



ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นสูงและไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว
STUDYING MACHANICAL PROPERTIES OF HIGH DENSITY
POLYETHYLENE AND HYDROXYAPATITE FROM ANIMAL BONE



นายณรงค์ศักดิ์ เรืองสุข รหัส 51362305
นายคนต์ ยอดด้วง รหัส 51362312

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... ๑๐ ก.ค. ๒๕๕๕
เลขทะเบียน..... ๑๘๑๔๕๕๘๖
เลขเรียกหนังสือ..... ๗๕
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๗๒๒๑ ๗

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา ๒๕๕๔



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความ
หนาแน่นสูงและไฮดรอกซีอะพาไทด์จากกระดูกวัว

ผู้ดำเนินโครงการ นายณรงค์ศักดิ์ เรืองสุข รหัส 51362305
 นายดนต์ ยอดดวง รหัส 51362312

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชั้นสัมฤทธิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2554

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชั้นสัมฤทธิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

.....กรรมการ
(อาจารย์ทศพล ตีร์จุฑาภาพงศ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว
ผู้ดำเนินโครงการ	นายณรงค์ศักดิ์ เรืองสุข รหัส 51362305 นายดนต์ ยอดด้วง รหัส 51362312
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite: HA) ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว โดยทำการศึกษารูปร่างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิคการกระตุ่นสารพลังงานแสงช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Spectrometry: FTIR) และสัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) พบว่าลักษณะของรูปร่างจะมีรูปแบบ XRD pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตรงกันกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ของแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากแฟ้มข้อมูล JCPDS 74-0565 หมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับช่วงคลื่นของฟังก์ชันนัลกรุปที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดมาตรฐานของไฮดรอกซีอะพาไทต์ และลักษณะสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์พบว่าเป็นผลึกที่รูปร่างค่อนข้างกลม มีการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก และศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยังส์ มีแนวโน้มลดลง เมื่อการเพิ่มปริมาณของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากทำให้เกิดให้การกระจายตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ไม่ดี และไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การส่งผ่านแรงได้ลดลงในส่วนการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่บริเวณผิวรอยแตกพบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์มีการกระจายตัวทั่วเนื้อพื้นเป็นอย่างดี จะทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูง และผงไฮดรอกซีอะพาไทต์มีการกระจายตัวไม่ดี และมีการเกาะกลุ่มของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ทำให้เกิดความเค้นสะสมบนชิ้นงาน ทำให้เกิดข้อบกพร่อง และส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันรัมย์ฤทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ปิยะนันท์ บุญพยัคฆ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ตลอดจนแนะนำวิธีการในการแก้ปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา จนสามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ และอาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชูลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตตภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ รวมไปถึงการแนะนำใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้ทำผู้ทำโครงการจนงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาเผา เตาอบ เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว เครื่องตัดเม็ดพลาสติก เครื่องฉีดพลาสติก เครื่องทดสอบแรงดึง และเครื่องมือต่างๆ ภายในอาคาร

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่าย และให้กำลังใจจนสามารถศึกษาทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อน และน้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการ

นายณรงค์ศักดิ์ เรืองสุข

นายดนต์ ยอดดั่ง

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการ และเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (OUTPUT).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (OUTCOME).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 หลักการเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบ.....	4
2.2 วัสดุชีวภาพ.....	8
2.3 หลักการเกี่ยวกับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	9
2.4 หลักการเกี่ยวกับพอลิเมอร์.....	12
2.5 กระบวนการขึ้นรูป.....	14
2.6 การวิเคราะห์สมบัติของไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	23
3.1 สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในโครงการ.....	23
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงการ.....	24
3.3 วิธีการทดลอง.....	26
3.4 วิธีการทดสอบ.....	27
3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	29
3.6 สรุปผลการทดลอง.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์	30
4.1 ผลการศึกษาภูมิภาค หมูฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว	30
4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีน ชนิด ความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว.....	34
บทที่ 5 บทสรุปผลโครงการ.....	38
5.1 สรุปผล.....	38
5.2 ปัญหา และการแก้ไข.....	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก ก.....	41
ภาคผนวก ข.....	44
ภาคผนวก ค.....	46
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	49

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ.....	3
2.1 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	12
2.2 แสดงช่วงคลื่นของฟังก์ชันัลกรุปที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดของไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	18
3.1 แสดงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เกรด H5818J.....	23
3.2 อัตราส่วนระหว่าง HA : HDPE.....	26
3.3 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้สมด้วยของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว.....	26
3.4 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปของเครื่องอัดฉีดขึ้นรูป.....	27
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของผง HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิคFTIR.....	32
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของผง HA ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	33



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกกลุ่มของวัสดุเชิงประกอบ.....	5
2.2 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์	10
2.3 แสดงภาพถ่ายตามแนวแกน C	10
2.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสกับสมบัติเชิงกล	12
2.5 แสดงลักษณะสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นแบบเส้นตรง	13
2.6 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันของโครงสร้างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	14
2.7 กระบวนการ อัดรีตขึ้นรูป (Extrusion Molding Machine).....	15
2.8 เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine).....	15
2.9 เทคนิคของกล้องจุลทรรศน์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD).....	17
2.10 แสดงการทำงานของกล้อง (Scanning Electron Microscope: SEM).....	19
2.11 ลักษณะของขั้นตอนสอบบริเวณที่จับ และบริเวณการยึดออก	20
3.1 แผนการดำเนินงานในโครงการ.....	25
3.2 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง และรูปชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	28
4.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวโดยเปรียบเทียบกับแบบจาก เพิ่มข้อมูล JCPDS หมายเลข 74-0565	30
4.2 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวโดย ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	31
4.3 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	31
4.4 สัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	34
4.5 กราฟความสัมพันธ์ด้านสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	35
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ด้านสมบัติด้านร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบ ระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	35
4.7 กราฟความสัมพันธ์สมบัติด้านมอดุลัสของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่ อัตราส่วนต่างๆ.....	36
4.8 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่กำลังขยาย 5000 เท่า	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการ และเหตุผล

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุ ได้แก่ โลหะ พอลิเมอร์ และเซรามิกได้ถูกออกแบบ และพัฒนาสมบัติต่างๆ มากมาย เช่น สมบัติความแข็ง ทนความร้อน ทนแรงกระแทก และทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ซึ่งใช้ในงานทางวิศวกรรม และยังรวมไปถึงงานที่ใช้ในทางการแพทย์อีกด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ต่างก็มีข้อจำกัดแตกต่างกันไป ดังนั้นการนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้งานจึงส่งผลให้ได้สมบัติทางกลที่ไม่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่แท้จริง เพราะฉะนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุเหล่านี้ให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยนำไปทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ หรือคอมโพสิต (Composite Materials)

วัสดุเชิงประกอบ หรือคอมโพสิต (Composite Materials) หมายถึง วัสดุที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน 2 ชนิดขึ้นไปมารวมอยู่ด้วยกัน โดยทั่วไปในทางวิศวกรรม หรือวัสดุศาสตร์ เราจะเรียกว่า วัสดุเชิงประกอบ เป็นวัสดุที่มีความนิยม และใช้งานอย่างมาก มีการใช้งานทั้งในด้านโครงสร้าง และการรับแรงต่างๆ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีสมบัติทางกลที่ดีหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูง และน้ำหนักเบา โดยในปัจจุบันนี้ทางการแพทย์นิยมใช้วัสดุเชิงประกอบ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชีวภาพเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบจะนำข้อดีของเฉพาะไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite: HA) ซึ่งเป็นอนุภาคเซรามิกอย่างหนึ่ง มีสูตรทางเคมีคือ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นแร่ธาตุ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในกระดูก และฟันจึงเป็นสารที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในร่างกาย แต่เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์มีข้อเสียคือ มีความเปราะสูง มีความแข็งต่ำ และยืดหยุ่นได้น้อย (สิทธิพร, 2554) จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในการรับแรงหรือรับน้ำหนักมากๆ ดังนั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์ จึงไม่เหมาะกับการมาซ่อมแซมกระดูกในส่วนที่รับน้ำหนักมากๆ ได้ เช่น กระดูกแขน และขา เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติแรงดึงของไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยการนำพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่ดีมารวมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ เพื่อให้เป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่น่านำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์หลายชนิด เนื่องจากมีสมบัติที่แข็งแรง มีความเหนียว ความยืดหยุ่น ทนสารเคมีได้ดี จึงนำมาใช้เป็นเนื้อพื้นในวัสดุเชิงประกอบ เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์เพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine) เพื่อให้ได้เป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติความยืดหยุ่นสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาภูมิภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

วัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัวที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 ลักษณะวัสดุภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

1.4.2 สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ตัวแปรควบคุม

1.5.1.1 วัสดุดิบ

ก. ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite: HA) ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

ข. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE)

เกรด H5818J

1.5.1.2 กระบวนการผลิต

กระบวนการการขึ้นรูปของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัวด้วยวิธีการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Molding Machine) และวิธีการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine)

1.5.2 ตัวแปรที่ต้องศึกษา

ปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่อัตราส่วน เท่ากับ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก

1.5.3 ศึกษาวัสดุภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

1.5.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 หลักการเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบ

2.1.1 ความหมายของวัสดุเชิงประกอบ

คำว่าวัสดุเชิงประกอบหมายถึง สิ่งที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน 2 ส่วนขึ้นไป โดยทั่วไปแล้วในทางวิศวกรรม หรือวัสดุศาสตร์เราใช้คำว่า วัสดุเชิงประกอบ กับวัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่แตกต่างกัน และมีสมบัติที่เป็นผลมาจากสมบัติของแต่ละองค์ประกอบมารวมกัน วัสดุเชิงประกอบมีหลากหลายประเภทด้วยกัน เราสามารถเลือกใช้วัสดุประเภทต่างๆ เข้ามาประกอบร่วมกันเป็นวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ ไม่ว่าจะเป็นพอลิเมอร์ร่วมกับเซรามิก โลหะกับโลหะ พอลิเมอร์กับโลหะ ตัวอย่างที่เห็นได้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ พลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว ที่ใช้ผลิตเป็นหลังคา รถบรรทุก และอ่างอาบน้ำ

วัสดุเชิงประกอบหรือคอมโพสิต (Composite Materials) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยม และมีการใช้งานอย่างมาก วัสดุเชิงประกอบจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering materials) ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุโครงสร้าง และรับแรง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงมีความแข็งแรงเฉพาะ (Specific Strength) สูง และมีค่ามอดูลัสเฉพาะ (Specific Modulus) สูง

2.1.2 องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบมีองค์ประกอบสองส่วน หรือมากกว่าสองส่วน ที่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดสามารถอยู่ด้วยกัน (Distinct components) ซึ่งแต่ละองค์ประกอบจะมีความแตกต่างทั้งทางกายภาพ และทางเคมี องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่

2.1.1.1 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุประกอบ วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรง และมอดูลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fibers) หรืออนุภาคเซรามิกที่เรียกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นต้น ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุเชิงประกอบ เป็นองค์ประกอบที่ไม่มีความต่อเนื่อง (Discontinuous phase)

2.1.1.2 เนื้อพื้น (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่ง และการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบ และปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น เป็นต้น โดยในพวกพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ซึ่งมักมีความแข็งแรง และมอดูลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เนื้อพื้นเป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง

2.1.3 การแบ่งชนิดของวัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรงสามารถแบ่งชนิดของวัสดุเชิงประกอบได้ดังนี้

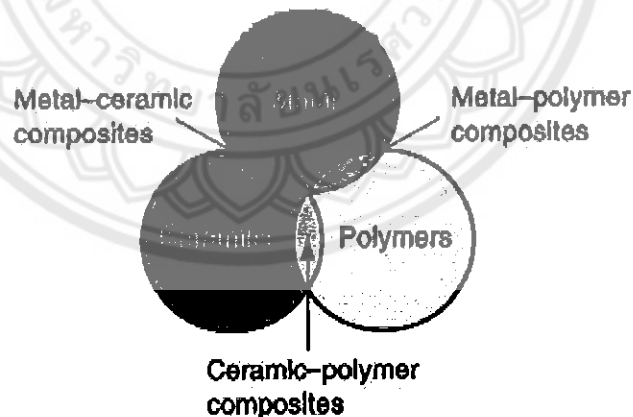
2.1.3.1 วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ วัสดุประกอบที่เสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) เส้นใยสั้น (Short fibers) หรือเส้นใยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรง และมอดุลัสสูง ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2.1.3.2 วัสดุประกอบแบบแผ่น หรือลามิเนต (Laminate composites) คือ วัสดุประกอบที่ประกอบด้วยชั้น หรือแผ่นวัสดุที่ยึดติดกันเชื่อมต่อกันด้วยกาวมีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแซนวิช (Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

2.1.3.3 วัสดุประกอบแบบอนุภาค (Particulate composites) คือ วัสดุประกอบที่มีส่วนเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)

2.1.4 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เนื้อพื้น และส่วนเสริมแรง ดังนั้นถ้าจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเนื้อพื้นสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic Matrix Composite, CMC) วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite, PMC) และวัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix Composite, MMC) ซึ่งสมบัติทางเคมี ทางกายภาพของวัสดุเหล่านี้มีความแตกต่างกัน ทำให้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหล่านี้ มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 การจำแนกกลุ่มของวัสดุเชิงประกอบ
ที่มา : มนัส (2541)

2.1.4.1 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic Matrix Composite) เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก เซรามิกจึงนำมาใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูง และในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียของเซรามิก คือ เปราะ และแตกหักง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้ง่าย การเสริมแรงให้กับเนื้อพื้นของเซรามิกเป็นการ

ปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียว และทนทานมากขึ้น วัสดุเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยวัสดุเสริมแรงเนื่องจากสมบัติที่เรียกว่า ความเหนียวแบบเทียม (Pseudo ductile) สำหรับเนื้อพื้นเซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะและแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังนั้น การใส่วัสดุเสริมแรงเข้าไปจะทำให้วัสดุเชิงประกอบเซรามิกที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น วัสดุเสริมแรงที่ใช้ในการเสริมแรงอาจอยู่ในรูปของอนุภาค เส้นใย หรือวิสเกอร์ ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ และคาร์บอน เป็นต้น และสำหรับเนื้อพื้นของเซรามิก ได้แก่ ซีเมนต์ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ และพอลิเมอร์ เป็นต้น

2.1.4.2 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite) โดยธรรมชาติ พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้ โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่ในการรับ และกระจายแรงกระทำโดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้อ่อนตัวของพอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง

สำหรับเนื้อพื้นของพอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเนื้อพื้นเทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) และเนื้อพื้นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห มีสมบัติแข็งเปราะ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล หรือการบ่มแล้วจะเกิดการคงรูป และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ส่วนเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้น หรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว มีสมบัติเหนียว และทนทานต่อสิ่งแวดล้อม พฤติกรรมเชิงความร้อนนี้จะมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบสำหรับเนื้อพื้นเทอร์โมเซตติงการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจะเป็นการผสมสารเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ ก่อนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแห และหลังจากที่ปฏิกิริยาสิ้นสุดวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการคงรูปซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ในขณะที่การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบที่เนื้อพื้นเป็นเทอร์โมพลาสติกนั้นจะใช้หลักการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว และขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยถ้าหลังจากคงรูปแล้วได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเนื้อพื้นก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก การที่จะเลือกใช้เนื้อพื้นชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

2.1.4.3 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix Composite) วัสดุเชิงประกอบโลหะได้พัฒนาขึ้น เพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะ อะลูมิเนียม และไทเทเนียม ที่เป็นเนื้อพื้นของโลหะที่ต้องการให้มีสมบัติพิเศษในการใช้งานในอุตสาหกรรมอวกาศยาน สารเสริมแรงอาจอยู่ในลักษณะของอนุภาคเส้นใย หรือวิสเกอร์ก็ได้ นอกจากนี้ สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิ สูงมากในการขึ้นรูป และสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเนื้อพื้นของโลหะ จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้สารเสริมแรงอินทรีย์ และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเนื้อพื้นของโลหะได้ สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิก หรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น

ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น การเสริมแรงเป็นการทำให้เนื้อพื้นของโลหะมีความทนทานต่อความล้าสูงชันมาก และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อีกทั้งความหนาแน่นของสารเสริมแรงที่น้อยกว่าโลหะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง รวมไปถึงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient temperature expansion, CTE) ลดลง เพราะสารเสริมแรงเป็นเซรามิกจึงมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่าโลหะ ส่วนกรณีที่สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใยยาว วัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีความแข็งแรงสูงชันมากอีกด้วย โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ สารเสริมแรงที่เติมเข้าไปจะเป็นการปรับปรุงสมบัติของเนื้อพื้นของโลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานก็ยังมีข้อจำกัดอยู่เนื่องจากมีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูงมาก

โดยในโครงการนี้เป็นการศึกษาวัสดุเชิงประกอบที่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นเนื้อพื้น และมีไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นส่วนเสริมแรง โดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีลักษณะเป็นอนุภาค ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม

2.1.5 วัสดุชีวภาพจำพวกวัสดุเชิงประกอบ

ในทางการแพทย์เนื้อเยื่อของมนุษย์ เช่น กระดูก เอ็นยึด ผิวน้ำหนัง อาจถือได้ว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบประเภทหนึ่ง เนื่องจากประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่แตกต่างกันทั้งในระดับโมเลกุล และระดับโครงสร้างจุลภาค ดังนั้นการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบในทางการแพทย์ก็อาศัยเหตุผลที่ว่าวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียวยังมีสมบัติที่ไม่เหมาะสม หรือไม่เพียงพอต่อการใช้งานตามความต้องการ จึงต้องมีการนำเอาวัสดุหลายประเภทมารวมเข้าด้วยกัน เพื่อนำเอาข้อดีของวัสดุแต่ละประเภทมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน ซึ่งกระดูกที่เป็นวัสดุเชิงประกอบทางธรรมชาติประกอบด้วยแร่ธาตุประมาณร้อยละ 60 เนื้อพื้นร้อยละ 30 และน้ำร้อยละ 10 กระดูกก็เป็นที่อยู่ของเนื้อเยื่อ ซึ่งเนื้อเยื่อมีประมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของกระดูก เนื่องจากอยู่ภายในกระดูก เนื้อพื้นในกระดูกจะมีส่วนประกอบของคอลลาเจนชนิดที่จัดเรียงตัวกันตามแนวราบ และเป็นโครงสร้างที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางซึ่งส่วนประกอบอินทรีย์ของกระดูกนี้ จะความโดดเด่นในเรื่องของการรับแรงความต้านทานแรงดึงให้กับกระดูก ส่วนประกอบของแร่ธาตุในกระดูกจะอยู่ในรูปของแคลเซียมฟอสเฟตที่รู้จักกันในชื่อไฮดรอกซีอะพาไทต์

องค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์คล้ายคลึงกับเฟสในกระดูกของมนุษย์มีความสามารถในการเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับร่างกาย (Biocompatibility) และมีความสามารถในการตอบสนองแบบว่องไวทางชีวภาพสูง สมบัติของวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับโดยให้ความสนใจกับสมบัติของทั้งเนื้อพื้น และการเสริมแรง สัดส่วนโดยปริมาณของเฟสที่ไม่ต่อเนื่องกัน ขนาด และรูปร่างของอนุภาคเส้นใยบางชนิด และการเรียงตัวของตัวมันเอง (Evans, 1998)

ซึ่งวัสดุชีวภาพที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ วัสดุเชิงประกอบระหว่างเซรามิกกับ พอลิเมอร์ โดยมีไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นส่วนเสริมแรง และมีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นเนื้อพื้น วัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้นกำลังมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง สำหรับการนำไปใช้ในทางการแพทย์ที่หลากหลาย เช่น การเคลือบวัสดุเพื่อใช้งานบริเวณที่ต้องการรับน้ำหนัก ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้นให้กับวัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพ เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิเมทิลเมทาไครเลต พอลิซิลิโพนต พอลิอิเทอร์อีเทอร์คิ-

โตน และอีพอกซี งานวิจัยส่วนมากที่มักใช้ทำวัสดุเชิงประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ใช้พอลิแลกติกแอซิก พอลิไกลคอลิกแอซิด และโคพอลิเมอร์ของตัวเอง

2.2 วัสดุชีวภาพ

2.2.1 ความหมายของวัสดุชีวภาพ

วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) หมายถึงวัสดุที่สามารถใช้แทนส่วนหนึ่งส่วนใดของเนื้อเยื่อในอวัยวะ ในร่างกายมนุษย์ที่เสื่อมสภาพโดยไม่เกิดปฏิกิริยาจากร่างกายมนุษย์ วัสดุชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัสดุทั่วไปไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบ หรือสารกึ่งตัวนำ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทำงานร่วมกับกระบวนการชีวภาพในร่างกาย ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเทคโนโลยีทางการแพทย์มีการพัฒนารุดหน้าไปมากนอกเหนือจากการรักษาโรคต่างๆ เพื่อเยียวยา และยืดชีวิตแล้วเทคโนโลยีทางการแพทย์ยังมีบทบาทช่วยสนับสนุนการดำรงชีวิตของเราทุกคน ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ การสร้างอวัยวะเทียม การปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ รวมไปถึงอุปกรณ์ และวัสดุต่างๆ ที่ใช้กับร่างกาย เช่น เข็มฉีดยา วัสดุอุดฟัน และท่อขยายหลอดเลือด เป็นต้นทั้งนี้การพัฒนาต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีวัตถุประสงค์เดียวกันคือ เพื่อตอบสนองความต้องการพื้นฐานของมนุษย์ที่ต้องการจะมีชีวิตที่ยืนยาว และสามารถดำรงชีวิตได้อย่างเป็นปกติ (บรรลักษ์ณ์, 2553)

2.2.2 สมบัติของวัสดุชีวภาพ

2.2.2.1 Biocompatibility หมายถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อกระดูก ซึ่งจะทำให้มีการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อกระดูกผสมผสานเข้าไปในสารทดแทนกระดูกจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา

2.2.2.2 Biodegradability หมายถึงความสามารถในการสลายตัวด้วยกลไกในร่างกาย ซึ่งทำให้สารทดแทนกระดูกที่ใช้ค่อยๆ ถูกกำจัดออกไปจากตำแหน่งที่ใส่หลังจากมีการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อกระดูกเข้าไปแทนที่แล้วจนในที่สุดแล้ว สารทดแทนที่ดีควรจะสลายและกำจัดออกไป

2.2.2.3 Functionability หมายถึงความสามารถในการทดแทนอวัยวะภายในร่างกาย โดยความสามารถนี้จะบ่งชี้ และฟื้นฟูสภาพของร่างกาย

2.2.2.4 Osteoinductive capability หมายถึงความสามารถในการเหนี่ยวนำเนื้อเยื่อกระดูกโดยรอบมีการเจริญเติบโตเข้าไปในสารทดแทนกระดูกที่ใช้โดยความสามารถนี้เป็นจุดสำคัญจุดหนึ่งที่เป็นที่ต้องการ

2.2.2.5 Bioinert หมายถึงสารที่มีความเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นโดยง่าย สมบัติข้อนี้จะทำให้ความสามารถผสมผสานอื่นที่จำเป็น เช่น ยาปฏิชีวนะเข้ากับสารทดแทนแล้วไม่เกิดปฏิกิริยา

2.2.2.6 Manufacturability หมายถึงการผลิต และการเตรียม มีขั้นตอนที่ง่าย สามารถทำรูปแบบหรือขนาดได้ตามความต้องการ และสามารถเก็บไว้ได้นาน เป็นสมบัติปลีกย่อยในการคัดเลือกวัสดุทดแทน

2.2.3 หมวดหมู่ของวัสดุชีวภาพ

อย่างไรก็ตาม จากการทำหน้าที่ต่างๆ เพื่อทดแทนคุณสมบัติของอวัยวะในร่างกายนี้เอง เราจึงได้แบ่งวัสดุชีวภาพออกเป็นหมวดหมู่ต่างๆ ได้แก่

2.2.3.1 วัสดุชีวภาพที่ทำหน้าที่เชิงกล หรือรองรับแรงกลที่เกิดจากกิจกรรมของร่างกาย

2.2.3.2 วัสดุชีวภาพที่ทำหน้าที่ปรับสมดุลต่างๆ ของของเหลวในร่างกาย

2.2.3.3 วัสดุชีวภาพที่ทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้า เพื่อควบคุมการทำงานของร่างกาย

2.2.3.4 วัสดุชีวภาพที่ทำหน้าที่เติมเต็มในช่องว่างเช่น วัสดุอุดฟัน กระดูกเทียม หรือสารหล่อลื่นเทียมที่ใช้กับข้อต่อ เป็นต้น

2.2.3.5 วัสดุชีวภาพที่ทำหน้าที่ส่งผ่านแสง หรือเสียง เช่น คอนแทกต์เลนส์ และเยื่อแก้วหูเทียม เป็นต้น

2.3 หลักการเกี่ยวกับไฮดรอกซีอะพาไทต์

2.3.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์

2.3.1.1 ความหมายของไฮดรอกซีอะพาไทต์

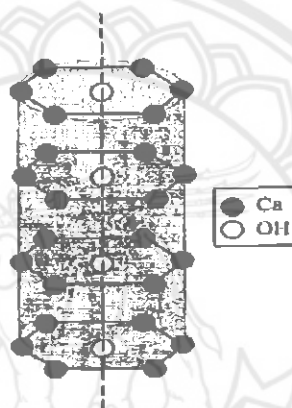
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite : HA) เป็นสารประกอบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งมีทั้งประจุบวก และประจุลบบนผิวโมเลกุลเดียวกัน มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นแคลเซียมฟอสเฟตไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์เป็นปริมาณสารสัมพันธ์ และมีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ประกอบด้วย Ca^{2+} , PO_4^{3-} และ OH^- ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ชีวภาพที่พบได้ในสิ่งมีชีวิต และตามแหล่งธรรมชาติทั่วไป และยังสามารถเตรียมได้ง่าย โดยปฏิกิริยาเคมีจากสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมฟอสเฟตจากปะการังโดยนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ แต่ปะการังมีปริมาณน้อย และเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจึงไม่นิยมนำมาใช้ จึงเปลี่ยนเป็นการเตรียมจากกระดูกสัตว์แทน เช่น วัว กระบือ ช้าง ปลา สุนัข รวมทั้งจากมนุษย์ โดยมากนิยมใช้กระดูกโค และกระดูกมากกว่า เนื่องจากมีปริมาณมาก และเป็นสัตว์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์อยู่แล้ว ทั้งการใช้แรงงาน และการบริโภค

ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นชีววัสดุที่เร่งปฏิกิริยาการสร้างเนื้อเยื่อ (Bioactive Material) นิยมนำมาผลิตกระดูกเทียม รากฟันเทียม เพราะสามารถเร่งการสร้างเซลล์กระดูก และเซลล์เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective Tissue) ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างวัสดุปลูกถ่าย และเนื้อเยื่อประสานกัน อย่างรวดเร็ว และแข็งแรง โดยเฉพาะวัสดุชนิดพรุน ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่า 100-150 ไมครอน เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้เลือด และสารเคมีที่จำเป็นในการสร้างเนื้อเยื่อสามารถผ่านเข้าออกได้ดีช่วยย่นระยะเวลาในการรักษาให้ลดลงได้ ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงมีการพัฒนานำสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ มาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน โดยเฉพาะการใช้เป็นสารทดแทนกระดูก หรือใช้เป็นสารดูดซับ และแยกอนุภาคที่มีประจุ

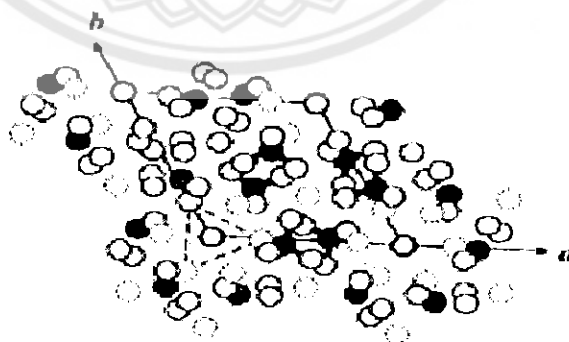
2.3.1.2 โครงสร้าง และสมบัติทางเคมีของไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ประกอบด้วยไอออนที่คล้ายคลึงกันกับในโครงสร้างกระดูก และฟัน ไฮดรอกซีอะพาไทต์แสดงถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะในเนื้อเยื่อแข็งเท่านั้น แต่ยังสามารถเข้ากับเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม เช่น ผิวหนัง และกล้ามเนื้อ นอกจากนั้นยังเป็นสื่อทำให้เกิดการขยายตัวของเซลล์กระดูกเมื่อนำไปปลูกฝังภายในเนื้อกระดูก ไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์เป็น

ปริมาณสารสัมพันธ์ และมีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ประกอบด้วย Ca^{2+} , PO_4^{3-} และ OH^- มีสัดส่วนต่อโมลของ Ca : P เป็น 1.67 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์ แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยมี Ca^{2+} บรรจุอยู่ภายในผลึกรูปแท่ง และมี OH^- ล้อมรอบอยู่ด้านข้าง โครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ อยู่ในระบบของผลึกเฮกซะโกนอล ด้วยกลุ่มช่องว่างลักษณะเฉพาะของการจัดเรียงตัวตามระนาบแกน c ในแนวตั้งถึงระนาบแกน a เสมอเป็นแนวเดียวกันทั้ง 3 ระนาบทำมุมกัน 120 องศาเท่ากัน และมีขนาดของหน่วยเซลล์ ($a=9.441$ อังสตรอม, $c=6.882$ อังสตรอม) ในแต่ละระนาบของหน่วยเซลล์ที่มีขนาดเล็กที่สุดมารวมตัวกันจนเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ตามตำแหน่งของหน่วยเซลล์แคลเซียมอะตอมทั้งหมด 10 อะตอมสามารถแยกเป็น 2 ประเภทคือ Ca^1 และ Ca^2 หรือ OH^- แคลเซียมอะตอม 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง Ca^1 ซึ่งวางอยู่ตรงตำแหน่งของออกตะฮีดรัล แคลเซียม (ส่วนบริเวณตรงกลาง) ในทิศทางแนวตั้งของผลึกเฮกซะโกนอล อะตอม 6 ตัวอยู่ที่ตำแหน่ง Ca^2 หรือค่า OH^- ซึ่งวางอยู่ที่มุมของผลึกเฮกซะโกนอล



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์
ที่มา : Weiner (1998)



รูปที่ 2.3 แสดงภาพฉายตามแนวแกน C
ที่มา : Weiner (1998)

2.3.2 การสังเคราะห์วัสดุผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นสามารถเตรียมได้จากสามแหล่ง คือ

2.3.2.1 จากสารเคมี เช่น แคลเซียมไนเตรต และแอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้น โดยสามารถทำโดยปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาการตกตะกอน เป็นต้น

2.3.2.2 จากปะการัง โดยนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ แต่ปะการังมีปริมาณน้อย และเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจึงไม่นิยมนำมาใช้

2.3.2.3 จากการให้ความร้อนสามารถเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยการให้ความร้อนแก่กระดูกสัตว์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอื่น เช่น กระดูกปลา กระดูกวัว ฟัน และกระดูกหมู หรือจากปะการัง เป็นต้น โดยมากจะนิยมใช้กระดูกวัว และกระดูกหมูมากกว่า เนื่องจากมีปริมาณมาก และเป็นสัตว์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์อยู่แล้วทั้งการใช้แรงงาน และการบริโภค การเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์มีหลายวิธี เช่น

ก. การเตรียมด้วยกระบวนการสกัดโดยใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤต (Subcritical water) เป็นการเตรียมปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ในหม้อนึ่งแรงดันสูง (Autoclave) และอบด้วยเตาไมโครเวฟ การสกัดโดยใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤต

ข. การเตรียมด้วยกระบวนการทางเบส (Alkaline hydrothermal hydrolysis) เป็นการเตรียมปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีนด้วยความร้อนโดยการเติมเบสเข้าช่วยเพื่อสกัดสารอินทรีย์ออกจากเนื้อของกระดูกสัตว์

ค. การเตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อน (Thermal decomposition) เป็นการเตรียมปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีนด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยการต้มด้วยน้ำที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ เพื่อเป็นการย่อยสลายโปรตีน ไขมัน หรือสารอินทรีย์ที่อยู่ในเนื้อกระดูกสัตว์

ง. หลังจากนั้นนำกระดูกที่ได้ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และนำไปบดละเอียด

2.3.3 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์

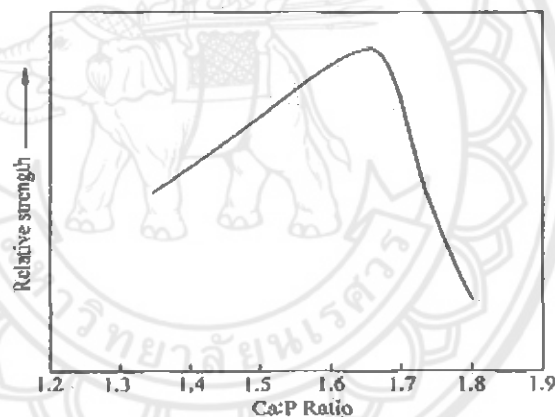
ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ส่วนมากจะสามารถเผาซินเตอร์ภายใต้ความดันต่างๆ ได้ และจะมีความหนาแน่นเข้าใกล้ทฤษฎีเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิในช่วง 1000-1200 องศาเซลเซียส เพราะเมื่อถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกรนเติบโตขึ้นอย่างผิดปกติ และการแตกตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง ซึ่งเมื่อใช้กระบวนการอัดด้วยความร้อน (Hot Pressing: HP), การอัดด้วยความดันทุกทิศทาง (Hot Isostatic Pressing: HIP) หรือการเผาโดยให้ความดันทุกทิศทาง (Hot postsintering) จะสามารถทำให้ลดอุณหภูมิของการเผาซินเตอร์ลงได้ ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงและทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความหนาแน่นสูง นั่นคือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์จะมีโครงสร้างทางจุลภาคที่ดี มีความเสถียรทางความร้อน ซึ่งทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีสมบัติเชิงกลที่ดีดังนี้ ค่าความทนทานต่อการดัดโค้ง (Bending Strength) ค่าความทนทานต่อการกด (Compressive Strength) ค่าทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) และค่ามอดูลัสของยังส์ (Young's Modulus: E) โดยค่าต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์

สมบัติเชิงกล	ค่า	หน่วย
ค่าความทนทานต่อการดัดโค้ง (Bending Strength)	38-250	MPa
ค่าความทนทานต่อการกด (Compressive Strength)	120-900	MPa
ค่าทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)	38-300	MPa
ค่ามอดูลัสของยังส์ (Young's Modulus: E)	35-120	GPa

ค่าความทนทานต่อการแตกหัก (Fracture Toughness, K_{Ic}) ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่บริสุทธิ์จะอยู่ในช่วง $0.8-1.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ โดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ $1.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ และจะลดลงเมื่อไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความพรุนตัวเพิ่มขึ้น

ซึ่งไฮดรอกซีอะพาไทต์มีอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P เพิ่มขึ้นความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น และจะมีความแข็งแรง โดยอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P จะเริ่มจากค่า 1.38 และอัตราส่วนจะเพิ่มขึ้น เส้นกราฟก็จะมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนค่าอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P เท่ากับ 1.67 ซึ่งเป็นค่าที่เสถียรที่สุด และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P มากกว่า 1.67 กราฟมีแนวโน้มลดลงแสดงถึงความเสถียรที่ต่ำลง และส่งผลให้ความแข็งแรงจะลดลง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสกับสมบัติเชิงกล
ที่มา : Yasuda (2000)

2.4 หลักการเกี่ยวกับพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ (Polymer) มาจากภาษากรีก 2 คำคือ polys แปลว่า หลาย หรือมาก และ meros แปลว่า ส่วน หรือหน่วย และหมายถึง สารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีมวลโมเลกุลมาก ประกอบด้วย หน่วยเล็กๆ ของสารเรียกว่ามอนอเมอร์ (Monomer) จะต้องมีหน่วยซ้ำกัน (Repeating unit) มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์

มอนอเมอร์ (Monomer) คือ โมเลกุลขนาดเล็กที่อยู่ซ้ำๆ กันในพอลิเมอร์ โครงสร้างไม่ซับซ้อน มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ที่ปลายทั้งสองข้างของโมเลกุล สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่เหมือนกัน หรือต่างกันได้

2.4.1 สมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติดีเด่นกว่าวัสดุอื่นที่ได้จากธรรมชาติ หรือจากการสังเคราะห์ขึ้นมาเอง เช่น ไม้ โลหะ แก้ว กระจก ที่นิยมกันเป็นอย่างมากมา ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์มีสมบัติหลายอย่างรวมกันในตัวของมันเอง และมีสมบัติสามารถใช้แทนวัสดุอื่นได้ดีกว่าวัสดุเดิม เช่น มีความแข็งแรง ทนความร้อน อ่อนนุ่ม ทนสารเคมี สามารถยืดตัวดี เหนียวทนทาน ทนการสึกกร่อน ใส กันน้ำ เบาลอยน้ำได้ ทำเป็นสีต่างๆ ได้ สมบัติทางกายภาพคือ มีความแข็งแรงเหนียวยืดหยุ่น สมบัติทางไฟฟ้าคือ เป็นฉนวนไฟฟ้า และสมบัติทางเคมีคือ สามารถทำต่อกรด ด่าง และสารเคมีอื่นๆ

2.4.2 ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา

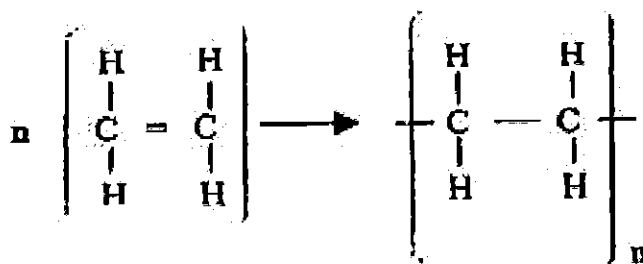
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ลักษณะสายโซ่โมเลกุลแบบเส้นตรง เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาว สายโซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ กิ่งก้านสาขาน้อยแสดงลักษณะสายโซ่แบบเส้นตรง แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง ทำให้โมเลกุลสามารถเข้าไปใกล้กันได้มากขึ้น ทำให้ความเป็นผลึก มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น จะทำให้มีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้ผิวแตกกรันได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนความร้อนได้สูงถึง 120 องศาเซลเซียส และทนต่อสารเคมีมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene: LDPE) ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นแบบเส้นตรง
ที่มา : แม้น (2541)

2.4.2.1 ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของโครงสร้างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

โมเลกุลเอทิลีนเกิดพันธะทางเคมีแบบพันธะคู่ (Double covalent bond) ระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับอีก 4 พันธะเดี่ยว (Single covalent bond) ของอะตอมไฮโดรเจน โมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอน โดยมีพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน และเมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้น จะทำให้พันธะคู่เปิดออก กลายเป็นพันธะเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.6 จะทำให้อะตอมของคาร์บอนมีอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ซึ่งพร้อมที่จะเกิดพันธะโควาเลนต์กับโมเลกุลอื่นๆ ที่มีอิเล็กตรอนอิสระเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้เอทิลีนมอนอเมอร์จึงเกิดพันธะโควาเลนต์เป็นพอลิเมอร์ หรือเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain polymerization) ได้พอลิเมอร์ของเอทิลีนเรียกว่า พอลิเอทิลีน



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของโครงสร้างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่มา : แม้น (2541)

2.4.2.2 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

- ก. จุดหลอมเหลวประมาณ 120-140 องศาเซลเซียส
- ข. มีความทนต่อแรงดึงสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene: LDPE)
- ค. เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี
- ง. ละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แต่ละลายน้อยที่อุณหภูมิต่ำ

- จ. อุณหภูมิที่ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ สูงสุด 100 องศาเซลเซียส
- ฉ. ทนกรด ต่าง ได้ดี

2.4.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

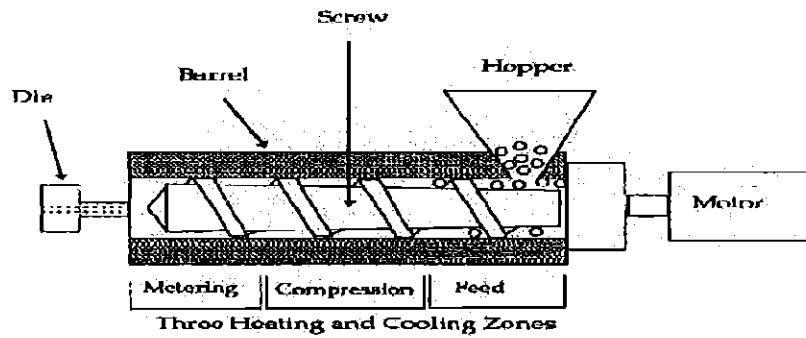
- ก. ขวดน้ำดื่ม ขวดบรรจุนม ถาดทำน้ำแข็ง
- ข. ภาชนะ กล่อง กระจุกบรรจุอาหาร กระจุกยา และวิตามิน
- ค. ขวดใส่สารเคมี ขวดสบู์เหลว (ขวดปั้ม) ขวดน้ำยาซักผ้า กระจุกป้องกัน
- ง. ลัง และกล่องบรรจุสินค้า ถุงใส่ของ เครื่องเล่นเด็ก โต๊ะ เก้าอี้
- ฉ. ฉนวนไฟฟ้า

2.5 กระบวนการขึ้นรูป

2.5.1 การผสมด้วยเทคนิคการเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนเดี่ยว (Extrusion Molding Machine)

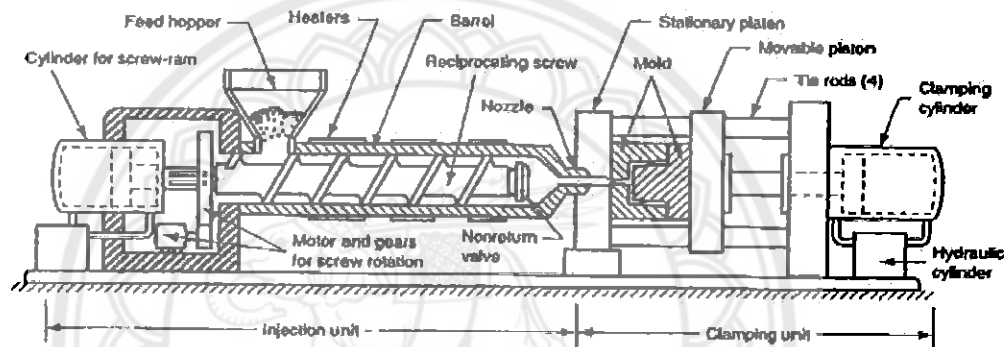
เป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งสำหรับใช้กับเทอร์โมพลาสติกกระบวนการนี้โดยมากใช้ผลิตพวกท่อ แท่ง เป็นฟิล์ม และแผ่นพลาสติก หรือผลิตเป็นรูปแบบอย่างอื่น เครื่องอัดรีดอาจใช้วัตถุดิบที่เป็นพลาสติกผสมให้ออกมาเป็นรูปร่างต่างๆ กัน เช่น ทำเม็ด หรือพวกพลาสติกที่ใช้แล้ว

ในกระบวนการอัดรีดพลาสติกนี้เม็ดพลาสติกจะถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแล้วพลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกบังคับให้ออกมาทางท่อเปิด หรือแม่พิมพ์ตามรูปร่างที่ต้องการด้วยสกรูหมุนพลาสติกที่ออกมาแล้วจะทำให้เย็นตัวต่ำกว่า T_g หรืออุณหภูมิการที่พลาสติกเปลี่ยนเป็นพลาสติกที่มีรูปร่างผลึก (Glass transition temperature) เพื่อให้แน่ใจว่ารูปร่างจะคงที่ การทำให้พลาสติกเย็นตัวลงใช้วิธีเอาลมเป่าหรือใช้ระบบน้ำเย็นหล่อก็ได้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Molding Machine)
ที่มา : แม้น (2541)

2.5.2 การขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine)



รูปที่ 2.8 เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine)
ที่มา : แม้น (2541)

ทำการเปิดเครื่องฉีดพลาสติกจากนั้นตั้งอุณหภูมิที่จะทำการฉีดพลาสติก เมื่ออุณหภูมิถึงที่กำหนดจึงใส่เม็ดพอลิเมอร์ที่จะทำการฉีดลงไปในฮอปเปอร์ จากนั้นจึงเริ่มเดินเครื่องฉีดพลาสติกสกรูจะเริ่มทำงานโดยสกรูจะนำเม็ดพอลิเมอร์ไหลไปตาม Zone ต่างๆ โดยแต่ละ Zone จะมีอุณหภูมิที่ต่างกันตามที่กำหนดอุณหภูมิ เมื่อเม็ดพอลิเมอร์ไหลไปตาม zone ต่างๆ จะเริ่มหลอมเหลว และถูกดันมารวมกันที่หัวฉีดเพื่อทำการฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยที่แม่พิมพ์จะประกอบอยู่ที่ปลายหัวฉีด จากนั้นพอลิเมอร์จึงถูกดันเข้าสู่แม่พิมพ์โดยสกรู แม่พิมพ์จะถูกคงอุณหภูมิด้วยเครื่องคงอุณหภูมิ เพื่อไม่ให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ฉีดเกิดการแข็งตัวเร็วขณะทำการฉีดพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์ถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์แล้ว พอลิเมอร์จะเริ่มเย็นตัวจนได้รูปร่างตามแบบของแม่พิมพ์ และจะถูกดันออกด้วยระบบปลดชิ้นงาน วิธีนี้เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ง่ายมีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

2.5.2.1 ฮอปเปอร์ (Hopper)

อุปกรณ์ส่วนนี้มีลักษณะเป็นกรวยขนาดใหญ่เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพอลิเมอร์และสารเติมแต่งเพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก

2.5.2.2 กระบอกฉีดและสกรู (Injector and Screw)

เป็นส่วนสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติกทำหน้าที่หลอมเหลวพอลิเมอร์ และสร้างแรงดันเพื่อฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ประกอบด้วยกระบอกตรงติดอยู่กับที่ส่วนต้นของกระบอกเป็นที่ติดตั้งฮอปเปอร์ ตรงส่วนกลาง และส่วนปลายของกระบอกมีเครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ได้ ปลายของกระบอกจะต่อเข้ากับหัวฉีดภายในกระบอกนี้เป็นสกรูที่มีความยาวสั้นกว่ากระบอกเล็กน้อย โดยมีลักษณะเป็นเกลียวหยาบหมุนป้อนส่วนผสมของพอลิเมอร์ให้เคลื่อนที่เข้าสู่กระบอก และสามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับเพื่อเพิ่มแรงดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์

2.5.2.3 หัวฉีด (Nozzle)

เป็นส่วนปลายกระบอกฉีดพอลิเมอร์เข้ากับช่องทางไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์ หัวฉีดมีรูขนาดเล็ก เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างของแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว

2.5.2.4 แม่พิมพ์ (Mold)

เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตแม่พิมพ์โดยทั่วไปมักออกแบบให้มี 2 ชั้น เพื่อให้สะดวกต่อการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ นอกจากนี้ต้องมีช่องทางไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวต่อจากหัวฉีด เข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์เรียกว่า สปรู (Sprue) ในแม่พิมพ์ที่มีหลายช่อง (ผลิตภัณฑ์ครั้งละหลายชิ้น) จะต้องมีช่องทางแยกจากสปรูเข้าสู่แม่พิมพ์แต่ละช่องเรียกว่า รันเนอร์ (Runner)

2.5.2.5 ตัวหนีบยึดแม่พิมพ์ (Hydraulic clamp unit)

มักเรียกกันว่า แคลมป์ เป็นกลไกสำหรับเปิด และปิดฝาแม่พิมพ์ขับเคลื่อนด้วยกำลังไฮดรอลิก อุปกรณ์ส่วนนี้ยังรวมทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่ออุ่นแม่พิมพ์ก่อนฉีด และอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวก่อนถอดออกจากแม่พิมพ์

2.5.2.6 ชุดควบคุมกลาง (Central control)

เป็นชุดควบคุมเครื่องจักรรวมทุกส่วน ได้แก่ส่วน อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์วัด และควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุมความดัน และอุปกรณ์ควบคุมเวลา

2.5.2.7 เครื่องคงอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Hold mold)

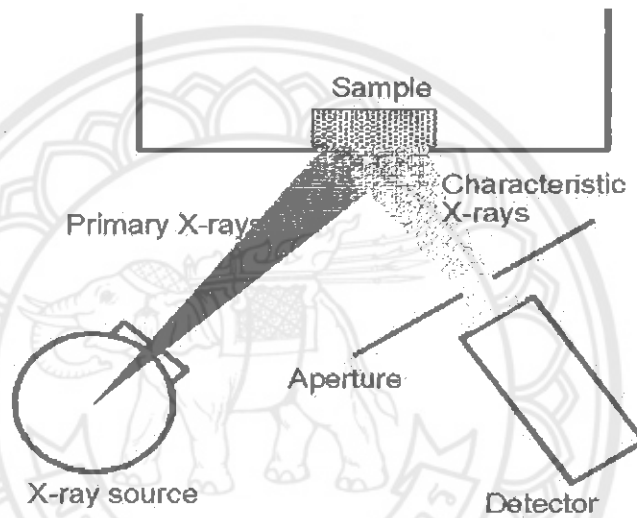
เป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ เพื่อให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิสูง หรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง สำหรับพอลิเมอร์ที่แข็งตัวเร็ว

2.6 การวิเคราะห์สมบัติของไฮดรอกซีอะพาไทต์

2.6.1 การวิเคราะห์วัฏภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) จะใช้เทคนิคที่เรียกว่าเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน (X-Ray Diffraction: XRD) ซึ่ง XRD นั้นเป็นเทคนิคที่นำไปใช้วิเคราะห์ และระบุองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของสารที่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline) และวัสดุที่มีความเป็นผลึกสูงจะให้ลักษณะของพีค (Peak) จะมีความสูง และแคบ ในขณะที่วัสดุที่มีความเป็นผลึกต่ำ หรือเป็นอสัณฐาน (Amorphous) นั้นจะแสดงลักษณะของพีค ที่ต่ำ และกว้าง ซึ่งเทคนิค XRD นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งผง (Powders) และผลึกเดี่ยว (Single Crystals) XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ

สารประกอบ และแร่ ทำให้นักวิทยาศาสตร์กลุ่มนี้ สามารถแยกแยะประเภท และชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติ ว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน ที่ทำการตรวจวัด (Joint Committee on Powder Diffraction Standard: JCPDS) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของ อะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาด และประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิด จะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน โดยปกติเครื่อง XRD ที่สถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุนี้ ใช้วิเคราะห์สารประกอบ หรือแร่ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด หากวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ไม่สามารถบดเป็นผงได้ ต้องทำการตัด หรือเตรียมให้มีลักษณะผิวเรียบขนาด 1-1.5x2 เซนติเมตร



รูปที่ 2.9 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)

ที่มา : นันทวัน (2549)

2.6.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Fourier Transform Spectrometry: FTIR)

เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการของสเปกโทรสโกปีชนิดหนึ่ง ที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกันโดยช่วงเลขคลื่น 4000-1500 จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล เช่น -OH, C=O, N-H, CH₃ เป็นต้น และในช่วงเลขคลื่น 1500-400 ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว แต่เนื่องจากจะมีพีคเกิดค่อนข้างเยอะ ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัมช่วงนี้ค่อนข้างยาก การนำเทคนิคนี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับด้านวัสดุศาสตร์ เช่น พอลิเมอร์ ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพง และรวมไปถึงชนิดของตัวอย่าง

สามารถวิเคราะห์ได้เกือบทุกชนิด ดังนั้นจึงนิยมใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้าง และองค์ประกอบของโมเลกุลรวมกับเทคนิคอื่น

ตารางที่ 2.2 แสดงช่วงคลื่นของฟังก์ชันนัลกรุปที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดของไฮดรอกซีอะพาไทต์

ช่วงคลื่น (cm^{-1})	ฟังก์ชันนัลกรุป
2700-3700	OH^- stretching
1631	OH^- bending
1300-1450	CO_3^{2-}
1062	PO_4^{3-} stretching
1031	
1027	
603	PO_4^{3-} bending
560	

ที่มา : แม้น (2541)

2.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้าง และสมบัติบางประการของสสาร ค่าความชัดลึก (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งนี้เป็นเพราะ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDXS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WED) เพื่อให้ข้อมูลในเชิงเคมีอีกด้วย

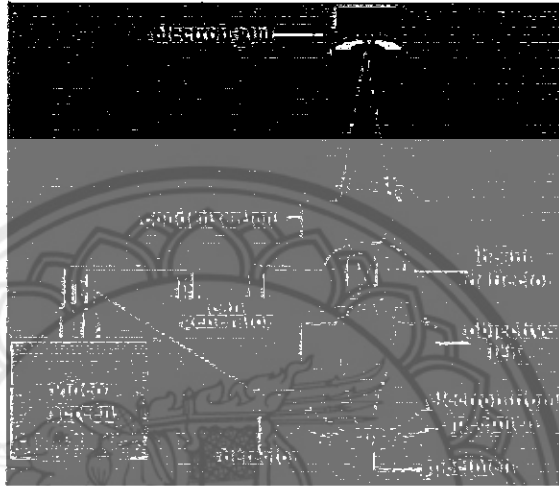
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์ อีกหลายสาขา (บัญญัติ, 2544)

2.6.4.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ

ก. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Secondary Electron จะได้ภาพที่เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความสูงต่ำ ขรุขระ ที่เกิดขึ้นจริงบนตัวอย่าง และสามารถวัดขนาดต่างๆ บนตัวอย่างนั้นได้

ข. ภาพที่ได้จากสัญญาณ Back Scattered Electron จะได้ภาพที่มีลักษณะที่เป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุนั้น วัตถุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่างกว่าวัตถุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

ลักษณะของตัวอย่าง และชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบที่ต้องการสภาพความเป็นสุญญากาศสูง การเตรียมตัวอย่างที่จะศึกษาต้องแห้ง ไม่มีน้ำ และไม่มีพันธะไฮโดรคาร์บอน (น้ำมัน) เพราะเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้น หรือสารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ ซัดขวางเส้นทางของอิเล็กตรอน ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนอีกทั้งโมเลกุลเหล่านี้อาจไปเกาะยังส่วนต่างๆ ของกล้อง เช่น ผิวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีอายุการใช้งานสั้นลง (บัญชา, 2544)



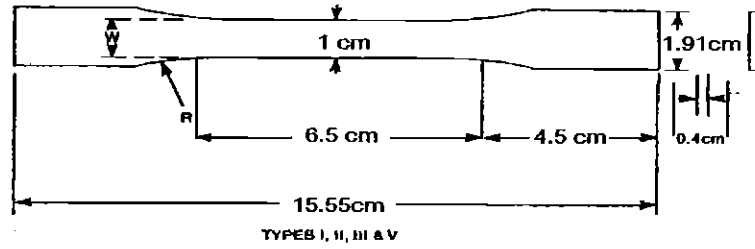
รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของกล้อง (Scanning Electron Microscope : SEM)
ที่มา : บัญชา (2544)

2.6.4 สมบัติเชิงกล

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานอย่างหนึ่งที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่างๆ ปกติการทดสอบแรงดึงจะใช้ชิ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน แต่ขณะเดียวกันก็สามารถใช้ชิ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัด และความยาวเริ่มต้น โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึง หรือการยืดในแนวแกนข้อมูล และการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไป

ความแข็งแรงดึงเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุที่มักจะมีการทดสอบกับความแข็งแรงดึงของวัสดุแสดงถึงความต้านทานของวัสดุนั้นต่อการยืด (Elongation) หรือการแตกหัก (Breaking) เมื่อมีแรงดึงวัสดุ ในการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมนำชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นแผ่นฟิล์มขนาดเท่าแม่พิมพ์มาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) โดยมีขนาด และความหนา ยึดตามมาตรฐาน ASTM D638 นำชิ้นทดสอบไปติดตั้งกับหัวจับของเครื่องทดสอบ โดยปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบถูกยึดเข้ากับหัวจับของเครื่องทดสอบ และใช้แรงดึงหัวจับทั้งสองให้เคลื่อนออกจากกัน วัสดุที่ทดสอบมักจะยืด และขาดออกจากกันตรงบริเวณใจกลางที่แคบของวัสดุ สามารถอ่านค่าแรงดึงและระยะยืดได้จากหน้าปัดบนเครื่อง หรืออ่านจากกราฟของเครื่องบันทึก

ASTM D 638 – 03



รูปที่ 2.11 ลักษณะของชิ้นทดสอบบริเวณที่จับ และบริเวณการยืดออก
ที่มา : รังสฤษฎี (2553)

ความแข็งแรงดึง (Tensile Stress : σ)

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{2.1}$$

- เมื่อ σ = ความเค้น มีหน่วยเป็นเมกกะปาสคาล (MPa)
- P = แรงที่ใช้ในการยืดชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
- A = พื้นที่ตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร (mm^2)

ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break : %EI)

$$(\%EI) = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \tag{2.2}$$

- เมื่อ %EI = เปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาด
- L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
- L_o = ความยาวของเกจเริ่มต้น มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

มอดุลัสของยังส์ (Modulus of Elasticity, Young's Modulus, Stiffness : E)

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L} \tag{2.3}$$

- เมื่อ E = มอดุลัสของยัง มีหน่วยเป็นเมกกะปาสคาล (MPa)
- σ = ความเค้น มีหน่วยเป็นเมกกะปาสคาล (MPa)
- e = ความเครียด

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สิทธิพร (2554) ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตก้อนเซรามิกเนื้อพรุนสำหรับใช้ปลูกถ่ายทดแทนกระดูกมนุษย์ และการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัยพบว่าเซรามิกเนื้อพรุนเป็นก้อนเซรามิก HA ชนิดแข็งเนื้อพรุน ผลิตมาจากกระดูกวัวที่เสริมความแข็งแรงด้วยแก้วชีวภาพ มีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ยินยอมให้เนื้อเยื่อกระดูกพร้อมหลอดเลือดเจริญแทรกเข้าภายในเนื้อชิ้นงานได้ วัสดุประกอบด้วย HA เป็นส่วนใหญ่ และปนเปื้อนด้วยแร่ธาตุอื่นๆ ในขนาดความเข้มจำกัดตามกำหนด มีความแข็งแรงเชิงกลที่พอเพียงกับการใช้งานในมนุษย์ที่ตำแหน่งต้องรับน้ำหนัก ในอนาคตจะต้องทดสอบเพิ่มเติมในสัตว์ทดลอง เพื่อยืนยันความเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต งานวิจัยประดิษฐ์นี้เป็นนวัตกรรมที่คิดค้นปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยนักวิทยาศาสตร์ไทย ผู้วิจัยที่จะแสดงให้เห็นว่าก้อนเซรามิกเนื้อพรุนมีความแข็งแรงเท่ากับ เยื่อกระดูกของมนุษย์ พบว่ายังเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากมีปัจจัยข้างเคียงที่แตกต่างกันมากมาย เช่น เยื่อกระดูกมีลักษณะเป็นเนื้อแน่นที่มีความพรุนอยู่เพียงร้อยละ 5-30 มีผลึกของ HA ที่เป็นแร่ธาตุหลักเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบตามสายโซ่คอลลาเจนที่เกี่ยวข้องกันอยู่อย่างสลับซับซ้อน และยังมีแร่ธาตุอื่นอีกประมาณร้อยละ 5 เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต คณะผู้วิจัยจึงได้ทดลองใช้น้ำหนักประมาณ 400 กิโลกรัมกระทำในแนวตั้งต่อกระดูกโชติกาพบว่าไม่เกิดความแตกร้าว

มาศกร (2553) ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีซิลิกอนในโครงสร้างเปลือกไข่โดยวิธีการตกตะกอน ผลการวิจัยพบว่า การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีซิลิกอนในโครงสร้างโดยใช้สารตั้งต้นจากเปลือกไข่ไก่เผาที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กับพุ่มด์ซิลิกอนั้น ผลปรากฏว่าประสบความสำเร็จ นอกจากนั้นซิลิกอนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่ได้มีลักษณะกลมขนาดเล็ก และมีขนาดที่สม่ำเสมอ

Orlovskii และคณะ (2002) ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite and Hydroxyapatite-Based Ceramics) การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยกระบวนการแบบเปียก ที่ช่วงสถานะของแข็งเกิดปฏิกิริยา และการรักษาความร้อน และด้านเงื่อนไขสำหรับการเตรียม HA ผ่านการตกตะกอนจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์, ฟอสเฟตแอมโมเนียม และแอมโมเนียในน้ำ แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์การผลิต และคุณสมบัติเซรามิกของแคลเซียมฟอสเฟต พิจารณาเทคนิคสำหรับการผลิตด้านความหนาแน่น และรูพรุนของ HA และแสดงการผลิต และการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ของวัสดุเชิงประกอบ

กิตติศักดิ์ชัย และคณะ (2550) ศึกษาการวิเคราะห์เปลือกไข่เปิดด้วยเทคนิคกาเลียวเบนรังสีเอ็กซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการวิจัยพบว่า เปลือกไข่เป็ประกอบด้วยส่วนใหญ่ของ CaCO_3 กับโครงสร้างแคลไซต์ ในงานนี้ผลอุณหภูมิบนเปลือกไข่เปิดมีการศึกษาผลที่แสดงให้เห็นว่าเป็นสิ่งสำคัญมากในการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และโครงสร้างที่เกิดขึ้นในเปลือกไข่เปิด เปลือกไข่เปิดเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ใน CaO หลังจากที่ถูกความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส CaO จากเปลือกไข่เปิดคือไว้มากต่อความชื้น

Rukudjarit และคณะ (2550) สังเคราะห์ HA จากกระดูกวัวโดยนำกระดูกวัวมาสกัดเอาโปรตีนออกจนหมดด้วยการต้มในน้ำร้อน และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำมาบดให้ละเอียดมากที่สุด พบว่าผลึกของ HA ที่เตรียมได้เป็นผลึก HA ที่มีความบริสุทธิ์มีค่า Ca:P เท่ากับ 1.66

รังสรรค์ (2553) วิธีการสกัด HA จากกระดูกโดยการเผาแคลไซน์ โดยจะศึกษา HA จากเทคนิค XRD, FTIR และSEM ผลที่ได้คือ สีของผง HA จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ถ้าได้รับอุณหภูมิที่ต่ำ จะทำให้มีสีเข้ม และจะมีสีขาวขึ้นถ้าได้รับอุณหภูมิที่สูงความเข้มข้นของแคลเซียม และฟอสฟอรัสในกระดูกที่ทำการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส จะมีค่าที่ต่ำกว่าการเผาที่อุณหภูมิที่ 950 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีสารอินทรีย์ในวัสดุ



บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ

ในการทดลองนี้ จะศึกษาวัฏภาค หมูฟังกซ์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite: HA) ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว จากนั้นสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัว และสรุปผลการทดลอง

3.1 สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในโครงการ

3.1.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

3.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรด H5818J จากบริษัท SCG Plastics Co.,Ltd. มีสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เกรด H5818J

สมบัติ	หน่วย	มาตรฐานการทดสอบ	HDPE เกรด H5818J
อัตราการไหล (Melt Flow Index)	g/10 min	ASTM D1238	18
ความหนาแน่น (Density)	g/cm ³	ASTM D1505	0.962
ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Strength at Yield)	MPa	ASTM D638	280
ค่าความต้านทานแรงดึง ณ จุดแตกหัก (Tensile Strength at Break)	MPa	ASTM D638	160
ค่าความยืดตัว (Elongation at Break)	%	ASTM D638	130
ค่าความยืดหยุ่น (Flexural Modulus)	MPa	ASTM D790	13000
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	°C	ASTM D2117	131

ที่มา : บริษัท SCG Plastics Co.,Ltd. (2550)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงการ

3.2.1 เตาเผา (Furnace)

3.2.2 โกร่ง (Mortar)

3.2.3 ตะแกรงร่อนขนาด 270 เมช

3.2.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวท่อนเดียว (Extrusion Moulding Machine)

3.2.5 เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding Machine)

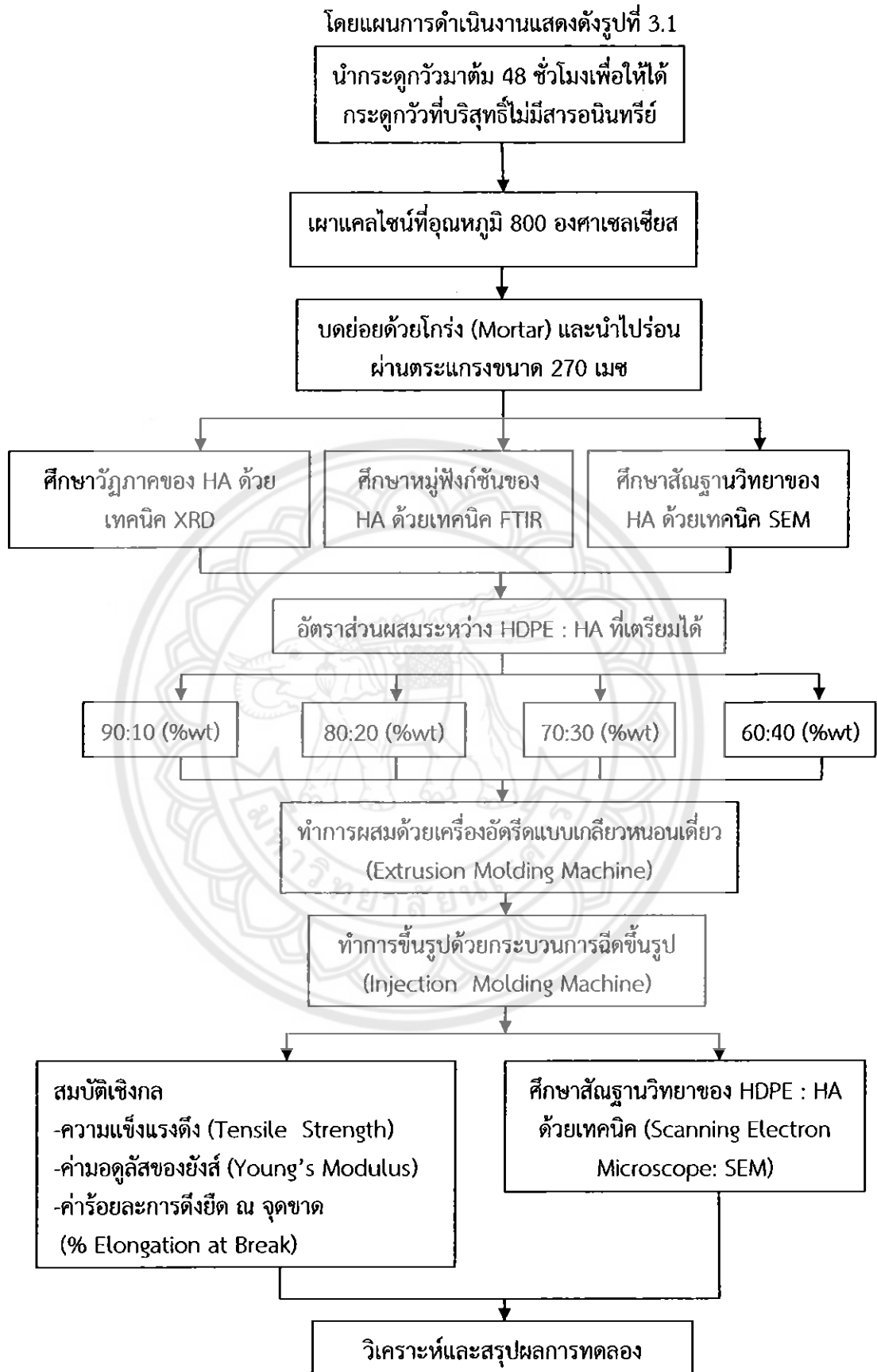
3.2.6 ศึกษาลักษณะด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)

3.2.7 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิคการกระตุ้นสารพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรดดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Spectrometry: FTIR)

3.2.8 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)





รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในโครงการ

1914 5686

พ.ร.

๑๖24๑๑

2554

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite : HA) จากกระดูกวัว

3.3.1.1 เตรียมกระดูกวัวแล้วกำจัดเนื้อเยื่อโปรตีน และไขมันด้วยวิธีต้มกระดูกในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และต้องทำการเปลี่ยนน้ำต้มที่ใช้ใหม่ทุกๆ 8 ชั่วโมง

3.3.1.2 เมาแคลไซน์ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุ หรือของผสมโดยไม่เกิดการหลอมตัว เพื่อกำจัดองค์ประกอบที่ระเหยได้ง่าย และเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพตามต้องการ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.3.1.3 จากนั้นจึงนำกระดูกที่ได้จากการเผาแคลไซน์แล้วไปทำการลดขนาด เมื่อได้ผงของกระดูกแล้ว จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 270 เมช

3.3.1.4 นำผงกระดูกที่ได้จากการร่อนไปทำการศึกษาวงศ์ภาคโดยใช้เทคนิค XRD และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้เทคนิค FTIR เพื่อยืนยันว่าผลของไฮดรอกซีอะพาไทต์

3.3.1.5 นำผง HA ไปทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.2 ขั้นตอนการทำวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HA และ HDPE

3.3.2.1 พอลิเมอร์ที่นำมาใช้ คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เกรด H5818J

3.3.2.2 ทำการผสมพอลิเมอร์ระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยแบ่งเป็น 4 ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนระหว่าง HA : HDPE

HA (%wt)	HDPE (%wt)
10	90
20	80
30	70
40	60

3.3.2.3 ทำการผสมตามอัตราส่วนข้างต้นในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Extrusion Molding Machine) ที่ช่วงอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆ กัน 4 โซน แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ผสมด้วยของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

ช่วงสภาวะ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Screw zone	210
Heaters zone	220
Barral zone	230
Nozzle zone	220

3.3.2.4 จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine) ซึ่งมีสถานะการขึ้นรูป แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ความเร็วรอบ 30 rpm.

ตารางที่ 3.4 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปของเครื่องอัดฉีดขึ้นรูป

ช่วงสภาวะ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Feed zone	210
Compression zone	220
Metering zone	230
Nozzle zone	220

3.3.2.5 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV โดยมีการให้ load ที่ 5 kN และอัตราเร็วการดึงยึด 50 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3.2.6 นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

ก. สมบัติเชิงกล

ก.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)

ก.2 ค่ามอดูลัสของยังส์ (Young's Modulus: E)

ก.3 ค่าร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด (% Elongation at Break)

ข. ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 ศึกษาลักษณะวัฏภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก ความเครียดของโลหะ ขนาดของอนุภาค และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ด้วยการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ตัวอย่างที่เตรียมได้จากกระดูกวัว เพื่อตรวจสอบเฟสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยการระบุพีคของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ โดยนำไปเทียบกับแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 74-0565

ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ เนื่องจากตัวอย่างเป็นของแข็งจึงต้องผ่านการบดด้วยโกร่ง (Mortar) หรือลูกบด เพื่อให้เป็นผงละเอียดก่อนจะทำการวิเคราะห์ หลังจากนั้นทำการอัดผงตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ลงในที่ใส่ตัวอย่าง (Sample Holder) แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ HA จากแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 74-0565

3.4.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิคการกระตุ้นสารพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Fourier Transform Spectrometry: FTIR)

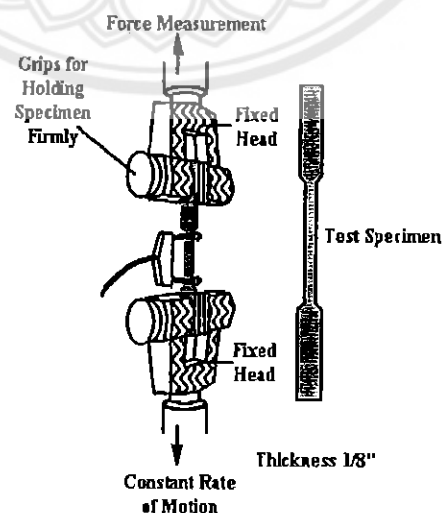
การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้คือ เตรียมให้เป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางมากๆ คือ มีความหนาประมาณ 0.01-0.1 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงผ่านได้ มีวิธีการเตรียมโดยใช้โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ซึ่งเป็นสารพวกอัลคาไลเฮไลด์ โดยใช้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 2.0 มิลลิกรัมผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ ประมาณ 100-200 มิลลิกรัมบดให้เข้ากันในโถรงจนเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อบดเสร็จแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic press) โดยใช้แรงดันประมาณ 15 ตัน หลังจากนั้นลดความดัน และปลดเครื่องอัดไฮดรอลิกออกจะได้ตัวอย่างที่เป็นแผ่นฟิล์มบางๆ เพื่อให้แสงผ่านได้ จากนั้นนำไปใส่ Sample Holder จากนั้นนำไปวิเคราะห์ต่อไปด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปี โดยใช้ช่วงคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$

3.4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การศึกษาลักษณะพื้นผิว และการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 3000 และ 5000 เท่า การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์มาเคลือบด้วยทองแล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง SEM โดยทำการศึกษาลักษณะของวัสดุเชิงประกอบ

3.4.4 สมบัติเชิงกลที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัสของยังส์ (Young's Modulus) และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ในการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 3.2 เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง 4 ชิ้น เมื่อได้ชิ้นงานตามที่ต้องการแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบเชิงกล จากนั้นนำผลการทดลองไปคำนวณตามสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง และรูปชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ
ที่มา : แม้น (2541)

3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.5.1 วิเคราะห์ภูมิภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

3.5.2 ปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง พอลิเอทิลีน-ชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

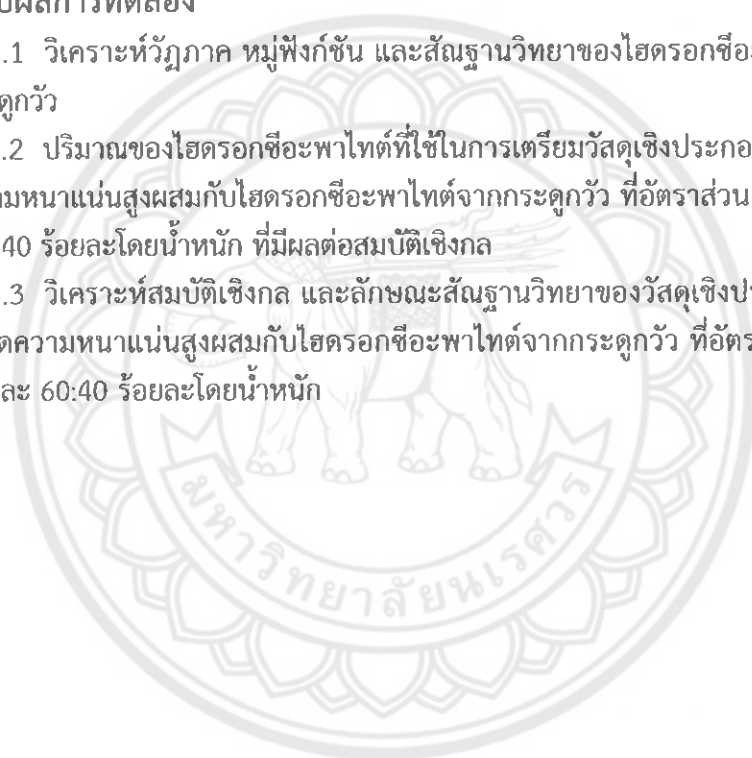
3.5.3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกล และลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก

3.6 สรุปผลการทดลอง

3.6.1 วิเคราะห์ภูมิภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

3.6.2 ปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง พอลิเอทิลีน-ชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

3.6.3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกล และลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก



บทที่ 4

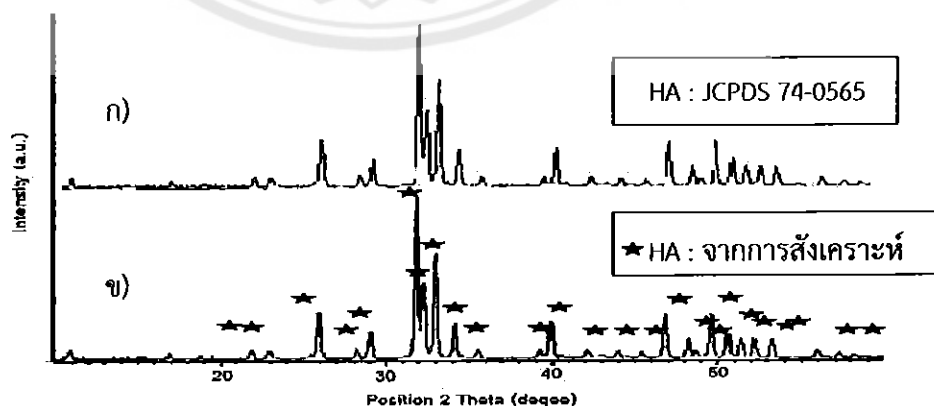
ผลการทดลอง และวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัฏภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite : HA) ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่ผ่านต้มน้ำเปล่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงจากนั้นเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จึงนำมาบดด้วยโกร่งให้เป็นผงละเอียด และนำไปผ่านตระแกรงร่อน 270 เมช หลังจากนั้นนำมาศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัว ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาวัฏภาค หมู่ฟังก์ชัน และสัณฐานของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

4.1.1 จากการศึกษาวัฏภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)

เทคนิคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์วัฏภาคตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวหน้าของผลึกของผงกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 จากรูปจะเห็นได้ว่าแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ HA ที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะวัฏภาคของรูปแบบ XRD pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตรงกันกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ของแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากแฟ้มข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดย (Joint Committee on Powder Diffraction Standard: JCPDS) หมายเลข 74-0565 จึงสามารถอธิบายได้ว่ากระดูกวัวที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถที่จะสังเคราะห์เป็นผง HA ได้ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ที่มีหน่วยเซลล์จัดอยู่ในระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal)



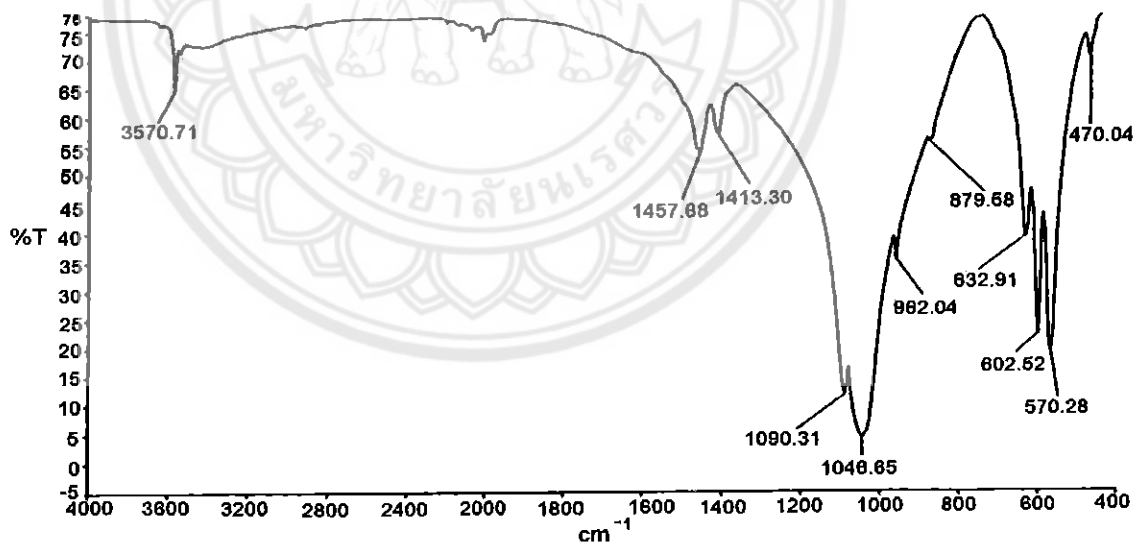
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวโดยเปรียบเทียบกับแบบจากแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 74-0565

ก) ผล XRD ของ HA จากแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 74-0565

ข) ผล XRD ของ HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

4.1.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิคการกระตุ่นสารพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Fourier Transform Spectrometry: FTIR)

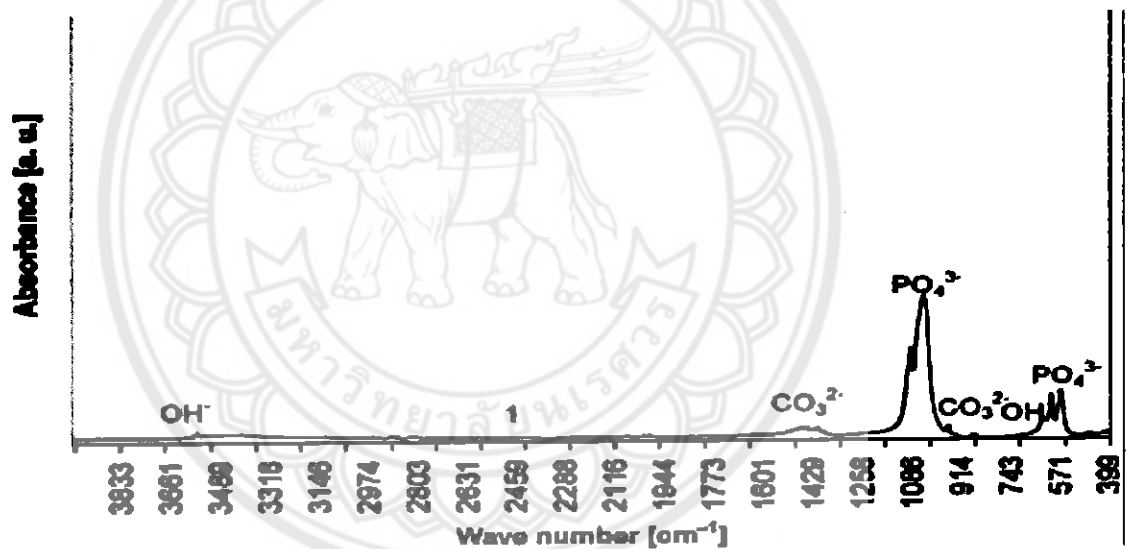
จากการตรวจสอบวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าหมู่ฟังก์ชันของ HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวมีค่าใกล้เคียงกับช่วงคลื่นของฟังก์ชันน้ำตาลรูปที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดมาตรฐาน โดยในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผง HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้ช่วงคลื่นในการวัดตั้งแต่ $400-4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าช่วงประมาณพิก 3570.71, 632.91 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน OH⁻ stretching ช่วงประมาณพิก 1457.68, 1413.30, 962.04, 879.58 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน CO₃²⁻ ช่วงประมาณพิก 1046.65 –1090.31 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO₄³⁻ stretching ในช่วงประมาณพิก 570.28-636 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO₄³⁻ bending ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rukudjarit และคณะ (Rukudjarit, 2007) แสดงดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 พบว่าพิกที่ 3570,602 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน OH⁻ stretching ส่วนในช่วงพิกที่ 1429, 1390, 914, 879 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน CO₃²⁻ ส่วนในช่วงพิกที่ 1046-1090 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO₄³⁻ stretching และช่วงประมาณพิกที่ 570-636 cm^{-1} จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน PO₄³⁻ bending การเปรียบเทียบช่วงพิกที่เกิดขึ้นระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิค FTIR กับของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิค FTIR จากงานวิจัยของ Rukudjarit และคณะ (Rukudjarit, 2007) ซึ่งแสดงให้เห็นความสอดคล้อง และความใกล้เคียงกันของช่วงพิกที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวโดยผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของผง HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิค FTIR

ช่วงคลื่น (cm^{-1})	ฟังก์ชันนัลกรุป
3570.71 632.91	OH^- stretching
1457.68 1413.30 962.04 879.58	OH^- bending
1046.65 1090.31	PO_4^{3-} stretching
570.28 636.91	PO_4^{3-} bending



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ที่มา : Rukudjarit (2007)

ตารางที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของผง HA ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

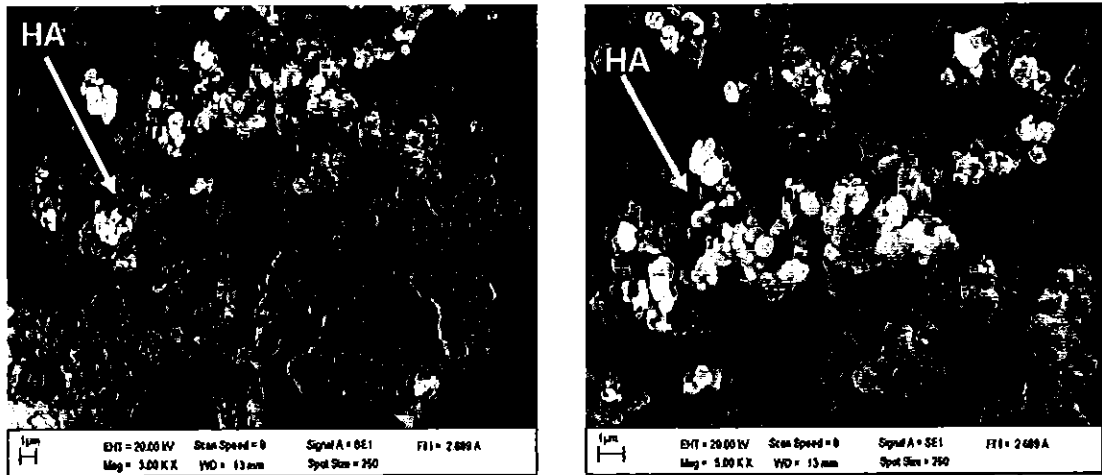
ช่วงคลื่น (cm ⁻¹)	ฟังก์ชันโมเลกุล
3570 632	OH ⁻ stretching
1457 1413 960 880	CO ₃ ²⁻
1047 960	PO ₄ ³⁻ stretching
636 570	PO ₄ ³⁻ bending

ที่มา : Rukudjarit (2007)

จากผลการวิเคราะห์ผง HA ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเครื่อง FTIR สรุปได้ว่าผง HA มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกับช่วงคลื่นของฟังก์ชันโมเลกุลที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดมาตรฐาน และพบว่า HA ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระดูกวัวจะมีหมู่ฟังก์ชันของ CO₃²⁻ ที่ปะปนเข้ามาด้วยซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในกระดูกวัว จึงไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายเมื่อนำไปใช้ในร่างกาย หรือทางการแพทย์

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว โดยใช้เทคนิคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากการทดลองได้นำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้นำไปตรวจดูโครงสร้าง และลักษณะสัณฐานวิทยา แสดงในรูปที่ 4.4 ก) ที่กำลังขยาย 3000 เท่า และ 4.4 ข) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า จากการวิเคราะห์พบว่า อนุภาคของไฮดรอกซีอะพาไทต์มีลักษณะ ค่อนข้างกลม พื้นผิวโดยรอบไม่เรียบ เกาะกลุ่มกันอยู่เป็นกลุ่มๆ และการที่ลักษณะผิวไม่เรียบของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์นี้ ทำให้เนื้อพอลิเมอร์สามารถแทรกตัวยึดเกาะกับอนุภาคได้มากขึ้น



ก)

ข)

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

ก) ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

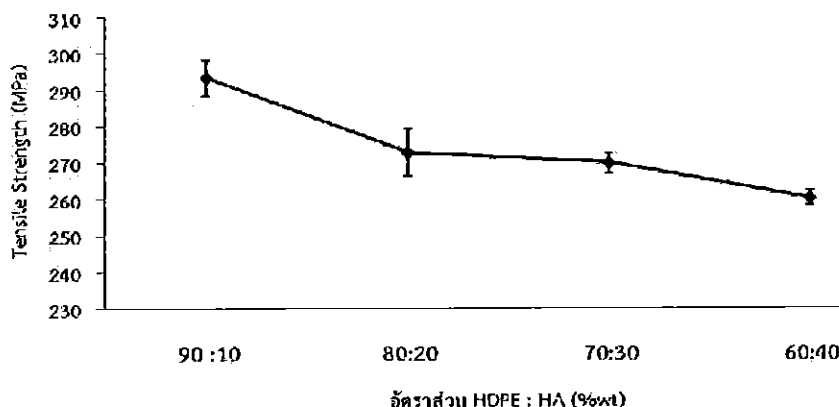
ข) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการนำไปวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR จนสามารถยืนยันความเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ถึงความเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ จึงสามารถนำไปทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบได้ และจากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะพบว่าที่ลักษณะผิวของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์จะมีลักษณะไม่เรียบ ทำให้เกิดช่องว่าง ส่งผลให้เนื้อพื้นที่เป็น HDPE สามารถเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างได้ จากนั้นนำมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE : HA ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

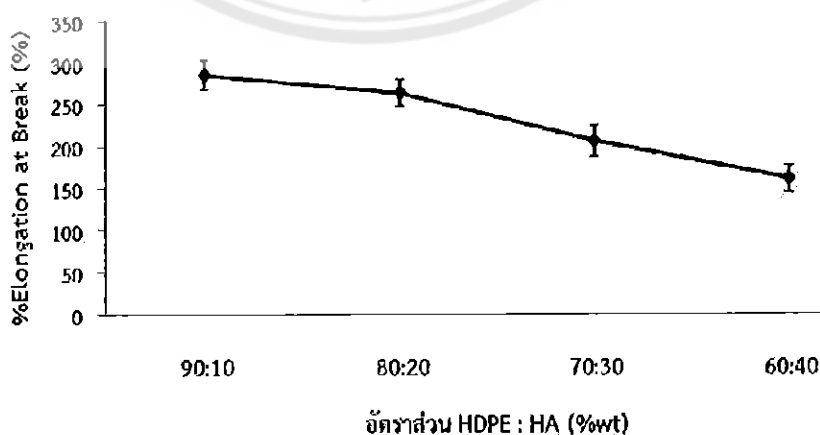
4.2.1 สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite: HA) ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt) หลังจากทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวทวนอนเดี่ยว (Extrusion Molding Machine) และทำการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine) เรียบร้อยแล้วก็จะนำไปทดสอบสมบัติทางกลโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV โดยมีการให้ load ที่ 5 kN และอัตราเร็วการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งให้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7



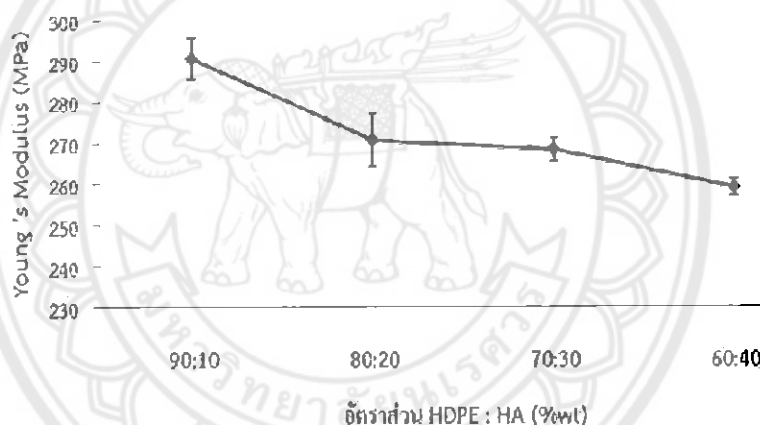
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ด้านสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านความแข็งแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30 และ 60 : 40 ร้อยละโดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าสมบัติด้านความแข็งแรงดึงนั้นจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณของ HA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก HA เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้การกระจายตัวของ HA ในวัสดุเชิงประกอบลดลง การที่ HA เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ เนื่องจาก HA เป็นอนุภาคของแข็ง เมื่อได้รับแรงกระทำในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะเกิดแรงดึงดูระหว่างอนุภาคเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ส่งผลให้เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้การส่งถ่ายแรงระหว่างภูมิภาคไม่ดี เพราะเกิดรอยต่อระหว่างภูมิภาคของเนื้อพื้น HDPE กับส่วนเสริมแรง HA ยิ่งรอยต่อระหว่างภูมิภาคมีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลให้สมบัติด้านแรงดึงต่ำลง เนื่องจาก HA เพิ่มขึ้นทำให้การส่งถ่ายแรงระหว่างเนื้อพื้น HDPE กับส่วนเสริมแรง HA เกิดได้น้อย เพราะรอยต่อภูมิภาคมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดความเค้นสะสมบริเวณรอยต่อภูมิภาคทำให้เกิดข้อบกพร่อง เมื่อให้แรงดึงกับวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของ HA เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ด้านสมบัติด้านร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วนต่างๆ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ในอัตราส่วน 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30 และ 60 : 40 ร้อยละโดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นการศึกษาเกี่ยวกับร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด เมื่อมีการให้แรงดึงกับวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้นจนผ่านขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) ไปแล้ว และวัสดุชิ้นนั้นไม่สามารถกลับสู่สภาพเดิมได้เมื่อเอาแรงออก และเมื่อยังให้แรงเพิ่มมากขึ้น พื้นที่หน้าตัดของวัสดุชิ้นนั้นก็จะลดลงไปจนเป็นคอคอด (Necking) จนกระทั่งขาดออกจากกัน จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติมผง HA เพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติด้านร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีปริมาณ HA เพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของ HA ในวัสดุเชิงประกอบลดลง เกิดการจับกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของอนุภาค HA ทำให้ขีดขวางการเกี่ยวพันของสายโซ่หลักของ HDPE และการที่ HA จับกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ จะทำให้มีเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคของเนื้อพื้น HDPE กับส่วนเสริมแรง HA ส่งผลให้การส่งถ่ายแรงระหว่างเนื้อพื้น HDPE กระจายแรงไปยังส่วนเสริมแรง HA ได้ต่ำลง เมื่อมีการออกแรงดึงกับวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA จึงทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงต่ำ ส่งผลให้สมบัติด้านร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณของ HA เพิ่มขึ้นตามลำดับ



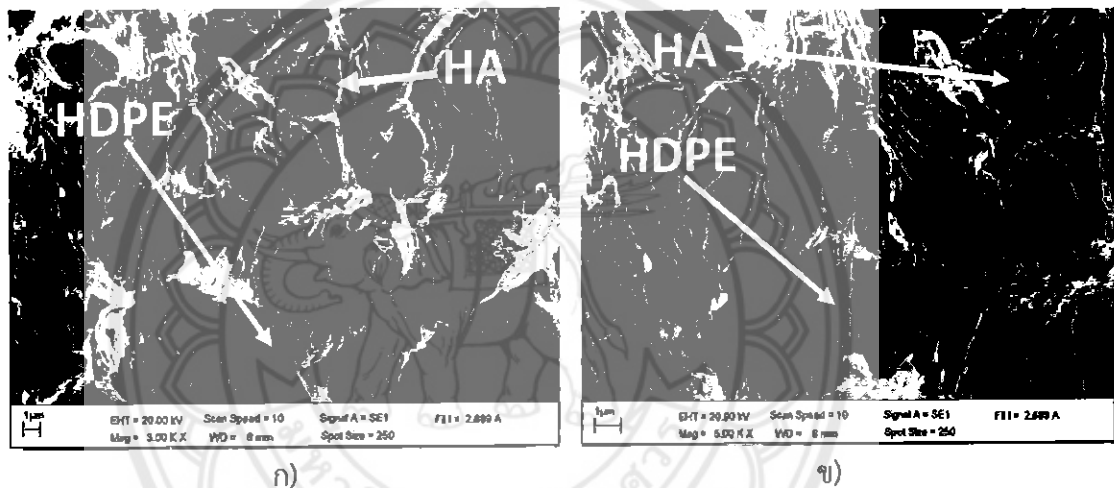
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์สมบัติด้านมอดูลัสของยังส์ของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านมอดูลัสของยังส์ของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก เนื่องจากการทดสอบด้านมอดูลัสของยังส์เป็นการศึกษาความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างในการยืดหยุ่น และเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่าความแข็งแรงดึง ถ้าค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบนี้มากก็จะส่งผลให้ผ่านสมบัติด้านมอดูลัสของยังส์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จากการทดลองพบว่าสมบัติด้านมอดูลัสของยังส์มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีปริมาณของ HA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก HA ยึดเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ทำให้การกระจายแรงภายในเนื้อพื้น HDPE ไม่ดีส่งผลให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคของเนื้อพื้น HDPE กับส่วนเสริมแรง HA เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ทำให้ความสามารถในการส่งถ่ายแรงที่มากกระทำบนเนื้อพื้น HDPE กระจายแรงไปยังส่วนเสริมแรง HA ได้ต่ำ และเนื่องจากอนุภาคของ HA มีค่ามอดูลัสของยังส์ที่ต่ำกว่า HDPE เมื่อให้แรงดึงชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA จะส่งผลต่อความแข็งแรง และค่าต้านทานการเสียรูปมีค่าต่ำลง ทำให้สมบัติด้านมอดูลัสของยังส์

มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณของ HA เพิ่มขึ้น และค่ามอดูลัสของยังก็ยังมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่กล่าวมาข้างต้น

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัวด้วยเทคนิคของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากการทดลองได้นำวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite: HA) ที่ผ่านการทดสอบแรงดึงแล้วมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยเลือกอัตราส่วนที่มีสมบัติด้านความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ ที่อัตราส่วน 90:10 มาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่มีสมบัติด้านความแข็งแรงดึงต่ำสุดคือ ที่อัตราส่วน 60:40 โดยใช้กำลังขยายที่ 5000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ก) HDPE : HA ที่อัตราส่วน 90 : 10

ข) HDPE : HA ที่อัตราส่วน 60 : 40

จากรูปที่ 4.8 ก) พบว่าอัตราส่วน HDPE : HA ที่ 90:10 ร้อยละโดยน้ำหนักที่กำลังขยาย 5000 เท่าอนุภาคของ HA จะมีการกระจายตัวที่ดี แทรกตัวอยู่ตามเนื้อพื้นของ HDPE โดยขนาดของอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิดการรับแรงได้ดี เมื่อมีแรงมากกระทำก็จะทำให้แรงกระจายตัวได้ทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้อัตราส่วน HDPE : HA ที่ 90:10 ร้อยละโดยน้ำหนักมีสมบัติเชิงกลที่สูง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราส่วน HDPE : HA ที่ 60:40 ร้อยละโดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.8 ข) พบว่าอนุภาคของ HA เรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวไม่ทั่วเนื้อพื้นของ HDPE เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำกับส่วนที่รับแรงหลักไม่สามารถกระจายแรงได้ทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นสะสมบนชิ้นงาน ทำให้เกิดข้อบกพร่อง ส่งผลให้สมบัติด้านความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และมอดูลัสของยังมีค่าต่ำที่สุด

ดังนั้นสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE : HA ที่อัตราส่วน 90:10 กับ 60:40 เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าอัตราส่วนที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือที่อัตราส่วน 90:10

บทที่ 5 บทสรุปผลโครงการ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาวัฏภาค หมูฟังกซ์ชัน และสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite : HA) ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว และสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว ที่อัตราส่วน 90:10, 80:10, 70:30 และ 60:40 ได้ข้อสรุปดังนี้

5.1.1 จากการทดลองสังเคราะห์ HA จากกระดูกวัว ซึ่งผลตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD พบว่าลักษณะวัฏภาคจะมีรูปแบบ XRD pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตรงกันกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ของแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากแฟ้มข้อมูล JCPDS 74-0565 และเทคนิค FTIR พบว่าหมูฟังกซ์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่าใกล้เคียงกับช่วงคลื่นของฟังกซ์ชันโมเลกุลที่ดูดกลืนแสงอินฟราเรดมาตรฐาน ทำให้สามารถยืนยันผลได้ว่ากระดูกวัวที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถที่จะสังเคราะห์เป็น HA ได้ และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ HA โดยเทคนิค SEM พบว่า ผง HA มีลักษณะรูปร่างผลึกเป็นลักษณะทรงกลมผิวไม่เรียบ

5.1.2 จากการศึกษสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE: HA ที่อัตราส่วนผสม 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 พบว่าเมื่อมีอัตราส่วนของ HA เพิ่มขึ้นจะส่งผลสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง ด้านรอยละการดึงยึด ณ จุดขาด ด้านมอดูลัสของยังส์ จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณของ HA เพิ่มขึ้นตามลำดับ

5.1.3 จากการศึกษสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE: HA ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ได้กล่าวมาพบว่าบริเวณผิวแตกหักของวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วน 90:10 มีการกระจายตัวของผง HA ทั่วทั้งชิ้นงาน จึงทำให้มีการยึดตัวของพอลิเมอร์สูง และมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวของผง HA ที่น้อยกว่า

5.2 ปัญหา และการแก้ไข

ขณะทำการทดสอบความแข็งแรงดึงชิ้นงานเกิดการลื่นไถลส่งผลให้ค่าที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน และทำให้เสียชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ การแก้ไขทำโดยการเพิ่มรอยบากบริเวณหัวของชิ้นงานทดสอบทั้งสองด้านโดยใช้มีดคัตเตอร์กรีดลงไป หรือใช้เลื่อยเลื่อยให้เป็นรอย

5.3 ข้อเสนอแนะ

ขั้นตอนการผสมอัตราส่วนผสมต่างๆ หลังจากทีผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนเดี่ยว (Extrusion Molding Machine) ควรนำไปผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ก่อน เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน และเพื่อให้กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้นของส่วนผสม หลังจากนั้นก็นำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding Machine)

เอกสารอ้างอิง

- แมน อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา. (2541). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ ฯ แมคครอฮิล
- สิทธิพร บุญยนิทย์. (2554). การผลิตก้อนเซรามิกเนื้อพรุนสำหรับใช้ปลูกถ่ายทดแทนกระดูกมนุษย์ และการทดสอบทางห้องปฏิบัติการ. สงขลา: หน่วยประสาทศัลยศาสตร์ภาควิชาศัลยศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- กิตติศักดิ์ชัย แนนจันทร์. (2550). การวิเคราะห์เปลือกไข่เปิดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.ปทุมธานี
- มาศกร โทวันนัง. (2553). การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีซิลิกอนในโครงสร้างจากเปลือกไข่ โดยวิธีการตกตะกอน. ขอนแก่น: สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- อนุวัฒน์ และประกาศิต. (2551). คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- บวรลักษณ์ อุณคานนท์. (2553). ชีววัสดุ. สืบค้นเมื่อ 6 กันยายน 2554, จาก <http://elearning.northcm.ac.th/it/lesson1-1.asp>
- บัญชา ธนบุญสมบัติ และศุภกัญญา คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประตูลูกโลก ระดับจุลภาค. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ
- รังสฤษฎ์ คุณวุฒิ. (2553). โครงสร้าง และสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ กับแป้งข้าว. ปรียญานันท์ปริญา วศ.บ. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , เชียงใหม่
- มนัส สติรจินดา. (2541). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นันทวัน มีเย็น และวรางคณา บุชยวิทย์. (2549), X-ray Diffractometer. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2554, จาก <http://tinyurl.com/3pkp99g>
- Ruksudjarit, A. Pengpat, K. Rujijanagul, G. and Tunkasiri, T. (2007). "Synthesis and characterization of nanocrystalline hydroxyapatite from natural bovine bone". Current Applied Physics., 8: 270-272
- Yasuda, (2000). Microstructure and mechanical property of synthesized hydroxyapatite prepared by colloidal process. Biomaterials, 21(20): 2045-2049
- Sobczak A and Kowalski Z. (2009). Preparation of hydroxyapatite from animal bone .Cracow University of Technology, Cracow, Poland Nasser, A. M.B Myung, S. K., Omran, A. M., Sheikh, F. A. and Kim, H. Y. (2009). Extraction of pure natural hydroxyapatite from the bovine bones bio waste three different methods .MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 209: 3408-3415.7
- Weiner, S. and Wagner, H. D. (1998). "The materials bone: structure - mechanical function Relations". Annual Review of Meterials Science, 28 : 271-298.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

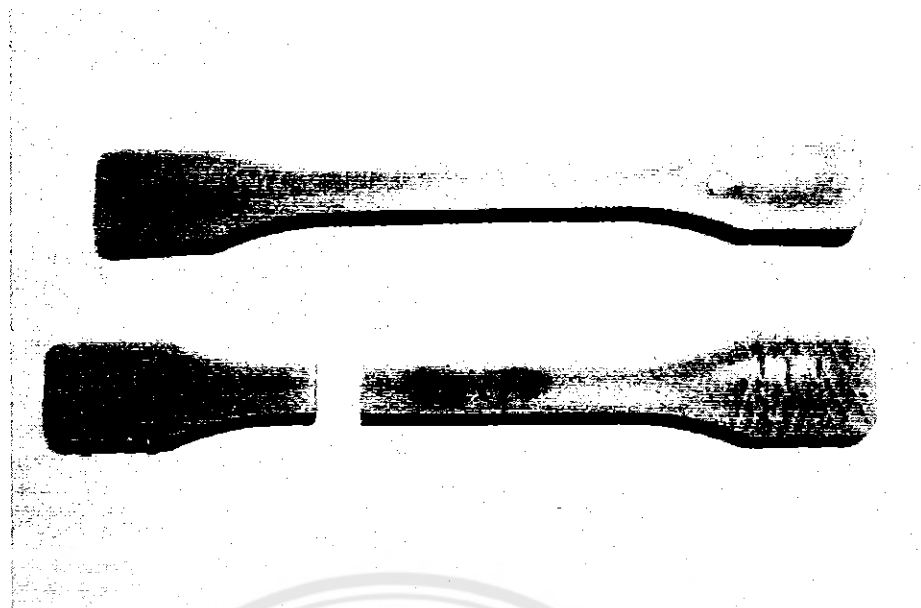
- V. P. Orlovskii, V. S. Komlev and S. M. Barinov. (2002). *Hydroxyapatite and Hydroxyapatite- Based Ceramics*. Russian Academy of Sciences, Ozernaya ul. 48, Moscow, 119361 Russia
- William D. Callister, Jr. (31 ธันวาคม 2551) *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING AN INTRODUCTION*, สืบค้นเมื่อวันที่ 12 สิงหาคม 2554, จาก <http://tinyurl.com/3ggleat>
- Bakar, A. M. S, Cheang, P. and Khor, K. A. (2003). "Tensile properties and microstructural Analysis of spheroidized hydroxyapatite poly(etheretherketone) biocomposite". *Materials Science and Engineering, A*, 345 : 55.
- Evans, S. L. and Gregson, P. J. (1998). "Composite technology in load-bearing orthopaedic Implants". *Biomaterials*. 19 : 1329.
- M. Wang, W. Bonfield. (2000), *Chemically coupled hydroxyapatite-polyethylene-composites: structure and properties*, University of London, London E1 4NS, UK



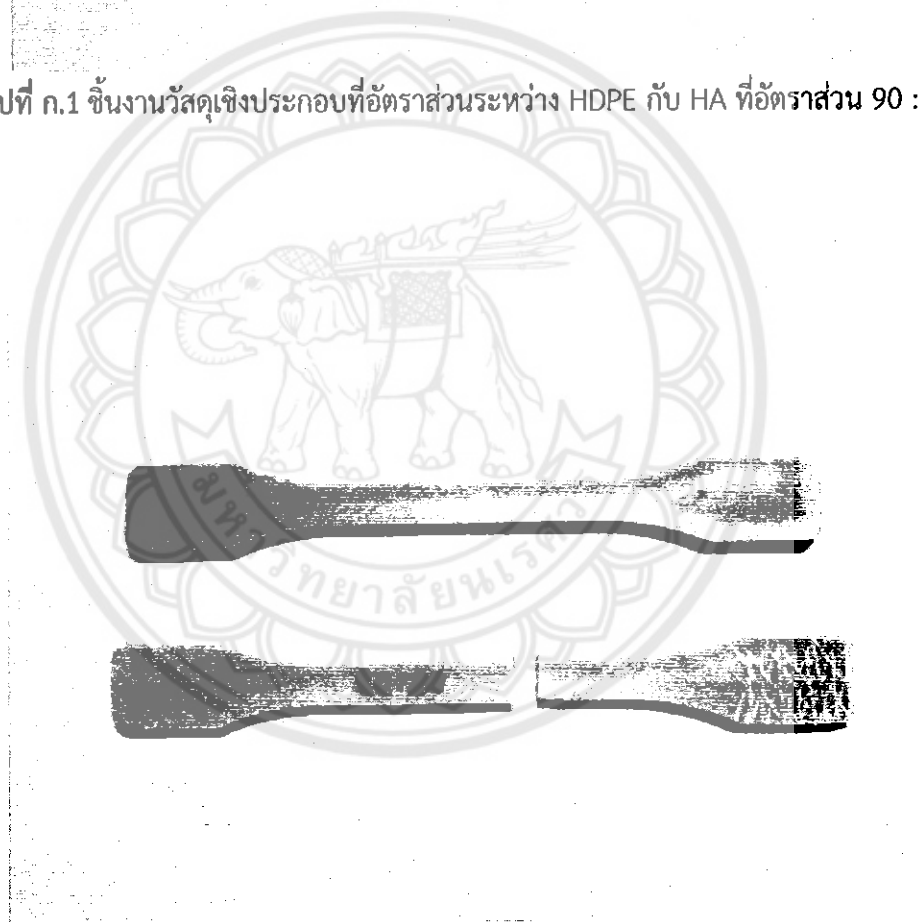


ภาคผนวก ก
รูปชิ้นงานทดสอบ

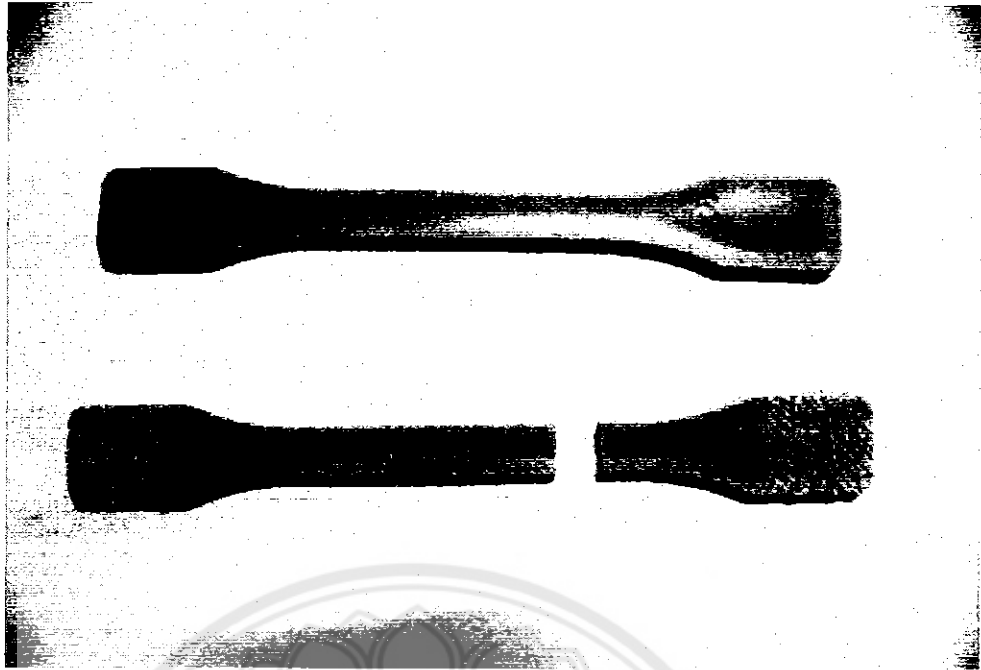
มหาวิทยาลัยพระนคร



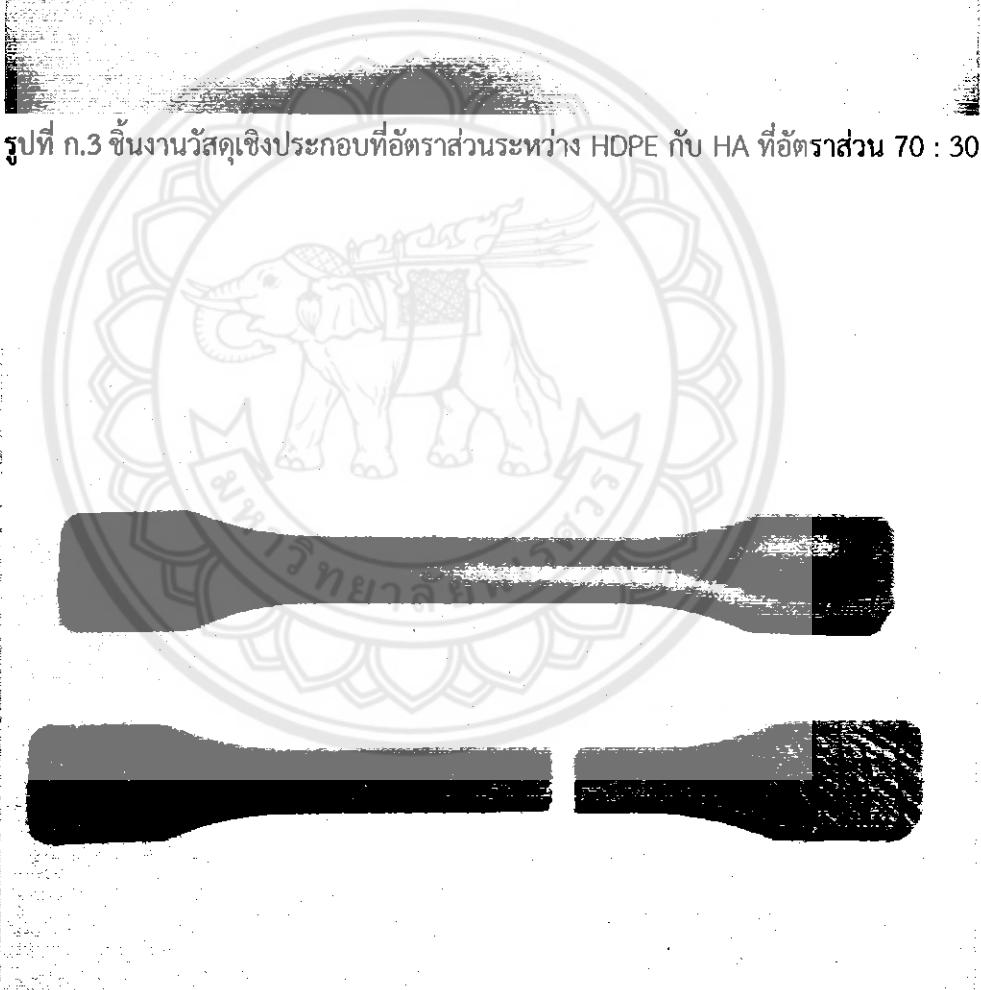
รูปที่ ก.1 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 90 : 10



รูปที่ ก.2 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 80 : 20



รูปที่ ก.3 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 70 : 30



รูปที่ ก.4 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 60 : 40



ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงดึงที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน	ค่าความต้านทานแรงดึงแต่ละชั้นงาน (MPa)				เฉลี่ย	SD
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4		
HDPE : HA						
90 :10	289.83	289.74	293.45	300.48	293.37	5.04
80:20	267.48	271.43	282.4	270.01	272.83	6.58
70:30	272.79	266.8	268.56	271.79	269.98	2.78
60:40	257.39	261.86	260.22	261.47	260.23	2.02

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบสมบัติด้านร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน	ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด				เฉลี่ย	SD
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4		
HDPE : HA						
90:10	308.18	281.96	288.49	265.68	286.01	17.60
80:20	262.18	266.17	284.12	245.46	264.48	15.87
70:30	230.20	189.55	212.46	193.58	206.44	18.72
60:40	168.32	176.94	161.09	138.95	161.325	16.26

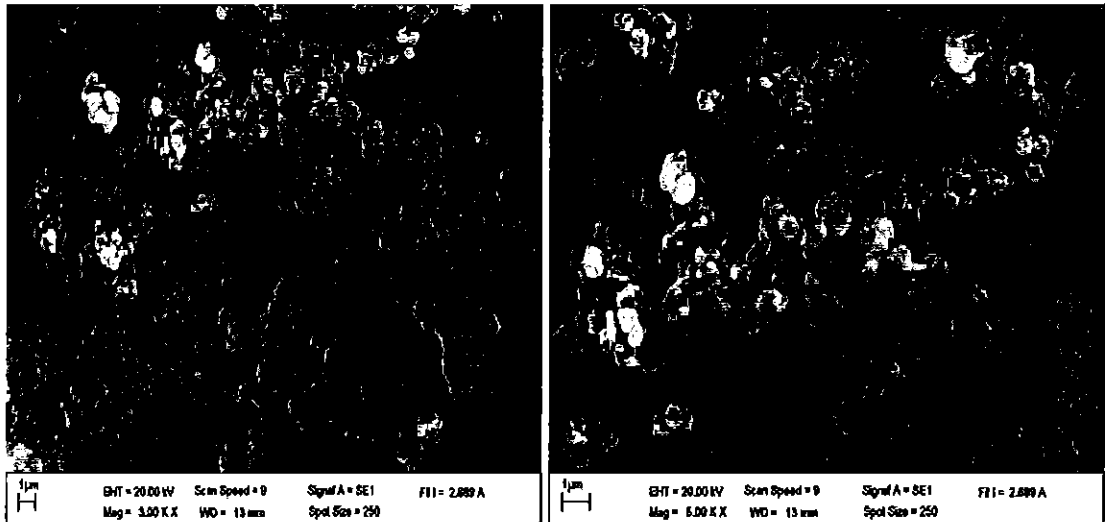
ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบสมบัติด้านมอดุลัสของยังส์ที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน	ค่ามอดุลัสของยังส์ (MPa)				เฉลี่ย	SD
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4		
HDPE : HA						
90:10	287.42	286.97	290.83	297.99	290.80	5.09
80:20	265.77	269.36	280.42	268.29	270.96	6.48
70:30	271.57	265.44	266.84	270.4	268.56	2.89
60:40	256.56	261.03	258.89	260.63	259.27	2.04



ภาคผนวก ค
รูปลักษณะต้นฐานวิทยา

มหาวิทยาลัยพระนคร



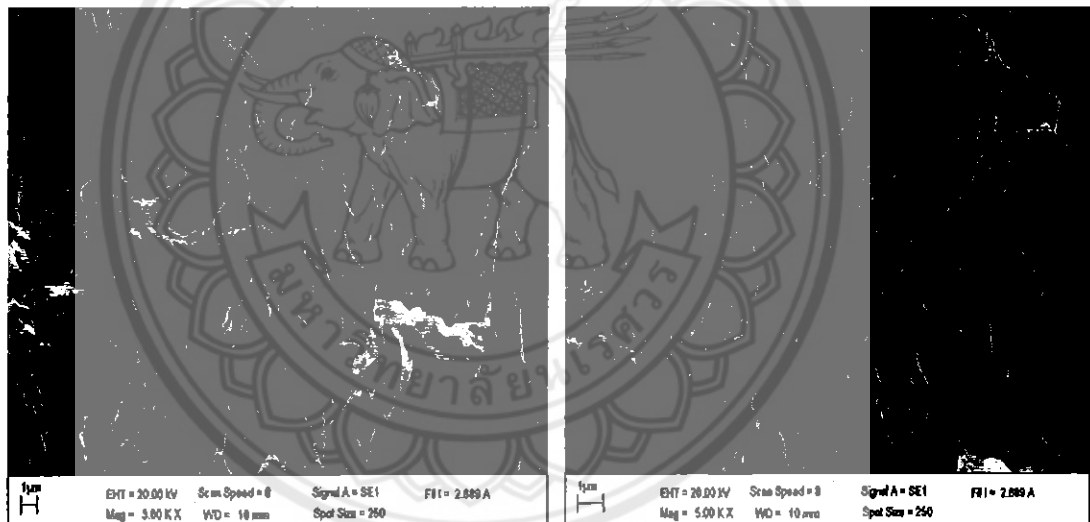
ก)

ข)

รูปที่ ค.1 สัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระดูกวัว

ก) ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ข) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



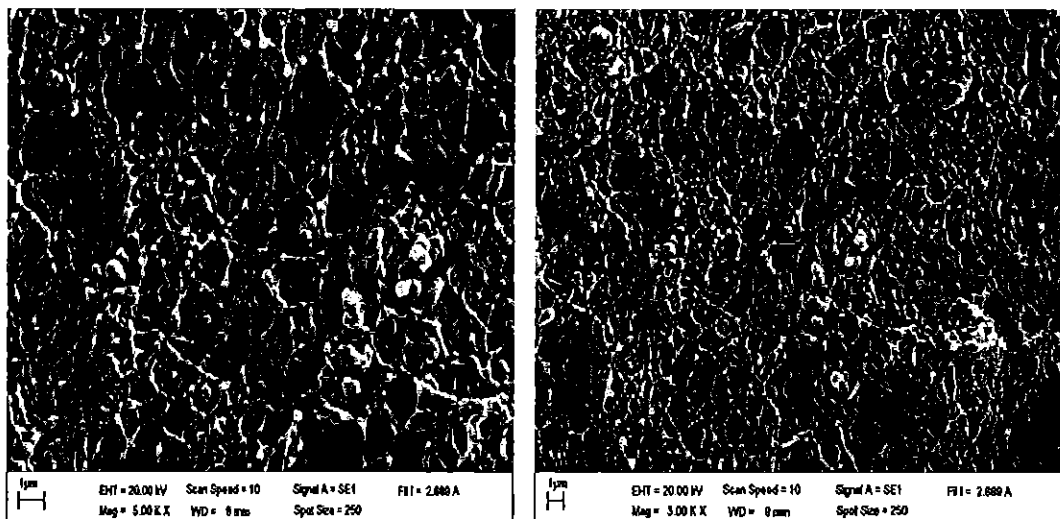
ก)

ข)

รูปที่ ค.2 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 80 : 20

ก) ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ข) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



ก)

ข)

รูปที่ ค.3 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HDPE กับ HA ที่อัตราส่วน 70 : 30

ก) ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ข) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

