำโดยปฏิกิริยาทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2.4 (Billmeyer, 1984)



รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ที่มา : Billmeyer (1984)

2.4.2 การประยุกต์ใช้งานของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ปัจจุบันอะคริลิกพลาสติกถูกประยุกต์ใช้ในงานหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นเครื่องประดับ อุปกรณ์สำนักงาน อุปกรณ์ในห้องน้ำ สื่อบ้าน ป้ายโฆษณา หรือ ป้ายชื่อร้าน และอื่น ๆ อีกมากมาย แต่มีการใช้งานบางอย่างที่น่าสนใจของพลาสติกมาใช้ได้อย่างลงตัว เช่น

2.4.1.1 งานด้านศัลยกรรมพบว่ามีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และกว้างขวางมานานแล้ว ทั้งในรูปแบบที่เป็นแบบผงพอลิเมทิลเมทาคริเลต และในรูปของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใส เช่น การนำมาใช้เป็นฐานฟันปลอม เนื่องจากมีความสวยงาม น้ำหนักเบา ราคาถูก ขั้นตอนการผลิตทำได้ง่าย เหมาะสำหรับการใช้ในช่องปากเนื่องจากซ่อมแซมได้ง่าย และยังสามารถนำไปทำเป็นซีเมนต์เชื่อมกระดูก (Bone ceramic) เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และยังทนต่อความต้านทานแรงกดได้ดี (กิติกร, 2549)

2.4.1.1 งานที่ต้องการความใส และความแข็งแรง เช่น กระจกบ่อเลี้ยงปลา ตู้ปลาส่วนใหญ่มักจะใช้กระจกแก้ว เช่นเดียวกับในบ่อเลี้ยงปลาขนาดใหญ่อย่างในพิพิธภัณฑ์สัตว์น้ำที่ต้องใช้แผ่นกระจกหนามากเพื่อรองรับแรงดัน และน้ำหนักของน้ำปริมาณมหาศาล แต่กระจกแก้วมีข้อด้อยสำคัญอย่างหนึ่ง คือ ขนาดแผ่นกระจกที่หนาขึ้น จะมีผลให้แสงส่องผ่านได้น้อยลง ทำให้มองเห็นปลาในบ่อไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ดังนั้นบ่อเลี้ยงปลาขนาดใหญ่สมัยใหม่จึงเปลี่ยนมาใช้แผ่นอะคริลิกพลาสติกแทนกระจกแก้ว เพราะอะคริลิกมีจุดเด่นเหนือกว่ากระจกแก้วหลายอย่าง คือ

ก. น้ำหนักเบากว่า (อะคริลิกพลาสติกมีความหนาแน่นน้อยกว่าแก้วมากกว่าครึ่ง) ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายและติดตั้งได้ง่ายกว่า

ข. แสงสว่างสามารถส่องทะลุผ่านอะคริลิกพลาสติกได้มากกว่าแก้ว

ค. การเชื่อมต่อแผ่นอะคริลิกพลาสติกสามารถเชื่อมได้ถึงระดับโมเลกุล โดยทาสารเคมีบางชนิด เช่น ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) หรือ ไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane) ลงที่ผิวพลาสติกทำให้พลาสติกอ่อนตัว หรือ เหลวก่อนประกบแผ่นอะคริลิกเข้าด้วยกัน วิธีนี้ทำให้พลาสติกสามารถเชื่อมต่อกันได้เป็นเนื้อเดียว และบริเวณรอยต่อจะมีขนาดเล็กมากจนแทบมองไม่เห็น ทำให้ผลงานมีความสวยงามมากกว่า

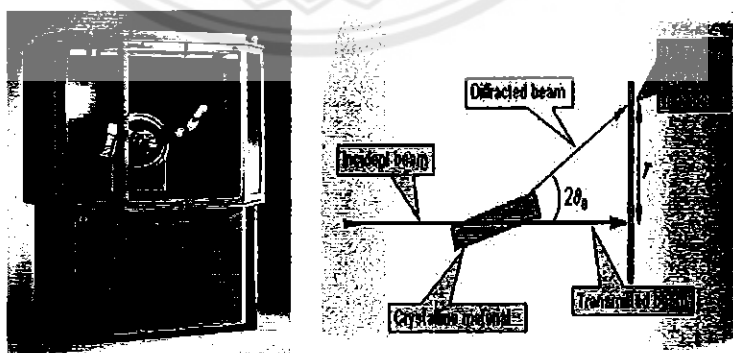
ง. อะคริลิกพลาสติกมีความเป็นฉนวนความร้อนดีกว่าแก้วประมาณร้อยละ 20 จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานสำหรับทำความร้อน หรือ ความเย็นในน้ำได้ขณะที่จุดด้อยของการใช้อะคริลิกพลาสติก คือ มันมีราคาแพงกว่าแก้ว และเกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายกว่าแก้ว แต่สามารถนำอะคริลิกไปเคลือบผิวให้ทนต่อการขีดข่วนได้

2.5 การตรวจสอบไฮดรอกซีอะพาไทต์ และวัสดุเชิงประกอบ

2.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ และระบุองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างของสารที่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline) และวัสดุที่มีความเป็นผลึกสูงจะให้ลักษณะของพีค (Peak) ที่สูงและแคบ ในขณะที่วัสดุที่มีความเป็นผลึกต่ำ ขนาดของอนุภาค การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งในผลึกแต่ละชนิดมีขนาดของหน่วยเซลล์ไม่เท่ากัน และประกอบด้วยสารที่แตกต่างกันแพทเทอร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเลี้ยวเบนกับความเข้มสัมพัทธ์ของพีค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับขนาดของหน่วยเซลล์ คือ มีขนาดตั้งแต่ประมาณ 0.1-100 อังสตรอม จึงจะสามารถเลี้ยวเบนได้ดีจากผลึก เช่นเดียวกับแสงที่สามารถเลี้ยวเบนจากดิฟแฟรคชันเกรตติง จะพบว่ารังสีขนานตกลงบนผลึกที่จุด A และ B ตามลำดับโดยทำมุม θ กับระนาบของผลึก แสดงดังรูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีจะเกิดขึ้นเมื่อระยะทางที่รังสีเอ็กซ์ 1 และ 2 เดินทางต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น โดยกฎข้อนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้ารังสีเอ็กซ์ตกกระทบมีความยาวคลื่นที่คงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ค่อนข้างรวดเร็ว และถูกต้อง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายกรณีอาทิเช่น การวิเคราะห์ หรือ ระบุองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างของสารที่เป็นผลึก ใช้จำแนกสีเก่าออกจากสีใหม่ ทางเภสัชกรรมใช้วิเคราะห์ส่วนประกอบของยา นอกจากนี้ยังใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ ฯลฯ



รูปที่ 2.5 ลักษณะและหลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน

ที่มา : นันทวัน (2554)

2.5.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการของสเปกโทรสโกปีชนิดหนึ่ง ที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกันโดยช่วงเลขคลื่น $4000-1500\text{ cm}^{-1}$ จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล เช่น -OH , C=O , N-H , CH_3 เป็นต้น และในช่วงเลขคลื่น $1500-400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว แต่เนื่องจากจะมีพีคเกิดค่อนข้างเยอะ ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัมช่วงนี้ค่อนข้างยาก การนำเทคนิคนี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับด้านวัสดุศาสตร์ เช่น พอลิเมอร์ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพง และรวมไปถึงชนิดของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ได้เกือบทุกชนิด ดังนั้นจึงนิยมใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) นี้ในการตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้าง และองค์ประกอบของโมเลกุลร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ

ตารางที่ 2.2 เป็นฟังก์ชันหลักของ HA ที่สนใจศึกษา

ช่วงคลื่น (cm^{-1})	ฟังก์ชันหลัก
2700-3700	OH^- และ NH_4^+ stretching
1631	OH^- bending
1450-1550	NH_4^+ bending
1300-1450	CO_3^{2-}
1062 1031	PO_4^{3-} stretching
1027 603 566	PO_4^{3-} bending

ที่มา : แม้น (2541)

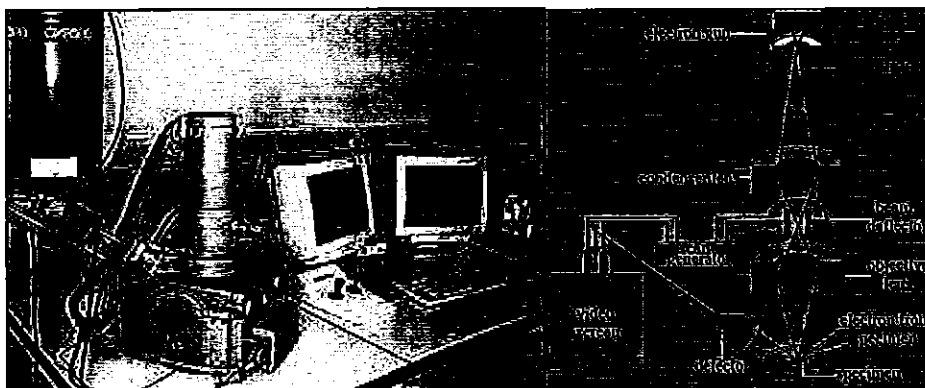
2.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้าง และสมบัติบางประการของสสารค่าความชัดลึก (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสงทั้งนี้เป็นเพราะ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถวัดความละเอียดได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ ทำให้ภาพที่ได้มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิค อื่น ๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDXS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WED) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีอีกด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมาก ๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง-กราดเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์ อื่นหลายสาขา (บุญชา, 2544) โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของพื้นผิวได้ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณที่ใช้ในการวัด (Detector) แบ่งภาพออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.5.3.1 ภาพที่ได้จากสัญญาณ (Secondary Electron) จะได้ภาพที่เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความสูงต่ำ ขรุขระ ที่เกิดขึ้นจริงบนตัวอย่าง

2.5.3.2 ภาพที่ได้จากสัญญาณ (Back Scattered Electron) จะได้ภาพที่มีลักษณะที่เป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุนั้น วัตถุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่าง กว่าวัตถุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

ลักษณะของตัวอย่าง และชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบที่ต้องการสภาพความเป็นสุญญากาศสูง การเตรียมตัวอย่างที่จะศึกษาต้องแห้ง ไม่มีความชื้น และไม่ปนเปื้อนสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน (น้ำมัน) เพราะเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้น หรือ สารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ขัดขวางเส้นทางของอิเล็กตรอน ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนอีกทั้งโมเลกุลเหล่านี้อาจไปเกาะยังส่วนต่าง ๆ ของกล้อง เช่น ผิวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีอายุการใช้งานสั้นลง (บุญชา, 2544)



รูปที่ 2.6 ลักษณะและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่มา : มนัส (2541)

2.5.4 การทดสอบความต้านทานแรงกด (Compressive strength)

แรงกดเป็นแรงตรงเช่นเดียวกับแรงอัด และแรงดึงโดยมีลักษณะการทดสอบความแข็งแรงคล้ายแรงดัดซึ่งกันที่แรงกดใช้แรงอยู่กับที่ และเพิ่มขนาดของแรงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งชิ้นงานที่ทดสอบแตกหัก หรือ ขาดออกจากกันเช่นเดียวกับแรงดัด แต่ชิ้นทดสอบที่รองรับแรงที่มากกระทำจะอยู่บนพื้นราบ การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกดจะมีความนิยมน้อยที่สุด เนื่องจากมีลักษณะของการทดสอบในลักษณะเดียวกับความแข็งแรงประเภทอื่นรวมทั้งการทดสอบความแข็งแรง (มณฑล, 2531) ซึ่งการทดสอบทำโดยการหล่อชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายมี 2 รูปทรง คือ

รูปทรงรูปบาศก์ ตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 : PART 3 ตัวอย่างขนาด เช่น 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

รูปทรงกระบอก ตามมาตรฐานอเมริกา ASTM C 192 ตัวอย่างขนาด เช่น 6 x 12 มิลลิเมตร

2.5.4.1 วิธีการทดสอบความต้านทานแรงกด

ก. วัดและบันทึกค่าความสูง ความกว้าง และความยาวของก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยวัดระยะระหว่างหน้าตัดแนวตั้งให้ละเอียดถึงระดับมิลลิเมตร (กรณีก้อนตัวอย่างเป็นทรงลูกบาศก์)

ข. วัดและบันทึกความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างทดสอบโดยวัด 2 แนวที่ตั้งฉากกัน ให้วัดให้ละเอียดถึงระดับมิลลิเมตร (กรณีก้อนตัวอย่างเป็นทรงกระบอก)

ค. ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าตัวอย่างทดสอบ

ง. นำก้อนตัวอย่างวางบนกึ่งกลางของแท่นทดสอบโดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด

จ. เปิดเครื่องทดสอบ โดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมอัตราความเค้นให้สม่ำเสมอประมาณ 1.43-3.47 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก และอัตราความเค้นประมาณ 1.12 - 2.72 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

ฉ. กดก้อนตัวอย่างจนพัง บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่าความต้านทานแรงกด

$$\text{ความต้านทานแรงกด (N/m}^2\text{)} = \frac{F(N)}{\pi r^2(\text{m}^2)} \quad (2.1)$$

โดยที่ $\pi = 22/7$ หรือ 3.1428 ค่าคงที่

r = รัศมีของแท่งตัวอย่าง (เมตร : meter)

F = แรงกด (นิวตัน : Newton)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รังสฤษฎ์ (2553) ได้ทำการศึกษาโครงสร้าง และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับแป้งข้าวเจ้าโดยพัฒนาทดลองการเตรียมวัสดุผสมเพื่อใช้ทดแทนกระดูกมนุษย์ โดยสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของไฮดรอกซีอะพาไทต์ การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวสัมผัสของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์กับแป้งข้าวเจ้า โดยใช้อัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อไฮดรอกซีอะพาไทต์ 75:25 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด

ภาณุวัฒน์ (2551) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยพอลิยูรีเทน เพื่อใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรมจัดฟัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านทันตกรรมจัดฟันทดแทนแผ่นที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบว่ามีลักษณะความยืดหยุ่นที่สูงกว่าแผ่นชิ้นงานที่นำเข้าจากต่างประเทศ และสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าใกล้เคียงกัน โดยไม่มีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์

Sobczak (2009) ได้ทำการศึกษาการเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกสัตว์ วิธีการสกัดไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกโดยการเผาแคลไซน์ และการตกตะกอน โดยจะศึกษาไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเทคนิคการเลี้ยวเบน (XRD) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR) และศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) สีของผงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ถ้าได้รับอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้มีสีเข้ม และจะมีสีขาวขึ้นถ้าได้รับอุณหภูมิที่สูงความเข้มข้นของแคลเซียม และฟอสฟอรัสในกระดูกที่ทำการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส จะมีค่าที่ต่ำกว่าการเผาที่อุณหภูมิที่ 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีสารอินทรีย์ในวัสดุ

Ruksudjarit (2007) ได้สังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว โดยนำกระดูกวัวสดที่หาได้ตามท้องตลาดมาสกัดเอาโปรตีนออกจนหมดด้วยการต้มในน้ำร้อน และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำมาบดย่อยให้ละเอียดมากที่สุด พบว่าผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมได้เป็นผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความบริสุทธิ์มีค่า Ca:P เท่ากับ 1.66 และเป็นผลึกที่มีขนาดนาโน-เมตรที่ระยะเวลาการบด 2-4 ชั่วโมง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว ซึ่งสามารถยืนยันว่าผงที่ได้เป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์จริงโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR) และสัณฐานวิทยา (SEM) เพื่อนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้ไปผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ และขึ้นรูปโดยการหล่อแบบ จากนั้นนำไปทำการทดสอบความต้านทานแรงกด และทำการตรวจสอบการกระจายตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.1 สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในโครงการงาน

3.1.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

3.1.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly Methyl Methacrylate : PMMA) เกรด MD001 จากข้อมูลบริษัท มิตซูบิชิ เรยอน จำกัด โดยมีสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเมทิลเมทาคริเลต เกรด MD001

คุณสมบัติ	วิธีการทดสอบ	ชนิด MD0001	หน่วย
ความถ่วงจำเพาะ	ASTM D792	1.19	-
ค่าการดูดซับน้ำ	ASTM D570	0.3	%
อุณหภูมิการอ่อนตัว	ASTM D1525	104	°C
อัตราการไหล	ASTM D1238	5.7	g/10 min
ความต้านทานแรงดึง	ASTM D638	700	kg/cm ²
ค่าความยืดตัว	ASTM D638	5	%
ความแข็งแรงดัด	ASTM D790	1,050	kg/cm ²
ค่ามอดุลัสความโค้งงอ	ASTM D790	3.1x10 ⁴	
ความต้านทานแรงกด	ASTM D695	1,050	kg/cm ²
ความแข็งแรงคงทนต่อการสลาย	ASTM D149	20	kv/mm

ที่มา : บริษัท (มิตซูบิชิ เรยอน จำกัด)

3.1.3 สารละลายอะซิโตน (Acetone)

3.1.4 เรซิน (Resin)

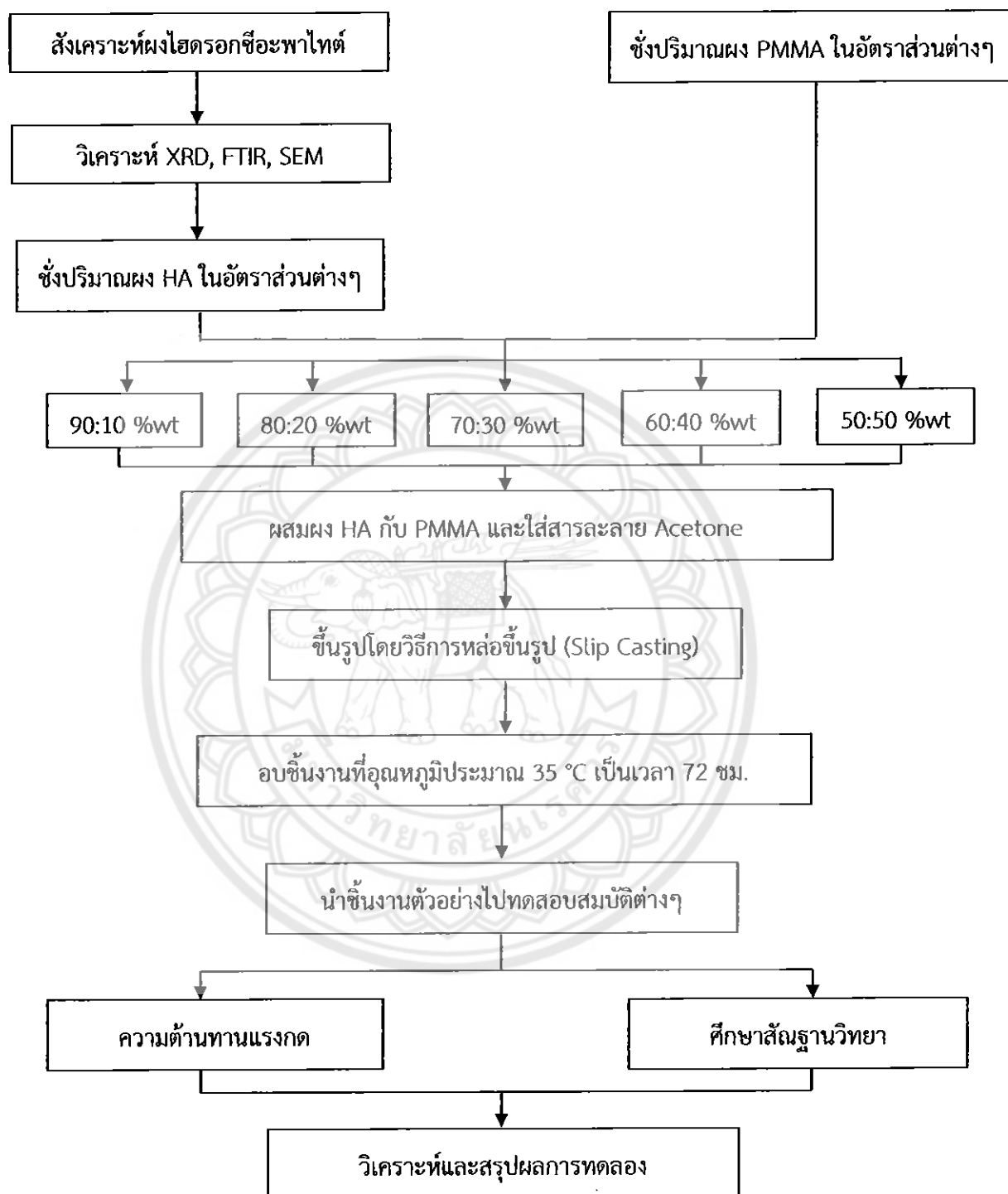
3.1.5 วาสลีน (Vaseline)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงการ

- 3.2.1 เตาเผา
- 3.2.2 ตะแกรงขนาด 270 เมช
- 3.2.3 แม่พิมพ์สำหรับการหล่อ
- 3.2.4 โกร่ง
- 3.2.5 เตาอบ
- 3.2.6 ครุชีเบิ้ล (crucible)
- 3.2.7 กระดาษทราย
- 3.2.8 แท่งแก้วคนสาร
- 3.2.9 บีกเกอร์
- 3.2.10 เครื่องเจาะ
- 3.2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 3.2.12 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)
- 3.2.13 เครื่องวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- 3.2.14 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (UTM)



โดยแผนการดำเนินงานในงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัย

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนในการเตรียมผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

3.3.1.1 นำกระดูกวัวที่ได้มากำจัดโปรตีน และไขมันออกให้หมด โดยการต้มในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาทั้งหมด 48 ชั่วโมง

3.3.1.2 จากนั้นนำไปทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำกระดูกที่ได้จากการเผาแคลไซน์แล้วไปทำการลดขนาดด้วยการทุบ หรือตำให้ละเอียดมากที่สุด จากนั้นจึงนำไปทำการบดแห้งด้วยโกร่ง

3.3.1.3 นำผงกระดูกที่ทำการบดละเอียดแล้วไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 270 เมช

3.3.1.4 นำผงกระดูกที่ได้จากการร่อนไปทำการศึกษาวงกาศ (XRD) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR) และศึกษาสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ (SEM)

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต

3.3.2.1 วิธีการเตรียมโดยการนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาทำการบด หรือ บั่นโดยเครื่องบั่นเพื่อให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีขนาดเล็กลง

3.3.2.2 นำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์และผงพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาผสมคนให้เข้ากันโดยใช้แท่งแก้วคนสาร โดยชั่งปริมาณของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์กับผงพอลิเมทิลเมทาคริเลต ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนระหว่างผง HA กับผง PMMA ในสถานะของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองต่าง ๆ

สถานะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	อัตราส่วนผง HA : PMMA (%wt)
1	90:10
2	80:20
3	70:30
4	60:40
5	50:50

3.3.2.3 ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป (Slip Casting) โดยใส่สารละลายอะซีโตนลงไปให้อัตราส่วนระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อสารละลายอะซีโตนเท่ากับ 1 : 0.7 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยใช้เรซินในการทำแม่พิมพ์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง

3.3.2.4 ทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกด

นำงานที่ได้มาทำการทดสอบความต้านทานแรงกดเพื่อเปรียบเทียบกับระหว่างอัตราส่วนต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต

3.3.2.5 ศึกษาสัณฐานวิทยา

นำชิ้นงานไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) จะใช้เทคนิคที่เรียกว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) ซึ่ง XRD นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ และระบุองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของสารที่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline) และวัสดุที่มีความเป็นผลึกสูงจะให้ลักษณะของพีค (Peak) ที่สูง และแคบในขณะที่วัสดุที่มีความเป็นผลึกต่ำ หรือเป็นอสัณฐาน (Amorphous) นั้นจะให้ลักษณะของพีคที่ต่ำ และกว้าง ซึ่งเทคนิค XRD นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งผง (Powders) และผลึกเดี่ยว ๆ (Single Crystals)

ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ โดยชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบเป็นของแข็งจะต้องผ่านการบดด้วยโม่ (Mortar) หรือลูกบด เพื่อให้เป็นผงละเอียดก่อนจะทำการวิเคราะห์ หลังจากนั้นทำการอัดผงตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ลงในที่ใส่ตัวอย่าง (Sample holder) แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้ Ni เป็นตัวกรองรังสี แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ HA จาก JCPDS หมายเลข 74-0565

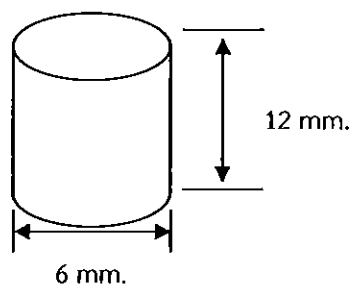
3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้คือ เตรียมให้เป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางมาก ๆ โดยใช้โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) คือมีความหนาประมาณ 0.01-0.1 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงผ่านได้มีวิธีการเตรียมโดยใช้โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ซึ่งเป็นสารพวกอัลคาไลเฮไลต์ โดยใช้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 2.0 มิลลิกรัม ผสมกับ KBr ประมาณ 100-200 มิลลิกรัม บดให้เข้ากันในโม่จนเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อบดเสร็จแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัดซึ่งเรียกว่าแม่พิมพ์ แล้วนำแม่พิมพ์ไปเข้าเครื่องไฮดรอลิก (Hydraulic press) โดยใช้แรงดันประมาณ 15 ตัน หลังจากนั้นลดความดัน และปลดเครื่องอัดไฮดรอลิกออกจากแม่พิมพ์จะได้ตัวอย่างที่เป็นแผ่นฟิล์มบาง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อไปด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปี โดยใช้ช่วงคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$

3.4.3 สมบัติความต้านทานแรงกด (Compressive strength)

ทดสอบความต้านทานแรงกดโดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine : UTM) เป็นการทดสอบโดยให้แรงกดลงบนชิ้นงาน ด้วยความเร็ว 0.02 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ Load Cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน จนกระทั่งชิ้นงานที่ทดสอบแตกหัก หรือขาดออกจากกัน ซึ่งมาตรฐานรูปทรงของชิ้นงานที่จะนำมาทำการทดสอบความต้านทานแรงกด คือ รูปทรงกระบอก ตาม

มาตรฐานอเมริกา ASTM C 192 ตัวอย่างขนาดชิ้นงานที่ใช้กว้าง 6 มิลลิเมตร สูง 12 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแรงกดได้จากสมการที่ 2.1



รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานทรงกระบอกที่นำมาทดสอบ

3.4.4 ศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้เข้ามาศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยจะทำการศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมทิลเมทาคริเลต และเพื่อดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

วิเคราะห์ห้วงภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และศึกษาสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว จากนั้นวิเคราะห์สมบัติความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบ แล้วจึงวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ

3.6 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองในด้านปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกด และสัณฐานวิทยาในวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

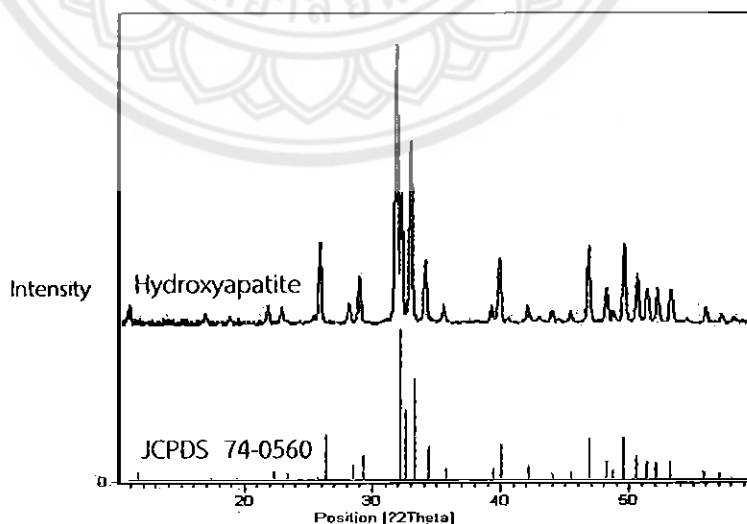
4.1 ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

ศึกษาภูมิภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากการนำกระดูกวัวไปทำการต้มด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปบดด้วยโกร่ง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 270 เมช

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD)

จากการตรวจสอบเฟสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วยเทคนิค XRD เพื่อยืนยันว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัวมีโครงสร้างผลึกเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่าได้ผลแสดงในรูปที่ 4.1 แบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว จะมีรูปแบบ (XRD Pattern) ตรงกับไฮดรอกซีอะพาไทต์จากแฟ้มข้อมูล (Joint Committee on Powder Diffraction Standard : JCPDS) หมายเลข 74-0565 ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ที่มีหน่วยเซลล์จัดอยู่ในระบบผลึกแบบเอกซะโกนอล (Hexagonal)

จากผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) สรุปว่าได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวมีโครงสร้างผลึกเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์

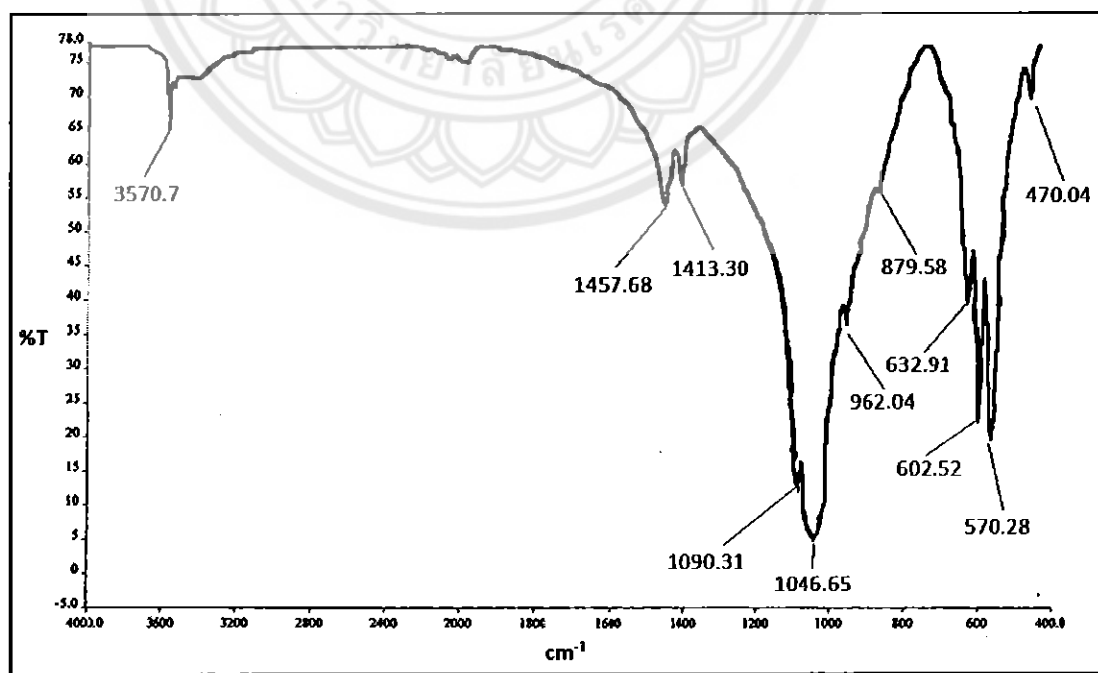


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว ด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบกับแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 74-0565

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR)

จากการตรวจสอบวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อที่ยืนยันว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวมีหมู่ฟังก์ชันที่มีค่าใกล้เคียงกับช่วงคลื่นของฟังก์ชันหลักที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดมาตรฐาน และแสดงถึงสมบัติของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 พบว่าในช่วงประมาณพิคที่ 3570.71 , 632.91 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน OH^- stretching (คือ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีแสงอินฟราเรดพันธะของโมเลกุลนั้นจะเกิดการยืด) ส่วนในช่วงพิคที่ 1457.68 , 1413.30 , 962.04 , 879.58 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน CO_3^{2-} ส่วนในช่วงประมาณพิคที่ 1047 - 1095 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO_4^{3-} stretching และในช่วงประมาณพิคที่ 470 - 636 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO_4^{3-} bending (คือ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีแสงอินฟราเรดพันธะของโมเลกุลนั้นจะเกิดการงอ) โดยนำผลช่วงคลื่นที่ได้ไปเปรียบเทียบกับช่วงคลื่นต่างๆ ของ (Ruksudjarit, 2007) แสดงดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 พบว่าพิคที่ $3570, 602$ cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน OH^- stretching ส่วนในช่วงพิคที่ 1429 , 1390 , 914 , 879 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน CO_3^{2-} ส่วนในช่วงพิคที่ 1046 - 1090 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO_4^{3-} stretching และช่วงประมาณพิคที่ 570 - 636 จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO_4^{3-} bending

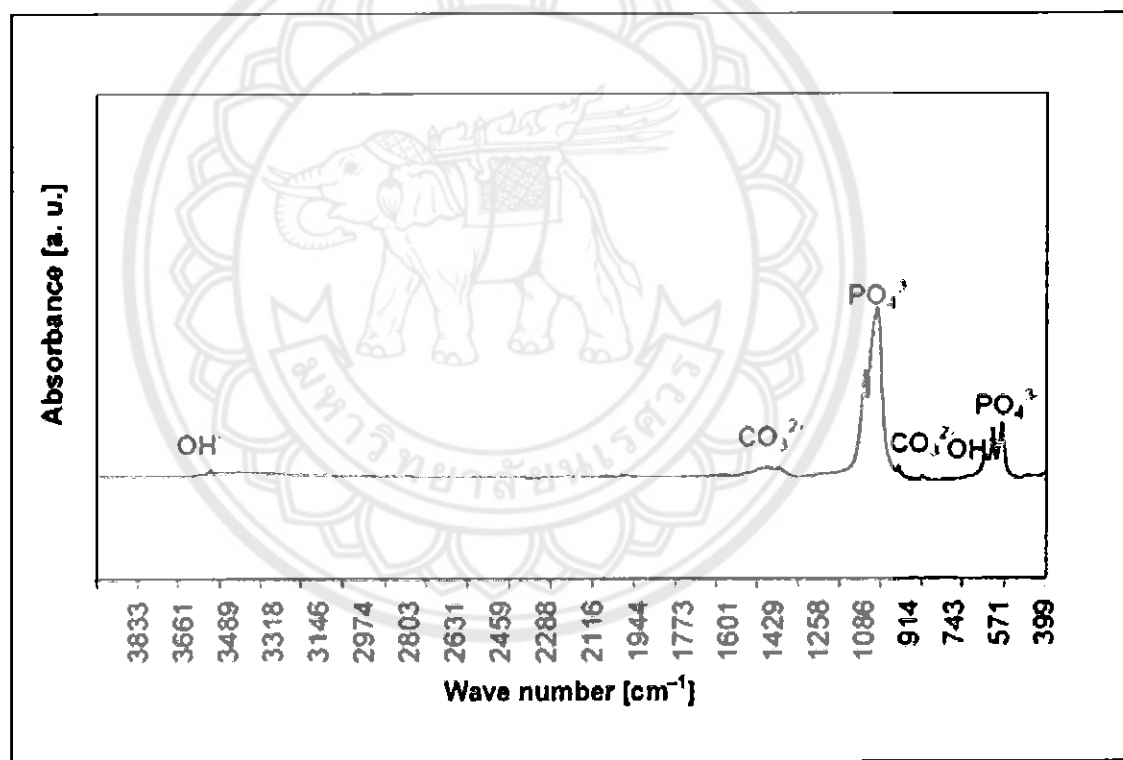
จากผลการวิเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) สรุปได้ว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวมีหมู่ฟังก์ชันที่มี CO_3^{2-} ซึ่งเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบของกระดูกโดยไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายปะปนอยู่ในไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Ruksudjarit, 2007)



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

ตารางที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิค FTIR

ช่วงคลื่น (cm^{-1})	ฟังก์ชันโมเลกุล
3570 602	OH^- stretching
1457.68 1413.30 962.04 879.58	CO_3^{2-}
1047-1095	PO_4^{3-} stretching
470-636	PO_4^{3-} bending



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว โดยการนำไปเผาที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C

ที่มา : Ruksudjarit (2007)

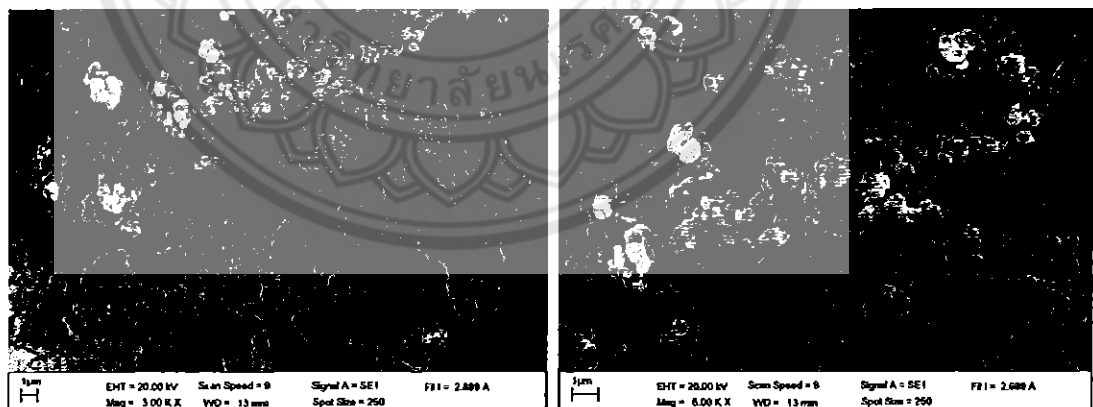
ตารางที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิค FTIR

ช่วงคลื่น (cm^{-1})	ฟังก์ชันหลัก
3550	OH ⁻ stretching
632	
1429	CO ₃ ²⁻
1390	
914	
879	
1046 - 1090	PO ₄ ³⁻ stretching
570-636	PO ₄ ³⁻ bending

ที่มา : Ruksudjarit (2007)

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Eletron Microscopy : SEM)

ผลจากการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่รูปร่างค่อนข้างที่จะเป็นทรงกลม พื้นผิวไม่เรียบ ทำให้มีการจับตัวกันได้แน่นขึ้น เนื่องจากมีรูปร่างที่เป็นทรงกลมสามารถจัดเรียงตัวได้ดี ส่งผลให้วัฏภาคของพอลิเมอร์สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวได้ แสดงดังรูปที่ 4.4



ก)

ข)

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

ก) ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ข) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

15944661

นาง,

อภร ๘๗

2664

4.2 ผลการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต

วิเคราะห์สมบัติความต้านทานแรงกด และศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานดังรูปที่ 3.1 โดยทำการชั่งอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตตามตารางที่ 3.2 และทำการละลายพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยสารละลายอะซีโตน จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธี Slip Casting และทำให้ชิ้นงานเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดความยาว 12 มิลลิเมตร กว้าง 6 มิลลิเมตร ด้วยแม่พิมพ์เรซิน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่แสดงดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 90:10 ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากในอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 90:10 ร้อยละโดยน้ำหนัก มีปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีน้อยเกินไป จึงทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้น้อย และไม่เพียงพอที่จะทำให้ชิ้นงานสามารถคงรูปอยู่ได้ จึงทำให้เกิดการเสียรูป เกิดการแตกหัก และไม่สามารถนำไปทดสอบความต้านทานแรงกดได้ แสดงดังรูปที่ 4.5



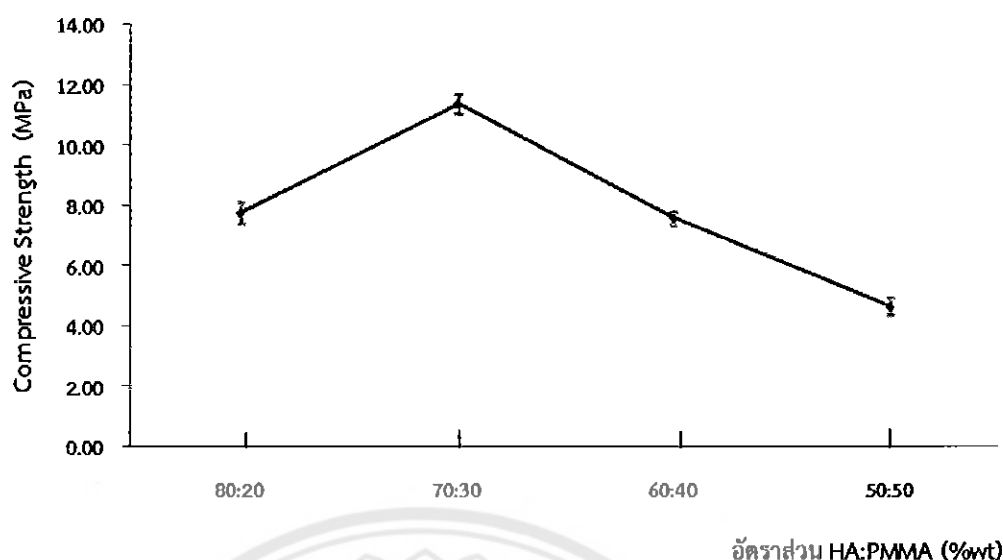
รูปที่ 4.5 วัสดุเชิงประกอบในอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 90:10 ร้อยละโดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าเมื่อมีปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้น จนถึงอัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก และมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น

โดยอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่รับแรงกดได้มากที่สุด เฉลี่ยประมาณ 11.67 เมกะปาสคาล เนื่องจากเมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบนั้นมีความสามารถในการยึดเกาะระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มมากขึ้น เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงกด ทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนแรงจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) ไปยังพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Filler) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้น และเมื่อพอลิเมทิลเมทาคริเลตถูกละลายโดยสารละลายอะซิโตน ส่งผลให้มุมระหว่างพันธะของ C-C เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดได้มากขึ้น นอกจากนี้ พันธะเอสเทอร์ (C=O) จะสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับฟอสฟอรัส (PO_4)₆ จากไฮดรอกซีอะพาไทต์ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัฏภาคเกิดการส่งผ่านแรงได้ดียิ่งขึ้น

วัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วน 80:20 ร้อยละโดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานแรงกดรองลงมานั้น เพราะว่ามีปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่น้อยกว่าอัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก ทำให้มียึดเกาะระหว่างอนุภาค และการถ่ายโอนแรงระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่น้อยกว่าอัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบค่าความต้านทานแรงกดแล้ว ชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งสรุปได้ว่าชิ้นงานนั้นมีปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพียงพอที่จะทำให้ชิ้นงานสามารถคงรูปอยู่ได้ แต่ปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตนั้นยังไม่เพียงพอที่ยึดเกาะกับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้มีการถ่ายโอนแรงไม่เท่ากันทั่วทั้งชิ้นงาน

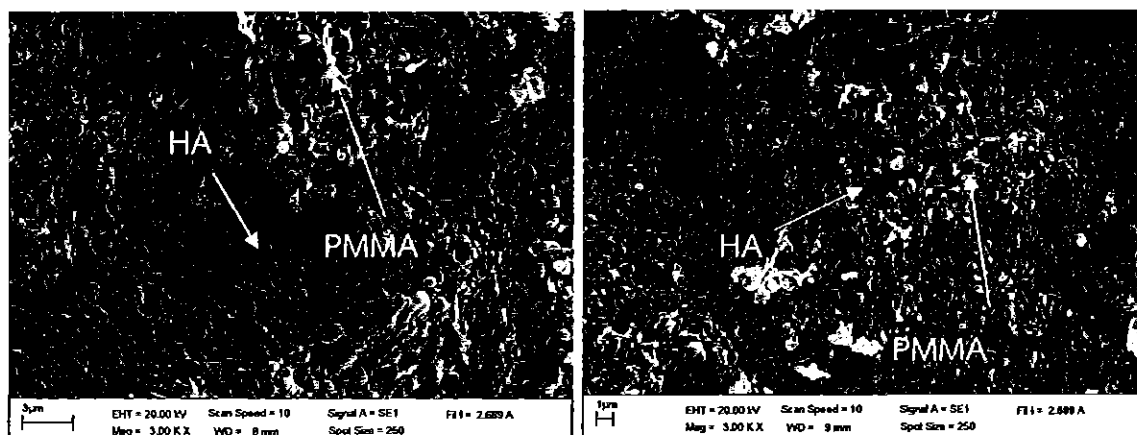
เมื่อพิจารณาจากปริมาณอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต 60:40 และ 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่าค่าความต้านทานแรงกดลดลง เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความหนาแน่นที่สูงกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลต และเป็นเนื้อพื้นทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงของวัสดุเชิงประกอบ และปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงลดลง ทำให้ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบลดลงตามลำดับ ตามอัตราส่วนของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบ และอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต

4.2.2 ผลการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Eletron Microscopy : SEM)

จากผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดพบว่า อัตราส่วนของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงมากที่สุด และอัตราส่วนของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงน้อยที่สุด จึงนำอัตราส่วนทั้ง 2 ไปทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อเปรียบเทียบดูการยึดเกาะระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในวัสดุเชิงประกอบ พบว่า อัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ส่งผลให้อัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก สามารถรับแรงได้ดีซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก และวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ และจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงกดย่นกว่าอัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก



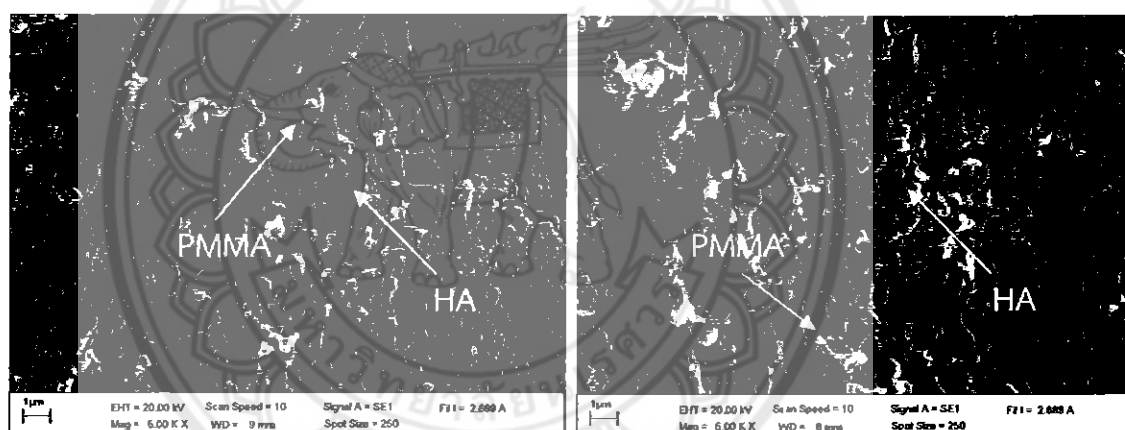
ก)

ข)

รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จาก
กระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ก) อัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก

ข) อัตราส่วน 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก



ก)

ข)

รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จาก
กระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ก) อัตราส่วน 70:30 ร้อยละโดยน้ำหนัก

ข) อัตราส่วน 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข ปัญหาของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ในงานวิจัยนี้การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว มีความเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยทำการยืนยันผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD หนึ่งฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR และสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

5.1.2 สมบัติความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต จะขึ้นอยู่กับปริมาณของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ยึดเกาะระหว่างพื้นผิวสัมผัสของพอลิเมทิลเมทาคริเลต และปริมาณผงไฮดรอกซีอะพาไทต์มีผลอย่างมากต่อสมบัติความต้านทานแรงกด เนื่องจากปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบลดลง

5.1.3 ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น ทำให้การยึดเกาะระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต และการกระจายตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นเกินกว่า 30 ร้อยละโดยน้ำหนัก การกระจายตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 สำหรับการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกดของชิ้นงานสามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงอัดในการขึ้นรูปชิ้นงาน

5.2.2 การเลือกวัสดุในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกโดยที่วัสดุนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่จัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุชีวภาพ จึงเหมาะสมต่อการนำไปทำการทดลองความเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต เช่น สัตว์ทดลอง

5.2.3 ทดลองหาสารตัวเติม หรือสารช่วยกระจายตัวชนิดอื่นมาช่วยในการขึ้นรูปที่ต้องการความซับซ้อน และช่วยให้ชิ้นงานแข็งแรงมากขึ้น

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 การทำวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ในงานวิจัย เป็นการขึ้นรูปด้วยมือ ซึ่งเป็นผลให้การขึ้นรูปชิ้นงานนั้นใช้แรงในการอัดขึ้นรูปไม่คงที่ เกิดความไม่สม่ำเสมอระหว่างชิ้นงาน จึงควรปรับลักษณะการขึ้นรูป

5.3.2 ชิ้นงานจากการขึ้นรูป เมื่อถึงไว้จนชิ้นงานแข็งตัวแล้ว ชิ้นงานจะติดกับแม่พิมพ์ ดังนั้นจึงควรใช้สารหล่อลื่นทาแม่พิมพ์

5.3.3 จากการขึ้นรูปชิ้นงานเนื่องจากชิ้นงานมีส่วนผสมของสารละลายอะซีโตน ซึ่งเป็นสารละลายที่สามารถระเหยได้ไวมาก จึงต้องใช้ทักษะ และความสามารถที่ดีในการขึ้นรูป มิฉะนั้น ชิ้นงานอาจแข็งตัวก่อนการขึ้นรูปได้



เอกสารอ้างอิง

- กิติกร จามรดุสิต และคณะ ทะเบียนสิทธิบัตรประเทศไทยเรื่อง “การเตรียมแผ่นสไตรีน-เมทิลเมทา-
คริลेटโคพอลิเมอร์ทนแรงกระแทกแบบโปร่งใสด้วยกระบวนการหล่อ” เลขที่คำขอ ๐๖๐๑๐๐
๒๖๓๕ ยื่นจดทะเบียนเมื่อวันที่ ๘ มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๓๙
- กิติกร จามรดุสิต และคณะ ทะเบียนสิทธิบัตรประเทศไทยเรื่อง “การปรับปรุงสมบัติการทนแรง
กระแทกของแผ่นสไตรีน-เมทิลเมทาคริลेटโคพอลิเมอร์ด้วยยางธรรมชาติโดยกระบวนการ
หล่อ” เลขที่คำขอ ๐๖๐๑๐๐๒๖๓๖ ยื่นจดทะเบียนเมื่อวันที่ ๘ มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๓๙
- นันทวัน มีเย็น และวรางคณา บุษยวิทย์. X-Ray Diffractometer. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กันยายน
2554, จาก <http://tinyurl.com/3pkp99g>
- บัญชา ธนบุญสมบัติ และศุภกาญจน์ คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประตูลูกโลก
ระดับจุลภาค. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ
- ภาณุวัฒน์ ประเสริฐพงษ์ และคณะ. (2551). การปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกของพอลิเม-
ทิลเมทาคริลेटด้วยพอลิยูรีเทนเพื่อใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรมจัดฟัน. ปรินูยานิพนธ์ปรินูญา
ท.บ. คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม
- มณฑล ฉายอรุณ. (2536). การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ Strength of Material Testing.
หน้า 9-15. กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ.
- มนัส สติรจินดา. (2541). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนัส สติรจินดา. (2541). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, ม.ป.ป.
- รังสฤษฎ์ คุณวุฒิ. (2553). โครงสร้าง และสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์
กับแป้งข้าว. ปรินูยานิพนธ์ปรินูญา วศ.บ. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,
เชียงใหม่
- แมน อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. (2541). วิศวกรรมวัสดุ. กรุงเทพฯ : แมคครอฮิล
- Billmeyer, F. W. Jr., Textbook of Polymer Science, John Willey, Singapore, 3rd ed.,
(1984) : 384-386
- Ruksudjarit, A. Pengpat, K. Rujjanagul, G. and Tunkasiri, T. (2007). “Synthesis and
characterization of nanocrystalline hydroxyapatite from natural bovine
bone”. Current Applied Physics., 8 : 270-272
- Sobczak A. Kowalski Z. (2009). Preparation of hydroxyapatite from animal bone.
Cracow University of Technology, Cracow, Poland
- William D. Callister, Jr. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING AN INTRODUCTION
สืบค้นเมื่อวันที่ 12 สิงหาคม 2554, จาก <http://tinyurl.com/3gglead>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Weiner, S. and Wagner, H. D. (1998). "The materials bone : structure - mechanical function Relations". Annual Review of Meterials Science, 28 : 271-298.

Yasuda, H. et al. (2000). "Microstructure and mechanical property of synthesized hydroxyapatite prepared by colloidal process. Biomaterials, 21(20) : 2045-2049.

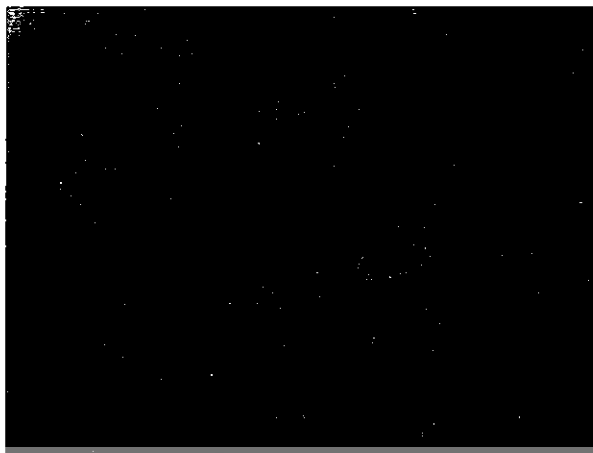




ภาคผนวก ก

ลักษณะผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

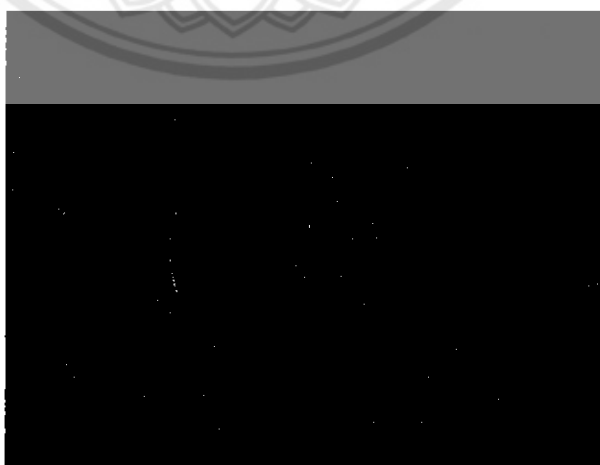
รูปที่ ก.1 กระดูกวัวที่ผ่านการต้มเป็นเวลา 48 ชม.



รูปที่ ก.2 ขั้นตอนการนำกระดูกวัวไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C



รูปที่ ก.3 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว



รูปที่ ก.4 ขั้นตอนการโกร่งไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว



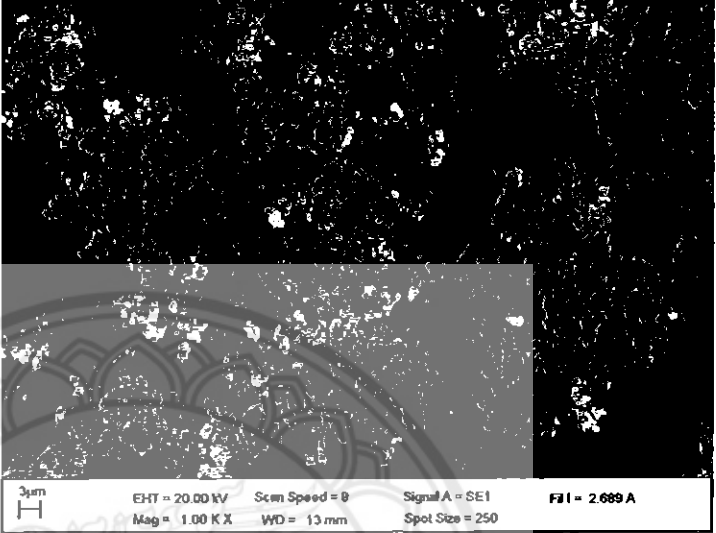
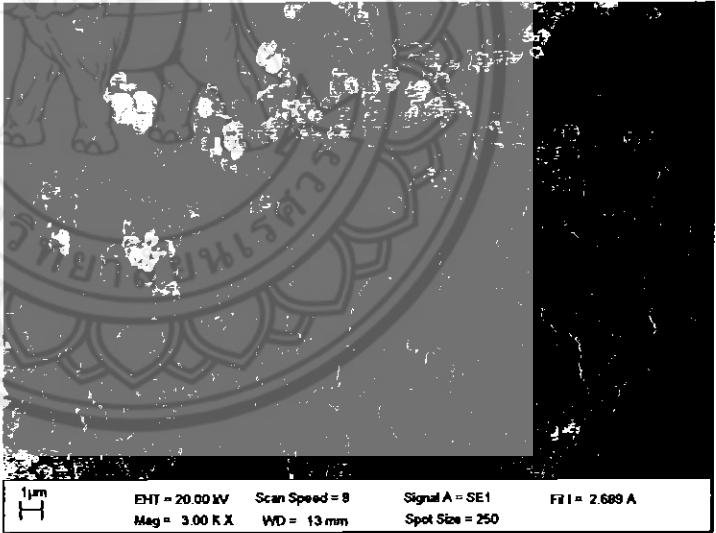
รูปที่ ก.5 ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว



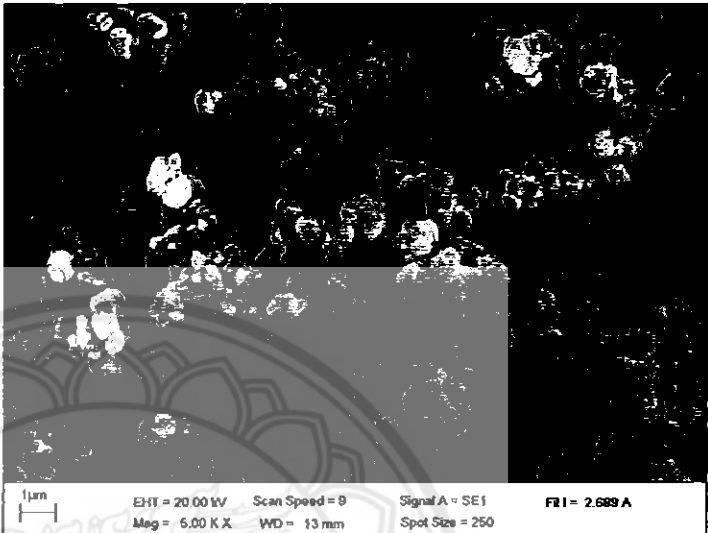
ภาคผนวก ข
ลักษณะสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่
กำลังขยายต่างๆ



ตารางที่ ข ลักษณะสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่กำลังขยาย
ต่างๆ

กำลังขยาย	ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว
1000x	
3000x	

ตารางที่ ข (ต่อ) ลักษณะสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่กำลังขยายต่างๆ

กำลังขยาย	ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว
5000x	

ภาคผนวก ค

แรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ได้
จากการทดสอบความต้านทานแรงกดโดยเครื่อง Universal Testing Machine



ตารางที่ ค แรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตจาก
การทดสอบความต้านทานแรงกดโดยเครื่อง Universal Testing Machine

อัตราส่วน ระหว่างไฮดรอก ซีอะพาไทต์กับ พอลิเมทิลเม ทาคริเลต	ชั้นงาน ชั้นที่	ขนาดเส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (mm.)	ความสูง (mm.)	แรงกด (N)	แรงกด เฉลี่ย (N)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
90 : 10	1	-	-	-	-	-
	2	-	-	-		
	3	-	-	-		
	4	-	-	-		
	5	-	-	-		
80 : 10	1	6.00	12.08	217.404	219.38	10.00
	2	6.00	12.13	224.180		
	3	6.00	12.09	216.918		
	4	6.00	11.88	205.66		
	5	6.00	12.04	232.74		
70 : 30	1	6.00	12.03	337.5	321.86	9.46
	2	6.00	12.10	316.43		
	3	6.00	12.03	317.38		
	4	6.00	12.00	323.85		
	5	6.00	12.07	314.13		
60 : 40	1	6.00	12.07	216.97	214.13	6.25
	2	6.00	12.01	217.43		
	3	6.00	12.23	203.7		
	4	6.00	12.02	213.17		
	5	6.00	12.03	219.37		
50 : 50	1	6.00	12.10	126.6	130.92	8.092
	2	6.00	12.13	140.4		
	3	6.00	12.06	133.68		
	4	6.00	12.00	119.39		
	5	6.00	12.15	134.51		

ภาคผนวก ง

ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเม-
ทิลเมทาคริเลตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงกดโดยเครื่อง

Universal Testing Machine



ตารางที่ ง ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเม-
ทิลเมทาคริเลตที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงกดโดยเครื่อง Universal

Testing Machine

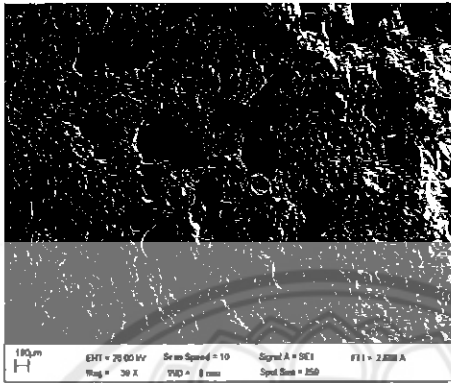
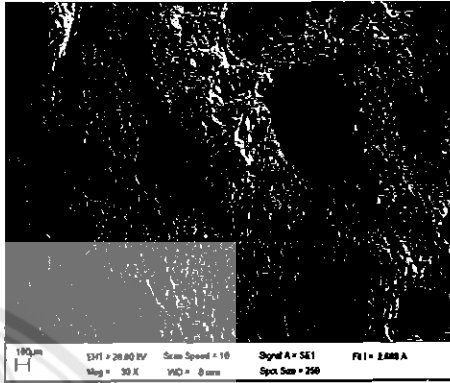
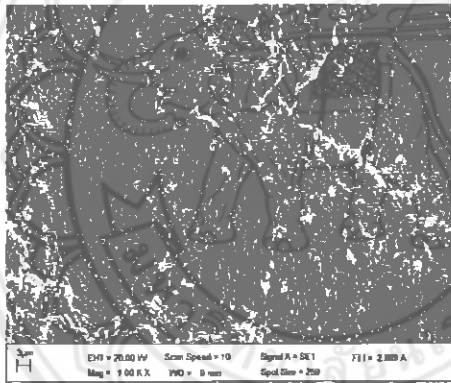
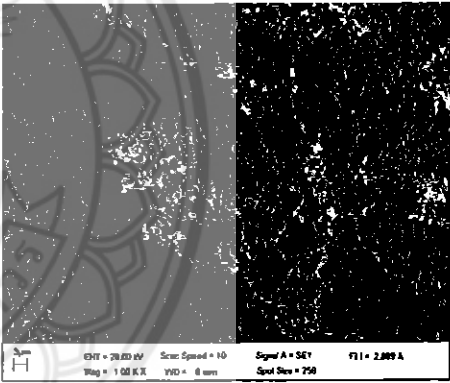
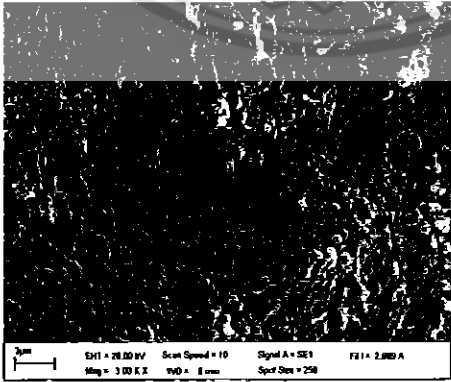
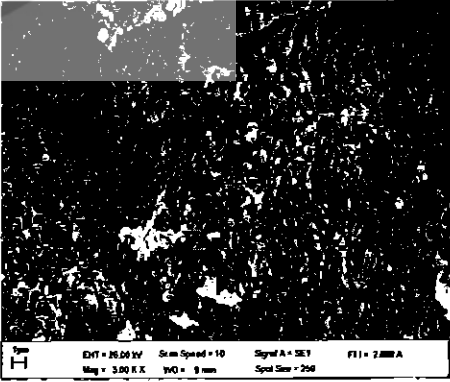
อัตราส่วน ระหว่างไฮดรอก ซีอะพาไทต์กับ พอลิเมทิลเม ทาคริเลต	ชิ้นงาน ชิ้นที่	ขนาดเส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (mm.)	ความสูง (mm.)	ความ ต้านทาน แรงกด (MPa)	ความ ต้านทาน แรงกดเฉลี่ย (MPa)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
90 : 10	1	-	-	-	-	-
	2	-	-	-		
	3	-	-	-		
	4	-	-	-		
	5	-	-	-		
80 : 10	1	6.00	12.08	7.69	7.76	0.35
	2	6.00	12.13	7.93		
	3	6.00	12.09	7.67		
	4	6.00	11.88	7.27		
	5	6.00	12.04	8.23		
70 : 30	1	6.00	12.03	11.94	11.38	0.33
	2	6.00	12.10	11.19		
	3	6.00	12.03	11.23		
	4	6.00	12.00	11.45		
	5	6.00	12.07	11.11		
60 : 40	1	6.00	12.07	7.67	7.57	0.22
	2	6.00	12.01	7.69		
	3	6.00	12.23	7.20		
	4	6.00	12.02	7.54		
	5	6.00	12.03	7.76		
50 : 50	1	6.00	12.10	4.48	4.63	0.29
	2	6.00	12.13	4.97		
	3	6.00	12.06	4.73		
	4	6.00	12.00	4.22		
	5	6.00	12.15	4.76		

ภาคผนวก จ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิล-
เมทาครีเลตในอัตราส่วน 70:30 และ 50:50 ที่กำลังขยาย 30,1000,3000,5000 เท่า



ตารางที่ จ ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วน 70:30 และ 50:50 ที่กำลังขยาย 30,1000,3000,5000 เท่า

กำลังขยาย	อัตราส่วนระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต	
	70:30	50:50
30x		
1000x		
3000x		

ตารางที่ จ (ต่อ) ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิ-
เมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วน 70:30 และ 50:50 ที่กำลังขยาย 30,1000,3000
,5000 เท่า

กำลังขยาย	อัตราส่วนระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต	
	70 : 30	50 : 50
5000x	