

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต
และพอลิเอทิลีนอะคิเลต



นางสาว นิษณา เนตรสวัสดิ์
นางสาว ภาวิชา สุขประเสริฐ
นางสาว สุทธาฉวี จันทหาร

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62140
วัน,เดือน,ปี..... 3 1 .ค.ค. 2549

6.....
.....

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Synthesis of Hydroxyapatite-Calcium Silicate/
Poly(ethylene adipate) Composites



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 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างไฮดรอกซีเอปอไซด์กับแคลเซียม-ซิลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปต

นักศึกษา นางสาวนิษณา เนตรสวาสดี
นางสาวภานิชา สุขประเสริฐ
นางสาวสุทธาชีนี จันทหาร

ภาควิชา เคมี
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ปุณณมา สิริพันธ์โนน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร. ตะวัน สุชน้อย
กรรมการ ดร. ชลลดา ถัดวิรุฬห์
กรรมการ ผศ.ดร. ปุณณมา สิริพันธ์โนน

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

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียม-ซิลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปต		
นักศึกษา	นางสาว นิษณา เนตรสวาสดี	44050089	
	นางสาว ภาณีชา สุขประเสริฐ	44050111	
	นางสาว สุทธาฉินี จันทหาร	44050137	
ภาควิชา	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2547		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ภัทรวาท มนฉวีเศษ		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปต (HAp-CS/PEA) โดยการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดฟอสฟอริก และสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกตโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตกตะกอน จากนั้นนำ HAp และ CS ที่สังเคราะห์ได้มาผสมในอัตราส่วน HAp:CS ที่ 70:30, 80:20 และ 90:10 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทรงกระบอกด้วยการกดอัดขึ้นรูป โดยมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึดติด จากนั้นนำไปเผาที่ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้เป็นชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ที่มีรูพรุน ขั้นตอนต่อมาสังเคราะห์สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปตจากพอลิเอทิลีนอะดิเปต โดยใช้ปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง จากนั้นเตรียมวัสดุประกอบโดยการแช่ชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ในสารละลายของสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปต จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงได้เป็นวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA วัสดุประกอบที่เตรียมได้ถูกนำไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงกด (Compressive strength) พบว่าค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบที่ทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์เริ่มต้น โดยวัสดุประกอบจะมีค่าความแข็งแรงกดอยู่ในช่วง 36-70 MPa ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการกระจายแรงของพอลิเอทิลีนอะดิเปต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Synthesis of Hydroxyapatite-Calcium Silicate / Poly(ethylene adipate) Composites
Name	Miss Nitsana Netswasdi Miss Paanicha Sukprasert Miss Sutachinee Jantahan
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic	2004
Special Project advisor	Asst.Prof.Dr. Punnama Siriphannon
Special Project co-Advisor	Asst.Prof.Dr. Pathavuth Monvisade

Abstract

This project was studied about the synthesis of composites of hydroxyapatite-calcium silicate with poly(ethylene adipate) (HAp-CS/PEA). Hydroxyapatite was synthesised by coprecipitation method from calcium hydroxide and phosphoric acid. Calcium silicate (CS) was synthesised by coprecipitation from calcium nitrate tetrahydrate and tetraethyl orthosilicate using sodium hydroxide as a precipitant. The HAp and CS in ratio of 70:30 80:20 and 90:10 by weight. The mixed powders were then pressed into cylindrical shape using poly(vinyl alcohol) (PVA) as a binder. The samples were fired at 1100 °C for 5 hours in order to obtain the porous HAp-CS ceramics. Cyclic oligo(ethylene adipate)(C-PEA) was synthesised by cyclo-depolymerization of PEA. HAp-CS/PEA composites were prepared by soaking the porous HAp-CS into the C-PEA solution, and then ring-opening polymerization (ROP) of C-PEA within the porous HAp-CS at 220 °C for 24 hours. After that the compressive strength of the composites were examined. It was found that the values of compressive strength of the composites was higher than those of the porous pre-composites. The compressive strength of the composites were 18-151 MPa. This is a result of reinforced poly(ethylene adipate).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำ และคำปรึกษาต่างๆจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา อบรมเอาใจใส่และกรุณาตรวจทาน แก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์คณะกรรมการที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และคอยให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พัชนี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค NMR

ขอขอบพระคุณพี่ปราณี ชนระวงศ์ พี่วไลลักษณ์ พี่เพ็ญศรี พี่อลงกต ตรีทอง พี่นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกๆฝ่าย สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนคอยเอื้อเฟื้ออุปถัมภ์ สารเคมี และเครื่องมือต่างๆ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ทำให้การดำเนินโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ซึ่งไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้

นส. นิยมา เนตรสวาสดี

นส. ภานิชา สุขประเสริฐ

นส. สุหาชินี จันทหาร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 วัสดุทางชีวภาพ	3
2.1.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม	3
2.2 ไฮดรอกซีแอปาทิต	4
2.2.1 โครงสร้างผลึกไฮดรอกซีแอปาทิต	5
2.2.2 สมบัติของไฮดรอกซีแอปาทิต	7
2.2.3 แอปาทิตในกระดูกและฟัน	8
2.2.4 พฤติกรรมของไฮดรอกซีแอปาทิตที่อุณหภูมิสูง	11
2.2.5 สารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่น ๆ	11
2.2.6 สารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่น ๆ	12
2.2.7 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิต	13
2.2.8 การประยุกต์ใช้งานของไฮดรอกซีแอปาทิต	15
2.2.9 ลักษณะการนำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้งาน	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.2.10 ตัวอย่างการใช้งานของไฮดรอกซีแอปาทาไทต์ใน งานสตัลยกรรมและทันตกรรม	16
2.3 แคลเซียมซิลิเกต	17
2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแคลเซียมซิลิเกต	17
2.3.2 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกต	18
2.3.3 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมซิลิเกต	19
2.3.4 สมบัติของแคลเซียมซิลิเกต	20
2.3.5 สมบัติเด่นและประโยชน์ของแคลเซียมซิลิเกต	21
2.3.6 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต	21
2.3.7 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกต	22
2.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอามเฟา	23
2.5 พอลิเอสเทอร์	23
2.5.1 อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์	26
2.5.2 อะโรมาติกพอลิเอสเทอร์	26
2.6 การตีพอลิเมอร์ชั้นแบบปิดวง	27
2.7 ปฏิกริยาพอลิเมอร์ชั้นแบบเปิดวง	28
2.8 วัสดุประกอบ	29
2.8.1 ความหมายของวัสดุประกอบ	29
2.8.2 ชนิดของวัสดุประกอบ	30
2.9 การบำบัดรักษาโดยการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ	30
2.10 ปฏิกริยาโต้ตอบของร่างกายต่อวัสดุชีวภาพ	32
2.11 กลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ	33
2.12 การทดสอบวัสดุทางชีวภาพ	35
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	42
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง	45
3.3.1 การเตรียมไฮดรอกซีแอปาทิต(HAp)	45
3.3.2 การเตรียมแคลเซียมซัลเฟต(CS)	47
3.3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์(PVA)	49
3.3.4 การขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาทิต-แคลเซียมซัลเฟต(HAp-CS)	50
3.3.5 การดีโพลิเมอร์ไรซ์แบบปิดวงของพอลิเอทิลีนอะดิเปต	52
3.3.6 การเตรียมวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA	54
3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	
4.1 สารตั้งต้นชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS	57
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของ HAp ที่สังเคราะห์ได้	57
4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซัลเฟตที่สังเคราะห์ได้	57
4.2 ดีโพลิเมอร์ไรเซชันแบบปิดวง (Cyclo-depolymerisation, CDP)	58
4.2.1 สารประกอบวงโพลีเอทิลีนอะดิเปต	58
4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาทิต-แคลเซียมซัลเฟต	59
4.3.1 ชิ้นงานเซรามิกส์ไฮดรอกซีแอปาทิต-แคลเซียมซัลเฟต	59
4.3.2 วัตถุประสงค์ที่เป็นผลึกของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ที่ได้จากเทคนิค XRD	60
4.4 วัสดุประกอบระหว่าง HAp-CS/PEA	62
4.4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์	62
4.4.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA	63
4.4.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ PEA ในวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้	65
4.4.4 ความหนาแน่นของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA	66
4.5 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA	67
4.5.1 การทดสอบความแข็งแรงกด	67
4.5.2 แนวโน้มของความหนาแน่นต่อค่าความแข็งแรงกด	68

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
5.1 ไฮดรอกซีเอปาทาइट (HAp)	69
5.2 แคลเซียมซิลิเกต (CS)	69
5.3 สารประกอบวงโอลิโกเทตินอะดิเปต (C-PEA)	69
5.4 วัสดุประกอบ HAp-CS/PEA	69
5.5 สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA	70
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก ก รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากฐานข้อมูล JCPDS	74
ภาคผนวก ข อินฟราเรดสเปกตรัม	77
ภาคผนวก ค นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม	81
ภาคผนวก ง โครมาโทแกรมจากเทคนิค GPC	85
ภาคผนวก จ เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA	91
ภาคผนวก ฉ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวจากเทคนิค SEM	95
ภาคผนวก ช การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine	102



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีแอปาไทต์	7
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมี ระบบผลึกและสมบัติเชิงกลของเคลือบฟัน กระดูก และไฮดรอกซีแอปาไทต์	8
ตารางที่ 2.3 แคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ที่มีอัตราส่วน Ca:P แตกต่างกัน	12
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite	18
ตารางที่ 2.5 สมบัติบางประการและการประยุกต์ใช้เส้นใยพอลิเอสเทอร์	24
ตารางที่ 2.6 การประยุกต์ใช้งาน ข้อดี และข้อเสียของวัสดุชีวภาพ	32
ตารางที่ 2.7 ชนิดของเซรามิกส์ตามกลไกการยึดติดและตัวอย่างของเซรามิกส์ แต่ละประเภท	34
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนและน้ำหนักไฮดรอกซีแอปาไทต์ : แคลเซียมซิลิเกตด้วย วิธีขึ้นรูปกดอัด	50
ตารางที่ 3.2 ลำดับชั้นอุณหภูมิและเวลาในการเผาขึ้นงาน ไฮดรอกซีแอปาไทต์กับ แคลเซียมซิลิเกต	50
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วน โมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของแคลเซียมซิลิเกต ที่สังเคราะห์ได้	57
ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ในแต่ละอัตราส่วน	60
ตารางที่ 4.3 โครมาโทแกรมของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยา ROP ที่เปอร์เซ็นต์ PVA ต่าง ๆ	62
ตารางที่ 4.4 น้ำหนักของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS เริ่มต้นเทียบกับน้ำหนัก ของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่เตรียมได้	66
ตารางที่ 4.5 ความหนาแน่นของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA เปรียบเทียบกับ ชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS	67

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของเนื้อเยื่อแข็งในร่างกายมนุษย์	4
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของกระดูกในร่างกาย	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์	6
รูปที่ 2.4 ภาพฉายด้านบนของโครงสร้างผลึกไฮดรอกซีแอปพาไทต์	6
รูปที่ 2.5 รูปร่างผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์	7
รูปที่ 2.6 ผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตรวจสอบวิเคราะห์โดย SEM	10
รูปที่ 2.7 ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่เป็นผลึกเดี่ยว ตรวจสอบวิเคราะห์โดย SEM	10
รูปที่ 2.8 กระดูกมนุษย์ และสาร ไฮดรอกซีแอปพาไทต์	16
รูปที่ 2.9 รากฟันที่ทำจากไฮดรอกซีแอปพาไทต์	17
รูปที่ 2.10 รากฟันที่ทำจากไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่เคลือบบนโลหะที่ทานิยม	17
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกต	19
รูปที่ 2.12 รูปผลึกของ Wollastonite ที่พบได้ในธรรมชาติ	20
รูปที่ 2.13 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลต	27
รูปที่ 2.14 การเกิดสารประกอบประเภทวงด้วยวิธีการดีพอลิเมอร์ไรซ์แบบปิดวง	27
รูปที่ 2.15 การสังเคราะห์สารประกอบวงเอไมด์	28
รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบปิดวงด้วยไอออนลบ	28
รูปที่ 2.17 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบวงของ Poly(butylene2, 6-naphthalene dicarboxylate) cyclic(PBN)	29
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์	46
รูปที่ 3.2 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต	48
รูปที่ 3.3 แผนงานการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	49
รูปที่ 3.4 แผนงานการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์-แคลเซียมซิลิเกต โดยการขึ้นรูปด้วยการกดอัดแบบเม็ค	51
รูปที่ 3.5 แผนงานการดีพอลิเมอร์ไรซ์แบบปิดวงของ PEA	53
รูปที่ 3.6 แผนงานการสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปต	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 3.7 แผนงานการวัดความแข็งแรงกด (Compressive strength)	56
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเซรามิกส์ที่อัตราส่วน HAp:CS ต่าง ๆ	61
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานเซรามิกส์และวัสดุประกอบไฮดรอกซีเอปาทาइटกับแคลเซียมซลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปต	63
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวภายในของชิ้นงานเซรามิกส์ก่อนการเตรียมวัสดุประกอบและชิ้นงานวัสดุประกอบไฮดรอกซีเอปาทาइटกับแคลเซียมซลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปต	64
รูปที่ 4.4 กราฟค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ในอัตราส่วน HAp:CS ต่าง ๆ	67
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงแนวโน้มความหนาแน่นต่อความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่อัตราส่วน HAp:CS ต่าง ๆ	68



คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

HAp	Hydroxyapatite
Na-CS	Sodium calcium silicate
PEA	Poly(ethylene adipate)
HAp-CS	Hydroxyapatite-Calcium silicate
HAp-CS/PEA	Hydroxyapatite-Calcium silicate with Poly(ethylene adipate) composite
ROP	Ring-opening polymerization
ROP-PEA	Poly(ethylene adipate) was synthesised by Ring-opening polymerization
CDP	Cyclodepolymerization
GPC	Gel permeation Chromatography
Mn	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน
Mw	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก
MWD	ค่าการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล
FT-IR	Fourier transform infrared spectrophotometry
U	เลขคลื่น
%T	% Transmitted
δ	Chemical shift
NMR	Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy
For NMR:	
br	broad
d	doublet
m	multiplet
s	singlet
t	triplet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEM	Scanning Electron Microscopy
XRF	X-ray fluorescence
XRD	X-ray diffraction
TGA	Thermogravimetric analysis



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์ทางการแพทย์ได้มีการพัฒนาให้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถสังเกตได้จากงานคิดค้นและวิจัยต่าง ๆ มากมายซึ่งเกี่ยวข้องกับ การรักษา การฟื้นฟูสมรรถภาพเมื่อร่างกายได้รับโรคร้ายไข้เจ็บและอุบัติเหตุต่างๆ การเปลี่ยนถ่ายอวัยวะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งทางการแพทย์ใช้ในการบำบัดรักษา เมื่อเนื้อเยื่อหรืออวัยวะภายในร่างกายบกพร่องไม่สามารถใช้งานได้ โดยการผ่าตัดเอาเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่บกพร่องออกแล้วแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อจากร่างกายผู้ป่วยเอง หรือการนำเนื้อเยื่อหรืออวัยวะจากสิ่งมีชีวิตอื่นมาใช้ทดแทน แต่การรักษาด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดทางด้านปริมาณ คุณภาพ ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและแหล่งที่มาของเนื้อเยื่อ ดังนั้นจึงได้มีการนำวัสดุชีวภาพหรืออวัยวะเทียมมาใช้ทดแทนเนื้อเยื่อหรืออวัยวะภายในร่างกายที่บกพร่องไม่สามารถใช้งานได้ โดยวัสดุชีวภาพที่เลือกใช้ควรเป็นวัสดุที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย มีคุณภาพ และมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับอวัยวะที่ถูกทดแทนในร่างกายของมนุษย์ สามารถกำหนดปริมาณในการผลิตและความคุมมาตรฐานได้ ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ผลิตวัสดุชีวภาพที่ได้รับความนิยมคือ ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) เพราะไฮดรอกซีแอปาทิตเป็นองค์ประกอบหลักของกระดูกและฟัน จึงทำให้นักวิจัยเล็งเห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำไฮดรอกซีแอปาทิตมาใช้เป็นวัสดุค้ำในการผลิตวัสดุชีวภาพหรืออวัยวะเทียม เพื่อใช้ในร่างกายโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่ร้ายแรง แต่เนื่องจากไฮดรอกซีแอปาทิตมีสมบัติเชิงกลต่ำ เปราะและขึ้นรูปได้ยาก จึงได้มีการศึกษาและวิจัยเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้น โดยการนำแคลเซียมซิลิเกตชนิดวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีความแข็งแรงสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และทนต่อการเสีรูปร่างทางความร้อนได้ดีมาผสมกับไฮดรอกซีแอปาทิตเพื่อปรับปรุงด้านการขึ้นรูป จากนั้นนำชิ้นงานเซรามิกส์ผสมที่ได้มาปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง โดยใช้พอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี หาได้ง่าย ราคาไม่แพง มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ พอลิเอทิลีนอะดิเปต (PEA) [1] มาทำเป็นวัสดุประกอบร่วมกับไฮดรอกซีแอปาทิต-แคลเซียมซิลิเกต

โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการขึ้นรูปวัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทิตกับแคลเซียมซิลิเกต โดยมีแคลเซียมซิลิเกตช่วยในการขึ้นรูปและเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮดรอกซีแอปาทิต แต่ในงานวิจัยนี้ยังคงต้องการให้ไฮดรอกซีแอปาทิตเป็นวัสดุค้ำเนื่องจากไฮดรอกซีแอปาทิตเป็นองค์ประกอบหลักในกระดูกและฟัน แล้วนำมาเตรียมเป็นวัสดุประกอบร่วมกับพอลิเอทิลีนอะดิเปต

จากนั้นนำวัสดุประกอบที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกด (Compressive strength) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุประกอบไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาสภาวะและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมชิ้นงานเซรามิกส์จากไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต (HAp-CS)
2. เตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปต (HAp-CS/PEA)
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจากไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปต (HAp-CS/PEA)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปต โดยเริ่มต้นจากการสังเคราะห์วัตถุดิบต่างๆ ได้แก่ ไฮดรอกซีแอปพาไทต์และแคลเซียมซิลิเกตโดยวิธีตกตะกอนทางเคมี และสารประกอบวง PEA ด้วยปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เซชันแบบปิดวง นำวัตถุดิบเซรามิกส์ที่สังเคราะห์ได้มาเตรียมชิ้นงานเซรามิกส์ของไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกตที่มีรูพรุน จากนั้นเตรียมวัสดุประกอบโดยปฏิกิริยาการเปิดวงของสารประกอบวง PEA ภายในรูพรุนของชิ้นงานเซรามิกส์ วัสดุประกอบที่เตรียมได้จะนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ พร้อมทั้งทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกด เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการพิจารณาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปตไปใช้ในการผลิตวัสดุชีวภาพหรืออวัยวะเทียม เพื่อประโยชน์ในทางการแพทย์ต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปตได้
2. ทำให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปต
3. ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้มาใช้กับร่างกายของมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วัสดุทางชีวภาพ [4]

ในปี ค.ศ.1974 ได้มีการตั้งคำนิยามของวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) อย่างเป็นทางการ ดังนี้ “วัสดุชีวภาพเป็นวัสดุที่เฉื่อย ถูกออกแบบมาเพื่อฝังหรือรวมเข้าไปในร่างกายของสิ่งมีชีวิต” ต่อมาปี ค.ศ.1980 นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Bruck ได้ให้คำนิยามไว้ว่า “วัสดุชีวภาพเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ตีเทียบเท่าอวัยวะธรรมชาติ และได้เข้าไปมีส่วนเกี่ยวข้องกับเนื้อเยื่อ เลือด ของเหลวในร่างกายโดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกาย ถูกกำหนดไว้ใช้งานทางสัลยกรรม การวินิจฉัยโรค การเชี่ยวชาญรักษาโรค และสามารถเก็บรักษาไว้ใช้งานทางการแพทย์ได้”

วัสดุชีวภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. วัสดุธรรมชาติ (Biological materials) ได้แก่ เนื้อเยื่อและวัสดุธรรมชาติต่าง ๆ
2. วัสดุสังเคราะห์สำหรับการเปลี่ยนถ่าย (Implant materials) ได้แก่ วัสดุสังเคราะห์ที่สามารถทำหน้าที่ทดแทนวัสดุธรรมชาติได้

2.1.1 การจำแนกประเภทของวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม [4]

วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมสามารถจำแนกประเภทตามวัสดุที่ใช้ผลิต ได้แก่ โลหะ พอลิเมอร์ เซรามิกส์ และวัสดุประกอบ

1. โลหะ (Metals) เช่น ไททานเนียมและโลหะผสม สแตนเลส ทองคำและเงิน เป็นต้น โลหะมีความแข็งแรงดึงและทนแรงกระทำสูง ทนต่อการขีดถูและมีความเหนียว แต่อาจเกิดการสึกกร่อนและปล่อยสารที่เป็นพิษต่อร่างกายได้ นอกจากนี้โลหะบางประเภทยังขึ้นรูปได้ยาก ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น ข้อต่อ รากฟันเทียม กระดูกและส่วนที่ยึดติดกระดูก ฯลฯ
2. พอลิเมอร์ (Polymers) เช่น ยาง ซิลิโคน เทฟลอน ไนลอน เป็นต้น โดยพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น ความหนาแน่นต่ำและสามารถผลิตได้ง่าย แต่พอลิเมอร์ไม่แข็งแรง เกิดการเสียสภาพเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ตัวอย่างการนำไปใช้งาน เช่น การเย็บตักแต่ง เส้นเลือดเทียม ข้อต่อสะโพก และเนื้อเยื่ออ่อนต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

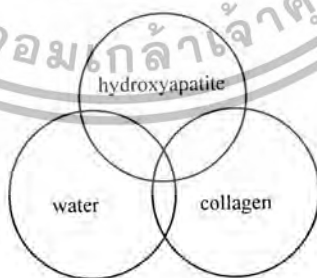
3. เซรามิกส์ (Ceramics) เช่น แคลเซียมฟอสเฟต ไฮดรอกซีเอปาทาइट เป็นต้น ซึ่งวัสดุประเภทนี้มีความเข้ากันได้ดีกับร่างกาย ทนต่อการกัดกร่อน มีทั้งที่เหนียวและว่องไวทางชีวภาพ แต่เซรามิกส์มีลักษณะเปราะและไม่ยืดหยุ่น การนำไปใช้งานทางการแพทย์ เช่น นำไปทำฟันปลอม เคลือบกระดูกและฟัน ข้อต่อ
4. วัสดุประกอบ (Composites) เช่น โลหะเคลือบผิวด้วยเซรามิกส์ วัสดุเคลือบผิวด้วยคาร์บอน เป็นต้น สมบัติเชิงกลมีหลากหลายและเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานทางการแพทย์ในรูปแบบต่างๆ แต่มีขั้นตอนในการผลิตยากกว่าวัสดุประเภทอื่น ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ข้อต่อซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงมาก ลิ้นหัวใจเทียม เป็นต้น

2.2 ไฮดรอกซีเอปาทาइट (Hydroxyapatite, HAp)

องค์ประกอบหลักของร่างกายมนุษย์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ น้ำ คอลลาเจน (Collagen) และไฮดรอกซีเอปาทาइट (Hydroxyapatite) โดยไฮดรอกซีเอปาทาइटเป็นแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในกระดูกและฟัน ซึ่งมีอยู่ประมาณ 5% ของน้ำหนักร่างกาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1

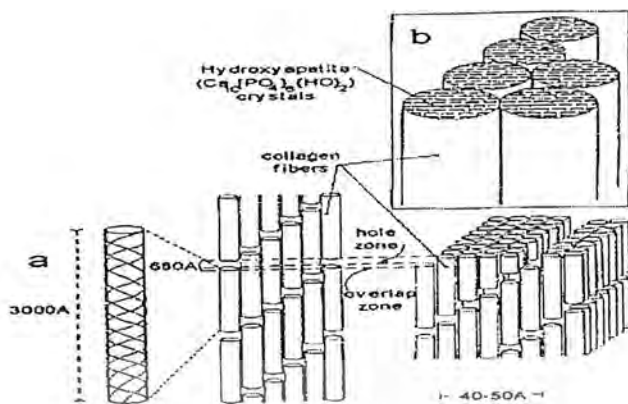
กระดูกและเนื้อเยื่อแข็งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ [5]

1. ส่วนที่เป็นแร่ธาตุ ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์มีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก ประกอบด้วยสารไฮดรอกซีเอปาทาइटเป็นหลัก
2. เนื้อเยื่อ (Tissues) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ประกอบด้วยเซลล์ ไขมัน และพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) พอลิฟอสเฟต (Polyphosphates) คอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของเนื้อเยื่อแข็งในร่างกายมนุษย์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของกระดูกในร่างกาย [7]

2.2.1 โครงสร้างผลึกไฮดรอกซีเอปาทิต [6]

สารไฮดรอกซีเอปาทิตเป็นสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate) มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ มีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P เป็น 10:6 หรือ 1.67:1 คำว่า ไฮดรอกซีเอปาทิต มาจากคำว่า "ไฮดรอกซี (Hydroxy)" ซึ่งหมายถึงไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion) และคำว่า "เอปาทิต (Apatite)" เป็นชื่อของผลึกแร่ธาตุที่มีองค์ประกอบดังนี้ $\text{M}_{10}(\text{ZO}_4)_6\text{X}_2$

สารประกอบเอปาทิต (Apatite compounds) จะมีส่วนประกอบแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับไอออนที่เข้าแทนที่ในตำแหน่ง M, Z และ X ซึ่งไอออนที่เป็นไปได้ในการแทนที่ ได้แก่

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

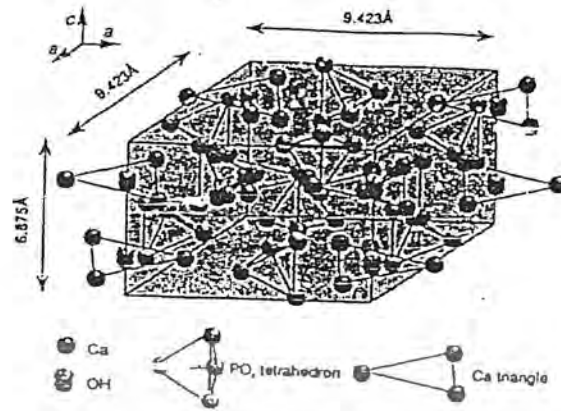
Z = P, V, As, S, Si, Ge, Cr, B ฯลฯ

X = OH, OD, CO_3 , O, BO_2 , F, Cl, Br, Vacancy ฯลฯ

ไฮดรอกซีเอปาทิตมีรูปผลึกเป็นเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ขนาดหน่วยเซลล์ (Unit cell) $a = 9.423 \text{ \AA}$ และ $c = 6.875 \text{ \AA}$ ดังรูปที่ 2.3

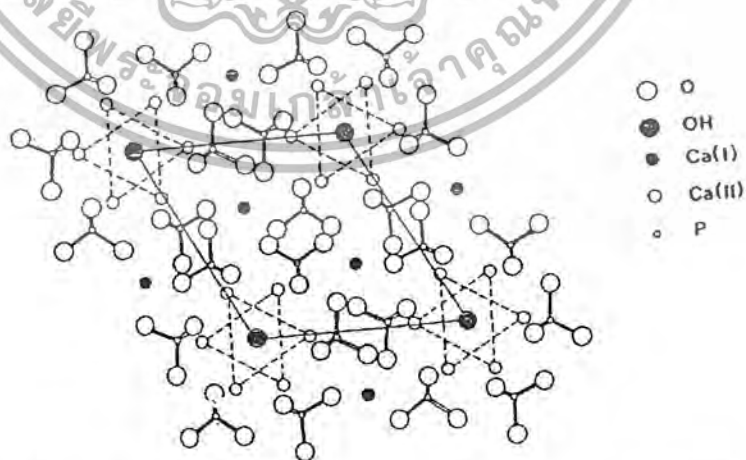
สูตรเคมี	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	$M = 1004.8$
ระบบผลึก (Crystal system)	Hexagonal
ขนาดหน่วยเซลล์ (Unit cell)	$a = 9.423 \text{ \AA}, c = 6.875 \text{ \AA}$
Chemical Unit Number	$Z = 1$
ความหนาแน่น (Density)	$D = 3.16 \text{ g/cm}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



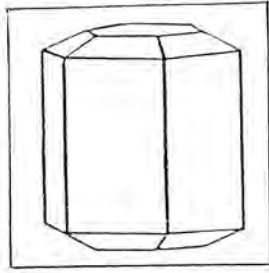
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีเอปาทาइट

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ของไฮดรอกซีเอปาทาइट โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บริเวณมุมที่ฐานรอมบิก (Rhombic) ของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นคอลัมน์ในที่ว่างซึ่งมีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงของหน่วยเซลล์ คอลัมน์ของหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกล้อมรอบด้วยแคลเซียมไอออน 6 ไอออน ที่จัดเรียงตัวในลักษณะสามเหลี่ยมด้านเท่า 2 รูป ตั้งฉากกับคอลัมน์ของไฮดรอกซิล โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นศูนย์กลางแคลเซียมไอออน อีก 4 ไอออนที่เหลือจะเรียงต่อเป็นคอลัมน์ 2 คอลัมน์ระหว่างสามเหลี่ยมด้านเท่าของแคลเซียมไอออนขนานกับคอลัมน์ของไฮดรอกซิล แคลเซียมไอออนเหล่านี้จะถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนของออร์โธฟอสเฟตเตตระฮีดรอล (Ortho phosphate tetrahedral) โดยออกซิเจนของไฮดรอกซิล (Hydroxyl oxygen) จะอยู่ห่างจากระนาบของสามเหลี่ยมไฮดรอกซิลประมาณ 0.3 Å



รูปที่ 2.4 ภาพฉายด้านบนของโครงสร้างผลึกไฮดรอกซีเอปาทาइट

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 รูปร่างผลึกของไฮดรอกซีแอนโอด

2.2.2 สมบัติของไฮดรอกซีแอนโอด [8]

ไฮดรอกซีแอนโอดเป็นสารประกอบที่ไม่เสถียรต่อความร้อน สลายตัวที่อุณหภูมิ 800-1200°C ขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมี โดยทั่วไปไฮดรอกซีแอนโอดมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องรับน้ำหนักมาก ๆ ได้

สมบัติทางกายภาพ

ค่าความแข็งของไฮดรอกซีแอนโอดในระบบของ Mohs เท่ากับ 5 และความหนาแน่นเท่ากับ 3.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีแอนโอดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีแอนโอด

Temperature (°C)	Compressive Strength σ_c (MPa)	Flexural Strength σ_f (MPa)	Torsional Strength τ_{st} (MPa)	Dynamic Torsional Strength τ_{dy} (MPa)	Modulus of elasticity in compressive on E_c (MPa)	Modulus of elasticity in bending E_b (GPa)
1150	308±46	61±8	50±7	57±6	42.2±3.8	44.3±3.5
1200	415±46	104±11	62±5	92±6	74.6±4.1	80.0±6.4
1250	465±58	106±10	75±4	76±5	79.0±4.8	85.1±6.1
1300	509±57	113±12	76±5	68±5	81.4±4.6	87.8±6.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการละลายของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ [6]

ไฮดรอกซีแอปพาไทต์สามารถละลายได้ในสารละลายกรด และละลายได้เล็กน้อยในน้ำกลั่น แต่ไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอัลคาไลน์ โดยมีค่าการละลายในน้ำกลั่น (pKs) ประมาณ 120

$$\text{pKs} = -\log([\text{Ca}]^{10}[\text{PO}_4]^{6}[\text{OH}]^2) \cong 120 \quad (1)$$

ความสามารถในการละลายในน้ำกลั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แต่ความสามารถในการละลายของไฮดรอกซีแอปพาไทต์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีกรดอะมิโน โพรตีนเอนไซม์และสารอินทรีย์อื่น ๆ สมบัติด้านการละลายนี้สัมพันธ์กับความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) กับเนื้อเยื่อ และปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบอื่น ๆ อย่างไรก็ตามอัตราของการละลายยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูปร่าง ความมีรูพรุน ขนาดผลึก ความเป็นผลึก และการเสียรูปเนื่องจากความเครียด (Strain defects) เมื่อนำไฮดรอกซีแอปพาไทต์ไปเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง สำหรับเนื้อเยื่อใต้ผิวหนังจะมีอัตราของการละลายเป็น 0.1 มิลลิกรัมต่อปี โดยที่ไฮดรอกซีแอปพาไทต์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโปรตีน ไขมัน สารอินทรีย์อื่น ๆ และแร่ธาตุอินทรีย์ได้

2.2.3 แอปพาไทต์ในกระดูกและฟัน

แอปพาไทต์ในกระดูกและฟันอาจเรียกว่า “สารแอปพาไทต์ชีวภาพ” (Biological apatite) ซึ่งมีสูตรเคมีหลากหลายแตกต่างกันขึ้นกับไอออนองค์ประกอบของแอปพาไทต์ และความบกพร่อง (Defects) ที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมี ระบบผลึกและสมบัติเชิงกลของเคลือบฟัน กระดูก และไฮดรอกซี-แอปพาไทต์ [8]

	Enamel	Bone	HAp
<i>Constituents (wt%):</i>			
Calcium, Ca ²⁺	36.0	24.5	39.6
Phosphorus, P	17.7	11.5	18.5
(Ca/P) molar	1.62	1.65	1.67
Sodium, Na ⁺	0.5	0.7	tr
Potassium, K ⁺	0.08	0.03	tr

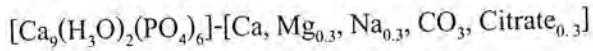
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

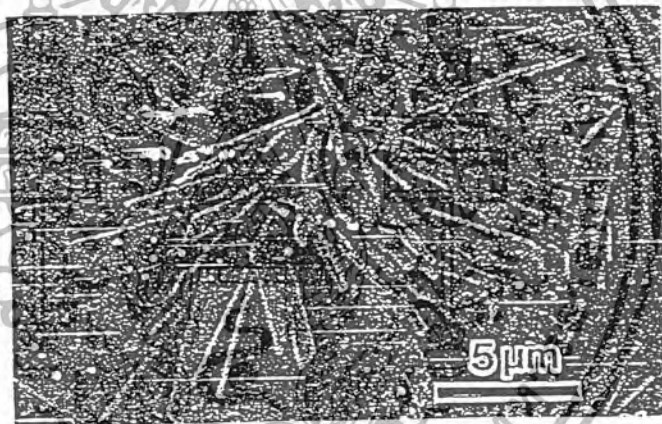
	Enamel	Bone	HAp
Magnesium, Mg ²⁺	0.44	0.55	tr
Carbonate, CO ₃ ²⁺	3.2	5.8	-
Fluoride, F ⁻	0.01	0.02	-
Chloride, Cl ⁻	0.30	0.10	-
Ash (total inorganic)	97.0	65.0	100
Total organic	1.0	25.0	-
Absorbed H ₂ O	1.5	9.7	-
Trace elements: Sr ²⁺ , Pb ²⁺ , Ba ²⁺ , Fe ³⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , etc.			
<i>Crystallographic properties</i>			
Lattice parameters (+/- 0.003 Å°)			
a-axis	9.441	9.419	9.422
c-axis	6.882	6.880	6.880
Crystallinity index	70-75	33-37	100
Crystalline size, Å°	1300 x 300	250 x 25-50	
<i>Product after sintering</i> (950°C)	Hydroxyapatite(HAp) + Tricalcium Phosphate (TCP)	Hydroxyapatite(HAp) + Calcium Oxide (CaO)	Hydroxyapatite(HAp)
<i>Mechanical properties</i>			
Elastic modulus (10 ⁶ MPa)	0.014	0.020	0.01
Tensile strength (MPa)	70	150	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

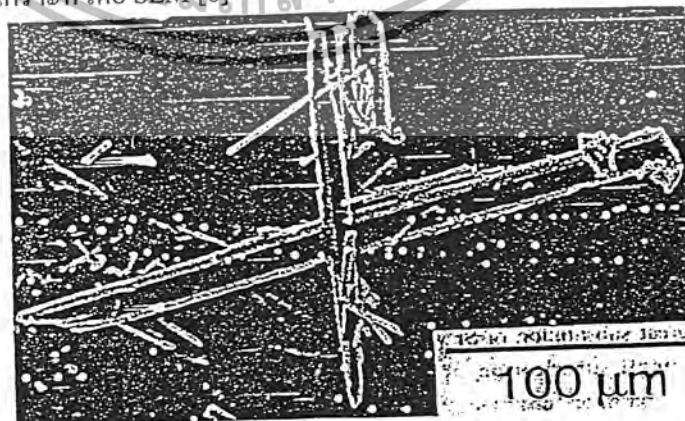
สูตรเคมีที่เป็นไปได้ขององค์ประกอบของกระดูกเป็นดังนี้



อย่างไรก็ตามสูตรนี้ไม่เป็นที่แน่นอนสำหรับแอปพาไทต์ของกระดูก เพราะในความเป็นจริง องค์ประกอบทางเคมีของแอปพาไทต์ของกระดูกจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามอายุ (Age) สปีชีส์ของสิ่งมีชีวิต (Species) และส่วนของอวัยวะ เป็นต้น อัตราส่วนโมลของ Ca:P ในเนื้อเยื่อแข็งประเภทกระดูกและฟันจะเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตจนมีค่าใกล้เคียง 1.67 ผลึกแอปพาไทต์ชีวภาพจะมีขนาดเล็กมาก โดยมีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร และมีรูปร่างเป็นแท่งยาวคล้ายรูปเข็ม (Needle-like) ในรูป 2.6 และ 2.7 แสดงตัวอย่างของผลึกแอปพาไทต์ โดยในกระดูกจะมีขนาดประมาณ 20 x 3 x 7 ลูกบาศก์นาโนเมตร ส่วนในเคลือบฟันจะมีขนาดประมาณ 150 x 60 x 30 ลูกบาศก์นาโนเมตร เป็นต้น เนื่องจากผลึกที่มีขนาดเล็กของแอปพาไทต์จึงสามารถช่วยให้การสร้างและซ่อมแซมกระดูกเกิดขึ้นได้เร็ว



รูปที่ 2.6 ผลึกของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตรวจวิเคราะห์โดย SEM [6]

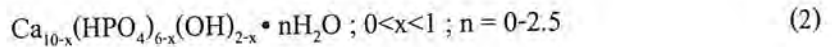


รูปที่ 2.7 ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่เป็นผลึกเดี่ยว ตรวจวิเคราะห์โดย SEM [6]

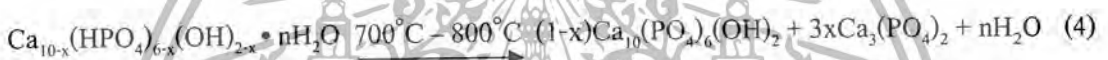
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 พฤติกรรมของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่อุณหภูมิสูง [10]

ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction pattern) ที่มีพีคฐานกว้าง เนื่องจากยังไม่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่าง ๆ ที่สมบูรณ์ สูตรทั่วไปที่ใช้แทนไฮดรอกซีแอปพาไทต์ดังกล่าวคือ



ในระหว่างที่ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้



สมการข้างบนสามารถใช้อธิบายในกรณีที่ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P เบี่ยงเบนไปจาก 1.67 (Non-stoichiometric HAp) เท่านั้น ในกรณีที่ Ca:P มีค่าเข้าใกล้ 1.67 (Stoichiometric HAp) พบว่าการเปลี่ยนแปลงไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่ 700°C หรือการเผา $900^\circ\text{C} - 1300^\circ\text{C}$ จะไม่พบเฟสอื่น ๆ เกิดขึ้นเลย [11]

ไฮดรอกซีแอปพาไทต์จะสูญเสียหมู่ไฮดรอกซิลที่ระเหย เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C แยกตัวให้ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ และ $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$



2.2.5 สารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่น ๆ [6]

นอกจากไฮดรอกซีแอปพาไทต์ยังมีสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตอีกหลายชนิดที่เข้ามามีบทบาทในงานวิจัยด้านวัสดุทางการแพทย์และอวัยวะเทียม สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเหล่านี้แตกต่างกันที่อัตราส่วนโมลของ Ca:P ในโครงสร้างและชนิดของไอออนองค์ประกอบอื่นๆ ตัวอย่างของแคลเซียมฟอสเฟตบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แคลเซียมฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ที่มีอัตราส่วน Ca:P แตกต่างกัน

สูตร	ชื่อ	อักษรย่อ	Ca:P
$\text{CaO}(\text{PO}_4)_2$	Tetracalcium phosphate (Hilgentsockite)	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 dehydrate (Brushite)	DCPD	1.0
CaHPO_4	Dicalcium phosphate (Monetite)	DCP	1.0
$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$	Calcium pyrophosphate dihydrate	CPPD	1.0
$\text{Ca}_7(\text{P}_5\text{O}_{16})_2$	Heptacalcium phosphate (Tromelite)	HCP	0.7
$\text{Ca}_2\text{H}_2\text{P}_6\text{O}_4$	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

2.2.6 การเตรียมสารไฮดรอกซีเอปาทิต

สามารถเตรียมได้จาก 3 แหล่ง คือ [5]

1. จากสารเคมี เช่น แคลเซียมไนเตรดและแอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้น
2. จากปะการัง โดยนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนเป็นสารไฮดรอกซีเอปาทิต แต่ปะการังมีปริมาณน้อยและเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจึงไม่นิยมนำมาใช้
3. จากกระดูกสัตว์ เช่น โค กระบือ ช้าง ปลา สุนัข รวมทั้งจากมนุษย์ โดยมากนิยมใช้กระดูกโคและกระบือมากกว่า เนื่องจากมีปริมาณมากและเป็นสัตว์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์อยู่แล้ว ทั้งใช้ในการบริโภคและใช้แรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

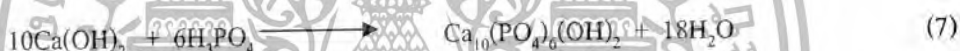
2.2.7 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์ [11]

วิธีการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

- วิธีตกตะกอนทางเคมี (Precipitation method)
- การใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis method)
- การใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)
- วิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method)
- วิธีอัลคอกไซด์ (Alkoxide method)

1. การตกตะกอนทางเคมี (Precipitation method)

การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์ โดยวิธีการตกตะกอนโดยทั่วไปจะเป็นไปตามวิธีของ Rathje [12] และ Hayek กับ Newesely [13] วิธีของ Rathje จะเป็นการเติมกรดฟอสฟอริกลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปั่นกววนอยู่ ดังสมการ (7)



ได้มีการปรับปรุงวิธีการตกตะกอนในสมการที่ (7) โดยการทำให้ปฏิกิริยามีความเป็นเบสสูง เพื่อให้เกิดไฮดรอกซีแอปาไทต์ได้ดีด้วยการเติมไฮดรอกไซด์ร่วมด้วย ดังวิธีของ Hayek กับ Newesely ในสมการ (8)



วิธีนี้จะมีความไวต่อค่า pH และความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ สามารถใช้ CaCO_3 , CaC_2O_4 , CaCl_2 หรือ $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ แทน $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ และในทำนองเดียวกันสามารถใช้ $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$, K_2HPO_4 , KH_2PO_4 หรือ NaH_2PO_4 แทน $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ แคลเซียมอะซิเตต ($\text{Ca}(\text{COOH})_2$) ได้ถูกเสนอให้นำมาใช้แทนแคลเซียมคลอไรด์หรือแคลเซียมไนเตรต เนื่องจากไอออนอะซิเตตจะไม่รวมเข้าด้วยกันกับไฮดรอกซีแอปาไทต์เหมือนไอออนไนเตรตหรือไอออนคลอไรด์ที่อาจรวมเข้ากับไฮดรอกซีแอปาไทต์ได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอนจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง $95\text{-}100^\circ\text{C}$

ไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ได้จากการตกตะกอนมีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด และจับตัวเป็นโครงสร้างที่มีรูปลูกที่ยังไม่สมบูรณ์

2. การใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis method)

ไฮดรอกซีเอปาทาइटสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกรดแคลเซียมฟอสเฟต เช่น ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ออกตะแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_8\text{H}_8(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ไดแคลเซียมฟอสเฟต (CaHPO_4) ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ไฮดรอกซีเอปาทาइटยังเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแคลเซียมคาร์บอเนตในสารละลายแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือโซเดียมฟอสเฟต

3. การใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-State reaction)

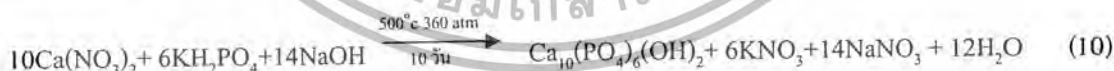
วิธีการนี้เป็นวิธีการพื้นฐาน ทำได้โดยการนำสารเคมีในสถานะที่เป็นของแข็งมาทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิสูง (Solid-State reaction) [14] ตัวอย่างวิธีการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ เช่น การทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) กับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ 1200°C ในบรรยากาศที่มีไอน้ำและไนโตรเจนในปริมาณที่เท่ากัน ดังสมการ



ไฮดรอกซีเอปาทาइटที่ได้จากปฏิกิริยาสถานะของแข็งจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดและเรียงเป็นโครงสร้างผลึกที่ดี

4. วิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Method)

วิธีนี้ทำโดยการนำสารเคมีที่เป็นเกลือของแคลเซียมและฟอสเฟต มาทำปฏิกิริยากันภายในบรรยากาศที่มีความดันและอุณหภูมิสูง เช่น Mosebach [15] ใช้ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ทำปฏิกิริยากับ KH_2PO_4 ใน NaOH ที่ 500°C ภายใต้ความดัน 360 บรรยากาศ เป็นเวลา 10 วัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการนี้



ส่วนวิธีของ Somiya [14] ใช้การควบคุมสถานะที่อุณหภูมิ $100\text{--}200^\circ\text{C}$ และความดัน 0.1- 0.2 เมกกะปาสกาล เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ไฮดรอกซีเอปาทาइटที่ได้จากวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว (Single crystal) ที่สมบูรณ์ และสามารถทำให้มีขนาดต่างๆได้

5. วิธีอัลค็อกไซด์ (Alkoxide Method)

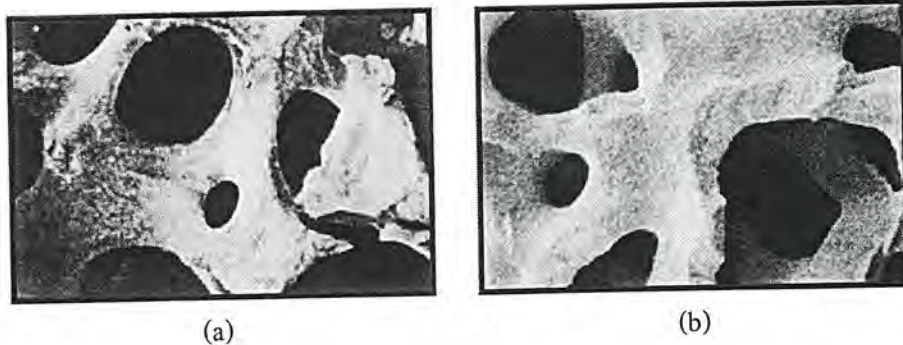
วิธีนี้เป็นวิธีใหม่ที่ใช้สังเคราะห์ HAP ให้มีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ โดยใช้แคลเซียมไนเตรท เติตระไฮเดรตกับไตรเมทิลฟอสเฟตละลายในเอทานอลหรือฟอร์มาไมด์ ปล่อยให้แห้งบางส่วน นำส่วนที่เหลือไปเผาที่อุณหภูมิ 500-1000°C จะได้ไฮดรอกซีเอปาทิต [13] สารที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้จะมีรูปผลึกที่สมบูรณ์

2.2.8 การประยุกต์ใช้งานของไฮดรอกซีเอปาทิต [5]

รูปแบบการนำไปใช้งานทางการแพทย์มีหลายลักษณะซึ่งขึ้นกับวัตถุประสงค์ และสมบัติที่ต้องการ โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. ไฮดรอกซีเอปาทิตแบบผง (Powder hydroxyapatite) สำหรับใช้เคลือบลงบนโลหะซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของข้อต่อเทียม หรือรากเทียม เพื่อให้โลหะทนทานต่อการกัดกร่อนของของเหลวภายในร่างกาย และสามารถเกิดการยึดติดระหว่างวัสดุชีวภาพและเนื้อเยื่อหรือกระดูกภายในร่างกายได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังนำไปผสมกับวัสดุอื่นอีก เช่น พอลิเมอร์เพื่อใช้ทำกระดูกเทียม
2. ไฮดรอกซีเอปาทิตแบบชั้นเนื้อแน่น (Dense hydroxyapatite) จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่าแบบมีรูพรุนการนำไปใช้งานมักนำไปทดแทนในส่วนของกระดูกสันหลังของผู้ป่วย โดยสารไฮดรอกซีเอปาทิตจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อมาเกาะ และทำให้เกิดการยึดติดได้ดีขึ้น
3. ไฮดรอกซีเอปาทิตแบบมีรูพรุน (Porous hydroxyapatite) นิยมใช้งานเป็นวัสดุทดแทนกระดูกเป็นตัวเติมทางด้านศัลยกรรมกระดูกและใบหน้า ไฮดรอกซีเอปาทิตชนิดนี้มีพื้นที่ผิวมาก เนื่องจากมีรูพรุนจึงมีสมบัติเชิงกลต่ำ โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีเอปาทิตชนิดนี้ก่อนนำไปปลูกถ่ายอวัยวะ ซึ่งสามารถทำได้โดยนำไฮดรอกซีเอปาทิตนี้มาผลิตเป็นวัสดุประกอบ

นอกจากนี้ในการวิจัยสามารถสังเคราะห์สารไฮดรอกซีเอปาทิตและสารจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตอื่นๆ โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลิตผลจากอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์ได้



รูปที่ 2.8 ไข่ของมนุษย์ (a) และสารไฮดรอกซีเอปาทไตต์ (b) [16]

2.2.9 ลักษณะการนำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้งาน

ลักษณะการนำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้งาน จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ [17]

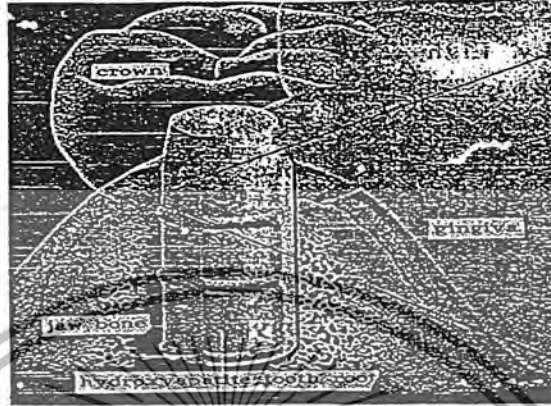
1. วัสดุทางการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะทำหน้าที่ทดแทนอวัยวะนั้นๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ ของร่างกาย
2. วัสดุทางการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะต้องมีส่วนร่วม หรือมีหน้าที่สัมพันธ์กับอวัยวะหรือส่วนต่างๆ ที่อยู่ในร่างกาย แต่ต้องไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อภายในร่างกาย

เนื่องจากไฮดรอกซีเอปาทไตต์เป็นองค์ประกอบหลักในกระดูกและฟัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไฮดรอกซีเอปาทไตต์สังเคราะห์ขึ้นมาเข้าไปใช้ในร่างกาย โดยที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่ร้ายแรงต่อร่างกาย ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอปาทไตต์ และนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านศัลยกรรมกระดูกและทันตกรรม เพื่อแทนที่เนื้อเยื่อของกระดูกและฟันที่ถูกทำลายจากอุบัติเหตุหรือสาเหตุอื่นๆ

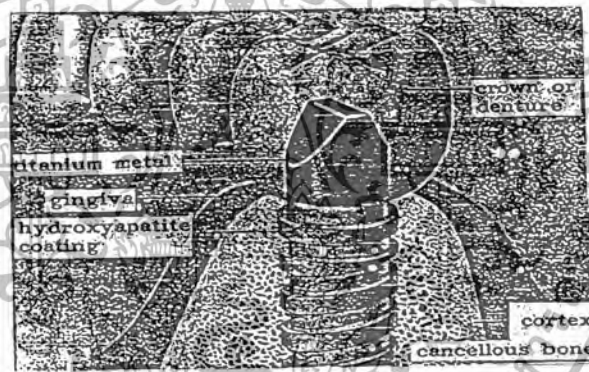
2.2.10 ตัวอย่างการใช้งานของไฮดรอกซีเอปาทไตต์ในงานศัลยกรรมและทันตกรรม

1. การปลูกกรากฟันหลังจากที่มีการถอนฟันออก โดยการใส่วัสดุสังเคราะห์ลงแทนที่ในบริเวณที่ถอนออก ซึ่งจะสามารถเคี้ยวอาหารได้เหมือนฟันจริงๆ และรักษาความสวยงามไว้ได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้ฟันซี่อื่นเกิดการเคลื่อนเข้ามาแทนที่ในช่องว่างนั้น ตัวอย่างของการใช้กรากฟันเทียมที่ผลิตจากไฮดรอกซีเอปาทไตต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

2. การทดแทนกระดูกขากรรไกรที่ถูกทำลาย ซึ่งการแทนที่อย่างเหมาะสมจะทำให้เกิดการยึดติดแน่นบริเวณพื้นผิวสัมผัสของวัสดุสังเคราะห์และกระดูกที่เหลืออยู่ เพื่อซ่อมแซมและเพิ่มความสามารถของฟันกราม



รูปที่ 2.9 รางฟันที่ทำจากไฮดรอกซีเอปาทาไทต์ [6]



รูปที่ 2.10 รางฟันที่ทำจากไฮดรอกซีเอปาทาไทต์ที่เคลือบบนโลหะทิทาเนียม [6]

2.3 แคลเซียมซิลิเกต

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแคลเซียมซิลิเกต [18]

แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite ได้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1830 โดยนักธรณีวิทยาชาวอังกฤษ ชื่อ William Hyde Wollaston และได้มีการตั้งชื่อตามผู้ค้นพบ มีการนำแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite มาใช้ทางการค้าอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1950 โดย Thae Cabot Carbon Co. of Boston ทำให้ได้มีการศึกษาถึงลักษณะรูปร่าง และวิธีการผลิตแร่ชนิดนี้อย่างถูกต้องและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

62140

การใช้งานของ Wollastonite ในช่วงแรกจะใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์และการเคลือบผิว และมีการสนับสนุนให้การใช้งานของ Wollastonite มีความหลากหลายมากขึ้น จนกระทั่งในปัจจุบันได้มีการขยายขอบเขตการใช้งานเข้ามาสู่วงการอุตสาหกรรมพลาสติกพอลิเมอร์ เนื่องจากว่า Wollastonite มีสมบัติเป็นสารคู่ควบ (Coupling agent)

ผลึก Wollastonite มีลักษณะเป็นแบบแท่งยาว (Acicular) เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ และเป็นแร่แคลเซียมเมตาซิลิเกต (Calcium metasilicate)

Wollastonite เป็นตัวเสริมแรงที่มีราคาถูกสำหรับพอลิเมอร์ สมบัติโดยทั่วไป คือ ดูดซึ่มความชื้นต่ำ เป็นผลึกสีขาว ด้านทานการนำไฟฟ้าดีเยี่ยม มีสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนต่ำ และทนต่อการเสีรูปร่างความร้อนได้ดี

2.3.2 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกต [19, 20]

แคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite เกิดขึ้นได้ในธรรมชาติจากอันตรกิริยาของหินปูนที่มีแคลไซต์ (Calcite; CaCO_3) เป็นองค์ประกอบกับซิลิกา (Silica; SiO_2) โดยจะต้องมีความร้อนและความดันเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปดังสมการ



ซึ่ง Wollastonite ที่ได้จะมีความแข็งแรงสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น งานเคลือบผิว ส่วนประกอบในเซรามิกส์ประเภทอิฐทนไฟ เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite

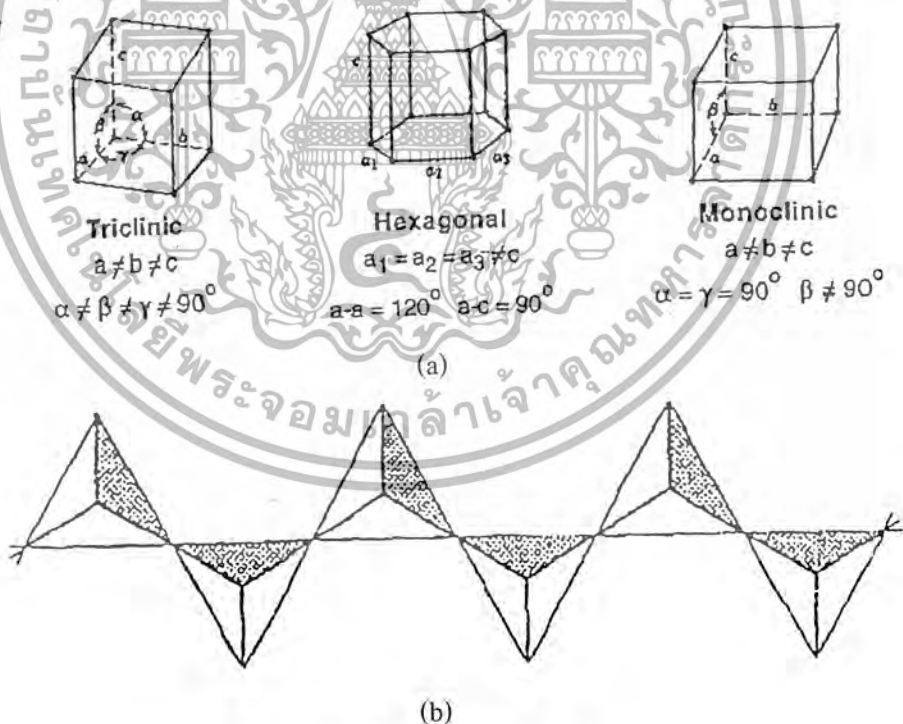
Component	Typical weight %
CaO	47.00
SiO_2	50.00
Fe_2O_3	1.00
Al_2O_3	0.30
K_2O	0.10
MnO	0.10
MgO	0.30

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

Component	Typical weight %
TiO ₂	0.05
P ₂ O ₅	0.04
Moisture	0.20
Loss on Ignition	0.20
Undermined	0.71

2.3.3 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมซิลิเกต [4,11]

แคลเซียมซิลิเกตจัดอยู่ในกลุ่ม Pyroxenoid และอยู่ในกลุ่มย่อย Inosilicates โดยสารประกอบประเภทนี้จะมีการจัดเรียงผลึกได้หลายแบบ เช่น ไตรคลินิก (Triclinic) โมโนคลินิก (Monoclinic) และเฮกซะโกนอล (Hexagonal) โดยที่ส่วนมากจะพบเป็นผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) ซึ่งมี $a = 7.94 \text{ \AA}$ $b = 7.32 \text{ \AA}$ $c = 7.07 \text{ \AA}$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 116.1625

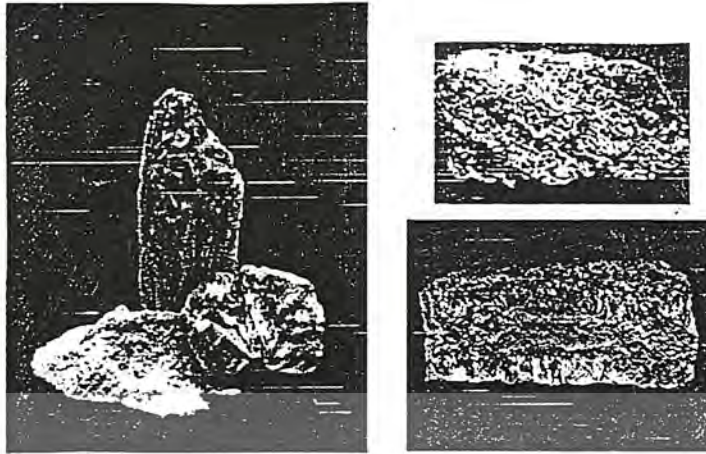


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกต [21]

a) การจัดเรียงผลึกแบบ Triclinic Monoclinic และ Hexagonal

b) Subclass : Inosilicates แบบ Single chain silicate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 รูปผลึกของ Wollastonite ที่พบได้ในธรรมชาติ [22 , 23]

2.3.4 สมบัติของแคลเซียมซิลิเกต

สมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซิลิเกตชนิด Wollastonite [19, 20, 24]

1. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของ Wollastonite บริสุทธิ์จะอยู่ในช่วง 2.87-3.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีค่าเป็นช่วง เนื่องจากมีโลหะอื่นเจือปน เช่น อลูมิเนียม เหล็ก แมกนีเซียม แมงกานีส โพแทสเซียม และ โซเดียม มาแทนที่แคลเซียมในโครงสร้างผลึก

2. สี (Color)

Wollastonite บริสุทธิ์จะมีสีค่อนข้างขาว แต่ถ้ามีโลหะอื่นเจือปนสีอาจจะเปลี่ยน เป็นสีครีม สีเทา สีชมพู สีส้มแดง หรือสีแดง โดยสีจะเป็นตัวบ่งชี้สารเจือปนที่มีอยู่ในพื้นผิวของผลึกหรือโครงสร้างผลึก

3. การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion)

ค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) ของ Wollastonite จะทำให้ Wollastonite มีความต้านทานต่อการเกิดการเสียสภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal shock) ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในงานที่อุณหภูมิสูงได้ เช่น อิฐทนไฟ กระดานกันความร้อน เป็นต้น

4. ความแข็ง (Hardness)

Wollastonite มีค่าความแข็งตกอยู่ในช่วง 5-5.5

5. รีดาย (Streak)

เส้นรีดายของ Wollastonite ในธรรมชาติ จะมีสีขาว

สมบัติทางเคมี [6, 7]

1. ความสามารถในการละลายต่ำ
2. เมื่อนำแคลเซียมซัลไฟด์ไปละลายน้ำให้อยู่ในรูปแขวนลอยจะได้ pH ในช่วง 8-10
3. องค์ประกอบของแคลเซียมซัลไฟด์จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิ

2.3.5 สมบัติเด่นและประโยชน์ของแคลเซียมซัลไฟด์ [25]

1. แคลเซียมซัลไฟด์มีความเหนียวมากถึงแม้ว่าสามารถละลายในกรดไฮโดรคลอริกได้ แต่ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นในระหว่างการใช้งานหรือหลังจากผ่านกระบวนการผลิต
2. แคลเซียมซัลไฟด์ที่มีสีขาวหรือไม่มีสีนิยมใช้ทำเป็นผงสีขาว
3. แคลเซียมซัลไฟด์มี pH สูงใน 10% สารแขวนลอย จึงสามารถคงความมีเสถียรภาพได้และยังช่วยลดการสลายตัวของพอลิไวนิลอะซิเรทในสีได้
4. โครงสร้างผลึกและสมบัติทางกายภาพของแคลเซียมซัลไฟด์จะคงรูปที่อุณหภูมิประมาณ 1120°C ทำให้สามารถใช้แทนเส้นใยหินในการเป็นฉนวนความร้อนได้
5. แคลเซียมซัลไฟด์มีปริมาณสารที่ระเหยได้เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1000°C (Loss On Ignition, LOI) ต่ำ ทำให้ลดปัญหาการมีฟองก๊าซในวัสดุซึ่งเกิดจากการสลายตัวให้ก๊าซในระหว่างการเผาเซรามิกส์ และลดเวลาในการเผา

2.3.6 การสังเคราะห์แคลเซียมซัลไฟด์

แคลเซียมซัลไฟด์มักจะสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของสารประกอบโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโลหะเป็นแคดไอออนและออกซิเจนเป็นแอนไอออน เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์โดยทั่วไป ได้แก่

1. การสังเคราะห์แคลเซียมซัลไฟด์โดยการทำปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [26, 27]

ปฏิกิริยาสถานะของแข็งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมสารประกอบทางเคมีที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ส่วนมากจะเป็นพวกออกไซด์ ตัวกำหนดโครงสร้างและสมบัติของสารประกอบ ได้แก่ ขนาดของอะตอม สถานะออกซิเดชัน และการมีพันธะกันของแคดไอออน

2. การสังเคราะห์แคลเซียมซัลไฟด์โดยการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) [28]

เทคนิคการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมวิธีหนึ่งที่ได้ผงเซรามิกส์ที่มีคุณภาพ ทำโดยนำสารละลายที่มีแคดไอออนของสารที่ต้องการตกตะกอนร่วมกันไปผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับสารช่วยตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ตะกอนร่วมของสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น

การเตรียมแคลเซียมซิลิเกตโดยการตกตะกอนร่วม อาศัยการใช้ปฏิกิริยาเคมีในสารละลายเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) และแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารช่วยตกตะกอน โซเดียมไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงต้องทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปนโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาพที่ดีที่สุดในการเตรียมโดยใช้ NaOH เข้มข้น 0.33 โมลต่อลิตร สารที่สังเคราะห์ได้จะถูกแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500°C และ 900°C เพื่อที่จะให้เกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกต

3. การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตโดยเทคนิคโซล-เจล [29]

โซล (Sol) คือ อนุภาคของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตรที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของเหลว ถ้าหากทำให้อนุภาคของโซลแน่นขึ้นจะเปลี่ยนเป็นอนุภาคเจล (Gel) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของแข็งที่เกิดการเชื่อมโยงจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งล้อมรอบในวัฏภาคที่เป็นของเหลวได้

เทคนิคการสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจล จะได้สารประกอบออกไซด์ผสมซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเทคนิคนี้สามารถผลิตร่างแหสารอนินทรีย์ได้หลากหลาย โดยร่างแหสารอนินทรีย์จะเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว (Sol) และการแข็งตัวของโซล (Sol) กลายเป็นโครงสร้างร่างแห (Gel) สารตั้งต้นที่นิยมใช้คือพวกโลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) เพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วกับน้ำ ตัวอย่างของโลหะอัลคอกไซด์ที่นิยมใช้ เช่น เตตระเมทอกซีซิลาน (Tetramethoxy silane, TMOS) เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, TEOS) และอัลคอกไซด์ (Alkoxide) อื่นๆ เช่น อลูมินาต (Aluminate) ทิทาเนต (Titanates) และบอเรต (Borate) ซึ่งมักนิยมผสมกับ TEOS

2.3.7 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกต [25]

ในสมัยแรกแคลเซียมซิลิเกตใช้เป็นหินตกแต่งเพื่อความสวยงาม ต่อมานำมาใช้แทนที่เส้นใยหิน ในการทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ กระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น ในอุตสาหกรรมสีจะใช้เป็นตัวทำให้แข็ง ตัวลดการดูดซึมน้ำมัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น โพลีเอสเตอร์ พอลิยูรีธ และพอลิยูรีเทน ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์แคลเซียมซิลิเกตจะช่วยลดการโค้งงอ ลด

การแตกหักในระหว่างการเผา และช่วยเพิ่มความแข็งแรง นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์การเคลือบผิว หรืออาจใช้เป็นซับสเตรท (Substrate) สำหรับสารตัวนำยิ่งยวด (Superconductive substance)

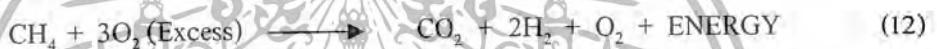
2.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา [30]

การเผาในเซรามิกส์ คือ การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ในเตาภายใต้บรรยากาศที่เหมาะสม เพื่อเปลี่ยนดินให้กลายเป็นวัตถุที่มีความแข็งแรงเหมือนหิน ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่คงทนถาวรและสวยงาม

บรรยากาศที่ใช้ในเตาเผาทั่วไป

1.บรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation Firing)

เป็นการเผาที่มีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และใช้ออกซิเจน (Oxygen) มากเกินพอ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะมีออกซิเจน (Oxygen) เหลืออยู่ ดังปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังนี้



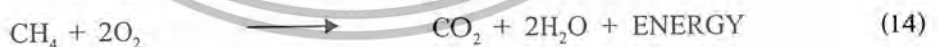
2.บรรยากาศรีดักชัน (Reduction Firing)

เป็นการเผาที่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในเตาเผาที่มีออกซิเจน (Oxygen) ไม่เพียงพอ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เหลืออยู่ดังปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังนี้



3.บรรยากาศนิวทรัล (Neutral Firing)

เป็นการเผาที่มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และในเตาเผาไม่มีออกซิเจน (Oxygen) เหลืออยู่เลย การเผาไหม้มีออกซิเจน (Oxygen) ที่พอดีดังปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังนี้

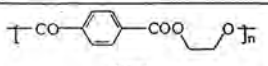
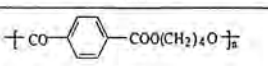
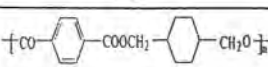


2.5 พอลิเอสเทอร์ (Polyester)

พอลิเอสเทอร์เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาควบแน่นชนิดแรก ซึ่งทำการศึกษาโดย Carothers และคณะ [31] ในตอนต้นค.ศ.1930 และเนื่องจากพอลิเอสเทอร์มีสมบัติที่มีความสามารถทนทานต่อการขูดขีดได้ดี และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการผลิตเป็นเส้นใยและฟิล์ม ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอสเทอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

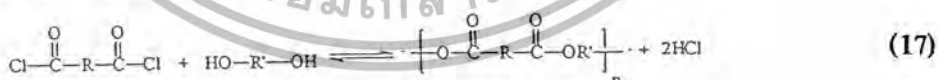
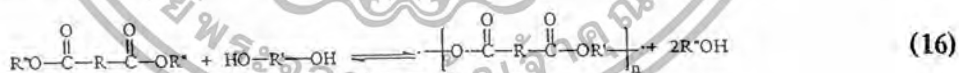
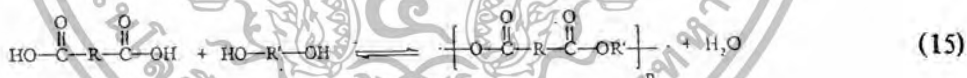
ตารางที่ 2.5 สมบัติบางประการและการประยุกต์ใช้เส้นใยพอลิเอสเทอร์

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

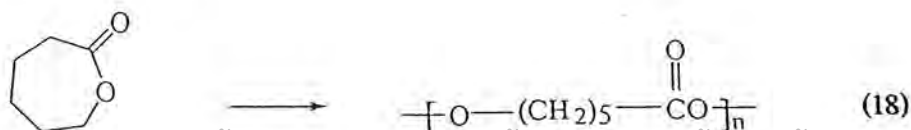
พอลิเอสเทอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ พอลิเอสเทอร์เชิงเส้นซึ่งจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก และพอลิเอสเทอร์แบบโครงสร้างร่างแหซึ่งจัดเป็นเทอร์โมเซต สำหรับในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะพอลิเอสเทอร์เชิงเส้น

โดยทั่วไปปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เชิงเส้นมี 2 รูปแบบ [32] ดังนี้

- ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น จะมีขจัดสารโมเลกุลเล็กๆออก เช่น น้ำ เมทานอล ในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยา เกิดเป็นพอลิเอสเทอร์เชิงเส้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ตัวอย่างการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาควบแน่น ได้แก่ การสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง (สมการที่ 15) ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่างไดเอสเทอร์กับไดออล (สมการที่ 16) ปฏิกิริยาระหว่างไดแอซิดเฮไลด์กับไดออล (สมการที่ 17)



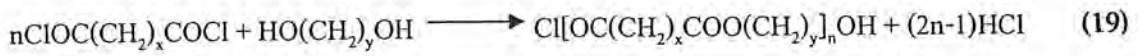
- ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงจะต่างจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น คือ ไม่มีการจัดออกของสารโมเลกุลเล็กๆ พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ ตัวอย่างการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เชิงเส้นด้วยวิธี ROP เช่นการสังเคราะห์พอลิคาโปแลคโตน



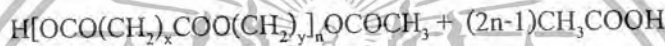
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอสเตอร์สามารถสังเคราะห์โดยแบ่งตามลักษณะของสารตั้งต้นได้หลายวิธี ได้แก่

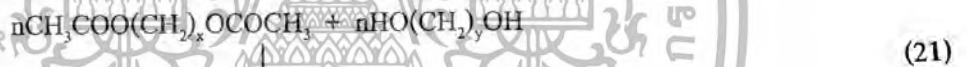
1. Acid Chloride Synthesis [33]



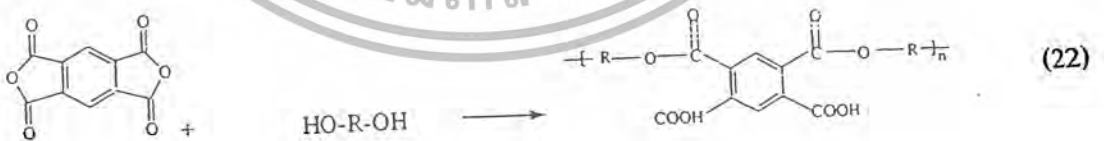
2. Acid Exchange [33]



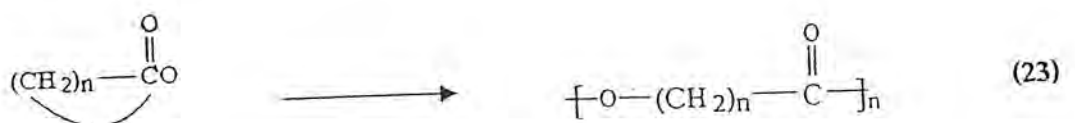
3. Ester Exchange [33]



4. Ring-Opening of Dianhydrides [33]



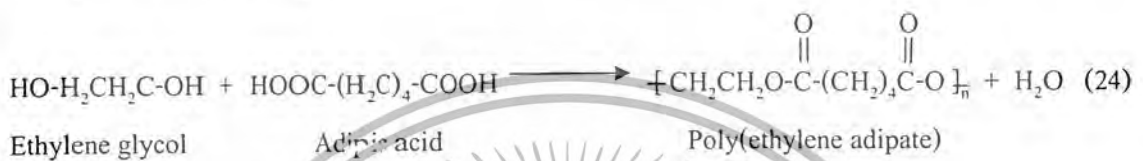
5. Ring-opening of Lactones [33]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic Polyester) [32]

อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ โดยทั่วไปสังเคราะห์ขึ้นจาก ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ของไดแอซิด (Diacid) หรือไดเอสเตอร์ (Diester) กับ ไดออล (Diol) ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนอะดิเปต (Poly(ethylene adipate), PEA) โดยการทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างกรดอะดิปิก (Adipic acid) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) โดยมีการจัดโมเลกุลของน้ำออกจากปฏิกิริยา



นอกจากนี้ อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ ยังสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาการเปิดวง เช่น ปฏิกิริยาการเปิดวงของ ϵ -caprolactone ได้ poly- ϵ -caprolactone เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่ง polycaprolactone มักใช้เป็นสารมัธยันตร์ในการผลิตพอลิยูรีเทน และใช้เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ทำให้ PVC นิ่มตัว

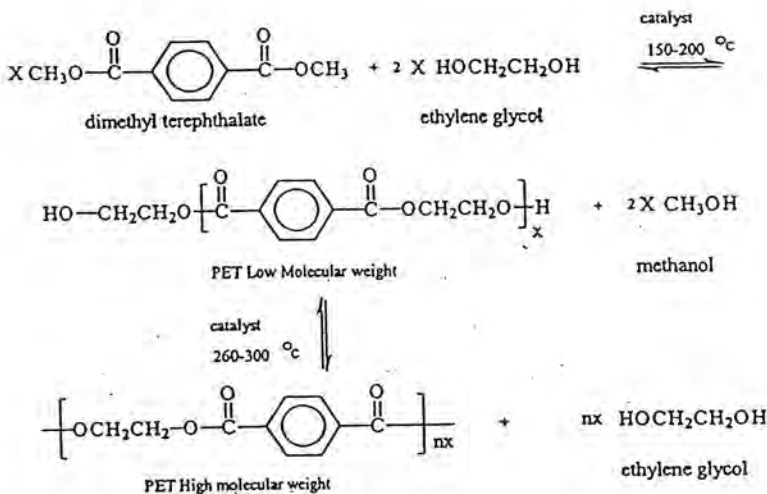
2.5.2 อะโรมาติกพอลิเอสเตอร์ (Aromatic polyester)

อะโรมาติกพอลิเอสเตอร์ที่นำมาใช้มากที่สุดคือ พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethyleneterephthalate, PET) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ในรูปของเส้นใย พลาสติก เป็นต้น พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา โปร่งแสง และมีสมบัติการซึมผ่านของก๊าซต่ำ มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ประมาณ 250-260°C อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) 75°C และมีความหนาแน่น 1380 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สำหรับการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต จะใช้ปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างกรดเทอเรพทาลิก (Terephthalic acid, TPA) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) โดยจะต้องใช้เอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน มีการกลั่นเมทานอลออกมาในระหว่างที่ปฏิกิริยาดำเนินไป ซึ่งจะได้สารประกอบโอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นภายใต้การลดความดัน เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น โดยปฏิกิริยาจะมีการกำจัดเอทิลีนไกลคอลออก

ในปัจจุบันนี้จะนำไคมทิสเทอเรพทาเลตมาสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลตแทนกรดเทอเรพทาลิก เพราะว่ากรดเทอเรพทาลิกมีจุดหลอมเหลวสูงและมีปัญหาในเรื่องการละลายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูป 2.13

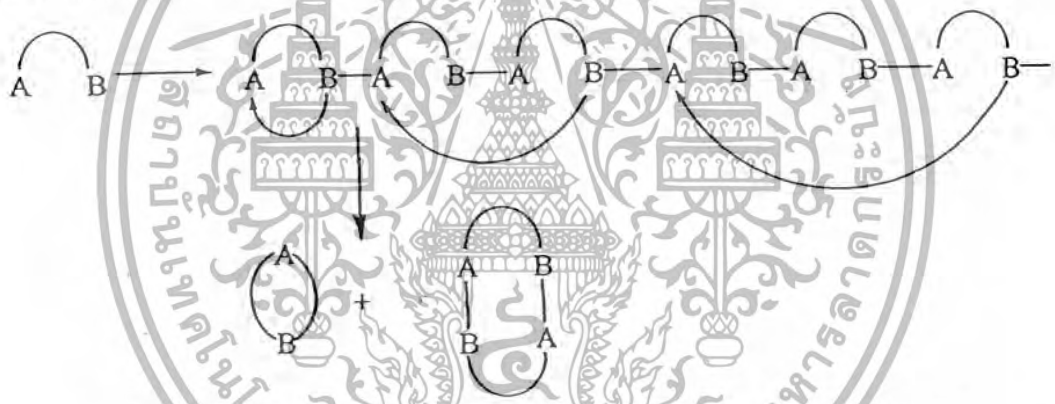
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET)

2.6 การดีพอลิเมอไรซ์แบบปิดวง (Cyclodepolymerisation; CDP)

ปฏิกิริยาการดีพอลิเมอไรซ์แบบปิดวง [34] เป็นเทคนิคหนึ่งในหลาย ๆ เทคนิคที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบประเภทวง หลักการของเทคนิคนี้คือการทำปฏิกิริยาภายในโมเลกุล (intramolecular reaction) ของพอลิเมอร์สายโซ่ตรงเกิดเป็นสารประกอบประเภทวง ดังแสดงในรูปที่ 2.14



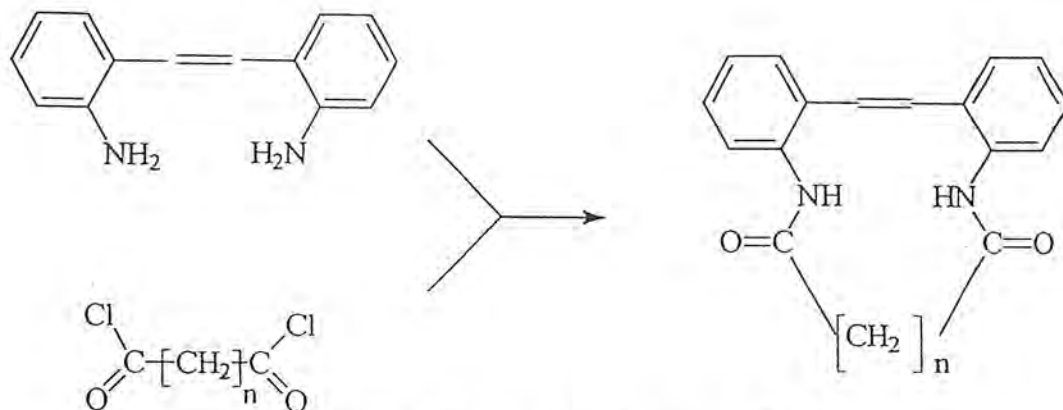
รูปที่ 2.14 การเกิดสารประกอบประเภทวงด้วยวิธีการดีพอลิเมอไรซ์แบบปิดวง

ดังนั้นสารประกอบประเภทวงที่ได้จากวิธีนี้จะเป็น Cyclic monomer, Cyclic dimer, Cyclic trimer และ Cyclic ที่มีมวลโมเลกุลสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอาจจะมีสารประกอบโอลิโกเมอร์เชิงเส้นเกิดขึ้นได้บ้าง ดังนั้นถ้าต้องการให้เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์เป็น Cyclic สูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นควรเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุล ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

1. วิธีสถานะสารละลายเจือจางสูง (High Dilution method)

เทคนิคสถานะสารละลายเจือจางสูง (High Dilution Method) มีการนำมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1912 โดย P.Ruggli [34] เป็นการสังเคราะห์สารประกอบวงเอไมด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การสังเคราะห์สารประกอบวงเอไมด์

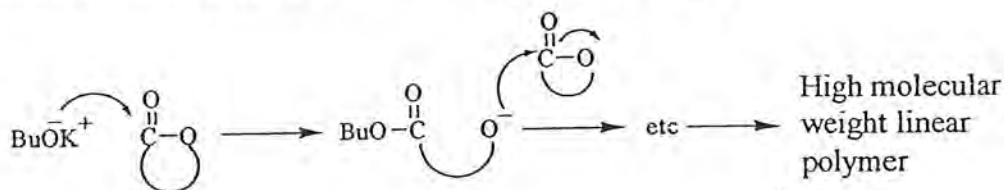
หลักการทั่วไปคือ เมื่อความเข้มข้นของสายโซ่โมเลกุลในตัวทำละลายต่ำ หมู่ปลายที่ว่องไวของสายโซ่โมเลกุลจะเกิดปฏิกิริยาแบบ Intramolecular cyclisation เนื่องจากในสถานะสารละลายเจือจางสูงสายโซ่โมเลกุลแต่ละสายโซ่มีโอกาสที่จะอยู่ห่างกันได้มากจนโอกาสที่สายโซ่โมเลกุลจะทำปฏิกิริยาข้ามโมเลกุลกันมีน้อย ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาภายในโมเลกุลเดียวกันให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบประเภทวงจึงมีสูง

2. วิธีสถานะสารละลายเจือจางสูงเทียม (Pseudo-high Dilution) [34]

การสังเคราะห์สารประกอบประเภทวงด้วยวิธีสถานะสารละลายเจือจางสูงจะให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้อย ถ้าสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพภายใต้สถานะการทำปฏิกิริยาโดยวิธีการรีฟลักซ์ วิธีสถานะสารละลายเจือจางสูงเทียมสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์มากขึ้นโดยทั่วไป สารตั้งต้นจะถูกเติมลงไปปฏิกิริยาที่ละน้อยเป็นระยะเวลานานระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของสารที่มีหมู่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

2.7 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-opening Polymerisation; ROP)

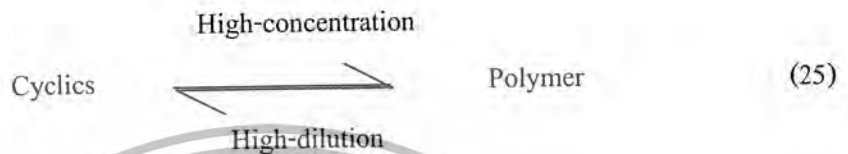
Cyclic ester สามารถเกิดพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงผ่านไอออนบวกหรือไอออนลบเป็นตัวริเริ่ม ปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.16 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาแบบเปิดวงนั้น ถ้าเป็น Cyclic monomer ที่มีวงขนาดเล็กจะขึ้นกับความเครียดภายในวงเป็นสำคัญ แต่ถ้าเป็น Cyclic monomer ที่มีวงขนาดปานกลาง การเปิดวงจะขึ้นกับความเกะกะของหมู่ข้างเคียงเป็นสำคัญ



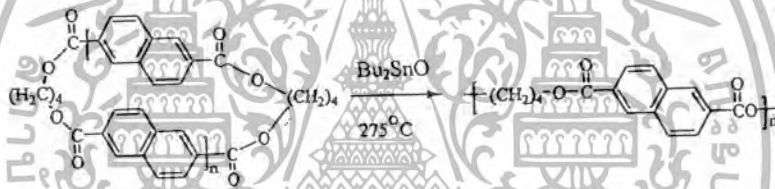
รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงด้วยไอออนลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cyclic monomer ที่มีวงขนาดใหญ่ขึ้น เช่น ϵ -caprolactone มีแนวโน้มที่จะไม่ให้องศาการพอลิเมอไรเซชันที่สูง เนื่องจากมีความเครียดภายในวงน้อยและวงขนาดใหญ่จะไม่มีผลของความเครียดภายในวง ดังนั้นจึงต้องทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงในสภาวะความเข้มข้นสูงโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบเกิดการพอลิเมอไรเซชันสูง ดังสมการ



ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบวงของ Poly(butylenes2, 6-naphthalene dicarboxylate)cyclic (PBN) โดยใช้ Dibutyltin oxide เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะความเข้มข้นสูง[33]



รูปที่ 2.17 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบวงของ Poly(butylenes2, 6-naphthalene dicarboxylate) cyclic(PBN)

2.8 วัสดุประกอบ (Composites) [35]

เนื่องจากวัสดุชีวภาพที่ผลิตมาจากโลหะ พอลิเมอร์ หรือเซรามิกส์เพียงอย่างเดียวอาจจะมีข้อด้อยในสมบัติบางประการ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาโดยนำเอาวัสดุแต่ละชนิดมาประกอบรวมกันเพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งวัสดุดังกล่าวนี้เรียกว่า “วัสดุประกอบ (Composites)”

2.8.1 ความหมายของวัสดุประกอบ

วัสดุประกอบ (Composites) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมกัน โดยสารแต่ละชนิดจะมีรูปร่างและส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยสารแต่ละชนิดจะไม่ละลายซึ่งกันและกันองค์ประกอบสองส่วนหลัก ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ส่วนเสริมแรง (Reinforced phase) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ทำให้ความแข็งแรงแก่วัสดุประกอบ วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงนี้จะมีแข็งแรงและมีค่ามอดูลัสสูง เช่น เส้นใยคาร์บอน เซรามิกส์ เป็นต้น
2. เมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากสภาวะสิ่งแวดล้อมภายนอก เมทริกซ์จะทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่ส่วนเสริมแรง

2.8.2 ชนิดของวัสดุประกอบ

ชนิดของวัสดุประกอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. วัสดุประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (Polymer Matrix Composites, PMCs) พอลิเมอร์ ถูกนำมาใช้เนื่องจากความแข็งแรง สมบัติต่างๆ ที่ดี แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ คือ เทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นเทอร์โมเซต เช่น พอลิเอสเตอร์เรซินและอีพอกซี
2. วัสดุประกอบที่มีเซรามิกส์เป็นเมทริกซ์ (Ceramic Matrix Composites, CMCs) เซรามิกส์เป็นวัสดุที่แตกง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ไม่นำไปใช้เป็นวัสดุวิศวกรรม แต่เนื่องจากเซรามิกส์มีสมบัติทางความร้อนดี ดังนั้นในปัจจุบันได้มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเพื่อนำไปใช้งานในด้านอากาศยาน
3. วัสดุประกอบที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์ (Metal Matrix Composites, MMCs) มักใช้งานในด้านอุตสาหกรรมรถยนต์และยานอวกาศ แต่มีข้อเสียเนื่องจากความหนาแน่นของโลหะทำให้วัสดุมีน้ำหนักมาก

2.9 การบำบัดรักษาโดยการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ

การบำบัดรักษาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ [36, 37] ได้แก่

1. การเปลี่ยนถ่ายเนื้อเยื่อและอวัยวะจากธรรมชาติ (Transplantation)
วิธีการนี้จะแบ่งย่อยได้ 3 ประเภท ตามแหล่งที่มาของอวัยวะ ดังนี้

1.1 Autograft transplants หรือ Autogeneous implants

วิธีนี้จะเป็นการเปลี่ยนถ่ายเนื้อเยื่อจากอวัยวะส่วนอื่น ๆ ของผู้ป่วยเองมาใช้ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่เกิดการต่อต้านจากร่างกาย และไม่ปัญหาเรื่องระบบภูมิคุ้มกันอีกด้วย อย่างไรก็ตามปัญหาหลักของวิธีการรักษานี้ คือ จะก่อให้เกิดบาดแผลบริเวณอวัยวะที่ตัดเนื้อเยื่อออกมาซึ่งจะต้องเสียเวลาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรักษาแผล และอาจมีโอกาสดเกิดการติดเชื้อที่บริเวณบาดแผลด้วยและในกรณีผู้ป่วยมีสุขภาพไม่แข็งแรงเนื้อเยื่อที่ติดออกมาอาจมีคุณภาพที่ไม่ดีพอ และวิธีการเปลี่ยนถ่ายนี้มีโอกาสก่อให้เกิดมะเร็งได้

1.2 Homograft transplants

วิธีนี้เป็นการนำเนื้อเยื่อหรืออวัยวะของผู้บริจาคคนอื่น ทั้งที่ยังมีชีวิตอยู่และเสียชีวิตแล้วมาใช้ในการเปลี่ยนถ่ายในร่างกายของผู้ป่วย วิธีนี้สามารถแก้ไขข้อจำกัดบางประการที่เกิดกับเนื้อเยื่อประเภท Autograft ได้ อย่างไรก็ตามวิธีการรักษานี้ยังมีข้อจำกัดคือ อวัยวะหรือเนื้อเยื่อที่ได้รับบริจาคมาอาจจะมีสภาพไม่สมบูรณ์ เพราะอาจมีการเสื่อมไประหว่างขั้นตอนการถ่ายทอดจากผู้บริจาคไปถึงผู้รับ เนื้อเยื่อประเภทนี้มีโอกาสถูกต่อต้านจากร่างกายผู้รับซึ่งอาจทำให้เนื้อเยื่อบริเวณนั้นเกิดการติดเชื้อโรคได้ง่าย อีกทั้งถูกตั้งข้อสังเกตในเรื่องคุณธรรมและจริยธรรม ในเรื่องการตัดเนื้อเยื่อบางส่วนจากผู้ป่วยที่ยังมีชีวิตอยู่ อย่างไรก็ตามการรักษาวินิจฉัยยังมีปัญหาหลักที่สำคัญคือการขาดแคลนผู้บริจาคเนื้อเยื่อ จึงมีผู้ป่วยจำนวนน้อยที่ได้รับประโยชน์จากรักษาวิธีนี้

1.3 Heterografts หรือ Xenograft

วิธีนี้จะใช้เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นทั้งที่มีชีวิตหรือเสียชีวิตแล้วก็ได้ แต่ผลที่ได้ นั้นต่ำกว่าที่ต้องการ

2. การเปลี่ยนถ่ายโดยใช้วัสดุสังเคราะห์ที่มนุษย์ผลิตขึ้นมาเอง (Implantation)

วัสดุประเภทนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการคือ ไม่มีปัญหาด้านศีลธรรมและจริยธรรม ไม่มีข้อจำกัดในด้านปริมาณ สามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้ และไม่มีปัญหาด้านคุณภาพของเนื้อเยื่อเนื่องจากสามารถควบคุมมาตรฐานการผลิตได้ นอกจากนี้วัสดุสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นมาจะผ่านการทดสอบเพื่อให้มีประสิทธิภาพได้มาตรฐานสากล ทำให้โอกาสเกิดความล้มเหลวเชิงกลของวัสดุประเภทนี้ลดต่ำกว่าวัสดุธรรมชาติทั่วไป อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของวัสดุประเภทนี้คือวัสดุจำพวกนี้จะมีอายุการใช้งานจำกัด จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลาสั้น วัสดุประเภทนี้ยังขาดความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองและความสามารถในการปรับปรุงโครงสร้าง และสมบัติของตนเองให้เหมาะสมเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของร่างกายซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของเนื้อเยื่อธรรมชาติทั่วไป เช่น การรับแรงเชิงกล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 การประยุกต์ใช้งาน ข้อดี และข้อเสียของวัสดุชีวภาพ [36]

วัสดุ	การประยุกต์ใช้งาน	ข้อดีของวัสดุ	ข้อเสียของวัสดุ
Stainless steel	ศัลยกรรมกระดูกที่แตก อวัยวะเทียม	ราคาถูก	เกิดการกัดกร่อน ได้ง่าย
Ti – Al – V	ศัลยกรรมกระดูกที่แตก	มีความสามารถในการ เข้ากันได้กับระบบ ชีวภาพของร่างกาย (Biocompatibility) ความแข็งแรงล้ำ	ราคาแพง
Ni – Cr	ศัลยกรรมกระดูก โคนขา	ความแข็งแรงล้ำและ ทนทานต่อการกัดกร่อน	มีความสามารถในการ เข้ากันได้กับระบบ ชีวภาพของร่างกายต่ำ
Polyacetal	วัสดุยึดติดฟันเทียม	ราคาถูก ง่ายต่อการ ฆ่าเชื้อ	มีการเกิดพอร์มัลดีไฮด์ ทนทานการขัดสีต่ำ
PMMA cement	วัสดุอุดช่องว่าง	มีการใช้งานแพร่หลาย	เกิดปฏิกิริยาคาย ความร้อน
Al ₂ O ₃	วัสดุยึดติดฟันเทียม	มีความสามารถในการ เข้ากันได้กับระบบ ชีวภาพของร่างกาย	ราคาแพง เทคนิคการ ผลิตค่อนข้างยาก
ZrO ₂ - TZP	วัสดุยึดติดฟันเทียม	ความแข็งแรง	ยังขาดความเชี่ยวชาญ ในการผลิต

2.10 ปฏิกิริยาโต้ตอบของร่างกายต่อวัสดุชีวภาพ [36]

สมบัติสำคัญของวัสดุชีวภาพคือจะต้องมีความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างเนื้อเยื่อ และวัสดุชีวภาพ โดยจะต้องไม่ก่อให้เกิดการตอบสนองที่ผิดปกติของร่างกาย เช่น ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง และอักเสบของเนื้อเยื่อรอบข้าง ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ หรือเกิดมะเร็ง เป็นต้น ปฏิกิริยาตอบโต้ของร่างกายที่มีต่อวัสดุชีวภาพสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วัสดุเป็นพิษต่อร่างกาย (Toxic) จะทำให้เนื้อเยื่อเกิดความผิดปกติกลายเป็นมะเร็งซึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อตาย
2. วัสดุชีวภาพจะถูกหุ้มด้วยถุงเส้นใยที่ไม่ยึดติดกัน (Non-adherent fibrous capsule) เพื่อแยกวัสดุนั้นออกจากกระบบร่างกายมนุษย์
3. เนื้อเยื่อสร้างพันธะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุทางชีวภาพ (Bioactive)
4. เนื้อเยื่อสร้างตัวเองแทนที่วัสดุชีวภาพ (Dissolution of implant)

2.11 กลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุเซรามิกชีวภาพ

วัสดุเซรามิกชีวภาพสามารถแบ่งตามประเภทการตอบสนองของร่างกาย และกลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุเซรามิกชีวภาพได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. เซรามิกส์ค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert / Bioinert ceramics)

ลักษณะทั่วไปของวัสดุเซรามิกชีวภาพประเภทนี้ คือ เมื่อถูกใส่เข้าไปแทนที่อวัยวะภายในร่างกายแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเนื้อเยื่อในร่างกายจะตอบสนองต่อวัสดุชีวภาพชนิดนี้ โดยการสร้างเส้นใยขึ้นมาห่อหุ้มวัสดุชีวภาพชนิดนั้น เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุชีวภาพสัมผัสโดยตรงกับเนื้อเยื่อข้างเคียงภายในร่างกาย อย่างไรก็ตามข้อด้อยของวัสดุประเภทนี้คือ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อจะทำให้ความหนาของชั้นเส้นใยเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีผลให้ความสามารถในการยึดติดกับกระดูกลดลงและอาจเกิดการเลื่อนหลุดของวัสดุได้

2. เซรามิกส์ที่มีรูพรุน (Porous ceramics)

วัสดุเซรามิกส์ที่มีรูพรุนชีวภาพประเภทนี้ ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดของวัสดุประเภทแรกออกจากเนื้อเยื่อข้างเคียง เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งทำให้เนื้อเยื่อสามารถเข้าไปเติบโตภายในรูพรุนได้ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกว่า เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อ ข้อจำกัดของวัสดุประเภทนี้คือขนาดของรูพรุนจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยสามารถเจริญเติบโตเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อกระดูกในรูพรุนได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดการเคลื่อนที่โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุอาจทำให้เส้นเลือดฝอยขาดได้ซึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อที่อยู่ในรูพรุนตายและเกิดการติดเชื้อตามมา

3. เซรามิกส์ที่สามารถถูกดูดซับหรือกัดเซาะภายใต้สภาวะทางสรีระวิทยา (Resorbable ceramics)

วัสดุเซรามิกส์ชีวภาพประเภทนี้มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งสามารถย่อยสลายตัวเองได้ เมื่อเข้าไปอยู่ในร่างกาย และถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อธรรมชาติที่ร่างกายสร้างขึ้นมา ข้อจำกัดของวัสดุประเภทนี้ คือ องค์ประกอบของวัสดุประเภทนี้จะต้องสามารถถูกย่อยสลายด้วยระบบเมตาบอลิซึม ส่วนสารที่ปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อร่างกาย และสามารถถูกกำจัดได้ด้วยระบบของร่างกาย สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของวัสดุประเภทนี้ คือ อัตราการย่อยสลายของวัสดุจะต้องใกล้เคียงกับอัตราการสร้างกระดูกและเนื้อเยื่อของร่างกาย ถ้าอัตราการย่อยสลายเร็วเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างของกระดูกใหม่กับอวัยวะเทียม ถ้าอัตราการย่อยสลายช้าเกินไปจะมีผลให้เกิดการซ้อนทับกันของกระดูกและอวัยวะเทียม สมบัติข้อนี้ทำให้เกิดข้อจำกัดในการออกแบบของวัสดุชนิดนี้มีความยากลำบาก และมีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถครอบคลุมข้อกำหนดทุกข้อได้

4. เซรามิกส์ที่ไวทางชีวภาพ (Bioactive ceramics)

สมบัติของวัสดุประเภทนี้จะอยู่กึ่งกลางระหว่างวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อยและวัสดุที่สามารถถูกดูดซับภายใต้สภาวะร่างกาย ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุประเภทนี้คือเมื่อใส่เข้าไปในร่างกายแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉพาะที่บริเวณรอยต่อของวัสดุกับเนื้อเยื่อ ทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุกับกระดูกหรือเนื้อเยื่อภายในร่างกาย โดยจะสร้างชั้นไฮดรอกซีแอปาทิตชั้นที่ผิวของวัสดุเพื่อยึดวัสดุกับเนื้อเยื่อ ดังนั้นจึงช่วยลดปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุได้

ตารางที่ 2.7 ชนิดของเซรามิกส์ตามกลไกการยึดติดและตัวอย่างของเซรามิกส์แต่ละประเภท [11]

Type of implant	Type of Attachment	Example
1. Nearly inert	Mechanical interlock (Morphological fixation)	Al ₂ O ₃ , Zirconia
2. Porous	Ingrowth of tissues into pores (Biological Fixation)	Hydroxyapatite (HA) HA coated porous metals
3. Resorbable	Replacement with tissue	Tricalcium phosphate Bioactive glasses
4. Bioactive	Interfacial bonding with tissues (Biological Fixation)	Bioactive glasses Bioactive glasses-ceramics HA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การทดสอบวัสดุทางชีวภาพ [37]

โดยทั่วไปกระทำใน 2 วิธี คือ

1. การทดสอบภายนอกร่างกาย

มีวัตถุประสงค์สำคัญ 3 ประการ ดังนี้

- สังเกตการทำงานและประเมินผลประสิทธิภาพของวัสดุชีวภาพ
- สามารถบอกสมรรถภาพของวัสดุชีวภาพภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันได้
- ประเมินความเชื่อถือได้และความคงทนของวัสดุชีวภาพ

เนื่องจากการนำไปใช้งานจริงจะต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อ ของเหลว และอวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกาย ซึ่งสภาพแวดล้อมต่าง ๆ นี้จะทำให้สมบัติบางประการของวัสดุทางชีวภาพเปลี่ยนไป ดังนั้นการทดสอบภายนอกร่างกายจึงมีข้อจำกัดมาก ในการศึกษาเพื่อนำไปใช้งานจริงนั้นจะต้องออกแบบการทดลองให้มีสภาวะแวดล้อมคล้ายกับในร่างกาย เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้นั้นมีผลถูกต้องมากที่สุด หรือมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เช่น การทดสอบโดยใช้ของเหลวที่มีองค์ประกอบคล้ายเลือดหรือพลาสมา

2. การทดสอบภายในร่างกาย

วิธีนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าการทดสอบภายนอกร่างกายเพราะสภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นสภาวะจริงในร่างกายสิ่งมีชีวิต ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องมากกว่า สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

- การประเมินในสัตว์ทดลองที่สุขภาพดี

วิธีการทดลองนี้จะทำโดยการผ่าตัด เพื่อให้วัสดุทางชีวภาพเข้าไปในร่างกายของสัตว์ทดลองที่มีสุขภาพดี โดยต้องใส่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับที่ความต้องการมากที่สุด แต่วิธีนี้มีข้อจำกัด ได้แก่ วงจรชีวิตและอายุขัยที่ไม่เท่ากัน สรีระและองค์ประกอบในร่างกายบางส่วนที่ไม่เหมือนกัน

- การประเมินในสัตว์ทดลองที่เป็นโรค

วิธีการนี้จะได้ผลแตกต่างกับการทดสอบกับสัตว์ที่มีสุขภาพดี เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างวัสดุชีวภาพกับอวัยวะที่เป็นโรค และไม่เป็นโรคต่างกัน การทดลองในสัตว์ที่มีสุขภาพดีไม่สามารถประเมินผลได้จึงต้องทำการทดลองในสัตว์ที่เป็นโรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การศึกษาจากกลุ่มผู้ป่วยในทางคลินิก
เป็นการทดลองในร่างกายมนุษย์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของวัสดุทางชีวภาพ และโรคแทรกซ้อนที่อาจเกิดจากการใช้วัสดุทางชีวภาพ
- การใช้ทางคลินิกทั่วไป
วัสดุทางชีวภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้นต้องผ่านการทดสอบและรับรองโดยองค์กรที่ทำหน้าที่ควบคุมก่อนนำไปใช้งานกับผู้ป่วยในการทดสอบภายในร่างกาย

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Siriphannon, P. และคณะ [41] ได้ทำการเตรียมแคลเซียมซิลิเกตโดยใช้สารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) และแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารตกตะกอน แต่พบว่าโซเดียมไอออนสามารถตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงต้องล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นทำให้สามารถกำจัดไอออนของโซเดียมออกไปได้ โดยการล้างตะกอน 2 ครั้งเพื่อให้ไอออนโซเดียมเหลือน้อยที่สุด สารที่สังเคราะห์ได้จะนำไปแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500°C และ 900°C เพื่อให้เกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกตที่ได้มีนำไปทดสอบในสภาวะที่ลดลงของร่างกาย (SBF) พบว่าเกิดชั้นของ HAp บนพื้นผิวของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการเข้ากันได้กับระบบชีวภาพของร่างกายได้ดี

งานวิจัยของเซาวเรศ มะลิมาศ และปิยวิทย์ รัตนฤทธิ์รัตน์ [9] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิตด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม โดยใช้สารตั้งต้นคือแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรตกับฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์หรือกรดฟอสฟอริก โดยควบคุมค่า pH ด้วยสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์และทิ้งให้ตกตะกอนสมบูรณ์เป็นเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าชนิดของสารตั้งต้นค่า pH ที่ใช้ในการตกตะกอน และเวลาในการตกตะกอนมีผลต่อการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิตคือ ถ้าใช้สารตั้งต้นชนิดเดียวกันและเวลาในการตกตะกอนเท่ากัน เมื่อค่า pH ในการตกตะกอนสูงขึ้นจะมีผลให้อัตราส่วนโมลของ Ca:P สูงขึ้น และถ้าใช้สารตั้งต้นชนิดเดียวกัน ค่า pH ในการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากัน เมื่อใช้เวลาในการตกตะกอนมากขึ้น อัตราส่วนโมลของ Ca:P ก็มากขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมในสังเคราะห์ คือใช้แคลเซียมไนเตรทเตตระไฮดรทและกรดฟอสฟอริกเป็นสารตั้งต้น ค่า pH ในการตกตะกอนเท่ากับ 9 และเวลาในการเลี้ยงตะกอนเป็น 60 นาที ได้อัตราส่วนโมลของ Ca:P เท่ากับ 1.15 และเมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ โดยการแช่ในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย (Simulated Body Fluid, SBF) พบว่ามี ไฮดรอกซีแอปพาไทต์เกิดขึ้นที่พื้นผิวของสารตัวอย่าง แสดงว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีความว่องไวทางชีวภาพ

งานวิจัยของ Hall, A.J. และคณะ [39] ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบวงโพลิโกลิเอทอซิโกลิอินไอโซพทาเลต (Cyclic oligo(hexilidene isophthalate)) จากปฏิกิริยาดีโพลิเมอไรเซชัน โดยเริ่มต้นจากการสังเคราะห์โพลิเอทอซิโกลิอินไอโซพทาเลต (Poly(hexilidene isophthalate)) จากการรีฟลักซ์กรดไอโซพทาติก กับ 1, 6-ไดโบโรโมเฮกเซน พร้อมการปั่นกววนเป็นเวลา 78 ชั่วโมง แยกผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยการตกตะกอนในเมทานอล นำตะกอนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และความดัน 20 มิลลิเมตรปรอท ได้เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์เท่ากับ 72 % เมื่อนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่ามีพีคเกิดขึ้นที่ค่า δ เท่ากับ 1.56(4 H, m) 1.85(4 H, m) 4.39(4 H, t) 7.55(1 H, d) และ 8.24(1 H, m) ppm จาก FT-IR ได้ค่า ν_{max} ที่ 2933 2896 2855 1721 1302 1237 และ 729 cm^{-1} และจากการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GPC พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักเฉลี่ยโดยจำนวนเท่ากับ 15500 และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักเท่ากับ 34000

สำหรับขั้นตอนการดีโพลิเมอไรเซชันแบบปิดวงนั้น ทำได้โดยการรีฟลักซ์โพลิเอทอซิโกลิอินไอโซพทาเลต 2.5 กรัม ในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรเบนซีน 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 10 วัน โดยใช้บิลทิลทินออกไซด์ 75 มิลลิกรัม (3% โมล) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำไประเหยตัวทำละลายและอบแห้งที่ความดัน 20 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งสีขาว 97% นำมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR จะให้ผลสอดคล้องกัน คือ ไม่พบหมู่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงและจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MS พบว่าสารประกอบวงที่เกิดขึ้นมีขนาดตั้งแต่ 2-mer ถึง 17-mer

งานวิจัยของ ชาลธร จันทร์ทัต และคณะ [40] ทำการศึกษาปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต Poly(ethylene terephthalate, PET) โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนการดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง โดยทำการรีฟลักซ์ PET ในตัวทำละลาย ออโรไดคลอโรเบนซีน ซึ่งเป็นอัตราส่วนพอลิเมอร์ต่อตัวทำละลายในหน่วย กรัมต่อมิลลิลิตร คือ 1:40 และ ใช้ไดบิวทิลทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 วัน เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นวง โอลิโกเมอร์ 76% เมื่อนำสารที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่ามีสัญญาณของหมู่ C=O ที่ 1721 cm^{-1} และ C-O ที่ 1264 cm^{-1} กับ 1090 cm^{-1} และไม่พบสัญญาณของหมู่ -OH ปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงเป็นหมู่ปลายของโอลิโกเมอร์เชิงเส้น และเมื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่าสัญญาณ δ เท่ากับ 4.7 ppm (4H, s, CH_2) และที่ δ เท่ากับ 8.1 ppm (4H, s, aromatic) โดยพบสัญญาณของหมู่เมทิลีนที่ต่อกับหมู่ -OH น้อยมาก และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MS พบว่าสารประกอบวงที่ได้มีตั้งแต่สารประกอบวง 3-mer จนถึง 10-mer และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยเทคนิค GPC เท่ากับ 1090 กรัมต่อโมล และมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลิตจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC เท่ากับ 320°C

ส่วนพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงนั้น เป็นการนำสารประกอบวง PET ที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้นมา ทำปฏิกิริยาในสถานะสูญญากาศที่อุณหภูมิ 250°C พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ 60 นาที และได้ผลิตภัณฑ์ 84% เมื่อนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบพีก C-O ที่ 1256 cm^{-1} และ 1097 cm^{-1} และพีกของ C=O ที่ 1716 cm^{-1} และจากเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบพีกที่ δ เท่ากับ 4.8 ppm (4H, s, CH_2) และ 8.1 ppm (4H, s, aromatic) พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคนี้มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลิตเท่ากับ 252°C และ 278°C จะเห็นได้ว่าการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่า PET ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงมีผลสอดคล้องกับ PET ก่อนทำปฏิกิริยา

งานวิจัยของ Choi, D. และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างไฮดรอกซีแอปโปไทด์กับพอลิ ϵ -คาโปรแลคโตน (Poly(ϵ -caprolactone)) โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาวัสดุประกอบที่จะเข้าไปอยู่ในบริเวณเนื้อเยื่อกระดูก ไม่เฉพาะแค่สร้างวัสดุที่แข็งแรงมาแทนที่ แต่จะสร้างวัสดุที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive materials) ที่ทำปฏิกิริยากับร่างกาย และไม่ทำอันตรายใด ๆ ต่อร่างกาย ความว่องไวทางชีวภาพของเซรามิกส์ชีวภาพ จะขึ้นกับองค์ประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตที่มีอยู่ในวัสดุนั้น ส่วนกระดูกที่สร้างจากเซรามิกส์ชีวภาพ จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้า แต่จะเปราะมาก วัสดุประกอบจะประกอบด้วยเซรามิกส์ชีวภาพและพอลิเมอร์ที่ละลายตัวได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นลักษณะของกระดูกที่เกิดจากเซรามิกส์ สมบัติการละลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ วัสดุประกอบจะแสดงสมบัติความว่องไวทางชีวภาพอย่างดีเยี่ยม แต่แสดงความแข็งแรงของกระดูกทราบีคิวลาร์(Trabecular) เพียงครั้งเดียว ปัญหาของเกรดไฮดรอกซีแอปาไทต์ คือ ความเป็นผลึกต่ำ มีสิ่งเจือปน ขนาดของอนุภาค และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นกับวิธีการสังเคราะห์ โดยจำนวนของไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ใช้คือ 10%wt อีกทั้งมีการกำหนดขนาดผลึกและขนาดอนุภาค ซึ่งลักษณะของไฮดรอกซีแอปาไทต์จะเป็นผลสีขาวคล้ายขอล็ก

การทำพอลิเมอร์คอมโพสิตของไฮดรอกซีแอปาไทต์กับ PCL ให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น สิ่งสำคัญคือการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์โดยมีสารละลายพอลิเมอร์เข้าร่วม ข้อดีคือทำให้เกิดนิวเคลียสขึ้น (Nucleation) และมีการดำเนินไปของกระบวนการ ซึ่งนำไปสู่การควบคุมโครงสร้างจุลภาค (Micro-structure) ของไฮดรอกซีแอปาไทต์ และการควบคุมโครงสร้างจุลภาคนี้มีผลต่อจำนวนของไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่จะนำไปรวมกลายเป็นวัสดุประกอบและผลการตอบสนองของเซลล์กระดูก(Osteoblast cell)

งานวิจัยของ Walsh, D. และคณะ [42] ทำการเตรียมวัสดุประกอบโดยกรนำแอปาไทต์ที่มีรูพรุนมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชัน เพื่อให้ ϵ -คลอโรแลคโตน (ϵ -CL) หรือ เมทิลเมทาไครเลต (MMA) เข้าไปแทรกอยู่ในรูพรุนภายใต้สภาวะสุญญากาศ แอปาไทต์ซีเมนต์เตรียมได้จากเตตระแคลเซียมฟอสเฟต โมโนออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมฟอสเฟต โมโนไฮดรเจนที่มีจำนวน โมลเท่ากันมาผสมกัน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปแอปาไทต์ซีเมนต์ในแม่พิมพ์ทรงกระบอก และเก็บไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง นำก้อนแอปาไทต์ที่ได้แช่ลงในสารละลายSBF ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นทำการเตรียม ϵ -CL ให้บริสุทธิ์ โดยการนำไปกลั่นที่ความดัน 5 มิลลิเมตรปรอท และที่อุณหภูมิ 89 °C แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ -20 °C ในภาชนะปิดภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน จากนั้นหยดสารละลายเจือจางของ ϵ -CL ที่มีคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายลงบนก้อนแอปาไทต์ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C ก่อนใส่เข้าไปในขวดสามคอเพื่อที่จะดูดอากาศภายในก้อนแอปาไทต์ ที่ความดัน 1 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการละลาย ϵ -CL ในน้ำกลั่นซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา แล้วเทลงในภาชนะที่มีก้อนแอปาไทต์เพื่อให้มอนอเมอร์เคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของก้อนแอปาไทต์ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ส่วนมอนอเมอร์ที่เหลือจะถูกเทออก จากนั้นนำสารประกอบร่วมที่สังเคราะห์ได้ไปเก็บในหลอดแก้วให้ความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลามากกว่า 10 วัน หรือที่ 80 °C เป็นเวลา 60 วัน จะได้วัสดุประกอบที่มีพอลิเมอร์แทรกอยู่ในรูพรุนของก้อนแอปาไทต์ เมื่อนำวัสดุประกอบที่ได้มาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค Size Exclusion Chromatography (SEC) จะได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (Mn) ของพอลิคาโพรแลคโตน (PCL) หลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 7.1×10^3 กรัมต่อโมล และหลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 60 วัน มีค่าเท่ากับ 16.8×10^3 กรัมต่อโมล จากผลการทดสอบความแข็งแรงกอดตัวของวัสดุประกอบ PCL ที่ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 7 วัน และ 60 วัน พบว่ามีค่าความแข็งแรงกอดเพิ่มขึ้นจาก 9 เมกกะปาสคาล เป็น 26 เมกกะปาสคาล และ 37 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ และจากผลการทดสอบความสามารถในการเปียก (Wettability) ของพื้นผิว พบว่าวัสดุประกอบ PCL มีมุมสัมผัสน้ำ (Contact angle) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 64 ° ซึ่งเป็นมุมที่เหมาะสมต่อการยึดติดพื้นผิวและการเจริญเติบโตของเซลล์

งานวิจัยของชุดานันท์ สุกมมงคล ปิยพร แซ่เจี่ย และวริศดา มัตตะนาวี [1] ได้ทำการศึกษาวิธีการสังเคราะห์วัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนอะดิเปต สำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ โดยเริ่มจากขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิต จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์และกรดฟอสฟอริก ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมที่อุณหภูมิ 20 °C ทำการควบคุมค่า pH ให้สูงกว่า 12 ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ แล้วทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ได้ด้วยเทคนิคการฉายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence, XRF) ได้ผลอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสใกล้เคียงกับ 1.67 ซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎี จากนั้นขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาทิต โดยมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารช่วยผสมและทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C เพื่อให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สลายตัวทิ้งรูพรุนไว้ในไฮดรอกซีแอปาทิต ขั้นตอนที่ 2 ทำการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนอะดิเปต จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลอะดิเปตกับเอทิลีนไกลคอล และใช้เตตระไฮโซโพรพิลไอโซโททานเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะสารละลายเจือจางสูง จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันแบบปิดวง มีไดเมทิลทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบโอลิโกเอทิลีนอะดิเปต ขั้นตอนที่ 3 ทำการสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนอะดิเปต ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันแบบเปิดวงของสารประกอบโอลิโกเอทิลีนอะดิเปตที่สภาวะต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์วัสดุประกอบที่เตรียมด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่ามีอัตราส่วนระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนอะดิเปต โดยประมาณเท่ากับ 4:1 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัสดุประกอบมี 2 ช่วง คือ 320-327 °C และ 360-363 °C และเมื่อนำวัสดุประกอบนี้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) พบว่าฟีกของไฮดรอกซีแอปาทิตในวัสดุประกอบมีส่วนฐานฟีกกว้างขึ้น เนื่องจากมีพอลิเอทิลีนอะดิเปต ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานแทรกอยู่ ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบโดยนำไปแช่ในสารละลาย SBF ที่มีค่า pH ประมาณ 7.3-7.4 เป็นเวลา 28 วัน พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้มีความว่องไวทางชีวภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
- สารละลายกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) 0.3 โมล/ลิตร เตรียมได้จากการนำสารละลายกรดฟอสฟอริก 85% บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์ 20 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1 ลิตร
- สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) 30% บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
- เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, TEOS) บริษัท Fluka Chemika เกรดวิเคราะห์
- แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calcium Nitrate Tetrahydrate, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
- สารละลายเอทานอล (Ethanol, CH_3OH) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
- ไดบิวทิลทินออกไซด์ (Dibutyltin oxide, $\text{C}_8\text{H}_{18}\text{OSn}$) บริษัท Fluka Chemika เกรดวิเคราะห์
- ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, CH_2Cl_2) บริษัท Fluka Chemika เกรดวิเคราะห์
- คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene, $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
- พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ($M_w = 70,000-100,000$ กรัมต่อโมล)
- ไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen)
- *พอลิเอทิลีนอะดิเปต ($M_w = 4280$) จุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง $50.2-52.0^\circ\text{C}$

FT-IR : ν_{max} 2958 (C-H, s) 1736 (C=O, s) 1082 (C-O, s) cm^{-1} (ภาคผนวก ข รูปที่ 1)

$^1\text{H-NMR}$: δ 1.68 (4H, br, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$) 2.38 (4H, br, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$) 4.28 (4H, s, $-\text{CH}_2\text{O}-$) ppm
(ภาคผนวก ก รูปที่ 1)

GPC : $\bar{M}_n = 2700$ $\bar{M}_w = 4280$ $MWD = 1.58$ (ภาคผนวก ง รูปที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*จาก โครงการงานพิเศษเรื่อง การศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงกดและสมบัติความว่องไวทาง
ชีวภาพของวัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนอะซิเตต ปี2546
โดย นางสาวนิชวีดี บุญชัยทิพย์ และ นางสาวรุ่งทิพย์ สุวรรณวิจิตร

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวิเคราะห์การคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) บริษัท BRUKER AG รุ่น SRS 3400
2. เครื่องบดผสมสารตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท ROCKLAB รุ่น BENCHMILL MODEL 1A
3. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท HERZOG รุ่น TP60/2D
4. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) บริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP
6. เครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA) บริษัท PERKIN ELMER รุ่น PYRIS 1 TGA

อุณหภูมิที่ใช้	: 50-900 °C
อัตราการให้ความร้อน	: 10 °C/min
7. เครื่อง Sputter Coater บริษัท POLARON รุ่น SC7620
8. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (¹H-NMR) บริษัท BRUKER AG รุ่น NMR 300 ULTRA SHIELD ความถี่ 300 เมกะเฮิรตซ์ ใช้เตตระเมทิลไซเรน (TMS) เป็นสารมาตรฐาน
9. เครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) บริษัท MILLIPORE รุ่น WATER 150-cv

คอลัมน์	: PLgel 10 Um Mixed B Z columns ขนาด 7.8x300 nm
วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง	500-1,000,000
ใช้พอลิสไตรีนเป็นสารมาตรฐาน	
สารละลาย	: เตตระไฮโดรฟูแรน (THF) เกรด HPLC
อุณหภูมิคอลัมน์	: 30°C
อุณหภูมิ injection	: 30°C
อุณหภูมิ sovent/pump	: 30°C
อัตราการไหล	: 1 ml/min
ปริมาณในการฉีด	: 100 µL
เวลาในการวิเคราะห์	: 22 min
Detector	: Reflective index

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

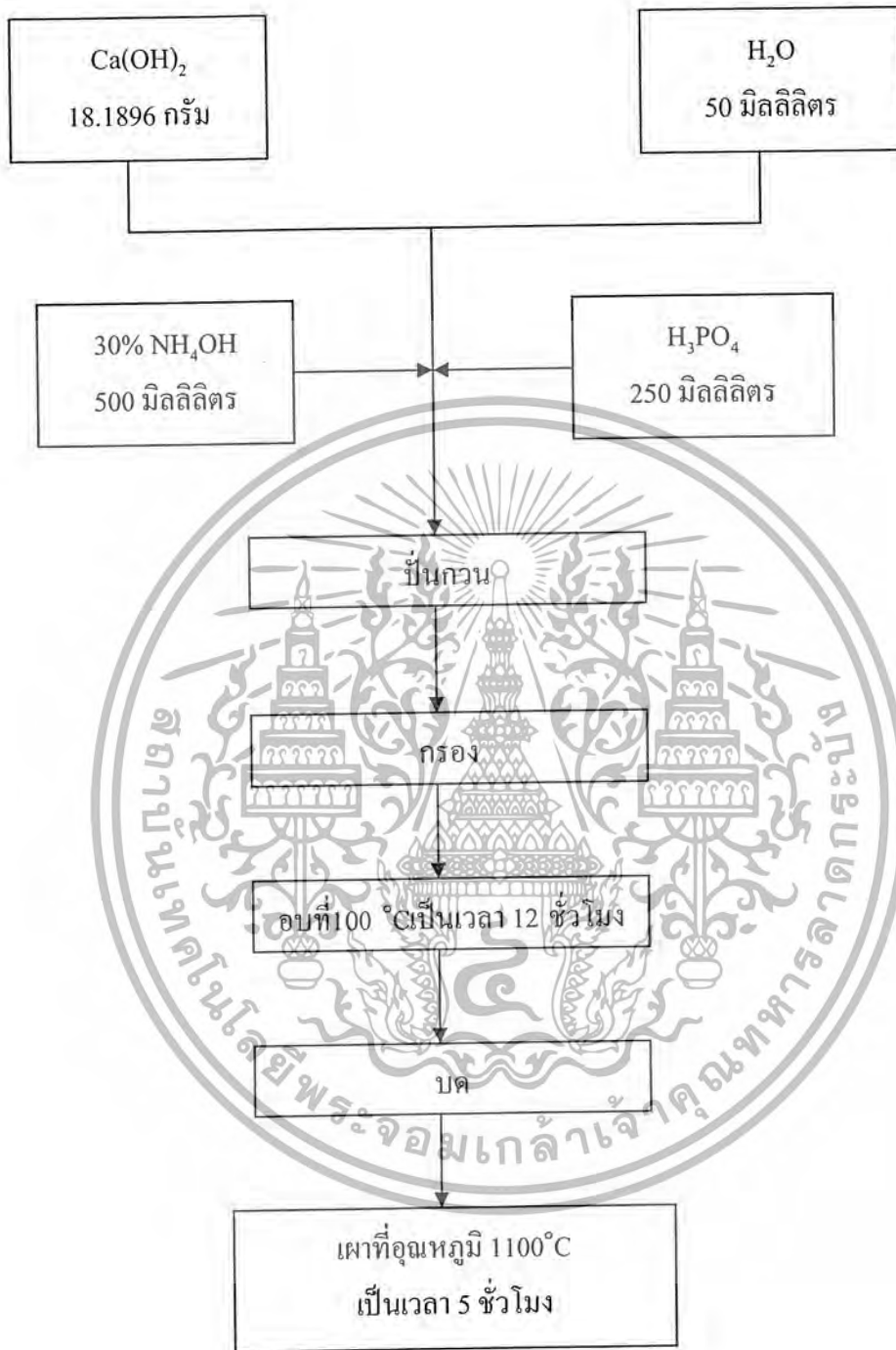
10. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) บริษัท BRUKER AG รุ่น IFS28
- | | |
|-------------------|--|
| ความยาวคลื่น | : 4000 - 400 cm^{-1} |
| การเตรียมตัวอย่าง | : สะลายด้วยคลอโรฟอร์มแล้วหยดบน KBr Plate |
11. อ่างควบคุมอุณหภูมิ และ Immersion circulator (FT01/5) รุ่น ISOTEMP
12. เครื่อง Gallenkamp หาดูหลอมเหลว บริษัท SUNYO รุ่น SG97/12/314
13. เครื่องระเหยตัวทำละลาย (Rotary evaporator) บริษัท BUCHI รุ่น ROTAVPOR R-114
14. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท BUCHI รุ่น B-169
15. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท NEY DENTAL รุ่น 14H
16. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) บริษัท DENVER INSTRUMENT รุ่น TC-254
17. เครื่องชั่งอย่างละเอียดพิเศษ 4 ตำแหน่ง บริษัท DENVER INSTRUMENT รุ่น TC-254
18. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท FISHER SCIENTIFIC
19. เครื่องควบคุมอัตราการหลอม บริษัท BARNANT รุ่น 77120-52
20. ปัมสุญญากาศ บริษัท EDWARDS รุ่น RV12
21. เตาเผาสาร บริษัท THERMOLYME รุ่น FURNANCE 6000
22. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine)
- | | |
|----------------|-------------------------|
| อัตราเร็วหัวกด | : 2.5 \pm 0.25 mm/min |
| Load cell | : 30 kN |
| Maximum load | : 25000 N |
23. เครื่องให้ความร้อนแบบหลุม (Heating mental)
24. มอเตอร์พร้อมใบพัดปั่นแก้ว
25. เทอร์โมสแตท
26. ชุดสำหรับทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ROP)
27. ครุชชีเบลชนิดพอร์ซเลน และ อลูมินา

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมไฮดรอกซีแอปไทต์ (HAp)

1. ชั่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ประมาณ 18 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ละลายในน้ำ 50 มิลลิลิตร ทำการวัดค่า pH ของสารละลาย
2. เตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร แล้วใช้ฟิล์มพลาสติกปิดที่ปากบีกเกอร์ เพื่อไม่ให้สารละลายระเหย และเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30% ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร พร้อมทั้งใช้ฟิล์มพลาสติกปิดที่ปากบีกเกอร์เช่นกัน
3. นำบีกเกอร์ที่มีสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และบีกเกอร์ที่มีสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์วางไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 10°C
4. ต่อสายยางขนาดเล็กเข้าเครื่องปั๊มที่ใช้ควบคุมอัตราเร็วในการหยดสารละลาย โดยเส้นที่ 1 นำปลายด้านหนึ่งจุ่มลงในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และเส้นที่ 2 นำปลายด้านหนึ่งจุ่มลงในสารละลายกรดฟอสฟอริก ส่วนปลายอีกด้านของทั้งสองเส้นจุ่มลงในบีกเกอร์ของสารแขวนลอยแคลเซียมไฮดรอกไซด์
5. คัดตั้งใบพัดปั่นกวนจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีสารแขวนลอยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทั้งจุ่มหัวอิเล็กโทรดไว้ในบีกเกอร์เพื่อทำการวัดค่า pH ขณะเกิดปฏิกิริยา ใช้ฟิล์มพลาสติกปิดบีกเกอร์เพื่อป้องกันการระเหยของสารขณะเกิดปฏิกิริยา
6. เปิดเครื่องปั่นกวนที่ความเร็วปานกลาง เปิดสวิตช์ปั๊มหยดสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยใช้อัตราการหยด 1.08 มิลลิลิตรต่อนาที
7. ทำการหยดสารละลายกรดฟอสฟอริกลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วปิดเครื่องปั๊ม ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเปิดสวิตช์เครื่องปั่นกวน วัดค่า pH ของสารละลาย (ไม่ควรต่ำกว่า 12) บันทึกปริมาตรสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
8. นำสารละลายไปกรองด้วยชุดเครื่องกรองลดความดัน นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
9. นำตะกอนไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละของผลผลิตของสารที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด
10. นำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
11. นำสารที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) เพื่อหาองค์ประกอบของสารที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

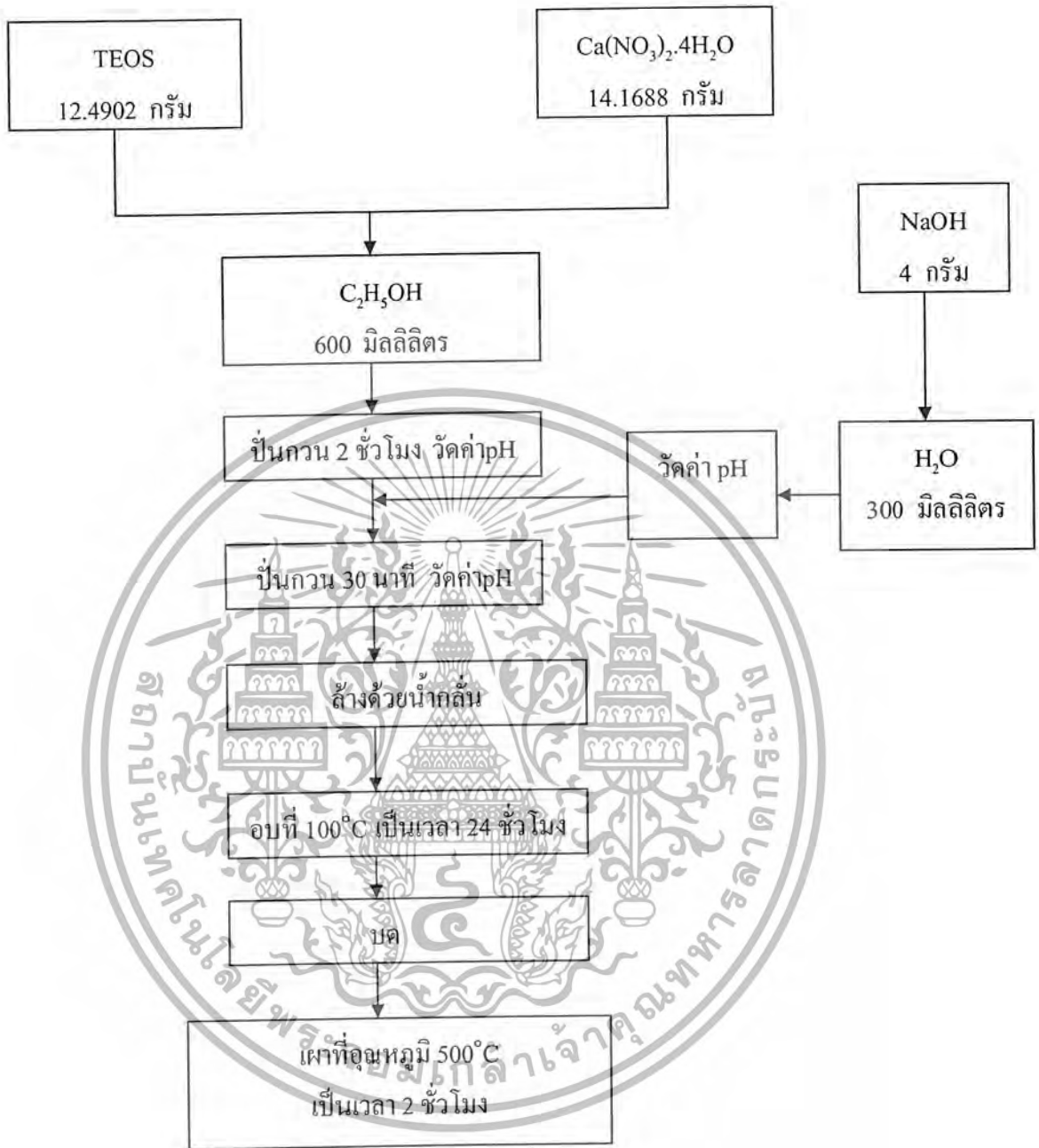


รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมแคลเซียมซิลิเกต (CS)

1. ชั่งเตรอะเทอิลอโรซิลิเกต (TEOS) ประมาณ 12 กรัม และชั่งแคลเซียมไนเตรตเตรอะไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ประมาณ 14 กรัม ละลายในเอทานอล 600 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่า pH ของสารละลาย
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร โดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ละลายในน้ำ 300 มิลลิลิตร วัดค่า pH ของสารละลาย
3. เทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ในข้อ 1. จากนั้นทำการปั่นกวนสารละลายต่อเป็นเวลา 10 นาที วัดค่า pH ของสารละลาย
4. กรองสารละลายด้วยชุดเครื่องกรองลดความดัน ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร นำตะกอนที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C อย่างน้อย 1 วัน
5. นำตะกอนไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละของผลผลิตของสารที่สังเคราะห์ได้ จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด
6. นำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน นำสารที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการฉายรังสีเอ็กซ์ (XRF) เพื่อหาองค์ประกอบของสารที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 3.2 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

1. ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (น้ำหนักโมเลกุล 70,000-100,000 กรัมต่อโมล) ประมาณ 20 กรัม
2. เตรียมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C
3. นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ชั่งเทในน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ แล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที
4. นำสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมได้ เก็บใส่ขวดปิดฝาให้สนิท



รูปที่ 3.3 แผนงานการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

3.3.4 การขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาทาइट-แคลเซียมซลิเกต

การขึ้นรูปด้วยวิธีกดอัด

1. ชั่งไฮดรอกซีแอปาทาइट : แคลเซียมซลิเกตที่สังเคราะห์ได้ทุกอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1
2. ทำการคลุกผสมสารประกอบเข้าด้วยกัน โดยขึ้นรูปร่วมกับ 2.5% โดยน้ำหนักของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เทียบกับอัตราส่วนของเซรามิกส์
3. นำสารประกอบในแต่ละอัตราส่วนมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ด
4. นำสารประกอบไฮดรอกซีแอปาทาइट - แคลเซียมซลิเกตที่ขึ้นรูปแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีลำดับการให้ความร้อนตามตารางที่ 3.2
5. ตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเทคนิค XRD และ SEM

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนและน้ำหนักไฮดรอกซีแอปาทาइट : แคลเซียมซลิเกตด้วยวิธีขึ้นรูปกดอัด

อัตราส่วนของ HAp:CS	น้ำหนักของ HAp:CS (กรัม)	น้ำหนักของ PVA (กรัม)
90:10	0.9:0.1	0.25
80:20	0.8:0.2	0.25
70:30	0.7:0.3	0.25

ตารางที่ 3.2 ลำดับขั้นอุณหภูมิและเวลาในการเผาขึ้นงานไฮดรอกซีแอปาทาइट-แคลเซียมซลิเกต

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)
300	30
500	30
800	30
1100	300



รูปที่ 3.4 แผนงานการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทิต-แคลเซียมซลิเกต
โดยการขึ้นรูปด้วยการกดอัดแบบเม็ด

3.3.5 การตีพอลิเมอร์แบบปิดวงของพอลิเอทิลีนอะดิเปต

1. ชั่งพอลิเอทิลีนอะดิเปต 6 กรัม ละลายในคลอโรเบนซีน 240 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:40 กรัมต่อมิลลิลิตร) ในขวดก้นกลม
2. เติมไดบิวทิลทินออกไซด์ 3% โมลของพอลิเมอร์ที่ใช้คิดเทียบต่อ 1 หน่วยซ้ำพอลิเมอร์
3. ต่อขวดก้นกลมดังกล่าวกับคอนเดนเซอร์ ทำการรีฟลักซ์ด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบหมุน เป็นเวลา 7 วัน
4. ทิ้งให้ของผสมเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง และนำไปกรองด้วยชุดเครื่องกรองลดความดัน
5. นำสารละลายที่ผ่านการกรองไประเหยตัวทำละลายออก ด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลายที่ อุณหภูมิ 80 °C
6. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. ทำการชั่งน้ำหนักหยาบของผลผลิต และนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค GPC $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR



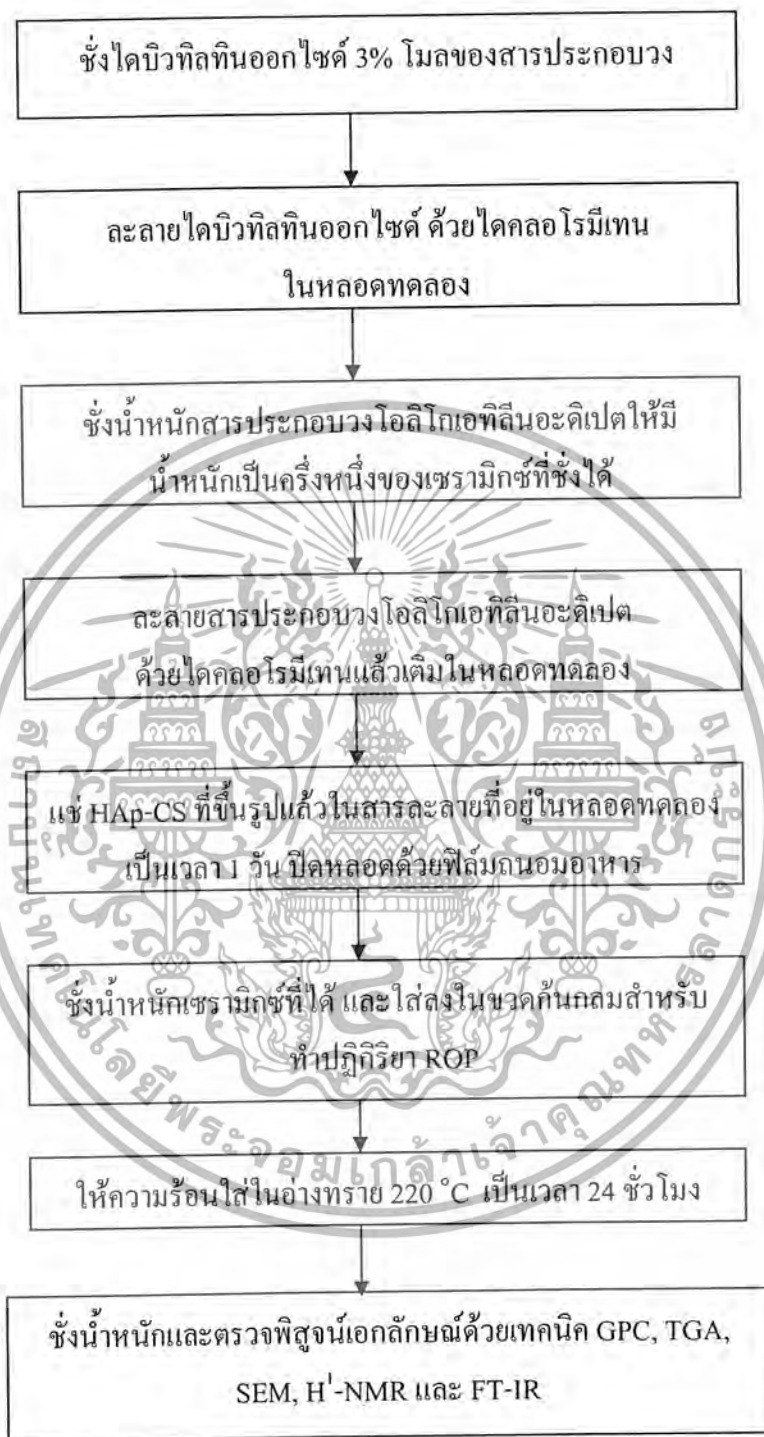


รูปที่ 3.5 แผนงานการดีพอลิเมอร์แบบปิดวงของ PEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์กับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปต (Composite HAp-CS/PEA)

1. ชั่งน้ำหนักวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์-แคลเซียมซิลิเกตที่ขึ้นรูปแล้ว 1 ชั่ง (ประมาณ 1 กรัม)
2. ชั่งน้ำหนักสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปต ให้มีน้ำหนักเป็นครึ่งหนึ่งของวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์-แคลเซียมซิลิเกตที่ชั่งได้ในข้อ 1. (ประมาณ 0.5 กรัม)
3. ชั่งไดบิวทิลทินออกไซด์ (3% โมลของสารประกอบวงคิดเทียบต่อ 1 หน่วยซ้ำของมอนอเมอร์)
4. ละลายไดบิวทิลทินออกไซด์ ด้วยไดคลอโรมีเทนในหลอดทดลอง
5. ละลายสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปตด้วยไดคลอโรมีเทน แล้วเติมลงในหลอดทดลองในข้อที่ 4.
6. แช่วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์-แคลเซียมซิลิเกตในสารละลายข้างต้นเป็นเวลา 1 วัน โดยปิดหลอดทดลองด้วยฟิล์มพลาสติก
7. เปิดฟิล์มออกเพื่อระเหยไดคลอโรมีเทน
8. ชั่งน้ำหนักวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์-แคลเซียมซิลิเกตที่ได้ แล้วห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ ใส่ในหลอดทดลองสำหรับทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันแบบเปิดวง
9. ทำให้ของผสมในหลอดทดลองอยู่ในสภาวะสุญญากาศ โดยการเติมก๊าซไนโตรเจน 30 นาที และปั๊มออก 30 นาที ทำซ้ำ 3 รอบ
10. ให้ความร้อนโดยใช้อ่างทรายที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
11. ชั่งน้ำหนักวัสดุประกอบที่ได้
12. นำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค GPC, $^1\text{H-NMR}$, FT-IR, TGA และ SEM



รูปที่ 3.6 แผนงานการสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับแคลเซียมซิลิเกต และพอลิเอทิลีนอะดิเปต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับแคลเซียมซิลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปต

นำวัสดุประกอบระหว่างระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับแคลเซียมซิลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปตที่มีรูปพรมมาวัดความแข็งแรงกด (Compressive strength) โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชัดผิวหน้าของวัสดุประกอบที่เตรียมได้แล้ววัดขนาดที่แน่นอน
2. นำชิ้นงานวางไว้ในตำแหน่งที่จะกดและกดชิ้นงานจนแตก



รูปที่ 3.7 แผนงานการวัดความแข็งแรงกด (Compressive strength)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 สารตั้งต้นชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่สังเคราะห์ได้

ไฮดรอกซีแอปาไทต์มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมและฟอสฟอรัส โดยมีอัตราส่วนโมลทางทฤษฎีของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 1.67 และจากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence, XRF) พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วย แคลเซียม (Ca) 57.7% โดยน้ำหนัก และฟอสฟอรัส (P) 41.2% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca:P) เท่ากับ 1.77 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (Ca:P เท่ากับ 1.67) และจากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) จากชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1100°C สามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีวิธภาคองค์ประกอบหลักเป็นไฮดรอกซี-แอปาไทต์

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้

แคลเซียมซิลิเกตมีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมและซิลิกอน โดยมีอัตราส่วนโมลทางทฤษฎีของแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca:Si) เท่ากับ 1.00 และจากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence, XRF) พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโดยโมลแคลเซียมต่อซิลิกอนอยู่ในช่วง 1.101 – 1.133 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วน โมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนของแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้

สาร	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			อัตราส่วน โมล Ca:Si
	Ca	Si	Na	
1	46.1	43.6	10.1	1.133
2	45.6	43.8	10.2	1.115
3	46.2	43.6	9.5	1.101
ค่าที่ได้จากทฤษฎี	48.3	51.7	-	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอนใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี แต่พบองค์ประกอบของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) จากสารตกตะกอนเจือปนในปริมาณสูง เนื่องจากในขั้นตอนของการล้างตะกอนของสารที่สังเคราะห์ได้ใช้ปริมาณของน้ำกลั่นในการล้างที่น้อยเกินไป ทำให้ยังมีโซเดียมหลงเหลืออยู่ในตะกอนของสาร เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปเผาที่อุณหภูมิสูง พบว่าโซเดียมออกไซด์จะเกิดผลึกเจือปนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้เป็นโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต (Sodium Calcium Silicate (Na-CS); $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_7$)

4.2 ดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง (Cyclo-depolymerisation, CDP)

4.2.1 สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปต (Cyclic oligo(ethylene adipate), C-PEA)

จากการสังเคราะห์สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปต (C-PEA) ด้วยปฏิกิริยาการดีพอลิเมอไรซ์แบบปิดวง โดยทำการรีฟลักซ์พอลิเอทิลีนอะดิเปตในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งมีไดบิวทิลทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ 4.1 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวหนืดสีเหลืองอมน้ำตาล



สมการที่ 4.1 ปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงของพอลิเอทิลีนอะดิเปต (PEA)

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (FT-IR) เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR) และเทคนิคเจลเพอมีเอชัน โครมาโทกราฟี (GPC) ได้ผลดังนี้

FT-IR : ν_{max} 2956 (C-H, s) 1736 (C=O, s) 1082 (C-O, s) cm^{-1} (ภาคผนวก ข รูปที่ 2)

$^1\text{H-NMR}$: δ 1.67 (4H, br, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{C}-$) 2.36 (4H, br, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{C}-$) 4.28 (4H, s, $-\text{CH}_2\text{O}-$) ppm
(ภาคผนวก ค รูปที่ 2)

GPC : $\bar{M}_n = 1225$ $\bar{M}_w = 2104$ MWD = 1.72 (ภาคผนวก ง รูปที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ พบสัญญาณที่แสดงถึงหมู่ปลายของสายโซ่โมเลกุลเพียงเล็กน้อย โดยไม่พบพีกที่ชัดเจนของสัญญาณการสั่นแบบยืดของหมู่ O-H (O-H stretching) ซึ่งแสดงถึงหมู่ปลายสายโซ่ ในขณะที่ $^1\text{H-NMR}$ พบพีก δ ที่ 4.22 และ 3.82 ซึ่งแสดงถึงโปรตอนของหมู่ปลายของ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{OH}$ และ $-\text{CH}_2-\text{OH}$ ตามลำดับ เพียงเล็กน้อยบนสเปกตรัมของ $^1\text{H-NMR}$ เมื่อวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC พบว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (\bar{M}_n) เท่ากับ 1225 และมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (\bar{M}_w) เท่ากับ 2104 และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) เท่ากับ 1.72 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสารพอลิเมอร์ตั้งต้น จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยสารประกอบวงโอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเป็นองค์ประกอบหลัก

4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาทาइट-แคลเซียมซิติเลต (HAp-CS)

4.3.1 ชิ้นงานเซรามิกส์ไฮดรอกซีแอปาทาइट-แคลเซียมซิติเลต (HAp-CS)

จากการนำไฮดรอกซีแอปาทาइटและโซเดียมแคลเซียมซิติเลต มาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 2.5 % โดยน้ำหนักของชิ้นงานเซรามิกส์ ซึ่ง PVA เป็นสารช่วยสร้างรูพรุน ในแต่ละอัตราส่วน จากนั้นทำการกดอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแล้วนำไปเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100°C พบว่าค่าความหนาแน่นของไฮดรอกซีแอปาทาइटจะลดลงเมื่อมีการใส่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไป เนื่องจากเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสลายตัวเกิดเป็นรูพรุน ในขณะที่โซเดียมแคลเซียมซิติเลตเป็นสารที่มีการหดตัวภายหลังการเผาได้สามารถคงรูปร่างได้ดี เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกส์ที่อัตราส่วน HAp:CS ต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นเป็นไปตามแนวโน้ม กล่าวคือชิ้นงานเซรามิกส์จะมีค่าความหนาแน่นต่ำลง เนื่องจากความสามารถในการคงรูปร่างหลังการเผาของโซเดียมแคลเซียมซิติเลตมากกว่าไฮดรอกซีแอปาทาइट ในทำนองเดียวกันการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกส์ที่มีการใส่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในชิ้นงานเซรามิกส์ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะต่ำลง เนื่องจากการสลายตัวไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ในแต่ละอัตราส่วน

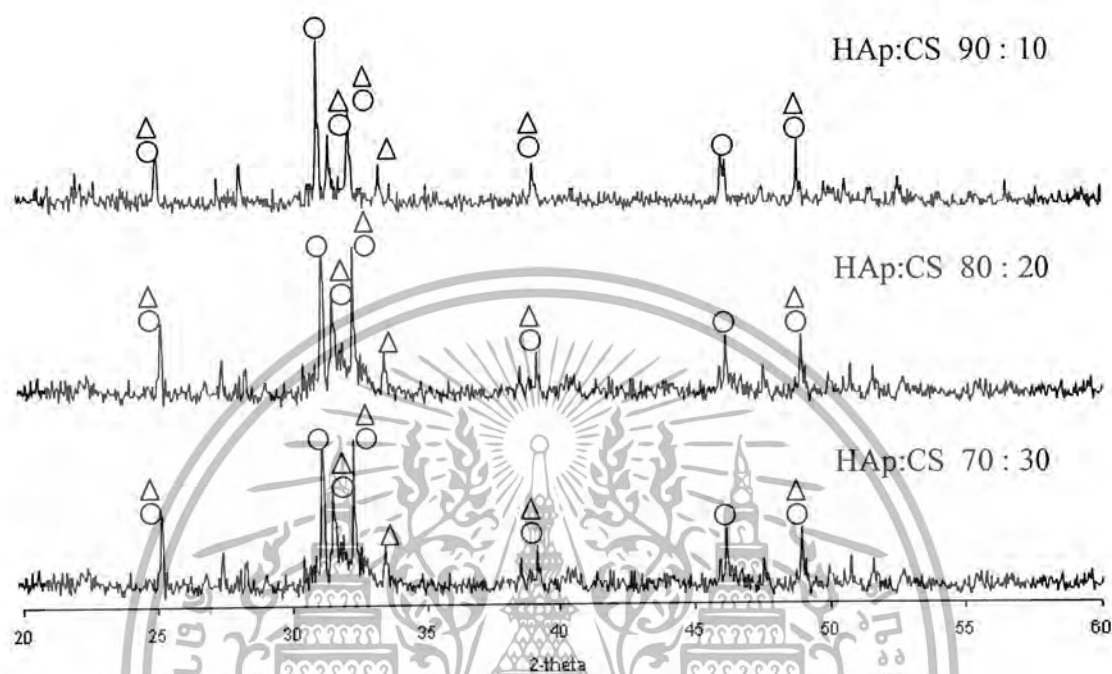
อัตราส่วน HAp:CS	เม็ดยี่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	
		0% PVA	2.5% PVA
100:0	1	2.23	1.42
	2	1.96	-
	3	1.92	-
	เฉลี่ย	2.04	1.42
90:10	1	1.36	1.31
	2	1.33	1.25
	เฉลี่ย	1.35	1.28
80:20	1	1.50	1.23
	2	1.48	1.22
	เฉลี่ย	1.49	1.23
70:30	1	1.23	1.28
	2	1.25	1.19
	เฉลี่ย	1.24	1.24
0:100	1	1.53	1.51
	2	1.34	1.37
	3	1.35	-
	4	1.17	-
	เฉลี่ย	1.35	1.44

4.3.2 วัฏภาคที่เป็นผลึกของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ที่ได้จากเทคนิค XRD

เมื่อนำสารไฮดรอกซีแอปาทาइटและแคลเซียมซลิเกตที่สังเคราะห์ได้ มาเตรียมเป็นชิ้นงานเซรามิกส์ในอัตราส่วนต่างๆ จากนั้นนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) พบว่าวัฏภาคที่เป็นผลึกประกอบด้วยฟีกของไฮดรอกซีแอปาทาइटที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.8, 31.7, 32.2, 32.9, 39.8, 46.7, 49.5 องศา และฟีกของโซเดียมแคลเซียมซลิเกตที่ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 θ เท่ากับ 25.0, 32.4, 33.0, 34.3, 34.6, 39.7, 49.6 องศา ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้ มีวัฏภาคองค์ประกอบหลักเป็นไฮดรอกซีเอปาทาइटและโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเซรามิกส์ที่อัตราส่วน HAp:CS ต่าง ๆ

○ : HAp, △ : Na-CS

จากรูปที่ 4.1 พบว่าพีกหลักของไฮดรอกซีเอปาทาइटและโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต ขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน คือที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 32.2-34.3 ทำให้พีกของสารทั้งสองซ้อนทับกัน โดยในชิ้นงานเซรามิกส์ที่มีอัตราส่วน HAp:CS เป็น 90:10 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีพีกองค์ประกอบหลักเป็นพีกของไฮดรอกซีเอปาทาइट โดยมีพีกของโซเดียมแคลเซียมซิลิเกตซ้อนทับอยู่ในปริมาณน้อย เมื่ออัตราส่วนของโซเดียมแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มในอัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 80:20 และ 70:30 พบว่าสัดส่วนความสูงของพีกโซเดียมแคลเซียมซิลิเกตที่ซ้อนทับในช่วง 2 θ เท่ากับ 32.2-34.3 มีค่าสูงขึ้น หากพิจารณาพีกที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 32.4 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งของพีกหลักของโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต พบว่ามีสัดส่วนความเข้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมแคลเซียมซิลิเกตสูงขึ้นในขณะที่พีกหลักของไฮดรอกซีเอปาทาइटที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 31.7 องศา มีสัดส่วนความเข้มลดลงเมื่อเทียบกับพีกของโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต เมื่อปริมาณของไฮดรอกซีเอปาทาइटในชิ้นงานเซรามิกส์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วัสดุประกอบระหว่าง HAp-CS/PEA

4.4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์

เมื่อนำสารที่อยู่ในวัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (FT-IR) เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ($^1\text{H-NMR}$) และเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) ได้ผลดังนี้

FT-IR : V_{\max} 2919 (C-H, s) 1736 (C=O, s) 1078 (C-O, s) cm^{-1} (ภาคผนวก ข รูปที่ 3)

$^1\text{H-NMR}$: δ 1.67 (4H, br, $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}-$) 2.37 (4H, br, $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}-$) 4.28 (4H, s, $-\text{CH}_2\text{O}-$) ppm
(ภาคผนวก ค รูปที่ 3)

GPC : ตารางที่ 4.3 (ภาคผนวก ง รูปที่ 3-5)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ GPC ของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยา ROP ที่อัตราส่วน HAp:CS ต่าง ๆ

HAp:CS	\bar{M}_n	\bar{M}_w	MWD
90:10	1730	3160	1.82
80:20	1630	2840	1.74
70:30	1530	2540	1.66

จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ พบพีกที่แสดงถึงโครงสร้างหลักของพอลิเอทิลีนอะซิเตต โดยไม่พบสัญญาณของ δ ที่ชัดเจนของสัญญาณการสั่นแบบยืดของหมู่ O-H (O-H stretching) ซึ่งแสดงถึงหมู่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์บนสเปกตรัมของ FT-IR และสเปกตรัมของ $^1\text{H-NMR}$ พบสัญญาณของ δ ที่ 4.22 และ 3.82 ซึ่งแสดงถึงโปรตอนของหมู่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ในปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่มีปริมาณมากขึ้นเมื่อเทียบกับสัญญาณเดียวกันของสารประกอบวงโอลิโกเมอร์ และผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC พบว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (\bar{M}_n) อยู่ในช่วง 1530-1730 และค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (\bar{M}_w) อยู่ในช่วง 2540-3160 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าของสารประกอบวงโอลิโกเมอร์ รายละเอียดของค่า \bar{M}_n และ \bar{M}_w ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

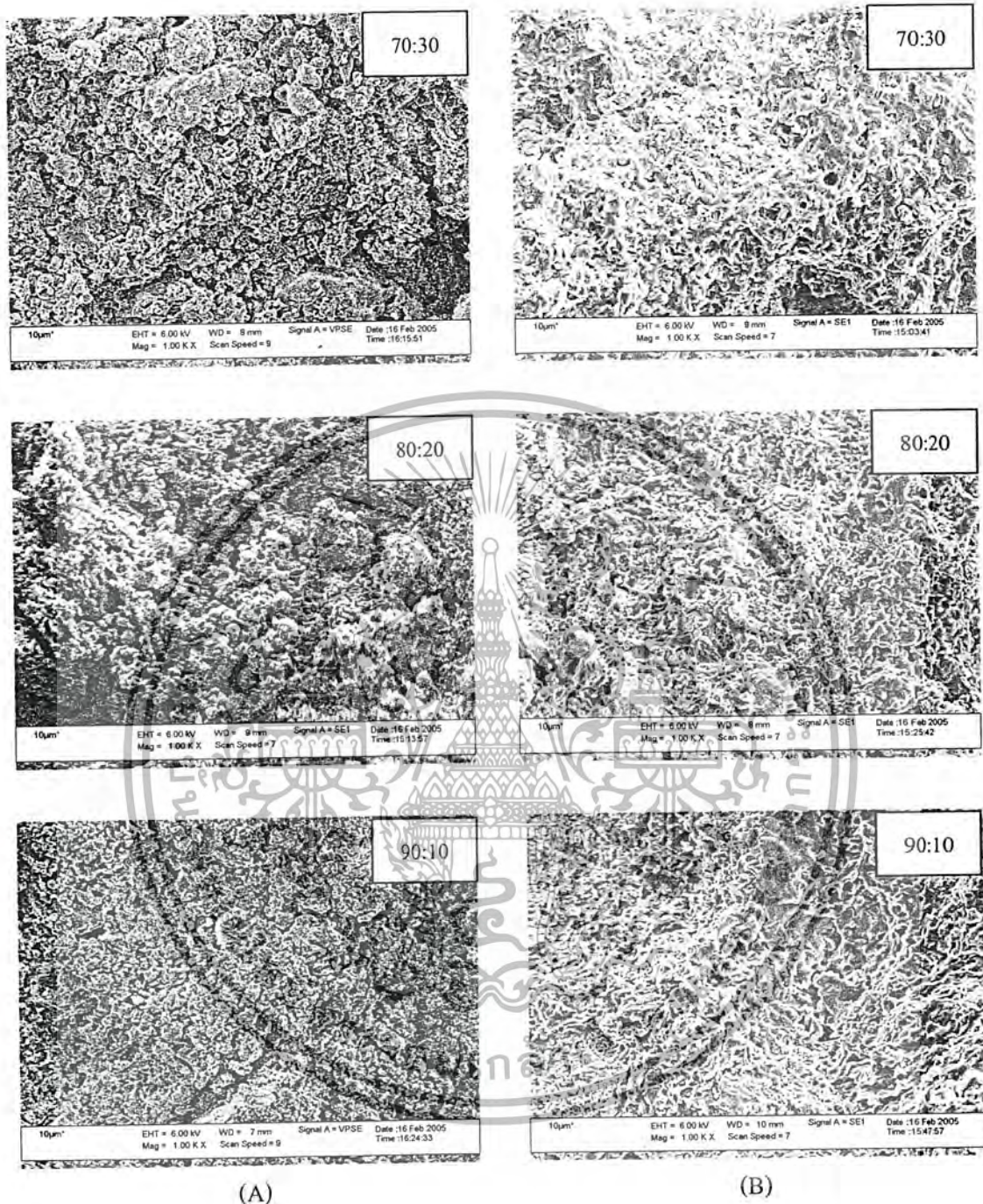
วัสดุประกอบแสดงในตารางที่ 4.3 จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่า สารประกอบวงโอลิโกเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์เปลี่ยนจากสารประกอบวงโอลิโกเมอร์เป็นพอลิเอทิลีนอะดิเปตภายในโครงสร้างของวัสดุประกอบ

4.4.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA

เมื่อนำชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS มาเตรียมเป็นวัสดุประกอบด้วยการพอลิเมอไรส์แบบเปิดวงของสารประกอบวงพอลิเอทิลีนอะดิเปต พบว่าชิ้นงานจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลทั้งภายในและภายนอกของชิ้นงาน ซึ่งเป็นสีของพอลิเมอไรส์ ดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปต (C-PEA) สามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนของชิ้นงานเซรามิกส์และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์แบบเปิดวงทั้งภายในและภายนอกของชิ้นงานได้ และเมื่อนำไปทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่พื้นผิวภายนอกและภายในชิ้นงานวัสดุประกอบ พบว่ามีฟิล์มพอลิเมอไรส์ปกคลุมบนเกรนเซรามิกส์ ทำให้มองเห็นเกรนของผลึกเซรามิกส์ไม่ชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS (A) และวัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับแคลเซียม-ซัลเฟต และพอลิเอทิลีนอะดิเปต (HAp-CS/PEA) (B)



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวภายในของชิ้นงานเซรามิกส์ก่อนการเตรียมวัสดุประกอบที่กำลังขยาย 1000 เท่า (A) ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวภายในของชิ้นงานวัสดุประกอบไฮดรอกซีเอปอไซด์กับแคลเซียมซิลิเกตและพอลิเอทิลีนอะดิเปตที่กำลังขยาย 1000 เท่า (B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวภายในของชิ้นงานเซรามิกส์ พบว่าชิ้นงานเซรามิกส์ ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1100°C จะมีผลึกที่เกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนและมีช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แต่เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานมีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณรูพรุนที่สังเกตได้ สันนิษฐานว่ารูพรุนส่วนมากเป็นผลจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งที่อัดตัวกันไม่แน่นในการขึ้นรูปชิ้นงาน

4.4.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ PEA ในวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้

ชิ้นงานวัสดุประกอบเมื่อผ่านปฏิกิริยาการพอลิเมอไรซ์แบบเปิดวงแล้ว จะนำมาตรวจสอบหาปริมาณของพอลิเอทิลีนอะดิเปตภายในโครงสร้างของวัสดุประกอบ โดยมีวิธีการตรวจสอบและคำนวณ 2 วิธี คือ การคำนวณจากความแตกต่างของน้ำหนักของวัสดุประกอบหลังการพอลิเมอไรซ์แบบเปิดวง และน้ำหนักของชิ้นงานเซรามิกส์ก่อนการเติมสารประกอบวงโอลิโกเมอร์

วิธีที่ 1 สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยนำหนักของพอลิเอทิลีนอะดิเปตในวัสดุประกอบได้จาก

$$\% \text{โดยนำหนักของพอลิเอทิลีนอะดิเปตในวัสดุประกอบ} = \frac{Y - X}{Y} \times 100$$

เมื่อ X คือ น้ำหนักของชิ้นงานเซรามิกส์เริ่มต้น (กรัม)

เมื่อ Y คือ น้ำหนักของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{น้ำหนักของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS} = 0.60 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA} = 0.80 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ โดยนำหนักของพอลิเอทิลีนอะดิเปตในวัสดุประกอบ} &= \frac{0.80 - 0.60}{0.80} \times 100 \\ &= 25 \% \end{aligned}$$

สำหรับค่าอื่น ๆ ในตารางที่ 4.4 สามารถคำนวณ % โดยนำหนักของพอลิเอทิลีนอะดิเปตในวัสดุประกอบ ได้เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ 2 เป็นการคำนวณเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปเป็นร้อยละของส่วนสารประกอบอินทรีย์ (พอลิเมอร์) หลังการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 900°C ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน ด้วยเทคนิค TGA (ภาคผนวก จ รูปที่ 1-3) จากการคำนวณทั้ง 2 วิธี (ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.4) พบว่าปริมาณพอลิเอทิลีนอะดิเปตในวัสดุประกอบที่ได้จากการชั่งน้ำหนัก และจากเทคนิค TGA มีค่าใกล้เคียงกัน จึงได้นำค่าจากการชั่งน้ำหนักแบบวิธีแรกมาใช้เป็นค่าอ้างอิงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนอะดิเปตในวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS เริ่มต้นเทียบกับน้ำหนักของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่เตรียมได้

ตัวอย่าง ที่	HAp:CS	น้ำหนัก HAp-CS (กรัม)	น้ำหนักวัสดุ ประกอบ (กรัม)	น้ำหนักที่ เพิ่มขึ้น (กรัม)	% โดยน้ำหนักของ PEA ในวัสดุประกอบ	
					จากการชั่ง น้ำหนัก	จากเทคนิค TGA
1	90:10	0.85	1.23	0.38	31	30
2	80:20	0.66	0.82	0.16	20	30
3	70:30	0.60	0.80	0.20	25	28

4.4.4 ความหนาแน่นของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA

จากตารางที่ 4.5 เมื่อนำชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS มาเตรียมเป็นวัสดุประกอบด้วยการพอลิเมอไรซ์แบบเปิดวงของสารประกอบวงพอลิเอทิลีนอะดิเปต แล้วนำมาหาค่าความหนาแน่นจากการคำนวณพบว่าวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่เตรียมได้จะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นประมาณ 29-30% เมื่อเทียบกับชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนอะดิเปตในวัสดุประกอบที่ได้จากการคำนวณ พบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 20-31% โดยน้ำหนักของวัสดุประกอบกล่าวคือพอลิเอทิลีนอะดิเปตสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในรูพรุนของชิ้นงานเซรามิกส์ได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากในทุกอัตราส่วน HAp:CS มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน จึงน่าจะมีปริมาณรูพรุนใกล้เคียงกัน เป็นผลให้พอลิเอทิลีนอะดิเปตสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในรูพรุนได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 ความหนาแน่นของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA เปรียบเทียบกับชิ้นงานเซรามิกส์

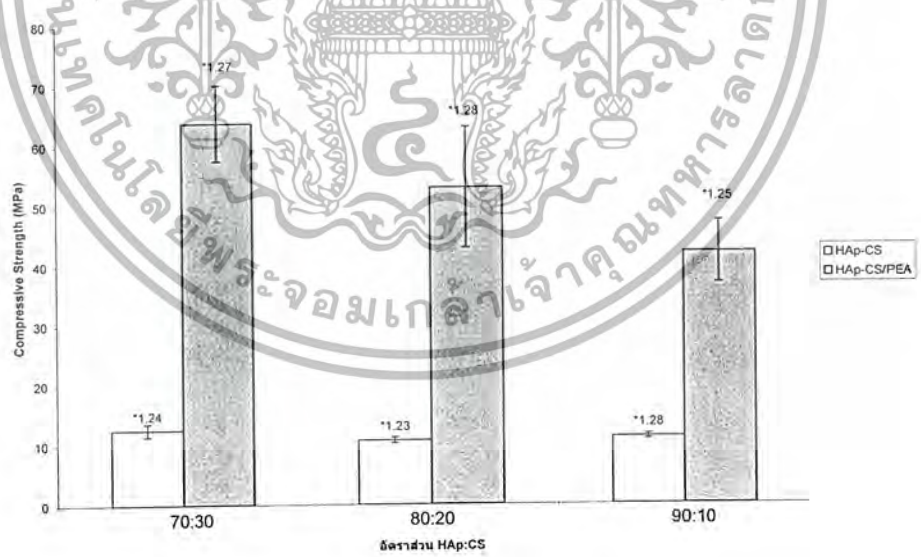
HAp-CS

อัตราส่วน HAp:CS	% โดยน้ำหนักของ PEA ในวัสดุประกอบ (คำนวณ)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)		% ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจากชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS
		HAp-CS	HAp-CS/PEA	
90:10	31	1.25	1.79	30
80:20	20	1.28	1.82	30
70:30	25	1.27	1.78	29

4.5 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA

4.5.1 การทดสอบความแข็งแรงกด

ค่าความแข็งแรงกด (Compressive Strength) ของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่ขึ้นรูปแบบการกดอัด ในแต่ละอัตราส่วน HAp:CS แสดงดังรูปที่ 4.4



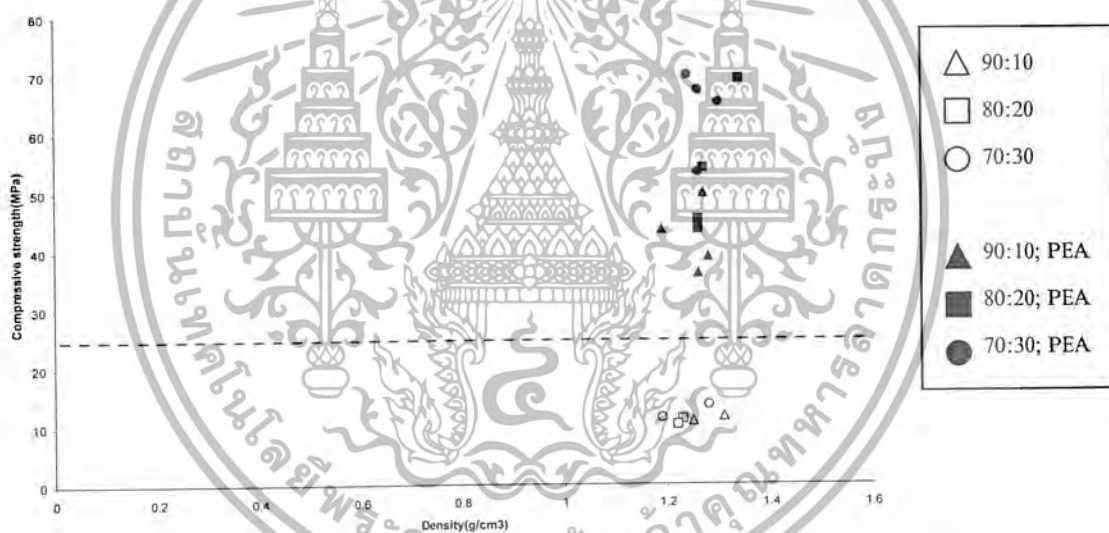
รูปที่ 4.4 กราฟค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ในอัตราส่วน HAp:CS ต่าง ๆ

* ตัวเลขด้านบนของแท่งกราฟคือค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟค่าความแข็งแรงกด พบว่าค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ก่อนการเตรียมเป็นวัสดุประกอบในทุกอัตราส่วน จะมีค่าความแข็งแรงกดต่ำกว่าค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่มีอัตราส่วน HAp:CS เดียวกัน เนื่องจากมีพอลิเอทิลีนอะดิเปตแทรกอยู่ในรูพรุนของชิ้นงานวัสดุประกอบทำหน้าที่ในการช่วยกระจายแรงให้กับชิ้นงาน ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกดของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น และพบว่าวัสดุประกอบที่มีอัตราส่วน HAp:CS เป็น 70:30 มีค่าความแข็งแรงกดอัดสูงกว่าอัตราส่วน HAp:CS ที่ 80:20 และ 90:10 ตามลำดับ เนื่องจากแคลเซียมซลิเกตสามารถรับแรงกดอัดได้ดีกว่าไฮดรอกซีอะปาทาइट ดังนั้นที่อัตราส่วน HAp:CS ที่ 70:30 ซึ่งมีปริมาณของแคลเซียมซลิเกตมาก จึงมีค่าความแข็งแรงกดอัดที่สูง

4.5.2 แนวโน้มของความหนาแน่นต่อค่าความแข็งแรงกด



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงแนวโน้มความหนาแน่นต่อค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่มีอัตราส่วน HAp:CS ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA จะแปรผันตามค่าความหนาแน่น กล่าวคือถ้าชิ้นงานเซรามิกส์หรือวัสดุประกอบมีค่าความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานจะเพิ่มสูงตามไปด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการขึ้นรูป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ไฮดรอกซีแอปาไทต์ (HAp)

ไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca:P) เท่ากับ 1.77 และเมื่อนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีวัฏภาคองค์ประกอบหลักเป็นไฮดรอกซีแอปาไทต์

5.2 แคลเซียมซิลิเกต (CS)

แคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca:Si) อยู่ในช่วง 1.101-1.133 แต่เนื่องจากมีปริมาณโซเดียมปนอยู่สูง แคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้จึงเป็นโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_7$)

5.3 สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะดิเปต (C-PEA)

เมื่อนำพอลิเอทิลีนอะดิเปตมาทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เซชันแบบเปิดวง ได้เป็น C-PEA ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีเหลืองอมน้ำตาล มีค่า M_w เท่ากับ 1225 M_n เท่ากับ 2104 และ MWD เท่ากับ 1.72

5.4 วัสดุประกอบ HAp-CS/PEA

วัสดุประกอบ HAp-CS/PEA เตรียมจากการนำไฮดรอกซีแอปาไทต์ผสมกับแคลเซียมซิลิเกตที่อัตราส่วน HAp:CS ต่างๆ หลังจากนั้นทำการกดอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ด แล้วทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันแบบเปิดวงของ C-PEA ได้ PEA ที่มีค่า M_w 1530-1730 ค่า M_n อยู่ในช่วง 2540-3160 และค่า MWD อยู่ในช่วง 1.66-1.82 PEA จะปกคลุมพื้นผิวภายนอกและแทรกอยู่ภายในรูพรุนของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS เป็นผลให้สีของวัสดุประกอบเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล โดยส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานเซรามิกส์ จากการชั่งน้ำหนักวัสดุประกอบพบว่ามี PEA อยู่ในวัสดุประกอบในช่วง 20-31% โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักของวัสดุประกอบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์จากเทคนิค TGA

5.5 สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA

ค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS มีค่ามากขึ้นเมื่อมี PEA แทรกอยู่ในรูปพรุนของชิ้นงาน โดยวัสดุประกอบจะมีค่าความแข็งแรงกดอยู่ในช่วง 36-70 MPa ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าของชิ้นงานเซรามิกส์ เนื่องจาก PEA แทรกเข้าไปอยู่ในรูปพรุน จะทำหน้าที่กระจายแรงกระทำที่ได้รับ ทำให้วัสดุประกอบ HAp-CS/PEA สามารถรับแรงได้ดียิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ในการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกส์อาจมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง HAp:CS เช่น อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 60:40 และ 50:50 เป็นต้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น
2. วัสดุประกอบที่เตรียมได้ควรนำไปทดสอบสมบัติความอ่อนไหวทางชีวภาพ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำวัสดุประกอบไปใช้งานทางการแพทย์



เอกสารอ้างอิง

1. ชุตานันท์ ศุภมงคล, ปิยพร แซ่เจี๋ย และวรัตตา มัตตะนาวี. 2545. การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิต์กับพอลิเอทิลีนอะดิเปต. โครงการงานพิเศษ. สาขาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. วรรัตน์ สุทธิสุขสถาพร, อภิขญา เจียนประเสริฐ และอรอนงค์ ชาวกุล. 2546. การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิต์กับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท และแคลเซียมซิลิเกต-พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท. โครงการงานพิเศษ. สาขาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. ระพี เจริญสูงเนิน และสิริรัตน์ รัตนาศิ. 2546. การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิต์กับพอลิเมทิลเมทาคริลิก และแคลเซียมซิลิเกต-พอลิเมทิลเมทาคริลิก. โครงการงานพิเศษ. สาขาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
4. Joon, P.B. 1979. **Biomaterial An Introduction**, USA: Plenum Press.
5. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 1997-2002. ไฮดรอกซีแอปาทิต์ (Hydroxyapatite) วัสดุทดแทนกระดูก. [online]. Available: http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool.html
6. LeGeros, R.Z. and LeGeros, J.P. 1993. **An introduction to bioceramics**. Singapore: World Scientific Publishing Co., pp. 140-145.
7. Aoki, H. 1994. **Medical Application of Hydroxyapatite**. Tokyo: Ishiyaky Euro America Inc.
8. AZoM™. 2004. ไฮดรอกซีแอปาทิต์ (Hydroxyapatite). [online]. Available: <http://www.AZoM™.com/patient/ha.html>
9. เซาวเรศ มะลิมาศ และ ปิยะวิทย์ รัตนฤทธินนท์. 2544. การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิต์เพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์. โครงการงานพิเศษ. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
10. Yamashita, K. and Kanazawa, T. 1989. **In Inorganic Phosphate**. Tokyo: Elsevier.
11. Hench, L.L and Wilson, J. 1993. **An Introduction to Bioceramics**. Singapore: World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Rathje, W. 1963. Zur Kenntnis de Phosphate I. Uber Hydroxyapatite. In: **Inorganic Synthesis Vol.7**, Kleinberg, J., eds. USA: Mcgraw-Hill Book Company, Inc., pp. 63-65.
13. Hayek, E. and Newesely, H. 1963. Pentacalcium Monohydroxyorthophosphate. In: **Inorganic Synthesis Vol.7**, Kleinberg, J., eds. USA: Mcgraw-Hill Book Company, Inc., pp. 63-65.
14. Somiya, S., Loku, K. and Yoshimura, M. 1988. **Hydrothermal Synthesis and Characterization of Fine Apatite Crystals**. Ceramic Developments. (34-36): 371-378.
15. Mosebach, R. 1996. **Some Properties of the Crystals of Synthetic of Hydroxyapatite**. Reach. Sci. (9): 415-416.
16. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC). 1997-2002. ไฮดรอกซีเอปาทิต (Hydroxyapatite)วัสดุทดแทนกระดูก. [online]. Available: <http://www.ioi.com/patient/ha.html>
17. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC). 1997-2002. ไฮดรอกซีเอปาทิต (Hydroxyapatite)วัสดุทดแทนกระดูก. [online]. Available: http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool2.html
18. พนิดาแสงสว่าง และ พูลศิริ รัตนนิยกุล. 2541. การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวกับแร่วอลลาสโตไนท์. โครงการพิเศษ. ภาควิชาวัสดุศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. <http://mineral.galleries.com/silicate/wollasto/wollasto.htm>
20. http://www.nycominerals.com/cache/page_92-127.htm
21. <http://www.geol.binghamton.edu/faculty/naslund/Geol.111.Lec3.html>
22. http://webmineral.com/data/wollastonite_2M.shtml
23. http://www.smmiec.com/4th/nonmetallic_mineral_product_2.htm
24. http://www.nycominerals.com/cache/page_92-130.htm
25. <http://geolog.cr.usgs.gov/pub/fact-sheets/fs-0002-01/fs-0002-01.pdf>
26. Ibanez A., Pena J.M.G. and sandoval F. 1990. Solid-state reaction for producing β -wollastonite. **Ceramic Bulletin**. 69(3): 374-378.
27. <http://www.ex.ac.uk/chemweb/staff-research/sjc.htm>
28. Dietoich, B., Viout, P. and Lehn, J.M. 1993. In **macrocyclic Chemistry**. VCM. Weinim.
29. <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30. วัชรพล พุฒทอง และ นพทิพย์ แซ่ตั้ง. 2546. การศึกษาผลของการใช้แบโรไทน์ในส่วนผสมผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ขาว. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. ภาควิทยาศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
31. Ulrich, A. 1993. **Introduction to Industrial Polymers**. 2nd edition. Germany: Hanser Publisher.
32. Parker, S.P. 1993. **Encyclopedia of Chemistry Vol.3**, USA: McGraw-Hill Inc.
33. Billmeyer, F.W. , Jr., Eckard, A.D.1969.**Macromolecule**. (2) :103-105.
34. Smith, M.B. 1994. **Organic Synthesis**. International edition. Mc.Graw-Hill. pp 611-621.
35. <http://www.bg.ic.ac.uk/Lectures/Hench/BioCamp/Chap3.html>
36. ปุณณมา สิริพันธ์ โนน. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
37. ชูศักดิ์ เวชแพทย์ และ สมศรี ดาวฉาย. 2543. โครงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทางชีวภาพทางการแพทย์. สถาบันและพัฒนาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหิดล.
38. Choi, D., Marra, K.G. and Kumta, P.N. 2003. **Chemical synthesis of hydroxyapatite / poly (ϵ -caprolactone) composites**. Material Research Bulletin. Elsevier. pp. 417-432.
39. Hall, A.J., Hodge, P., Megraff, C.H. and Rickerby, J. 2000. Synthesis of a series of cyclicoligo(alkylidene isophthalate) by cyclo-depolymerisation. **Polymer**. (41): 1239-1249.
40. ชลารช จันทร์ทศ และคณะ. 2543. การรีไซเคิลของพอลิเอทีลีนเทอร์พาทาเลตโดยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง และโดยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง. โครงการพิเศษ. สาขาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
41. Siriphannon, P., Hayshi, S., Yasunori, A. and Okada, K. 1999. **Preparation and sintering of CaSiO_3 from coprecipitated powder using NaOH as precipitant and its apatite**. Formation in simulated body fluid solution. **J.Mater Res**. (14) : 529-540.
42. Walsh, D. 2001. **Preparation of porous composite implant material by in situ polymerization of porous apatite containing ϵ -caprolactone or methyl methacrylate**. **Biomaterial**. (22) : 1205-1212.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 74-565		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Hydroxylapatite / Calcium Hydroxide Phosphate		10.832	17	1	0	0	82.323	1	1	6	2
		16.842	5	1	0	1	*82.323	1	6	0	3
		18.817	2	1	1	0	82.703	1	7	0	0
		21.762	6	2	0	0	83.123	1	4	4	1
		22.858	6	1	1	1	83.240	1	3	3	4
		25.357	2	2	0	1	83.391	4	4	3	3
		25.883	35	0	0	2	84.268	3	2	4	4
		28.131	9	1	0	2	84.423	2	0	0	6
		28.921	16	2	1	0	84.953	<1	4	0	5
		31.766	100	2	1	1	85.443	2	5	2	3
		32.195	52	1	1	2	*85.443	2	1	0	6
		32.897	61	3	0	0	85.781	1	2	6	0
		34.063	21	2	0	2	87.338	2	5	1	4
		35.455	4	3	0	1	87.493	4	4	1	2
		38.168	<1	2	2	0	*87.493	4	1	1	6
		39.197	5	2	1	2	88.021	3	2	3	5
		39.791	20	1	3	0	88.471	6	3	5	2
		40.436	2	2	2	1	89.530	<1	1	6	3
		40.845	<1	1	0	3					
		41.966	6	1	3	1					
		42.325	1	3	0	2					
		43.876	5	1	1	3					
		44.362	1	4	0	0					
		45.329	3	2	0	3					
		46.381	1	4	0	1					
		46.694	23	2	2	2					
		48.081	12	1	3	2					
		48.586	4	2	3	0					
		49.490	31	2	1	3					
		50.475	16	3	2	1					
		51.255	12	1	4	0					
		52.075	12	4	0	2					
		52.075	12	3	0	3					
		53.220	14	0	0	4					
		54.484	1	1	0	4					
		55.863	6	3	2	2					
		56.317	<1	5	0	0					
		57.133	4	3	1	3					
		58.027	2	5	0	1					
		58.164	1	2	0	4					
		58.295	1	4	1	2					
		58.737	1	3	3	0					
		59.524	4	2	4	0					
		60.404	3	3	3	1					
		61.571	3	2	4	1					
		61.703	5	1	2	4					
		62.981	8	5	0	2					
		63.404	2	5	1	0					
		63.998	8	3	0	4					
		64.165	9	3	2	3					
		65.000	7	5	1	1					
		66.412	2	1	4	3					
		67.359	<1	2	2	4					
		68.461	<1	3	1	4					
		68.985	<1	6	0	0					
		69.193	<1	1	0	2					
		69.673	2	5	1	5					
		70.074	<1	4	3	0					
		70.516	<1	8	0	1					
		70.799	<1	5	0	3					
		71.381	<1	1	1	5					
		71.596	4	4	3	1					
		72.232	3	5	2	0					
		72.436	2	2	0	5					
		72.947	<1	3	3	3					
		73.735	2	5	2	1					
		74.011	4	2	4	3					
		74.916	1	2	3	4					
		75.031	1	6	0	2					
		75.622	5	2	1	5					
		76.065	2	3	4	2					
		76.473	2	6	1	0					
		77.021	5	1	4	4					
		77.174	5	5	1	3					
		77.720	<1	3	0	5					
		77.947	1	1	6	1					
		78.179	6	2	5	2					
		80.836	<1	2	2	5					
		81.180	1	5	0	4					
		81.673	2	4	4	0					
		81.870	1	1	3	5					

รูปที่ ก-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ไฮดรอกซีแอปพาไทต์จากข้อมูล JCPDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

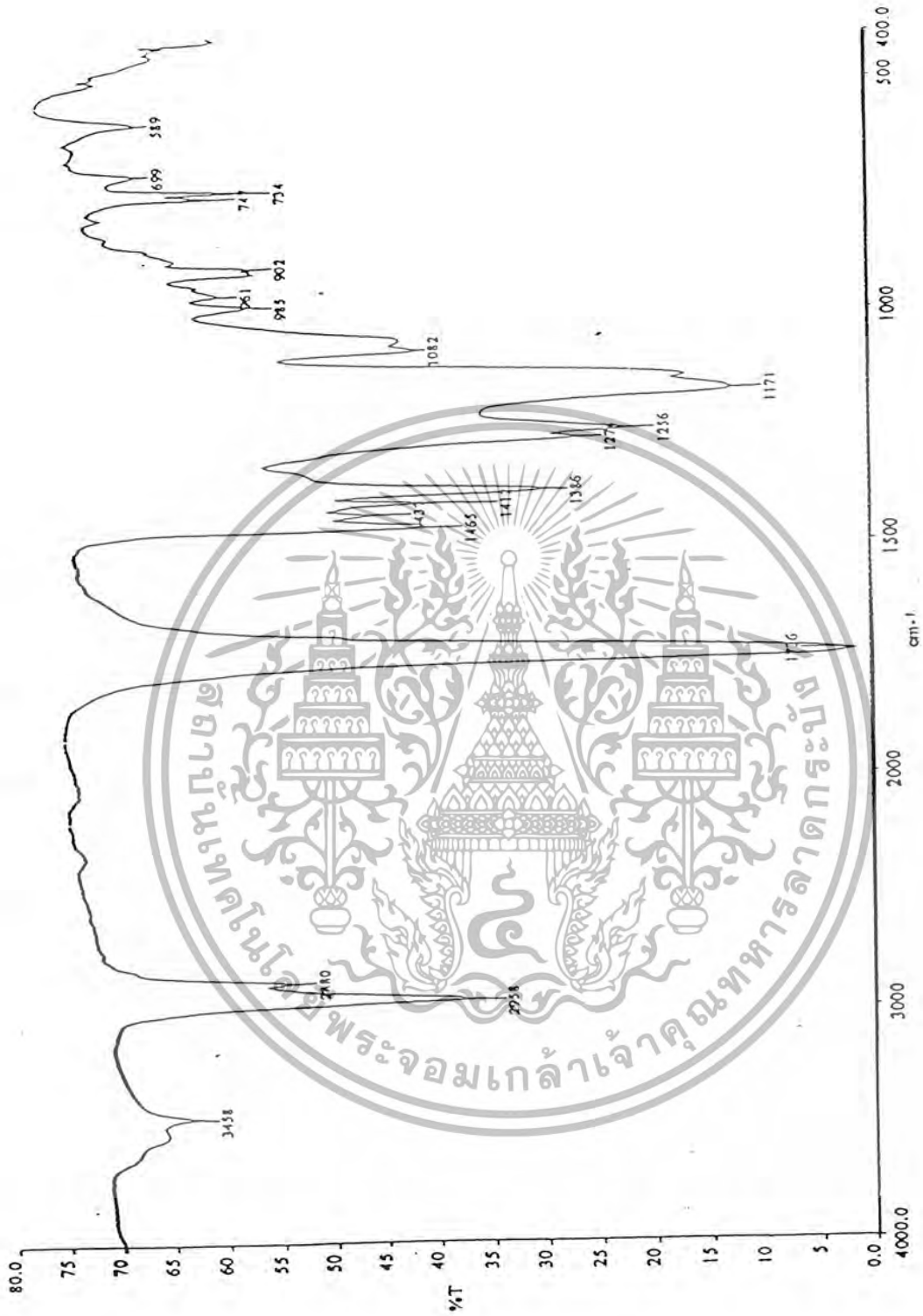
Pattern : 10-16		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
		2 θ	I	h	k	l
Na ₂ Ca ₂ Si ₂ O ₇ / Na ₂ O 2 CaO 2 SiO ₂		21.984	20			
Sodium Calcium Silicate		23.022	20			
		24.921	60			
		27.081	20			
		28.309	20			
		30.808	40			
		32.412	100			
		33.027	100			
		34.331	80			
		34.605	80			
		35.892	10			
		37.281	20			
		38.958	20			
		39.673	20			
		40.605	20			
		41.384	20			
		42.824	10			
		44.370	80			
		46.134	10			
		47.254	10			
		48.763	20			
		49.613	80			
		50.256	20			
		53.312	20			
		56.821	20			
		57.598	60			
		58.115	20			
		59.430	20			
		60.198	20			
		61.166	70			
		63.368	40			
		69.583	40			
		70.969	10			
		72.675	20			
		73.396	20			
		74.268	20			
		75.164	20			
		78.613	20			
		87.297	20			
		90.462	20			
Lattice : Not assigned						
Mol. weight = 294.31						
S.G. : (0)						
GENERAL COMMENTS : Reference suggests monoclinic for the crystal system.						
GENERAL COMMENTS : Lath-shaped crystals, melting point about 1450 C.						
GENERAL COMMENTS : Synthetic material.						
*Am. J. Sci., volume 251, page 586. (1953) primary reference : Segnè.						
Radiation :	Filter : Not specified					
	d-sp : Not given					

รูปที่ ก-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมซิลิเกตจากข้อมูล JCPDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

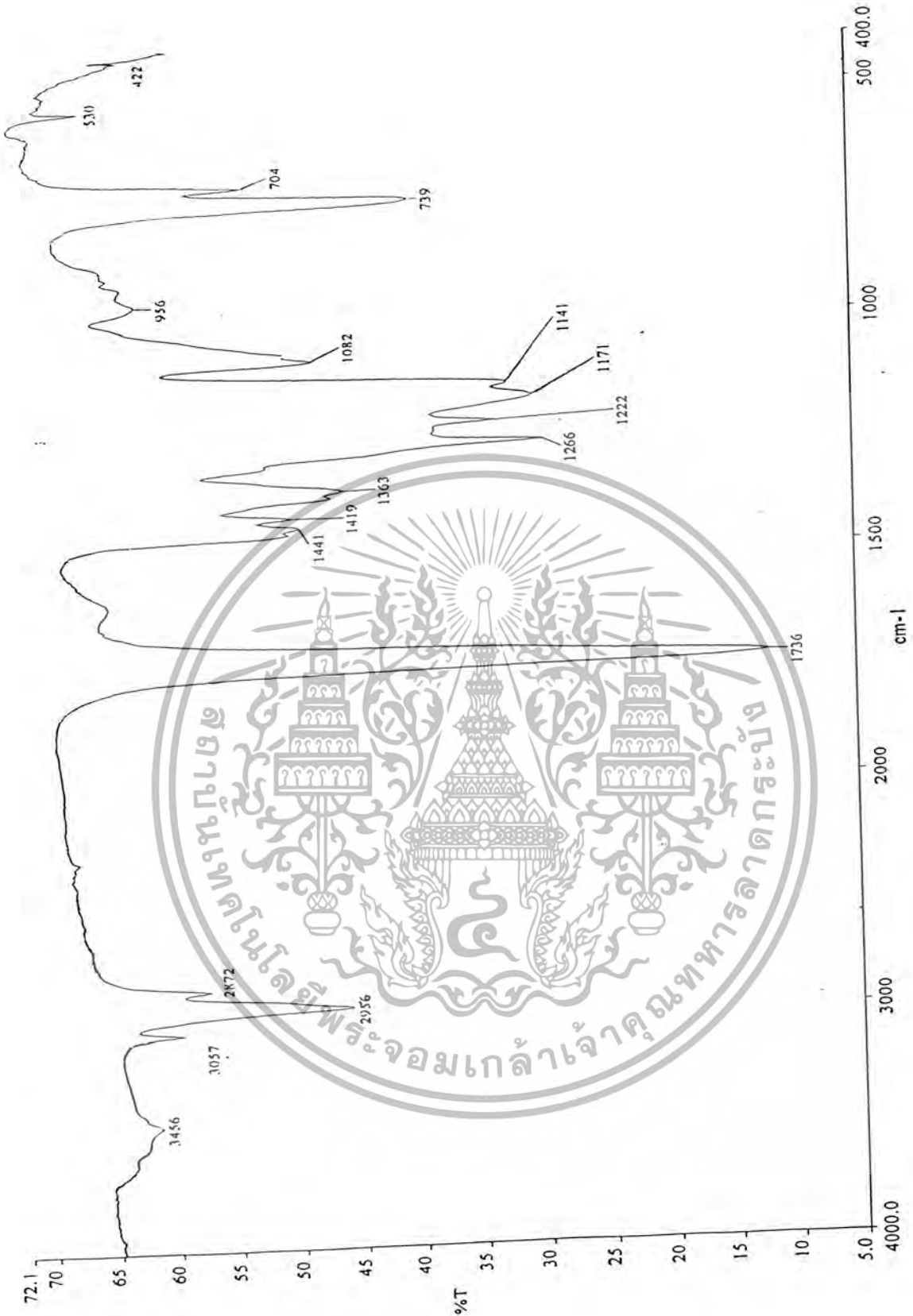


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



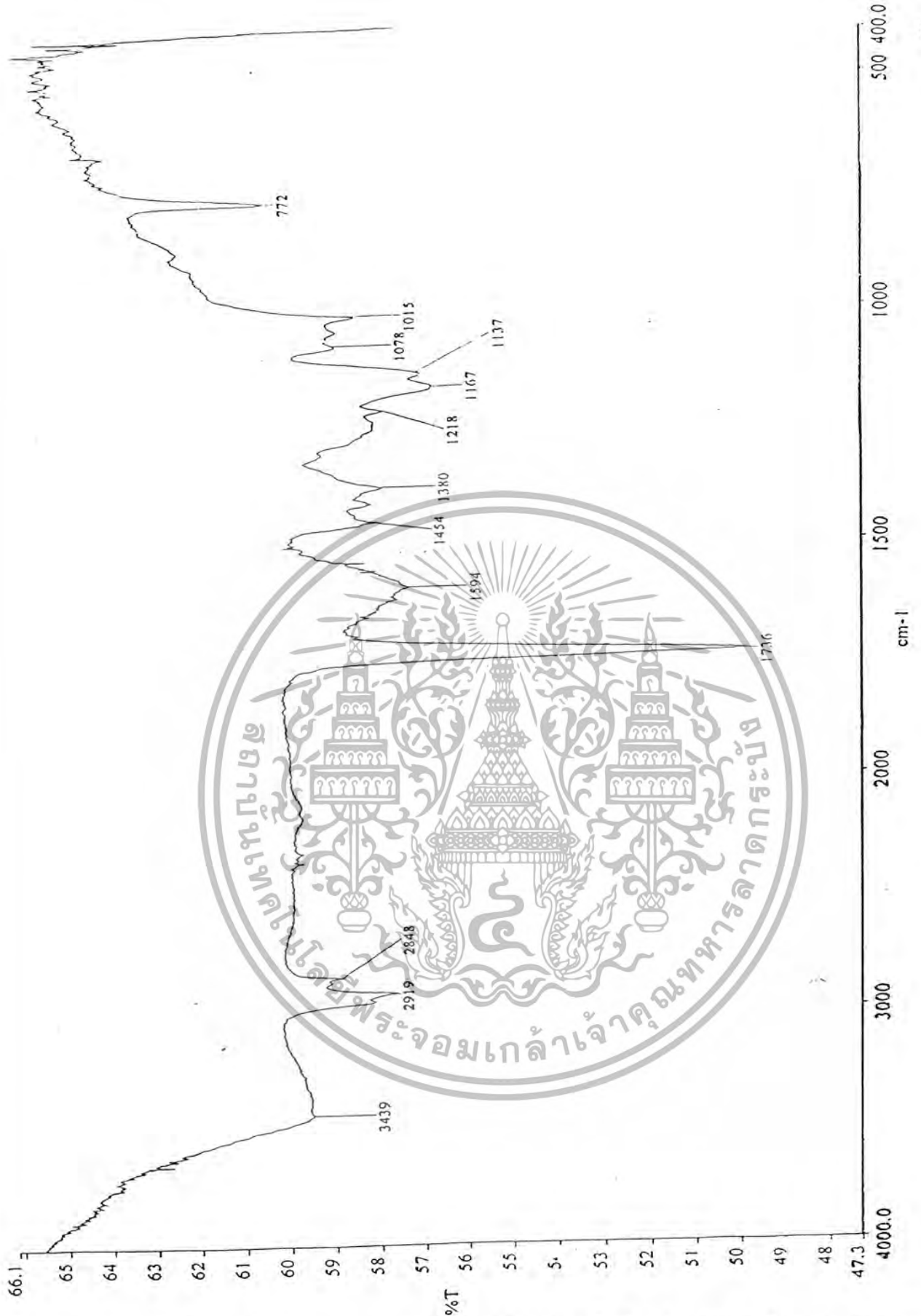
รูปที่ ข-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนอะดีเปต (PEA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-2 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบวง โอลิโกเททรีนอะดิเปต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

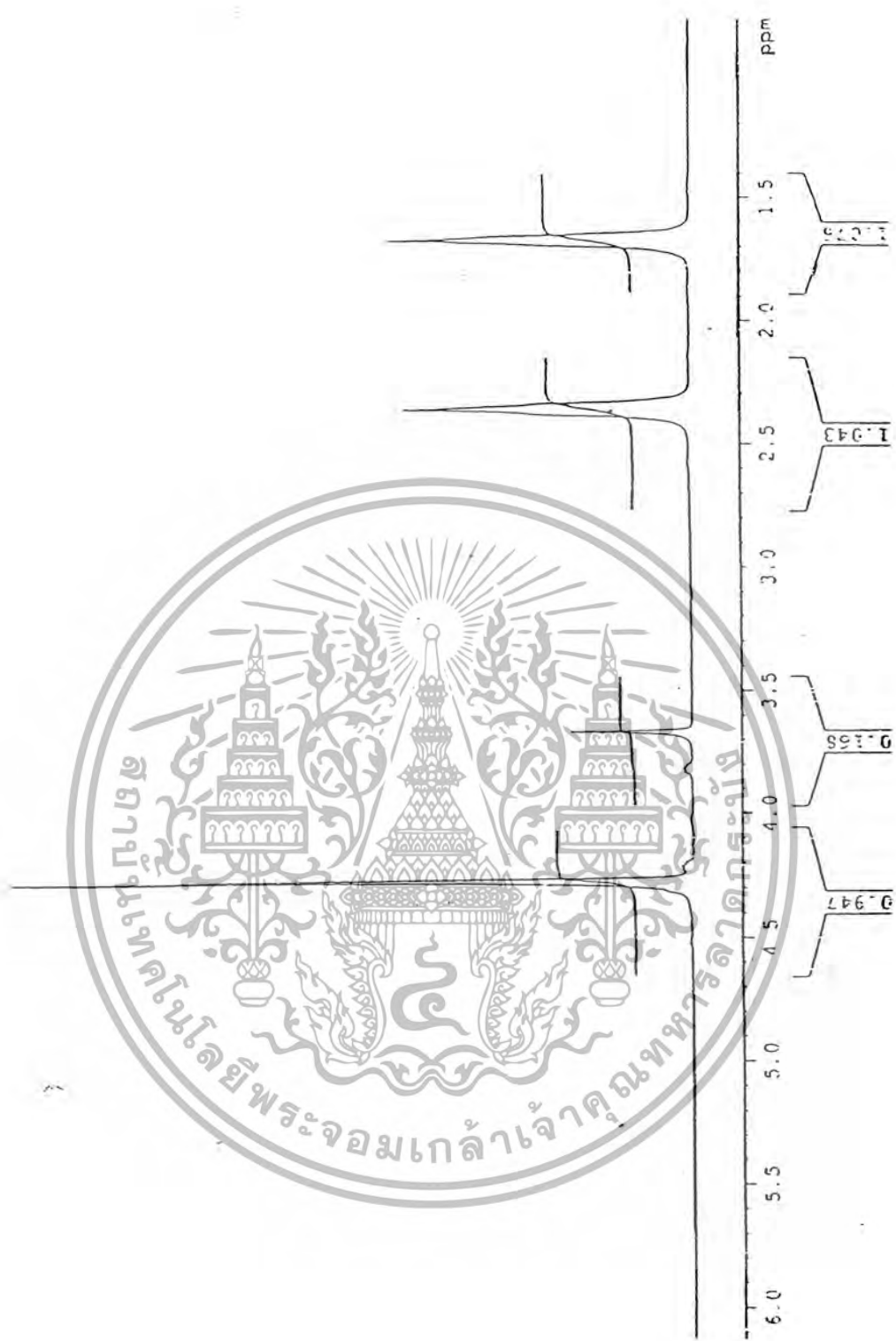


รูปที่ ข-3 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนอะคิเลตในวัสดุประกอบระหว่าง HAp-CS/PEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

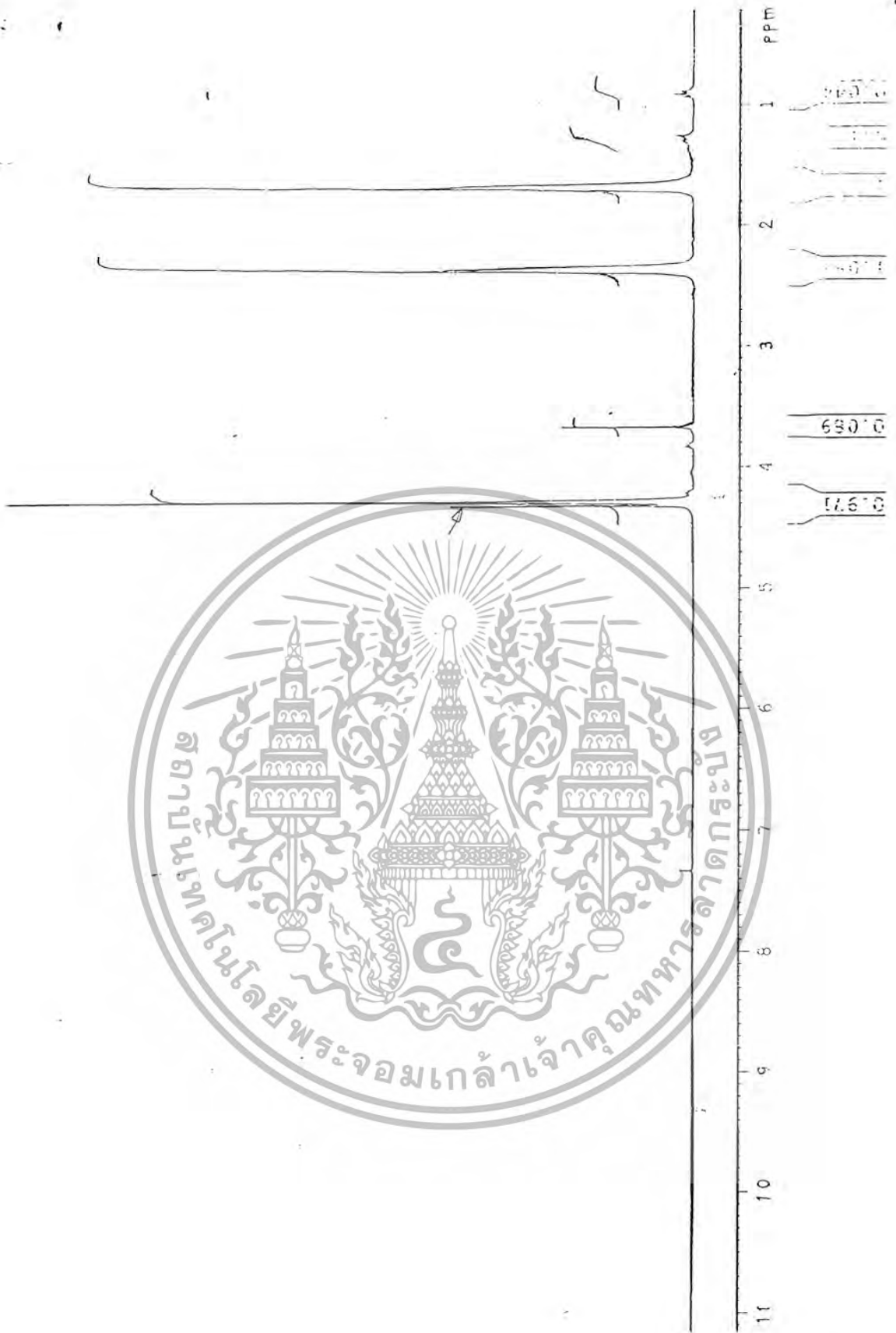


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัมของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-2 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัมของสารประกอบวงโพลิโกเอทีลินอะดิเปต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-3 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัมของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยา ROP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

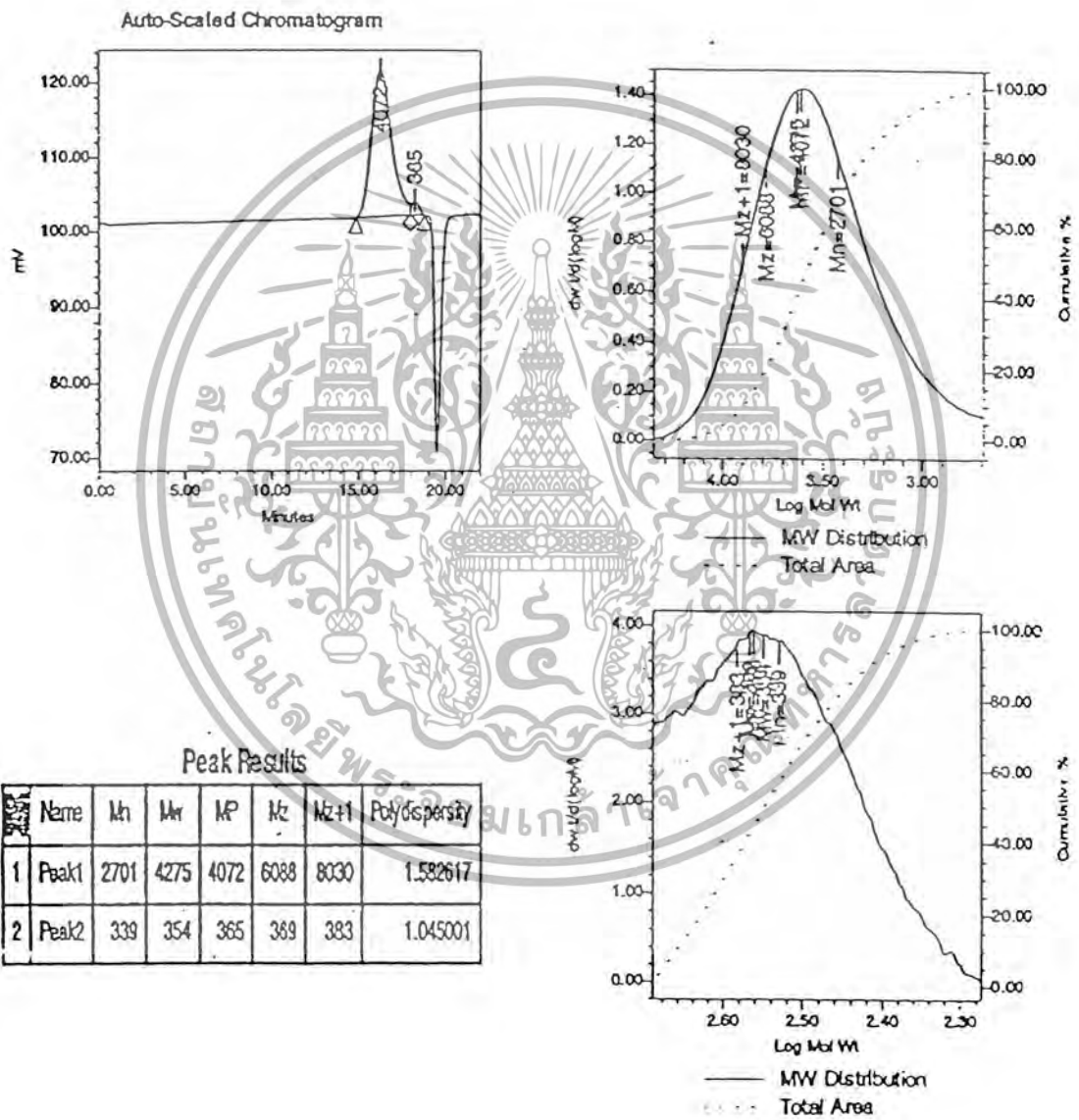


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Information

SampleName pea
 Vial 4
 Injection 1
 Injection Volume 100.00 μ
 Channel SATIN
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown
 Date Acquired 3/1/04 4:05:05 PM
 Acq Method Set Y2004_1_MethR_THF_30C_1
 Processing Method Y2004_1_ProcR_THF_30C_1
 Date Processed 3/1/04 5:23:19 PM

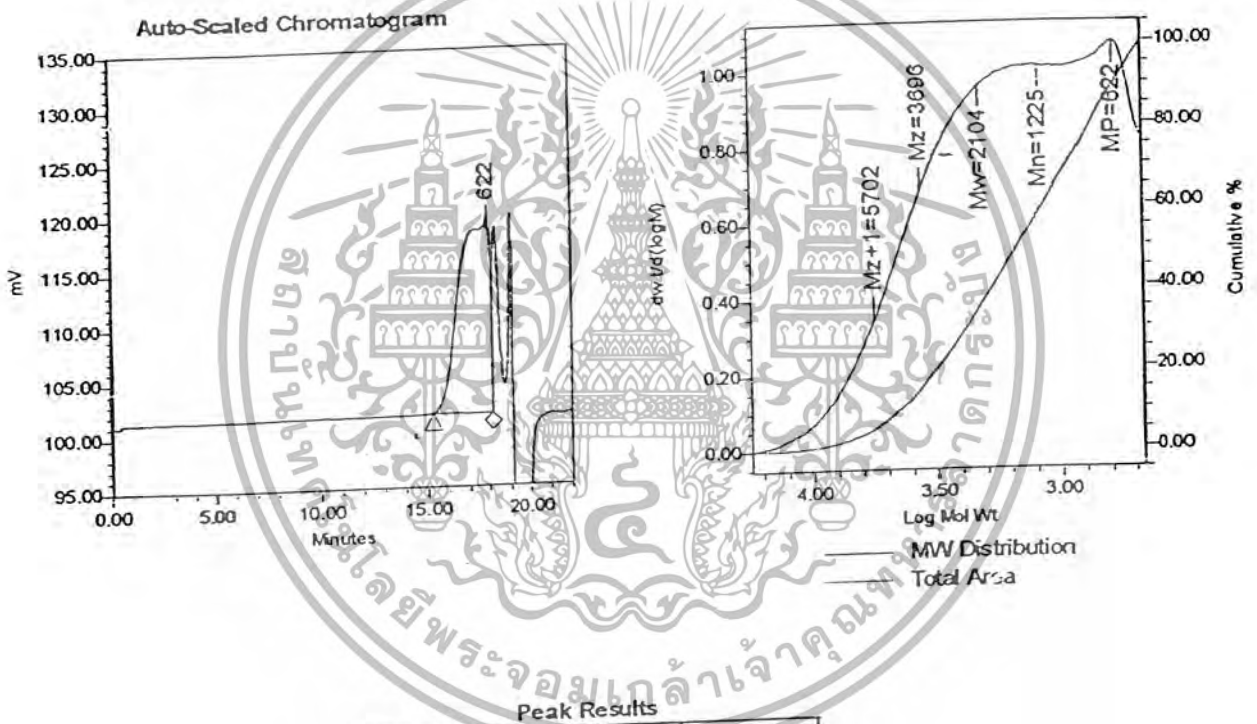


รูปที่ ง-1 โครมาโทแกรมของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาควมแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Information

<p>SampleName C-PEA Vial 3 Injection 1 Injection Volume 100.00 μl Channel SATIN Run Time 22.0 Minutes</p>	<p>Sample Type Broad Unknown Date Acquired 3/15/05 2:25:48 PM Acq Method Set Y2005_MethR_THF_30C_3 Processing Method Y2005_ProcR_THF_30C_3 Date Processed 3/18/05 1:16:00 PM</p>
--	---



Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	1225	2104	622	3696	5702	1.717037

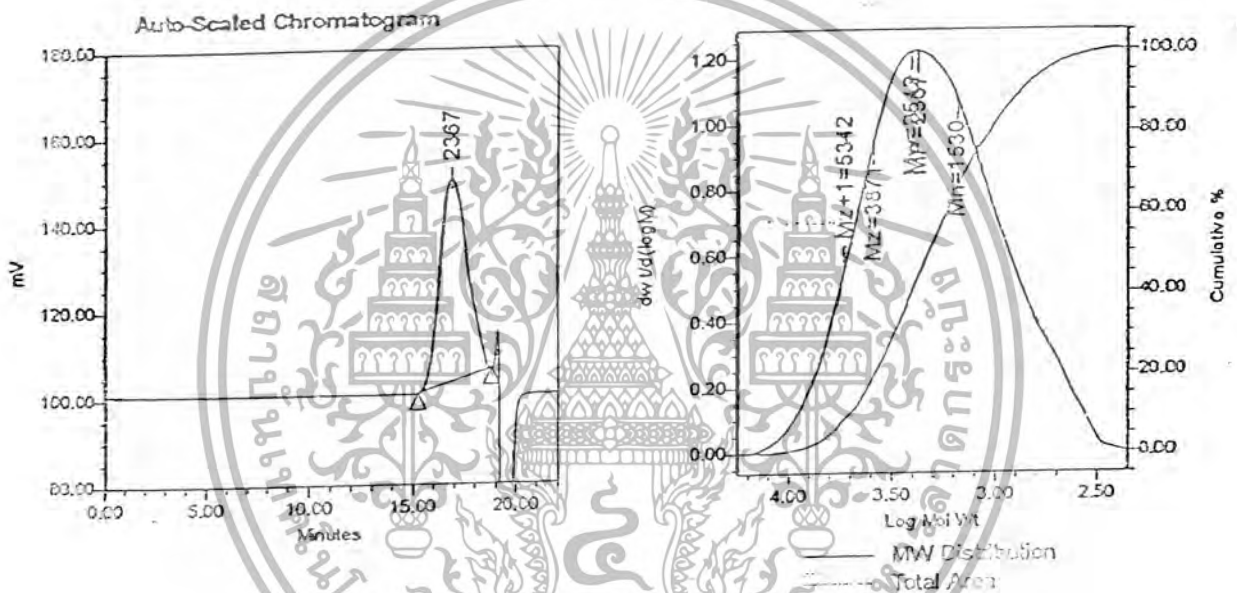
รูปที่ ง-2 โครมาโทแกรมของสารประกอบวงโพลิโกเอทีลีนอะซิเตต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Information

SampleName 70:30 20% PVA
 Vial 10
 Injection 1
 Injection Volume 100.00 μ l
 Channel SATIN
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown
 Date Acquired 3/15/05 5:25:49 PM
 Acq Method Set Y2005_MethR_THF_30C_3
 Processing Method Y2005_ProcR_THF_30C_3
 Date Processed 3/17/05 8:01:54 AM



รูปที่ ง-3 โครมาโทแกรมของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยา ROP ที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ

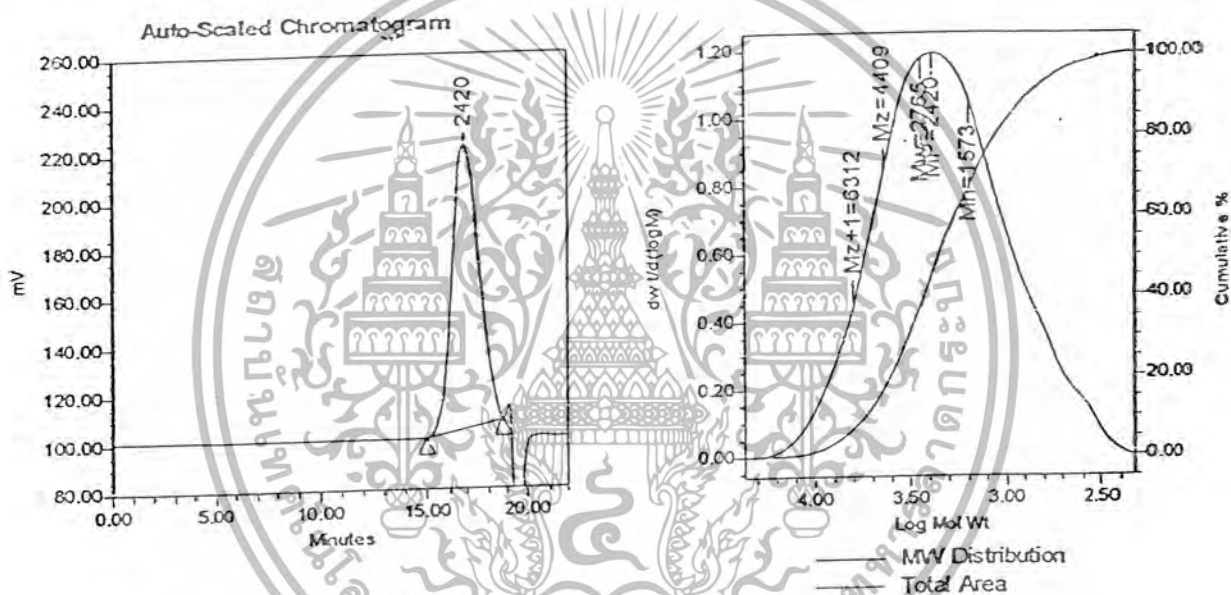
70:30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Information

SampleName 80:20 20% PVA
 Vial 7
 Injection 1
 Injection Volume 100.00 μ l
 Channel SATIN
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown
 Date Acquired 3/15/05 4:08:39 PM
 Acq Method Set Y2005_MethR_THF_30C_3
 Processing Method Y2005_ProcR_THF_30C_3
 Date Processed 3/17/05 8:12:57 AM



รูปที่ ง-4 โครมาโทแกรมของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยา ROP ที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ

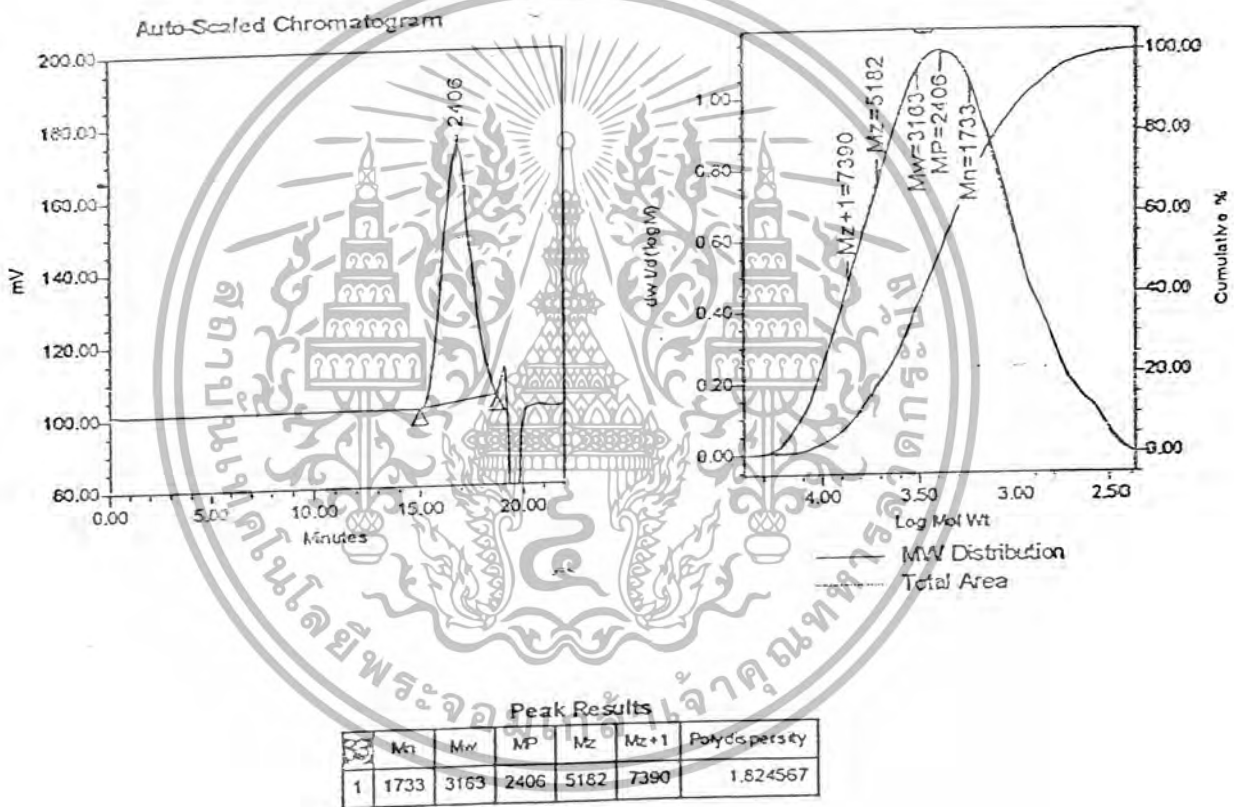
80:20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample Information

SampleName 90:10 20% PVA
 Vial 4
 Injection 1
 Injection Volume 100.00 μ l
 Channel SATIN
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown
 Date Acquired 3/15/05 2:51:32 PM
 Acq Method Set Y2005_MethR_THF_30C_3
 Processing Method Y2005_ProcR_THF_30C_3
 Date Processed 3/15/05 3:49:27 PM



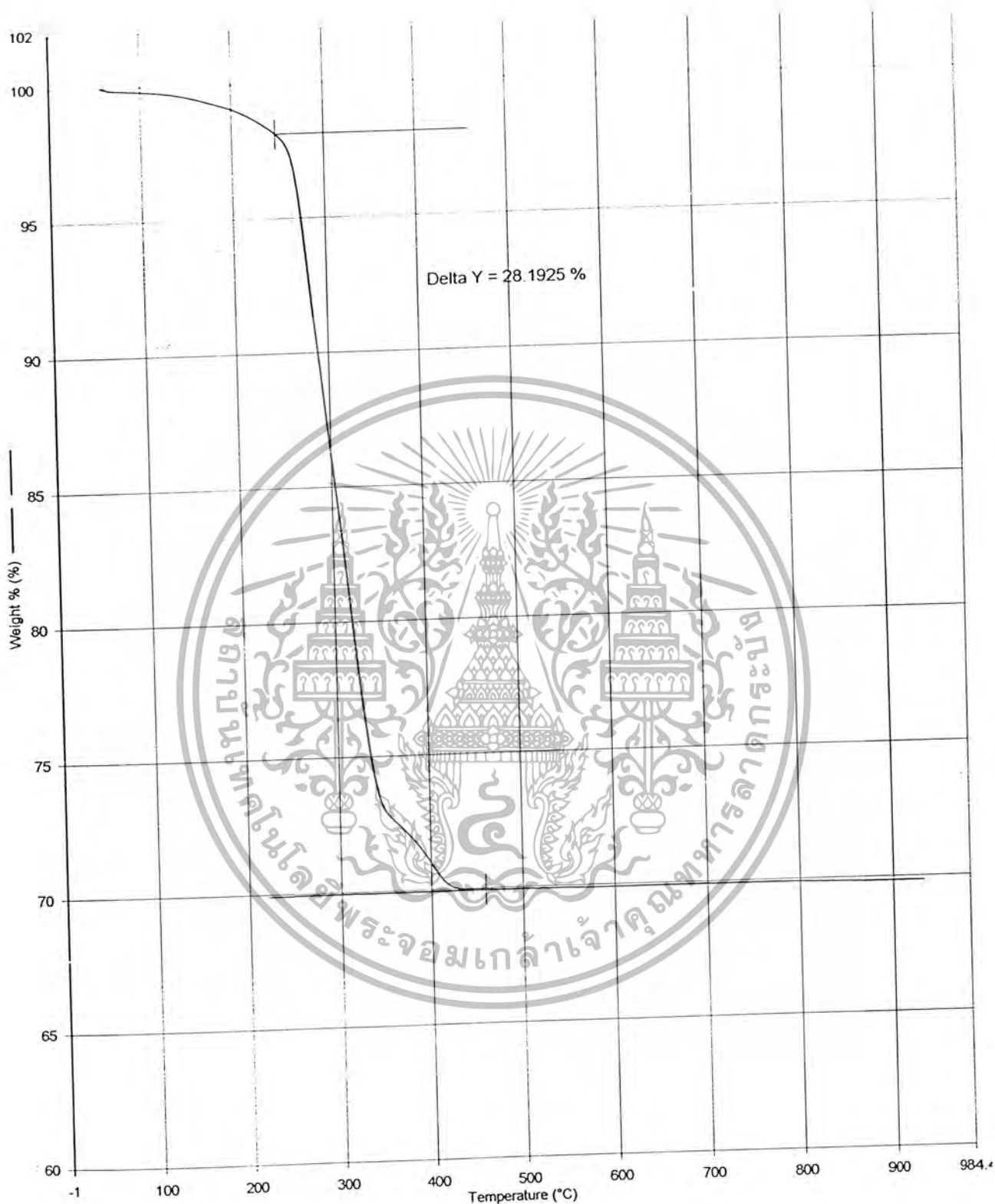
รูปที่ 5-5 โครมาโทแกรมของ PEA ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยา ROP ที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ

90:10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

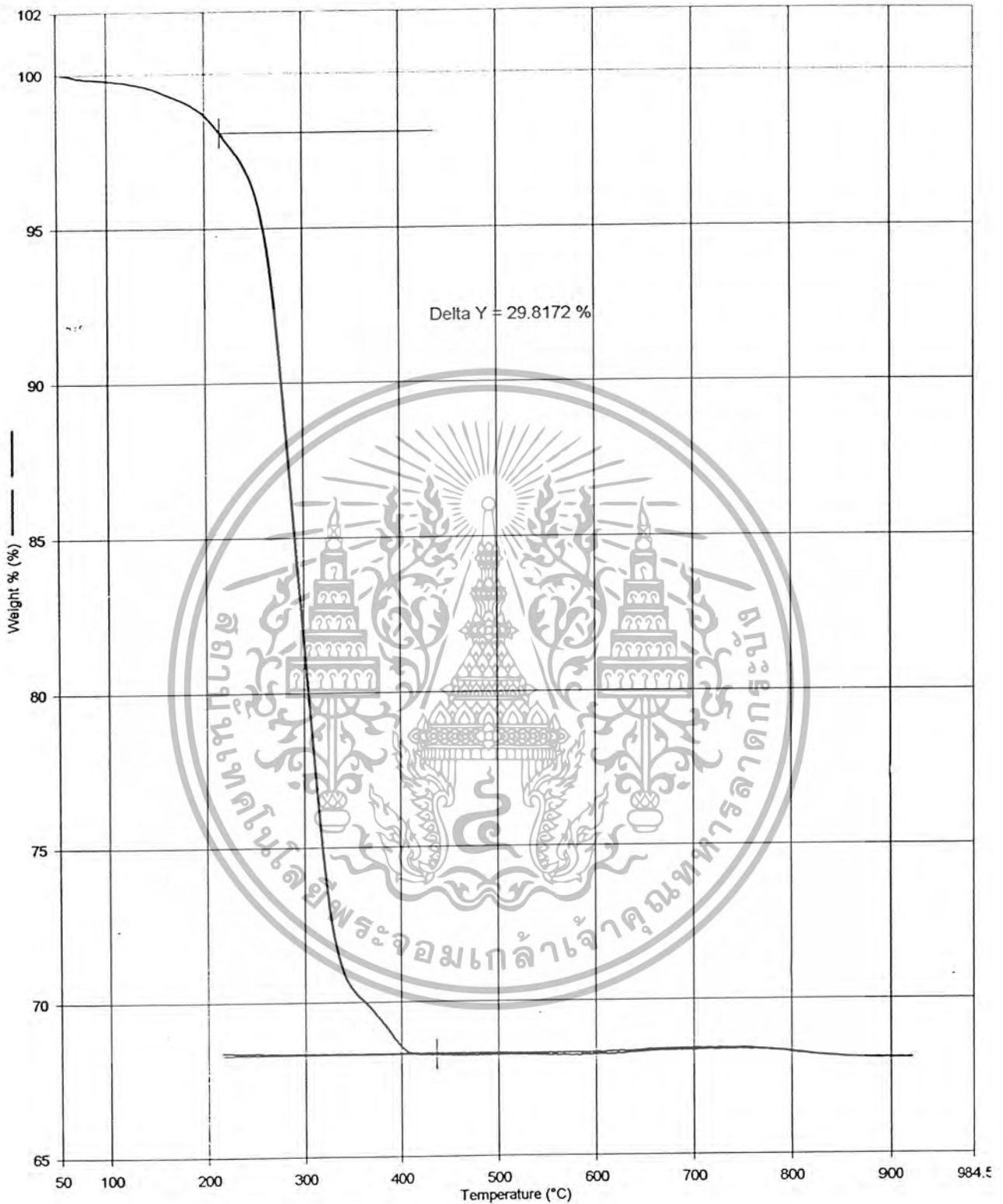


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



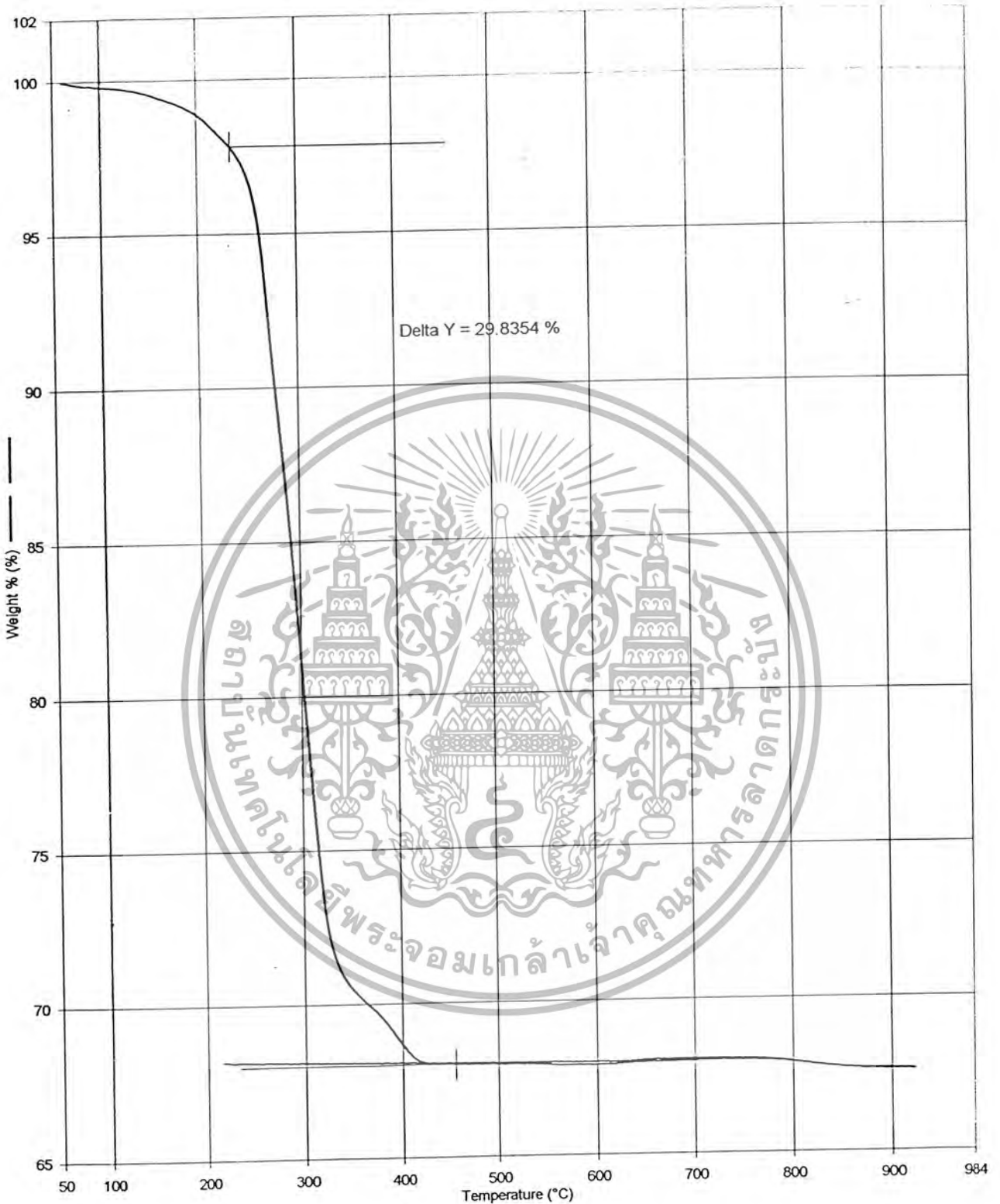
รูปที่ จ-1 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบเฉพาะภายในชิ้นงานที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 70:30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-2 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบเฉพาะภายในชิ้นงานที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 80:20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

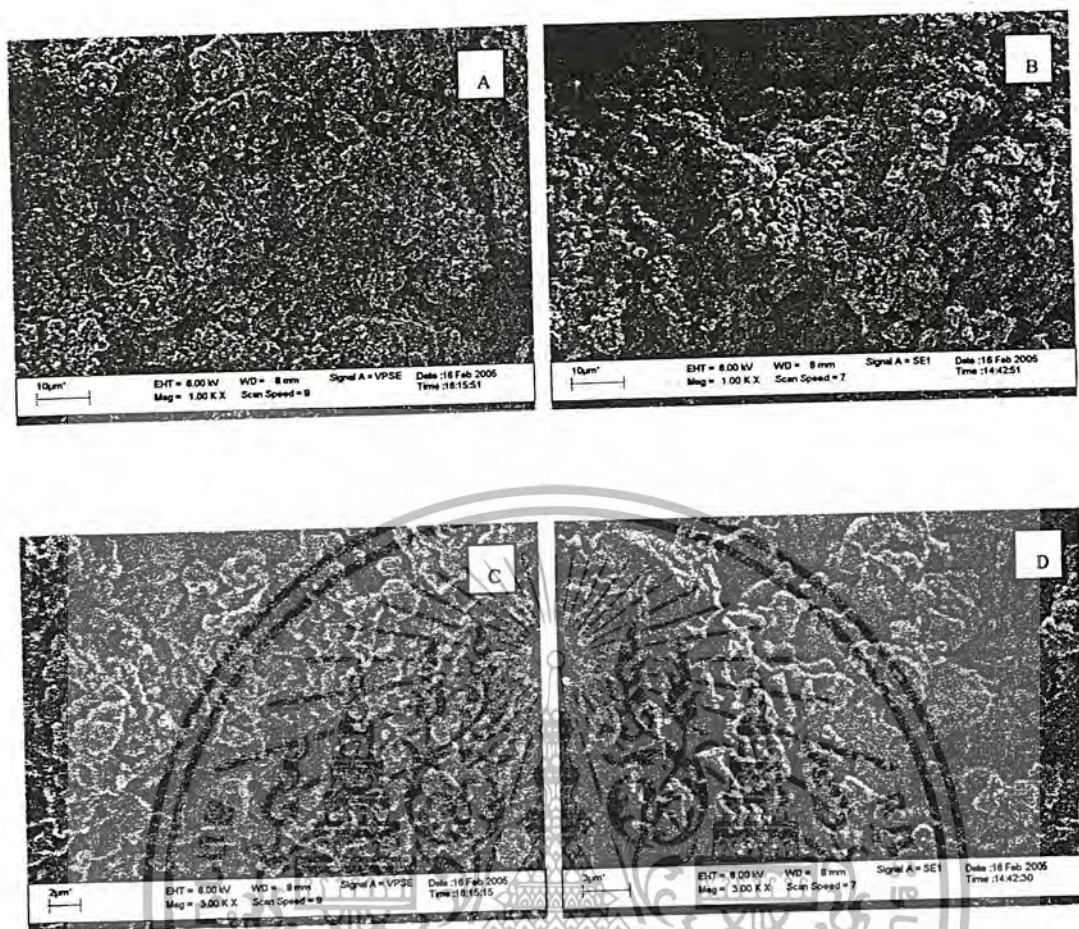


รูปที่ จ-3 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบเฉพาะภายในชิ้นงานที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 90:10

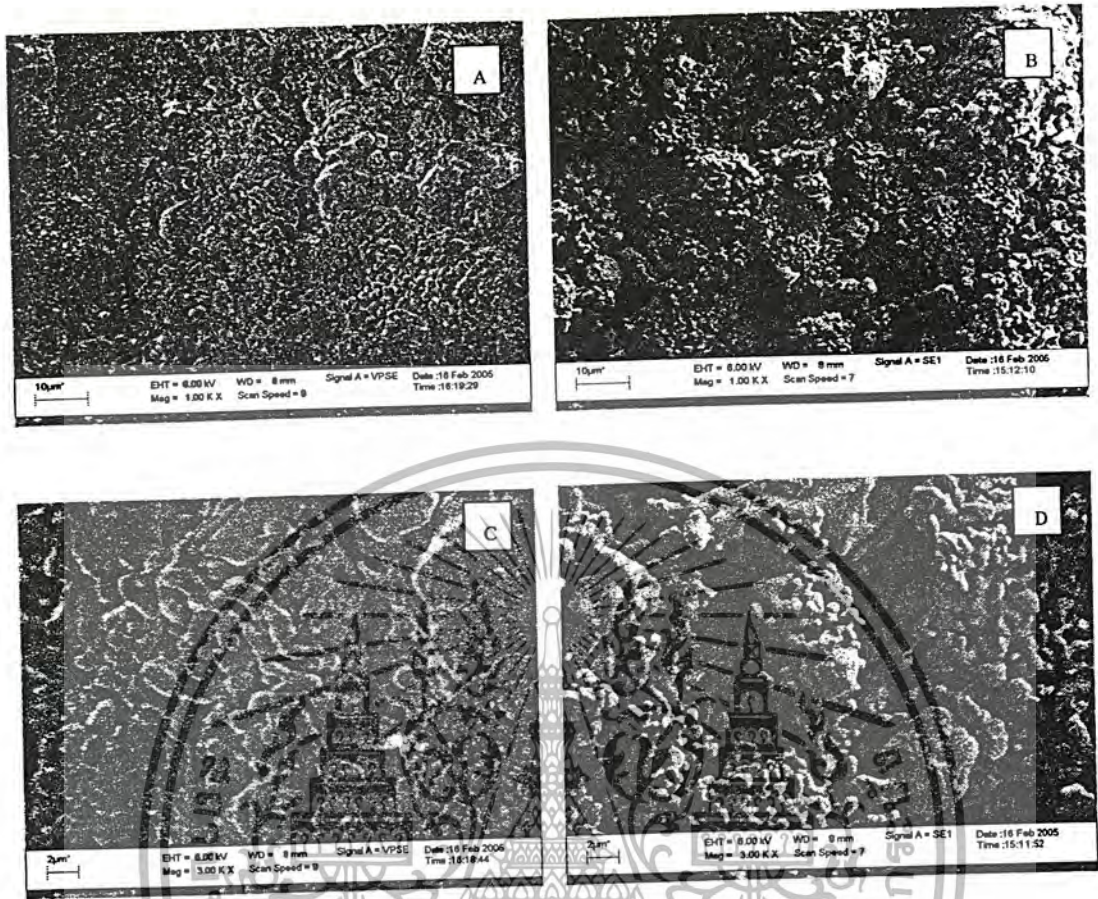
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

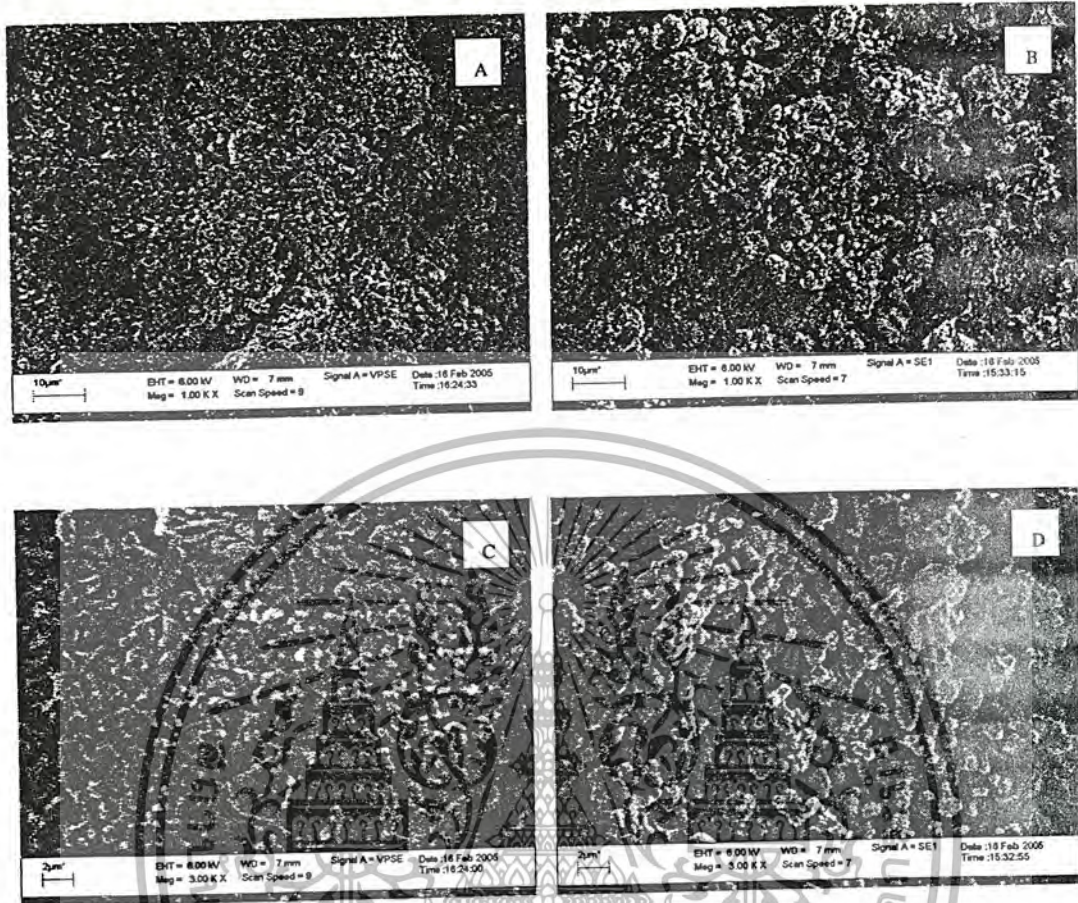


รูปที่ ๑-1 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ที่อัตราส่วน HAp:CS ที่ 70:30
 A - พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 1000 เท่า, B - พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 1000 เท่า
 C - พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 3000 เท่า, D - พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 3000 เท่า

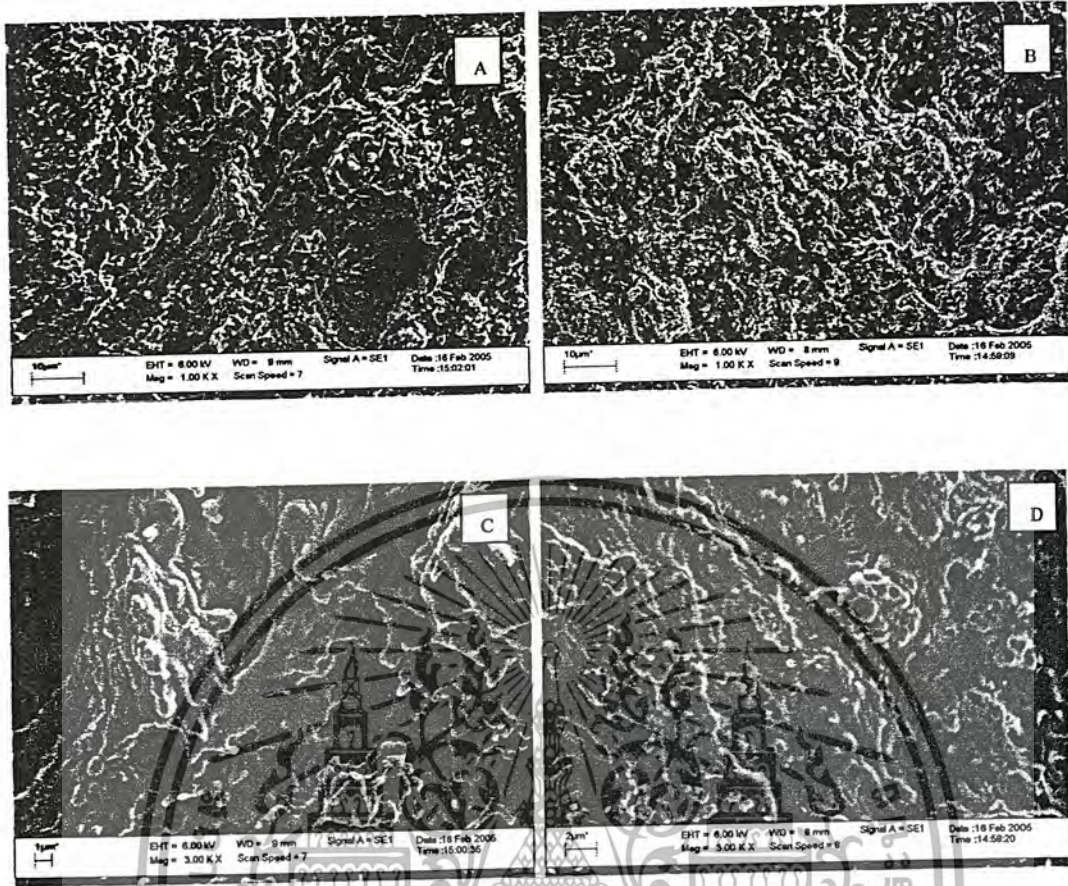


รูปที่ ๓-2 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ที่อัตราส่วน HAp:CS ที่ 80:20 :

A – พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 1000 เท่า, B – พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 1000 เท่า
 C – พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 3000 เท่า, D – พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 3000 เท่า

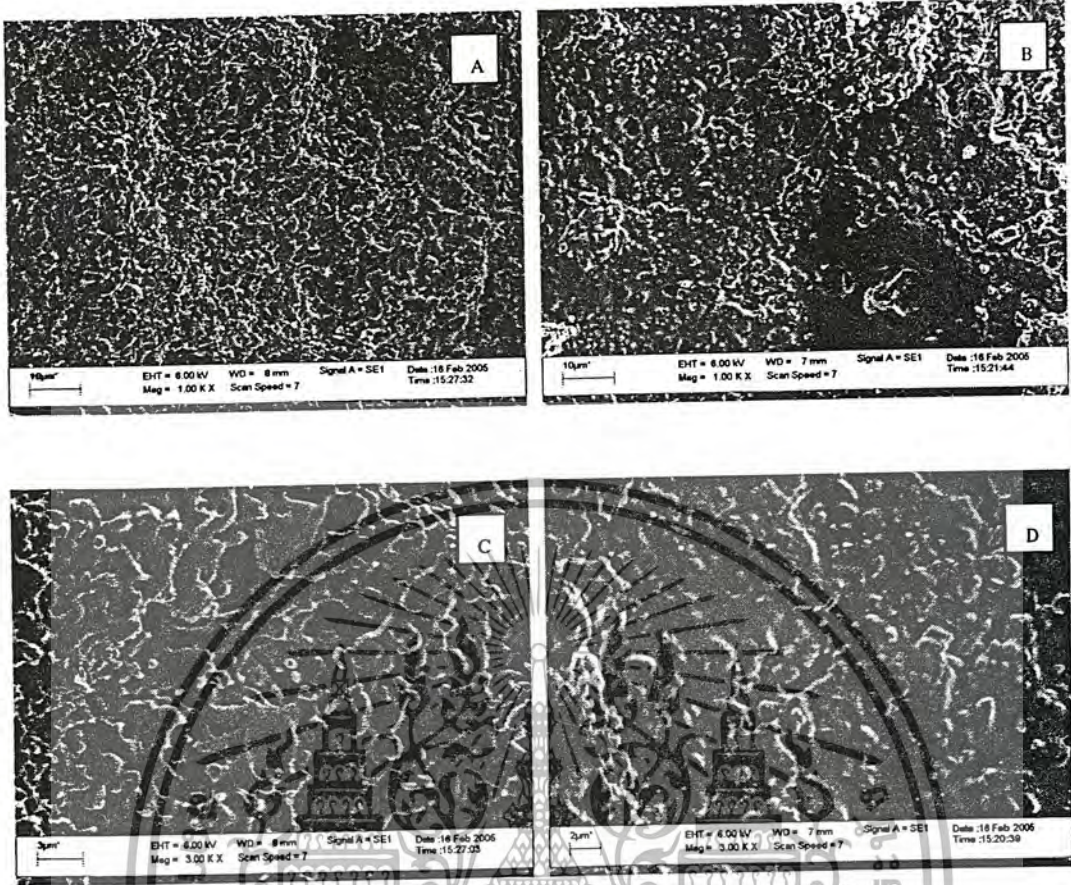


รูปที่ ๓-3 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS ที่อัตราส่วน HAp:CS ที่ 90:10 :
 A - พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 1000 เท่า, B - พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 1000 เท่า
 C - พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 3000 เท่า, D - พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 3000 เท่า

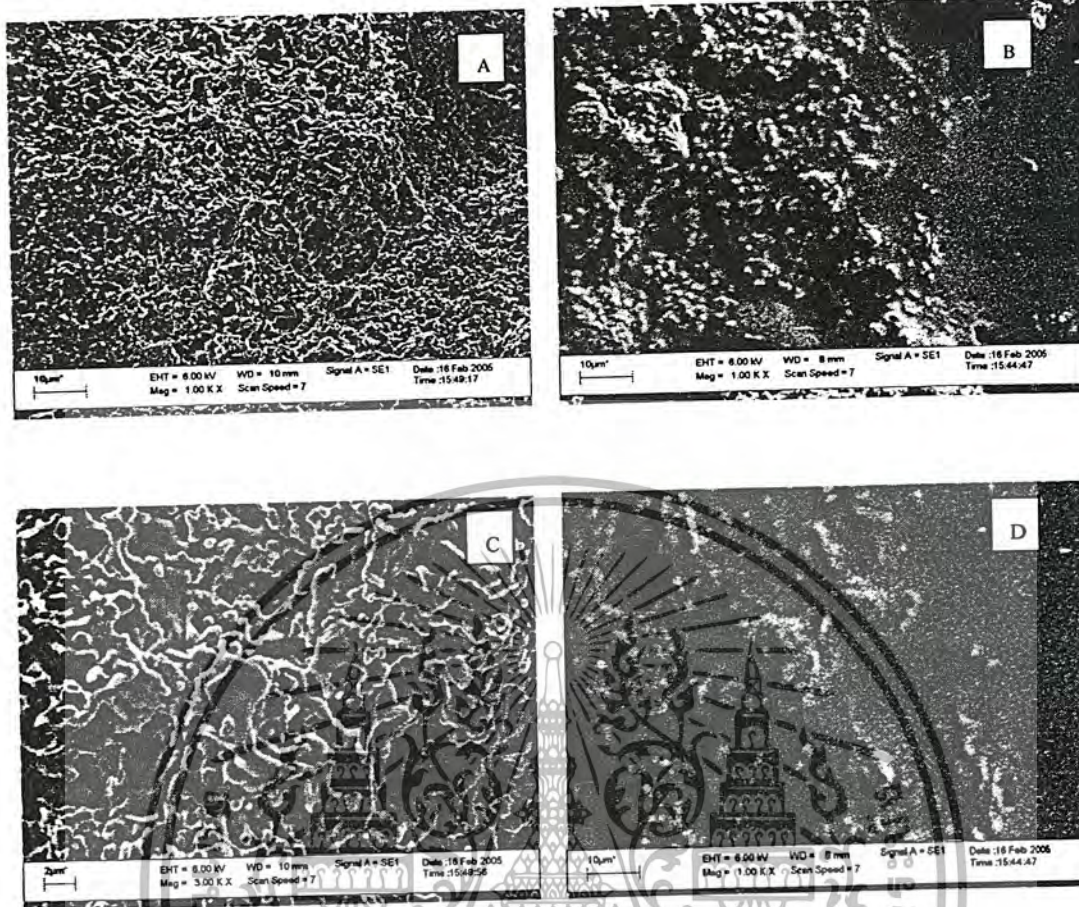


รูปที่ ๔-๔ ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่อัตราส่วน HAp:CS ที่ 70:30 :

A - พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 1000 เท่า, B - พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 1000 เท่า
 C - พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 3000 เท่า, D - พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ ๕-5 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่อัตราส่วน HAp:CS ที่ 80:20 :
 A – พื้นผิวด้านในก้ำถึงขยาย 1000 เท่า, B – พื้นผิวด้านนอกก้ำถึงขยาย 1000 เท่า
 C – พื้นผิวด้านในก้ำถึงขยาย 3000 เท่า, D – พื้นผิวด้านนอกก้ำถึงขยาย 3000 เท่า



รูปที่ ๖-6 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่อัตราส่วน HAp:CS ที่ 90:10 :

A – พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 1000 เท่า, B – พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 1000 เท่า
 C – พื้นผิวด้านในกำลังขยาย 3000 เท่า, D – พื้นผิวด้านนอกกำลังขยาย 3000 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(A)

HAp / % PVA	เมื่ใดที่	ความหนาแน่นหลังเผา (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)
HAp 0% PVA	1	2.23	22.78
	2	1.96	4.26
	3	1.92	10.89
	เฉลี่ย	2.04	12.64
HAp 2.5% PVA	1	1.42	2.59
	เฉลี่ย	1.42	2.59

(B)

CS / % PVA	เมื่ใดที่	ความหนาแน่นหลังเผา (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)
CS 0% PVA	1	1.53	21.71
	2	1.34	30.89
	3	1.55	26.72
	4	1.17	10.69
	เฉลี่ย	1.35	22.50
CS 2.5% PVA	1	1.51	22.35
	2	1.37	9.76
	เฉลี่ย	1.44	16.06

ตารางที่ ข-1 (A) ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงาน ไฮดรอกซีเอปาทิต

(B) ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงาน โซเดียมแคลเซียมซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

70 : 30 % PVA	ชิ้นงาน HAp-CS			วัสดุประกอบ HAp-CS/PEA					
	เม็คซี่ที่	ความหนาแน่นหลังเผา (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	เม็คซี่ที่	ความหนาแน่นก่อน ROP (g/cm ³)	ความหนาแน่นหลัง ROP (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	%พอลิเมอร์ที่เข้า (คำนวณ)	%ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น
0% PVA	1	1.23	16.40	1	-	-	-	-	-
	2	1.25	5.56	2	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	1.24	10.98	เฉลี่ย	-	-	-	-	-
2.5% PVA	1	1.28	13.62	1	1.24	1.78	69.75	30.52	30.34
	2	1.19	11.47	2	1.26	1.78	53.18	28.94	29.21
	3	-	-	3	1.26	1.74	67.20	27.57	27.59
	4	-	-	4	1.30	1.82	65.10	28.47	28.57
	เฉลี่ย	1.24	12.55	เฉลี่ย	1.27	1.78	63.81	28.88	28.93

ตารางที่ ข-2 ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 70:30



80 : 20 % PVA	ชิ้นงาน HAp-CS			วัสดุประกอบ HAp-CS/PEA					
	เม็คที่	ความหนาแน่นหลังเผา (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	เม็คที่	ความหนาแน่นก่อน ROP (g/cm ³)	ความหนาแน่นหลัง ROP (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	%พอลิเมอร์ที่เข้า (คำนวณ)	%ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น
0% PVA	1	1.50	20.41	1	-	-	-	-	-
	2	1.48	18.15	2	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	1.49	19.28	เฉลี่ย	-	-	-	-	-
2.5% PVA	1	1.23	11.21	1	1.26	1.77	45.27	29.00	27.28
	2	1.22	10.28	2	1.26	1.82	43.58	30.67	31.10
	3	-	-	3	1.34	1.88	69.09	28.72	29.88
	4	-	-	4	1.27	1.80	53.92	29.69	33.03
	เฉลี่ย	1.23	10.75	เฉลี่ย	1.28	1.82	52.97	29.52	30.32

ตารางที่ ข-3 ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 80:20



90 : 10 % PVA	ชิ้นงาน HAp-CS			วัสดุประกอบ HAp-CS/PEA					
	เม็ดที่	ความหนาแน่น หลังเผา (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	เม็ดที่	ความหนาแน่น ก่อน ROP (g/cm ³)	ความหนาแน่น หลัง ROP (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	%พอลิเมอร์ ที่เข้า (คำนวณ)	%ความ หนาแน่น ที่เพิ่มขึ้น
0% PVA	1	1.36	5.77	1	-	-	-	-	-
	2	1.33	5.46	2	-	-	-	-	-
	เฉลี่ย	1.35	5.62	เฉลี่ย	-	-	-	-	-
2.5% PVA	1	1.31	11.61	1	1.28	1.77	38.90	27.90	28.81
	2	1.25	10.80	2	1.27	1.84	49.74	31.11	30.77
	3	-	-	3	1.26	1.79	36.06	29.88	28.72
	4	-	-	4	1.19	1.77	43.56	33.03	29.44
	เฉลี่ย	1.28	11.21	เฉลี่ย	1.25	1.79	42.07	30.48	29.44

ตารางที่ ช-4 ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเซรามิกส์ HAp-CS และวัสดุประกอบ HAp-CS/PEA ที่อัตราส่วน HAp:CS เท่ากับ 90:10

