

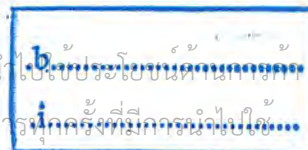
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมและสมบัติความแข็งแรงกคของ
วัสดุประกอบไฮดรอกซีเอปอไทต์กับพอลิไดเอทิลีนเทรพทาเลต



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....55565
วัน,เดือน,ปี.....19 พ.ศ. 2548



Preparation and Compressive strength of
Hydroxyapatite/Polydiethyleneterephthalate Composite



A special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

for the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง/ปัญหาพิเศษเรื่อง การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปอ
ไทต์กับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต

นักศึกษา นางสาวกนกพร เข็มจรรยา
นางสาวกลองทอง จักรวัฒน์ธรรม
นางสาวชาลินี เลี้ยววิชานนท์

ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ปุณณมา สิริพันธ์โนน

ภาควิชา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
ปัญหาพิเศษ/โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร-
บัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด	
กรรมการ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	
กรรมการ ดร.สุภารัตน์ รักชาติ	


.....
(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)
หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมและสมบัติความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต	
นักศึกษา	นางสาวกนกพร	เจียมจรรยาภรณ์
	นางสาวกลองทอง	จักรวิฒนธรรม
	นางสาวชาลินี	เตียงวชิรานนท์
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2546	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ดร. กังนารุช มนต์วิเศษ	

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (HA/pPDET) โดยไฮดรอกซีแอปาทิตสังเคราะห์ด้วยการตกตะกอนจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดฟอสฟอริก ส่วนพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (PDET) สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไดเมทิลเทเรพทาเลตกับไดเอทิลีนไกลคอลโดยใช้พทาเนียมไอโซโพรพอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุประกอบเตรียมได้โดยนำพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตมาละลายในไดคลอโรมีเทน จากนั้นนำผงไฮดรอกซีแอปาทิตมาคลุกผสมกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด แล้วนำมาอัดขึ้นรูปเป็นก้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร และสูง 5 มิลลิเมตร โดยใช้อัตราส่วนของไฮดรอกซีแอปาทิตต่อพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตเท่ากับ 2:1, 3:1 และ 4:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำก้อนวัสดุประกอบไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำวัสดุประกอบที่ได้ไปทดสอบความแข็งแรงกดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ พบว่าวัสดุประกอบที่ได้มีค่าความแข็งแรงกดอัด เท่ากับ 36, 30 และ 28 MPa ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณ PDET เพิ่มขึ้น วัสดุประกอบมีความแข็งแรงกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นสามารถช่วยกระจายแรงกดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation and Compressive strength of Hydroxyapatite/Polydiethyleneterephthalate Composites
Name	Miss Kanokporn Jiamjunyong Miss Klongthong Chakvattanham Miss Chalinee Lengvachiranon
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2003
Special Project Advisor	Dr. Punnama Siriphannon
Special Project co-advisor	Dr. Phathavuth Monvisade

ABSTRACT

This research studied on preparation of hydroxyapatite/polydiethylene terephthalate (HAp/PDET) composites. The hydroxyapatite (HAp) was synthesized from calcium hydroxide and phosphoric acid by coprecipitation method. The polydiethylene terephthalate (PDET) was synthesized by polymerization of dimethylterephthalate and diethylene glycol using titanium isopropoxide as a catalyst. The composites were prepared by dissolving PDET in dichloromethane. Then the HAp Powder was mixed with the PDET paste and pressed to form pellets of 13 mm in diameter and 5 mm in height. The ratios of HAp/PDET were 2:1, 3:1 and 4:1 by weight. The pellets were heated at 80°C for 24 hours. The compressive strengths of composites were tested using an universal testing machine. It was found that the compressive strengths of these composites were about 36, 30 and 28 MPa, respectively. This result indicated that the amount of PDET was increased, the compressive strengths of composites were increased because polymer was flexible and could help to disperse the compressive force.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน และ ดร.ภัทธาวิช มนต์วิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ์ และ ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ พี่สุภาณี ชนะวงศ์ (พี่จ้อย) และพี่ทัศนีย์ อินทรวชิธร (พี่ก้อย) สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ฝ่ายที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องของอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ พี่ปริญญานาโททุกท่าน ที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องของอุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมีต่าง ๆ ตลอดจนคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ที่ห่วงใย และช่วยอำนวยความสะดวก จุนเจือดูแลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ซึ่งมีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

กนกพร	เจียมจรรยาดี
กลองทอง	จักร วัฒนธรรม
ชาลินี	เสี้ยว วิจารณ์นท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ไฮดรอกซีเอปาทิต (Hydroxyapatite, HAp)	3
2.1.1 โครงสร้างผลึกไฮดรอกซีเอปาทิต	4
2.1.2 ความสามารถในการละลายของไฮดรอกซีเอปาทิต	6
2.1.3 สารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่นๆ	7
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานของไฮดรอกซีเอปาทิต	10
2.2 พอลิเอสเทอร์	12
2.2.1 อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester)	13
2.2.2 อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (Aromatic polyester)	14
2.3 การประยุกต์ใช้งานวัสดุประกอบในร่างกายมนุษย์	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง	21
3.3 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิต (HAp)	24
3.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านการพอลิเมอไรซ์แบบควบแน่น	26
3.5 การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีน เทเรพทาเลต (Composite HAp/PDET) แบบคลุกผสม	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	30
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีแอปาทิต (HAp) ที่สังเคราะห์ได้	30
4.2 การสังเคราะห์พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (PDET)	31
4.3 การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีน เทเรพทาเลต (HAp/PDET)	37
4.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต	37
4.4.1 ผลของฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)	37
4.4.2 ผลของเทอร์โมแกรมจากเครื่อง TGA	39
4.4.3 ผลของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนสเปกตรัม	43
4.4.4 ผลของเจลเพอิมิเอชันโครมาโทกราฟี (GPC)	44
4.4.5 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD	45
4.4.6 ค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบที่มีอัตราส่วน HAp/PDET ต่างๆ	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	47
5.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิต	47
5.2 การสังเคราะห์พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต	47
5.3 การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีน เทเรพทาเลต (HAp/PDET)	47
5.4 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก ก อินฟราเรดสเปกตรา	51
ภาคผนวก ข สมบัติความแข็งแรงกด	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีอัตราส่วน โมลของ Ca : P ที่แตกต่างกัน	7
ตารางที่ 2.2 สมบัติและการประยุกต์ใช้เส้นใยพอลิเอสเตอร์ในงานทางด้านต่าง ๆ ใน ประเทศสหรัฐอเมริกา	12
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งพีก FT-IR ของพอลิเมอร์จากวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PDET ที่สภาวะ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วน HAp:PDET ต่างๆ	37
ตารางที่ 4.2 เฟอร์เรนต์โดยน้ำหนักของ PDET ในวัสดุประกอบ HAp/PDET ที่สภาวะ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วน HAp:PDET ต่างๆ	39
ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงกดที่สภาวะต่างๆ	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ของไฮดรอกซีเอปาทิต	5
รูปที่ 2.2 ภาพฉายด้านบนของ โครงสร้างผลึกไฮดรอกซีเอปาทิต	6
รูปที่ 2.3 กระดุมมนุษย์	11
รูปที่ 2.4 ไฮดรอกซีเอปาทิต	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET)	14
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนของปฏิกิริยาในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต	15
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ผ่านการอัดสำหรับ XRF	23
รูปที่ 3.2 แผนงานการสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอปาทิต	25
รูปที่ 3.3 แผนงานการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น	27
รูปที่ 3.4 แผนงานการสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่าง HAp กับ PDET แบบคลุกผสม	29
รูปที่ 4.1 ภาพเทิร์นการเดี่ยวเบนริงส์เอ็กซ์ของไฮดรอกซีเอปาทิต ภายหลังจากเผาที่ 1100 °C แล้วอัดขึ้นรูป	30
รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่าง ไดเมทิลีนเทเรพทาเลตกับ ไดเอทิลีนไกลคอล	31
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต	33
รูปที่ 4.4 เทอร์โมแกรมจากเครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต	34
รูปที่ 4.5 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัมของพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต	35
รูปที่ 4.6 โครมาโทแกรมจากเทคนิค GPC ของพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต	36
รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุประกอบที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ	38
รูปที่ 4.8 เทอร์โมแกรมที่ได้จากเทคนิค TGA ของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1	40
รูปที่ 4.9 เทอร์โมแกรมที่ได้จากเทคนิค TGA ของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80 °C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 3:1	41
รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมที่ได้จากเทคนิค TGA ของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80 °C	
เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 4:1	42
รูปที่ 4.11 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัมของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80°C	
เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1	43
รูปที่ 4.12 โดอะแกรมจากเทคนิค GPC ของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80 °C	
เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1	44
รูปที่ 4.13 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบ HAp/PDET ที่สังเคราะห์จากสภาวะ 80 °C ใช้เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CDP	Cyclodepolymerisation
DSC	Differential scanning calorimetry
FT-IR	Fourier transform infrared spectrophotometry
GPC	Gel permeation chromatography
HAp	Hydroxyapatite
HAPEX™	วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีน
IR	Infrared spectrometry
M_n	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน
M_w	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก
MW	น้ำหนักโมเลกุล
MWD	การกระจายน้ำหนักโมเลกุล
NMR	Nuclear magnetic resonance spectroscopy
PBN	Poly(butylene 2,6-naphthalenedicarboxylate)
PBT	Polybutylene terephthalate
PCL	Polycaprolactone
PDET	Polydiethylene terephthalate
PE	Polyethylene
PET	Polyethylene terephthalate
pKs	ค่าการละลายในน้ำกลั่น
PMMA	Poly(methyl methacrylate)
ppm	ส่วนในล้านส่วน
PVC	Polyvinylchloride
ROP	Ring-opening polymerisation
SEC	Size exclusion chromatography
SEM	Scanning electron microscopy
T_g	Glass transition temperature
T_m	Melting temperature
TGA	Thermogravimetric analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TGA	Thermogravimetric analysis
TTCP	Tetracalcium phosphate
XRD	X-ray diffraction
XRF	X-ray fluorescence



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันมีกิจกรรมมากมายที่ทำให้มนุษย์ต้องเสี่ยงอันตราย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดอุบัติเหตุต่าง ๆ ตามมา อาจทำให้เกิดการบาดเจ็บเล็กน้อยจนถึงมีอาการสาหัส และบางรายอาจทำให้กระดูกแตกหักในที่สุด ในทางการแพทย์ได้มีวิธีการแก้ไขโดยหาวัสดุอื่นมาทดแทนกระดูกที่แตกหักไป วัสดุที่นำมาใช้ควรต้องมีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับกระดูกตามธรรมชาติ โดยปกติกระดูกในร่างกายมนุษย์จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแร่ธาตุและเนื้อเยื่อ โดยส่วนที่เป็นแร่ธาตุเป็นสารอนินทรีย์จะมีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก ซึ่งประกอบด้วยไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) เป็นส่วนใหญ่ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่นิยมนำไฮดรอกซีแอปาทิตมาเป็นสารทดแทนกระดูกหรือวัสดุชีวภาพ โดยไม่เป็นพิษต่อร่างกายของมนุษย์ ทั้งนี้เพื่อซ่อมแซมกระดูกที่แตกหักไปโดยทำเป็นชิ้นส่วนขึ้นมาทดแทน แต่ไฮดรอกซีแอปาทิตมีข้อด้อยคือการขึ้นรูปยากและสมบัติเชิงกลต่ำ จึงมีการนำวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี หาได้ง่าย และราคาไม่แพง มาขึ้นรูปร่วมกับไฮดรอกซีแอปาทิต เพื่อผลิตเป็นวัสดุประกอบ (Composite) โดยสามารถแก้ไขข้อด้อยของไฮดรอกซีแอปาทิตได้ ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ เช่น พอลิเมทิลเมทาอะครีเลต (PMMA) [1] พอลิเอทิลีน (PE) [2] และ พอลิคลอไรด์โพลีโพรพิลีน (PCL) [3] เป็นต้น

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงต้น ทำให้เกิดโครงงานวิจัยนี้ขึ้นมาเพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต และศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงกด เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมไฮดรอกซีแอปาทิต (HAp) และ พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (PDET) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมวัสดุประกอบ
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุประกอบของไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (HAp/PDET) ด้วยวิธีการคลุกอัด
3. ตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลและศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิไคเอทิลีนเทเรพทาเลต โดยทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์และพอลิไคเอทิลีนเทเรพทาเลต จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้มาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ และทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิไคเอทิลีนเทเรพทาเลตโดยการคลุกผสม นำวัสดุประกอบที่ได้มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ และสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกด ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิไคเอทิลีนเทเรพทาเลตมาใช้ในการผลิตวัสดุชีวภาพเพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์
2. ทำให้ทราบถึงผลของพอลิเมอร์ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบ
3. ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้มาใช้กับร่างกายมนุษย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ไฮดรอกซีเอปาทิต (Hydroxyapatite, HAp)

กระดูกประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนที่สำคัญ คือ [4]

1. ส่วนที่เป็นแร่ธาตุ (สารอนินทรีย์)
2. เนื้อเยื่อ (Tissues)

ส่วนที่เป็นแร่ธาตุคือ สารอนินทรีย์มีส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก ซึ่งประกอบไปด้วยสารไฮดรอกซีเอปาทิตเป็นหลัก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่นิยมนำสารตัวนี้มาใช้เป็นสารทดแทนกระดูก

ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อนั้นประกอบด้วย สารอินทรีย์ ซึ่งจะมีเซลล์ สารจำพวกไขมัน และพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) คอลลาเจน (Collagen) พอลิฟอสเฟต (Polyphosphates) เป็นต้น

การเตรียมสารไฮดรอกซีเอปาทิต

สามารถเตรียมได้จาก 3 แหล่ง คือ [4]

1. จากสารเคมี เช่น แคลเซียมไนเตรดและทองโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้น
2. จากปะการัง โดยนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนเป็นสารไฮดรอกซีเอปาทิต แต่ปะการังมีปริมาณน้อยและเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงไม่นิยมนำมาใช้
3. จากกระดูกสัตว์ เช่น โค กระบือ หัง ปลา สุนัข รามทั้งจากมนุษย์ โดยมากนิยมใช้กระดูกโคและกระดูกหมูมากกว่า เนื่องจากมีปริมาณมากและเป็นสัตว์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์อยู่แล้ว ทั้งการใช้แรงงานและการบริโภค

สมบัติของไฮดรอกซีเอปาทิต [5]

- ไฮดรอกซีเอปาทิตเป็นสารประกอบที่ไม่เสถียรต่อความร้อน สลายตัวที่อุณหภูมิ 800-1200 °C ขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมี
- โดยทั่วไปไฮดรอกซีเอปาทิตมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องรับน้ำหนักมากๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 โครงสร้างผลึกไฮดรอกซีแอสพาไทต์ [6]

สารไฮดรอกซีแอสพาไทต์เป็นสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate) มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ มีอัตราส่วน Ca : P เป็น 1.67 : 1 คำว่า ไฮดรอกซีแอสพาไทต์ มาจากคำว่า ไฮดรอกซี (Hydroxy) ซึ่งหมายถึง ไฮดรอกซีไอออน (Hydroxy ion) และคำว่า แอสพาไทต์ (Apatite) เป็นชื่อผลึกแร่ธาตุที่มีองค์ประกอบดังนี้ $\text{M}_{10}(\text{ZO}_4)_6\text{X}_2$

สารประกอบแอสพาไทต์ (Apatite compound) มีส่วนประกอบแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับไอออนที่เข้าแทนที่ในตำแหน่ง M Z และ X ซึ่งไอออนที่เป็นไปได้ในการแทนที่ ได้แก่

M = Ca, Sr, Ba, Cd, Pb, Mg, Na, K, H, D ฯลฯ

Z = P, V, As, S, Si, Ge, Cr, B ฯลฯ

X = OH, OD, CO_3 , O, BO_3 , F, Cl, Br, Vacancy ฯลฯ

สูตรเคมี

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

ระบบผลึก (Crystal system)

Lattice Constants

Chemical Unit Number

ความหนาแน่น (Density)

$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$

MW = 1004.8

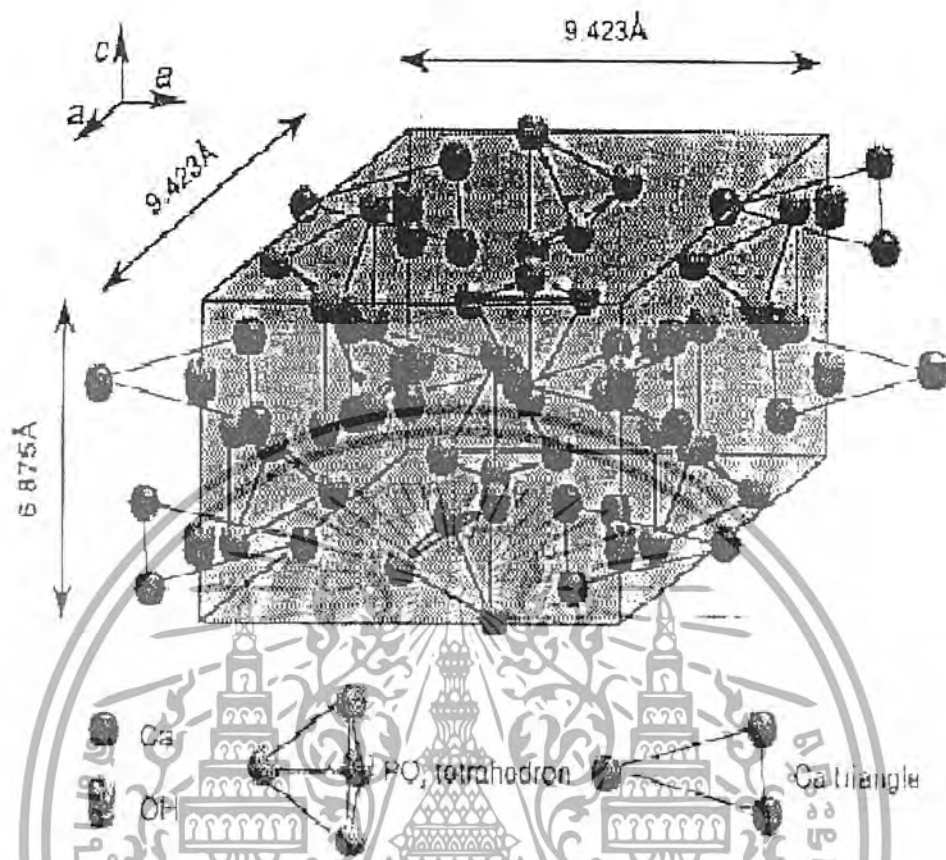
Hexagonal

a = 9.423, c = 6.875 Å

Z = 1

D = 3.16 g/cm³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ของไฮดรอกซีแอปาทิต

รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ของไฮดรอกซีแอปาทิต โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บริเวณมุมที่ฐานรอมบิก (Rhombic) ของหน่วยเซลล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นคอลัมน์ในที่ว่างซึ่งมีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงของหน่วยเซลล์ คอลัมน์ของหมู่ไฮดรอกซิลถูกล้อมรอบด้วยแคลเซียมไอออน 6 ไอออน ที่จัดเรียงตัวในลักษณะ 3 เหลี่ยมด้านเท่า 2 รูปตั้งฉากกับคอลัมน์ของไฮดรอกซิล โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นศูนย์กลาง แคลเซียมไอออนอีก 4 ไอออนที่เหลือจะเรียงต่อเป็นคอลัมน์ 2 คอลัมน์ระหว่างสามเหลี่ยมด้านเท่าของแคลเซียมไอออน ขนานกับคอลัมน์ของไฮดรอกซิล แคลเซียมไอออนเหล่านี้ถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนของออร์โทฟอสเฟตเตตระฮีดรอล (Orthophosphate tetrahedral)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายด้านบนของโครงสร้างผลึกไฮดรอกซีเอปาทิต

2.1.2 ความสามารถในการละลายของไฮดรอกซีเอปาทิต [6]

ไฮดรอกซีเอปาทิตสามารถละลายน้ำได้ในกรดอะซิติกและละลายได้เล็กน้อยในน้ำกลั่น แต่ไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอัลคาไลน์ โดยมีค่าการละลายในน้ำกลั่น (pKs) ประมาณ 120

$$pKs = -\log([Ca]^{10}[PO_4]^6[OH]^{-2}) \approx 120$$

ความสามารถในการละลายในน้ำกลั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แต่ความสามารถในการละลายของไฮดรอกซีเอปาทิตจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีกรดอะมิโน โพรตีน เอนไซม์ และสารอินทรีย์อื่นๆ สมบัติด้านการละลายนี้สัมพันธ์กับความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) กับเนื้อเยื่อ และปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบอื่นๆ อย่างไรก็ตาม อัตราของการละลายยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูปร่าง ความมีรูพรุน ขนาดผลึก ความเป็นผลึก และการเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปเนื่องจากความเครียด (Strain defects) เมื่อนำไฮดรอกซีแอปพาไทต์ไปเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.1.3 สารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่นๆ [7]

นอกจากไฮดรอกซีแอปพาไทต์ ยังมีสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตอีกหลายชนิดที่เข้ามามีบทบาทในงานวิจัยด้านวัสดุทางการแพทย์และอวัยวะเทียม สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเหล่านี้ แตกต่างกันที่อัตราส่วน โมลของ Ca : P ในโครงสร้างและชนิดของไอออนองค์ประกอบอื่นๆ ตัวอย่างของแคลเซียมฟอสเฟตบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่มีอัตราส่วน โมลของ Ca : P ที่แตกต่างกัน

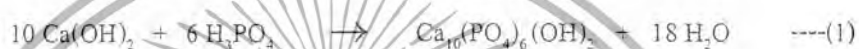
สูตร	ชื่อ	อักษรย่อ	Ca : P
$\text{CaO}(\text{PO}_4)_2$	Tetracalcium phosphate (Hilgentschite)	TeCP (TTCP)	2.0
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Hydroxyapatite	HAp	1.67
$\text{Ca}_{10-x}\text{H}_{2x}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	Amorphous calcium phosphate	ACP	
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Tricalcium phosphate (α, β, γ)	TCP	1.50
$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Octacalcium phosphate	OCP	1.33
$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Dicalcium phosphate dihydrate (Brushite)	DCPD	1.0
CaHPO_4	Dicalcium phosphate (Monelite)	DCP	1.0
$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$	Calcium pyrophosphate (α, β, γ)	CPP	1.0
$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Calcium pyrophosphate dihydrate	CPPD	1.0
$\text{Ca}_7(\text{P}_5\text{O}_{16})_2$	Heptacalcium pyrophosphate (Tromelite)	HCP	0.7
$\text{Ca}_4\text{H}_2\text{P}_6\text{O}_{24}$	Tetracalcium dihydrogen phosphate	TDHP	0.67
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Monocalcium phosphate monohydrate	MCPM	0.5
$\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$	Calcium metaphosphate (α, β, γ)	CMP	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสาร HAp ด้วยวิธีทางเคมี มี 5 วิธี คือ วิธีทางเคมีโดยการตกตะกอน (Precipitation method) วิธีไฮโดรไลซิส (Hydrolysis method) การใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) วิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method) และวิธีอัลคอกไซด์ (Alkoxide method) แต่ละวิธีการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [8]

1. การตกตะกอน (Precipitation method)

การสังเคราะห์ HAp โดยวิธีการตกตะกอนโดยทั่วไปจะเป็นไปตามวิธีของ Rathje [9] และ Hayek กับ Newesely [10] วิธีของ Rathje เป็นการเติมกรดฟอสฟอริกลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปั่นกวนอยู่ ดังสมการ (1)



ได้มีการปรับปรุงวิธีการตกตะกอนในสมการที่ (1) โดยการทำให้ปฏิกิริยามีความเป็นเบสสูงเพื่อให้เกิด HAp ได้ดีด้วยการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับ ดังวิธีของ Hayek กับ Newesely ในสมการที่ (2)



วิธีนี้ค่า pH และความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้จะมีผลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของสารที่สังเคราะห์ได้ สารตั้งต้นสามารถใช้ CaCO_3 , CaC_2O_4 , CaCl_2 หรือ Ca(OH)_2 แทน $\text{Ca(NO}_3)_2$ และในทำนองเดียวกันสามารถใช้ $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$, K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4 แทน $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ นอกจากนี้ยังมีการเสนอให้ใช้แคลเซียมอะซิเตต ($\text{Ca}(\text{COOH})_2$) แทนแคลเซียมคลอไรด์หรือแคลเซียมไนเตรต เนื่องจากไอออนอะซิเตตจะไม่รวมเข้าด้วยกันกับ HAp เหมือนไอออนไนเตรตหรือไอออนคลอไรด์ที่อาจรวมเข้ากับ HAp ได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอนจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้อง (24°C) ถึงจุดเดือด ($95-100^\circ\text{C}$)

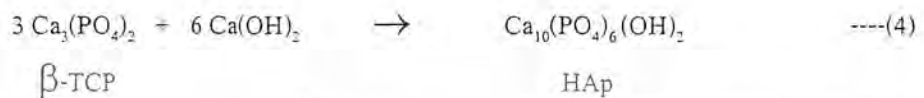
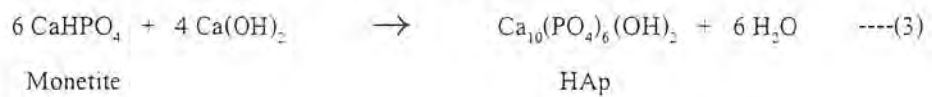
2. การใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis method)

HAp สามารถเตรียมได้จากใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกรดแคลเซียมฟอสเฟต เช่น ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ออกตะแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_5\text{H}_8(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ไดแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) ฯลฯ ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ HAp สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือโซเดียมฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)

HAp สามารถเตรียมได้จากการใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ได้ดังนี้



โดยนำสารประกอบแคลเซียมทั้งสองมาผสมกัน ทำการกวดอัดและนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 950 °C

4. วิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method)

ปฏิกิริยาในสมการที่ (3) และ (4) สามารถใช้ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลได้ที่อุณหภูมิ 275 °C ภายใต้ความดันไอน้ำ 12,000 psi นอกจากนี้ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ TTCP ยังสามารถเปลี่ยนเป็น HAp ได้ง่ายในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลภายใต้สภาวะนี้

CaCO_3 เมื่อทำปฏิกิริยากับ CaHPO_4 หรือ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสามารถเปลี่ยนไปเป็น HAp ได้ง่าย ดังสมการ



5. วิธีอัลคอกไซด์ (Alkoxide)

วิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมไฮดรอกซีอะปาทิตให้เป็นฟิล์มบางๆ โดยใช้แคลเซียมไนเตรดเตรียมไฮดรอกไซด์กับไตรเมทิลฟอสเฟต ละลายในเอทานอล จะได้ HAp ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การประยุกต์ใช้งานของไฮดรอกซีแอปาทิต

รูปแบบการนำสารไฮดรอกซีแอปาทิตไปใช้ทดแทนกระดูกในต่างประเทศ

การนำสารไฮดรอกซีแอปาทิตไปใช้งานแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ [4]

1. แบบผง สำหรับใช้เพื่อเคลือบลงบนโลหะที่เป็นส่วนประกอบหลักของข้อสะโพกเทียม หรือรากฟันเทียม หรือนำไปผสมกับวัสดุชนิดอื่น เช่น พอลิเมอร์ เพื่อใช้ทำกระดูกเทียม ซึ่งช่วยผู้ป่วยที่สูญเสียการได้ยินให้สามารถได้ยินเสียงดีขึ้น
2. แบบเป็นชิ้นเนื้อแน่น มีการนำไปใช้เป็นกระดูกเสริมช่องว่างทางด้านศัลยกรรมกระดูกและไขข้อ
3. แบบเป็นรูพรุน ใช้งานเป็นวัสดุทดแทนกระดูก เป็นตัวเติมทางด้านศัลยกรรมกระดูกและไขข้อ

ทั้งนี้ การนำไปใช้งานในส่วนใดของร่างกายนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะในการรับน้ำหนักของกระดูกในส่วนนั้นด้วย

ลักษณะการนำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้งานนั้น จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ [4]

1. วัสดุการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะทำหน้าที่ทดแทนอวัยวะนั้นๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเนื้อเยื่อส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย
2. วัสดุการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะต้องมีส่วนรวม หรือมีหน้าที่สัมพันธ์กับอวัยวะหรือส่วนต่างๆ ที่อยู่ในร่างกาย แต่ต้องไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อในร่างกาย

คุณสมบัติเฉพาะของสารไฮดรอกซีแอปาทิตนี้สามารถนำไปใช้ในร่างกาย เพื่อทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุหรืออุปกรณ์การแพทย์กับเซลล์กระดูกคนไข้ได้ดี

สารไฮดรอกซีแอปาทิตแบบผง [4] สามารถใช้เคลือบลงบนข้อสะโพกเทียมในส่วนที่เป็นแกนโลหะ เพื่อให้โลหะทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวภายในร่างกายที่โดยปกติจะมีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ อยู่แล้ว และหากเกิดการเจ็บป่วย สภาพภายในร่างกายก็จะเป็นกรดยิ่งขึ้น ดังนั้นการใช้สารไฮดรอกซีแอปาทิตเคลือบบนผิวข้อสะโพกเทียมจะทำให้อุปกรณ์มีความทนทานมากยิ่งขึ้น และยังช่วยสร้างพันธะระหว่างข้อสะโพกเทียมกับกระดูกของผู้ป่วยด้วย

สารไฮดรอกซีแอปาทิตแบบชิ้นเนื้อแน่น [4] จะมีสมบัติทางกลดีกว่าแบบรูพรุน จึงสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า การนำไปใช้งานมักนำไปทดแทนในส่วนกระดูกสันหลังของผู้ป่วย สารไฮดรอกซีแอปาทิตจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อให้มาเกาะ และทำให้ระบบในร่างกายทำงานได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารไฮดรอกซีแอปาทาท์แบบรูพรุน [4] เป็นที่ต้องการมากที่สุด ใช้เป็นตัวเติมแทนกระดูกของผู้ป่วย สำหรับบริเวณต่างๆ ของร่างกายที่มีการสูญเสียกระดูกไม่ว่าจะเนื่องมาจาก โรคมะเร็ง การติดเชื้อ หรืออุบัติเหตุก็ตาม โดยอาศัยความเป็นรูพรุนทำให้เซลล์และเลือดนำพาแร่ธาตุต่างๆ เข้าไปได้ อย่างทั่วถึง ช่วยทำให้เกิดการสร้างกระดูกเชื่อมต่อได้ดี

นอกจากนี้ในการวิจัยสามารถสังเคราะห์สารไฮดรอกซีแอปาทาท์และสารในเครือแคลเซียมฟอสเฟตอื่นๆ โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลผลิตจากอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์ได้



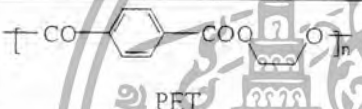


รูปที่ 2.4 ไฮดรอกซีแอปาทาท์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พอลิเอสเตอร์

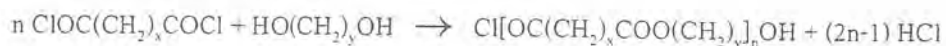
พอลิเอสเตอร์ (Polyester) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาควมนั่นชนิดแรกซึ่งทำการศึกษาโดย Carothers และผู้ร่วมกลุ่มวิจัย [12] ในตอนต้นค.ศ. 1930 และเนื่องจากพอลิเอสเตอร์มีสมบัติที่มีความสามารถทนทานต่อการขูดถูเสียดสีได้ดี และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการผลิตเป็นเส้นใยและฟิล์ม ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอสเตอร์ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติและการประยุกต์ใช้เส้นใยพอลิเอสเตอร์ในงานทางด้านต่างๆในประเทศสหรัฐอเมริกา [12]

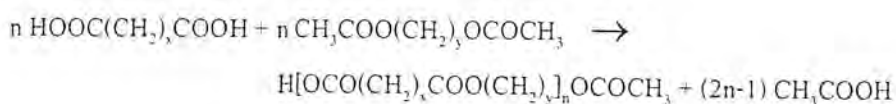
ชื่อและ โครงสร้าง	ความหนาแน่น (g/cm ³)	T _m (°C)	T _g (°C)	การใช้งาน
 PET	1.36 + 1.38	265	70-80	เสื้อผ้าและขวดน้ำดื่ม
 PBT	1.31	224	40	สวิตช์ และชิ้นส่วน โทรทัศน์
 PCT	1.22 + 1.23	290-195	60-80	แผงวงจรไฟฟ้าและชิ้น ส่วนรถยนต์

พอลิเอสเตอร์สามารถสังเคราะห์ได้โดยแบ่งตามลักษณะของสารตั้งต้นได้หลายวิธี ได้แก่

1. Acid chloride synthesis [13]

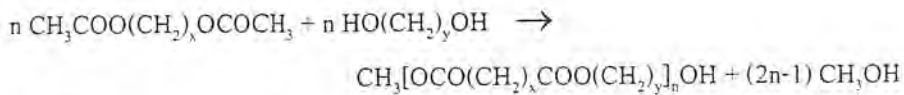


2. Acid exchange [13]

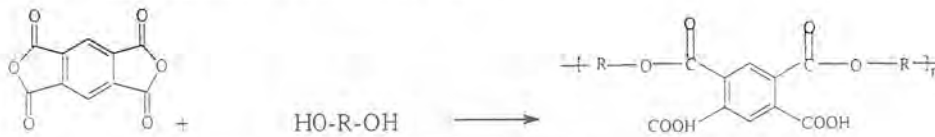


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Ester exchange [13]



4. Ring - opening of dianhydrides [12]



5. Ring - opening of lactones [12]



2.2.1 อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) [14]

อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ โดยทั่วไปสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ของไดแอซิด (Diacid) หรือ ไดเอสเทอร์ (Diester) กับ ไดออล (Diol) ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนอะดิเปต (Poly(ethylene adipate)) โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างกรดอะดิปิก (Adipic acid) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) โดยมีการกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจกปฏิกิริยา



นอกจากนี้ อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ยังสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาการเปิดวง เช่น ปฏิกิริยาการเปิดวงของ ε-caprolactone ได้ Poly-ε-caprolactone เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่ง Poly-ε-caprolactone นี้มักใช้เป็นสารมัธยันต์ในการผลิตพอลิยูรีเทน และใช้เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ทำให้ PVC นุ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.2.2 อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (Aromatic polyester)

พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต หรือ PET เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่สำคัญ และเป็นพอลิเอสเทอร์ที่ผลิตกันมากที่สุดในเชิงการค้า ซึ่งสามารถใช้ได้ในหลายรูปแบบ เช่น ในรูปของเส้นใย ที่รู้จักกันดีในชื่อ Dacron ในรูปของฟิล์ม ที่เรียกว่า Mylar ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เหนียว และแข็งแรง นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนา PET ชนิดที่มีการตกผลึกเร็วสำหรับใช้เป็นขวดบรรจุเครื่องดื่มประเภทคาร์บอนเนต เนื่องจากมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET)

พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต สามารถเตรียมได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกของการบวนการจะเกิดเป็นสารประกอบ โอลิโกเมอร์ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) โดยตรงของกรดเทเรพทาติก (Terephthalic acid, TPA) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) หรือการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ของไดเมทิลเทเรพทาเลต (Dimethyl terephthalate, DMT) กับเอทิลีนไกลคอล โดยถ้าเริ่มจากไดเมทิลเทเรพทาเลตต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Acetates ของ Li Ca Mg Zn หรือ Pb Ti(OR)₄ PbO ที่อุณหภูมิ 190-220 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และมีการกำจัดเมทานอลออกระหว่างทำปฏิกิริยา และถ้าเริ่มจากกรดเทเรพทาติก (Terephthalic acid, TPA) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 190-220 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บรรยากาศ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและมีการกำจัดน้ำออกระหว่างทำปฏิกิริยา ซึ่งทั้ง 2 ปฏิกิริยานี้ต่างให้สารประกอบโอลิโกเมอร์ตัวเดียวกัน คือ Bis(β-hydroxyethyl) terephthalate (BHET)

ส่วนในขั้นตอนที่สอง เกิดขึ้นจากการนำสารประกอบโอลิโกเมอร์ที่ได้ในขั้นตอนแรกมาใช้เป็นมอนอเมอร์ในการทำปฏิกิริยาควบแน่น (Polycondensation) ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Sb acetate Oxide ของ Sb Ge Ti(OR)₄ ที่อุณหภูมิ 275-285°C โดยมีการกำจัดเอทิลีนไกลคอลออกระหว่างการทำปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การประยุกต์ใช้งานวัสดุประกอบในร่างกายมนุษย์ [15]

วัสดุทางชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็น หลอดเลือดเทียม ข้อเทียม หรือวัสดุอุดฟัน ล้วนเป็นวัสดุที่สร้างขึ้นเพื่อซ่อมแซมหรือทดแทนส่วนต่างๆ ของร่างกายที่บกพร่อง ข้อสะโพกเทียมนับเป็นตัวอย่างหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดเจน นับแต่ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในช่วงปี 1950 ที่ประเทศอังกฤษ โดย Sir John Charnley จากนั้นมีผู้ป่วยในอังกฤษเป็นจำนวนถึง 40,000 คนต่อปี และประมาณเกือบครึ่งล้านของประชากรโลกที่เข้ารับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อสะโพกเทียม ข้อสะโพกเทียมโดยทั่วไปแล้วประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นโลหะและพลาสติก โลหะอาจทำขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L โลหะผสมของโคบอลต์-โครเมียม หรือ โลหะผสมของไททานเนียม-อลูมิเนียม-วานาเดียม ส่วนพลาสติกมักทำจาก Ultra high molecular weight polyethylene จะมีลักษณะเป็นรูปครึ่งทรงกลมทั้ง 2 ส่วนจะถูกทำให้อยู่กับที่ด้วยซีเมนต์เชื่อมกระดูกซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภท Poly(methylmethacrylate) (PMMA) ปัจจุบันนี้ ศัลยแพทย์พยายามหลีกเลี่ยงการใช้ PMMA และหันมาใช้ในการยึดติดด้วยวิธีอื่น เช่น การเคลือบผิวของวัสดุด้วย Hydroxyapatite (HAp) หรือด้วยโลหะที่มีรูพรุนเพื่อหวังให้เนื้อเยื่อกระดูกเจริญเข้าไปยึดติดกับตัววัสดุได้ ความสำเร็จการสำรวจคนไข้ที่เข้ารับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อสะโพกเทียมในประเทศอังกฤษ พบว่าประมาณ 18% ของผู้ป่วยต้องเข้าทำการผ่าตัดซ้ำ สาเหตุของการผ่าตัดซ้ำไม่ได้เกิดเนื่องจากการแตกหักของข้อเทียมโดยตรง แต่เกิดจากผลการคอบสนองของร่างกายที่มีต่อวัสดุ ส่วนโลหะของข้อเทียมที่ฝังอยู่ในกระดูกจะช่วยรับแรงที่กระทำต่อกระดูกไปเป็นส่วนใหญ่ และด้วยความแตกต่างระหว่างสมบัติเชิงกลของโลหะและกระดูกนี้เอง จะทำให้กระดูกที่อยู่บริเวณรอบๆ วัสดุเกิดการสลายตัว (Bone resorption) ทำให้เกิดการหลวมของข้อเทียม ซึ่งอาจเกิดขึ้นภายใน 5-20 ปีภายหลังจากการผ่าตัด การแก้ปัญหาในจุดนี้อาจทำได้โดยการหาวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับกระดูกมาแทน และจะดียิ่งขึ้นถ้าวัสดุนั้นมีสมบัติเป็น Bioactive กล่าวคือ สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเจริญเติบโตของกระดูกไปบนวัสดุฝังได้ จึงเป็นที่มาของ HApEXTM ซึ่งเป็นผลงานของทีมวิจัยแห่ง Queen Mary and Westfield College มหาวิทยาลัยลอนดอน ผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นสารทดแทนกระดูก สร้างขึ้นมาจากวัสดุประกอบ (Composite) ระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (Hydroxyapatite) กับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) ไฮดรอกซีแอปพาไทต์จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและความคงทนให้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และด้วยเหตุที่ไฮดรอกซีแอปพาไทต์เป็นสารที่เป็นองค์ประกอบของกระดูก (กระดูกเป็นวัสดุประกอบระหว่าง HAp กับ Collagen) จะช่วยให้เซลล์กระดูกเจริญมาบนวัสดุประกอบนี้ได้ ในการทดลองเลี้ยงเซลล์ Osteoblast ซึ่งเป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ผลิตกระดูกในร่างกายของมนุษย์ พบว่าเซลล์สามารถเจริญเติบโตและแพร่ขยายไปทั่วชิ้นงานได้ดี โดยเซลล์จะยึดติดกับ HAp ที่ผิวของชิ้นงานและจากการศึกษาทางชีวภาพในร่างกาย พบว่าการยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างตัววัสดุและกระดูกบริเวณที่ฝังวัสดุนี้มีความมั่นคงและแข็งแรง ในปี 1987 HAPEX™ ได้ถูกนำมาใช้ในคนไข้ที่กระดูกเข่าแตกหัก และใช้ในผู้ป่วยที่สูญเสียขาและต้องการจะใส่ขาปลอม ซึ่งสามารถตัดแต่งเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่ายในระหว่างการผ่าตัด โดยอาศัยเพียงเครื่องมือธรรมดาในห้องผ่าตัดเท่านั้น นอกจากนี้ HAPEX™ ยังใช้แทนกระดูกในห้องผ่าตัดอีกด้วย HAPEX™ เป็นวัสดุหนึ่งที่ได้รับการยอมรับจากองค์การอาหารและยา (FDA) ว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการใช้ทดแทนกระดูกในหูชั้นกลาง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย คงทน และมีสมบัติในการนำเสียงที่ดี

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของทัศนีย์ ตรงค์สุวรรณ และประสิทธิ์ ภาวสันต์ ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [16] ศึกษาถึงผลของเกลือไฮดรอกซีเอปาทาइटที่มีต่อเซลล์เพาะเลี้ยงจากเหงือกและจากเยื่อชั้นปริทันต์ ผลจากการทดลองพบว่าเซลล์ทั้งสองชนิดสามารถตอบสนองต่อเกลือไฮดรอกซีเอปาทาइटโดยเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีนที่เซลล์สร้างขึ้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิส เซลล์ที่สัมผัสกับเกลือไฮดรอกซีเอปาทาइटจะสร้างโปรตีนใหม่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลราว 52-55 กิโลดาลตัน ซึ่งไม่พบในกลุ่มควบคุม และยังพบการสร้างโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 200 กิโลดาลตันเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนด้วย เมื่อทำการศึกษาเพิ่มเติม พบว่าหนึ่งในโปรตีนที่เซลล์สร้างขึ้นคือ ไฟโบรเนกทิน การเพิ่มขึ้นของโปรตีนทั้งสองชนิดสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งแสดงว่าเซลล์ที่เลี้ยงบนเกลือไฮดรอกซีเอปาทาइटจะมีการสะสมของเมทริกซ์นอกเซลล์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าเซลล์เพาะเลี้ยงสามารถตอบสนองต่อสัญญาณจากไฮดรอกซีเอปาทาइट และตอบสนองโดยการเพิ่มการสร้างไฟโบรเนกทินเพื่อช่วยในการยึดเกาะของเซลล์กับเกลือไฮดรอกซีเอปาทาइट

งานวิจัยของ Sir Charnley และทีมงานวิจัยแห่ง Queen Mary and Westfield College มหาวิทยาลัยลอนดอน [17] เรื่อง HAPEX™ วัสดุที่เปรียบเสมือนเนื้อเยื่อของร่างกาย ซึ่งเป็นวัสดุทางชีวภาพที่มีความสำคัญต่อมนุษย์ เช่น หลอดเลือดเทียม ข้อเทียม หรือวัสดุอุดฟันซึ่งล้วนแต่เป็นวัสดุที่สร้างขึ้นเพื่อซ่อมแซม หรือทดแทนส่วนต่างๆ ของร่างกายที่บกพร่องทั้งสิ้น ข้อสะโพกเทียมถูกนำมาใช้ครั้งแรกในช่วงปี 1950 ที่ประเทศอังกฤษโดย Sir Charnley ข้อสะโพกเทียมโดยทั่วไปนั้นโดยทั่วไปแล้วประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นโลหะและพลาสติก โลหะอาจจะทำขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L โลหะผสมของโคบอลต์-โครเมียม หรือโลหะผสมของทิตเนียม-อลูมิเนียม-วานาเดียม ส่วนพลาสติกมักจะทำจากพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(UHMWPE) จะมีลักษณะเป็นรูปครึ่งทรงกลม ทั้ง 2 ส่วนจะถูกทำให้อยู่กับที่ด้วยซีเมนต์กระดูก ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภท Polymethyl methacrylate (PMMA) ปัจจุบันนี้ ศัลยแพทย์พยายามหลีกเลี่ยงการใช้ PMMA และหันมาใช้การยึดติดด้วยวิธีอื่น เช่น การเคลือบผิวของวัสดุด้วยไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) หรือด้วยโลหะที่มีรูพรุน เพื่อหวังให้เนื้อเยื่อกระดูกเจริญเข้าไปยึดติดกับตัววัสดุได้ จากการสำรวจคนไข้ที่เข้ารับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อสะโพกในประเทศอังกฤษ พบว่าประมาณ 18% ของผู้ป่วยต้องเข้าทำการผ่าตัดซ้ำ สาเหตุของการผ่าตัดซ้ำไม่ได้เกิดเนื่องมาจากการแตกหักของตัวข้อเทียมโดยตรง แต่เกิดจากผลการตอบสนองของร่างกายที่มีต่อวัสดุ ส่วนโลหะของข้อเทียมที่ฝังอยู่ในกระดูกจะช่วยรับแรงที่กระทำต่อกระดูกไปเป็นส่วนใหญ่ และด้วยความแตกต่างระหว่างสมบัติเชิงกลของโลหะ และกระดูกนี้เองจะทำให้กระดูกที่อยู่บริเวณรอบๆ วัสดุเกิดการสลายตัว (Bone resorption) ทำให้เกิดการหลวมของข้อขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ภายใน 5-20 ปีภายหลังจากการผ่าตัด ดังนั้นในการแก้ปัญหาทำได้โดยการนำวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับกระดูกมาแทน โดยวัสดุนั้นต้องเป็นวัสดุที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive) กล่าวคือ สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเจริญเติบโตของกระดูกไปบนวัสดุชีวภาพได้ ซึ่งทีมวิจัยแห่ง Queen Mary and Westfield College มหาวิทยาลัยลอนดอนได้ผลิต HAPEX™ ขึ้น เพื่อใช้เป็นสารทดแทนกระดูก สร้างขึ้นมาจากคอมโพสิตระหว่าง ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (Hydroxyapatite) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ไฮดรอกซีแอปพาไทต์จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและคงทนให้กับพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง และด้วยเหตุที่ไฮดรอกซีแอปพาไทต์เป็นสารที่เป็นองค์ประกอบของกระดูก (กระดูกเป็นคอมโพสิตระหว่าง HAp กับ Collagen) จะช่วยให้เซลล์กระดูกเจริญมาบนคอมโพสิตนี้ได้ ในการทดลองเลี้ยงเซลล์ Osteoblast ซึ่งเป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ผลิตกระดูกในร่างกายลงบนวัสดุนั้น พบว่าเซลล์สามารถเจริญเติบโตและแพร่ขยายไปทั่วชิ้นงานได้ดี โดยเซลล์จะยึดติดกับ HAp ที่ผิวของชิ้นงาน และจากการศึกษาทางชีวภาพภายในร่างกาย พบว่าการยึดระหว่างตัววัสดุและกระดูกบริเวณที่ฝังวัสดุนั้นเป็นไปแบบมั่นคงและแข็งแรง ในปี 1987 HAPEX™ ได้ถูกนำมาใช้ในคนไข้ที่กระดูกเข่าแตกหัก และใช้กับผู้ป่วยที่สูญเสียขาและต้องการจะใส่ตาปลอม ชิ้นวัสดุจะถูกใส่เข้าไปที่ฐานของเข่า ซึ่งพบว่ามันจะยึดติดแน่นกับกระดูกเข่า ศัลยแพทย์ยังพบว่า HAPEX™ สามารถตัดแต่ง เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายในระหว่างทำการผ่าตัด โดยใช้เครื่องมือในห้องผ่าตัด นอกจากนี้ HAPEX™ ยังใช้แทนกระดูกในหูชั้นกลางอีกด้วย เสียงที่เราได้ยินเกิดจากการสั่นคลั่งเสียงผ่านหูชั้นกลางเข้าไปยังหูชั้นใน ในหูชั้นกลางจะมีกระดูกอยู่ 3 ชิ้น ซึ่งจะทำให้ช่วยความตึงสะเทือนของคลื่นเสียงให้มากกว่าเดิมหลายเท่าตัว ซึ่งสัญญาณที่ถูกขยายนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าสำหรับส่งไปยังสมองต่อไป ดังนั้นถ้ามีความผิดปกติเกิดขึ้นที่กระดูกของหูชั้นกลางก็อาจทำให้เกิดอาการหูหนวกได้ วัสดุหลายชนิดได้ถูกทดลองสำหรับใช้ทดแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดูกในหูชั้นกลาง แต่มี HAp เท่านั้นที่สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อของร่างกายได้ และสามารถใช้แทนกระดูกในหูได้เป็นอย่างดี การนำ HAp เข้าสู่ร่างกายต้องมีการตกแต่ง โดยส่วนหัวทำด้วย HAp และส่วนก้านทำด้วย HAPEX™ ซึ่งส่วนของก้านสามารถตกแต่งให้มีรูปร่างตามต้องการได้ง่าย นอกจากนี้ HAp ยังสามารถขึ้นรูปได้ง่าย คงทน และมีสมบัติในการนำเสียงที่ดี

งานวิจัยของเขาวเรศ มะลิมาศ และปิยวิทย์ รัตนฤทธิ์รัตน์ [18] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วม สารตั้งต้นที่ใช้คือแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรตกับฟอสฟอรัสเพนท็อกไซด์ หรือกรดฟอสฟอริก มีการควบคุมค่า pH ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นทิ้งให้ตกตะกอนสมบูรณ์เป็นเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าชนิดของสารตั้งต้น ค่า pH ที่ใช้ในการตกตะกอน และเวลาในการตกตะกอนมีผลต่อการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์คือ ถ้าใช้สารตั้งต้นชนิดเดียวกันและเวลาในการตกตะกอนเท่ากัน เมื่อค่า pH ในการตกตะกอนสูงขึ้นจะมีผลให้อัตราส่วนโมลของ Ca : P สูงขึ้น จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คือ ใช้แคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรตและกรดฟอสฟอริกเป็นสารตั้งต้น ตกตะกอนที่ค่า pH เท่ากับ 9 เป็นเวลา 60 นาที จะได้อัตราส่วนโมลของ Ca : P เท่ากับ 1.15 ซึ่งใกล้เคียงค่าทางทฤษฎีของไฮดรอกซีแอปพาไทต์มากที่สุด (อัตราส่วนโมลของ Ca : P เท่ากับ 1.67) และเมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ โดยการแช่ในสารละลาย Simulated body fluid (SBF) พบว่ามีไฮดรอกซีแอปพาไทต์เกิดขึ้นที่พื้นผิวของสารตัวอย่าง แสดงว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีความว่องไวทางชีวภาพ

งานวิจัยของทัศนีย์ ตรงศิริวรรณ และประสิทธิ์ กวีสันต์ ภาควิชาอุทกศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [19] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออนในอาหารเลี้ยงเชื้อกระดูกกระดูการสร้างไฟโบรเนกทินในเซลล์เพาะเลี้ยงจากเนื้อเยื่อเอ็นยึดปริทันต์ของมนุษย์ การวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน โดยในส่วนแรกทำขึ้นเพื่อศึกษาว่าการเพิ่มขึ้นของการสร้างไฟโบรเนกทินโดยเซลล์เพาะเลี้ยงจากเอ็นยึดปริทันต์ของมนุษย์ในสภาวะที่มีเกลือไฮดรอกซีแอปพาไทต์ จำเป็นต้องมีการสัมผัสโดยตรงระหว่างเซลล์กับไฮดรอกซีแอปพาไทต์หรือไม่ และในส่วนที่สองเราทำการศึกษาถึงผลของการเพิ่มของแคลเซียมไอออนในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีต่อการสร้างไฟโบรเนกทิน ในการทดลองเราได้ทำการเลี้ยงเซลล์ในสภาวะต่าง ๆ คือ สภาวะที่มีเกลือไฮดรอกซีแอปพาไทต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ Lorprayoon และคณะ [20] ได้สังเคราะห์ไฮดรอกซีแอลฟาโทคีนิทรูพรุนซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูก สามารถเตรียมจากกระดูกวัวโดยนำกระดูกวัวส่วนที่เป็นรูพรุนมาผ่านกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ (ไขมันและโปรตีน) ออก และรักษาส่วนที่เป็นแร่ธาตุ (ไฮดรอกซีแอลฟาโทคี) และ โครงสร้างรูพรุนตามธรรมชาติเดิมเอาไว้ ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การใช้สารเคมีโดยการแช่ใน 5% NaOCl ใช้เวลา 48 ชั่วโมง และการผ่านความร้อนโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ใช้เวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นกระดูกที่ผ่านการกำจัดไขมันและโปรตีนด้วย 2 วิธีดังกล่าวมาตรวจวิเคราะห์ด้วยภาค องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะ โครงสร้างพื้นผิว พบว่าการใช้สารเคมีกำจัดโปรตีนสามารถรักษาวิภาค องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานกระดูกได้ใกล้เคียงกับธรรมชาติเดิมดีกว่าวิธีการเผา ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการตอบสนองทางชีวภาพของวัสดุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, Ca(OH)_2) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
3. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
4. กรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
5. คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene, $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$) เกรดวิเคราะห์
6. ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate, $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_4$) เกรดวิเคราะห์ (FLUKA)
7. ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_3$) เกรดวิเคราะห์ (FLUKA)
8. ออโรไดคลอโรเบนซีน (o-dichlorobenzene) เกรดวิเคราะห์ (FLUKA)
9. ทิทาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium isopropoxide) เกรดวิเคราะห์ (FLUKA)
10. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, CH_2Cl_2) เกรดการค้า
11. เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เกรดการค้า
12. อะซิโตน (Acetone, CH_3COOH) เกรดการค้า
13. เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF) เกรด HPLC (LAB-SCAN)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง

1. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS 3400
2. เครื่องบดผสมสารสำหรับ XRF (Rock Lab รุ่น Benchmill Model 1A)
3. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ XRF (Herzog) รุ่น TP60/2D
4. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance
5. เครื่อง Sputter Coater บริษัท Polaron Range รุ่น SC7620
6. เครื่องเจลเพอเมชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatography, GPC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บริษัท MILLIPORE รุ่น Waters 150-CV
- คอลัมน์ : Plgel 10 μ m mixed B 2 columns
วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500-10,000,000
ใช้พอลิสไตรีนเป็นสารมาตรฐาน(MW 5,460-1,290,000)
- สารละลาย : เตตระไฮโดรฟิวแรน (THF)
- อุณหภูมิ : 30 $^{\circ}$ C
- อัตราการไหล : 1.0 ml/min
- ปริมาณในการฉีด : 100 μ L
- เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ : 1 ชั่วโมง
- Detector : Refractive index Detector
7. เครื่องคิดเพอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)
รุ่น DSC ของบริษัท Perkin เตรียมตัวอย่างโดยนำสารตัวอย่างมาใส่ใน Aluminium pan โดยใช้อินเดียม (Indium) เป็นสารมาตรฐาน
สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ : 50-300 $^{\circ}$ C
อัตราการให้ความร้อน : 10 $^{\circ}$ C/min
อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน : 20 ml/min
ปริมาณสารตัวอย่าง : 5 mg
8. เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) บริษัท Bruker AG รุ่น IFS28
9. อ่างควบคุมอุณหภูมิและ Immersion circulator (FT01/5) รุ่น IsoTemp
10. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (1 H-NMR) บริษัท Bruker AG รุ่น NMR 300 Ultra Shield ความถี่ 300 MHz ใช้เตตระเมทิลไซเรน (TMS) เป็นสารมาตรฐาน
11. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 225
12. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Ney Dental รุ่น 14H
13. เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254
14. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific
15. เครื่องควบคุมอัตราการหยดสาร บริษัท Barnant รุ่น 77120-52
16. ปัมสุญญากาศ บริษัท EDWARDS รุ่น RV12
17. เตาเผาสาร Furnace 6000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. เครื่องให้ความร้อนแบบหุ้ม (Heating mantle)
19. มอเตอร์พร้อมใบพัดปั่นกวน
20. เทอร์โมสตัท (Thermostat)
21. ขวดสามคอ
22. กรูซีเบลชนิดพอร์ซเลน
23. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท BUCHI รุ่น B-169
24. ขวดก้นกลม 500 มิลลิลิตร
25. ชุดกรองลดความดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์ (HAp)

1) การเตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริก 0.3 โมลต่อลิตร

ปีเปตกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้น 85% โดยปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

2) การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์

1. ชั่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 9.077 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร บันทึกค่า pH ด้วย pH meter
2. นำบีกเกอร์ดังกล่าวไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 10°C นำพีเอชอิเล็กโทรดติดไว้ที่ข้างบีกเกอร์พร้อมกับใส่ใบพัดปั่นกวนจุ่มลงในสารละลาย ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษพอยล์ (ระวังอย่าให้ใบพัดกระทบพีเอชอิเล็กโทรด)
3. เทแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) อย่างละ 250 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์แต่ละใบขนาด 500 มิลลิลิตร (เทสารละลาย NH_4OH ในตู้ดูดควัน) จากนั้นใช้แผ่นพลาสติกปิดปากบีกเกอร์ทั้งสองไว้
4. ก่อยาหยุด NH_4OH กับ H_3PO_4 ด้วยเครื่องควบคุมอัตราการหยดสาร โดยมีอัตราการหยดเท่ากับ 8 มิลลิลิตร/นาที พร้อมปั่นกวนสารละลาย
5. ปิดเครื่องควบคุมอัตราการหยดสารและหยุดปั่นกวนสารละลาย บันทึกค่า pH อีกครั้ง (ไม่ควรต่ำกว่า 12)
6. ทำการกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน โดยล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น
7. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
8. นำมาบดและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
9. ตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิค (XRF) เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca : P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนงานการสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอปาทิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านการพอลิเมอไรซ์แบบควบแน่น

การสังเคราะห์พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET, T100)

1. นำไดเมทิลเทเรพทาเลต 150.0 กรัม (0.765 โมล) และไดเอทิลีนไกลคอล 162.18 กรัม (1.53 โมล) ใส่ลงในขวดสามคอขนาด 500 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:2 โดยโมล) ต่อเข้ากับชุดเทอร์โมสแตท และชุดกลั่น ทำการปั่นกวนด้วยใบพัดตลอดเวลาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120°C เติมททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ 2.13 กรัม (0.5 โมลเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไดเมทิลเทเรพทาเลต)
2. ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 150°C แล้วคงไว้จนกระทั่งปริมาณเมทานอลที่ออกมาไม่เพิ่มขึ้นแล้ว และค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิทีละ 10°C (รองนเมทานอลที่ออกมาไม่เพิ่มขึ้นแล้ว) จนถึง 180°C (ปฏิกิริยาไกล่เกลี่ยที่สุดโดยสังเกตปริมาณเมทานอลที่ออกมา) เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงจนถึง 120°C
3. ทำการลดความดันของปฏิกิริยาโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150°C แล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิทีละ 10°C (รองนปริมาณ ไดเอทิลีน ไกลคอลที่ออกมาไม่เพิ่มขึ้นแล้ว) จนถึง 180°C (ปฏิกิริยาไกล่เกลี่ยที่สุดโดยสังเกตปริมาณ ไดเอทิลีน ไกลคอลที่ออกมา)
4. หยุดปฏิกิริยา แล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
5. ละลายพอลิเมอร์ที่ได้ด้วยไดคลอโรมีเทน นำสารละลายที่ได้ใส่ในกรวยแยก แล้วค่อยๆ หยดลงในเมทานอล 600 มิลลิลิตร ที่มีกรปั่นกวนอย่างรุนแรงเพื่อทำการตกตะกอน แยกเอาชิ้นสารละลายที่ใสออก และเก็บชิ้นที่เป็นของเหลวหนักนำไปอบในตู้อบลดความดันที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. ชั่งน้ำหนักและหาลักษณะของผลิตภัณฑ์
7. ตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค FTIR, DSC, $^1\text{H-NMR}$ และ GPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนงานการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านการพอลิเมอไรส์แบบควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (Composite HAp/PDET) แบบคลุกผสม

1. ชั่งน้ำหนักผงไฮดรอกซีแอปาทาइट 1 กรัมและชั่งพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต 0.5 กรัมโดยอัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาทาइटต่อพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตเท่ากับ 2:1
2. นำพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตใส่ในขามระเหยแล้วละลายด้วยไดคลอโรมีเทน จนกระทั่งพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตละลายหมด โดยพยายามใช้ตัวทำละลายในปริมาณที่น้อยที่สุดที่สามารถละลาย PDET ได้หมด
3. นำไฮดรอกซีแอปาทาइटใส่ลงไป แล้วทำการคลุกผสม
4. นำสารที่ผสมที่ได้ในข้อ 4. ไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร และสูง 5 มิลลิเมตร
5. นำวัสดุประกอบที่ได้ ใส่อบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและชั่งน้ำหนักวัสดุประกอบที่ได้ ถ้าน้ำหนักหรือร้อยละของผลิตภัณฑ์
7. ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนข้างต้น แต่ปรับอัตราส่วนไฮดรอกซีแอปาทาइटต่อพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต เท่ากับ 3:1 และ 4:1 โดยน้ำหนัก
8. นำวัสดุประกอบ ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิค FT-IR, TGA, XRD และ วัดค่าความแข็งแรงกด



รูปที่ 3.4 แผนงานการสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่าง HAp กับ PDET แบบคลุกผสม

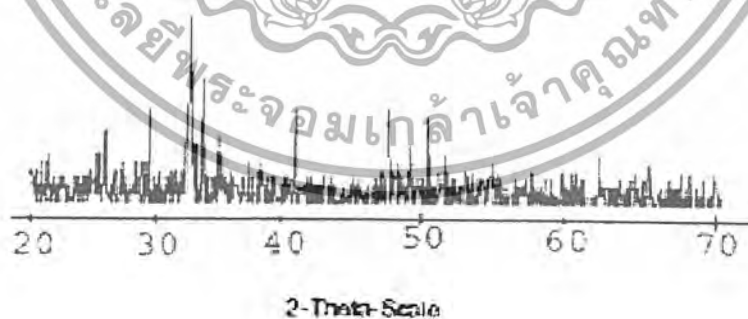
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีแอปาไทต์ (HAp) ที่สังเคราะห์ได้

ไฮดรอกซีแอปาไทต์มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมและฟอสเฟต โดยมีอัตราส่วนทางทฤษฎีระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca:P) เท่ากับ 1.67 จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโมล Ca:P ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี คืออยู่ในช่วง 1.54-1.77 ค่า Ca:P ของสารที่สังเคราะห์ได้ก็คาดเคลื่อนไปจากค่าทางทฤษฎีเนื่องจากค่า pH ของสารละลายอาจไม่สูงพอจึงทำให้แคลเซียมออกไซด์ตกผลึกไม่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการควบคุม pH เกิดการระเหยไปในช่วงขั้นตอนการสังเคราะห์สาร ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไม่คงที่ เมื่อ pH ต่ำลงทำให้มีสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่นที่มีอัตราส่วนโมลของ Ca:P ต่ำกว่า 1.67 ตกตะกอนร่วมกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนของไฮดรอกซีแอปาไทต์ลดลง ถึงแม้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้จะมีอัตราส่วนของ Ca:P ไม่เท่ากับ 1.67 แต่จากเทคนิค XRD สามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีวิฤภาคองค์ประกอบหลักเป็นไฮดรอกซีแอปาไทต์ จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวิฤภาคที่เป็นผลึกประกอบด้วยฟลักของไฮดรอกซีแอปาไทต์ซึ่งมีพิกัดสำคัญที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 25.8 31.8 32.2 32.9 34.1 46.7 และ 49.5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp ภายหลังจากเผาที่ 1100°C แล้วอัดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานไฮดรอกซีเอปาทิตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1100°C แล้วทำการขึ้นรูปแบบกดอัดมีน้ำหนักเฉลี่ยของแต่ละก้อนเท่ากับ 1.5067 กรัม เมื่อนำไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงกดอัดพบว่าค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength) เท่ากับ 7.10 MPa

4.2 การสังเคราะห์พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (PDET)

พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างไดเมทิลเทเรพทาเลตกับไดเอทิลีนไกลคอลโดยใช้ทิตานเนียมไอโซโพรพอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 220°C ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.2 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งมีสีเหลืองอ่อนอมน้ำตาล ปริมาณ 91 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR, DSC, $^1\text{H-NMR}$ และ GPC ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างไดเมทิลเทเรพทาเลตกับ ไดเอทิลีน ไกลคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FT-IR : V_{\max} 3440 (O-H,s) 2957 (C-H,s) 1717 (C=O,s) 1274, 1102 (C-O,s)
725 (C-H,s) cm^{-1} (รูปที่ 4.3)

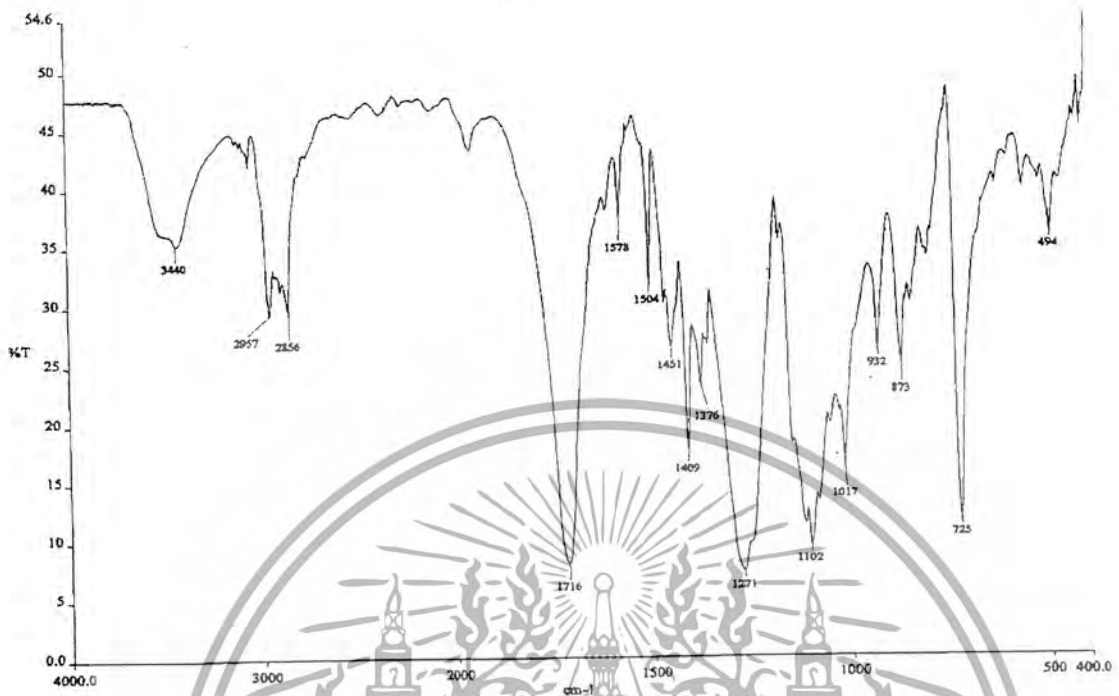
DSC : $T_m = 83^\circ\text{C}$ (รูปที่ 4.4)

$^1\text{H-NMR}$ (CDCl_3) : δ 8.05 (4H,br,aromatic) 4.52 (4H,s, CH_2) 3.88 (4H,s, CH_2) ppm (รูปที่ 4.5)

GPC : มีน้ำหนักโมเลกุลสองช่วง (รูปที่ 4.6)

ผลิตภัณฑ์หลัก	$M_n =$	6700
	$M_w =$	12700
	MWD =	1.97
ผลิตภัณฑ์รอง	$M_n =$	400
	$M_w =$	430
	MWD =	1.08

จาก $^1\text{H-NMR}$ พบสัญญาณสำคัญ 3 สัญญาณ คือ สัญญาณที่ 3.88 ppm (สัญญาณ a) เป็นสัญญาณของโปรตอนจากอัลฟา-เมทิลีน (α -Methylene) ที่ติดกับ ester-oxygen สัญญาณที่ 4.52 ppm (สัญญาณ b) เป็นสัญญาณของโปรตอนจากอัลฟา-เมทิลีนที่ติดกับออกซิเจนของ ester linkage ของหมู่เอทิลีนออกไซด์ และสัญญาณที่ 8.05 ppm (สัญญาณ c) เป็นสัญญาณของโปรตอนจากหมู่อะโรมาติก แสดงว่าสารที่สังเคราะห์ได้คือ พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต ซึ่งเป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.2 และผลจากเทคนิค GPC พบว่า PDET มีน้ำหนักโมเลกุล 2 ช่วง ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีการควบแน่น โดยทั่วไปได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงมากนัก และมีผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำปนอยู่ ซึ่งมักถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการตกตะกอนพอลิเมอร์ แต่สำหรับงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถกำจัดผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกไปได้หมด แต่เหลืออยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อย โดยจะเห็นได้จากพื้นที่ใต้พีกของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ใต้พีกของผลิตภัณฑ์หลักที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PDET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

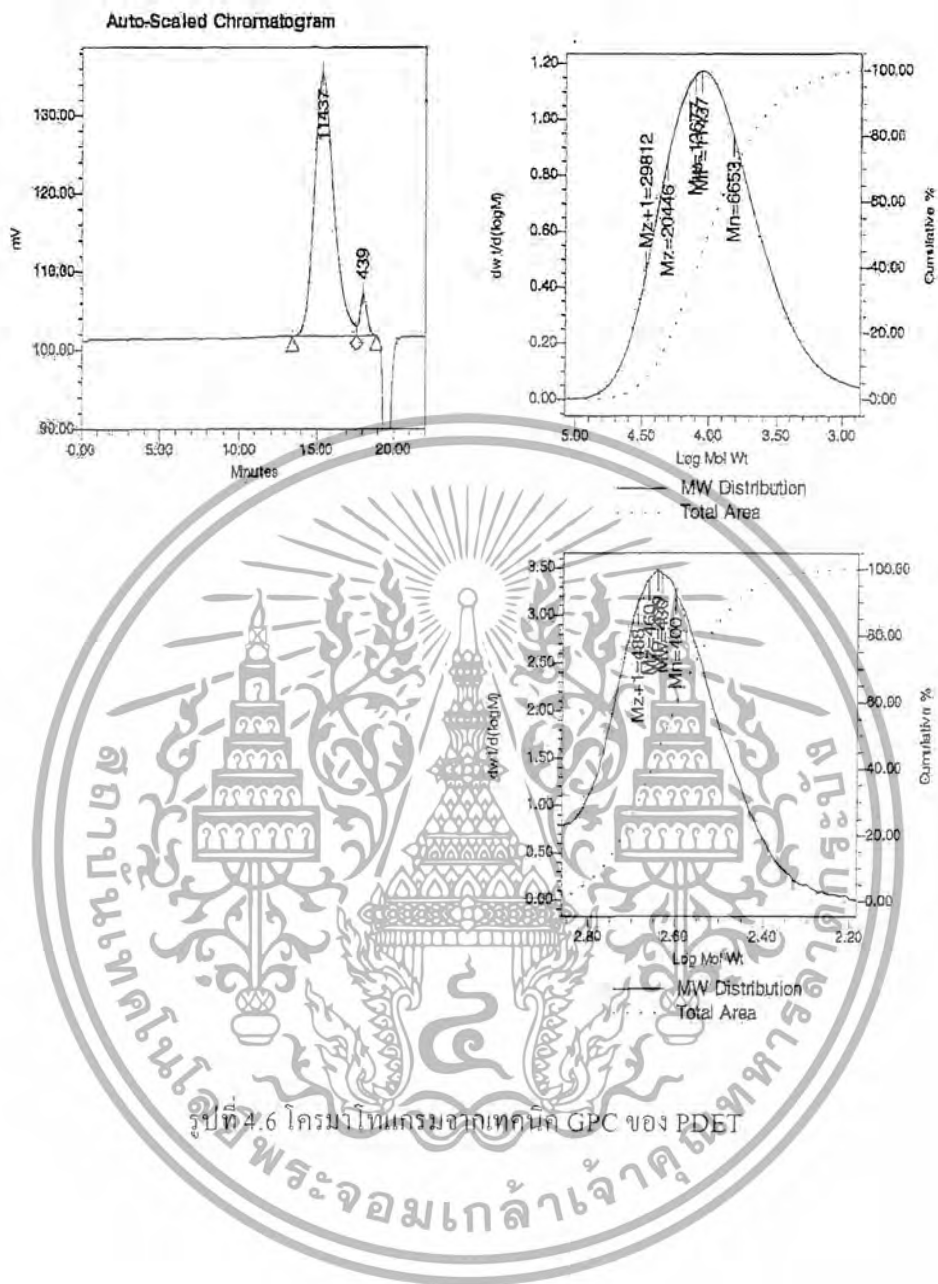


รูปที่ 4.4 เทอร์โมแกรมจากเครื่อง DSC ของ PDET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 โครมาโทแกรมจากเทคนิค GPC ของ PDET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาไทต์กับพอลิไคเอทีลินเทรพทาเลต (HAp/PDET)

การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาไทต์กับพอลิไคเอทีลินเทรพทาเลตในอัตราส่วน 2:1, 3:1 และ 4:1 ซึ่งเตรียมจากการคลุกผสมระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาไทต์กับพอลิไคเอทีลินเทรพทาเลตเชิงเส้น แล้วให้ความร้อนเพื่อให้พอลิไคเอทีลินเทรพทาเลตเกิดการเชื่อมต่อกัน โดยมีไฮดรอกซีแอปาทาไทต์กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ โดยให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุประกอบระหว่าง HAp กับ PDET ที่มีอัตราส่วนต่างๆกันไปตรวจด้วยเทคนิค FT-IR, TGA, $^1\text{H-NMR}$, GPC, XRD และทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงกด

4.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาไทต์กับพอลิไคเอทีลินเทรพทาเลต

4.4.1 ผลของฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งพีก FT-IR ของพอลิเมอร์จากวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PDET ที่สภาวะ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วน HAp:PDET ต่างๆ

อัตราส่วน HAp:PDET	พีก FT-IR
2:1	V_{\max} 3571 (O-H,s) 2957 (C-H,s) 1718 (C=O,s) 1271,1102 (C-O,s) 728 (C-H,s) cm^{-1} (รูปที่ 4.7, ภาคผนวก ก รูปที่ ก-1)
3:1	V_{\max} 3571 (O-H,s) 2918 (C-H,s) 1719 (C=O,s) 1271,1102 (C-O,s) 728 (C-H,s) cm^{-1} (รูปที่ 4.7, ภาคผนวก ก รูปที่ ก-2)
4:1	V_{\max} 3572 (O-H,s) 2919 (C-H,s) 1719 (C=O,s) 1272,1102 (C-O,s) 728 (C-H,s) cm^{-1} (รูปที่ 4.7, ภาคผนวก ก รูปที่ ก-3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุประกอบที่อุณหภูมิ 80°C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ

จากเทคนิค FT-IR วัสดุประกอบที่ใช้อัตราส่วน 2:1, 3:1 และ 4:1 โดยให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะพบสัญญาณเช่นเดียวกับพอลิโดเอเทิลีนเทเรพทาเลตที่สังเคราะห์ได้ตอนแรก และพบว่าสัญญาณของทั้ง 3 สภาวะมีลักษณะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ในวัสดุประกอบมีพอลิโดเอเทิลีนเทเรพทาเลตอยู่จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลของเทอร์โมแกรมจากเครื่อง TGA

ตารางที่ 4.2 เปรอ์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PDET ในวัสดุประกอบ HAp/PDET ที่สภาวะ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วน HAp:PDET ต่างๆ

อัตราส่วน HAp:PDET	% โดยน้ำหนักของ PDET ในวัสดุประกอบ HAp/PDET จาก TGA
2:1	33.94
3:1	25.83
4:1	20.64

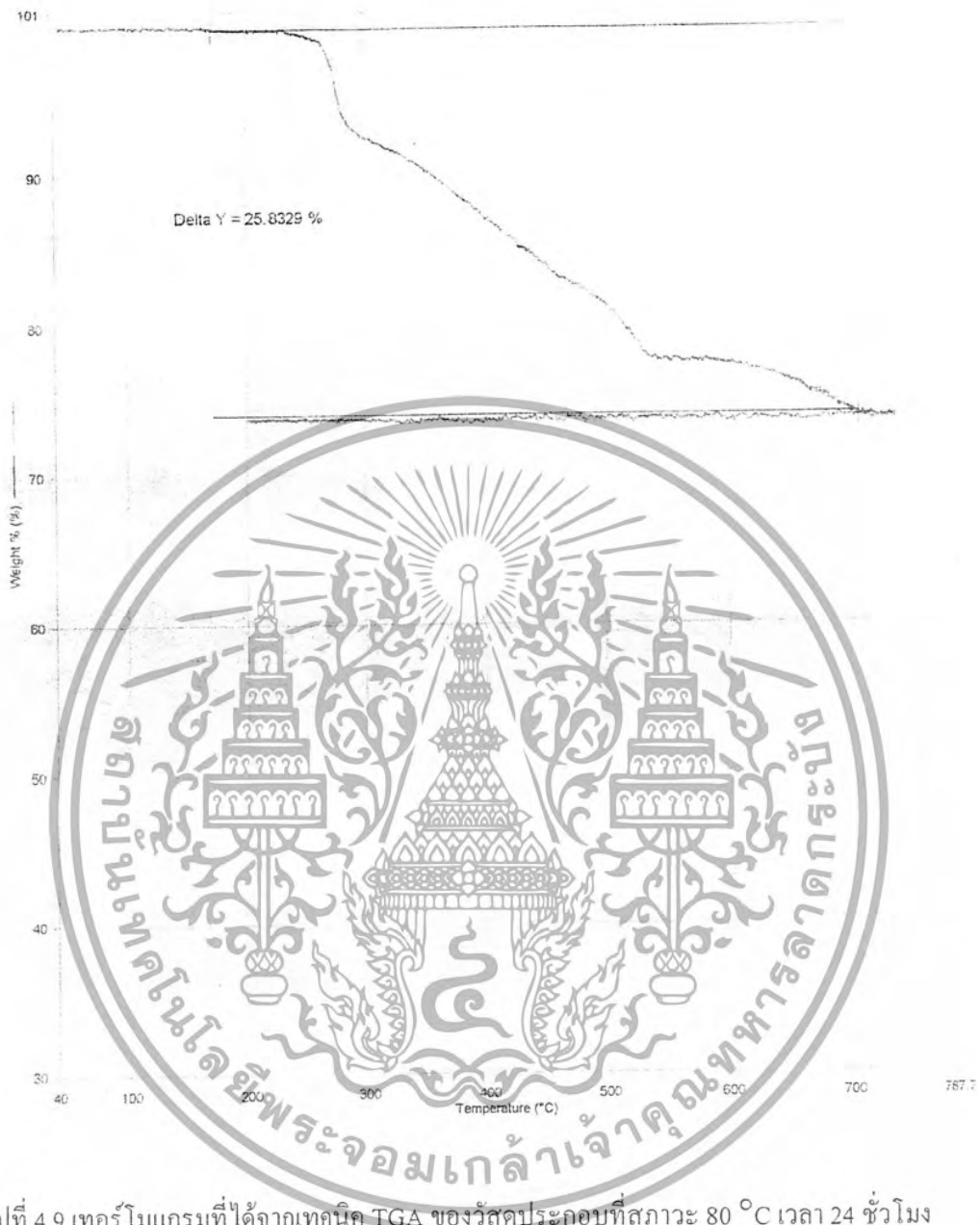
จากตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PDET ในวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PDET ซึ่งได้จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักจากเทคนิค TGA ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง HAp/PDET ในการสังเคราะห์วัสดุประกอบตอนเริ่มต้นคือ 2:1, 3:1 และ 4:1 โดยน้ำหนัก ดังนั้นควรได้อัตราส่วน PDET ในวัสดุประกอบคิดเป็น 33.94%, 25.83% และ 20.64% โดยน้ำหนักตามลำดับ จากการตรวจวัดด้วยเทคนิค TGA พบว่าได้ถ่าน้ำหนักของ PDET ในวัสดุประกอบได้ค่าใกล้เคียงกับถ่าน้ำหนัก PDET เริ่มต้น แสดงว่า พอลิเมอร์สามารถเข้าไปอยู่ในวัสดุประกอบได้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



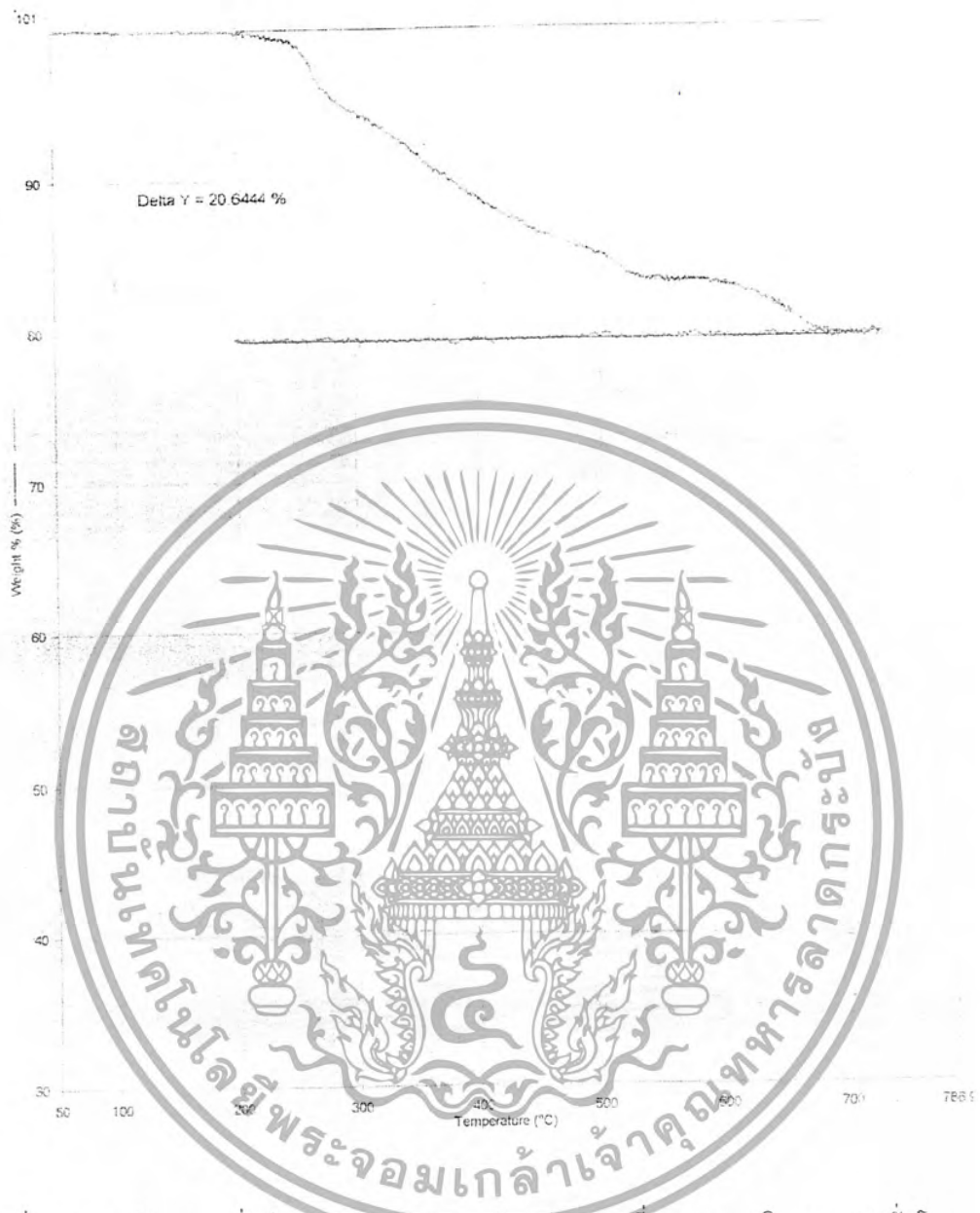
รูปที่ 4.8 เทอร์โมแกรมที่ได้จากเทคนิค TGA ของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 เทอร์โมแกรมที่ได้จากเทคนิค TGA ของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 3:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมที่ได้จากเทคนิค TGA ของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 4:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนสเปกตรัม

$^1\text{H-NMR}$ (CDCl_3) : δ 8.05 (4h,br,aromatic) 4.52 (4h,s, CH_2) 3.88 (4h,s, CH_2) ppm
(รูปที่ 4.11)



รูปที่ 4.11 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนสเปกตรัมของวัสดุประกอบที่สภาวะ 80°C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1

จาก $^1\text{H-NMR}$ พบสัญญาณสำคัญ 3 สัญญาณเช่นเดียวกับข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีพอลิไดออกซิเจนเทรพทาเลตประกอบอยู่ในวัสดุประกอบจริง

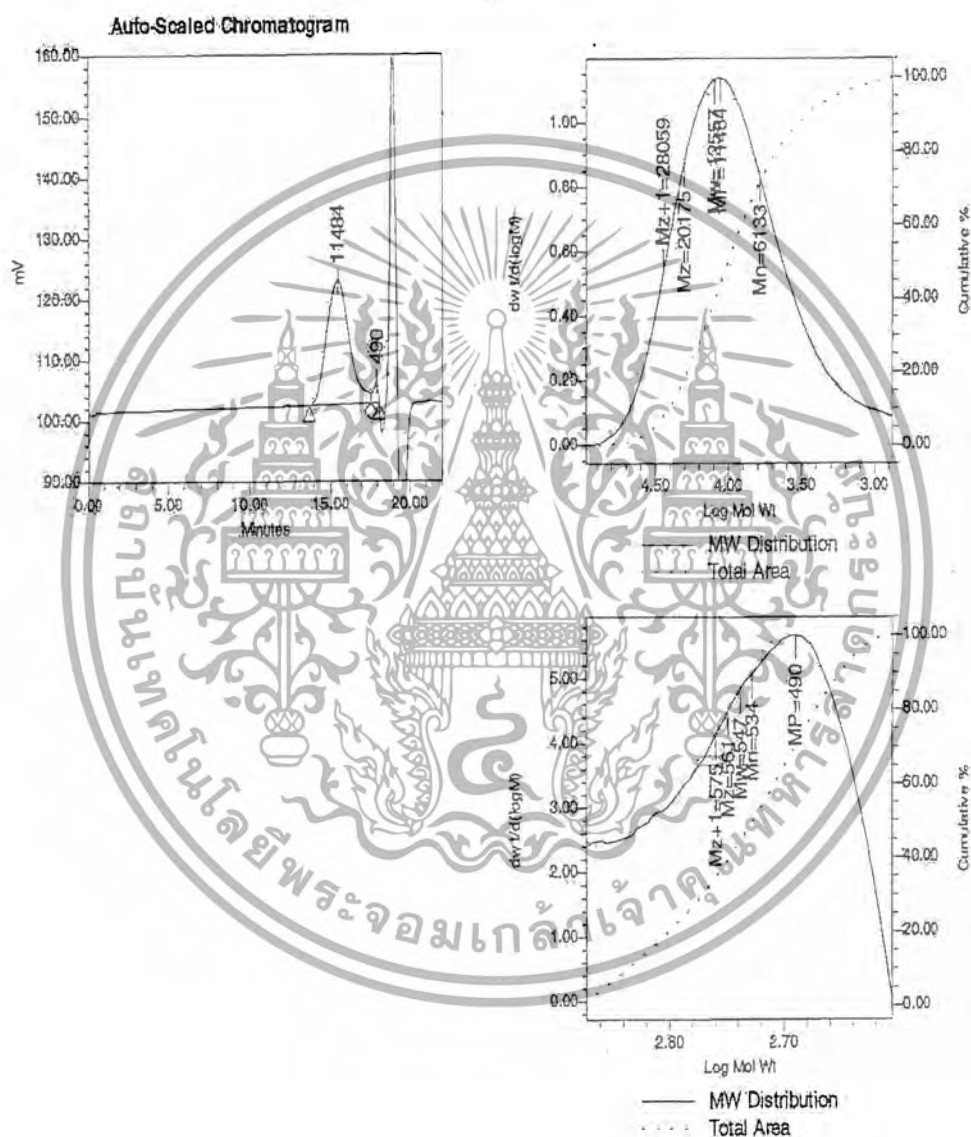
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลของเจลพอลิเมอร์โครมาโทกราฟี (GPC)

GPC : ช่วงที่ 1 $M_n = 6100$ $M_w = 12600$ $MWD = 2.05$

: ช่วงที่ 2 $M_n = 530$ $M_w = 550$ $MWD = 1.02$

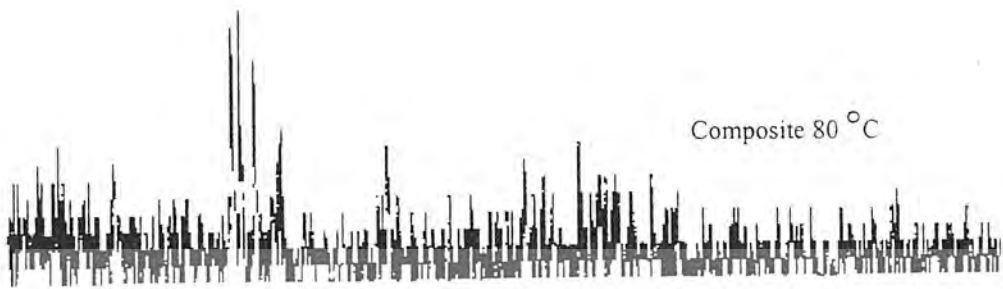
จากผลดังกล่าว แสดงว่าการทำวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PDET พอลิเมอร์ที่ประกอบอยู่ในวัสดุประกอบมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเช่นเดียวกับพอลิเมอร์เริ่มต้น



รูปที่ 4.12 โดอะแกรมจากเทคนิค GPC ของวัสดุประกอบ ที่สภาวะ 80°C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 4.13 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุประกอบ HAp/PDET ที่สังเคราะห์จากสภาวะ 80°C ใช้เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1

พบว่า แพทเทิร์นของวัสดุประกอบมีพีคของวัสดุที่เป็นผลึกประกอบของฟอสเฟตไฮดรอกซีแอปาทิตที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.8, 31.8, 32.2, 32.9, 34.1, 46.7 และ 49.5 องศา แต่ไม่พบพีคของ PDET ซึ่งสันนิษฐานว่า PDET เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 ค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบที่มีอัตราส่วน HAp/PDET ต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงกดที่สภาวะต่าง ๆ ดังนี้

อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน HAp:PDET	ความแข็งแรงกด MPa
80	2:1	36
80	3:1	30
80	4:1	28

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการทำวัสดุประกอบจากไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต ซึ่งมีค่าอัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET คือ 2:1, 3:1 และ 4:1 ให้ค่าความแข็งแรงกดเท่ากับ 36, 30 และ 28 ตามลำดับ พบว่า เมื่อปริมาณพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตมากขึ้น วัสดุประกอบจะสามารถรับแรงกดได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากพอลิเมอร์ซึ่งมีสมบัติช่วยกระจายแรงได้ดี ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกับพวกเซรามิกส์จึงทำให้ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงกดของเซรามิกส์ให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอปาทิต์

ไฮดรอกซีเอปาทิต์ที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 1.54-1.77 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนโมลทางทฤษฎีของไฮดรอกซีเอปาทิต์

5.2 การสังเคราะห์พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต

จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยการพอลิเมอไรซ์แบบควบแน่น ใช้ทิกทาเนียมไอโซโพรพอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้พอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 12,700 และมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกเท่ากับ 83°C

5.3 การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทิต์กับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (HAp/PDET)

การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทิต์กับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตเชิงเส้น (HAp/PDET) โดยใช้อัตราส่วน HAp/PDET เท่ากับ 2:1, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ พบว่าปริมาณพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตในวัสดุประกอบที่ได้จากเทคนิค TGA มีค่าเท่ากับ 33.94, 25.83 และ 20.64 % และค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบมีค่าสูงกว่าก้อนไฮดรอกซีเอปาทิต์บริสุทธิ์คือ มีค่าเท่ากับ 36.30 และ 28 MPa ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อเพิ่มพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตทำให้ความแข็งแรงกดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลตในวัสดุประกอบซึ่งใช้อัตราส่วน HAp/PDET เท่ากับ 2:1 มีน้ำหนักโมเลกุล 2 ช่วง คือมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 6,100 และ 530 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักเท่ากับ 12,600 และ 550 และค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 2.05 และ 1.02

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลอื่นนอกจากความแข็งแรงกด เช่น ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เนื่องจากวัสดุประกอบเมื่อนำไปใช้งานจริงอาจต้องมีการรับแรงกระแทกจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้ในระบบจำลองร่างกาย และทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบระหว่าง HAp กับ PDET
3. ทำการสังเคราะห์วัสดุประกอบ HAp/PDET โดยทำการขึ้นรูป HAp แบบมีรูพรุน
4. การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิไดเอทิลีนเทเรพทาเลต (HAp/PDET) แบบคลุกผสมโดยไม่ผ่านการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง ควรปรับเปลี่ยนอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ให้มากขึ้นคือประมาณ 85°C เพื่อให้วัฏภาคทั้งสองเข้ากันได้มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Moursi, A.M., Winnard, A.V., Winnard, P.L., Lannutti, J.J. and Seghi, R.R. 2002. Enhanced osteoblast response to a polymethylmethacrylate-hydroxyapatite composite. **Biomaterials**. (23): 133-144.
2. Silvio, L.D., Dalby, M.J. and Bonfield, W. 2002. Osteoblast behavior on HA/PE composite surfaces with different HA volume. **Biomaterials**. (23): 101-107.
3. Walsh, D., Furuzono, T. and Tanaka, J. 2001. Reparation of porous composite implant materials by in situ polymerisation of porous apatite containing ϵ -caprolactone or methylmethacrylate. **Biomaterials**. (22): 1205-1212.
4. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC).1997-2002.ไฮดรอกซีแอปไทต์(Hydroxyapatite)วัสดุทดแทนกระดูก.[online].Available:http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool12.html
5. AZoM™.2004.ไฮดรอกซีแอปไทต์ (Hydroxyapatite) [online].Available: <http://www.AZoM™.com/patient/ha.html>
6. Aoki, H. 1994. **Medical Application of Hydroxyapatite**. Tokyo: Ishiyaky EuroAmerica, Inc.
7. Raemdonck, W.V., Ducheyne, P. and Meester, P.D. 1984. Calcium phosphate ceramics. In: **Metal and Ceramic Biomaterials Volume II : Strength and Surface**, pp. 145 Ducheyne, P. and Hastings, G.W., eds. Boca Raton, FL: CRC Press.
8. Hench, L.L. and Wilson, J. 1993. **An introduction to Bioceramics**. Singapore: World Scientific Publishing .
9. Rathje, W. 1963. Zur Kenntnis de Phosphate I. Uber Hydroxyapatite. In: **Inorganic Synthesis Vol.7**, pp. 63-65. Kleinberg, J., eds. USA: McGraw-Hill.
10. Hayek, E. and Newesely, H. 1963. Pentacalcium Monohydroxyorthophosphate. In: **Inorganic Synthesis Vol.7**, pp. 63-65. Kleinberg, J., eds. USA: McGraw-Hill.
11. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC).1997-2002.ไฮดรอกซีแอปไทต์ (Hydroxyapatite)วัสดุทดแทนกระดูก.[online].Available:<http://www.ioi.com/patient/ha.html>
12. Ulrich, A. 1993. **Introduction to Industrial Polymers**. 2nd edition. Germany: Hanser Publisher.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Billmeyer, F.W., Jr., Eckard, A.D. 1969, *Macromolecule*. (2): 103-105.
14. Parker, S.P. 1993. *Encyclopedia of Chemistry Vol.3*. USA: McGraw-Hill.
15. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC).1997-2002.ไฮดรอกซีแอปาไทต์(Hydroxyapatite)วัสดุทดแทนกระดูก.[online].Available:
<http://magnet.mtec.or.th/Internet/services/publications/newsletters/Biomat/content4.html>
16. ทศนีย์ ตรงค์สุวรรณ และประสิทธิ์ กวสันต์. “ผลของเกลือไฮดรอกซีแอปาไทต์ต่อเซลล์สร้างเส้นใยจากเหงือกและเอ็นยึดปริทันต์” *วารสารคณะทันตแพทยศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. 20 (2540) : 183-193.
17. Sir Chamley J. และทีมงานวิจัยแห่ง Queen Mary and Westfield College. “HAPEX™ วัสดุที่เปรียบเสมือนเนื้อเยื่อของร่างกาย” *Materials World*. 5 (1997) : 18-20.
18. เขาวเรศ มะลิมาศ และปิยวิทย์รัตนฤทธินนท์. 2544. การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์เพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
19. ทศนีย์ ตรงค์สุวรรณ และประสิทธิ์ กวสันต์. “การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออนในอาหารเลี้ยงเซลล์กระตุ้นการสร้างไฟโบรเนกทินใน เซลล์เพาะเลี้ยงจากเนื้อเยื่อเอ็นยึดปริทันต์ของมนุษย์” *วารสารคณะทันตแพทยศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. 21 (2541) : 65-73.
20. Lorprayoon, C., Pathumarak, S. and Intiya, W. “Preparation and Characterisation of Porous Hydroxyapatite From Bovine Bone Used as Bone Substitute Materials.” Abstr. the 26th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, October 18-20, 2000.
21. Dietrich, B., Viout, P. and Lehn, J.M. 1993. *Macrocyclic Chemistry Part I (Chapter 3)*. Weinheim VCH.
22. Habbard, P. and Brittain, W.J. 1996. Synthesis and Ring-Opening Polymerisation of Poly(alkylene 2,6-naphthalenedicarboxylate) Cyclic Oligomers. *Macromolecule*. (29): 8304-8307.
23. Kokubo, T. 1990. *J. Non-Cryst. Solids*. (120): 138.
24. Kokubo, T. 1993. *An Introduction to Bioceramics*. Singapore: World Scientific Publishing.
25. Cho, S.B., Nakanishi, K., Kokubo, T., Soca, N., Ohtsuki, C., Nakamura, T., Kitsuki, T. and Yamamura, T. 1995. *J. Am. Ceram. Soc.* (78): 1769.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. ทศนีย์ อินทรวิเชียร. 2546. การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม พอลิ(ไดเอทิลีนอะดิเปต-ไดเอทิลีน เทเรพทาเลต) วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุประกอบที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุประกอบที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 3:1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 ไคอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของไฮดรอกซีแอป-
ไทต์บริสุทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-2 ไดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของไฮดรอกซีแอปาทิต์บริสุทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 โดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของไฮดรอกซีแอปาทิต์บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-4 โดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของวัสดุประกอบ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAP:PDET เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 โดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของวัสดุประกอบ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp : PDET เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-6 โดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของวัสดุประกอบ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ 3:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-7 โดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของวัสดุประกอบ
ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp:PDET เท่ากับ
3:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-8 โดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของวัสดุประกอบ
ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp : PDET เท่ากับ
4:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-9 โดอะแกรมจากเครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแสดงค่าแรงสูงสุดของวัสดุประกอบ ที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง HAp : PDET เท่ากับ 4:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้