

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์และการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง  
ไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต

**SYNTHESIS AND STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF  
HYDROXYAPATITE/POLY(ETHYLENE GLUTARATE) COMPOSITES**



วลักษณ์ ทัพเจริญ

WALAILAK TAPCHAROEN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **61218**  
วัน,เดือน,ปี **17 ก.ค. 2549**

b. **115๑๑๑13**  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2548

ISBN 974-15-2023-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT ON 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์และการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต
นักศึกษา	นางสาว วไลลักษณ์ ทัพเจริญ
รหัสประจำตัว	45064409
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. กัทธาวุธ มนต์วิเศษ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต โดยทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทาइटด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดฟอสฟอริกในสภาวะที่เป็นเบสสูง จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีรูพรุน ทำการสังเคราะห์สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรตสังเคราะห์ขึ้นด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง และทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ โดยการแช่ชิ้นงานไฮดรอกซีแอปาทาइटในสารละลายของสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต และนำมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่สภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาในช่วง 180 - 220°C และ 24 - 72 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนกลูตาเรตในวัสดุเชิงประกอบอยู่ในช่วง 2,700 - 6,920 กรัมต่อโมล ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา และมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1.3 - 2.3 ปริมาณของพอลิเอทิลีนกลูตาเรตในวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA อยู่ในช่วง 11 - 18 % โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงกดของวัสดุเชิงประกอบอยู่ในช่วง 5 - 20 MPa ซึ่งมีค่าแปรผันโดยตรงกับปริมาณพอลิเอทิลีนกลูตาเรตในวัสดุเชิงประกอบ การทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพโดยการแช่วัสดุเชิงประกอบในสารละลายจำลองเซลล์ของเหลวในร่างกาย (SBF) ภายใต้การควบคุมอัตราการไหลของสารละลายที่ 130 มิลลิลิตรต่อวัน เป็นเวลา 7 - 28 วัน จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณธาตุบนพื้นผิววัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอัตราส่วนโดยโมลของ C:Ca มีค่าลดลง เนื่องจากมีการสลายตัวของพอลิเอทิลีนกลูตาเรตในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนโดยโมล Ca:P ของ HAp บริสุทธิ์ ซึ่งแสดงถึงการก่อตัวของผลึก HAp จากสารละลาย SBF บนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปทุมมา สิริพันธ์ โนน และ ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่ให้ความกรุณา ความรู้ คำปรึกษา อบรม เอาใจใส่และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุพัตรา จินาวัฒน์ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักขลธิ และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาให้เกิดริเป็นอาจารย์คณะกรรมการ และความกรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาต่างๆ และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พชณี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค NMR

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน และคุณ เต็มศิริ เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องของอุปกรณ์ สารเคมี รวมถึงความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณบิดา – มารดา คุณชายและน้องชายที่แสนดี ที่คอยให้กำลังใจและให้ความเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณ กุลภัสสร กัญจนกิตติมา ผู้เป็นกำลังใจ ให้ความดูแลเอาใจใส่ และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน เป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และรุ่นน้องที่แสนดีที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ บิดา-มารดา ซึ่งเป็นบุคคลที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

วไลลักษณ์ ทัพเจริญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVIII
บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 วัสดุที่ใช้งานทางด้านการแพทย์.....	6
2.2 พอลิเมอร์ที่ใช้งานทางด้านการแพทย์.....	8
2.2.1 พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (Poly(ethylene glutarate), PEG).....	11
2.2.2 ปฏิกิริยาการปิดวง (Cyclization).....	12
2.2.3 ดีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบปิดวง (Cyclodepolymerization, CDP).....	14
2.2.4 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง.....	16
2.3 เซรามิกส์สำหรับงานทางด้านการแพทย์.....	17
2.3.1 การแบ่งประเภทของวัสดุเซรามิกส์.....	17
2.3.1.1 การแบ่งประเภทของเซรามิกส์ตามการประยุกต์ใช้งาน.....	17
2.3.1.2 การแบ่งประเภทของเซรามิกส์ตามการตอบสนองของเนื้อเยื่อภายใน ร่างกายและกลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อกับเซรามิกส์ทางชีวภาพ.....	18
2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเซรามิกส์ทางด้านการแพทย์.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 ไฮดรอกซีแอปาไทต์ (Hydroxyapatite, HAp).....	20
2.3.3.1 โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีแอปาไทต์.....	20
2.3.3.2 พฤติกรรมของไฮดรอกซีแอปาไทต์.....	21
2.4 วัสดุเชิงประกอบสำหรับงานทางด้านทันตกรรม.....	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>32</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.3 วิธีการดำเนินการ.....	35
3.3.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์.....	35
3.3.2 การขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาไทต์.....	36
3.3.2.1 การขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาไทต์แบบกดอัด.....	36
3.3.2.2 การขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาไทต์แบบกรองลดความดัน.....	37
3.3.3 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต.....	38
3.3.4 การเตรียมสารประกอบวงโพลิโกลูตาเรตด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง.....	40
3.3.5 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์กับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (HAp/PEG Composites).....	41
3.3.6 การทดสอบความแข็งแรงกดของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG.....	44
3.3.7 การทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ในระบบจำลองของร่างกาย.....	44
3.3.7.1 การเตรียมสารละลายที่มีองค์ประกอบความเข้มข้นของไอออนอินทรีย์และค่าความเป็นกรด-ด่างใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์.....	44
3.3.7.2 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ในระบบที่มีการไหลผ่าน.....	45

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	47
4.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์และการขึ้นรูป.....	47
4.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (Poly(ethylene glutarate, PEG) และสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (Cyclic oligo(ethylene glutarate), C-PEG).....	49
4.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์กับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (HAp/PEG).....	51
4.3.1 วัฏภาคที่เป็นผลึกจากเทคนิค XRD.....	53
4.3.2 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาค.....	54
4.3.3 ความหนาแน่นและปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ.....	57
4.3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ.....	58
4.3.5 สมบัติด้านความแข็งแรงกด.....	62
4.3.6 สมบัติความว่องไวทางชีวภาพ.....	65
บทที่ 5 สรุปผลงานวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 การสังเคราะห์วัสดุดิบไฮดรอกซีแอปาไทต์และการขึ้นรูป.....	74
5.2 การสังเคราะห์วัสดุดิบพอลิเอทิลีนกลูตาเรตและสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต.....	74
5.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาไทต์กับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต.....	74
5.4 แนวทางที่ควรจะศึกษาต่อไป.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	143

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุทางการแพทย์.....	6
2.2 พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง.....	17
2.3 ตัวอย่างเซรามิกส์ที่ใช้งานทางด้านชีวภาพ.....	19
2.4 สภาวะในการพอลิเมอไรเซชัน ส่วนประกอบและค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength) ของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PCL และ HAp/PMMA ที่เตรียมได้.....	25
2.5 อุณหภูมิในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PHB-PHV และวัสดุเชิงประกอบ TCP/PHB-PHV.....	28
2.6 วัสดุเชิงประกอบที่มีการพอลิเมอไรเซชันของแลคโตน (Lactone, L) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ $\text{SnOct}_2$ ในอัตราส่วน ( $[\text{SnOct}_2]/[\text{L}] = 3.5 \times 10^{-3}$ ) ใน HAp ที่อุณหภูมิ $130^\circ\text{C}$ .....	30
3.1 อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาขึ้นรูป HAp.....	36
3.2 สภาวะอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ROP ของชิ้นงาน Pre-composite.....	40
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SBF.....	44
3.4 ความเข้มข้นของไอออนอินทรีย์ในสารละลาย SBF และ Human blood plasma.....	45
4.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ PEG และ C-PEG ด้วยเทคนิค GPC FT-IR $^1\text{H-NMR}$ และ DSC.....	49
4.2 ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงโดยเทคนิคการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา ROP ภายหลังจากเตรียมวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG (% โดยน้ำหนัก) ปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG โดยเทคนิค TGA.....	56
4.3 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ PEG, C-PEG และน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค GPC.....	60
4.4 ค่าความแข็งแรงกดของก้อน HApบริสุทธิ์กับและก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยา ROP.....	62
4.5 อัตราส่วนโดยโมลของ C:Ca และ Ca:P ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยา ROP ก่อนและหลังการแช่วัสดุเชิงประกอบในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 28 วัน.....	71

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	เลนส์แก้วตาเทียมที่ทำจาก PMMA.....2
1.2	(a) รากฟันเทียม และ (b) ข้อสะโพกเทียมที่ทำจากโลหะไทเทเนียม.....2
2.1	ประยุกต์ใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ทางการแพทย์.....7
2.2	โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้.....10
2.3	สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต.....11
2.4	ปฏิกิริยาการปิดวงของ โมเลกุลชนิดเดียวกันซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ (i) ปฏิกิริยาการปิดวงของ โมเลกุลชนิดเดียวกัน (Intramolecular cyclization) (ii) ปฏิกิริยาการปิดวงของ โมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular cyclization).....12
2.5	ปฏิกิริยาการปิดวงของ โมเลกุลสองชนิด (i) ปฏิกิริยาการปิดวงของ โมเลกุลต่างชนิดกัน (Intramolecular cyclization) (ii) ปฏิกิริยาการปิดวงของ โมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular cyclization) (iii) วงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้น.....13
2.6	การเกิดปฏิกิริยาภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์.....14
2.7	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารประกอบวงเอไมด์โดยใช้เทคนิคสถานะสารละลายเชิงองสูง.....15
2.8	ปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เซชันแบบปิดวงของพอลิเอทิลีนอะดิเปต.....15
2.9	ปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์เซชันแบบปิดวงของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต.....15
2.10	(a) โครงสร้างผลึกของ ไฮดรอกซีแอปาไทต์ และ (b) ภาพฉายด้านบนของ โครงสร้างผลึกของ ไฮดรอกซีแอปาไทต์.....21
3.1	แผนงานการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาไทต์.....35
3.2	แผนงานการขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาไทต์แบบกดอัด.....37
3.3	แผนงานการขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาไทต์แบบกรองลดความดัน.....38
3.4	แผนงานการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต.....39
3.5	แผนงานการสังเคราะห์สารประกอบวงโพลิโกลิเอทิลีนกลูตาเรต.....40
3.6	ชุดอุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยา ROP.....42
3.7	ชุดอุปกรณ์แช่สารละลาย SBF ในระบบไหลผ่าน.....42
3.8	แผนงานการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PEG.....43
4.1	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้ภายหลังการขึ้นรูปและเผาที่ อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ลักษณะ โครงสร้างจุลภาค (a) ที่ผิว (b) ภาพตัดขวางของก้อน HAp ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 1100°C (กำลังขยาย 5,000 เท่า).....47
4.3	สเปกตรัม FT-IR ของ (a) PEG ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น และ (b) สารประกอบวง โอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG).....50
4.4	สเปกตรัม <sup>1</sup> H-NMR ของ (a) PEG ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น และ (b) สารประกอบวง โอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG).....51
4.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา 200°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง.....52
4.6	ลักษณะทางกายภาพของ (a) HAp บริสุทธิ์ และ (b) วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 48 ชั่วโมง โดยขึ้นรูป HAp แบบกรองลดความดัน.....53
4.7	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวภายใน (a) HAp บริสุทธิ์ และวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา (b) 24 ชั่วโมง (c) 48 ชั่วโมง และ (d) 72 ชั่วโมง (กำลังขยาย 2,500 เท่า).....54
4.8	ลักษณะทางกายภาพของ (a) HAp บริสุทธิ์ และ (b) วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 24 ชั่วโมง โดยขึ้นรูป HAp แบบกดอัด.....55
4.9	ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของ (a) พื้นผิวภายนอก และ (b) ภาพตัดขวางบริเวณพื้นผิวภายในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง โดยการขึ้นรูปก้อน HAp แบบกดอัด (กำลังขยาย 1000 เท่า).....55
4.10	สเปกตรัม FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา (a) 24 ชั่วโมง (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับ (d) สเปกตรัมของ C-PEG ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง.....57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	เปรียบเทียบสเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP $200^\circ\text{C}$ และเวลา (a) 24 ชั่วโมง (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง ในการทำปฏิกิริยา กับ (d) สเปกตรัมของ C-PEG ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบปีดวง.....59
4.12	กราฟแสดงแนวโน้มของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ROP.....61
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกด ค่ามอดุลัสกดอัดและปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบของก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้ที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทำปฏิกิริยา ROP.....63
4.14	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (a) HAp บริสุทธิ์ (b) วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ( $200^\circ\text{C}$ , 48 ชั่วโมง) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และวัสดุเชิงประกอบภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา (c) 7 วัน (d) 14 วัน (e) 21 วัน และ (f) 28 วัน.....65
4.15	โครงสร้างจุลภาคของผิววัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ( $200^\circ\text{C}$ เวลา 48 ชั่วโมง) (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และหลังการแช่ในสารละลาย SBF ระยะเวลา (b) 7 วัน (c) 14 วัน (d) 21 วัน และ (e) 28 วัน (กำลังขยาย 2,500 เท่า).....66
4.16	ภาพถ่าย SEM-EDS แสดงธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวและการกระจายของธาตุบนพื้นผิว (a) ก้อน HAp บริสุทธิ์ และวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ( $200^\circ\text{C}$ เวลา 48 ชั่วโมง) (b) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และหลังการแช่ในสารละลาย SBF ระยะเวลา (c) 7 วัน (d) 14 วัน (e) 21 วัน และ (f) 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า).....67
4.17	กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวก้อน HAp บริสุทธิ์ กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ( $200^\circ\text{C}$ เวลา 48 ชั่วโมง) ก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 - 28 วัน.....69
4.18	สเปกตรัมของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังการแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ที่สภาวะอุณหภูมิ $200^\circ\text{C}$ เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....72
ค-1	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp ที่เผาอุณหภูมิ $1100^\circ\text{C}$ , 5 ชั่วโมง.....92
ค-2	เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ $180^\circ\text{C}$ .....92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค-3 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C.....	93
ค-4 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C.....	93
ค-5 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	94
ค-6 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	94
ค-7 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	95
ค-8 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	95
ค-9 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	96
ค-10 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	96
ค-11 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	97
ค-12 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค-13	เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน.....98
ง-1	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนไกลูตาเรต (PEG).....100
ง-2	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของสารประกอบวง โอลิโกเอทิลีนไกลูตาเรต (C-PEG).....100
ง-3	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 180°C เวลา 24 ชั่วโมง.....101
ง-4	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 180°C เวลา 48 ชั่วโมง.....101
ง-5	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 180°C เวลา 72 ชั่วโมง.....102
ง-6	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 24 ชั่วโมง.....102
ง-7	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 48 ชั่วโมง.....103
ง-8	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 72 ชั่วโมง.....103
ง-9	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 220°C เวลา 24 ชั่วโมง.....104
ง-10	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 220°C เวลา 48 ชั่วโมง.....104
ง-11	<sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ 220°C เวลา 72 ชั่วโมง.....105
จ-1	สเปกตรัม FT-IR ของพอลิเอทิลีนไกลูตาเรต (PEG) ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น.....107
จ-2	สเปกตรัม FT-IR ของสารประกอบวง โอลิโกเอทิลีนไกลูตาเรต (C-PEG) ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง.....107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ-3	สเปกตรัม FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง, (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง.....108
จ-4	สเปกตรัม FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง, (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง.....108
จ-5	สเปกตรัม FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง, (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง.....109
จ-6	สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....109
จ-7	สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....110
จ-8	สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....110
จ-9	สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....111
จ-10	สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....111
จ-11	สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....112
จ-12	สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
จ-13	สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังกการแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....	113
จ-14	สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังกการแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน.....	113
ฉ-1	DSC เทอร์โมแกรมของสารประกอบบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG).....	115
ช-1	โครมาโทแกรมของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (PEG) ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น.....	117
ช-2	โครมาโทแกรมของสารประกอบบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG).....	117
ช-3	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 24 ชั่วโมง.....	118
ช-4	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 48 ชั่วโมง.....	118
ช-5	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 72 ชั่วโมง.....	119
ช-6	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 24 ชั่วโมง.....	119
ช-7	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 48 ชั่วโมง.....	120
ช-8	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 72 ชั่วโมง.....	120
ช-9	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 24 ชั่วโมง.....	121
ช-10	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 48 ชั่วโมง.....	121
ช-11	โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 72 ชั่วโมง.....	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ซ-1 เทอร์โมแกรมของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100°C.....	124
ซ-2 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต.....	124
ซ-3 เทอร์โมแกรมของสารประกอบวง โอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต.....	125
ซ-4 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 24 ชั่วโมง.....	125
ซ-5 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 48 ชั่วโมง.....	126
ซ-6 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 72 ชั่วโมง.....	126
ซ-7 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 24 ชั่วโมง.....	127
ซ-8 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 48 ชั่วโมง.....	127
ซ-9 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 72 ชั่วโมง.....	128
ซ-10 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 24 ชั่วโมง.....	128
ซ-11 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 48 ชั่วโมง.....	129
ซ-12 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 72 ชั่วโมง.....	129
ฉ-1 โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของ HAp บริสุทธิ์ ขึ้นรูปแบบกรองลดความดัน (a) กำล้างขยาย 1,000 เท่า (b) กำล้างขยาย 2,500 เท่า และ (c) กำล้างขยาย 3,000 เท่า.....	131
ฉ-2 โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของวัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 180°C (กำล้างขยาย 2,500 เท่า).....	131
ฉ-3 โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของวัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 200°C (กำล้างขยาย 2,500 เท่า).....	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฅ-4 โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของวัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 220°C (กำลังขยาย 2,500 เท่า).....	132
ฅ-5 โครงสร้างจุลภาคพื้นผิววัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 180°C หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน ในระบบไหลผ่าน (กำลังขยาย 2,500 เท่า).....	133
ฅ-6 โครงสร้างจุลภาคพื้นผิววัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 200°C หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน ในระบบไหลผ่าน (กำลังขยาย 2,500 เท่า).....	133
ฅ-7 โครงสร้างจุลภาคพื้นผิววัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 220°C หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน ในระบบไหลผ่าน (กำลังขยาย 2,500 เท่า).....	134
ฅ-1 ภาพถ่าย SEM-EDS ของ HAp บริสุทธิ์ ที่สังเคราะห์ได้ เมาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1,000 เท่า).....	136
ฅ-2 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	137
ฅ-3 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	138
ฅ-4 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	139
ฅ-5 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	140
ฅ-6 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	141
ฅ-7 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 8 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	145
รูปที่ 9 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	146
รูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000เท่า).....	147



## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$\beta$ -TCP	$\beta$ -Tricalcium phosphate
v	เลขคลื่น
$\delta$	Chemical shift
BCP	Biphasis calcium phosphate
CDP	Cyclodepolymerization
C-PEG	สารประกอบวงโพลิโกลิเอทีลีนกลูตาเรต
CL	$\epsilon$ -caprolactone
DCP	Dicalcium phosphate
DMTMCs	Dimethyl-trimethylene carbonate
DMA	Dynamic mechanical analysis
DSC	Differential Scanning Calorimetry
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectrophotometry
GPC	Gel Permeation Chromatography
HAp	Hydroxyapatite
HAp/PEG	วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิเอทีลีนกลูตาเรต
HAp/PET	วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิเอทีลีนเทอเรพทาเลต
HAp/PEA	วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิเอทีลีนอะดิเปต
HAp/PEA-co-PET	วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทีลีนอะดิเปตกับพอลิเอทีลีนเทอเรพทาเลต
HAPEX <sup>TM</sup>	วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิเอทีลีน
HDPE	High Density Polyethylene
$\bar{M}_w$	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก
MWD	การกระจายน้ำหนักโมเลกุล
$\bar{M}_n$	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน
NMR	Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy

For NMR:

d	Doublet
m	multiplet
t	Triplet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

PBN	Poly(butylenes 2,6-naphthalenedicarboxylate)
PBT	Poly(butylenes terephthalate)
PCL	Polycaprolactone
PE	Polyethylene
PEA	Poly(ethylene adipate)
PEG	Poly(ethylene glutarate)
PEA-co-PET	พอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนอะดิเปตกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต
PMMA	Poly(methyl methacrylate)
PGA	Poly(glycolic acid)
PHB	Polyhydroxybutyrate
PHV	Polyhydroxy- valerate
PHB-PHV	พอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิไฮดรอกซีบิวเทอเรตกับพอลิไฮดรอกซีวาเลอเรต
PLA	Poly(lactic acid)
PLLA	Poly-L-lactide
POEs	Polyorthoesters
PP	Polypropylene
ppm	ส่วนในล้านส่วน
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PVPA	Poly(vinyl phosphate)
PVC	Poly(vinyl chloride)
PDS	Polydioxanone
ROP	Ring-opening polymerization
SBF	Simulated Body Fluid
SEM	Scanning Electron Microscopy
SnOct <sub>2</sub>	Stannous (II) octoate
TGA	Thermogravimetric Analysis
TetCP	Tetracalcium phosphate
T <sub>g</sub>	Glass Transition Temperature
T <sub>m</sub>	Melting Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

TIPS	Thermal induced phase separation
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene
UTS	Ultimate tensile strength
VL	$\delta$ -valerolactone
XRD	X-Ray Diffractometry
XRF	X-Ray Fluorescence Spectrometry



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

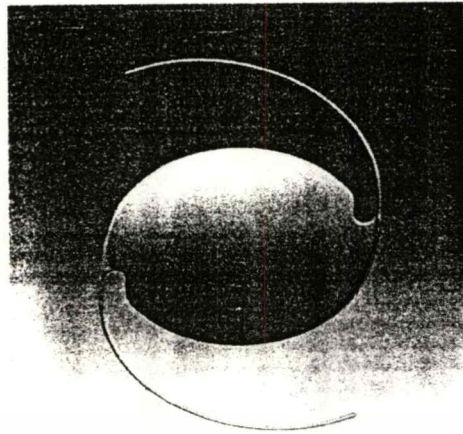
# บทที่ 1

## ความเป็นมาและความสำคัญ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

วัสดุที่สามารถนำมาใช้งานด้านการแพทย์ ได้แก่ โลหะ (Metals) พอลิเมอร์ (Polymers) แก้ว (Glasses) ไฮโดรเจล (Hydrogels) เซรามิกส์ (Ceramics) และ แก้ว-เซรามิกส์ (Glass-Ceramics) ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทยังมีความแตกต่างกันทั้งในด้านสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และ สมบัติความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactivity) ดังนั้น การนำวัสดุมาใช้ในงานจึงพิจารณาเลือกชนิดของ วัสดุตามสมบัติที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่จะต้องพิจารณา ได้แก่ พิษวิทยา (Toxicity) ซึ่ง วัสดุที่นำมาใช้ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตนั้นต้องไม่ก่อให้เกิดโทษต่อร่างกาย มีความสามารถในการ เข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) และต้องพิจารณาถึงความยากง่ายในกระบวนการผลิต (Productivity) ด้วย

วัสดุที่สามารถนำมาใช้งานด้านการแพทย์นั้น มีสมบัติเด่นและสมบัติด้อยที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น โลหะจำพวกสแตนเลส (Stainless Steels) มีความแข็งแรงสูง แต่กระบวนการผลิตนั้น ก่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนหลายขั้นตอนและอาจเกิดการกัดกร่อนในสภาวะร่างกายได้ เซรามิกส์ (Ceramics) มีความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี มีความแข็งแต่เปราะ และพอลิเมอร์ (Polymers) สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ต้องการได้ง่าย มีความเหนียว และสามารถปรับแต่งสมบัติ ที่ต้องการได้จากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ แต่ความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นการนำเอาวัสดุที่มี สมบัติเด่นที่แตกต่างกันนั้นมาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composites) เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยปรับ ประสิทธิภาพของวัสดุให้ได้ตรงตามความต้องการในการใช้งานมากขึ้น วัสดุเชิงประกอบจึงเป็นวัสดุ อีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ เช่น วัสดุเชิง ประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) [1] วัสดุเชิง ประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับ  $\epsilon$ -คาโพรแลกโตน ( $\epsilon$ -caprolactones) และเมทิลเมทา- คริลเลต (Methylmethacrylate) [2] วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิแลค- แลทิด (Poly-L-lactide) เพื่อใช้ในการปลูกถ่ายอวัยวะ [3] เป็นต้น



รูปที่ 1.1 เลนส์แก้วตาเทียมที่ทำจาก PMMA [4]



(b)

รูปที่ 1.2 (a) รากฟันเทียม และ (b) ข้อสะโพกเทียม ที่ทำจากโลหะไทเทเนียม [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่กลุ่มวิจัยนี้กำลังทำการศึกษาอยู่ ได้แก่ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ (Polyesters) โดยผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-opening polymerization, ROP) เหตุผลที่เลือกใช้ไฮดรอกซีแอปาทาइटนั้น เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับกระดูกและฟันของมนุษย์ โดยเตรียมจากการตกตะกอนร่วมระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) กับกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) ในสภาวะที่เป็นเบสสูง (pH 11 – 13) ส่วนของพอลิเอสเทอร์ที่เลือกใช้ในการศึกษาของกลุ่มวิจัยอื่นที่ผ่านมามีได้แก่ พอลิเอทิลีนอะดิเปต (Poly(ethylene adipate), PEA) พอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต (Poly(ethylene terephthalate), PET) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนอะดิเปตกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต ที่เตรียมผ่านปฏิกิริยา ROP จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนอะดิเปต (HAp/PEA) [5, 6] วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต (HAp/PET) [7] และวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนอะดิเปตและพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต (HAp/PEA-co-PET) [8] จัดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความอ่อนไหวทางชีวภาพ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบเตรียมได้เมื่อนำมาทดสอบสมบัติความอ่อนไหวทางชีวภาพ โดยการแช่ในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย (Simulated Body Fluid; SBF) ที่มีองค์ประกอบของไอออนอนินทรีย์ใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์ ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีการก่อตัวของชั้นไฮดรอกซีแอปาทาइटที่ตกผลึกจากสารละลาย SBF บนผิวของวัสดุเชิงประกอบ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเอสเทอร์ในระบบที่คล้ายคลึงกับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEA ที่กล่าวมาข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดพอลิเอสเทอร์เป็นพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (Poly(ethylene glutarate), PEG) ซึ่ง PEG เป็นพอลิเมอร์ที่มีจำนวนหมู่เมทิล (Methyl group) น้อยกว่า PEA และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งการทดลองได้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง เป็นการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทาइटโดยปฏิกิริยาการตกตะกอนร่วมระหว่าง  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  กับ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ในสภาวะที่เป็นเบสสูง (pH 11–13) ส่วนที่สอง เป็นการสังเคราะห์ PEG โดยปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymerization) โดยใช้ ไดเมทิลกลูตาเรต (Dimethyl glutarate) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) และตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เตตระไอโซโพรพิลออกโททิตานเนต (Tetraisopropyl orthotitanate) และสังเคราะห์สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง (Cyclodepolymerization, CDP) ของ PEG โดยใช้ ไดบิวทิลทินออกไซด์ (Dibutyltin oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะสารละลายเจือจางสูง ส่วนที่สามเป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต โดยผ่านปฏิกิริยา ROP ของวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรตโดยเปลี่ยนแปลงสภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

180°C 200°C และ 220°C เป็นระยะเวลา 24 48 และ 72 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของสภาวะในการทำปฏิกิริยาต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนกลูตาเรตในวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ รวมถึงการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกด (Compressive strength) และสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactivity) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิเอทิลีนกลูตาเรตโดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิเอทิลีนกลูตาเรตโดยเทคนิคต่างๆ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกดและสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (HAp/PEG) โดยเริ่มจากการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) ด้วยปฏิกิริยาการตกตะกอนร่วมระหว่าง  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  กับ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ในสภาวะที่เป็นเบสสูงที่ pH 11–13 และการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (PEG) โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลกลูตาเรตกับเอทิลีนไกลคอล และมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เตตระไฮโซโพรพิลออกโททาทานต ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น และสังเคราะห์สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG) ในสภาวะสารละลายเจือจางสูง มีคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene) เป็นตัวทำละลายและไดบิวทิลทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (CDP) จากนั้นนำ C-PEG และ HAp ที่สังเคราะห์ได้มาใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ROP) โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ROP ที่ต่างๆ กัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของ C-PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG วิเคราะห์ผลของสภาวะในการเตรียมต่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่ได้ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกดและทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้ โดยการแช่ในระบบสารละลายจำลองของเหลวในร่างกาย (SBF) ที่อุณหภูมิ 36.5°C และเป็นระยะเวลา 7 - 28 วัน ในระบบไหลเวียน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ HA<sub>p</sub>/PEG โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงสมบัติด้านความแข็งแรงกดและสมบัติความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านทางการแพทย์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 วัสดุที่ใช้งานทางด้านการแพทย์ [4]

ประเภทของวัสดุที่ใช้งานทางด้านการแพทย์ ได้แก่ พอลิเมอร์ (Polymers) โลหะ (Metals) ไฮโดรเจล (Hydrogels) แก้ว (Glasses) แก้ว-เซรามิกส์ (Glass-Ceramics) และเซรามิกส์ (Ceramics) โดยวัสดุแต่ละประเภทยัง สามารถนำมาใช้งานตามความเหมาะสมที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

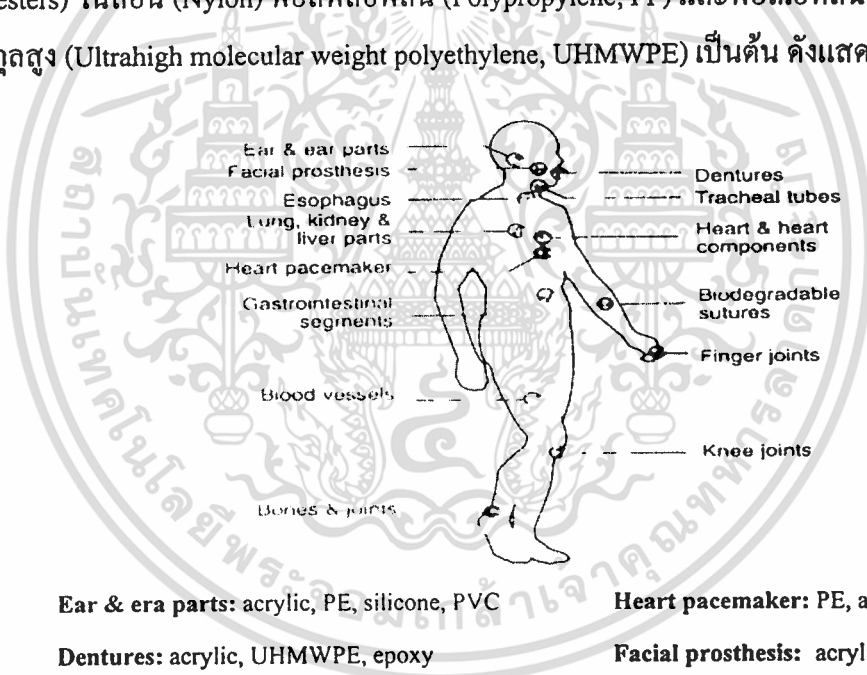
ตารางที่ 2.1 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุทางการแพทย์ [4]

การใช้งาน	ชนิดของวัสดุที่ใช้
<b>ระบบกระดูก</b> ข้อต่อเทียม (สะโพก, หัวเข่า) ชิ้นกระดูกสำหรับการรักษาการแตกร้าวของกระดูก วัสดุเชื่อมกระดูก วัสดุคล้ายกระดูกสำหรับการรักษาการชำรุดของกระดูก เส้นเอ็นและเอ็นยึดเทียม ฟันเทียม	Titanium, Ti-Al-V alloy, stainless steel, polyethylene Stainless steel, cobalt-chromium alloy, Poly(methyl methacrylate) Hydroxyapatite Teflon, Dacron Titanium, alumina, calcium phosphate
<b>ระบบหัวใจและหลอดเลือดหัวใจ</b> หลอดเลือดเทียม ลิ้นหัวใจ ท่อกลวงสำหรับระบายของเหลวจากโพรงร่างกาย	Dacron, Teflon, polyurethane Reprocessed tissue, stainless steel, carbon Silicone rubber, Teflon, polyurethane
<b>อวัยวะในร่างกาย</b> หัวใจเทียม ผิวหนังเทียม ไตเทียม ชิ้นส่วนของหัวใจและปอด	Polyurethane Silicone-collagen composite Cellulose, polyacrylonitrile Silicone rubber
<b>อวัยวะที่เกี่ยวกับระบบสัมผัส</b> อวัยวะรูปหอยโข่งในหูส่วนใน เลนส์แก้วตาเทียม คอนแทกซ์เลนส์	Platinum electrodes Poly(methyl methacrylate), silicone rubber, hydrogel Silicone-acrylate, hydrogel

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าประเภทของวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้งานทางด้านการแพทย์นั้น เป็นวัสดุสังเคราะห์จำพวกพอลิเมอร์ เนื่องจากข้อดีของวัสดุพอลิเมอร์ คือ สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักเบา และปรับแต่งสมบัติได้จากการปรับเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทโลหะจะพบว่าวัสดุพอลิเมอร์นั้นไม่มีปัญหาในเรื่องของการกัดกร่อนและไม่ต้องทำการผ่าตัดอีกครั้งเพื่อนำชิ้นวัสดุพอลิเมอร์ออกจากร่างกายเมื่อการบำบัดรักษาสิ้นสุด ดังนั้นวัสดุพอลิเมอร์จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ซึ่งได้มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์เพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งานอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

ในทางการแพทย์ยุคปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในการนำมาใช้บำบัดรักษาอาการบาดเจ็บที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น ความผิดปกติที่มีมาแต่กำเนิด อาการบาดเจ็บที่เกิดจากอุบัติเหตุ หรือการป่วยเรื้อรังด้วยโรคบางชนิด เช่น โรคไต โรคหัวใจ เป็นต้น ตัวอย่างของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้งานทางการแพทย์ในปัจจุบัน เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ซิลิโคน (Silicone) อะคริลิก (Acrylic) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) พอลิเอสเทอร์ (Polyesters) ไนลอน (Nylon) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และพอลิเอทิลีนชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Ultrahigh molecular weight polyethylene, UHMWPE) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



**Ear & era parts:** acrylic, PE, silicone, PVC

**Dentures:** acrylic, UHMWPE, epoxy

**Tracheal tubes:** acrylic, silicone, nylon

● **Heart & heart components:** polyester, silicone

**Blood vessels:** PVC, polyester

**Gastrointestinal segments:** silicones, nylon, PVC

**Bones & joints:** acrylic, nylon, silicone, PUR, PP, UHMWPE

**Heart pacemaker:** PE, acetal

**Facial prosthesis:** acrylic, PVC, PUR

**Lung, kidney and liver parts:** polyester, polyaldehyde, PVC

● **Esophagus segments:** PE, PP, PVC

**Biodegradable sutures:** PUR

**Finger joints:** silicone, UHMWPE

**Knee joints:** PE

รูปที่ 2.1 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ทางการแพทย์ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานทางการแพทย์ [4]

ในยุคเริ่มต้นของการนำวัสดุสังเคราะห์มาใช้ในร่างกายมนุษย์นั้นมุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุที่มีความเสถียรและมีความทนทานในการใช้งาน เป็นประเด็นสำคัญซึ่งวัสดุพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่ยังไม่เกิดการย่อยสลายภายใต้ระบบทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น พอลิเอเทอร์อีเทอร์คีโตน (Poly (ether-ether ketone), PEEK) เทฟลอน (Teflon) และเคฟลา (Kevlar) เป็นต้น แต่ภายหลังเริ่มมีการศึกษาพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายนั้นเริ่มได้รับความสนใจและเข้ามามีบทบาทในทางการแพทย์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามข้อจำกัดด้านสมบัติการย่อยสลายและการใช้งานยังคงเป็นประเด็นศึกษาที่สำคัญ

เงื่อนไขที่สำคัญในการพิจารณาออกแบบระบบและการสังเคราะห์วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพทางการแพทย์ ขึ้นอยู่กับความต้องการเฉพาะในการบำบัดรักษาเพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมต่อการบำบัดรักษาอาการที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ประเด็นสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการนำวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งาน คือ ปัญหาความเป็นพิษหรือการระคายเคืองที่อาจเกิดกับเนื้อเยื่อที่อยู่ข้างเคียงในระหว่างระยะเวลาที่ทำการปลูกถ่ายอวัยวะ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น มอนอเมอร์ตกค้าง ตัวเริ่มต้นในปฏิกิริยาการพอลิเมอไรซ์หรือสารที่เติมเพื่อช่วยให้พอลิเมอร์มีความเสถียรต่างๆ เป็นต้น โดยทั่วไปวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้นั้น มีสมบัติที่ช่วยเสริมความต้องการในเรื่องของความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้รับการรับรองจากองค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (FDA) เพื่อใช้ในงานทางการแพทย์นั้น มีอยู่ 3 ชนิด คือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid), PLA), พอลิไกลคอลลิกแอซิด (Poly (glycolic acid), PGA) และพอลิไดออกซานอน (Polydioxanone, PDS)

การประยุกต์ใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการเย็บตอกต่างขนาดแผล (Sutures) ที่เรียกว่า “ไหมละลาย” สังเคราะห์จากวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
2. การประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์หรืออวัยวะเพื่อช่วยในการลำเลียงยาเพื่อการรักษาโรค (Drug delivery devices) ซึ่งกำลังศึกษาทดลองกันอย่างกว้างขวางโดยการเลือกใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
3. การประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการบำบัดรักษาเกี่ยวกับกระดูก (Orthopedic fixation devices) โดยวัสดุพอลิเมอร์นั้นต้องมีความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ที่เหมาะสม เพื่อสามารถรองรับน้ำหนักและแรงในบริเวณหรือตำแหน่งที่นำวัสดุพอลิเมอร์นั้นมาใช้

เอกสารนี้งานได้ สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

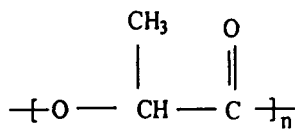
4. การประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการป้องกันการยึดติดกันของเนื้อเยื่อ (Adhesion prevention) โดยวัสดุพอลิเมอร์ที่เลือกใช้นั้นต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาสร้างเยื่อเซลล์ (Membranes) หรือฟิล์มบาง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการยึดติดกันระหว่างเนื้อเยื่อสองชนิดที่ไม่ต้องการให้ติดกัน

5. การประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นหลอดเลือดเทียมชั่วคราว (Temporary vascular grafts) ซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยมีความเข้ากันได้กับระบบโลหิตเป็นประเด็นสำคัญในการพิจารณานำมาใช้งาน

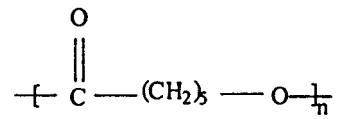
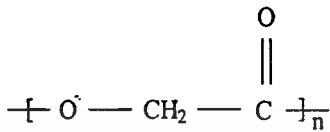
อย่างไรก็ตาม ได้มีการศึกษาและพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ นอกจากพอลิเมอร์ทั้งสามชนิดที่ FDA ของสหรัฐอเมริการับรอง เพื่อใช้เป็นวัสดุในการปลูกถ่ายอวัยวะที่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งยังอยู่ในขั้นของการศึกษาแนวโน้มการนำมาใช้งาน ได้แก่ พอลิเอทิลกลูตาเมต (Poly (γ-ethyl gluta mate)) และพอลิคาโพรแลกโตน (Poly (ε-caprolac-tone), PCL) เป็นต้น

รูปที่ 2.2 แสดงสูตร โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ พบว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ (Polyesters) และพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น พอลิเอไมด์ (Polyamides) พอลิแอนไฮไดรด์ (Polyanhydrides) พอลิฟอสฟาซีน (Polyphosphazenes) พอลิฟอสฟอเนต (Polyphosphonates) และพอลิอะมิโนคาร์บอเนต (Polyaminocarbonates) เป็นต้น

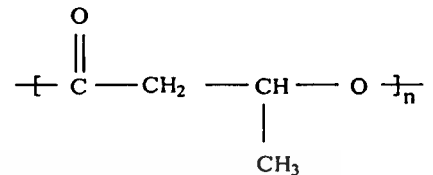
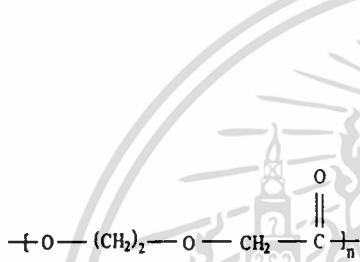
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้พอลิเอสเทอร์ คือ พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (Poly (ethylene-glutarate), PEG) ซึ่งเป็นพอลิเอสเทอร์ที่โดยทั่วไปสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น โดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



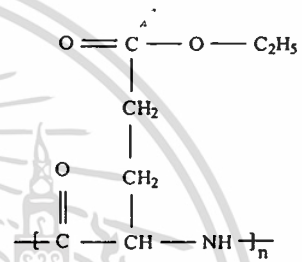
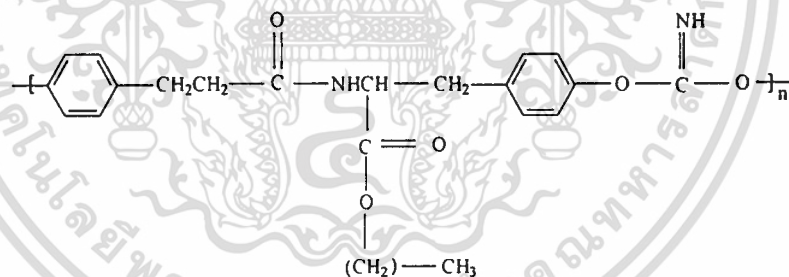
Poly (lactic acid)

Poly ( $\epsilon$ -caprolactone)

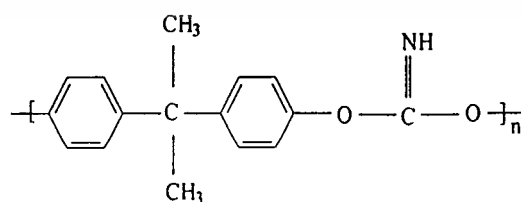
Poly (glycolic acid)

Poly ( $\beta$ -hydroxybutyrate)

Polydioxanone

Poly ( $\gamma$ -ethyl glutamate)

Poly (DTH iminocarbonate)



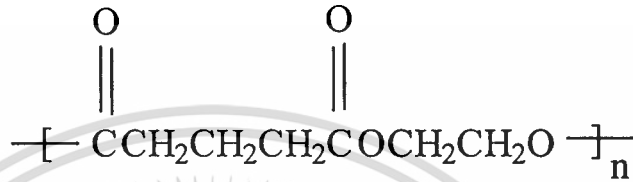
Poly (Bisphenol A iminocarbonate)

### รูปที่ 2.2 สูตร โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

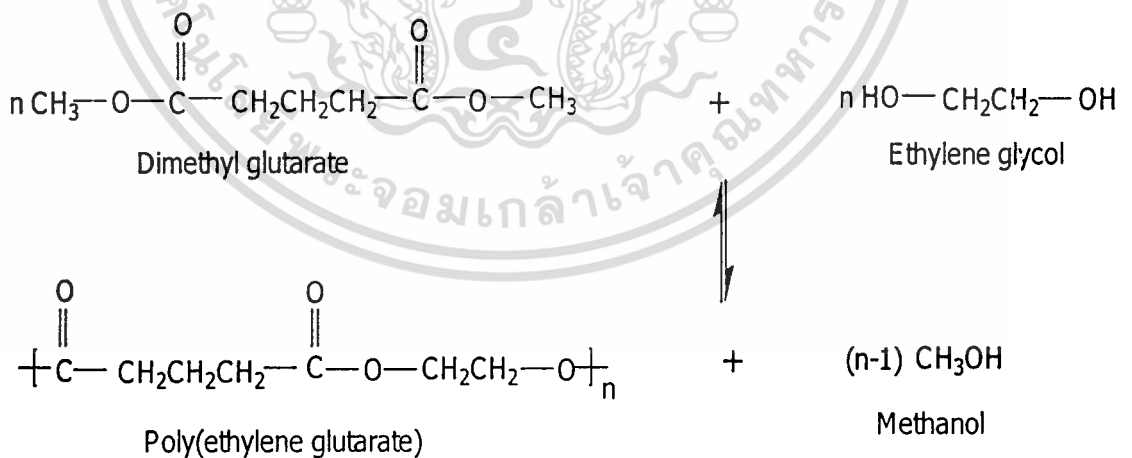
### 2.2.1 พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (Poly (ethylene glutarate), PEG) [9]

พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (Poly (ethylene glutarate), PEG) จัดเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyesters) ที่ภายใน โครงสร้าง ไม่มีส่วนของหมู่อะโรมาติกอยู่และมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (Aromatic polyesters) PEG เตรียมได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น (Condensation polymerization) สูตรโครงสร้างของ PEG ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต

วิธีการสังเคราะห์ PEG ใช้วิธีการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์โดยสารตั้งต้นที่ใช้ คือ ไดเมทิลกลูตาเรต (Dimethyl glutarate) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ในอัตราส่วน 1:1 โดยโมล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เตตระไอโซพโรพิลอโธไทแทนต (Tetraisopropyl orthotitanate) โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรตด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์แสดงในสมการที่ 2.1 ดังนี้

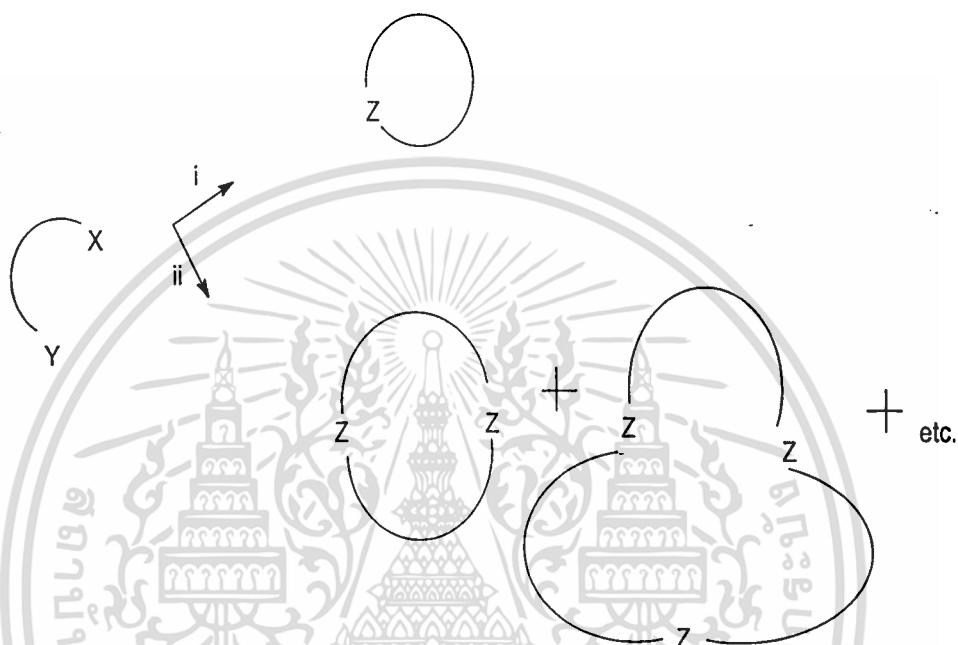


สมการที่ 2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรตด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ [9]

### 2.2.2 ปฏิริยาการปิดวง (Cyclization) [10]

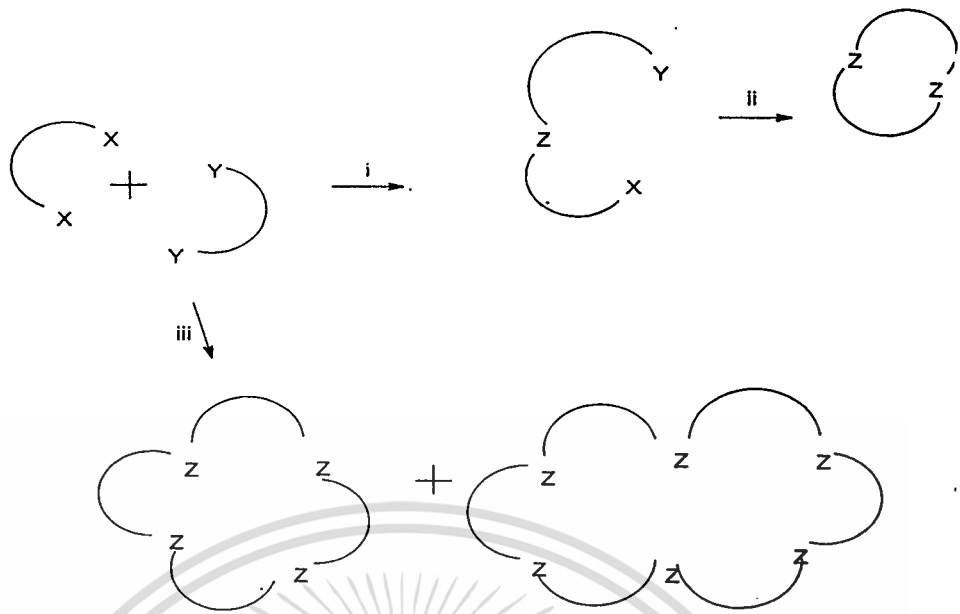
ประเภทของปฏิริยาการปิดวง สามารถแบ่งได้ตามรูปแบบของสารตั้งต้นได้ ดังนี้

1. ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Intramolecular cyclization) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่เกิดสารประกอบประเภทวง ซึ่งอาจเกิดจากปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลชนิดเดียวกัน หรือจากปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular cyclization)



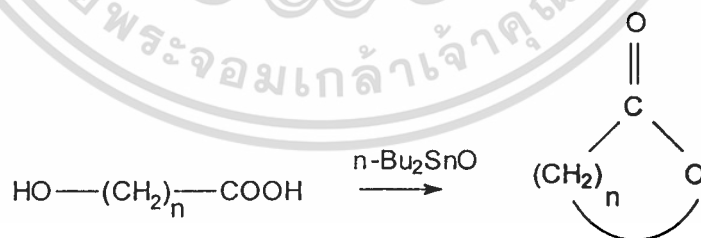
รูปที่ 2.4 ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลชนิดเดียวกันซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ [10] (i) ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Intramolecular cyclization) (ii) ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular cyclization)

2. ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular cyclization) โดยอาจเกิดปฏิริยาการควบแน่นของโมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular condensation) ก่อนและตามด้วยปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Intramolecular cyclization) เกิดเป็นสาร-ประกอบวง หรืออาจเกิดปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular condensation) ทำให้ได้สารประกอบประเภทวงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



**รูปที่ 2.5** ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลสองชนิด [10] (i) ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลต่างชนิดกัน (Intermolecular cyclization) (ii) ปฏิริยาการปิดวงของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Intramolecular cyclization) (iii) วงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้น

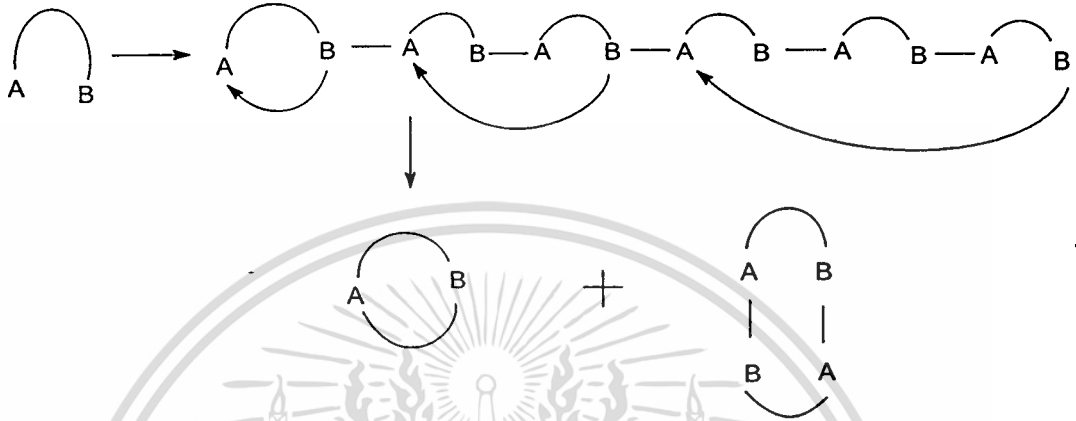
ตัวอย่างของปฏิริยาการเกิดสารประกอบประเภทวงจากการทำปฏิริยาของสารประกอบชนิดเดียวกัน เช่น การทำปฏิริยาการปิดวงของ  $\omega$ -Hydroxyacid โดยใช้ไดบิวทิลทินออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิริยา ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ แลคโตน (Lactone) ที่มีขนาดวงต่างๆ ปฏิริยาการสังเคราะห์แลคโตนจาก  $\omega$ -Hydroxyacid [10] ดังแสดงในสมการที่ 2.2



**สมการที่ 2.2** ปฏิริยาการสังเคราะห์แลคโตนจาก  $\omega$ -Hydroxyacid [10]

### 2.2.3 ปฏิกริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง (Cyclodepolymerization; CDP) [10]

ปฏิกริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงเป็นการสังเคราะห์สารประกอบวงจากสารตั้งต้นประเภทพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear polymer) โดยมีหลักการ คือ การทำปฏิกริยาภายในโมเลกุล (Intramolecular reaction) ของพอลิเมอร์สายโซ่ตรงเกิดเป็นสารประกอบวง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

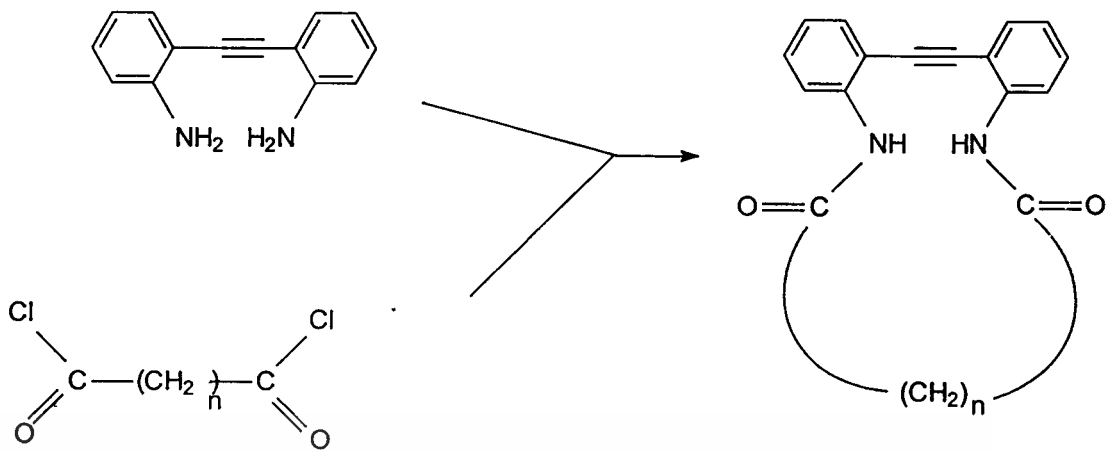


รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกริยาภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ [10]

ดังนั้น สารประกอบวงที่ได้จะมีทั้งที่เป็นวงมอนอเมอร์ (Cyclic monomer) วงไดเมอร์ (Cyclic dimers) วงไตรเมอร์ (Cyclic trimers) และสารประกอบวงโอลิโกเมอร์ (Cyclic oligomers) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น

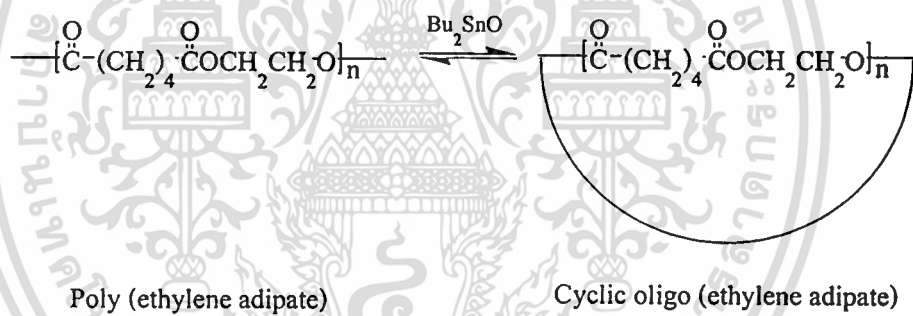
ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการสังเคราะห์สารประกอบวงโอลิโกเมอร์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบวงจำนวนมาก ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นควรจะเป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลมากกว่าปฏิกริยาที่เกิดขึ้นข้ามโมเลกุล ซึ่งทำได้โดยใช้เทคนิคสถานะสารละลายเจือจางสูง (High dilution method) โดยมีการนำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1912 โดย Ruggli P. เป็นการสังเคราะห์สารประกอบวงเอไมด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

หลักการทั่วไป คือ เมื่อความเข้มข้นของสายโซ่โมเลกุลในตัวทำละลายต่ำสายโซ่แต่ละสายของพอลิเมอร์อยู่ห่างกัน ทำให้หมู่ปลายที่ว่องไวของสายโซ่มีโอกาสมทำปฏิกริยาข้ามโมเลกุลน้อยลง ดังนั้นปฏิกริยาที่เกิดภายในโมเลกุลของสายโซ่เดียวกันจึงเกิดได้มาก ส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นวง ตัวอย่างของสารประกอบวงที่เกิดจากการปฏิกริยาการดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงโดยใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น เช่น สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนอะซิเตต [5, 6] สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนเทรเพทาเรต [7] เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

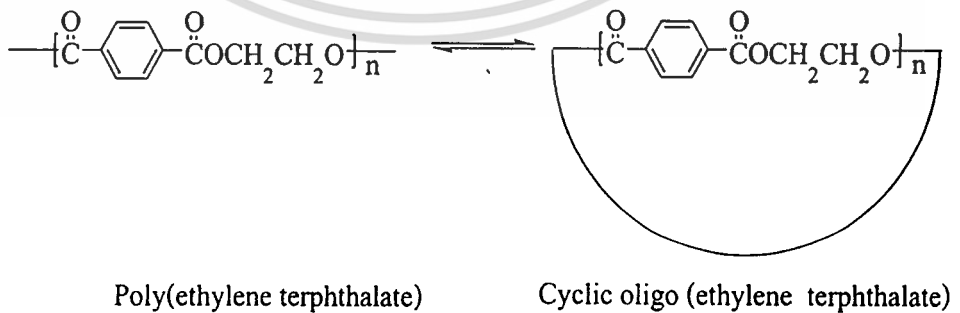


n = 2 - 7

รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาการสังเคราะห์สารประกอบวงเอไมด์โดยใช้เทคนิคสภาวะสารละลายเชิงองสูง [10]



รูปที่ 2.8 ปฏิกริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบปิดวงของพอลิเอทิลีนอะดิเปต [5, 6]



รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบปิดวงของพอลิเอทิลีนเทรพทาเรต [7]

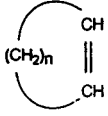

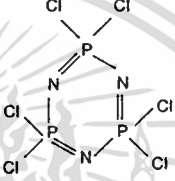
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-opening polymerization, ROP) [10]

การพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เชิงเส้น โดยวิธีนี้ใช้มอนอเมอร์ที่มีลักษณะเป็นวง (Cyclic monomer) หรือสารประกอบวงโอลิโกเมอร์ (Cyclic oligomer) เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง แสดงในตารางที่ 2.2

องค์ประกอบที่มีผลต่อการเปิดวง คือ แรงผลักดัน (Driving force) ของมอนอเมอร์ ชนิดวง (Cyclic monomer) โดยคำนึงถึงผลจากความเครียด (Stress) หรือผลของความเกะกะ (Steric effect) ขององศาพันธะระหว่างกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในวง ลักษณะของมอนอเมอร์ที่ประกอบด้วยอะตอมในสายโซ่หลักจำนวน 3-4 อะตอม ซึ่งจัดเป็นสารประกอบวงขนาดเล็ก จะมีผลจากความเครียดภายในวงจึงทำให้เกิดการเปิดวงขึ้น ส่วนมอนอเมอร์ที่มีอะตอมในสายโซ่หลักจำนวน 8-10 อะตอม จัดเป็นสารประกอบวงขนาดปานกลาง จะมีผลจากความเกะกะของกลุ่มอะตอมภายในวงจึงส่งผลให้เกิดการเปิดวงและมีองศาการพอลิเมอไรเซชันสูง สำหรับมอนอเมอร์ที่มีอะตอมในสายโซ่หลักจำนวนมากกว่า 10 อะตอม จัดเป็นสารประกอบวงขนาดใหญ่ จะมีความเครียดและความเกะกะน้อยมาก ทำให้องศาการพอลิเมอไรเซชันต่ำ จึงมีโอกาสที่จะเกิดการเปิดวงยากกว่าสารประกอบวงขนาดเล็ก (วงขนาด 3-4 อะตอม) และขนาดปานกลาง (วงขนาด 8-10 อะตอม) ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้นจึงต้องทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงในสภาวะความเข้มข้นสูง โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบเกิดการพอลิเมอไรเซชันและได้องศาการพอลิเมอไรเซชันสูง ตัวอย่างของมอนอเมอร์ชนิดวงที่มีจำนวนอะตอมในสายโซ่หลักต่างๆ กัน เช่น ไซโคลอัลคีน (Cycloalkene) ไตรออกเซน (Trioxane) เฮกซะคลอโรไซโคลไตรฟอสฟาซีน (Hexachlorocyclotriphosphazene) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง [10]

ชนิดของพอลิเมอร์	หน่วยซ้ำพอลิเมอร์	โครงสร้างของมอนอเมอร์	ชนิดของมอนอเมอร์
Polyalkene	$\text{-(CH=CH(CH}_2)_n\text{)-}$		Cycloalkene
Polyether	$\text{-(CH}_2\text{O)-}$		Trioxane
Polyphosphazene	$\text{-(P=N)-}$		Hexachloro Cyclotriphosphazene

## 2.3 เซรามิกส์สำหรับงานทางด้านการแพทย์ [4, 14]

วัสดุทางชีวภาพจำพวก เซรามิกส์ แก้ว และ แก้ว-เซรามิกส์ นั้นนำมาใช้งานทางด้านการแพทย์เพื่อรักษาโรคหรืออาการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุ หรืออาการพิการที่มีมาแต่กำเนิดที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของกระดูก เนื่องจากวัสดุเซรามิกส์มีความแข็งแรงเปราะ แต่สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาถึงประเภทของวัสดุเซรามิกส์ และความไวทางชีวภาพของวัสดุเซรามิกส์ เพื่อความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งาน

### 2.3.1 การแบ่งประเภทของวัสดุเซรามิกส์

การแบ่งประเภทของวัสดุเซรามิกส์ สามารถแบ่งได้ ดังนี้

#### 2.3.1.1 การแบ่งประเภทของเซรามิกส์ตามการประยุกต์ใช้งาน [4]

โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เซรามิกส์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายเพื่อทำหน้าที่ทดแทนอวัยวะนั้นๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ ของร่างกาย

2. เซรามิกส์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายเพื่อทำหน้าที่มีส่วนร่วมหรือมีหน้าที่สัมผัสและเกี่ยวข้องกับอวัยวะหรือส่วนต่างๆ ที่อยู่ในร่างกาย แต่ต้องไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อในร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เชิงพาณิชย์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.2 การแบ่งประเภทของเซรามิกส์ตามการตอบสนองของเนื้อเยื่อภายในร่างกายและกลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อกับเซรามิกส์ทางชีวภาพ [11, 14]

แบ่งได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

#### 1. เซรามิกส์ค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert / Bioinert ceramics)

ลักษณะทั่วไปของเซรามิกส์ทางชีวภาพประเภทนี้ คือ เมื่อใส่เข้าแทนที่อวัยวะภายในร่างกายแล้วจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งเนื้อเยื่อในร่างกายจะตอบสนองต่อเซรามิกส์นี้ โดยการสร้างเนื้อเยื่อขึ้นมาห่อหุ้มเซรามิกส์นั้นไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เซรามิกส์สัมผัสโดยตรงกับระบบภายในร่างกายและเนื้อเยื่อข้างเคียงในร่างกายกลไกการยึดติดกับเนื้อเยื่อของเซรามิกส์ประเภทนี้จะขึ้นกับลักษณะรูปร่างทางกายภาพของอวัยวะส่วนที่ใช้งาน (Morphological fixation) อย่างไรก็ตามข้อด้อยของวัสดุประเภทนี้ คือ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเซรามิกส์กับเนื้อเยื่อ จะทำให้ความหนาของชั้นเนื้อเยื่อห่อหุ้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลให้ความสามารถในการยึดติดกับกระดูกลดลงและอาจเกิดการเลื่อนหลุดของอวัยวะเทียมได้ ตัวอย่างของเซรามิกส์ค่อนข้างเฉื่อย ได้แก่ อลูมินา (Alumina,  $Al_2O_3$ ) เซอร์โคเนีย (Zirconia,  $ZrO_2$ ) เป็นต้น

#### 2. เซรามิกส์ที่มีรูพรุน (Porous ceramics)

เซรามิกส์ประเภทนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาในเรื่องของการเคลื่อนหลุดของเซรามิกส์ประเภทแรกโดยเซรามิกส์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุน โดยเฉพาะที่ผิวซึ่งสัมผัสกับเนื้อเยื่อภายในร่างกาย กลไกการยึดติดกับเนื้อเยื่อนั้นจะเกิดการเติบโตของเนื้อเยื่อเข้าไปภายในรูพรุน (Biological fixation) ทำให้มีการยึดติดที่คิดว่าเป็นการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างเซรามิกส์กับเนื้อเยื่อแต่ข้อจำกัดของเซรามิกส์ประเภทนี้คือขนาดของรูพรุนจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยสามารถเติบโตเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อในรูพรุนได้ นอกจากนี้หากเกิดการเคลื่อนที่โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อกับเซรามิกส์ อาจทำให้เส้นเลือดฝอยขาดได้ ซึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อที่อยู่ในรูพรุนตายและเกิดการติดเชื้อตามมา ตัวอย่างของเซรามิกส์ที่มีรูพรุน เช่น ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ โลหะที่มีรูพรุนเคลือบด้วยไฮดรอกซีแอปพาไทต์ เป็นต้น

#### 3. เซรามิกส์ที่สามารถถูกดูดซับหรือกักเก็บภายใต้สภาวะทางสรีระวิทยา (Resorbable ceramics)

เซรามิกส์ประเภทนี้มีสมบัติพิเศษ คือ สามารถย่อยสลายได้เมื่อเข้าไปอยู่ในร่างกาย และถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อธรรมชาติที่ร่างกายสร้างขึ้นมา ข้อจำกัดของเซรามิกส์ประเภทนี้ คือ องค์ประกอบของเซรามิกส์ที่เกิดการย่อยสลายจะต้องถูกกำจัดด้วยระบบเมตาบอลิซึมของร่างกายได้ อีกทั้งสารที่ปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายของเซรามิกส์จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการสร้างเนื้อเยื่อทดแทนของร่างกาย ถ้าอัตราการย่อยสลายเร็วเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อที่เข้ามาแทนที่และเซรามิกส์ และถ้าอัตราการย่อยสลายช้าเกินไปจะมีผลให้เกิดการเสื่อมซ้อนของเนื้อเยื่อใหม่ที่เข้ามาแทนที่และเซรามิกส์ ข้อจำกัดดังกล่าวข้าง

ต้นเป็นเหตุให้การออกแบบระบบของเซรามิกส์ชนิดนี้ยุ่งยากซับซ้อน ตัวอย่างของเซรามิกส์ประเภทนี้ ได้แก่ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Tricalcium phosphate,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) Bioactive glasses<sup>®</sup> เป็นต้น

#### 4. เซรามิกส์ที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive ceramics)

สมบัติของเซรามิกส์ประเภทนี้จะอยู่กึ่งกลางระหว่างเซรามิกส์ที่มีสมบัติค่อนข้างเฉื่อยและเซรามิกส์ที่สามารถถูกดูดซับภายใต้สภาวะร่างกาย ลักษณะโดยทั่วไปของเซรามิกส์ประเภทนี้ คือ เมื่อใส่เข้าไปแทนที่ในร่างกายแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเฉพาะที่บริเวณรอยต่อของเซรามิกส์กับเนื้อเยื่อทำให้เกิดการสร้างพันธะขึ้นระหว่างเซรามิกส์กับกระดูกหรือเนื้อเยื่อในร่างกาย (Biological fixation) โดยจะสร้างชั้นไฮดรอกซีแอปพาไทต์ขึ้นที่ผิวของเซรามิกส์เพื่อยึดเซรามิกส์กับเนื้อเยื่อ ดังนั้น เซรามิกส์ประเภทนี้จึงช่วยลดปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างเซรามิกส์กับเนื้อเยื่อหรือกระดูกได้ ตัวอย่างของเซรามิกส์ที่ว่องไวทางชีวภาพ เช่น Bioactive glasses<sup>®</sup> Bioactive glass-ceramics เป็นต้น

#### 2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเซรามิกส์ทางการแพทย์ [4]

การประยุกต์ใช้วัสดุเซรามิกส์ทางการแพทย์มีการนำมาใช้เป็นเวลาเกือบ 20 ปี โดยการประยุกต์ใช้นั้นรวมถึง ทางด้านทันตกรรม ด้านการศัลยกรรมกระดูก ด้านการศัลยกรรมใบหน้า เส้นเอ็นยึดต่างๆ เป็นต้น ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของวัสดุเซรามิกส์ทางชีวภาพที่ใช้งานในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างเซรามิกส์ที่ใช้งานทางด้านชีวภาพ [4]

การประยุกต์ใช้งาน	ตัวอย่างของวัสดุ
กระดูกส่วนที่ต้องรองรับแรง (Orthopedic load bearing)	อลูมินา (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
ออร์โทปิดิกส์ทันตกรรมและศัลยกรรมบริเวณใบหน้า โดยการเคลือบวัสดุเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงทางพันธะ เคมี (Coating for chemical bonding (Orthopedic, dental and maxillofacial prosthetics))	Hydroxyapatite (HAp), Bioactive glasses <sup>®</sup> , Bioactive glass-ceramics
ขอบสันของขากรรไกรหรือแอ่งรับฟัน (Alveolar ridge augmentations)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Hydroxyapatite (HAp), HA-autogeneous bone composite, HAp-PLA composite, Bioactive glasses
อุปกรณ์ในการเชื่อมต่อกระดูก (Orthopedic fixation devices)	PLA-carbon fibers, PLA-calcium/phosphorous-base glass fibers
ศัลยกรรมบริเวณขากรรไกรและใบหน้า (Maxillofacial reconstruction)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Hydroxyapatite (HAp), HAp-PLA composite, Bioactive glass

### 2.3.3 ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite, HAp) [12]

ในร่างกายของมนุษย์นั้นมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ น้ำ คอลลาเจน (Collagen) และ ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite, HAp) โดย HAp เป็นแร่ธาตุที่เป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดูกและฟัน ซึ่งมีอยู่ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักร่างกาย

ในกระดูกนั้นประกอบด้วย 2 ส่วนหลักที่สำคัญ [13] คือ

1. แร่ธาตุ ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่มีสัดส่วนประมาณ 69 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกระดูก
2. เนื้อเยื่อ (Tissues) เป็นสารจำพวกอินทรีย์ประกอบด้วยเซลล์ไขมันและพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ คอลลาเจน (Collagen) พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) และพอลิฟอสเฟต (Polyphosphates) เป็นต้น

#### 2.3.3.1 โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีแอปาทิต [12]

HAp จัดเป็นสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium Phosphate) มีสูตรทางเคมีคือ Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub> มีอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca:P ratio) เท่ากับ 1.67 คำว่าไฮดรอกซี (Hydroxy) หมายถึง ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion) และคำว่า “แอปาทิต” (Apatite) เป็นชื่อขององค์ประกอบแร่ธาตุที่มีสูตรทางเคมีเป็น M<sub>10</sub>(ZO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>X<sub>2</sub>

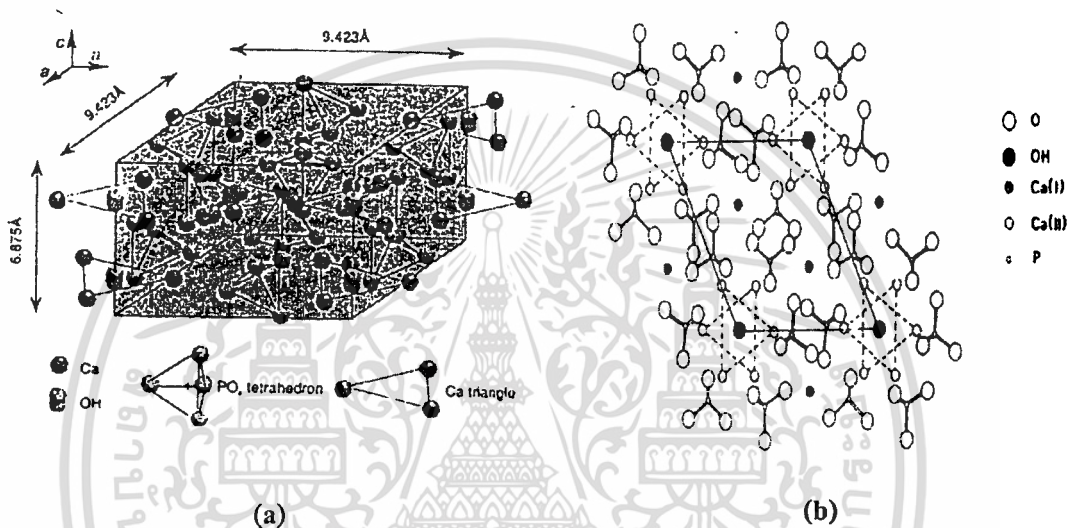
สารประกอบเอปาทิต (Apatite compound) จะมีองค์ประกอบแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับไอออนที่เข้ามาแทนที่ในตำแหน่ง M, Z และ X ซึ่งไอออนที่เป็นไปได้ในการแทนที่นี้ ได้แก่

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

Z = P, V, As, S, Si, Ge, Cr, B

X = OH, OD, CO<sub>3</sub>, O, BO<sub>2</sub>, F, Cl, Br

รูปผลึกของ HAp เป็นเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ขนาดหน่วยเซลล์ (Lattice constants) คือ  $a = 9.423 \text{ \AA}$  และ  $c = 6.875 \text{ \AA}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 (a) โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีเอปาทิต และ (b) ภาพฉายด้านบนของโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีเอปาทิต [12]

ในรูปที่ 2.10 (A) แสดงโครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ของ HAp โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บริเวณมุมที่ฐานรอมบิก (Rhombic) ของหน่วยเซลล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นคอลัมน์ในที่ว่าง ซึ่งมีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงในหน่วยเซลล์ คอลัมน์ของหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกล้อมรอบด้วยแคลเซียมไอออน จำนวน 6 ไอออน ที่จัดเรียงตัวในลักษณะสามเหลี่ยมด้านเท่า 2 รูป ตั้งฉากกับคอลัมน์ของหมู่ไฮดรอกซิล โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นศูนย์กลางแคลเซียมไอออนที่เหลืออีก 4 ไอออน จะเรียงต่อกันเป็นคอลัมน์ 2 คอลัมน์ ระหว่างสามเหลี่ยมด้านเท่าของแคลเซียมไอออนขนานกับคอลัมน์ของหมู่ไฮดรอกซิล แคลเซียมไอออนเหล่านี้จะถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนของออร์โทสเฟตเตตระฮีดรอล (Orthophosphate tetrahedral)

### 2.3.3.2 พฤติกรรมของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ [12, 14]

เฟสของแคลเซียมฟอสเฟตในร่างกายมนุษย์ที่เสถียร จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณน้ำ องค์ประกอบทั้งในกระบวนการผลิตและในสภาวะแวดล้อมในสภาวะสารละลายของเหลวและอุณหภูมิในร่างกายมนุษย์นั้น มีเฟสของแคลเซียมฟอสเฟตที่เสถียรได้อยู่เพียง 2 ชนิด คือ ไคแคลเซียมฟอสเฟต ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , DCP) และไฮดรอกซีแอปพาไทต์ ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , HAp) ซึ่ง DCP จะเสถียรอยู่ที่สภาวะ pH ต่ำกว่า 4.2 และ HAp จะเสถียรอยู่ที่ pH มากกว่าหรือเท่ากับ 4.2 [4]

สมบัติเชิงกลของ HAp เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการปลูกถ่ายอวัยวะ โดยเฉพาะด้านความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และสมบัติด้านความแข็งแรงกด (Compressive strength) สมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับความมีรูพรุนทั้งหมดของชิ้นงาน นอกจากนี้เมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลจะต่ำลงขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 ไมครอน เนื้อเยื่อและเส้นเลือดฝอยจะไม่สามารถเจริญเติบโตเข้าไปภายในรูพรุนได้ [1]

เนื่องจาก HAp นั้นมีความสามารถในการเข้ากันได้กับร่างกาย ทนต่อการกัดกร่อน มีความเหนียวและความว่องไวทางชีวภาพ สามารถขึ้นรูปได้ และสามารถทนต่อแรงกดอัดได้แต่ก็มีข้อด้อย คือ ความเปราะและไม่ยืดหยุ่น จึงนิยมนำ HAp มาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพ เพื่อปรับปรุงสมบัติที่เป็นข้อด้อยของ HAp และสามารถนำมาใช้งานทางด้านชีวภาพได้ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

## 2.4 วัสดุเชิงประกอบสำหรับงานทางการแพทย์ [4]

วัสดุเชิงประกอบ (Composites) ประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วน หรือมากกว่าโดยทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. วัสดุที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) วัสดุส่วนนี้นั้นจะเรียกว่า “เมทริกซ์” (Matrix) เป็นส่วนของวัสดุที่มีเนื้อสารต่อเนื่องถึงกันแต่อาจมีสมบัติเชิงกลไม่ดัดนัก ตัวอย่าง เช่น พอลิเมอร์ เซรามิกส์ เป็นต้น
2. วัสดุที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) วัสดุส่วนนี้อาจเรียกว่าเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcing) โดยวัสดุส่วนนี้จะมีความแข็งและความแข็งแรงมากกว่าส่วนที่มีวัสดุต่อเนื่องจึงมีส่วนช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เซรามิกส์ (Ceramics) เส้นใยพอลิเมอร์ (Polymer fiber) เส้นใยแก้ว (Glasses fiber) เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพ (Biomedical composites) เป็นวัสดุเชิงประกอบที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลักในการใช้งานทางการแพทย์ สมบัติสำคัญของวัสดุเชิงประกอบประเภทนี้ที่ ต้องคำนึงถึง คือ ความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ (Biocompatibility)

วัสดุเชิงประกอบทางด้านชีวภาพสามารถเตรียมได้จากเมทริกซ์ชนิดที่สามารถดูดซับได้ และไม่สามารถดูดซับได้ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วเมทริกซ์ที่ใช้นั้นมักเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถดูดซับได้ เช่น พอลิซัลโฟน (Polysulfone) พอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (UHMWPE) พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (PEEK) และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้จะถูกเสริมแรงโดยใช้เส้นใยคาร์บอนและอนุภาคเซรามิกส์ โดยนิยมนำมาใช้เป็นกระดูกสะโพก (Prosthetic hip stems) เป็นอุปกรณ์ในเชื่อมกระดูกแตกร้าว (Fracture fixation device) รากฟันเทียม (Artificial tooth roots) และซีเมนต์เชื่อมกระดูก (Bone cement)

วัสดุเชิงประกอบสำหรับการปลูกถ่ายอวัยวะที่สามารถดูดซับได้ (Absorbable composite implants) เตรียมได้จากวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับได้ประเภทพอลิเอสเทอร์ ( $\alpha$ -polyester) เช่น พอลิแลคติก (Polylactic) และพอลิไกลคอลิก (Polyglycolic) การนำมาใช้งานของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้จำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง (Strength) พอลิไกลคอลิกแอซิด (Poly(glycolic acid), PGA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดแรกที่สังเคราะห์ขึ้น โดย Frazza และ Schmitt ในปี ค.ศ. 1971 และต่อมาในปี ค.ศ. 1979 Gilding และ Reed ได้สังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) และพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง PGA และ PLA เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับการปลูกถ่ายอวัยวะในบริเวณเนื้อเยื่ออ่อน (Soft tissues) และเป็นวัสดุเพื่อการเย็บตักแต่งบาดแผล (Sutures) พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้พัฒนาเมื่อไม่นานนี้ คือ พอลิออร์โธเอสเทอร์ (Polyorthoesters, POEs) ซึ่งสังเคราะห์โดย Heller และผู้ร่วมงาน ในปี ค.ศ. 1980 นอกจากนี้ยังมี ไดมethylไตรเมทิลลิคาร์บอเนต (Dimethyl-trimethylene carbonate, DMTMCs) สังเคราะห์โดย Tang *et.al.* ในปี ค.ศ. 1990 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับได้ทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับได้ทางชีวภาพอื่นๆ เช่น พอลิไดออกซานอน (Polydioxanone) พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (Poly(ester amides)) พอลิอิมิโนคาร์บอเนต (Poly(imino carbonates)) ไซยาโนอะคริเลต (Cyanoacrylates) และพอลิแอนไฮไดรด์ (Poly(anhydrides)) เป็นต้น

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Wang และ W. Bonfield [1] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) โดยพอลิเอทิลีนที่เลือกใช้ในการงานวิจัยนี้คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ที่ต่อกิ่ง (Grafting) และไม่มีกรต่อกิ่งด้วยอะคริลิกแอซิด (Acrylic acid) โดยอะคริลิกแอซิด จะช่วยในการปรับปรุงสมบัติการยึดติดกับ HAp และมีการเติมสารคู่ควบไซเลนเพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดติดกับ HDPE

เอกสารนี้โดยสารคู่ควบที่เลือกใช้คือ 3-ไตรเมทอกซีไซลิลพรอพิลเมทาคริเลต (3-Trimethoxy-silylpropyl)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

methacrylate) วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเตรียมโดยการผสม HAp และ HDPE ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติการยึดติดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Twin-screw extruder) ตัดเป็นเม็ด (Pelletising) และบดเป็นผง (Powdering) จากนั้นจึงผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และนำชิ้นงานมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติการยึดติดของ HAp และ HDPE ทำให้วัสดุทั้งสองเกิดการยึดติดกันทางเคมีเป็นผลให้สมบัติเชิงกลด้านสมบัติความเหนียว (Ductility) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงสมบัติการยึดติดของ HAp และ HDPE นั้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบให้ดีขึ้น

D. Walsh และคณะ [2] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบไฮดรอกซีแอปาทาइटที่มีรูพรุนกับ  $\epsilon$ -คาโพรแลกโตน (E-caprolactone, CL) หรือเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) โดยในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ CL มีน้ำเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นระยะเวลา 10 วัน และที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 60 วัน ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $\bar{M}_n$ ) ของพอลิคาโพรแลกโตน (Polycaprolactone, PCL) ที่ได้จากปฏิกิริยาเท่ากับ  $7.1 \times 10^3$  กรัมต่อโมล และเท่ากับ  $16.8 \times 10^3$  กรัมต่อโมล ตามลำดับ ส่วนวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมทิล-เมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate, PMMA) นั้นใช้ AIBN เป็นตัวเริ่มต้นทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง การเตรียมวัสดุเชิงประกอบนั้นทำในระบบสุญญากาศเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากรูพรุนของแอปาทาइटก่อนทำการแช่ในมอนอเมอร์ เมื่อผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน พบว่ามีพอลิเมอร์เคลือบอยู่ภายในรูพรุนของไฮดรอกซีแอปาทาइटอย่างสม่ำเสมอ ตารางที่ 2.4 แสดงสภาวะของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ปริมาณพอลิเมอร์องค์ประกอบและค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ค่าความแข็งแรงกดที่เพิ่มขึ้นจาก 9 MPa ของไฮดรอกซีแอปาทาइट เป็น 37 MPa ของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PCL และ 64 MPa ของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PMMA เมื่อทำการทดสอบการวัดมุมของน้ำที่หยดบนผิววัสดุ (Water drop angle) พบว่าวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PCL และ HAp/PMMA เท่ากับ 64° และ 84° ตามลำดับ ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำกับผิววัสดุ (Contact angle) ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเซลล์และเนื้อเยื่อคือ 60°-80° ดังนั้น HAp/PCL นั้นมีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์มากกว่า HAp/PMMA เนื่องจากมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) มากกว่า

ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable) ของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PCL พบว่าการสลายตัวของ PCL นั้นทำให้เกิดกรด ซึ่งทำให้เนื้อเยื่อบริเวณใกล้เคียงเกิดการอักเสบ แต่แคลเซียม ไอออนจาก HAp ที่ละลายออกมาจะช่วยทำให้เป็นกลาง (Neutralise) ทำให้ช่วยกวดการอักเสบดังกล่าวลงได้

ตารางที่ 2.4 สภาวะในการพอลิเมอไรเซชันส่วนประกอบและค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength) ของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PCL และ HAp/PMMA ที่เตรียมได้ [2]

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ ในการพอลิเมอไรซ์ (°C)	เวลา ในการพอลิเมอไรซ์	%น้ำหนัก พอลิเมอร์	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความแข็งแรงกด (MPa)
Apatite	-	-	-	0.63	9
Apatite/PCL	120	7 วัน	53	1.40	26
Apatite/PCL	80	60 วัน	52	1.39	37
Apatite/PMMA	70	8 ชั่วโมง	42	1.1	64

I. Nenad และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาสภาวะการเตรียมวัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพระหว่าง HAp/Poly-L-lactide (PLLA) โดยเตรียม HAp จากปฏิกิริยาดังสมการ



จากนั้น นำสารที่สังเคราะห์ได้มาเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ พบว่า HAp ที่สังเคราะห์ได้มีความหนาแน่น เท่ากับ 3.15 g/cm<sup>3</sup> และมีค่าพื้นที่ผิวเฉพาะ (Specific surface area) เท่ากับ 5 x 10<sup>3</sup> m<sup>2</sup>/kg และ PLLA สังเคราะห์โดยใช้มอนอเมอร์ คือ L-lactide และตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา คือ สแตนนัสออกโทเอต (Stannous octoate) อัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ต่อตัวเริ่มต้น เท่ากับ 1,000-20,000 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 103°C ใช้เวลาในการพอลิเมอไรซ์ 12-88 ชั่วโมง ด้วยวิธีการนี้ทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนัก เท่ากับ 400,000 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 1.12 g/cm<sup>3</sup> มีเปอร์เซ็นต์ผลิตรากเท่ากับ 73.8

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PLLA เตรียมได้โดยการละลาย PLLA ในคลอโรฟอร์ม (Chloroform) และใส่ HAp ลงในสารละลาย PLLA ที่เตรียมได้ ลักษณะเป็นของผสมที่ค่อนข้างหนืดและขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 - 184°C ความดัน 49 - 490 MPa จะได้ชิ้นงานหลังจากผ่านการกดอัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และสูง 10 มิลลิเมตร

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณของ PLLA ในวัสดุเชิงประกอบมีผลต่อความแข็งแรงกดเมื่อปริมาณของ PLLA เพิ่มขึ้นมีผลให้ความแข็งแรงกดลดลง และเมื่อมีปริมาณของ PLLA 15% โดยน้ำหนัก ให้ความแข็งแรงกดสูงสุดเท่ากับ 25 MPa ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบซึ่งมีปริมาณของ PLLA 20% โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีความแข็งแรงกดใกล้เคียงกับกระดูกในร่างกายมากที่สุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกดอัดมีผลให้ความแข็งแรงกดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิในการกดอัด 184°C วัสดุเชิงประกอบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมได้นั้นจะมีค่าความแข็งแรงกดสูงสุด เท่ากับ 93.2 MPa เนื่องจาก PLLA จะเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมินี้ (จุดหลอมเหลวของ PLLA เท่ากับ 184°C) เป็นผลให้ PLLA นั้นสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่าง HAp ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างวัฏภาคของ PLLA และ HAp ได้ดีขึ้น

งานวิจัยของ นิธิวดี บุญธัญทิพย์ และรุ่งทิพย์ สุวรรณจิตต์ [6] ได้ทำการศึกษาสมบัติความแข็งแรงกดและความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนอะซิเตต (HAp/PEA) สำหรับประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์โดยการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEA นั้นเตรียมผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงและมีไดบิวทิลทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีฟิล์มของ PEA ปกคลุมพื้นผิวทั้งภายนอกและภายในชิ้นงาน HAp และ PEA ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก เท่ากับ 4,450 กรัมต่อโมล และ MWD เท่ากับ 1.76 เมื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ในวัสดุเชิงประกอบ พบว่ามีปริมาณพอลิเมอร์ในวัสดุเชิงประกอบ ประมาณ 19% ซึ่งมีผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มขึ้นเป็น 1.70 g/cm<sup>3</sup> และค่าความแข็งแรงกดเพิ่มขึ้นเป็น 140 MPa และผลการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ พบว่าวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEA นั้นมีความว่องไวทางชีวภาพ

งานวิจัยของ สุภาณี ชนระวงศ์ [8] นั้นเป็นการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเมอร์ร่วมพอลิเอทิลีนอะซิเตตกับพอลิเอทิลเทเรพทาเรต (PEA-co-PET) โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของสารประกอบวงร่วม การพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ร่วมในวัสดุเชิงประกอบอยู่ในช่วง 2,188-4,540 กรัมต่อโมล และ MWD อยู่ในช่วง 1.73-2.61 เมื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ร่วมในวัสดุเชิงประกอบ พบว่ามีปริมาณพอลิเมอร์ในวัสดุเชิงประกอบประมาณ 19-21% โดยน้ำหนัก และเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วน โดยน้ำหนักระหว่าง HAp กับพอลิเมอร์ โดยประมาณเท่ากับ 4:1 ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.29 g/cm<sup>3</sup> ผลการทดสอบความแข็งแรงกดของวัสดุเชิงประกอบที่สังเคราะห์ได้เพิ่มขึ้น เท่ากับ 28.6 MPa และการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพโดยการแช่ในสารละลายจำลองคล้ายของเหลวในร่างกาย โดยสภาวะดังกล่าวได้ควบคุมอัตราการไหลของสาร ละลายที่ 130 มิลลิลิตรต่อวัน อุณหภูมิ 36.5°C pH 7.4 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่สังเคราะห์ได้นั้นมีสมบัติความว่องไวทางชีวภาพ

M.S.A. Bakar และคณะ [15] ศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่าง PEEK/HAp เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับการใช้งานส่วนของกระดูกเพื่อรองรับน้ำหนัก (Load-bearing orthopedic) การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง PEEK/HAp ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ปริมาณของ HAp ที่ใช้อยู่ในช่วง 0-40 % โดยปริมาตร ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปคัมเบลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลาญและถูกขับถ่ายออกจากร่างกายได้และในส่วนของเซรามิกส์ทางชีวภาพจะสามารถเชื่อมต่อกับกระดูกในร่างกายได้ โดยไม่เกิดการระคายเคืองหรือเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อและเนื่องจากเซรามิกส์ทางชีวภาพนั้นมีความเปราะ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติความเปราะของเซรามิกส์จึงได้มีการศึกษาโดยการนำพอลิเมอร์เข้ามาผสมเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติส่วนนี้ของเซรามิกส์ได้

L.J. Chen และ M. Wang [17] ได้ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบทางชีวภาพระหว่างเซรามิกส์ทางชีวภาพ ได้แก่ HAp และ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) กับพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พอลิไฮดรอกซีบิวเทอเรต-พอลิไฮดรอกซีวาลิเรต (Polyhydroxybutyrate-Poly-hydroxyvalerate, PHB-PHV) โดยใช้อัตราส่วนของ HAp และ TCP 0-30 % โดยปริมาตร ขึ้นตัวอย่างขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้คือ HAp/PHB-PHV และ TCP/PHB-PHV และทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ พบว่า HAp และ TCP นั้นสามารถกระจายตัวใน PHB-PHV อย่างสม่ำเสมอ อุณหภูมิในการสลายตัวของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp กับพอลิเมอร์ร่วม PHB-PHV และวัสดุเชิงประกอบระหว่าง TCP กับพอลิเมอร์ร่วม PHB-PHV ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ในขณะที่จุดหลอมเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ร่วม PHB-PHV จะแตกต่างกันเมื่อปริมาณของ HAp และ TCP ต่างกัน มอดูลัสและค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ HAp และ TCP เพิ่มขึ้น การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพโดยการแช่สารละลายคล้ายของเหลวในร่างกาย (SBF) เป็นเวลา 7 วัน พบว่าวัสดุเชิงประกอบทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมได้มีความว่องไวทางชีวภาพ เนื่องจากสามารถกักผลึกของ HAp บนผิวของวัสดุเชิงประกอบในทุกอัตราส่วน ดังนั้นจึงสามารถที่จะปรับแต่งอัตราส่วนหรือเลือกชนิดของเซรามิกส์ทางชีวภาพให้เหมาะสมกับสมบัติตามความต้องการในการนำมาใช้งานทางด้านชีวภาพได้

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PHB-PHV และ วัสดุเชิงประกอบ TCP/PHB-PHV [17]

ปริมาณของเซรามิกส์ (% โดยปริมาตร)	อุณหภูมิในการย่อยสลาย (Degradation temperature) (°C)	
	HAp/PHB-PHV	TCP/PHB-PHV
0	279.6	279.6
10	280.2	277.3
20	266.9	274.9
30	252.2	269.7

G. Wei และ P.X. Ma [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบระหว่างนาโนไฮดรอกซี-แอปาทาไทต์ (nano-HAp) กับพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ที่เลือกทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly-L-lactic acid, PLLA) เพื่อใช้เป็น โครงสร้างของกระดูกในร่างกายที่มีความเป็นรูพรุนสูงและสามารถควบคุมขนาดของรูพรุนได้จากเทคนิคการใช้ความร้อนในการเหนี่ยวนำให้เกิดการแยกวัฏภาค (Thermal induced phase separation, TIPS) โดยการผสม nano-HAp และ PLLA ในตัวทำละลาย คือ ไดออกเซน (Dioxane) และน้ำ จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดการแยกเฟสระหว่าง ของแข็ง-ของเหลวหรือของเหลว-ของเหลว เก็บส่วนที่เป็นของแข็งไว้ที่อุณหภูมิ  $-5^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-10^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน 0.5 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลา 7 วัน เพื่อกำจัดเอาตัวทำละลายออกองค์ประกอบสุดท้ายที่ได้จากการความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์และปริมาณ nano-HAp ที่มีอยู่ในของผสมเมื่อเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง nano-HAp/PLLA และ ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) สมบัติเชิงกลและการดูดซับโปรตีน (Protein adsorption) ของวัสดุเชิงประกอบ พบว่า nano-HAp/PLLA นั้นมีสมบัติเชิงกลและการดูดซับโปรตีนได้ดีในขณะที่ยังคงมีความเป็นรูพรุนสูงและคงรูปร่างของรูพรุน โดยการดูดซับโปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณและเพิ่มขนาดของรูพรุน และสัณฐานวิทยาของรูพรุนขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในตัวทำละลายไดออกเซน จากการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำน้อยกว่า 5% โดยปริมาตรที่ผสมในตัวทำละลายไดออกเซน จะลดขนาดของรูพรุนลงจาก 100  $\mu\text{m}$  เป็น 10  $\mu\text{m}$  และ โครงสร้างของรูพรุนก็เปลี่ยนแปลงด้วย การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกดของ nano-HAp/PLLA พบว่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ nano-HAp ในวัสดุเชิงประกอบ

E. Helwig และคณะ [19] ได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp กับ  $\epsilon$ -คาโพรแลกโตน (E-caprolactone, CL),  $\delta$ -วาเลโรแลกโตน ( $\delta$ -valerolactone, VL) และแลคไทด์ (D,L-lactide) ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง โดยใช้ HAp ในอัตราส่วน 1, 5, 10, 30, 40, 50 และ 80 % โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ สแตนนัสออกโทเอต (Stannous (II) octoate,  $\text{SnOct}_2$ ) ในอัตราส่วนของ  $[\text{SnOct}_2]/[\text{lactone}]$  เท่ากับ  $3.5 \times 10^{-3}$  และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $130^{\circ}\text{C}$  ในสภาวะบรรยากาศของอาร์กอนจนกระทั่งแลคโตนเปลี่ยนเป็นพอลิคาโพรแลกโตน (Poly caprolactone, PCL) โดยสมบูรณ์ จากการศึกษาโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค GPC พบว่า HAp นั้นจะขัดขวางการพอลิเมอไรส์ของ PCL ซึ่งทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $\bar{M}_n$ ) ลดลง เมื่อปริมาณของ HAp เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วนของ HAp 50% และ 80% โดยน้ำหนัก ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PCL เวลาในการทำปฏิกิริยา 240 นาที พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน เท่ากับ 12,100 และ 12,000 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 วัสดุเชิงประกอบที่มีการพอลิเมอไรเซชันของแลกโตน (Lactones, L) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ  $\text{SnOct}_2$  ในอัตราส่วน ( $[\text{SnOct}_2]/[\text{L}] = 3.5 \times 10^{-3}$ ) ใน HAp ที่อุณหภูมิ  $130^\circ\text{C}$  [19]

Polymer or composites <sup>a</sup>	[HAp]/[L]	Reaction time (min)	Conversion $\alpha$ of L (%)	$M_n$ (กรัมต่อโมล)	$M_w / M_n$	$P_n$ at $\alpha = 100\%$	HAp <sub>cr</sub> (%)
PCL		93	98.6	25300	1.57	224.8	
PCL-1HAp	0.00295	69	93.4	(25100)	1.41		
				22300		209.2	11.3
5HAp	0.01196	86	86.0	19200	1.35	195.6	5.6
10HAp	0.02525	92	89.3	18100	1.50	177.6	4.7
30HAp	0.09738	245	93.6	17800	1.79	166.6	1.6
40HAp	0.15148	135	95.5	16900	1.83	155.0	1.3
50HAp	0.2272	240	98.4	12100	1.48	107.5	2.1
80HAp	0.9091	240	98.6	12000	1.90	106.6	0.5
PCL-10HAp <sup>b</sup>	0.02525	4320	91.2	14900	1.58	143.1	10.0
PVL		115	97.0	19900	1.44	204.9	
PVL-1HAp	0.00201	125	96.5	17500	1.47	181.1	31.9
5HAp	0.01049	120	98.2	13000	1.31	132.2	25.6
PDLLA		243	97.7	32100	1.39	228.0	
PDLLA-5HAp	0.015102	95	96.2	26550	1.20	191.5	5.5
10HAp	0.031882	70	95.4	23750	1.40	172.7	4.4
30HAp	0.12297	75	98.2	16500	1.61	116.8	3.4
50HAp	0.2869	83	98.2	14700	1.49	103.9	1.8

a: The mass percentage of HAp in the non-extracted composites is denoted by the number before HAp.

b: Composite obtained by polymerization in the absence of catalyst at  $170^\circ\text{C}$

N.C. Bleach และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาปริมาณของแคลเซียมฟอสเฟตสองวัฏภาค (Biphasis calcium phosphate, BCP) ในวัสดุเชิงประกอบระหว่างแคลเซียมฟอสเฟตสองวัฏภาค และพอลิแลกไทด์ (Poly-L-lactide, PLLA) ซึ่งปริมาณของสารที่เติมมีผลต่อสมบัติเชิงกล ในงานวิจัยนี้ใช้ PLLA ที่มีความหนืดที่แท้จริง 6.1 เดซิลิตรต่อกรัม เป็นเมทริกซ์และ BCP ที่ประกอบด้วย เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต ( $\beta$ -Tricalcium phosphate) 70% โดยน้ำหนัก กับ HAp 30% โดยน้ำหนักเป็นสารตัวเติม จากนั้นทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยการเตรียมเป็นฟิล์มโดยละลาย PLLA 0.25 กรัมในคลอโรฟอร์ม 12.5 มิลลิลิตร และเติม BCP ลงไปในปริมาณต่างๆ กัน โดยมีสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ตั้งแต่ 0 – 0.25 ปั่นกวนอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และหล่อเป็นฟิล์มโดยการเปิดของผสมลงบนสไลด์แก้วและปิดทับด้วยสไลด์อีกแผ่น ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง เพื่อให้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวทำละลายค่อยๆ ระเหยไป นำฟิล์มที่ได้มาทดสอบการกระจายตัวของสารตัวเติม คือ BCP ด้วยเทคนิค SEM ทดสอบสมบัติการดึงยึดตามมาตรฐาน ASTM D882 แล้วทำการทดสอบสมบัติทางจลนศาสตร์ ด้วยเทคนิค Dynamic mechanical analysis (DMA) โดยให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 20 - 80°C ในอัตราการให้ความร้อน 4°C ต่อนาที และค่าความเครียดคงที่ 0.2% และ 0.1% ตามลำดับ ความถี่ในการทดสอบ 1 Hz จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณของ BCP เพิ่มขึ้นทำให้ความเครียด (Strain) ลดลง ซึ่งมีผลต่อค่า Ultimate tensile strength (UTS) ทำให้มีค่าลดลง เพราะเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค BCP ทำให้อนุภาคกระจายตัวไม่ทั่วชิ้นงาน และเกิดเป็นช่องว่างขึ้น ส่วนอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ BCP เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เกิดการดูดซับบนอนุภาค BCP ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เกิดได้ยากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 30% (Ammonium Hydroxide 30%,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
3. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid 98%,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
4. ไดเมทิลกลูตาเรต (Dimethyl glutarate) บริษัท Fluka เกรดวิเคราะห์
5. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ) บริษัท Fluka เกรดวิเคราะห์
6. เตตระไอโซโพรพิลออร์ทอไททาเนต (Tetraisopropyl orthotitanate,  $\text{Ti}(\text{iPrO})_4$ ) บริษัท Fluka เกรดวิเคราะห์
7. เมทานอล (Methanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
8. คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
9. ไดบิวทิลทินออกไซด์ (Dibutyltin oxide,  $\text{C}_8\text{H}_{18}\text{OSn}$ ) บริษัท Fluka เกรดวิเคราะห์
10. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
11. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (vinyl alcohol))  $\bar{M}_w = 70,000 - 100,000$  กรัมต่อโมล
12. กรดบอริก (Boric acid,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
13. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride,  $\text{NaCl}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
14. โซเดียมไฮโปคลอไรด์ (Sodium hypochloride,  $\text{NaHCO}_3$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
15. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride,  $\text{KCl}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
16. โพแทสเซียมไฮโปฟอสเฟต (Potassium Hypophosphate,  $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
17. แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
18. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid,  $\text{HCl}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
19. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride,  $\text{CaCl}_2$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
20. โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. ไฮดรอกซีเมทิล เมทิลามีน (Tris-Hydroxymethyl methylamine,  $(\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNH}_2$ ) บริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals Limited เกردวิเคราะห์

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS 3400
2. เครื่องบดผสมสารตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท Rock Lab รุ่น Benchmill Model 1A
3. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท Herzog รุ่น TP 60/2D
4. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance
5. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (Nuclear magnetic resonance spectrometer, NMR) บริษัท Bruker AG รุ่น NMR 300 AMX Advance 300 MHz ใช้เตตระเมทิลไซเลน (TMS) เป็นสารละลายมาตรฐาน
6. เครื่องเจลเพอเมชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatography, GPC) บริษัท Milipore 150-cv
 

คอลัมน์	: PLgel 10 $\mu\text{m}$ Mixed B 2 columns ขนาด 7.8 x 300 nm
	วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500–10,000,000 กรัมต่อโมล
	ใช้พอลิสไตรีนเป็นสารมาตรฐาน
สารละลาย	: เตตระไฮโดรฟูแรน (THF) เกรด HPLC
อุณหภูมิคอลัมน์	: 30°C
อุณหภูมิส่วนฉีด	: 30°C
อุณหภูมิ solvent/pump	: 30°C
อัตราการไหล	: 1 ml/min
ปริมาณการฉีด	: 100 $\mu\text{m}$
เวลาการฉีด	: 22 นาที
Detector	: Reflective index
การเตรียมตัวอย่าง	: พอลิเมอร์ในวัสดุเชิงประกอบทำได้โดยการสกัดด้วยไดคลอโรมีเทนจนหมด นำไปกรองและระเหยตัวทำละลายออกไป
	ละลายใน THF เกรด HPLC ให้มีความเข้มข้น 0.5% w/v
	: สารประกอบวงละลายใน THF เกรด HPLC ให้มีความเข้มข้น 0.5%w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Infrared Spectrophotometer, FT-IR) บริษัท Bruker AG รุ่น IFS28  
 ความยาวคลื่น :  $4,000\text{ cm}^{-1} - 400\text{ cm}^{-1}$   
 การเตรียมตัวอย่าง : ของแข็งอัดผสมกับ KBr ของเหลวหนืดละลายด้วย  
 คลอโรฟอร์มแล้วหยดบน KBr Plate ทิ้งให้คลอโรฟอร์ม  
 ระเหยจนหมด
8. เครื่องระเหยตัวทำละลายแบบหมุน (Rotary evaporator) บริษัท BUCHI รุ่น ROTAVAPOR R-114
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท LEO รุ่น 1450VP
10. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) บริษัท Perkin elmer รุ่น Pyris Diamond DSC
11. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) บริษัท Perkin elmer รุ่น Pyris 1 TGA  
 อุณหภูมิที่ใช้ :  $50 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 อัตราการให้ความร้อน :  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$
12. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท LLoyd Instrument รุ่น LR30K
13. อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น CBN28-30 และ Immersion circulator (FT01/5) รุ่น ISOTEMP
14. เครื่อง Gallenkamp หาจุดหลอมเหลว บริษัท SUNYO รุ่น SG97/12/314
15. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท Buchi รุ่น B-169
16. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 225
17. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Ney Dental รุ่น 14H
18. เครื่องควบคุมอัตราการหยดสาร บริษัท Barnant รุ่น 77120-52
19. เครื่องซั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254
20. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific รุ่น Fisherbrand
21. เครื่องให้ความร้อนแบบหุ้ม (Heating Mantle)
22. ชุดอุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (รูปที่ 3.6)
23. ชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบความว่องไวทางชีวภาพในระบบสถานะที่มีการไหลเวียน บริษัท Cole-Parmer รุ่น Masterflex 7553-85 (รูปที่ 3.7)  
 อัตราการไหล : 130 มิลลิลิตร/วัน  
 อุณหภูมิในการทดสอบ:  $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

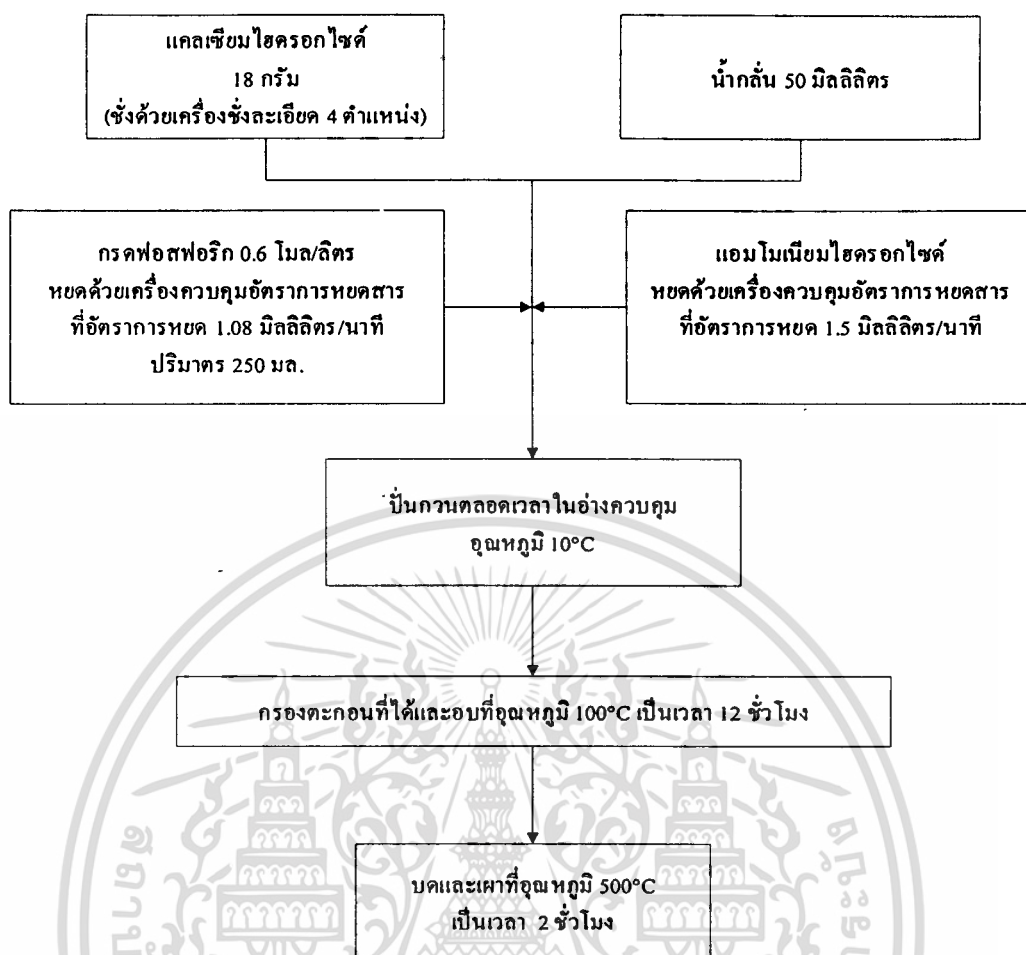
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับ 24. ตู้อบลดความดัน (Vacuum oven) บริษัท Hotpack รุ่น Model 273800 ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isotemp
26. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000
27. ปัมระบบสุญญากาศ บริษัท Edwards รุ่น RV 12
28. มอเตอร์พร้อมใบพัดปั่นกวน
29. เทอร์โมสแตท
30. โกร่งบดสาร
31. ครุชิลิตชนิดพอร์ซเลนและอลูมินา
32. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

### 3.3 วิธีการดำเนินการ

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปาทิต์

ทำการสังเคราะห์ HAp ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) ด้วยการนำแคลเซียม 0.5 โมล ทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัส 0.3 โมล โดยการชั่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 18 กรัม (ชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง) ผสมในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.6 โมล/ลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยการหยดด้วยเครื่องควบคุมอัตราการหยดสารที่อัตราการหยดเท่ากับ 1.08 มิลลิลิตร/นาที พร้อมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ที่อัตราการหยด 1.5 มิลลิลิตร/นาที ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ  $10^\circ\text{C}$  จากนั้นกรองสารที่ได้ด้วยเครื่องกรองลดความดันแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง บดและเผาที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอปาทาइट

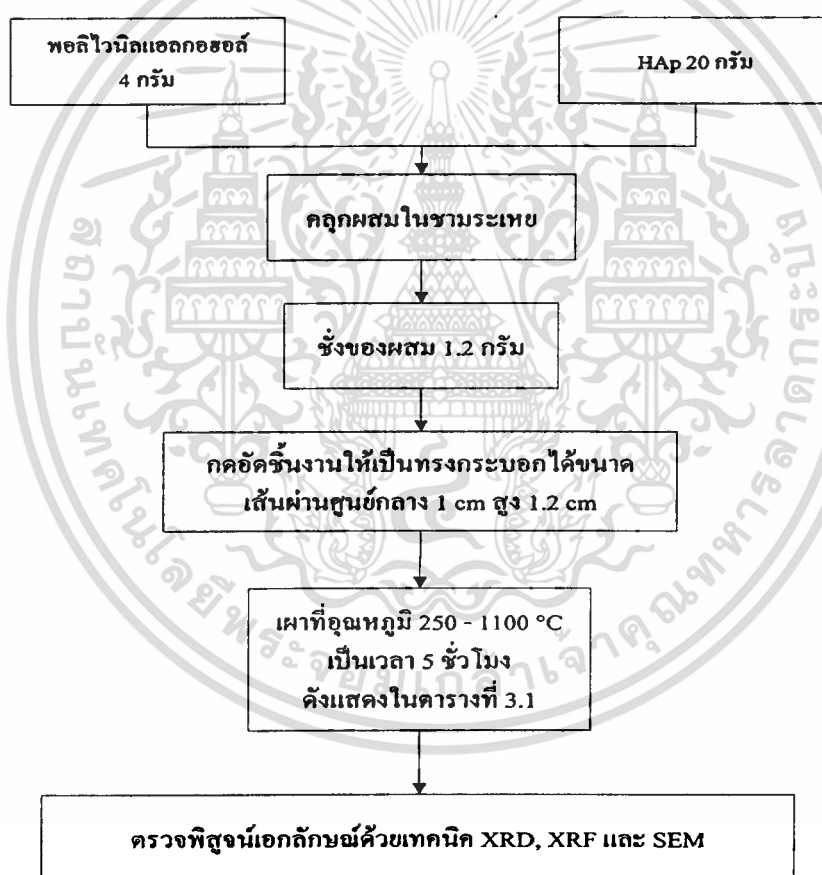
### 3.3.2 การขึ้นรูปไฮดรอกซีเอปาทาइट

#### 3.3.2.1 การขึ้นรูปไฮดรอกซีเอปาทาइटแบบกดอัด

ซังพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สารสร้างรูปพูน) 4 กรัม (20% โดยน้ำหนักของ HAp) ผสมกับ HAp ที่สังเคราะห์ได้ในข้อ 3.3.1 ปริมาณ 20 กรัม ในชามระเหย ทำการคลุกผสม และนำของผสมที่ได้นำมาชั่งประมาณ 1.2 กรัมและทำการกดอัดขึ้นงานเป็นทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สูง 1.2 เซนติเมตร และนำก้อนขึ้นงาน HAp ที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาแสดงใน ตารางที่ 3.1 และนำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF, XRD และ SEM

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาขึ้นรูป HAp

ขั้นที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)
1	250	45
2	450	45
3	650	45
4	850	45
5	1000	60
6	1100	300



รูปที่ 3.2 แผนงานการขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปพาไทต์แบบกดอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.2 การขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาทาइटแบบกรองลดความดัน

ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สารสร้างรูพรุน) 4 กรัม (20% โดยน้ำหนักของ HAp) ปั่นกวนในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร พร้อมให้ความร้อน เป็นเวลา 45 นาที ค่อยๆ เติม HAp ที่สังเคราะห์ได้ ปริมาณ 20 กรัมลงในของเหลว ทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 20 นาที นำไปกรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน และทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาด  $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ cm}^3$  นำชิ้นงาน HAp ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำก้อนชิ้นงาน HAp มาเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผา ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และนำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF, XRD และ SEM

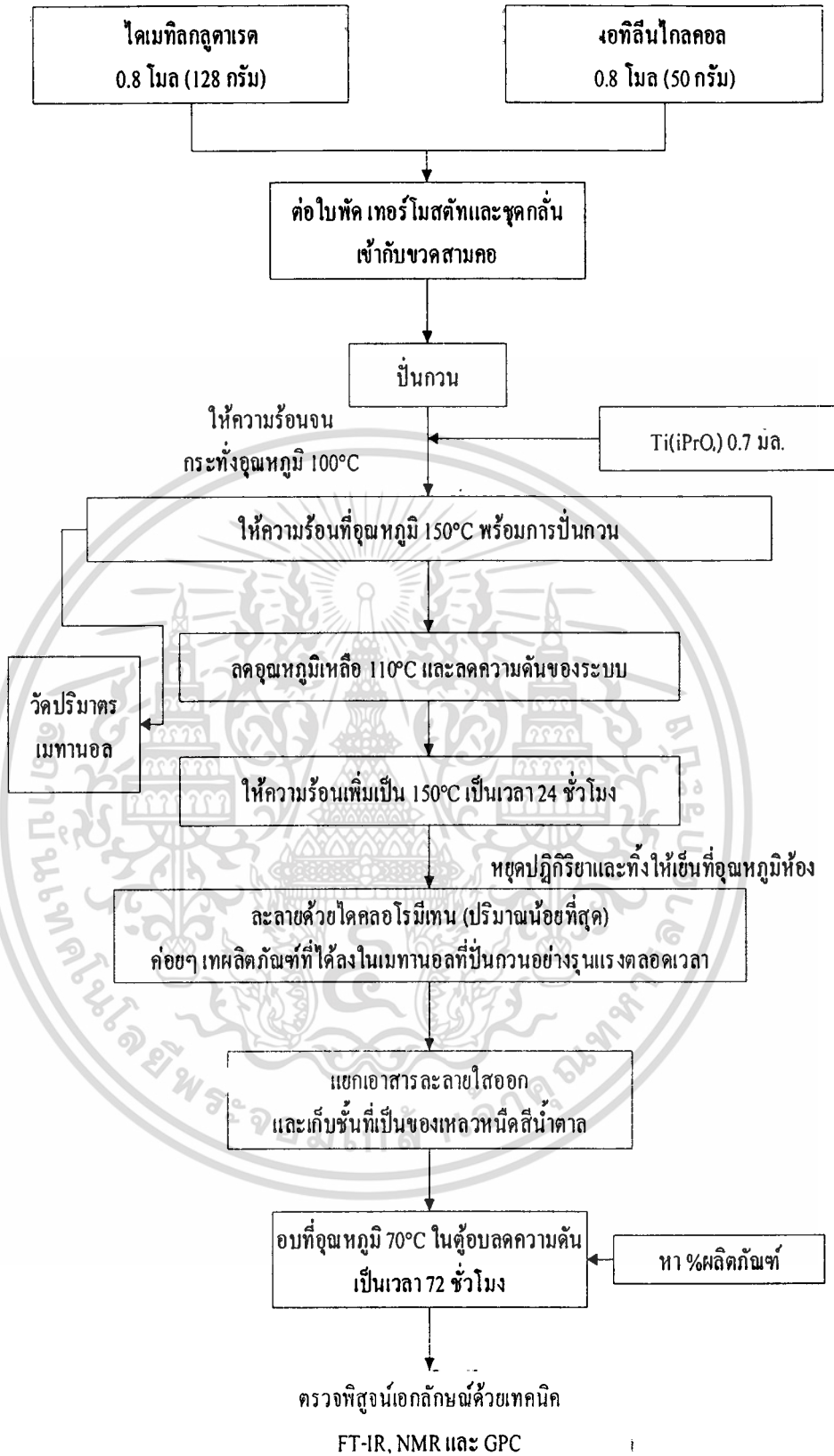


รูปที่ 3.3 แผนงานการขึ้นรูปไฮดรอกซีแอปาทาइटแบบกรองลดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต

นำโคเมทิลกลูตาเรต 128 กรัม และเอทิลีนไกลคอล 50 กรัม ซึ่งด้วยเครื่องซึ่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (1:1 โดยโมล) ใส่ในขวดสามคอต่อใบพักกวน เทอร์โมสแตทและชุดกลั่นเข้ากับขวดสามคอให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิ 100°C จากนั้นเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเตตระไอโซโพรพิลออกโทททาเนต 0.7 มิลลิลิตร (0.5% โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์โคเมทิลกลูตาเรต) ลงไป เพิ่มอุณหภูมิเป็น 150°C ปั่นกวนตลอดเวลา วัดปริมาตรของเมทานอลที่ได้ หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ประมาณ 110°C และลดความดันของระบบลง จากนั้นให้ความร้อนต่อไปที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการหยุดปฏิกิริยาและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยไดคลอโรมีเทน (ปริมาณน้อยที่สุด) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ใส่กรวยแยกและตกตะกอนในเมทานอลพร้อมปั่นกวนอย่างรุนแรง ทิ้งให้ตะกอนตกสมบูรณ์ และกรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน ทิ้งส่วนที่เป็นของเหลวใสและเก็บผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาล นำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C ในตู้อบลดความดันเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักและหาเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ นำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค NMR, GPC และ FT-IR

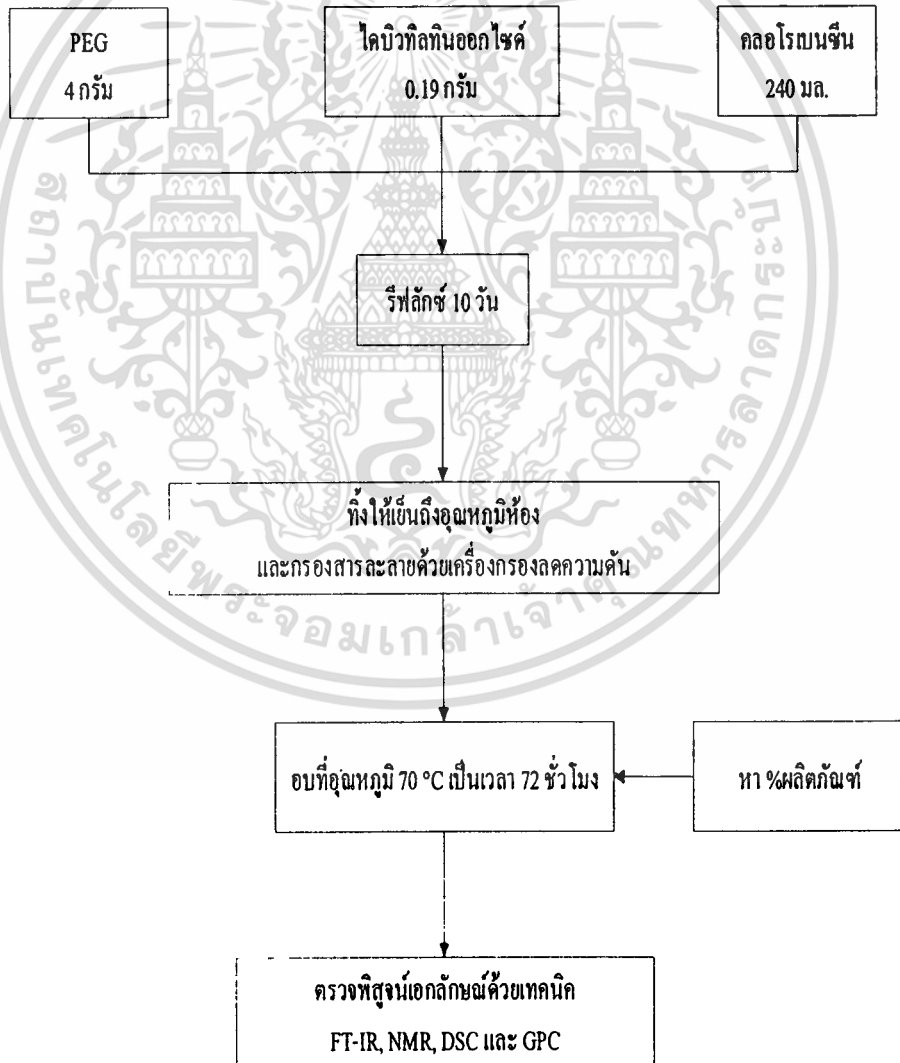


รูปที่ 3.4 แผนงานการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การเตรียมสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรตด้วยเทคนิคการ ดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง

นำพอลิเอทิลีนกลูตาเรตที่สังเคราะห์ได้มา 4 กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยาไดบิวทิลทินออกไซด์ 0.19 กรัม (3% โมลของหน่วยซ้ำพอลิเมอร์) และตัวทำละลายคลอโรเบนซีน 240 มิลลิลิตร (อัตราส่วนพอลิเมอร์ต่อตัวทำละลาย 1:60 กรัม/มิลลิลิตร) ใส่ลงในขวดก้นกลม ทำการรีฟลักซ์ด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบหมุน เป็นเวลา 10 วัน จากนั้นทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง กรองสารละลายที่ได้ด้วยเครื่องกรองลดความดัน นำสารละลายที่ผ่านการกรองไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลาย นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบด้วยตู้อบลดความดันที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิค NMR, FT-IR, GPC และ DSC



รูปที่ 3.5 แผนงานการสังเคราะห์สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต

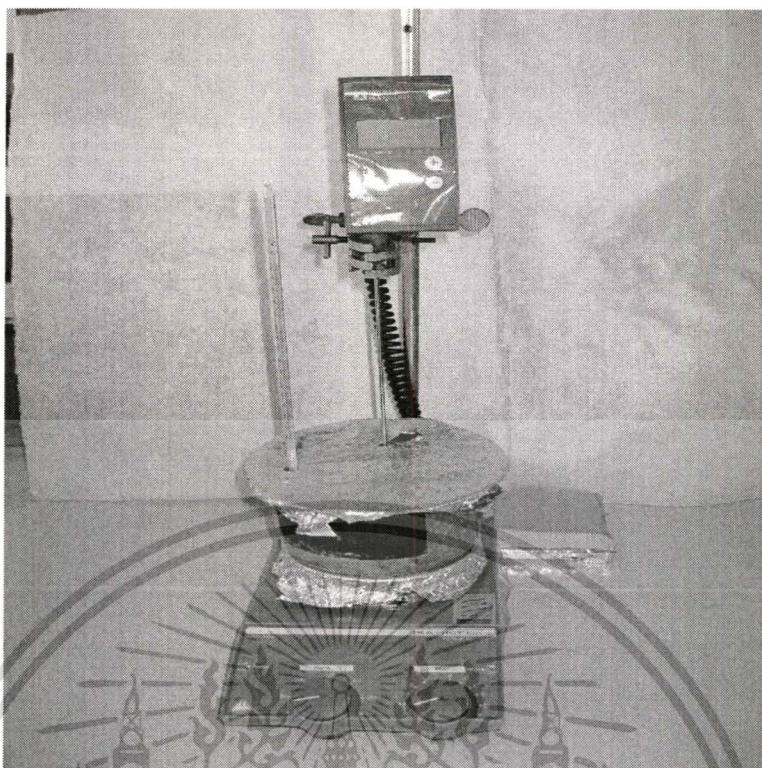
#### (HAp/PEG Composite)

ชั่งน้ำหนักชิ้นงาน HAp ที่ขึ้นรูปแล้ว 1 ชิ้น (ประมาณ 1 กรัม) สารประกอบวงโพลิโก เอทิลีนกลูตาเรต 0.5 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา ไคบิวทิลทินออกไซด์ปริมาณ 3% โมล โดยน้ำหนักของ น้ำหนักหน่วยซ้ำพอลิเมอร์ ละลายในไดคลอโรมีเทน 5 มิลลิลิตร ให้มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อ มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นแช่ชิ้นงาน HAp ลงในหลอดทดลองดังกล่าวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำชิ้นงาน Pre-composite ออกจากสารละลายวางบนกระดาษฟิลา ค่อยๆ หยดสารละลายที่เหลือลงบนชิ้นงานทิ้งให้แห้ง จากนั้นหยดสารละลายต่อไปอีกทำสลับกัน ไปเช่น นี้จนชิ้นงานไม่สามารถดูดซับสารละลายได้หมด นำ Pre-composite ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายออก หลังจากนั้นชั่งชิ้นงาน Pre-composite ที่ได้ดังกล่าว ใส่ในหลอดทดลองสำหรับทำปฏิกิริยา ROP (ดังรูปที่ 3.6) นำไปทำให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ จากนั้นให้ความร้อนโดยใช้อ่างทรายที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่ 3.2

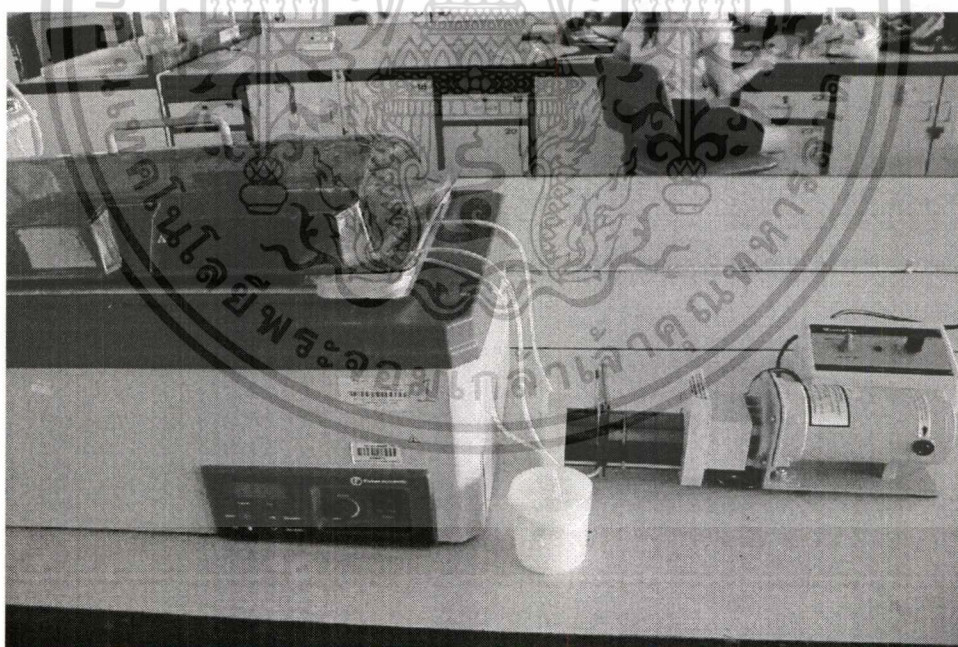
ตารางที่ 3.2 สภาวะอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ROP ของชิ้นงาน Pre-composite

ตัวอย่างที่	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)
1	180	24
2	180	48
3	180	72
4	200	24
5	200	48
6	200	72
7	220	24
8	220	48
9	220	72

ทั้งให้เขียนที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักวัสดุเชิงประกอบที่ได้แล้วนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิค NMR, FT-IR, TGA และ XRD และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM

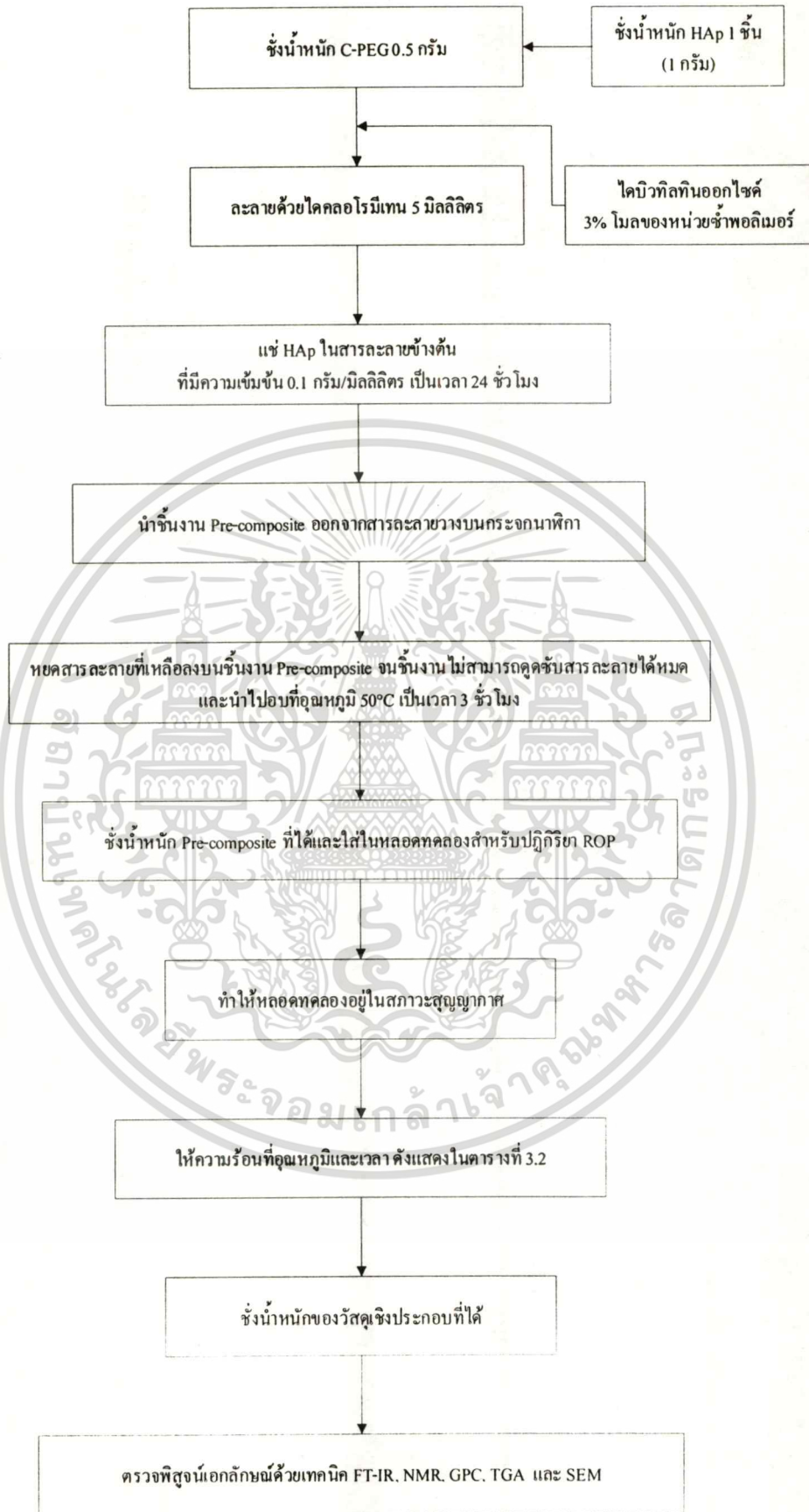


รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยา ROP



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์แ่สารละลาย SBF ในระบบไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.8 แผนงานการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PEG โยชนด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 การทดสอบความแข็งแรงกดของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG

นำวัสดุเชิงประกอบระหว่าง HAp/PEG และชิ้นงาน HAp อย่างละ 3 ตัวอย่างขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ คือ 10 x 10 x 6 มิลลิเมตร มาทดสอบค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength) โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) โดยมีสภาวะการทดสอบ ดังนี้

Load cell	: 30 kN
Test speed	: 2.5 mm/min

### 3.3.7 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบในระบบจำลองของร่างกาย

#### 3.3.7.1 การเตรียมสารละลายที่มีองค์ประกอบความเข้มข้นของไอออนอินทรีย์และค่าความเป็นกรด-เบส ใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์

#### ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SBF

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย	
1. NaCl	15.992 กรัม
2. NaHCO <sub>3</sub>	0.7 กรัม
3. KCl	0.448 กรัม
4. K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 3H <sub>2</sub> O	0.348 กรัม
5. MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	0.612 กรัม
6. 1M HCl	80 มิลลิลิตร
7. CaCl <sub>2</sub>	0.556 กรัม
8. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.144 กรัม
9. (CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> CNH <sub>2</sub>	12.116 กรัม

โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารละลายดังนี้

นำบีกเกอร์พลาสติกที่บรรจุน้ำกลั่น 1400 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 36-37°C ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ค่อยๆ ละลายสารเคมีที่ละลายลงในน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ ตั้งแต่สารตัวที่ 1 ถึงสารตัวที่ 8 ยกเว้นสารตัวที่ 6 จะแบ่งใส่ลงไปเพียง 30 มิลลิลิตร ก่อนพร้อมวัดค่า pH ของสารละลายในระหว่างที่ผสม เติมสารตัวที่ 9 ลงไปที่ละน้อยจนกระทั่งสารละลายมีค่า pH ประมาณ 7.4 จากนั้นจึงเติมสารตัวที่ 6 ที่เหลือลงไปเพื่อปรับให้ pH เป็น 7.3 (ค่า pH เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ควรเกิน 7.5 เพราะ จะทำให้เกิดตะกอน) ทำเช่นนี้สลับกันจนกระทั่งสารตัวที่ 9 หหมด จะได้สารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 7.4 ปรับปริมาตรของสารละลายที่เตรียมได้เป็น 2000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลาย SBF ที่อุณหภูมิประมาณ 5°C สารละลาย SBF ที่เตรียมได้มีความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์ในสารละลาย SBF และ Human blood plasma [4]

Ion	Simulated body fluid (mM)	Human blood plasma (mM)
Na <sup>+</sup>	142.0	142.0
Cl <sup>-</sup>	148.8	103.0
HCO <sup>3-</sup>	4.2	27.0
K <sup>+</sup>	5.0	5.0
Mg <sup>2+</sup>	1.5	1.5
Ca <sup>2+</sup>	2.5	2.5
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.0	1.0

### 3.3.7.2 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ในระบบที่มีการไหลผ่าน (Flowing system)

ทำการขัดผิวชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG แล้วจึงนำมาแช่ในสารละลาย SBF ที่เตรียมไว้ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 36.5°C พร้อมทั้งควบคุมอัตราการไหลผ่านของสารละลาย SBF ที่อัตราเร็ว 130 มิลลิลิตรต่อวัน ด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหล (ดังแสดงในรูปที่ 3.7) โดยเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการแช่เป็น 7 14 21 และ 28 วัน เก็บสารละลาย SBF ที่ไหลผ่านวัสดุเชิงประกอบทุกๆ 7 วัน ในทุกๆ ตัวอย่างเมื่อครบกำหนดในแต่ละช่วงเวลา นำวัสดุเชิงประกอบออกจากสารละลาย SBF และล้างด้วยน้ำกลั่นทิ้งไว้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบมาชั่งน้ำหนักและนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM

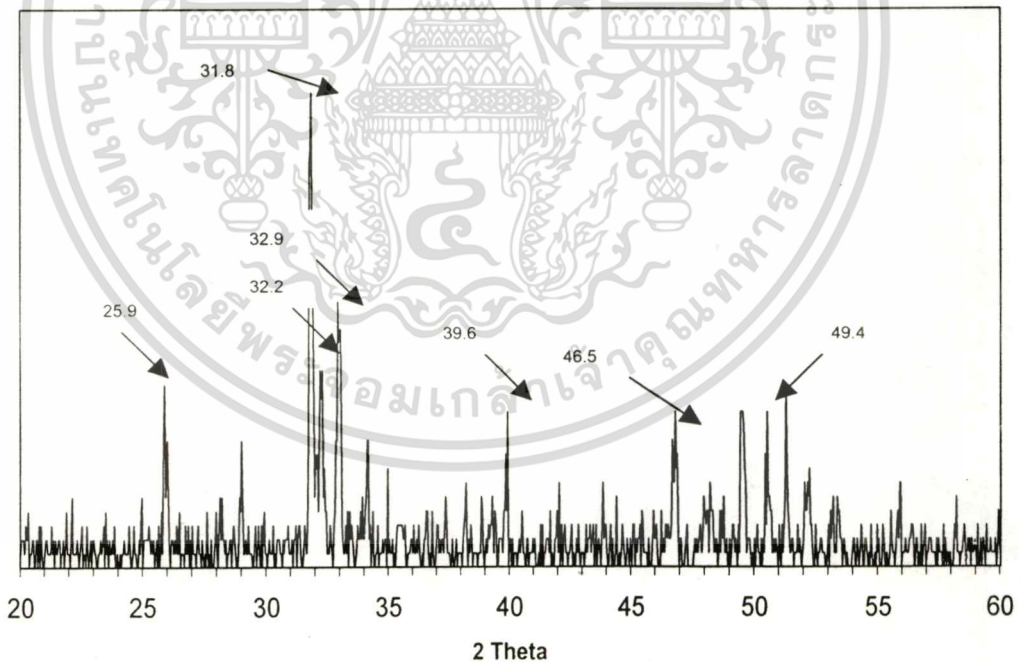
นำสารละลาย SBF ที่ไหลผ่านวัสดุเชิงประกอบทุกๆ 7 วัน มาสกัดด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนและระเหยตัวทำละลายออก จากนั้นละลายสารที่สกัดได้อีกครั้งด้วยคลอโรฟอร์ม และนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีแอปพาไทต์และการขึ้นรูป

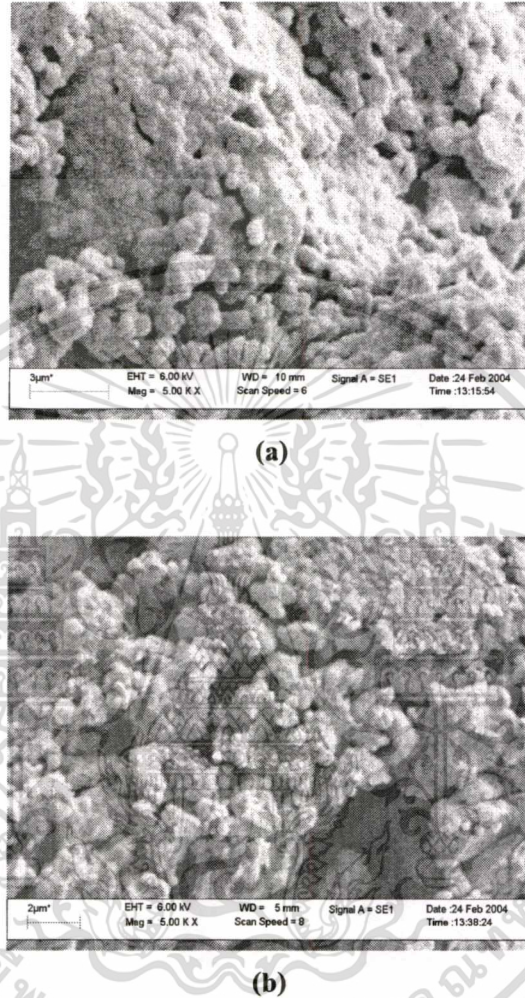
เมื่อนำผงไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการตกตะกอนร่วมผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นมีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ CaO อยู่ในช่วง 55.0 – 56.5 % โดยน้ำหนัก และ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> อยู่ในช่วง 43.0 – 44.5 % โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนโมลของ Ca:P อยู่ในช่วง 1.56 – 1.67 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของ HAp คือ 1.67 และนำ HAp ที่สังเคราะห์ได้นี้มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาวัฏภาคขององค์ประกอบหลัก พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีวัฏภาคขององค์ประกอบหลักเป็น HAp ซึ่งปรากฏพิกที่สำคัญในตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.9, 31.8, 32.2, 32.9, 39.6, 46.5 และ 49.4 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้ภายหลังการขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อนำผง HAp ผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่ใช้เป็นสารสร้างรูพรุน มาขึ้นรูปเอกสารนี้เป็นก้อนและเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของก้อน HAp ที่ผ่านการขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าผลึกของ HAp มีลักษณะเป็นเกรนเหลี่ยมค่อนข้างกลมเชื่อมต่อกันและมีช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวของ PVA ได้เป็นก้อนที่มีรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



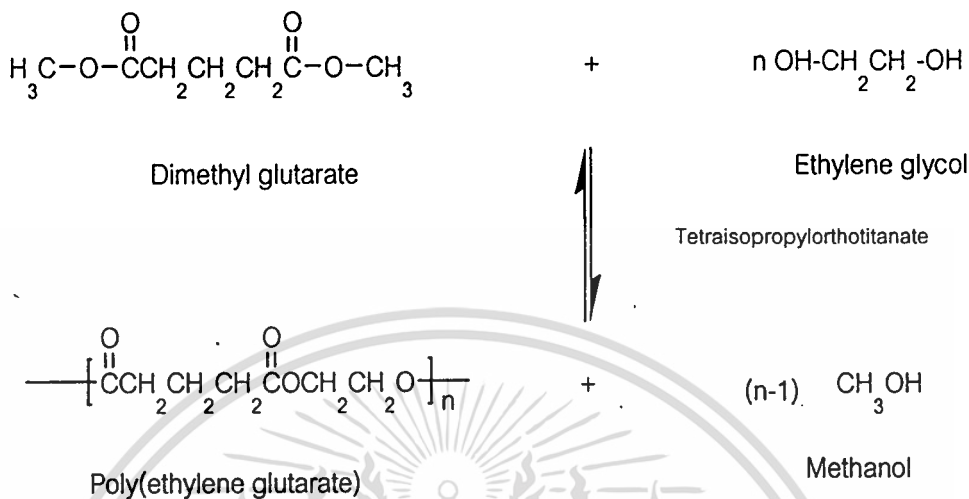
รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (a) ที่ผิว (b) ภาพตัดขวางของก้อน HAp ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

#### 4.2 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (Poly(ethylene glutarate), PEG) และสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (Cyclic Oligo(ethylene glutarate), C-PEG)

สมการที่ 4.1 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนกลูตาเรต (PEG) โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น จากสารตั้งต้น คือ ไคเมทิลกลูตาเรตและเอทิลีนไกลคอล โดยมี

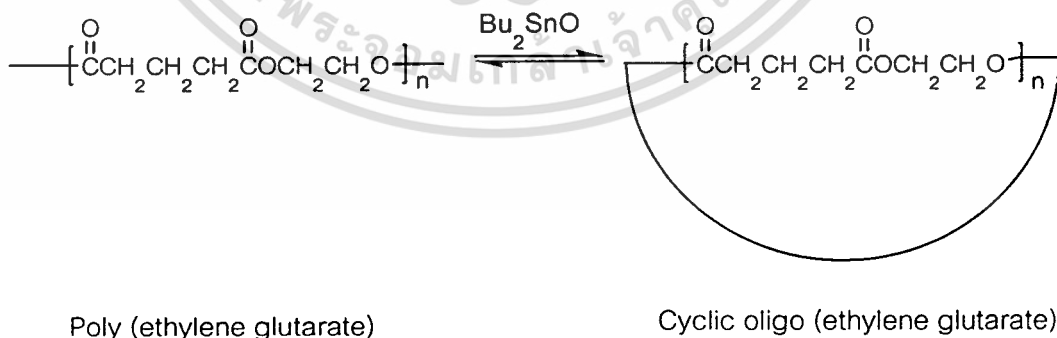
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตตระไฮโซโพรพิลออกโททิตานेट เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 170°C ผลิต กัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีเหลืองอมน้ำตาล โดยมีร้อยละผลผลิต เท่ากับ 60



**สมการที่ 4.1** ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างไดเมทิลกลูตาเรตกับเอทิลีน-ไกลคอล

เมื่อนำ PEG ที่สังเคราะห์ดังกล่าวมาทำปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงโดยรีฟลักซ์ PEG ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน เป็นเวลา 10 วัน และใช้โคบิวทิลทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบวง โอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG) ดังแสดงในสมการที่ 4.2 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็งสีเหลืองอมน้ำตาล มีร้อยละผลผลิต เท่ากับ 88



**สมการที่ 4.2** ปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (PEG)

จากการสังเคราะห์ PEG และ C-PEG ดังกล่าวมาผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองมา ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค GPC, FT-IR, NMR และ DSC ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

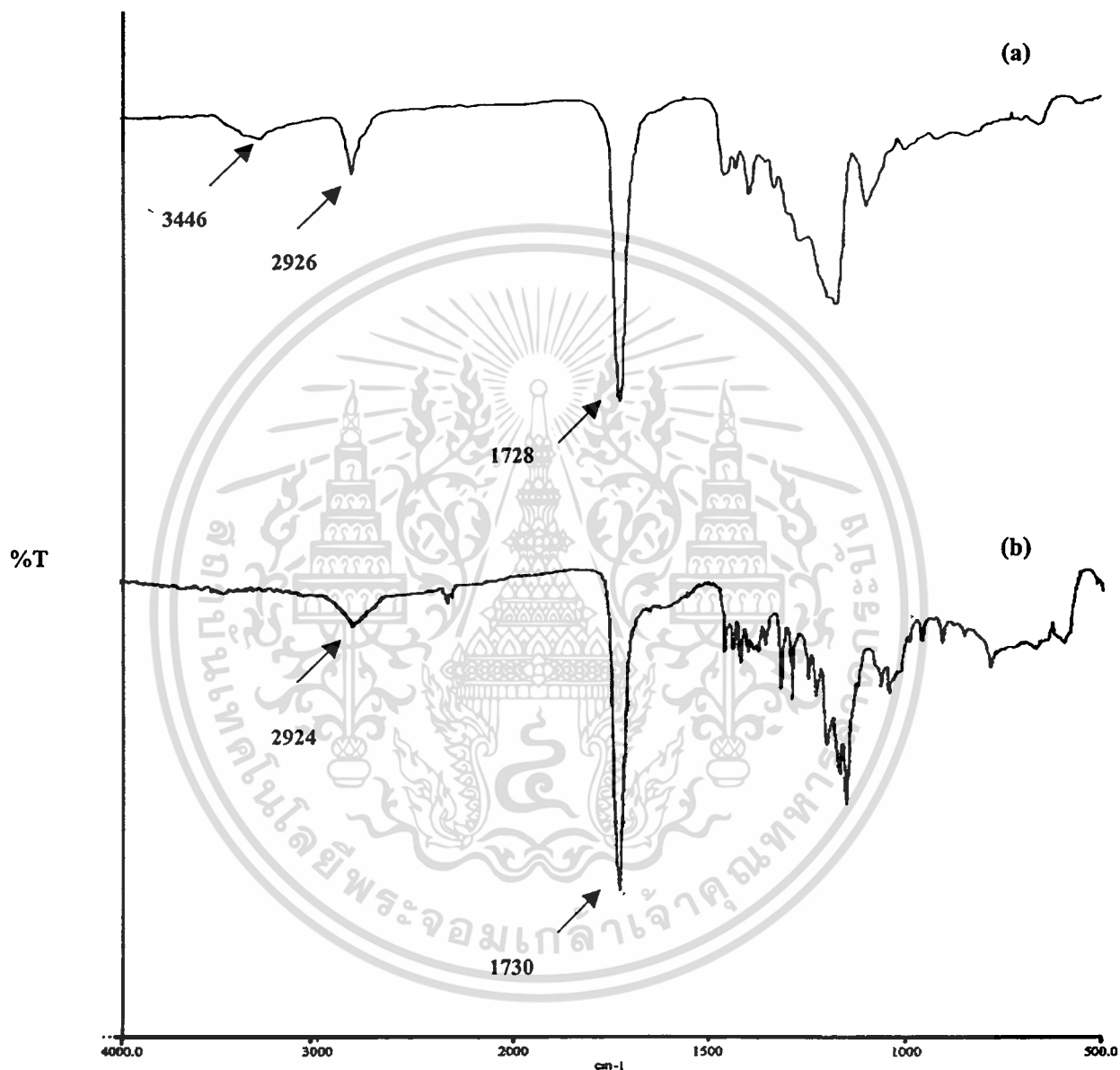
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ PEG และ C-PEG ด้วยเทคนิค GPC, FT-IR, <sup>1</sup>H-NMR และ DSC

เทคนิคการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์	PEG	C-PEG	หมายเหตุ
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลวหนืด สีเหลืองอมน้ำตาล ที่อุณหภูมิห้อง	ของแข็งสีเหลืองอมน้ำตาล	-
GPC	$\bar{M}_w = 3500$ $\bar{M}_n = 1950$ MWD = 1.8	$\bar{M}_w = 570$ $\bar{M}_n = 430$ MWD = 1.31	PEG (ภาคผนวก ข-1) C-PEG (ภาคผนวก ข-2)
FT-IR	$V_{max} 3446 - 3450 \text{ cm}^{-1}$ (Hydroxyl, O-H, s) $V_{max} 2920 - 2925 \text{ cm}^{-1}$ (Aliphatic, C-H, s) $V_{max} 1720 - 1730 \text{ cm}^{-1}$ (Ester, C=O, s)	- - $V_{max} 2920 - 2925 \text{ cm}^{-1}$ (Aliphatic, C-H, s) $V_{max} 1720 - 1730 \text{ cm}^{-1}$ (Ester, C=O, s)	PEG (ภาคผนวก จ-1) C-PEG (ภาคผนวก จ-2)
<sup>1</sup> H-NMR	$\delta 4.10 - 4.50 \text{ ppm}$ (-O-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -, s) $\delta 3.60 - 4.00 \text{ ppm}$ (-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -OH, s) $\delta 2.30 - 2.50 \text{ ppm}$ (-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -, br) $\delta 1.80 - 2.10 \text{ ppm}$ (-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -, br)	$\delta 4.10 - 4.50 \text{ ppm}$ (-O-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -, s) - - $\delta 2.30 - 2.50 \text{ ppm}$ (-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -, br) $\delta 1.80 - 2.10 \text{ ppm}$ (-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -, br)	PEG (ภาคผนวก ง-1) C-PEG (ภาคผนวก ง-2)
DCS	-	$T_m = 127^\circ\text{C}$	C-PEG (ภาคผนวก ฉ-1)

จากตารางที่ 4.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค GPC พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $\bar{M}_w$ ) ของ PEG เท่ากับ 3499 และ C-PEG เท่ากับ 567 ค่า  $\bar{M}_w$  ที่ลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงของ PEG ซึ่งทำให้ PEG ที่เป็นสารโมเลกุลใหญ่ เปลี่ยนเป็น C-PEG ที่เป็นสารโมเลกุลเล็กภายหลังจากการทำปฏิกิริยา จึงทำให้  $\bar{M}_w$  ลดลง และจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR สเปกตรัมของ PEG และ C-PEG นั้นพบสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันหลักที่เหมือนกัน คือ สัญญาณ  $V_{max}$  ตำแหน่งพิกะหว่าง  $2925-2930 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ อะลิฟาติก(C-H) และตำแหน่งพิกะ ระหว่าง  $1728-1730 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่เอสเทอร์ (C=O) สัญญาณ เอกสารนี้ที่แตกต่างกันของ PEG และ C-PEG ที่พบในเทคนิค FT-IR คือ สัญญาณ  $V_{max}$  ตำแหน่งพิกะหว่าง ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

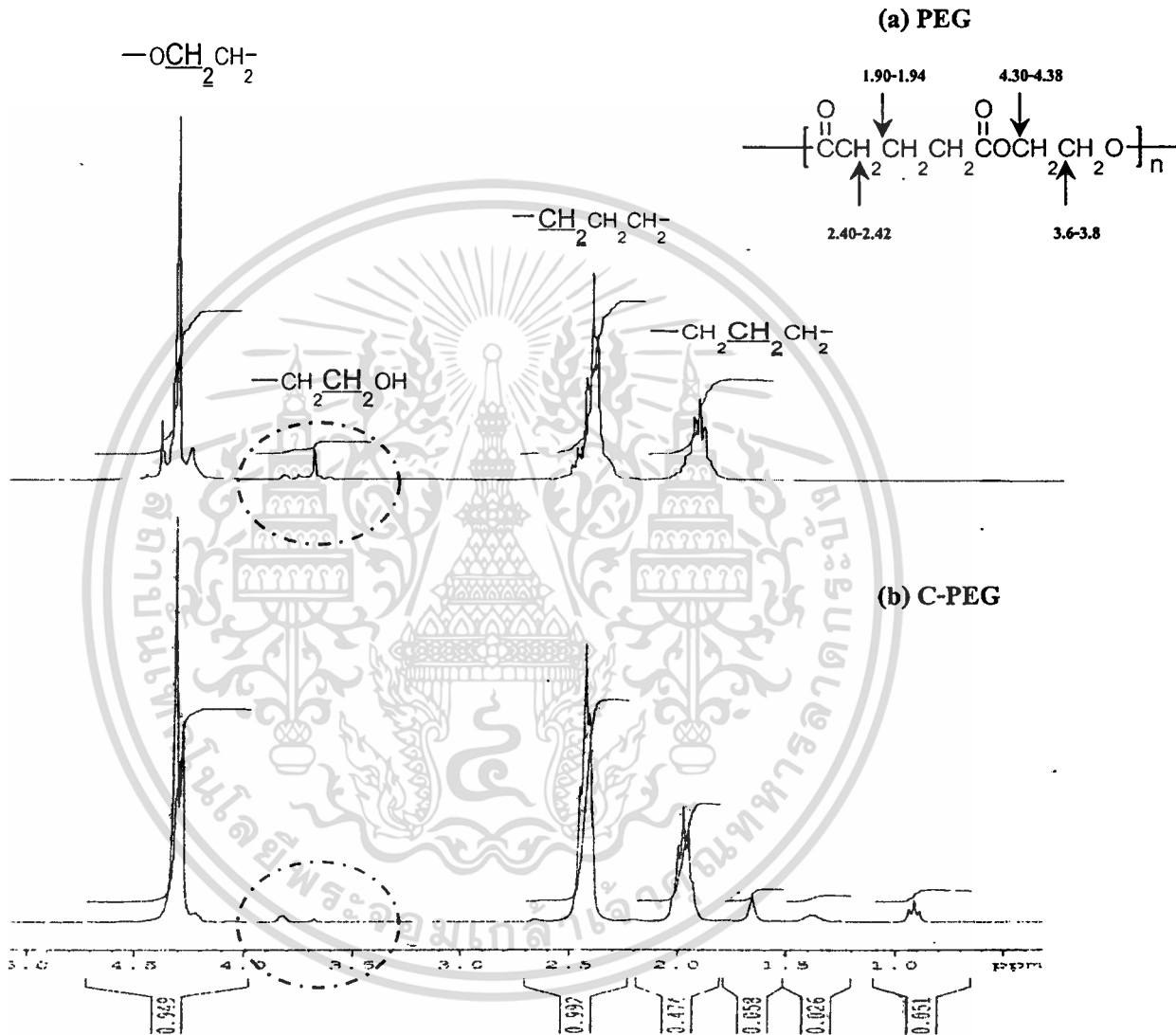
$3445 - 3450 \text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ซึ่งเป็นหมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของ PEG ซึ่งไม่พบใน C-PEG ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงของ PEG ทำให้สัญญาณที่ตำแหน่งดังกล่าวนี้ไม่ปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) PEG ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น และ (b) สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG)

จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  ของ PEG และ C-PEG พบสัญญาณหลักที่ตำแหน่ง  $\delta$  ระหว่าง 4.10 – 4.50 ppm ตำแหน่ง  $\delta$  ระหว่าง 2.30 – 2.50 ppm และตำแหน่ง  $\delta$  ระหว่าง 1.80 – 2.10 ppm ซึ่งเป็นสัญญาณโปรตอนจากสายโซ่หลักของ PEG (รูปที่ 4.4 เอกสารนี้ a) และ C-PEG (รูปที่ 4.4 b) ที่ตำแหน่ง  $(-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_2-)$ ,  $(-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2-)$  และ  $(-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2-)$  ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรทั้งสองจะพบว่าปริมาณความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่ง  $\delta$  ระหว่าง 3.6 – 3.8 ppm ซึ่งเป็นสัญญาณของโปรตอนตำแหน่ง  $(-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{OH})$  ซึ่งแสดงถึงหมู่ปลายสายโซ่ของ PEG และสเปกตรัมของ C-PEG มีค่าลดลง ผลดังกล่าวแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงของ PEG ไปเป็น C-PEG



รูปที่ 4.4 สเปกตร้า  $^1\text{H-NMR}$  ของ (a) PEG ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น และ (b) สารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG)

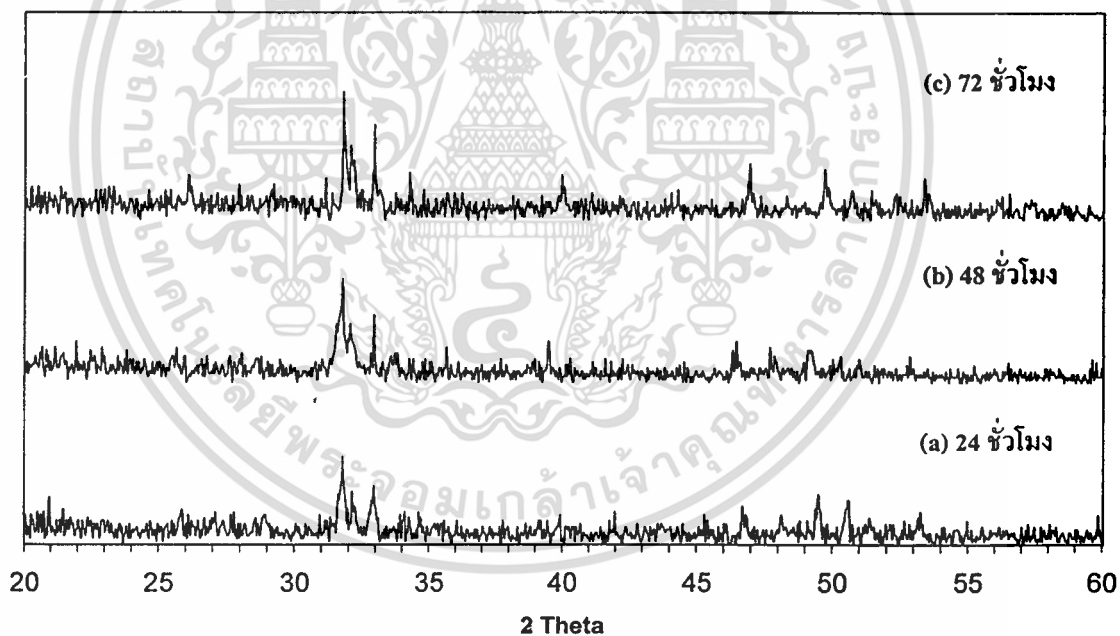
จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค DSC ของ C-PEG พบว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึกของ C-PEG เท่ากับ  $127^\circ\text{C}$  เนื่องจาก C-PEG เป็นของแข็ง ส่วนของ PEG เป็นของเหลวหนืดที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปพาไทต์กับพอลิเอทิลีนไกลคอล (HAp/PEG)

#### 4.3.1 วัฏภาคที่เป็นผลึกจากเทคนิค XRD

เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-Opening Polymerisation, ROP) ของ C-PEG ภายในรูพรุนของ HAp ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 180 200 และ 220°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะสูญญากาศ จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัฏภาคองค์ประกอบหลักของวัสดุเชิงประกอบปรากฏพิกสำคัญที่ตำแหน่ง  $2\theta$  อยู่ในช่วง 30 – 35 องศาซึ่งเป็นวัฏภาคองค์ประกอบหลักของ HAp ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แต่ไม่พบพิกของ PEG เนื่องจาก PEG นั้นเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน ดังนั้นเทคนิค XRD จึงไม่สามารถทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ PEG ได้ต้องใช้เทคนิคอื่นในการตรวจพิสูจน์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

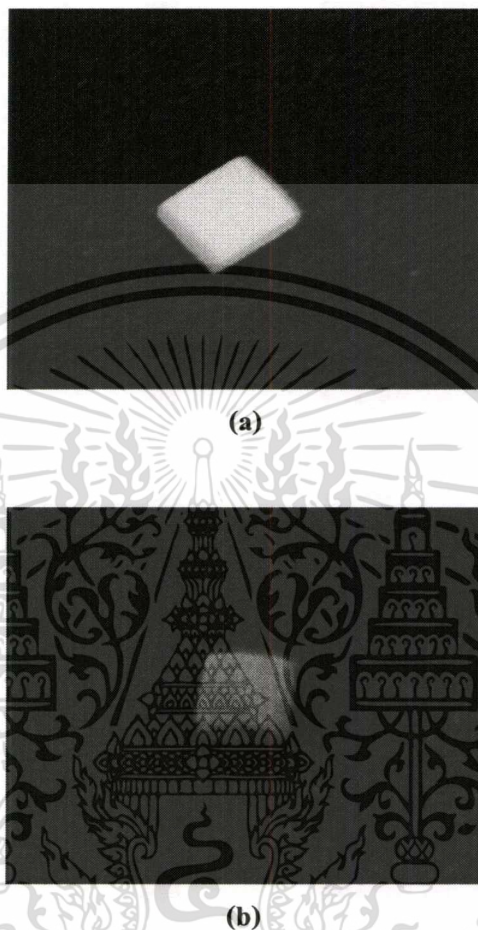


รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา 200°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง

#### 4.3.2 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาค

ลักษณะของก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้โดยการแช่ HAp ที่ขึ้นรูปเป็นก้อนแบบกรองลดความดัน ในสารละลาย C-PEG และตัวเร่งปฏิกิริยาไดบิวทิลทินออกไซด์ จากนั้นนำไปทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเผยแพร่ข้อมูลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปทำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

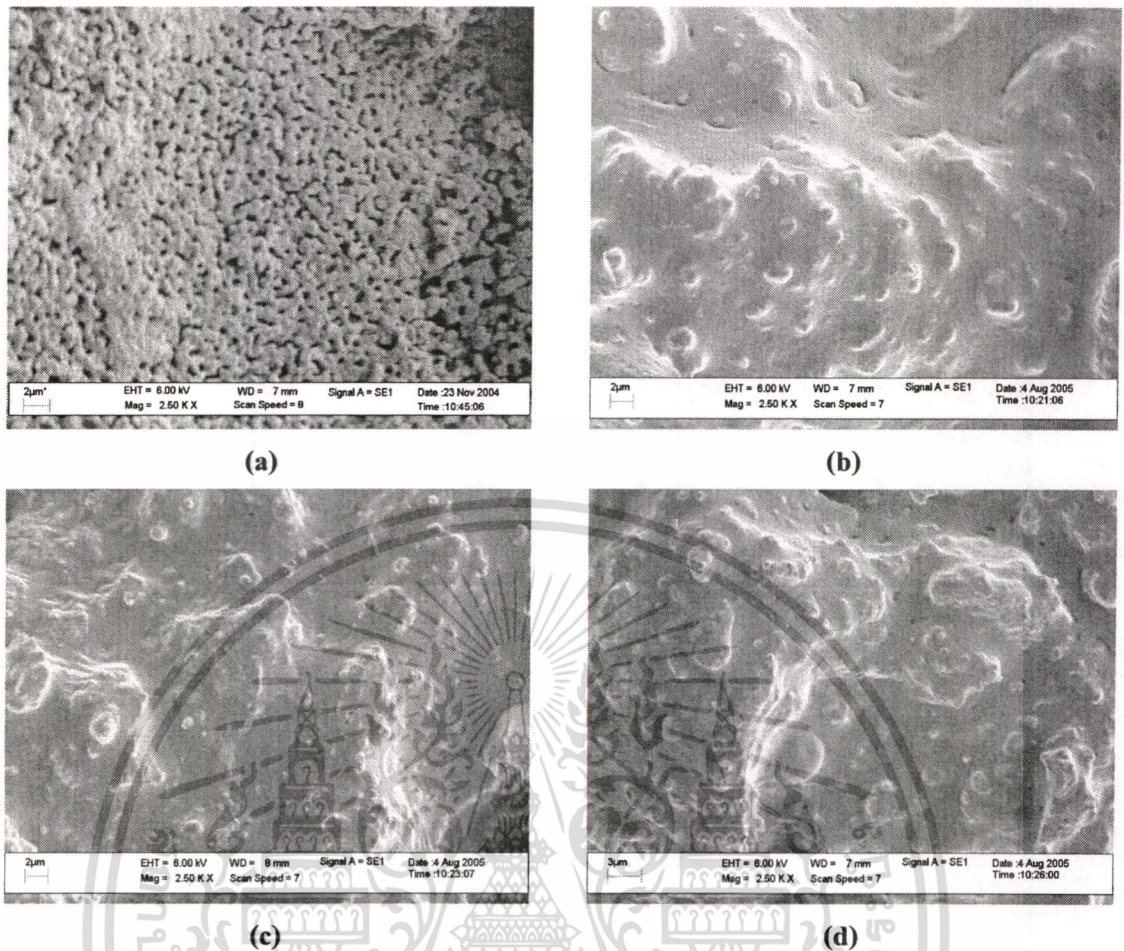
ปฏิกิริยา ROP ที่สภาวะอุณหภูมิ 180, 200 และ 220°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะสุญญากาศ จะมีลักษณะภายนอกเปลี่ยนแปลงไปจากก้อนสีขาว (รูปที่ 4.6 (a)) เป็นก้อนสีเหลืองอมน้ำตาล (รูปที่ 4.6 (b))



**รูปที่ 4.6** ลักษณะทางกายภาพของ (a) HAp บริสุทธิ์ และ (b) วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 48 ชั่วโมง โดยขึ้นรูป HAp แบบกรองลดความดัน

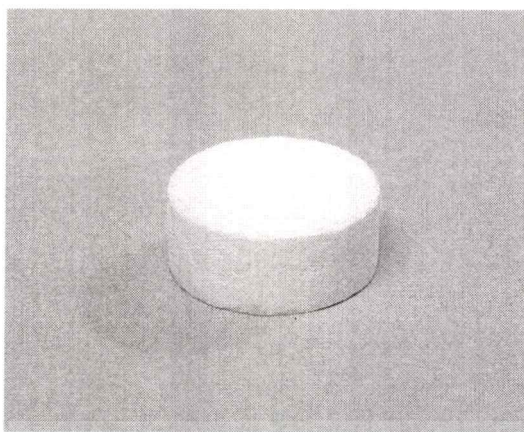
เมื่อนำก้อนวัสดุเชิงประกอบมาศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบทุกตัวอย่างมีชั้นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ปกคลุมอยู่บนผิวผลึกของ HAp ทำให้เห็นขอบเกรนของผลึก HAp ไม่ชัดเจน เปรียบเทียบความแตกต่างดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยรูปที่ 4.7 (a) เป็นภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวภายในก้อน HAp บริสุทธิ์ก่อนการทำปฏิกิริยา ROP เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 (b) (c) และ (d) เป็นภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างจุลภาคของผิวภายในก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.7** ภาพตัดขวางแสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวภายใน (a) HAp บริสุทธิ์ และวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  เวลาในการทำปฏิกิริยา (b) 24 ชั่วโมง (c) 48 ชั่วโมง และ (d) 72 ชั่วโมง (กำลังขยาย 2,500 เท่า)

สำหรับการขึ้นรูป HAp แบบอัดและนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบโดยการแช่ในสารละลาย C-PEG และตัวเร่งปฏิกิริยาไดบิวทิลทินออกไซด์ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยา ROP ที่สภาวะอุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าลักษณะภายนอกนั้นเปลี่ยนแปลง จากเดิมก้อน HAp เป็นสีขาว (รูปที่ 4.8 (a)) เปลี่ยนเป็นก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG สีเหลืองอมน้ำตาล (รูปที่ 4.8 (b))



(a)

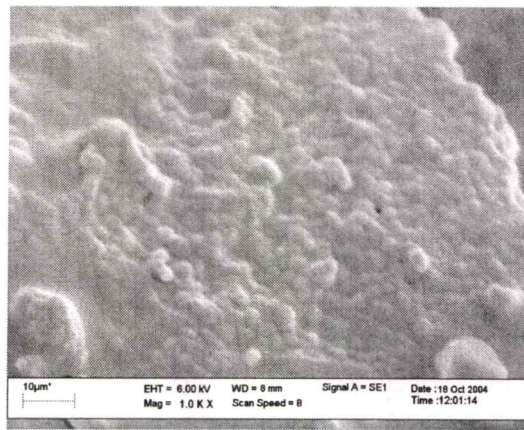


(b)

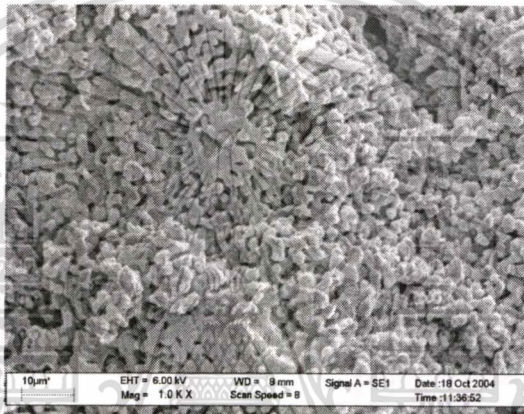
**รูปที่ 4.8** ลักษณะทางกายภาพของ (a) HAp บริสุทธิ์ และ (b) วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสถานะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลา 24 ชั่วโมง โดยขึ้นรูป HAp แบบอัด

เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวภายนอกของก้อนวัสดุเชิงประกอบมีฟิล์มบางของ PEG ปกคลุมอยู่ (รูปที่ 4.9 (a)) เมื่อนำมาผ่าครึ่งเพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวภายใน พบว่าปริมาณฟิล์ม PEG ที่ปกคลุมภายในก้อนวัสดุเชิงประกอบมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณพื้นผิวด้านนอก (รูปที่ 4.9 (b)) ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูปแบบอัดทำให้ผง HAp อัดตัวแน่น เป็นผลให้ปริมาณรูพรุนน้อยกว่าการขึ้นรูปก้อน HAp แบบกรองลดความดันและรูพรุนบางส่วนบนพื้นผิวของก้อน HAp ที่ขึ้นรูปแบบอัด เป็นรูพรุนปิดภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จึงเป็นผลให้สารละลาย C-PEG ไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงใช้เฉพาะก้อน HAp ที่ขึ้นรูปแบบกรองลดความดันในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

**รูปที่ 4.9** ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ (a) พื้นผิวภายนอก และ (b) ภาพตัดขวางบริเวณพื้นผิวภายใน วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง โดยการขึ้นรูปก้อน HAp แบบอัด (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

#### 4.3.3 ความหนาแน่นและปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ

การหาค่าความหนาแน่นของ HAp และวัสดุเชิงประกอบหาได้โดยการแทนที่น้ำและการหาปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบหาได้จากการชั่งน้ำหนักก้อน HAp บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้และจากเทคนิค TGA ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงโดยเทคนิคการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาROP ภายหลังการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG (%โดยน้ำหนัก) ปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG โดยเทคนิค TGA

ลำดับที่	สถานะในการทำปฏิกิริยา		ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )		ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น (%)	น้ำหนักของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ (%โดยน้ำหนัก)	
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ก่อนทำปฏิกิริยา	หลังทำปฏิกิริยา		การชั่งน้ำหนัก	เทคนิค TGA
1	180	24	1.07	1.24	17.02	16.72	17.56
2	180	48	1.07	1.22	14.61	14.36	14.81
3	180	72	1.04	1.18	13.01	12.81	13.43
4	200	24	1.06	1.23	15.62	15.31	16.23
5	200	48	1.08	1.22	12.96	13.46	13.66
6	200	72	1.08	1.21	12.04	13.30	12.50
7	220	24	1.06	1.20	12.84	12.33	12.80
8	220	48	1.07	1.19	12.05	11.65	12.30
9	220	72	1.07	1.18	10.59	10.58	11.73

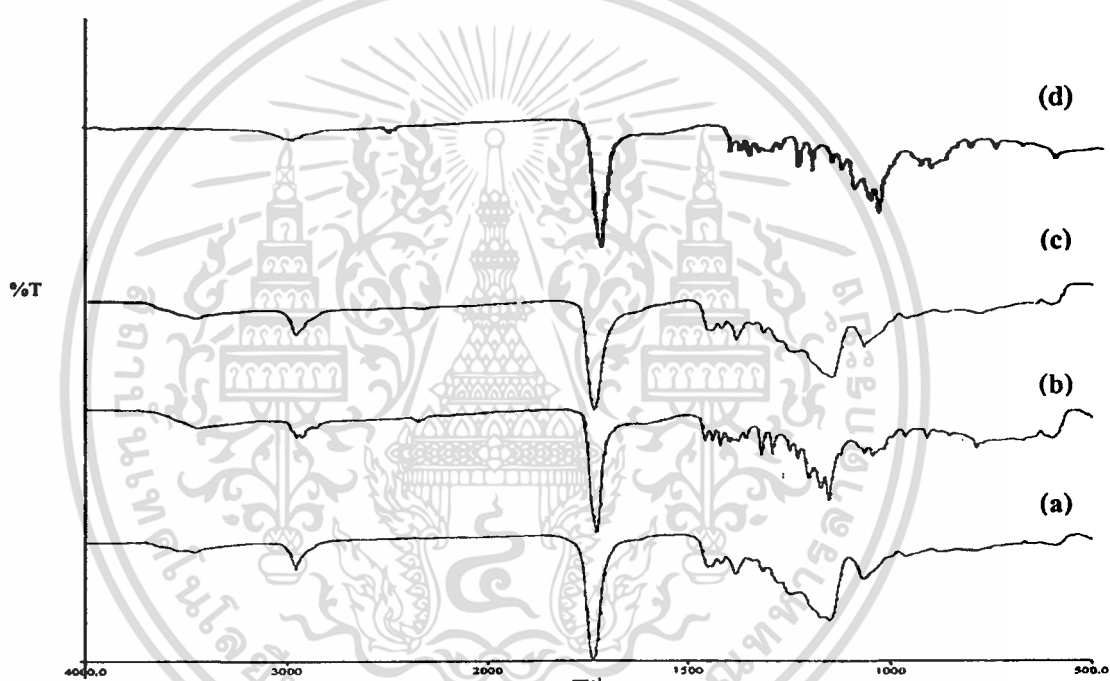
เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงและปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ จากตารางที่ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคงที่ ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PEG เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ดังนั้นที่อุณหภูมิคงที่ การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา ทำให้โมเลกุลของ PEG มีเวลาในการเคลื่อนที่มากขึ้น ทำให้ PEG บางส่วนไหลออกจากก้อนวัสดุเชิงประกอบ และส่งผลให้ปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มลดลงด้วย ในทำนองเดียวกัน ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ความหนืดของ PEG ลดลงได้ และทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของ PEG เคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ทำให้ PEG บางส่วนในก้อนวัสดุเชิงประกอบสามารถไหลออกจากก้อนวัสดุเชิงประกอบ แนวโน้มความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงและปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบจึงมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน

ดังนั้น ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงและปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ แปรผกผันกับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา เนื่องจาก PEG เป็นพอลิเมอร์ของเหลวหนืด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาทำให้ PEG มีความหนืดลดลงและสามารถไหลออกจากก้อนวัสดุเชิงประกอบได้บางส่วน จึงมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิคงที่ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของความหนาแน่นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงลดลงจาก 15.62% เป็น 12.96% และ 12.04% ตามลำดับ และที่เวลาในการทำปฏิกิริยา คงที่ 48 ชั่วโมง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 180 200 และ 220°C พบว่าแนวโน้มของความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงลดลง จาก 14.61% เป็น 12.96% และ 12.05% ตามลำดับ

#### 4.3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ

เมื่อนำก้อนวัสดุเชิงประกอบ ไปสกัดแยกส่วนของพอลิเมอร์ด้วยตัวทำละลาย คลอโรฟอร์มและนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ได้สเปกตราดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นสเปกตราของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C เวลา 24 48 และ 72 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 สเปกตรา FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สถานะอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา (a) 24 ชั่วโมง (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับ (d) สเปกตราของ C-PEG ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง

จากรูปที่ 4.10 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้พบว่าสเปกตราที่ได้จากวัสดุเชิงประกอบกับ C-PEG สัญญาณ  $V_{max}$  ที่ตำแหน่งระหว่าง 3,445 – 3,450  $cm^{-1}$  ของ PEG ที่ได้จากวัสดุเชิงประกอบซึ่งแสดงถึงหมู่ปลายสายโซ่ของ PEG หมู่ไฮดรอกซี (O-H) แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของ C-PEG ที่แทรกตัวอยู่

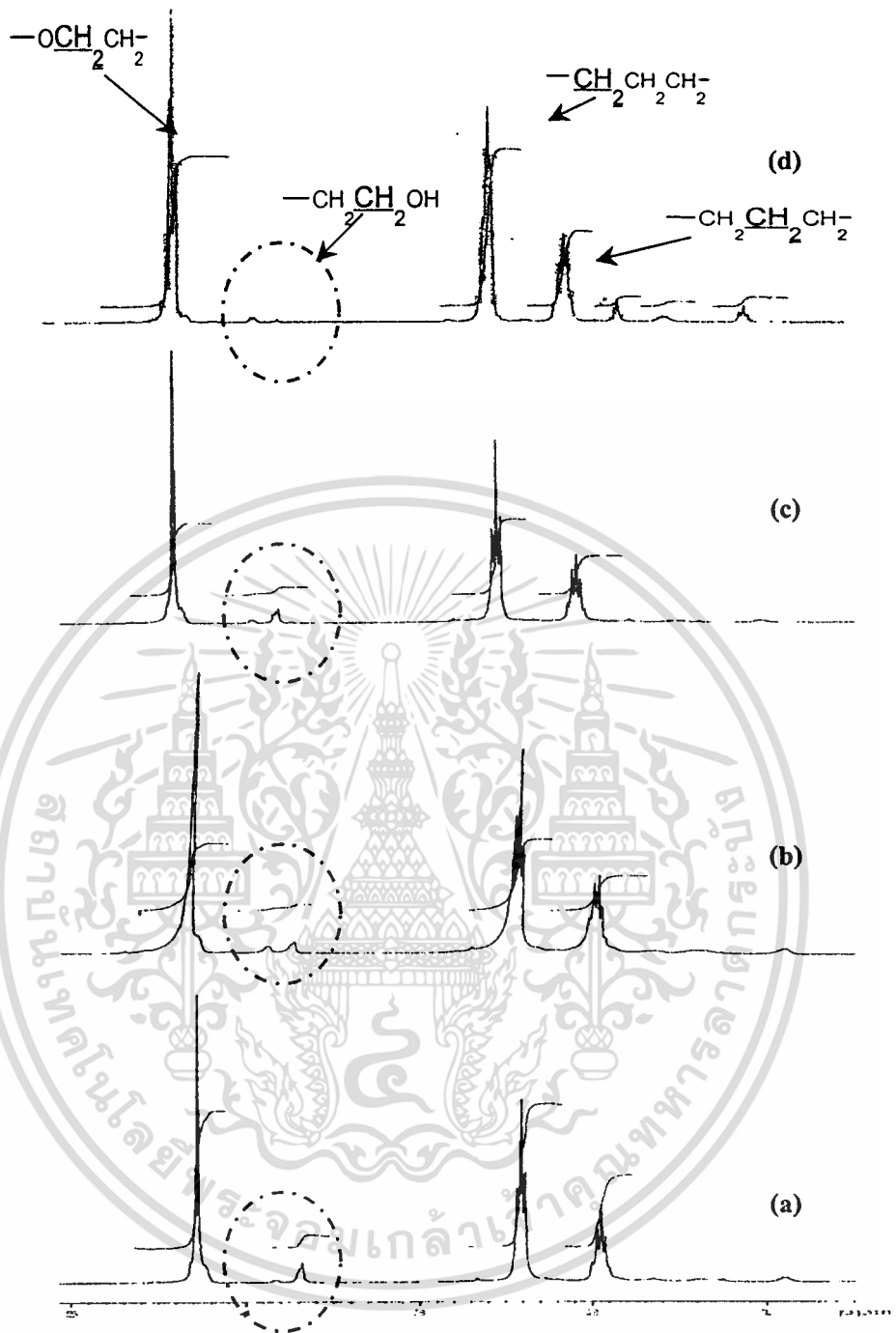
เอกสารนี้ ภายใต้อุปกรณ์ของ HAp เป็น PEG ที่สถานะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมงว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง ในขณะที่สภาวะอุณหภูมิ 180 และ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง นั้นก็แสดงผลในทำนองเดียวกัน (ภาคผนวก จ)

ผลจากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR สามารถสนับสนุนโดยนำวัสดุเชิงประกอบไปสกัดแยกส่วนของพอลิเมอร์ด้วยตัวทำละลายดิคลอไรด์ฟอรัม (CDCl<sub>3</sub>) และนำสารที่สกัดได้มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค <sup>1</sup>H-NMR ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าปริมาณความเข้มของสัญญาณของ -CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH ซึ่งแสดงถึงหมู่ปลายสายโซ่ ที่ตำแหน่ง δ ประมาณ 3.6 – 3.8 ppm ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (a) (b) และ (c) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารตั้งต้น C-PEG ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (d) ซึ่งผลดังกล่าวสนับสนุนผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ที่กล่าวตอนต้น ได้อย่างชัดเจนว่า C-PEG เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงเป็นสายโซ่ PEG ในทำนองเดียวกันที่สภาวะอุณหภูมิ 180 และ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง ก็ให้ผลสอดคล้องกัน (ภาคผนวก ง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.11** การเปรียบเทียบสเปกตร้า  $^1\text{H-NMR}$  ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP  $200^\circ\text{C}$  และเวลา (a) 24 ชั่วโมง (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง ในการทำปฏิกิริยากับ (d) สเปกตร้าของ C-PEG ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มาทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค GPC โดยการนำวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มาสกัดส่วนของพอลิเมอร์ออกด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน และระเหยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนออก จากนั้นละลายสารที่สกัดได้นี้ด้วยตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) เกรด HPLC เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะในการทำปฏิกิริยา ROP ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ PEG, C-PEG และน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค GPC

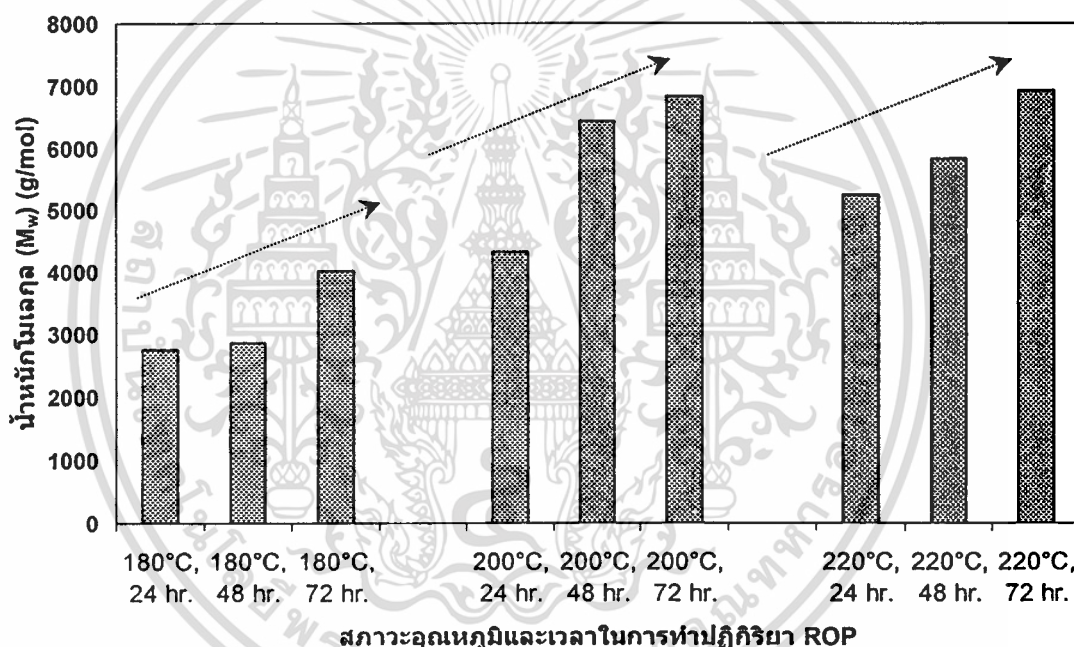
ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	$\bar{M}_n$	$\bar{M}_w$	MWD
1	PEG	-	-	1950	3500	1.80
2	C-PEG	-	-	430	570	1.31
3	HAp/PEG	180	24	2130	2760	1.29
4		180	48	2120	2870	1.35
5		180	72	2780	4030	1.45
6	HAp/PEG	200	24	2590	4320	1.67
7		200	48	2860	6430	2.25
8		200	72	2900	6840	2.35
9	HAp/PEG	220	24	3630	5250	1.45
10		220	48	3980	5820	1.46
11		220	72	4829	6920	1.43

จากตารางที่ 4.3 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $\bar{M}_w$ ) ของ PEG ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ROP มีค่าอยู่ในช่วง 2,700 – 6,900 กรัมต่อโมล โดยตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ คือ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ROP โดยตัวแปรแรกคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของ C-PEG ให้สามารถเคลื่อนที่มาทำปฏิกิริยาและเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลขนาดเล็กของ C-PEG หลายๆ สายโซ่เกิดเป็นสายโซ่โมเลกุลของ PEG ที่มีขนาดใหญ่ และได้พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ตัวแปรที่สองคือ เวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคงที่ เวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลของ C-PEG มีระยะเวลามากพอที่จะเคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายโซ่โมเลกุลของ C-PEG หลายๆ สายโซ่ เกิดเป็นสายโซ่โมเลกุลของ PEG ที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น

กล่าวโดยสรุปว่า น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบแปรผันโดยตรงกับ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ตัวอย่างเช่น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา คงที่ 24 ชั่วโมง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 180 200 และ 220°C พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก เท่ากับ 2,758 4,323 และ 5,250 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย โดยน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คงที่ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก เท่ากับ 4,323 6,434 และ 6,839 ตาม ลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงแนวโน้มของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ROP ต่างๆ

#### 4.3.5 สมบัติด้านความแข็งแรงกด

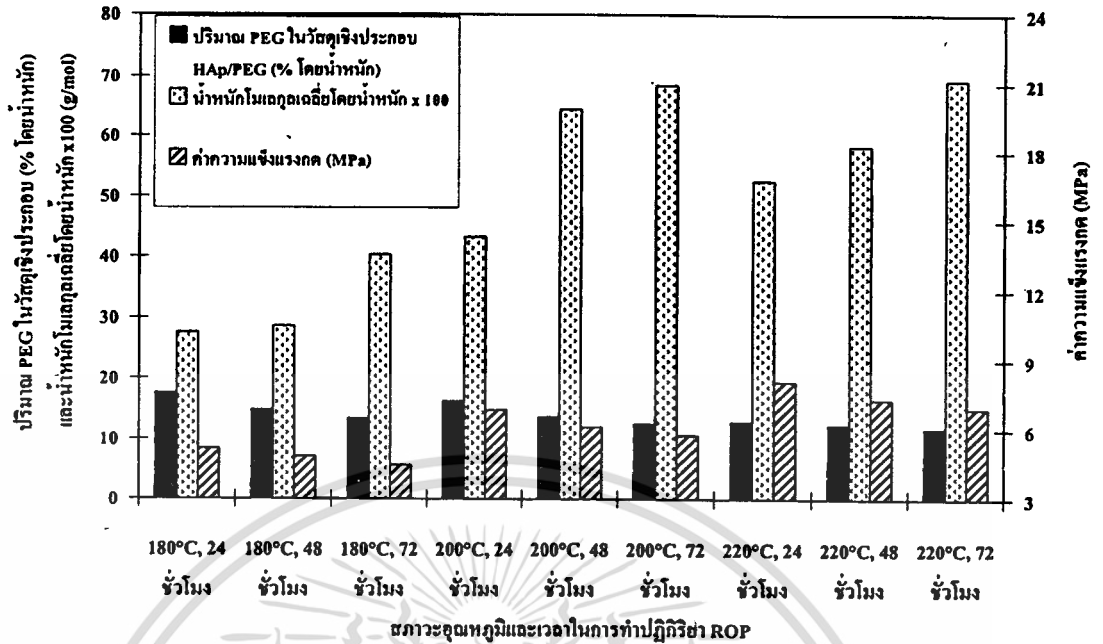
HAp เป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ เปราะและแตกง่าย โดยค่าความแข็งแรงกดของก้อน HAp แบบมีรูพรุนเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่ อุณหภูมิ 180 200 และ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงกดของก้อน HAp บริสุทธิ์กับและก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยา ROP

ลำดับที่	ตัวอย่าง	สถานะในการทำปฏิกิริยา ROP		$M_w$	ปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ* (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความแข็งแรงกด (MPa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกด**	ค่ามอดุลัสกดอัด (MPa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดุลัสกดอัด***
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)						
1	HAp บริสุทธิ์	-	-	-	-	3.4	0.19	29.2	1.22
2	HAp/PEG	180	24	2760	17.56	8.4	1.65	139.4	1.36
3		180	48	2870	14.81	7.1	0.22	123.1	1.43
4		180	72	4030	13.43	5.6	0.27	104.1	0.76
5	HAp/PEG	200	24	4320	16.23	14.8	0.77	189.1	1.24
6		200	48	6430	13.66	12.0	0.74	153.1	1.33
7		200	72	6840	12.50	10.6	0.70	126.8	1.73
8	HAp/PEG	220	24	5250	12.80	19.4	1.13	207.6	1.44
9		220	48	5820	12.30	16.5	0.44	178.8	1.33
10		220	72	6920	11.73	15.0	0.88	148.4	1.42
11	Cancellous bone [21, 22]	-	-	-	-	2-13	-	-	-
12	Cortical bone [23]	-	-	-	-	100-230	-	-	-

หมายเหตุ \* ปริมาณ PEG วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

\*\* , \*\*\* การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัด แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PEG น้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG และค่าความแข็งแรงกดของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่เตรียมได้ที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการทำปฏิกิริยา ROP

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสกดอัดของก้อน HAp เทียบกับก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG พบว่าค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสกดอัดของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นจากก้อน HAp บริสุทธิ์ โดยค่าความแข็งแรงกดที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 1.5 – 5.7 เท่า และค่ามอดูลัสกดอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 3.5 – 7.2 เท่า จากผลการทดลองที่ได้สนับสนุนฐานว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสกดอัดของวัสดุเชิงประกอบ คือ ปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งค่าทั้งสองแปรผัน โดยตรงกับปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ กล่าวคือค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก PEG ที่แทรกตัวอยู่ภายในรูพรุนของก้อน HAp มีความยืดหยุ่นสูงกว่าก้อน HAp ดังนั้น PEG จึงช่วยปรับปรุงพฤติกรรมรับแรงและการแตกหักของก้อน HAp ซึ่งมีลักษณะแข็งเปราะ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุเชิงประกอบ PEG จะทำหน้าที่รับแรงและส่งผ่านแรงไปทั่วก้อนวัสดุเชิงประกอบทำให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก้อน HAp บริสุทธิ์

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงกดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้กับกระดูกในร่างกายมนุษย์ พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในทุกๆ สภาวะอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ROP มีค่าความแข็งแรงกดในช่วง 5.6 – 15.0 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับกระดูกในส่วนของ Cancellous bone ที่

มีค่าความแข็งแรงกดยู่ในช่วง 2 – 13 MPa จึงคาดว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้น่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในส่วนของกระดูกที่มีรูพรุนหรือส่วนที่ต้องการรับแรงได้ที่อยู่ในช่วงดังกล่าวได้

เนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ผ่านปฏิกิริยา ROP คือ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีผลต่อปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบ และค่าความแข็งแรงกดยที่เพิ่มขึ้นของก้อนวัสดุเชิงประกอบเป็นผลเนื่องมาจาก PEG ที่แทรกตัวอยู่ภายในรูพรุน เข้าไปปรับปรุงพฤติกรรมรับแรงของก้อนวัสดุเชิงประกอบ ดังอธิบายในตอนต้น ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงกดยมีค่าเพิ่มขึ้น ในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความแข็งแรงกดยมีค่าลดลง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดลองนี้ไม่สามารถเพิ่มทั้งปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบไปพร้อมกันได้ ซึ่งหัวข้อที่ 4.3.3 ได้อธิบายถึงปริมาณ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบแปรผกผันกับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา และหัวข้อที่ 4.3.4 ได้อธิบายว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าปริมาณ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบน่าจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงกดยมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PEG

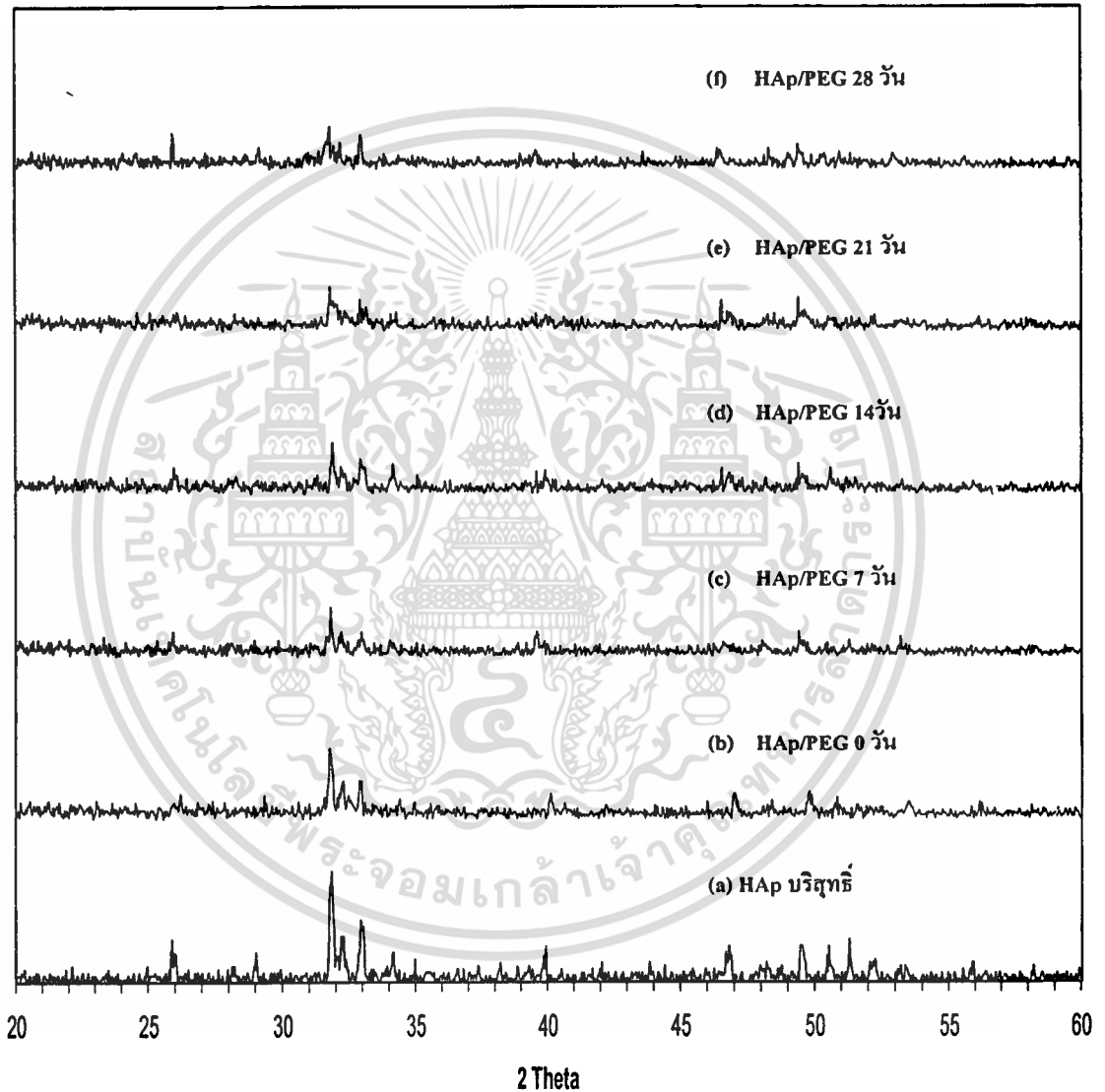
#### 4.3.6 สมบัติความว่องไวทางชีวภาพ

เมื่อนำวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG แช่ในสารละลาย SBF ซึ่งเป็นสารละลายที่มีความอิ่มตัววดยิ่ง (Supersaturated solution) ของไฮดรอกซีอะปาทิตหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮดรอกซีอะปาทิตและฟอสเฟอรัส ที่เป็นองค์ประกอบหลักในการก่อผลึกของ HAp ที่อุณหภูมิ 37.5°C (อุณหภูมิร่างกายมนุษย์) เป็นระยะเวลา 7 - 28 วัน โดยการทดสอบทำในระบบที่มีการไหลผ่าน (Flowing system) ของสารละลาย SBF ที่อัตราการไหล เท่ากับ 130 มิลลิลิตรต่อวัน

รูปที่ 4.14 แสดงผลจากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของก้อนวัสดุเชิงประกอบภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งเทคนิคดังกล่าวแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคที่เป็นผลึกบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าพิกที่ปรากฏทั้งหมดเป็นพิกของ HAp ซึ่งมีพิกที่สำคัญในช่วง  $2\theta$  ที่ 30 – 35 องศา โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF ทุกช่วงเวลา ยังปรากฏเป็นสามพิกหลักเช่นเดียวกับก้อน HAp บริสุทธิ์และก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF แต่ฐานพิกจะมีลักษณะกว้างขึ้นและการแยกของพิกทั้งสาม (Peak resolution) มีความชัดเจนลดลงเมื่อระยะเวลาการแช่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการก่อตัวของผลึก HAp ขนาดเล็กจากสารละลาย SBF บนพื้นผิวของก้อนวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลึก HAp ลักษณะดังกล่าวจะทำให้ลักษณะของพิกแตกต่าง

จากผลึก HAp ที่เกิดจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงในก้อน HAp บริสุทธิ์และก้อนวัสดุเชิงประกอบ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

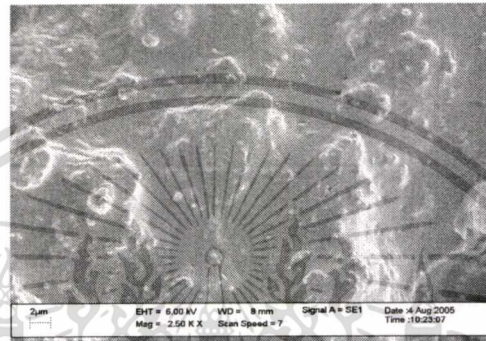
ก่อนแช่ในสารละลาย SBF อย่างไรก็ตามชั้นผลึกของ HAp ที่ตกผลึกจากสารละลาย SBF น่าจะมีความหนาไม่มากพอ จึงไม่สามารถบดบังสัญญาณจากผลึก HAp ที่เกิดจากการแคลไซน์ในก้อนวัสดุเชิงประกอบได้ ทำให้พีกที่ปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังกล่าวเกิดการซ้อนทับกันระหว่างพีกของ HAp ในวัสดุเชิงประกอบกับพีกของ HAp ที่เกิดจากการตกผลึกในสารละลาย SBF



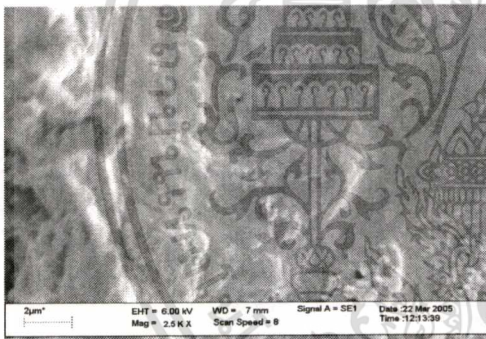
**รูปที่ 4.14** รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (a) HAp บริสุทธิ์ (b) วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG (200°C, 48 ชั่วโมง) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และวัสดุเชิงประกอบภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นเวลา (c) 7 วัน (d) 14 วัน (e) 21 วัน และ (f) 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

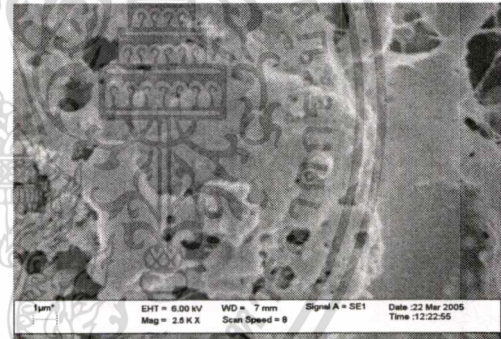
รูปที่ 4.15 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของก้อนวัสดุเชิงประกอบก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF ด้วยเทคนิค SEM พบว่าโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิววัสดุเชิงประกอบก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 – 28 วัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ แต่เมื่อนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบทั้งก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 – 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16



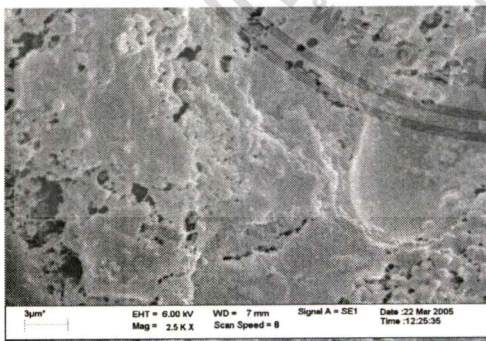
(a) HAp/PEG ก่อนแช่สารละลาย SBF



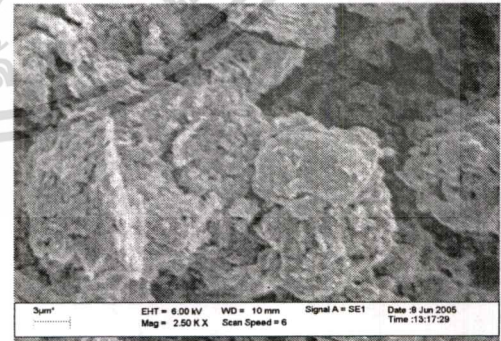
(b) HAp/PEG หลังแช่สารละลาย SBF 7 วัน



(c) HAp/PEG หลังแช่สารละลาย SBF 14 วัน



(d) HAp/PEG หลังแช่สารละลาย SBF 21 วัน



(e) HAp/PEG หลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของผิววัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG (200°C เวลา 48 ชั่วโมง) (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และหลังการแช่ในสารละลาย SBF ระยะเวลา (b) 7 วัน (c) 14 วัน (d) 21 วัน และ (e) 28 วัน (กำลังขยาย 2,500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมุ่งเน้นให้ได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

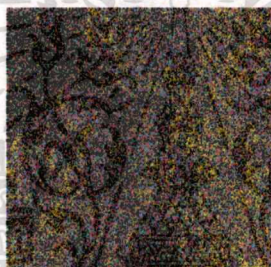
● Calcium ● Phosphorous ● Carbon

(a)



Element	Weight %	Atomic %
C K	9.26	31.71
P K	25.79	25.75
Ca K	64.95	42.54
Total	100	100

(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	60.29	82.19
P K	13.23	6.99
Ca K	26.48	10.82
Total	100	100

(c)



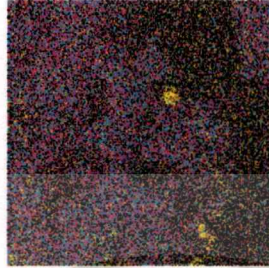
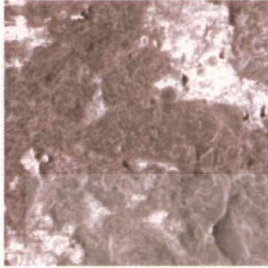
Element	Weight %	Atomic %
C K	45.52	69.02
P K	15.43	12.47
Ca K	39.05	18.51
Total	100	100

**รูปที่ 4.16** ภาพถ่าย SEM-EDS แสดงธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวและการกระจายของธาตุนบนพื้นผิว (a) ก่อนHAp บริสุทธิ์และวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG (200°C เวลา 48 ชั่วโมง) (b) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และหลังการแช่ในสารละลาย SBF ระยะเวลา (c) 7 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

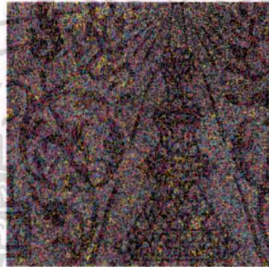
● Calcium    ● Phosphorous    ● Carbon

(d)



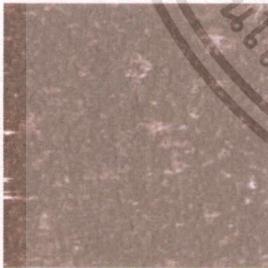
Element	Weight %	Atomic %
C K	32.14	59.05
P K	22.17	15.79
Ca K	45.70	25.16
Total	100	100

(e)



Element	Weight %	Atomic %
C K	29.63	54.48
P K	20.79	17.25
Ca K	49.58	28.27
Total	100	100

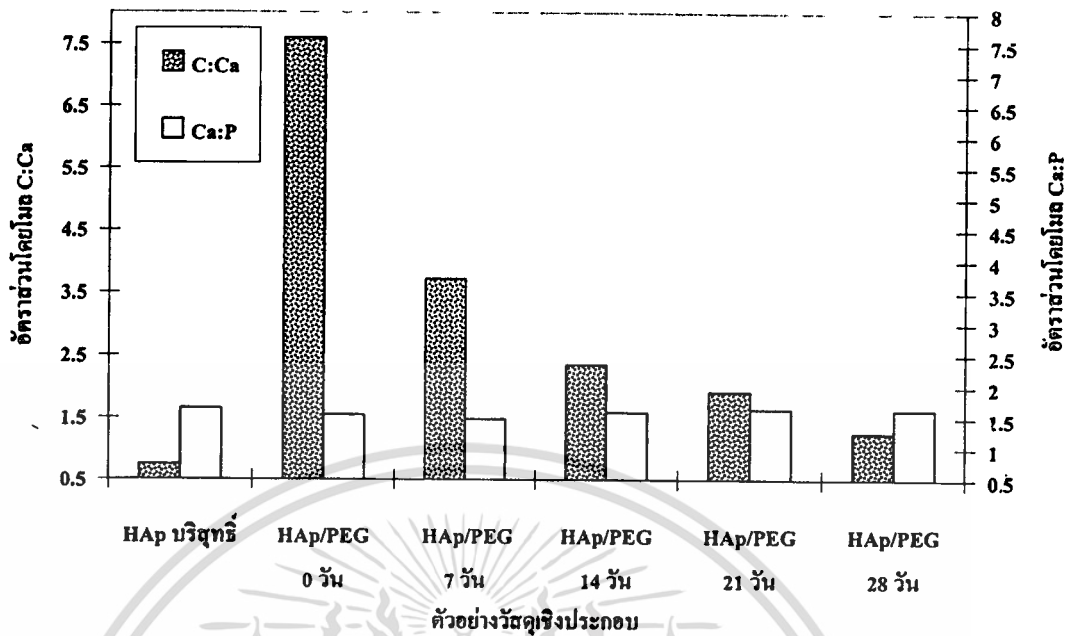
(f)



Element	Weight %	Atomic %
C K	19.89	44.01
P K	26.61	21.31
Ca K	53.50	34.68
Total	100	100

รูปที่ 4.16 (ต่อ) ภาพถ่าย SEM-EDS แสดงธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวและการกระจายของธาตุนบนพื้นผิวหลังการแช่ในสารละลาย SBF ระยะเวลา (d) 14 วัน (e) 21 วัน และ (f) 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของ HAp บริสุทธิ์ กับ วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG (200°C เวลา 48 ชั่วโมง) ก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 - 28 วัน

รูปที่ 4.16 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของก้อน HAp และก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF ด้วยเทคนิค SEM-EDS เมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุบนพื้นผิวของก้อน HAp บริสุทธิ์กับก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (a) และ 4.16 (b) ตามลำดับ พบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสมีค่าลดลง จากปริมาณธาตุคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวของก้อนวัสดุเชิงประกอบ สามารถอธิบายได้ว่าวัสดุเชิงประกอบถูกปกคลุมด้วยฟิล์มบางของ PEG ซึ่ง PEG มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอน ดังนั้นจากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM-EDS จึงพบปริมาณของธาตุคาร์บอนบนพื้นผิววัสดุเชิงประกอบค่อนข้างสูง ซึ่งฟิล์มบางของ PEG ที่ปกคลุมบนพื้นผิววัสดุเชิงประกอบดังกล่าวบดบังสัญญาณบางส่วนของธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสบนพื้นผิวของก้อน HAp ทำให้ปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง และในรูปที่ 4.17 แสดงอัตราส่วน โดยโมลของ C:Ca และ Ca:P ของก้อน HAp บริสุทธิ์ กับก้อนวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF พบว่าเมื่อนำก้อน HAp บริสุทธิ์มาเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ ทำให้อัตราส่วน โดยโมลของ C:Ca มีค่าเพิ่มขึ้น และอัตราส่วน โดยโมลของ Ca:P มีค่าลดลง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับปริมาณของธาตุบนพื้นผิวของก้อน HAp บริสุทธิ์และก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้ แปรเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

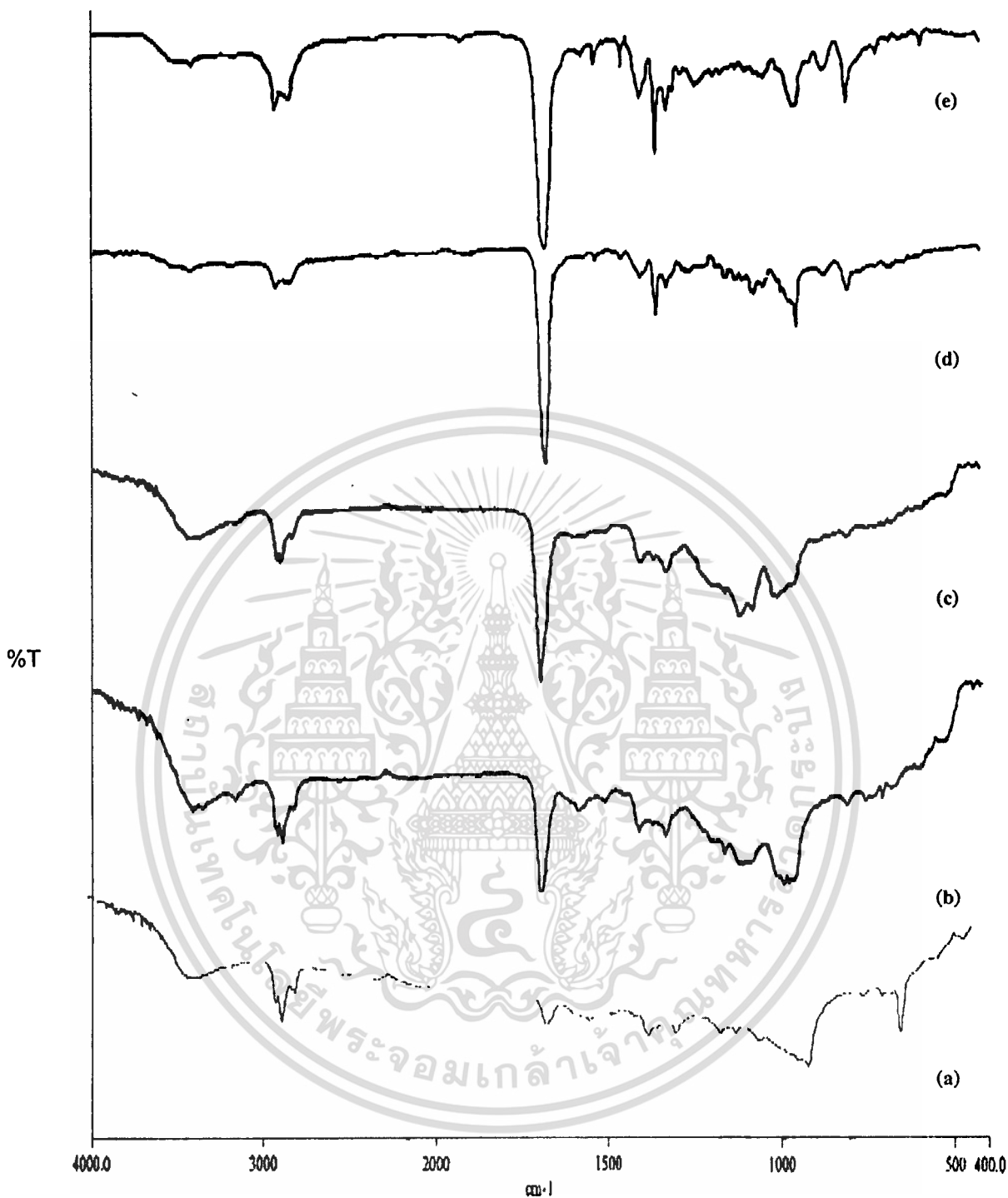
ในรูปที่ 4.16 (b) – 4.16 (f) เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของก้อนวัสดุเซิงประกอบก่อนและหลังการแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 – 28 วัน ด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนบนพื้นผิววัสดุเซิงประกอบลดลง ภายหลังจากแช่วัสดุเซิงประกอบในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7 วันและมีแนวโน้มลดลงประมาณ 25 -35% ของปริมาณคาร์บอนบนพื้นผิววัสดุเซิงประกอบ เมื่อระยะเวลาการแช่วัสดุเซิงประกอบในสารละลาย SBF เพิ่มขึ้น เป็น 28 วัน ในขณะที่ปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 39.0 – 53.5 % โดยน้ำหนัก และ 15.4 – 26.6 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลดังกล่าวสามารถสรุปเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของธาตุองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 อัตราส่วนโดยโมล C:Ca ภายหลังจากแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 วัน มีค่าลดลง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจาก พิล์มบาง PEG ที่ปกคลุมพื้นผิวของวัสดุเซิงประกอบเกิดการสลายตัวในระหว่างที่ทำการแช่วัสดุเซิงประกอบในสารละลาย SBF ในทางตรงข้ามอัตราส่วนโดยโมล Ca:P มีการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนนัก และมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนโดยโมล Ca:P ของ HAp บริสุทธิ์ ทั้งนี้ผลดังกล่าวน่าจะเนื่องมาจากในระยะแรกที่แช่ในสารละลาย SBF สัตถุณของแคลเซียมและฟอสฟอรัส โดยส่วนใหญ่มาจาก HAp ที่เกิดจากการแคลไซน์ในก้อนวัสดุเซิงประกอบ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่ ก่อให้เกิดชั้น HAp ที่ตกผลึกจากสารละลาย SBF สัตถุณของแคลเซียมและฟอสฟอรัสในช่วงหลังจึงมาจากชั้นของ HAp ที่เกิดจากการตกผลึกร่วมกับ HAp ในก้อนวัสดุเซิงประกอบ จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนโดยโมล Ca:P ที่ชัดเจนภายหลังจากแช่ในสารละลาย SBF

เมื่อนำวัสดุเซิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP สภาวะอื่นๆ ไปแช่ในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 7 – 28 วัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของก้อนวัสดุเซิงประกอบให้ผลแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมล C:Ca และ Ca:P (ตารางที่ 4.5) เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนโดยโมลของ C:Ca และ Ca:P ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยา ROP ก่อนและหลังการแช่วัสดุเชิงประกอบในสารละลาย SBF เป็นระยะเวลา 28 วัน

สถานะในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ		อัตราส่วนโดยโมลของ C:Ca		อัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P	
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ก่อนแช่ในสารละลาย SBF	หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน	ก่อนแช่ในสารละลาย SBF	หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน
HAp บริสุทธิ์ที่สังเคราะห์ได้		0.74	-	1.65	-
180	24	14.37	1.46	1.36	1.58
	48	16.32	0.82	1.43	1.69
	72	9.78	0.71	1.61	1.74
200	24	9.40	2.13	1.56	1.60
	48	7.60	1.26	1.55	1.63
	72	6.24	1.83	1.60	1.60
220	24	2.74	1.36	1.64	1.68
	48	1.13	0.87	1.66	1.64
	72	2.45	0.90	1.65	1.63

สารละลาย SBF ก่อนและหลังการแช่วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ถูกนำมาสกัดด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนและระเหยตัวทำละลายออก จากนั้นนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อศึกษาการสลายตัวของฟิล์มบาง PEG ที่ปกคลุมบนพื้นผิววัสดุเชิงประกอบภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบในสารละลาย SBF พบว่าพิกัดสำคัญที่แสดงถึงหมู่เอสเทอร์ ที่ตำแหน่ง  $V_{max}$  ในช่วง  $1,725 - 1,730 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงหมู่ฟังก์ชันหลักของ PEG ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าการหลุดออกของ PEG แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่า PEG นั้นเกิดการหลุดออกมาในรูปแบบใด โดยพบได้ในทุกช่วงเวลาของการแช่ในสารละลาย SBF ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และพบในวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะในการทำปฏิกิริยา ROP ที่อุณหภูมิ 180 และ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 48 และ 72 ชั่วโมง แสดงผลในทำนองเดียวกัน (ภาคผนวก จ)



**รูปที่ 4.18** สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 วัน (b) 0 - 7 วัน (c) 8 - 14 วัน (d) 15 - 21 วัน และ (e) 22 - 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลงานวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะ

### 5.1 การสังเคราะห์วัสดุคอปไฮดรอกซีแอปาทาไทต์และการขึ้นรูป

งานวิจัยนี้สังเคราะห์ HAp ที่มีอัตราส่วนโดยโมล Ca:P อยู่ในช่วง 1.56 – 1.67 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนโดยโมล Ca:P ทางทฤษฎีของ HAp และ HAp ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาเตรียมเป็นก้อนเซรามิกส์ที่มีรูพรุน โดยการเผาที่อุณหภูมิ 1100°C ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 1.04 – 1.07 g/cm<sup>3</sup> และมีค่าความแข็งแรงกดเฉลี่ยเท่ากับ 3.41 MPa ค่ามอดูลัสกดเฉลี่ยเท่ากับ 29.22 MPa

### 5.2 การสังเคราะห์วัสดุคอปพอลิเอทิลีนกลูตาเรตและสารประกอบวงโพลิโกลิเอทิลีน-กลูตาเรต

PEG ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลอมเหลืองที่อุณหภูมิห้อง  $\bar{M}_w$  เท่ากับ 3,500 กรัมต่อโมล  $\bar{M}_n$  เท่ากับ 1,950 กรัมต่อโมล MWD เท่ากับ 1.8 และนำ PEG ที่สังเคราะห์ได้มาสังเคราะห์สารประกอบวงด้วยปฏิกิริยาดี-พอลิเมอไรเซชันแบบปิดวงได้สารประกอบวง C-PEG ที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีเหลืองอมน้ำตาล  $\bar{M}_w$  เท่ากับ 570 กรัมต่อโมล  $\bar{M}_n$  เท่ากับ 430 กรัมต่อโมล MWD เท่ากับ 1.31 และอุณหภูมิในการหลอมเหลวเฉลี่ย เท่ากับ 127°C

### 5.3 วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาไทต์กับพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (HAp/PEG)

วัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG สังเคราะห์ได้ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของ C-PEG ภายในรูพรุนของก้อน HAp ที่สภาวะอุณหภูมิ 180 – 220°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 – 72 ชั่วโมง

- ก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีสีเหลืองอมน้ำตาล เนื่องจากมี PEG แทรกตัวอยู่ทั่วพื้นผิวทั้งภายในและภายนอกก้อน HAp
- ปริมาณ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบแปรผกผันกับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง มีผลทำให้ปริมาณ PEG ในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น

- น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ของ PEG ในก้อนวัสดุเชิงประกอบอยู่ในช่วง  $M_w$  2,700 – 6,920 กรัมต่อโมล และ MWD อยู่ในช่วง 1.3 – 3.0
- ความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสกดอัดขึ้นอยู่กับกับปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ โดยค่าความแข็งแรงกดของก้อนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5 – 20 MPa และค่ามอดูลัสความแข็งแรงกดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 100 – 200 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงกดของกระดูกในร่างกายมนุษย์ พบว่าใกล้เคียงกับกระดูกในส่วนของ Cancellous bone ที่มีค่าความแข็งแรงกดอยู่ในช่วง 2 – 13 MPa
- การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ โดยการแช่วัสดุเชิงประกอบในสารละลาย SBF พบว่ามีการสลายตัวของ PEG ในสารละลาย SBF และมีการก่อตัวของผลึก HAp ที่ตกผลึกจากสารละลาย SBF

#### 5.4 แนวทางที่ควรจะศึกษาต่อไป

1. ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนกลูตาเรตในวัสดุเชิงประกอบต่ออัตราการสลายตัวของ PEG โดยการแช่ในสภาวะจำลองของเหลวในร่างกาย
2. ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนกลูตาเรตซึ่งเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ กับอะโรมาติกพอลิเอสเตอร์ อื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบให้เหมาะสม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Wang and W. Bonfield. "Chemically coupled hydroxyapatite-polyethylene composites: structure and properties." **Biomaterials**. 2001(22): 1311-1320.
- [2] D. Walsh T., Furuzono and J. Tanaka. "Preparation of porous composite implant materials by in situ polymerization of porous apatite containing  $\epsilon$ -caprolactone or methyl methacrylate." **Biomaterials**. 2001(22): 1205-1212.
- [3] I. Nenad, T. Simonida, D. Momcilo, M. Miroslav, P. Milenko and U. Dragan. "Synthesis and properties of hydroxyapatite/poly-L-lactide composite biomaterials." **Biomaterials**. 1999 (20): 809-816.
- [4] D.R. Buddy, S.H. Allan, J.S. Frederick and E.L. Jack 1996. **Biomaterials science: An Introduction to Materials in Medicine**. : U.K.: Academic Press.
- [5] ชุตานันท์ สุกมงคล, ปิยะพร แซ่เจี๋ย และ รัตดา มัตตะนาวี. 2545. "การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนอะดิเปต" โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] นิธิวดี บุญธัญทิพย์ และ รุ่งทิพย์ สุวรรณจิตต์. 2546. "การศึกษาสมบัติความแข็งแรงและความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนอะดิเปต" โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] มธุรส สิ้นธุระหัต และ วิมล จารุอรยพันธ์. 2545. "การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต" โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] สุภาณี ชนะวงศ์. 2547. "การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเมอร์ร่วมพอลิเอทิลีนอะดิเปตกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [9] กมลวรรณ รัตนภักดิ์, พนอ วรรณวงศ์ และ ศิริยา เข้มสกุล. 2544. “การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต พอลิเอทิลีนกลูตาเรต และพอลิเมออร์ร่วมโดยปฏิกิริยาการพอลิเมอไรซ์แบบเปิดวง” โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] M.B. Smith. 1994. **Organic Synthesis**. International edition. New York, Mc.Graw – Hill.
- [11] K. Yamashita. and T. Kanazawa. 1989. In **Inorganic Phosphate**, Tokyo: Elsevier.
- [12] H. Aoki. 1994. **Medical Application of Hydroxyapatite**. Tokyo: Ishiyaky Euro America.
- [13] ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. 2002. ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite) วัสดุทดแทนกระดูก. [Online]. Available: [http://www.magnet.mtec.or.th/th/news/cool\\_stuff/cool2.html](http://www.magnet.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool2.html)
- [14] L.L.Hench and J. Wilson. 1993. **An Introduction to Bioceramics**. Singapore: World Scientific.
- [15] M.S.A. Bakar, M.H.W. Cheng, S.M. Tang, S.C. Yu, K. Liao, C.T. Tan, K.A. Khor and P. Cheang. “Tensile properties, tension-tension fatigue and biological response of polyether-ether ketone-hydroxyapatite composites for load-bearing orthopedic implants.” **Biomaterials**. 2003(24): 2245-2250.
- [16] Y.E. Greish and P.W. Brown. “Chemically formed HAp-Ca poly(vinyl phosphate) composites.” **Biomaterials**. 2001(22): 807-816.
- [17] L.J. Chen and M. Wang. “Production and evaluation of biodegradable composites based on PHB-PHV copolymer.” **Biomaterials**. 2002(23): 2631-2639.
- [18] G. Wei and P.X. Ma. “Structure and properties of nano-hydroxyapatite /polymer composite scaffolds for bone tissue engineering.” **Biomaterials**. 2002(21): 1678-1688.
- [19] E. Helwig, B. Sandner, U. Gopp, F. Vogt, S. Wartewig and S. Henning. “Ring-opening polymerization of lactones in the presence of hydroxyapatite.” **Biomaterials**. 2001(22): 2695-2702.

- [20] N.C. Bleach, S.N. Nazhat, K.E. Taner and M. Tormala. "Effect of Filler Content on Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Particular Biphasic Calcium Phosphate-Polyactide Composites." **Biomaterials**. 2002(23): 1579-1585.
- [21] F.G. Evans and A. King. 1983, **Biomedical Studies of the Musculoskeletal System**, New York: Mc.Graw – Hill.
- [22] W. Bonfield. 1984, **Elastic and Viscoelasticity of Cortical Bone**. In: **Natural and Living Biomaterials**, New York: Elsevier.
- [23] R.V. Audekercke and M. Martens. 1984. **Mechanical Properties of Cancellous Bone**. In: **Natural and Living Biomaterials**, New York: Elsevier.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก1. การคำนวณอัตราส่วนโดย Ca:P

### ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ HAp ด้วยเทคนิค XRF

ตัวอย่างที่	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)		อัตราส่วนโดยโมล Ca:P
	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
1	55.25	44.75	1.57
2	56.14	43.86	1.62
3	56.48	43.52	1.64
4	56.85	43.15	1.67
เฉลี่ย	56.18	43.82	1.62
ค่าทางทฤษฎี			1.67

แคลเซียมที่ตรวจวัดได้อยู่ในรูปของสารประกอบ CaO ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ

$$40.078 + 15.9990 = 56.077$$

ฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้อยู่ในรูปของสารประกอบ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ

$$(30.974 \times 2) + (15.999 \times 5) = 141.94$$

นำค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CaO และ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ที่ได้จากเครื่อง XRF มาคำนวณ

โดย	CaO	56.077	กรัม	มี	Ca	1	โมล
ถ้า	Ca	X	กรัม	มี	Ca	(1 x X) / 56.077	โมล
							= A โมล

โดย	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	141.94	กรัม	มี	P	2	โมล
ถ้า	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Y	กรัม	มี	P	(2 x Y) / 141.94	โมล
							= B โมล

เพราะฉะนั้น อัตราส่วน Ca:P เท่ากับ A / B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวอย่างการคำนวณ**

ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้ตัวอย่างที่ 1

สารประกอบ CaO	56.077 กรัม	มี	Ca	1 โมล
ถ้า CaO ที่วัดได้	56 กรัม	มี	Ca	$(1 \times 56.14) / 56.077$ โมล = 1.001 โมล

และสารประกอบ P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	141.94 กรัม	มี	P	2 โมล
ถ้า P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ที่วัดได้	43.6 กรัม	มี	P	$(2 \times 43.86) / 141.94$ โมล = 0.618 โมล

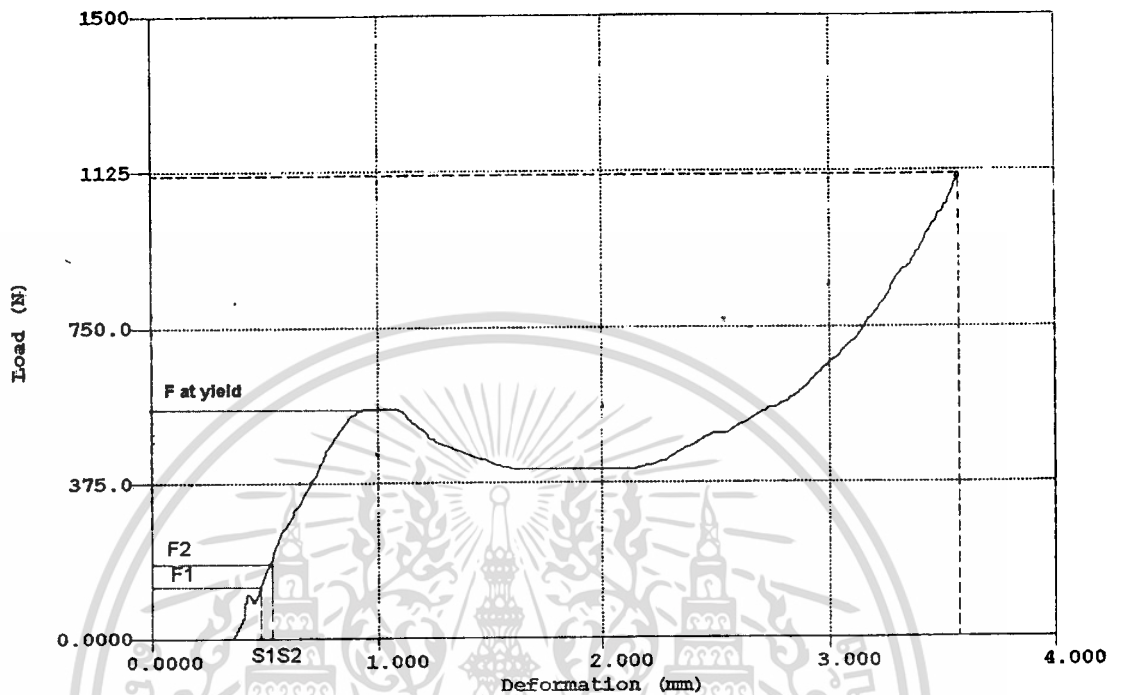
เพราะฉะนั้น อัตราส่วน Ca:P เท่ากับ 1.001 / 0.618

เท่ากับ 1.62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก2. การคำนวณค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดของชิ้นงาน HAp และวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG



ค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength)

$$= \frac{F \text{ at yield}}{A} \quad (\text{N/mm}^2 \text{ or MPa})$$

ค่ามอดุลัสกดอัด (Compressive modulus)

$$= \frac{[(F_2 - F_1) / A]}{[(S_2 - S_1) / L_0]} \quad (\text{N/mm}^2 \text{ or MPa})$$

โดย

- |       |     |  |
|-------|-----|--|
| A     | คือ | พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )                     |
| $L_0$ | คือ | ความสูงของชิ้นงานก่อนการทดสอบ (mm)                             |
| $S_1$ | คือ | การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นงาน (mm) ที่ถูกแรง $F_1$ กดทับ (N) |
| $S_2$ | คือ | การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นงาน (mm) ที่ถูกแรง $F_2$ กดทับ (N) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตัวอย่างการคำนวณ

ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG

F at yield	=	892.86 N	Area (A)	=	102.105 mm <sup>2</sup>
Heigh ( L <sub>0</sub> )	=	5.10 mm	F <sub>1</sub>	=	178.57 N
F <sub>2</sub>	=	428.57 N	S <sub>1</sub>	=	0.17 mm
S <sub>2</sub>	=	0.26 mm			

$$\begin{aligned} \text{Compressive strength} &= (892.86 / 102.125) \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \\ &= \underline{8.74} \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Compressive modulus} &= \frac{[(428.57 - 178.57) / 102.125]}{(0.26 - 0.17) / 5.10} \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \\ &= 2.448 / (1.76 \times 10^{-3}) \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \\ &= \underline{139.09} \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

ค่า Compressive modulus ที่ % Strain ในช่วง 45 – 50% เท่ากับ 156.67 MPa สำหรับค่าอื่นๆ ในตารางที่ 4.4 สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกัน

### ก. 3 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกด

โดย

$$(\text{ค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงานแต่ละชิ้น}) - (\text{ค่า MEAN ของความแข็งแรงกด}) = A_1$$

$$\text{นำค่า } A_1 \text{ มายกกำลังสองและรวมค่าทั้งหมด} = A_2$$

$$\text{นำค่า } A_2 \text{ มาหารด้วยจำนวนข้อมูล คือ 3} = A_3$$

$$\text{ถอดรากที่สองของ } A_3 = A_4$$

โดย  $A_4$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกด

ตัวอย่างการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกดของชิ้นงาน HAp บริสุทธิ์

ข้อมูลที่	ค่าความแข็งแรงกด	$A_1$	$(A_1)^2 = A_2$	$A_2$	$A_2 / (3) = A_3$	$\sqrt{A_3} = A_4$
1	2.86	0.27	0.0711	0.1075	0.0358	0.19
2	3.28	-0.15	0.0235			
3	3.24	-0.11	0.0128			
MEAN	3.13	ผลรวม	0.1075			

ดังนั้น

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกดของก้อน HAp บริสุทธิ์ เท่ากับ **0.19**

ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกดทั้งหมดสามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

ตารางผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแข็งแรงกด

ตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	ค่าความ แข็งแรงกด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่าความ แข็งแรงกด	ตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	ค่าความ แข็งแรงกด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่าความ แข็งแรงกด
HAp	1	2.86	0.19	HAp/PEG 200°C, 48 hrs.	1	12.09	0.74
	2	3.28			2	13.58	
	3	3.24			3	11.95	
	MEAN	3.1			MEAN	12.5	
HAp/PEG 180°C, 24 hrs.	1	7.02	1.65	HAp/PEG 200°C, 72 hrs.	1	10.15	0.70
	2	10.58			2	11.04	
	3	7.12			3	11.87	
	MEAN	8.2			MEAN	11.0	
HAp/PEG 180°C, 48 hrs.	1	7.18	0.22	HAp/PEG 220°C, 24 hrs.	1	19.04	1.13
	2	6.71			2	21.68	
	3	7.17			3	19.66	
	MEAN	7.0			MEAN	20.1	
HAp/PEG 180°C, 72 hrs.	1	5.41	0.27	HAp/PEG 220°C, 48 hrs.	1	15.61	0.44
	2	6.05			2	15.16	
	3	5.85			3	14.53	
	MEAN	5.8			MEAN	15.1	
HAp/PEG 200°C, 24 hrs.	1	14.71	0.77	HAp/PEG 220°C, 72 hrs.	1	15.09	0.88
	2	13.22			2	16.89	
	3	14.96			3	14.98	
	MEAN	14.3			MEAN	15.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก. 4 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดูลัสยกกำลังสอง

โดย

(ค่ามอดูลัสยกกำลังสองของชิ้นงานแต่ละชิ้น) - (ค่า MEAN ของค่ามอดูลัสยกกำลังสอง)

$$= B_1$$

$$\text{นำค่า } B_1 \text{ มายกกำลังสอง และรวมค่าทั้งหมด} = B_2$$

$$\text{นำค่า } B_2 \text{ มาหารด้วยจำนวนข้อมูลยก คือ 3} = B_3$$

$$\text{ถอดรากที่สองของ } B_3 = B_4$$

โดย  $B_4$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดูลัสยกกำลังสอง

ตัวอย่างการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดูลัสยกกำลังสองของชิ้นงาน HAp บริษัท

ข้อมูลที่	ค่ามอดูลัสยกกำลังสอง	$B_1$	$(B_1)^2 = B_2$	$B_2$	$B_2 / (3) = B_3$	$\sqrt{B_3} = B_4$
1	26.54	1.76	3.0976	4.6496	1.5499	1.24
2	29.22	-0.92	0.8464			
3	29.14	-0.84	0.7056			
MEAN	28.30		4.6496			

ดังนั้น

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดูลัสยกกำลังสองของก้อน HAp บริษัท เท่ากับ 1.24

ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดูลัสยกกำลังสองทั้งหมดสามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

**ตารางผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ามอดุลัสกดอัด**

ตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	ค่ามอดุลัส กดอัด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่ามอดุลัส กดอัด	ตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	ค่ามอดุลัส กดอัด	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ค่ามอดุลัส กดอัด
HAp	1	26.54	1.22	HAp/PEG 200°C, 48 hrs.	1	152.14	1.33
	2	29.22			2	153.21	
	3	29.14			3	150.02	
	MEAN	28.3			MEAN	151.8	
HAp/PEG 180°C, 24 hrs.	1	137.8	1.36	HAp/PEG 200°C, 72 hrs.	1	124.94	1.73
	2	141.05			2	128.58	
	3	138.81			3	124.88	
	MEAN	139.2			MEAN	126.1	
HAp/PEG 180°C, 48 hrs.	1	123.48	1.43	HAp/PEG 220°C, 24 hrs.	1	206.47	1.44
	2	120.14			2	209.96	
	3	122.74			3	207.81	
	MEAN	122.1			MEAN	208.1	
HAp/PEG 180°C, 72 hrs.	1	103.69	0.76	HAp/PEG 220°C, 48 hrs.	1	174.98	1.33
	2	105.54			2	173.57	
	3	104.46			3	171.74	
	MEAN	104.6			MEAN	173.4	
HAp/PEG 200°C, 24 hrs.	1	187.06	1.24	HAp/PEG 220°C, 72 hrs.	1	151.78	1.42
	2	185.063			2	153.497	
	3	188.05			3	150.01	
	MEAN	186.7			MEAN	151.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

**รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไฮดรอกซีแอพาไทต์  
จากฐานข้อมูล PDF (Powder Diffraction Files)**

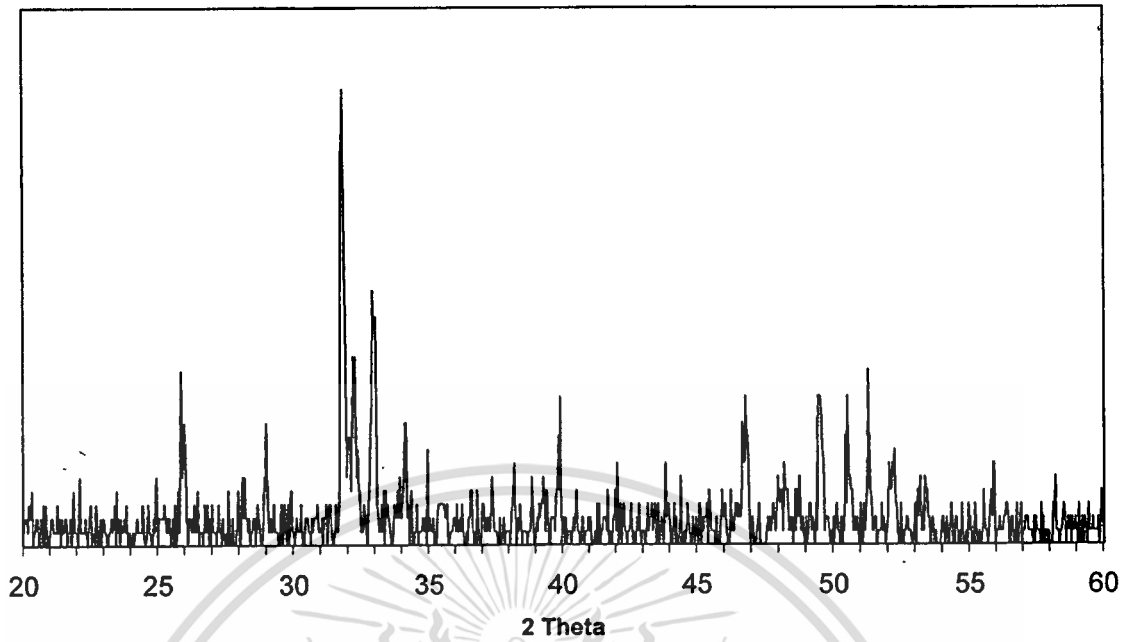
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 74-565		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub>		2th	l	h	k	i	2th	l	h	k	i
Hydroxylapatite / Calcium Hydroxide Phosphate		10.832	17	1	0	0	82.323	1	1	6	6
		16.842	5	1	0	1	*82.323	1	6	0	2
		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	3
		25.357	2	2	0	1	83.391	4	4	3	4
		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	4	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					
		41.986	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	28	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					
		59.924	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	5					
		69.673	2	5	1	2					
		70.074	<1	4	3	0					
		70.516	<1	6	0	1					
		70.799	<1	5	0	3					
		71.361	<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					
		76.085	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					
Lattice : Hexagonal S.G. : P63/m (176) a = 9.42400 c = 6.87900 Z = 1		Mol. weight = 1004.64 Volume [CD] = 529.09 Dx = 3.153 Uicor = 1.06									
ICSD COLLECTION CODE : 026204 TEMPERATURE FACTOR : ATF SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Holly Springs, GA, USA. ADDITIONAL PATTERN : See PDF 9-432.											
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B, volume 25, page 1534, (1969) : Sudarsanan, K., Young, R.A.											
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings									

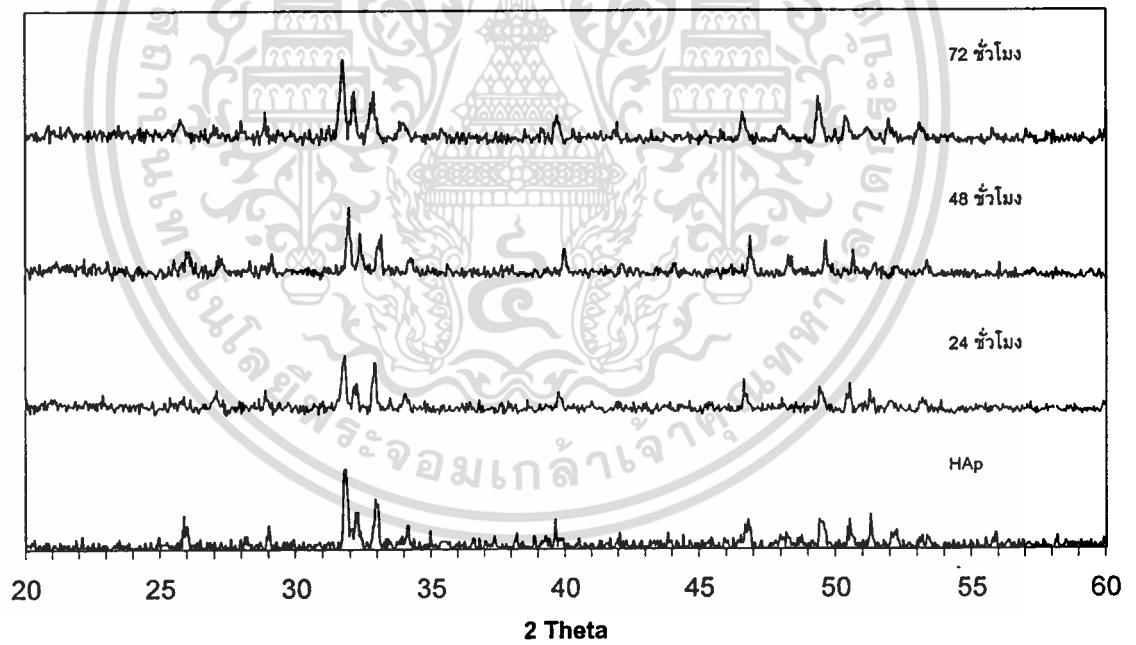
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

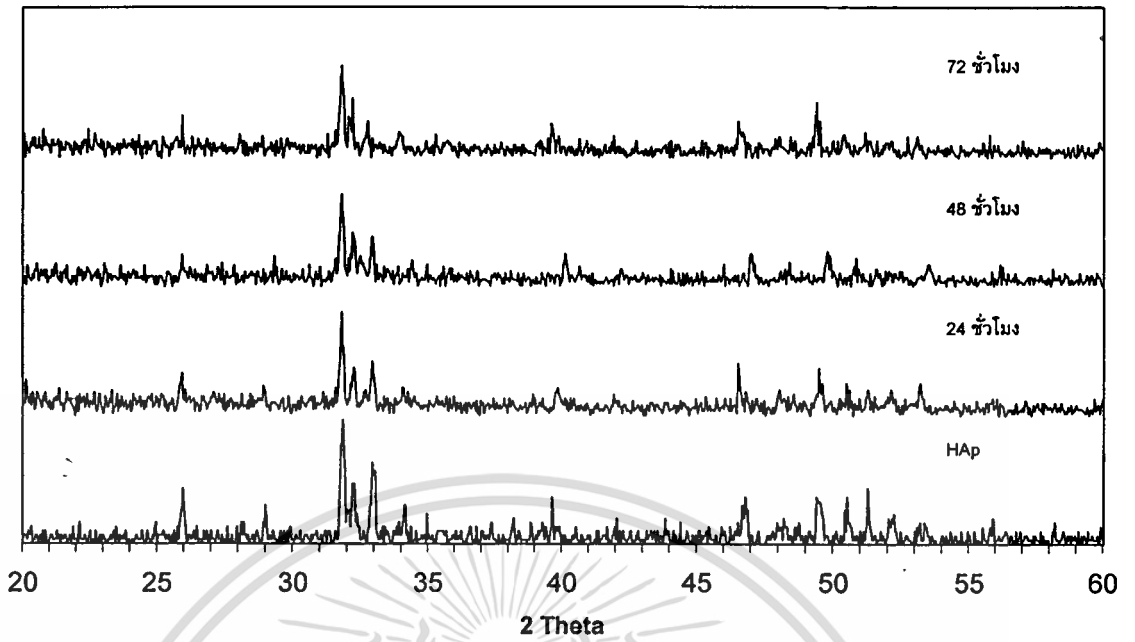


รูปที่ ค-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp ที่เผาอุณหภูมิ 1100°C, 5 ชั่วโมง

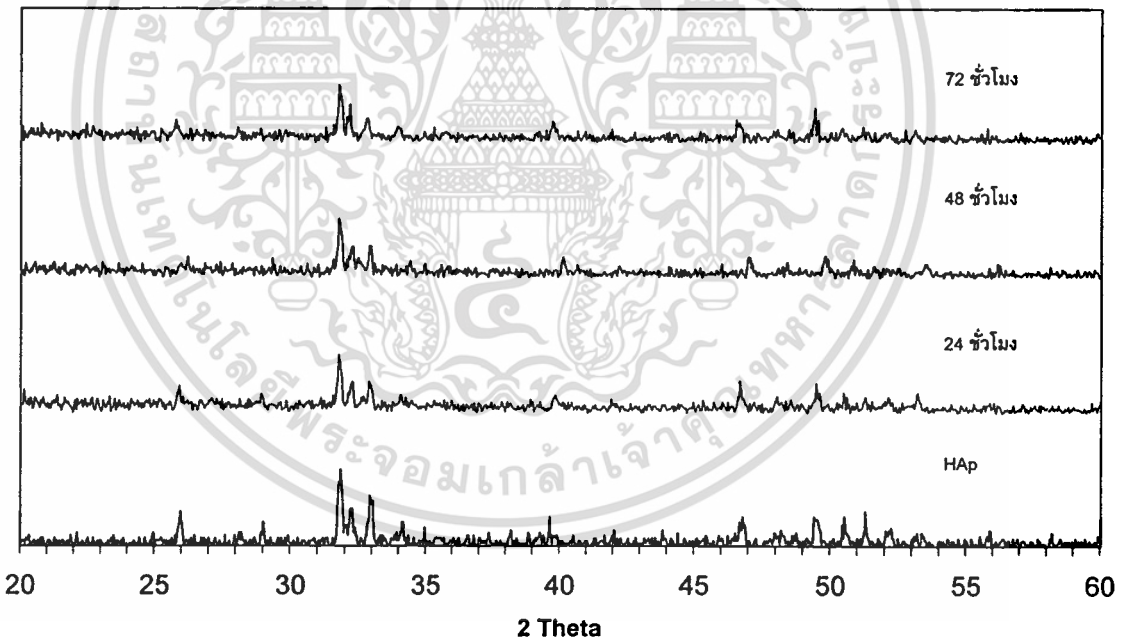


รูปที่ ค-2 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 180°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

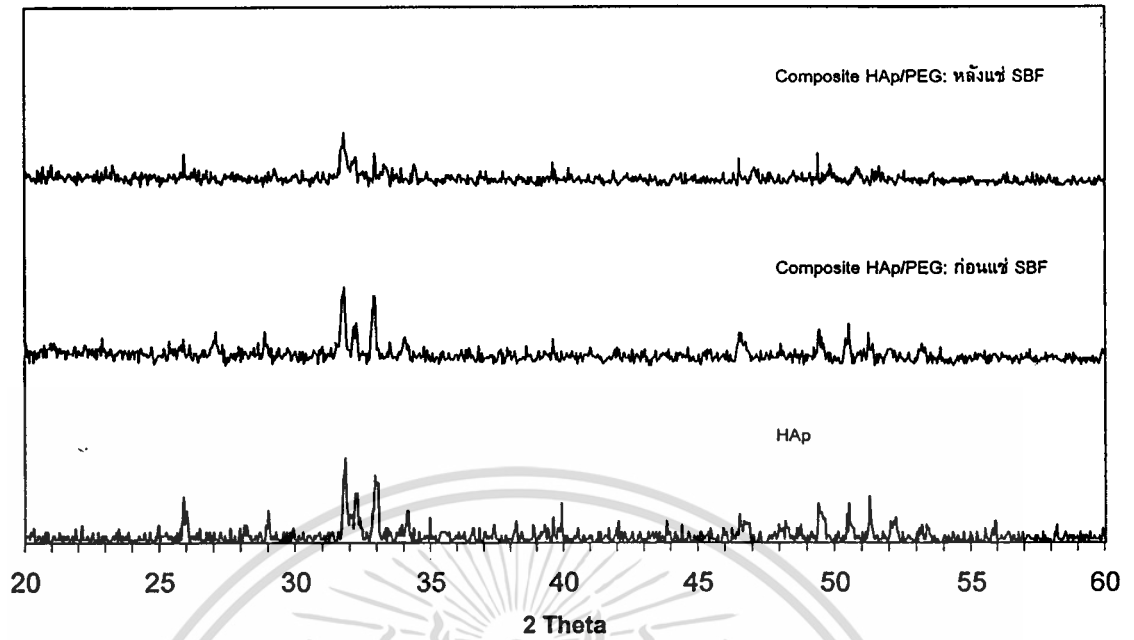


รูปที่ ค-3 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C

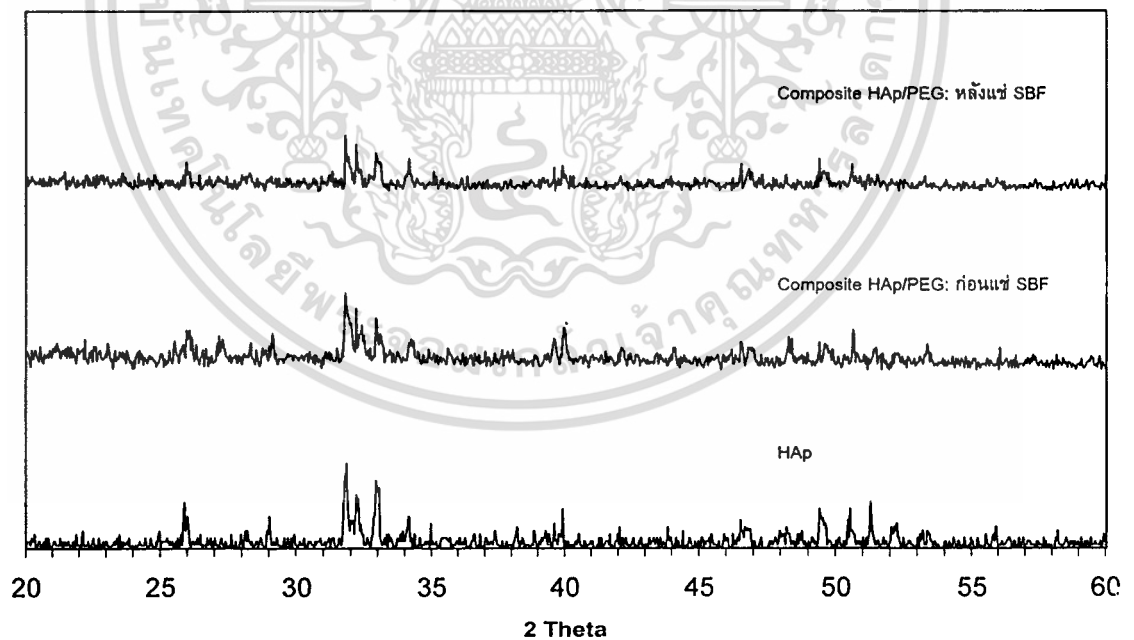


รูปที่ ค-4 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

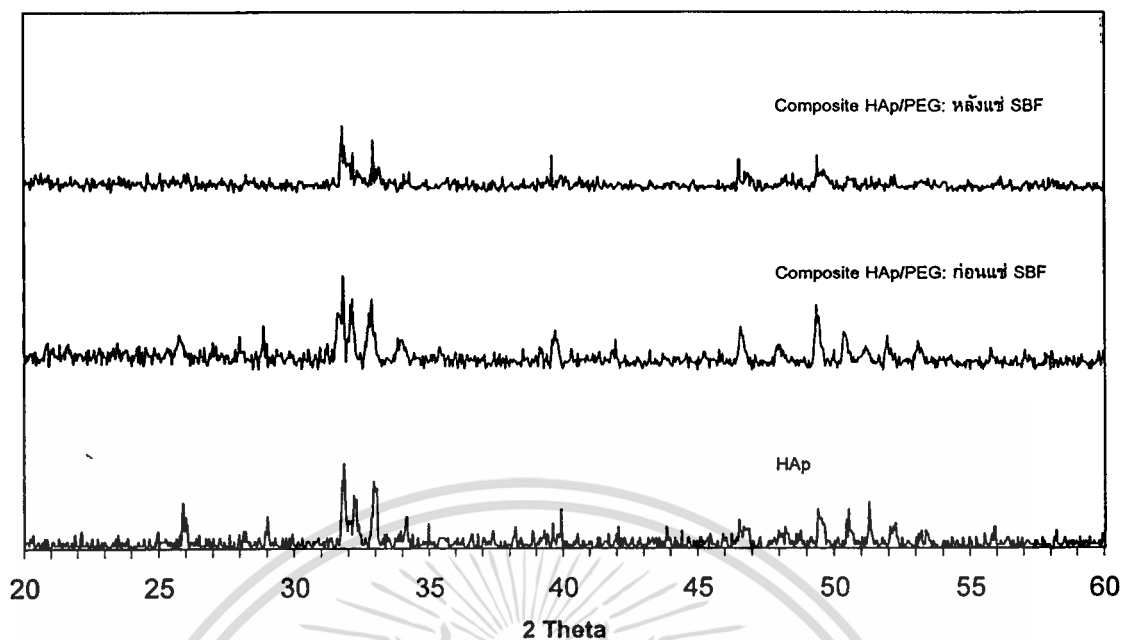


รูปที่ ค-5 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

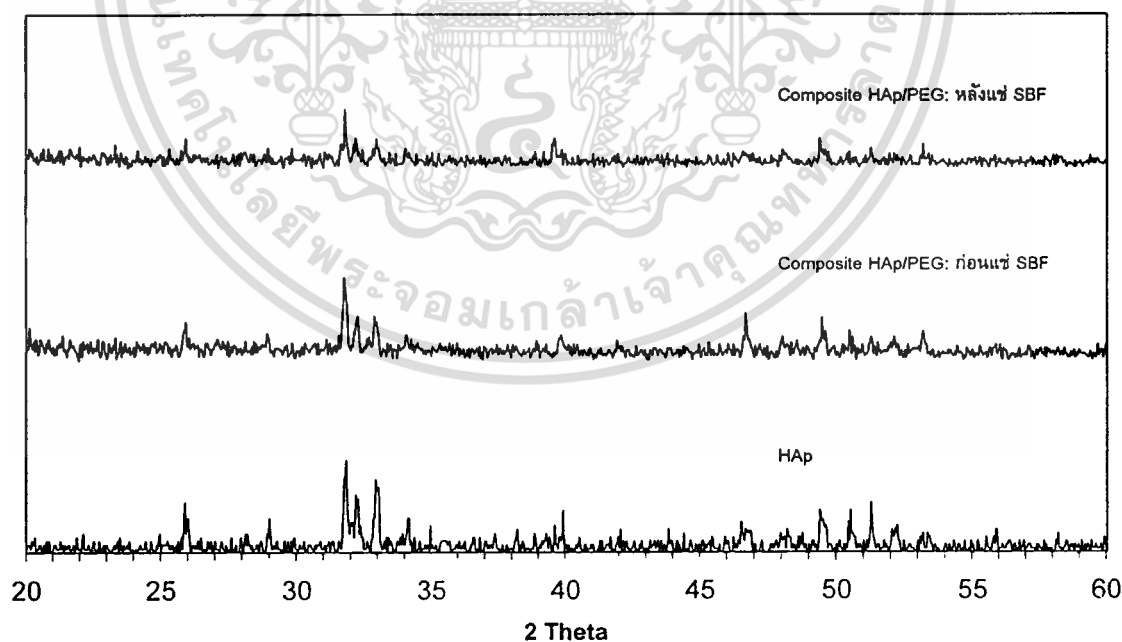


รูปที่ ค-6 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

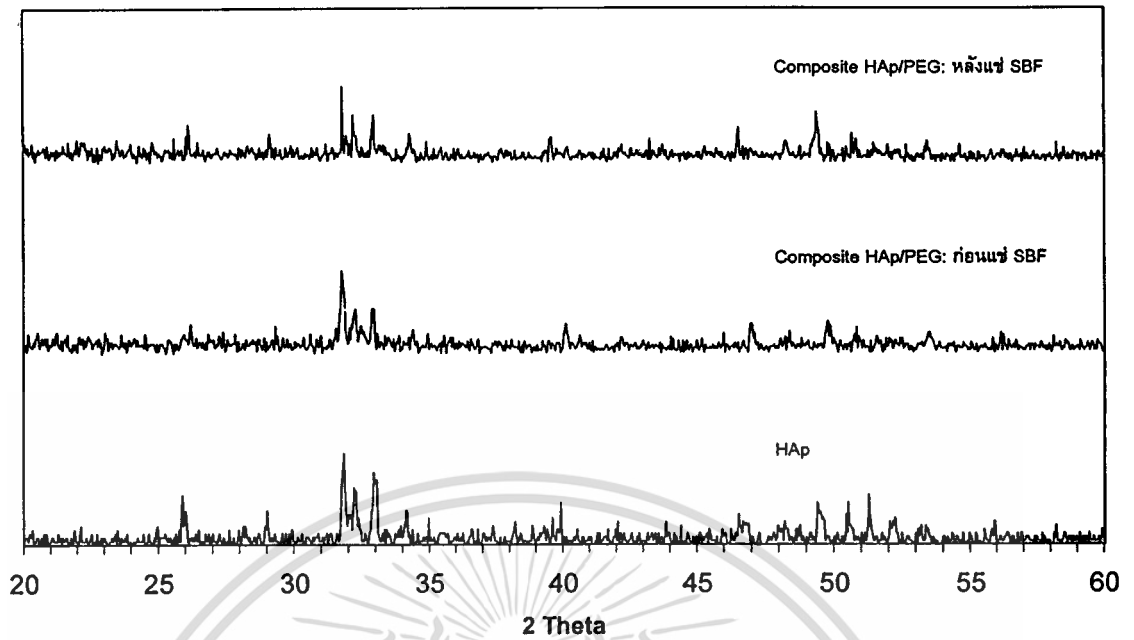


รูปที่ ค-7 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

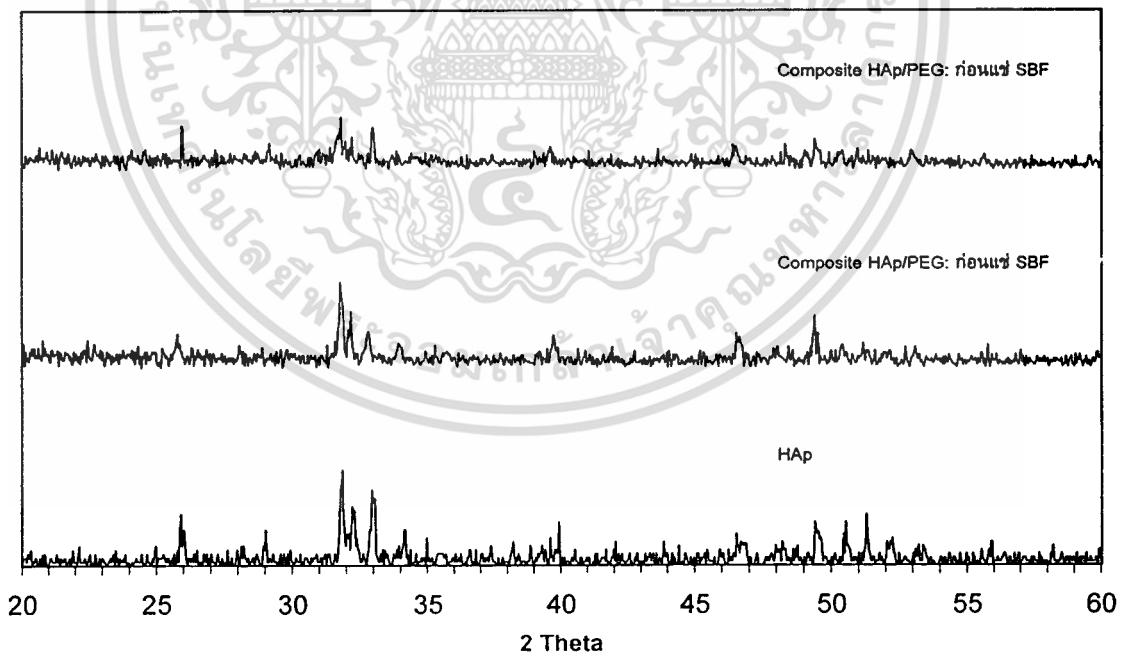


รูปที่ ค-8 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

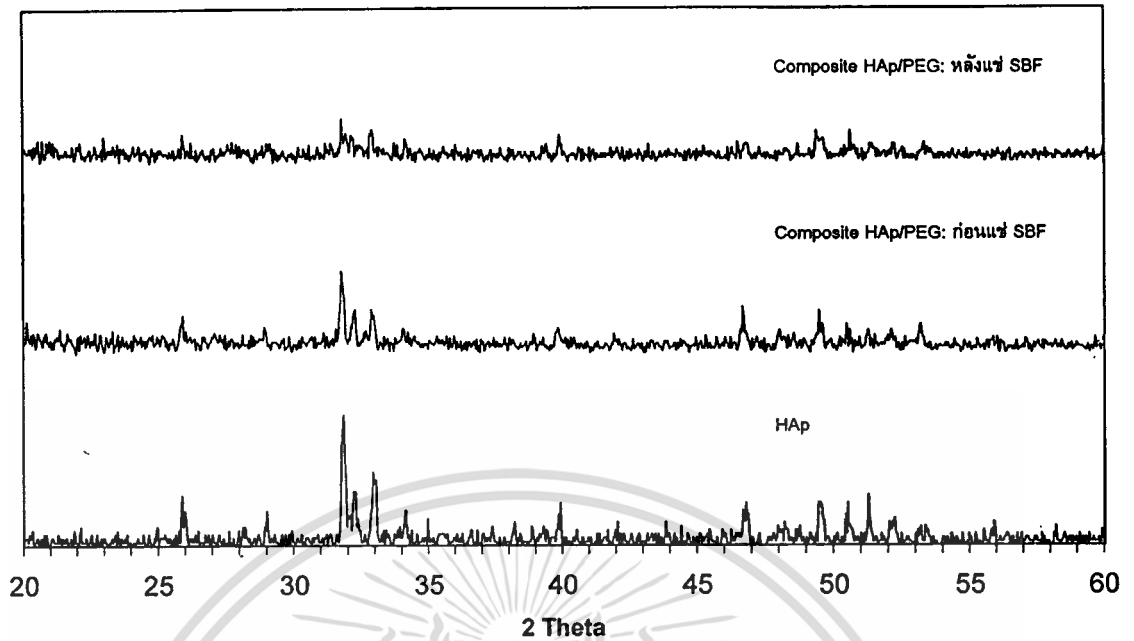


รูปที่ ค-9 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

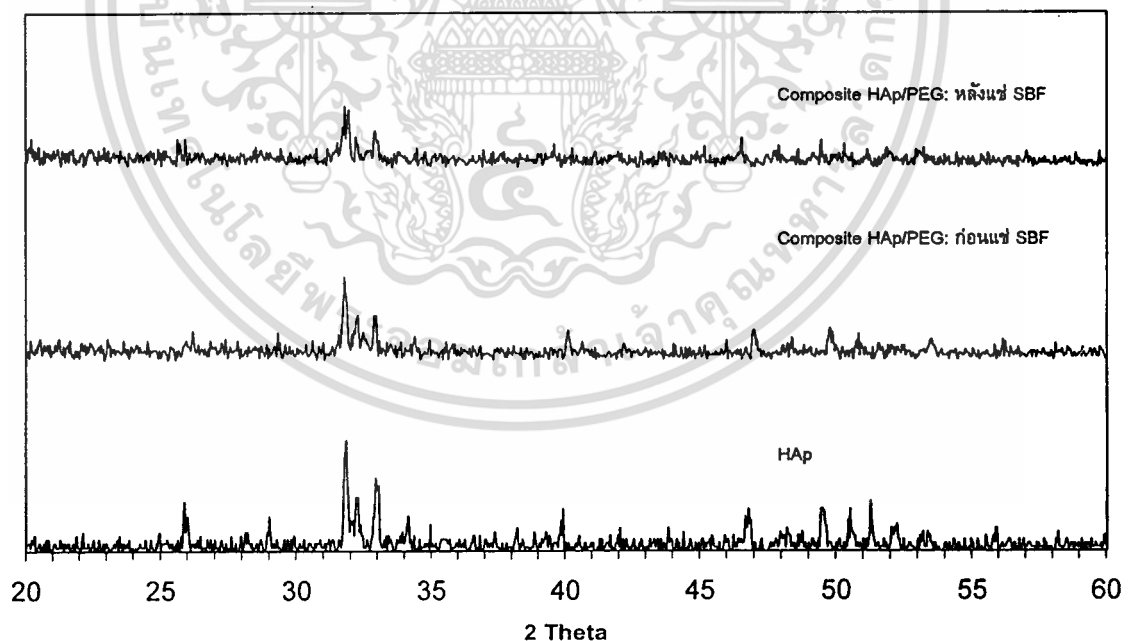


รูปที่ ค-10 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

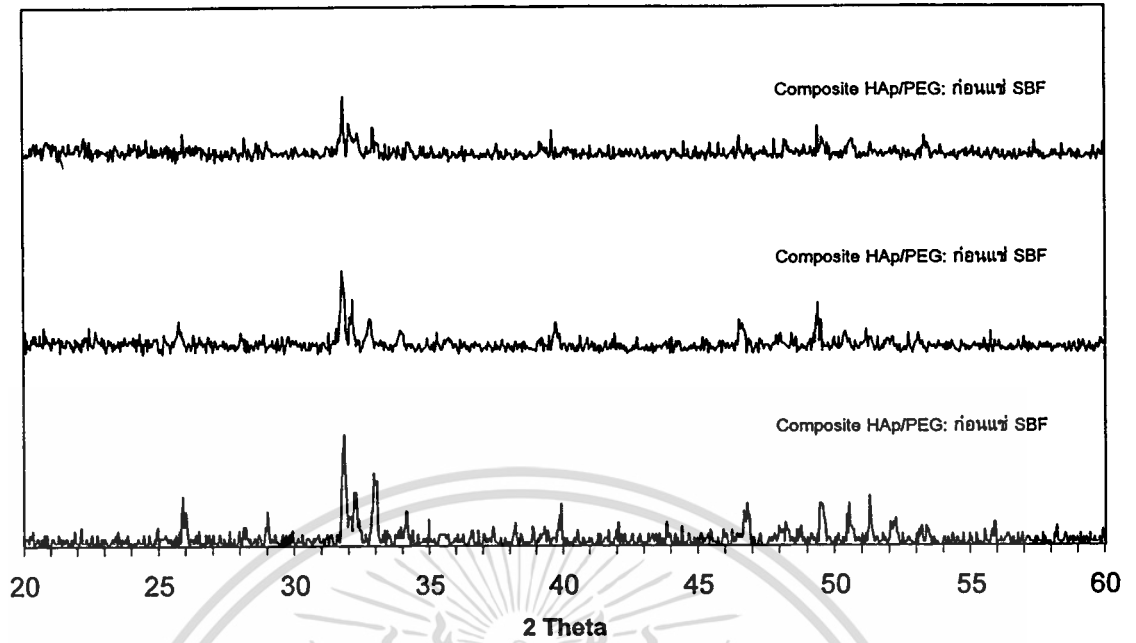


รูปที่ ค-11 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน



รูปที่ ค-12 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน

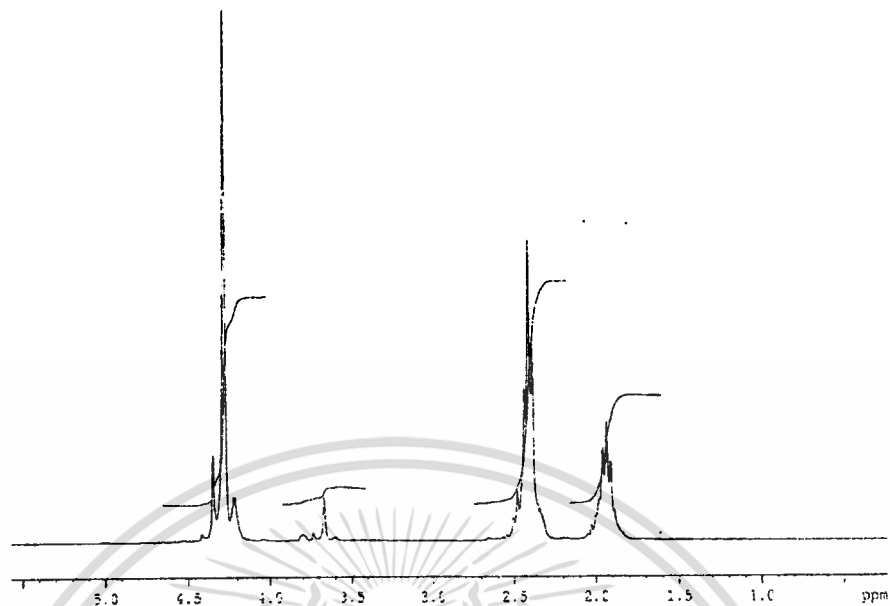
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



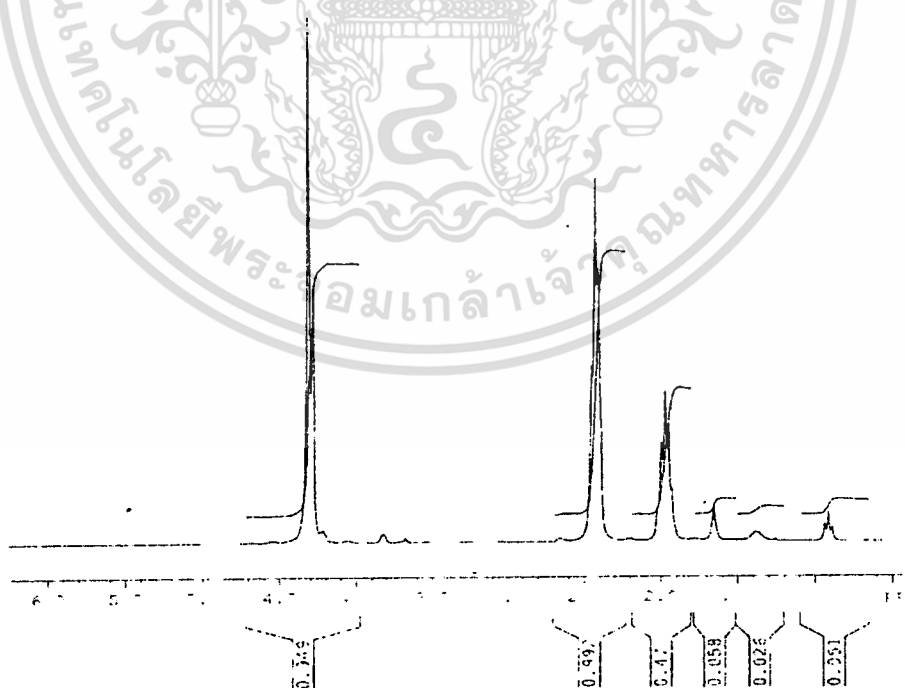
รูปที่ ค-13 เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp กับวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง ก่อนแช่สารละลาย SBF และหลังแช่สารละลาย SBF 28 วัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

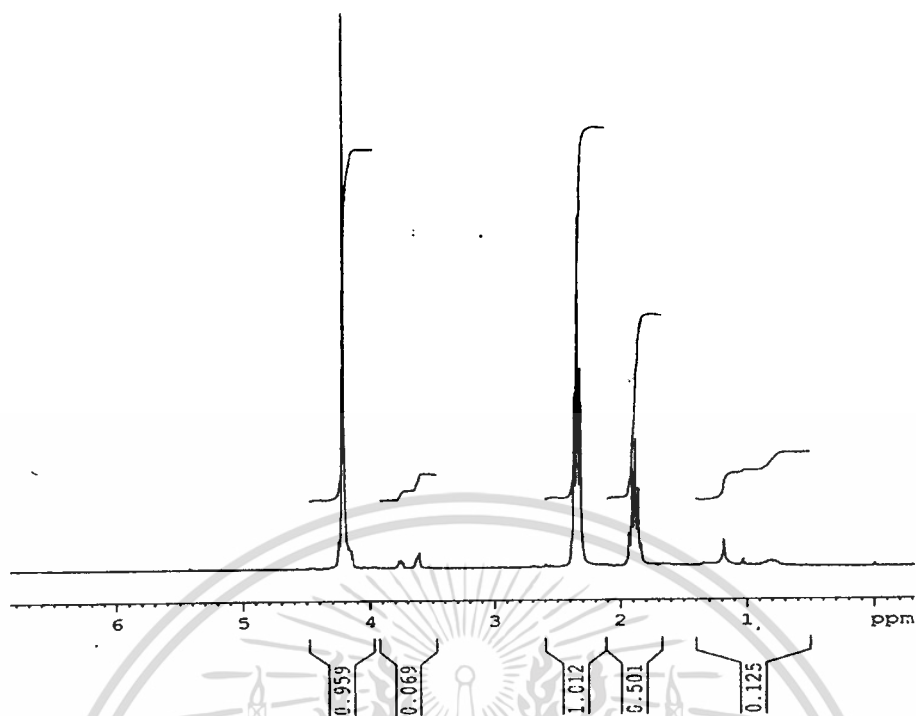


รูปที่ ง-1  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตร้าของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (PEG)

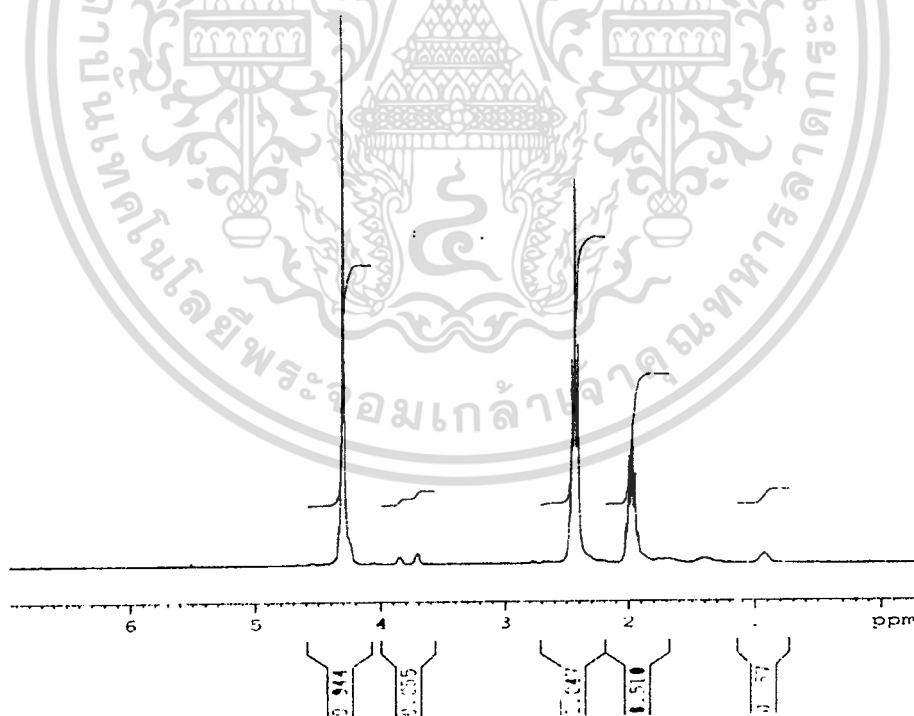


รูปที่ ง-2  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตร้าของสารประกอบวงโพลิเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

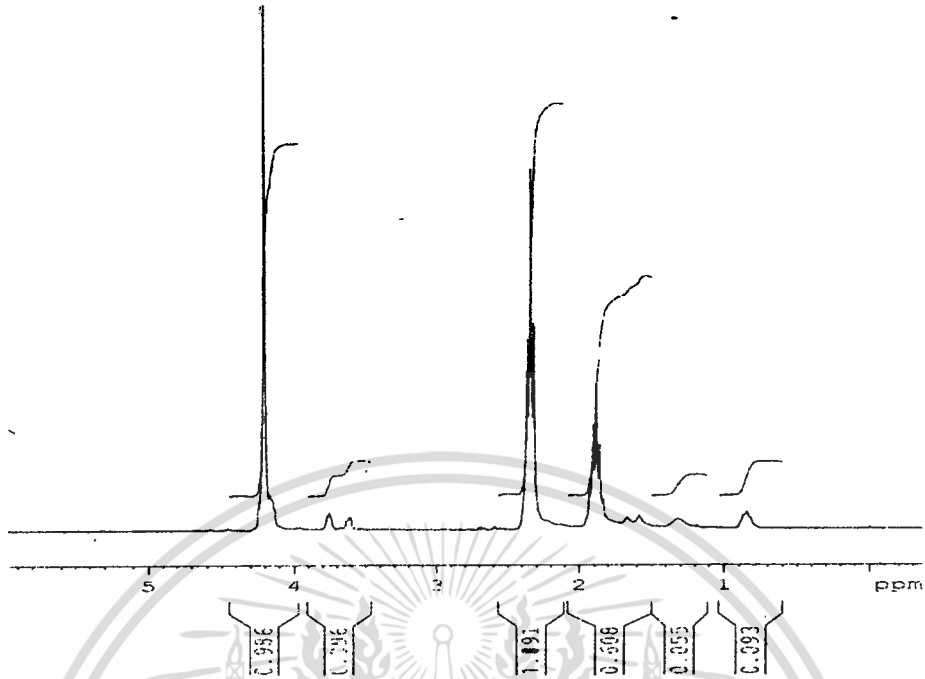


รูปที่ ง-3  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สถานะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์โซลเจลแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ  $180^\circ\text{C}$  เวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ ง-4  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สถานะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์โซลเจลแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ  $180^\circ\text{C}$  เวลา 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

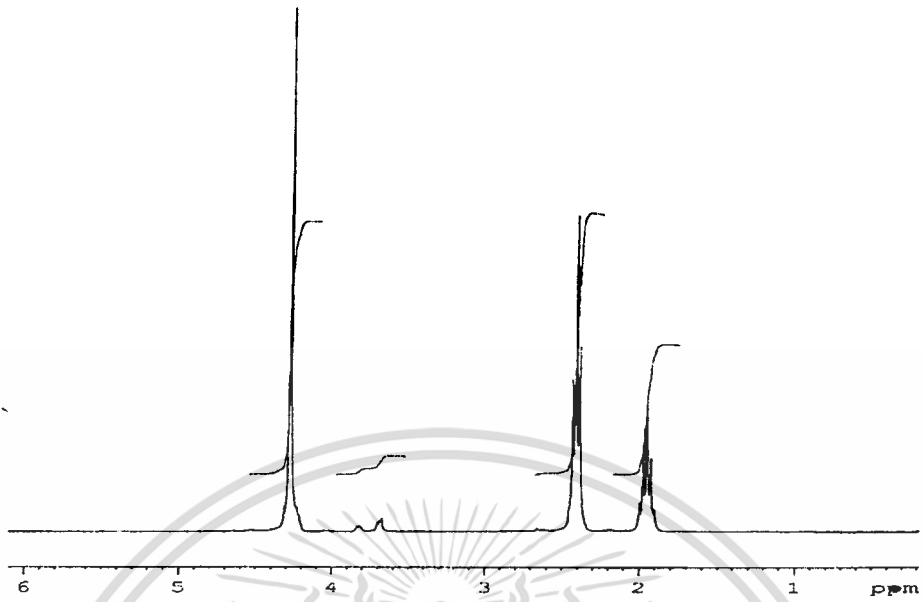


รูปที่ ง-5  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ  $180^\circ\text{C}$  เวลา 72 ชั่วโมง

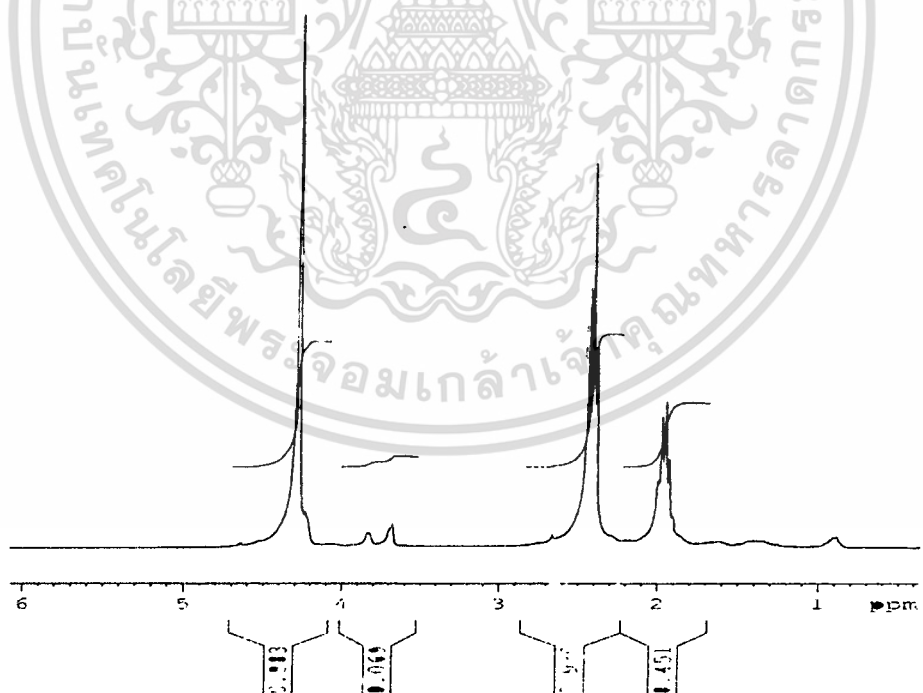


รูปที่ ง-6  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  เวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

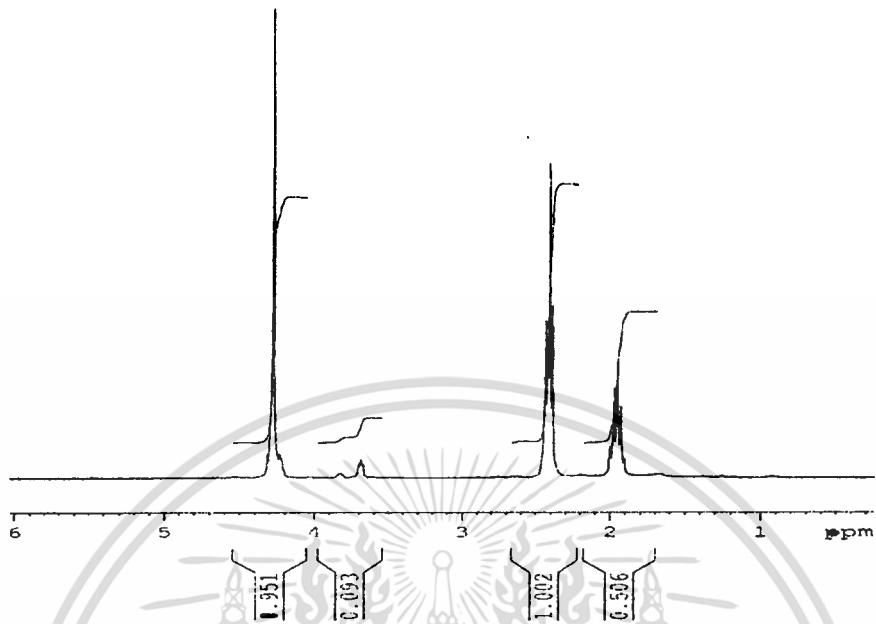


รูปที่ ง-9  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ  $220^\circ\text{C}$  เวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ ง-10  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ  $220^\circ\text{C}$  เวลา 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

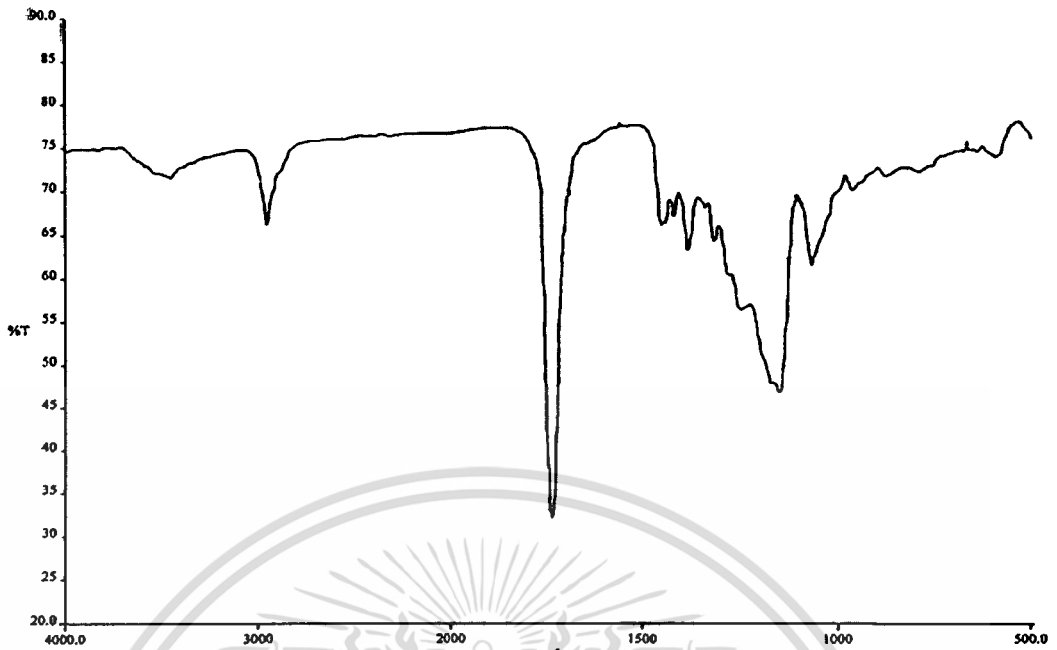


รูปที่ ง-11  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สถานะในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่อุณหภูมิ  $220^\circ\text{C}$  เวลา 72 ชั่วโมง

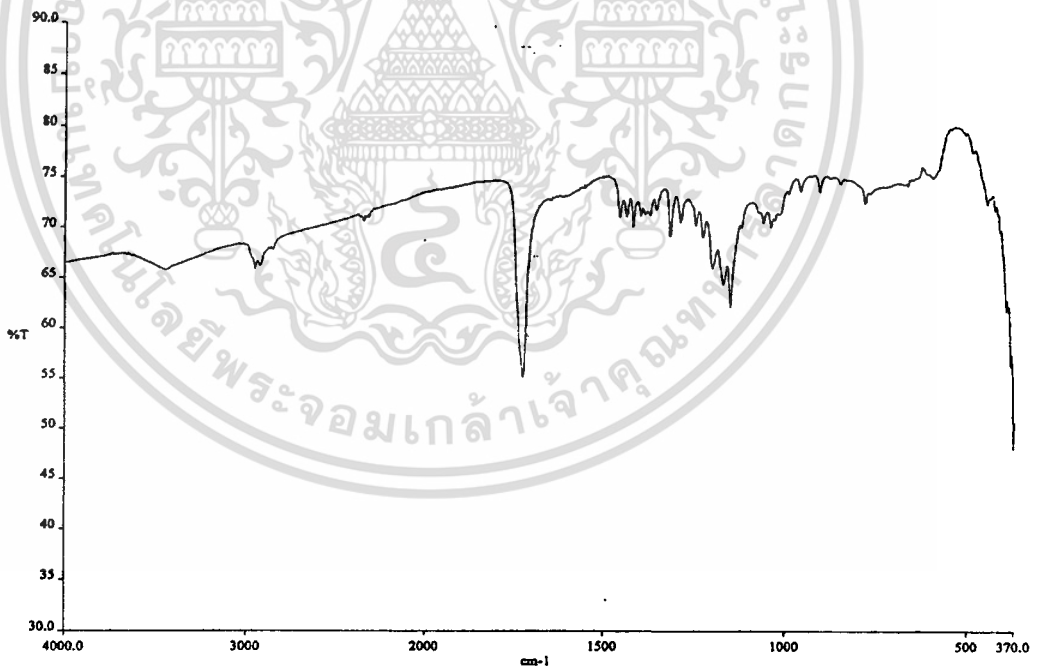
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

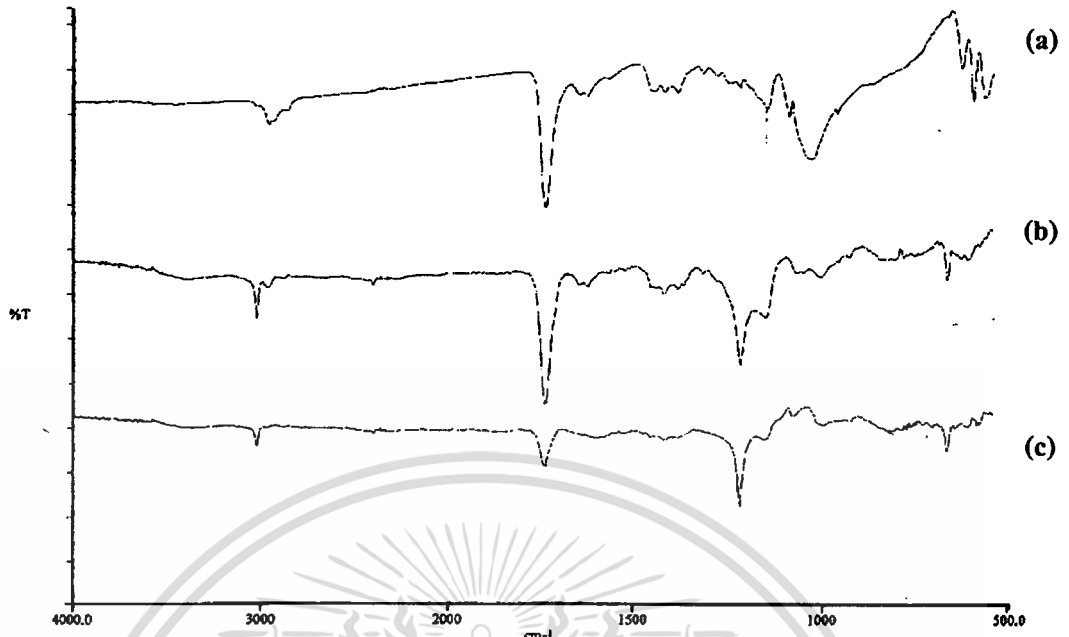


รูปที่ จ-1 สเปกตรัม FT-IR ของพอลิเอทิลีนไกลูตาเรต (PEG) ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น

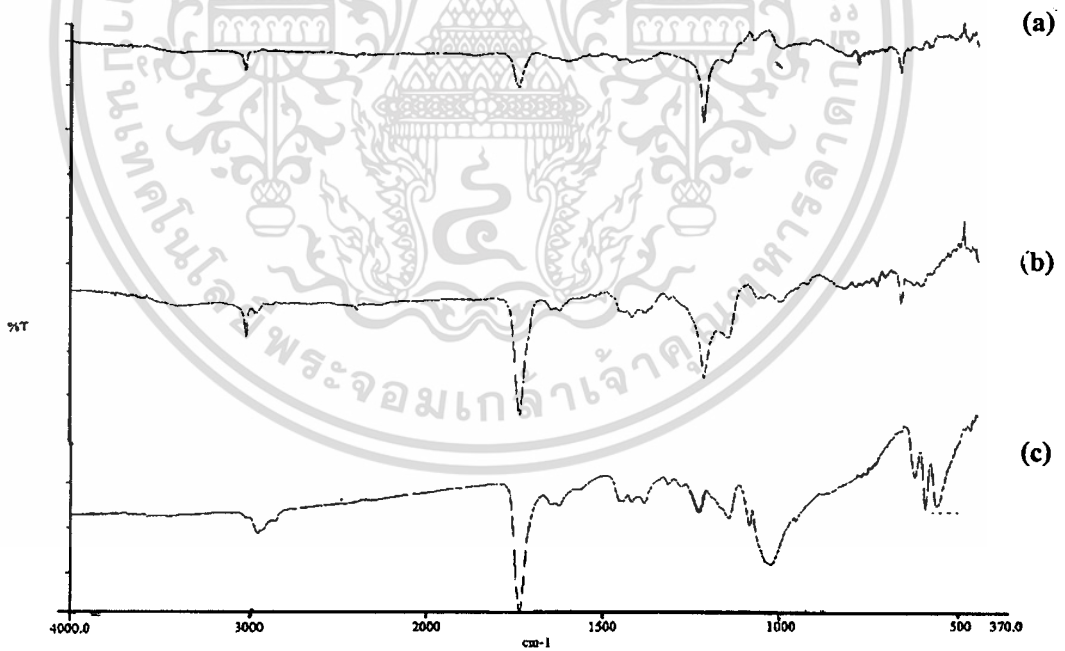


รูปที่ จ-2 สเปกตรัม FT-IR ของสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนไกลูตาเรต (C-PEG) ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

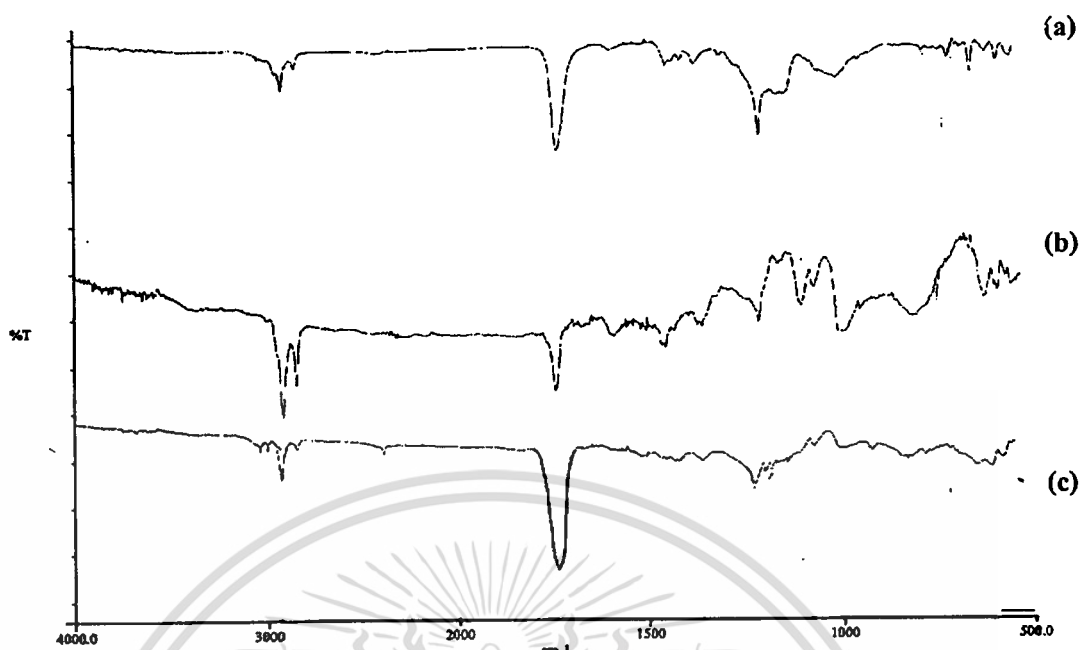


รูปที่ จ-3 สเปกตรัม FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง, (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง

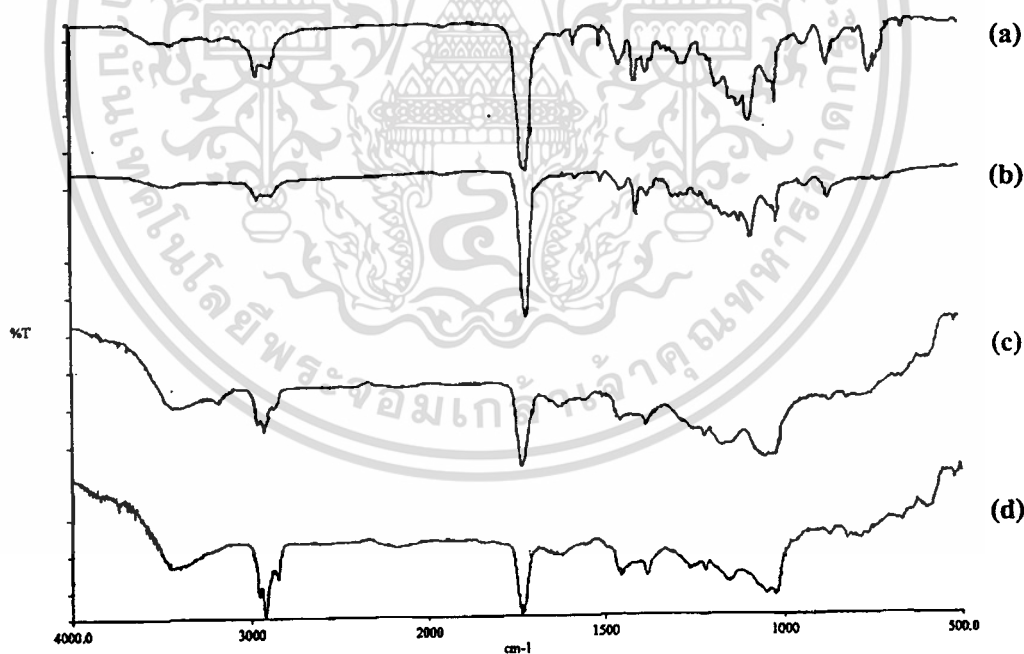


รูปที่ จ-4 สเปกตรัม FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง, (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

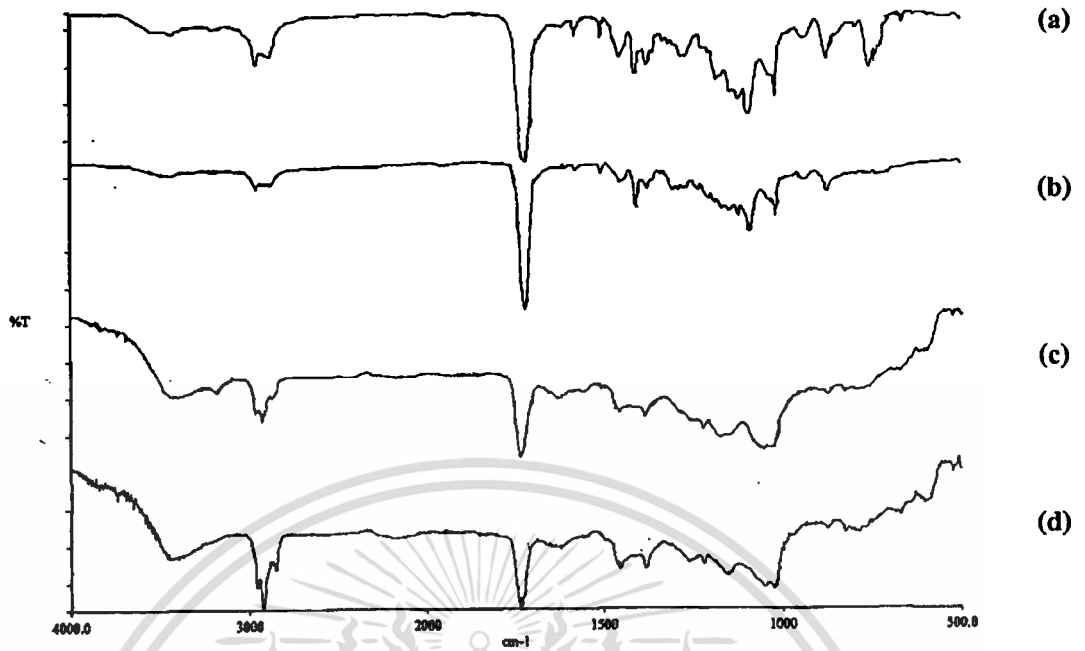


รูปที่ ๑-5 สเปกตรัม FT-IR ของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C เวลา (a) 24 ชั่วโมง, (b) 48 ชั่วโมง และ (c) 72 ชั่วโมง

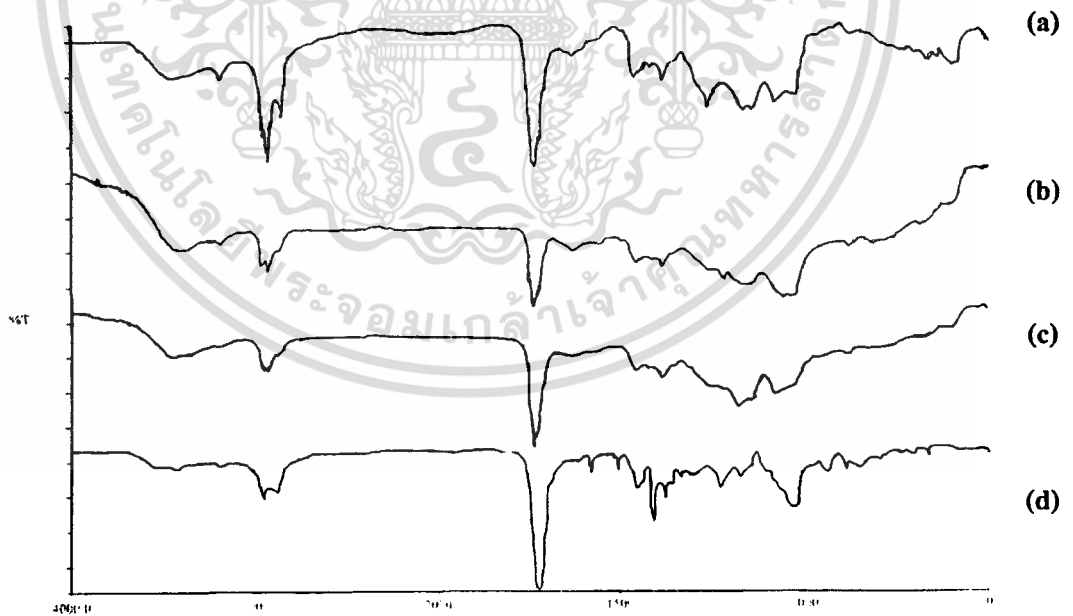


รูปที่ ๑-6 สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

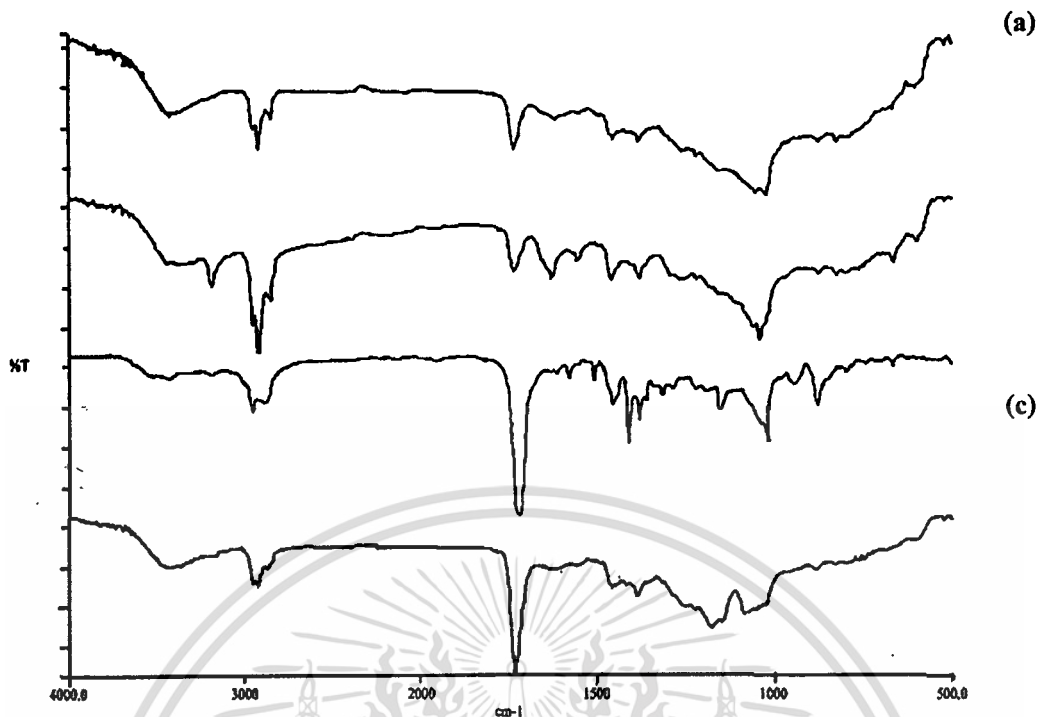


**รูปที่ ๑-7** สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเซริงประกอบ  
ที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะ  
เวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

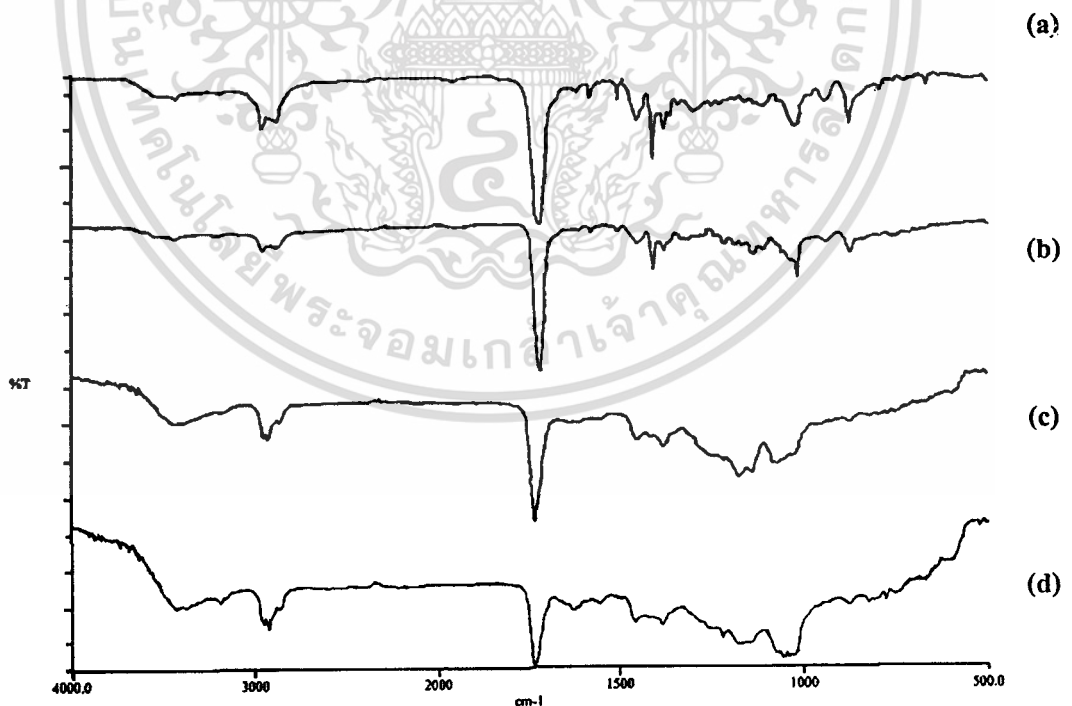


**รูปที่ ๑-8** สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเซริงประกอบ  
ที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง เป็นระยะ  
เวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

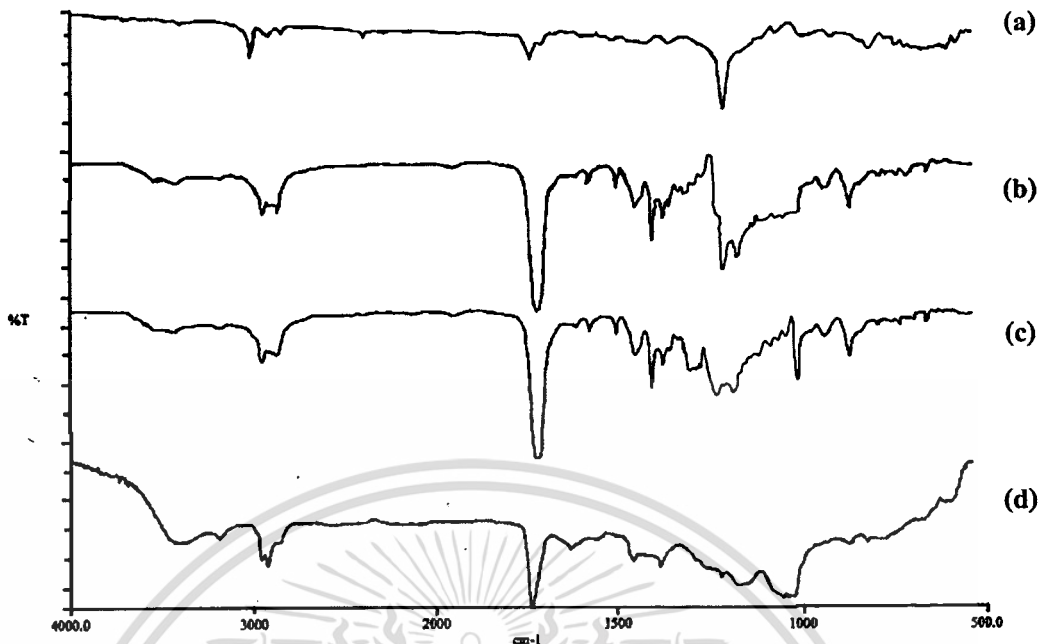


รูปที่ จ-9 สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

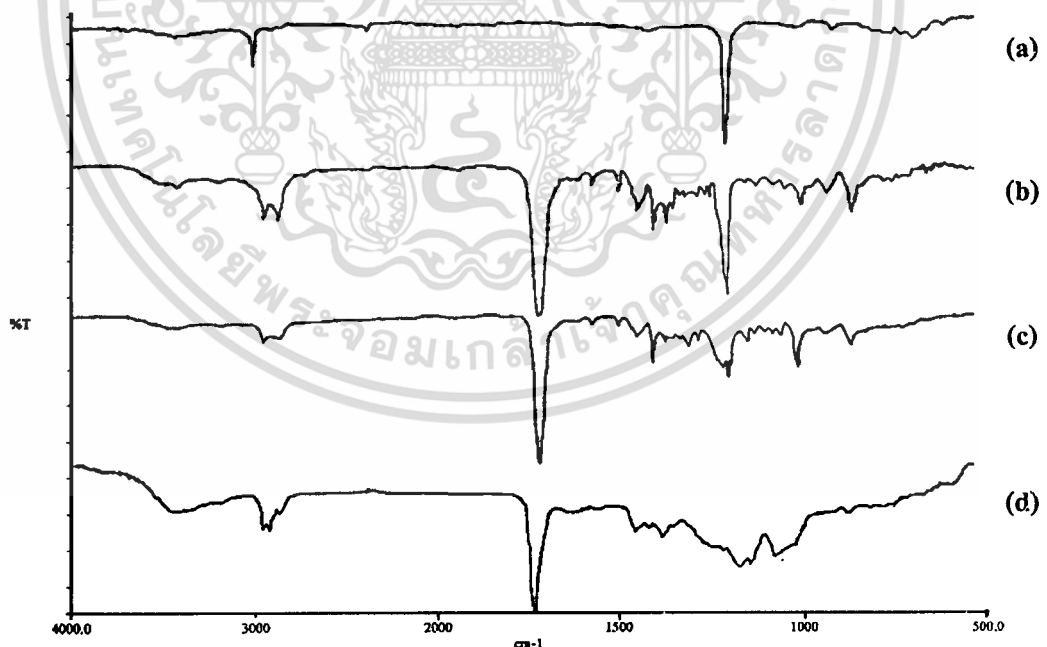


รูปที่ จ-10 สเปกตรัม FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

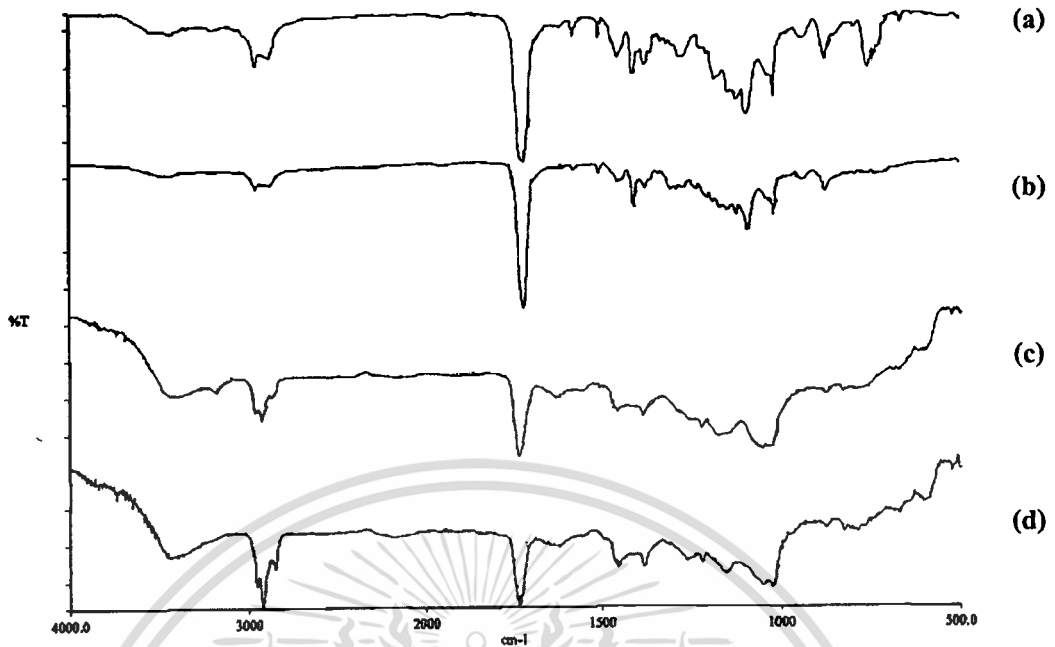


**รูปที่ ๑-11** สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาดังกล่าว (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

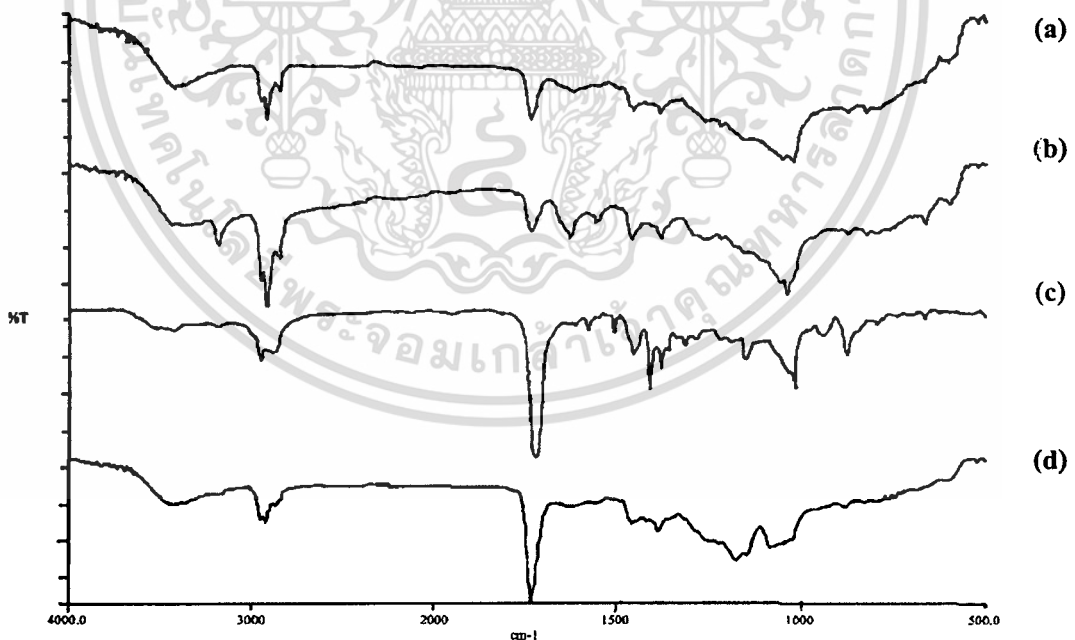


**รูปที่ ๑-12** สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาดังกล่าว (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ จ-13** สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาดังต่อไปนี้ (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

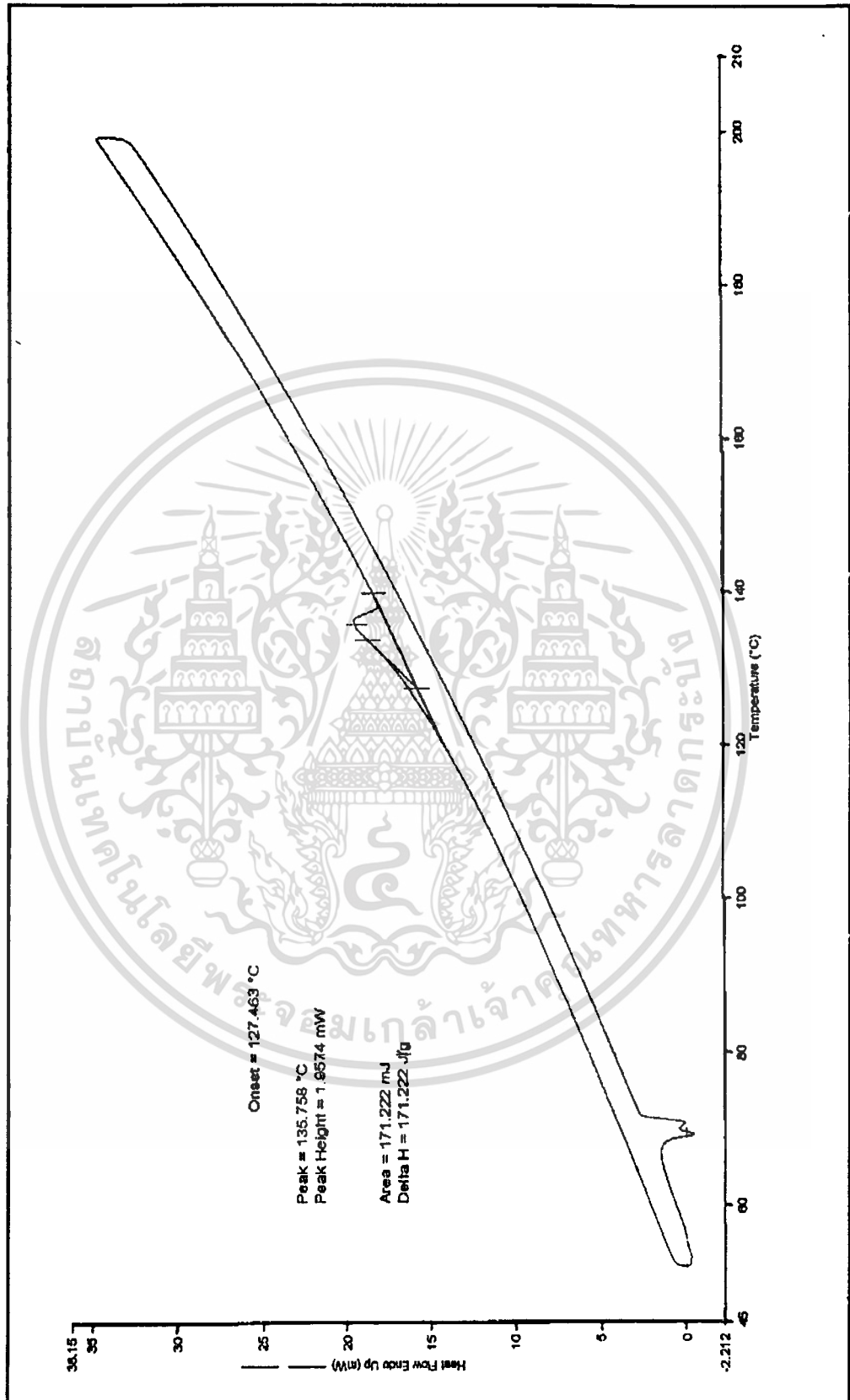


**รูปที่ จ-14** สเปกตร้า FT-IR ของสารที่สกัดจากสารละลาย SBF ภายหลังจากแช่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาดังต่อไปนี้ (a) 0 - 7 วัน (b) 8 - 14 วัน (c) 15 - 21 วัน และ (d) 22 - 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

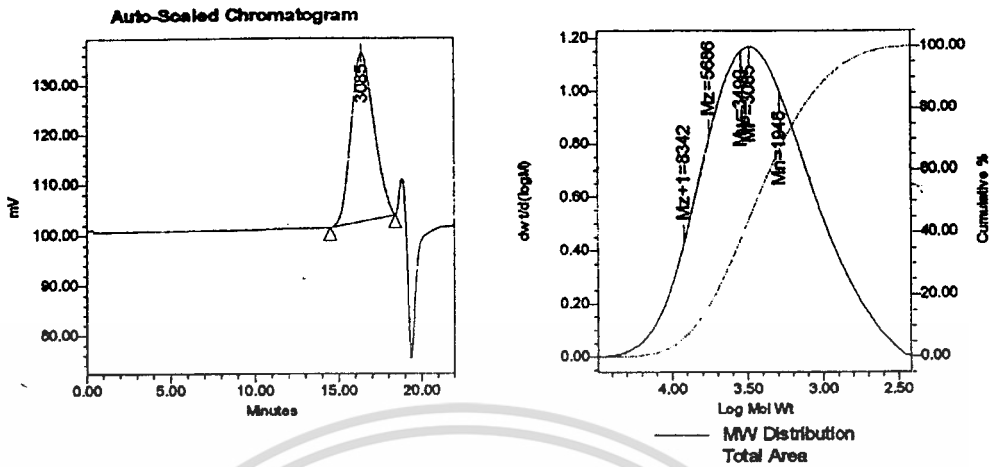


รูปที่ ๑-1 DSCเทอร์โมแกรมของสารประกอบวงโพลิเอทิลีนไกลุกตาเรต (C-PEG)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



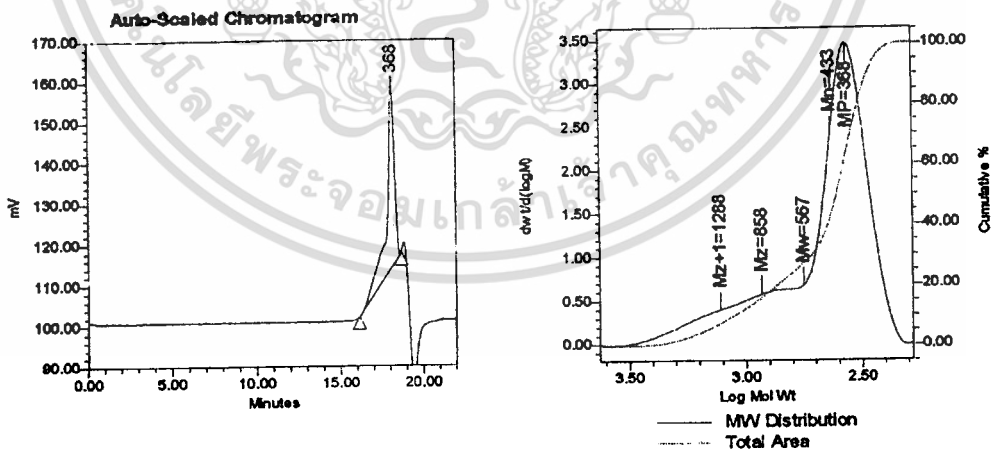
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	1848	3499	3085	5686	8342	1.797857

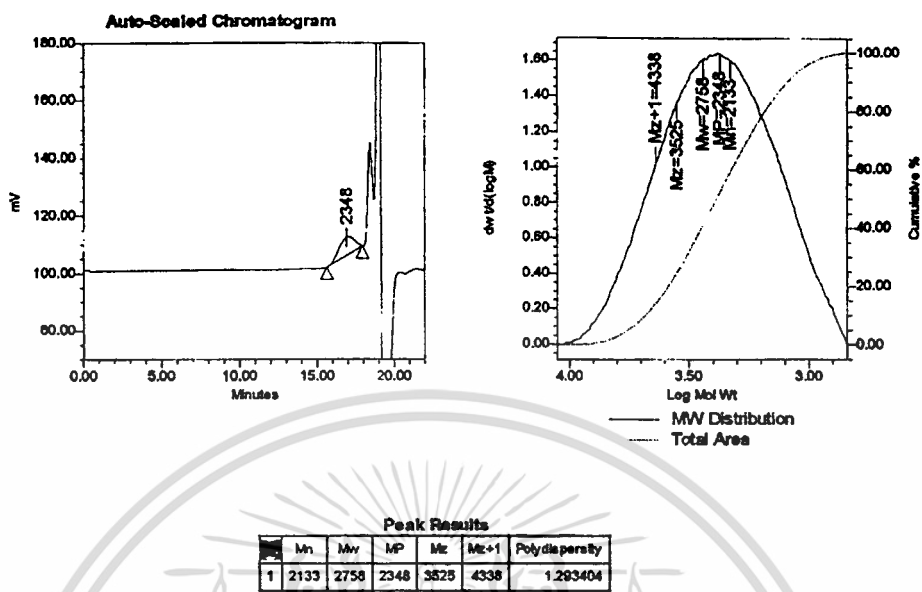
รูปที่ ข-1 โครมาโทแกรมของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต (PEG) ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น



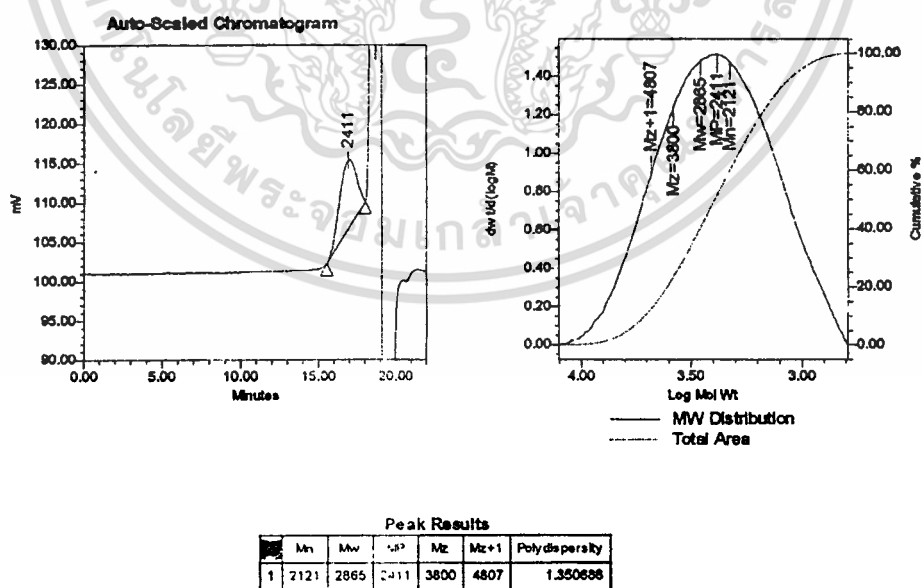
**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1						
2	433	567	368	858	1288	1.310122

รูปที่ ข-2 โครมาโทแกรมของสารประกอบวงโอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต (C-PEG) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

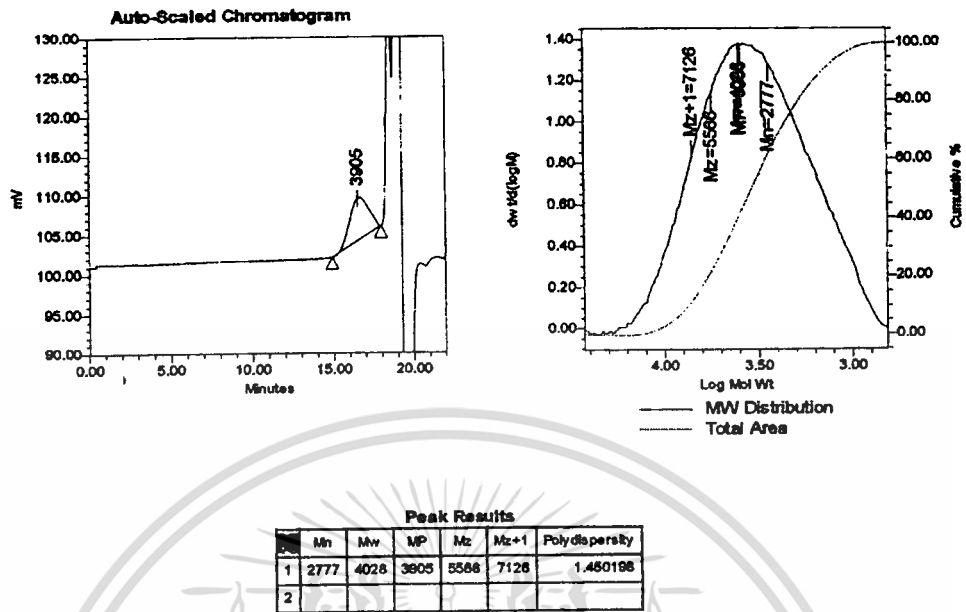


รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 24 ชั่วโมง

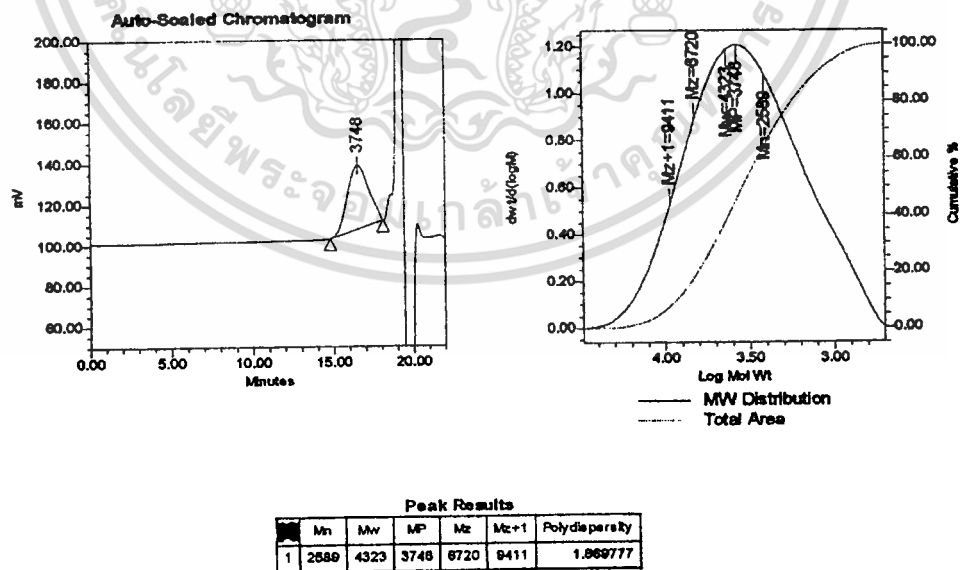


รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

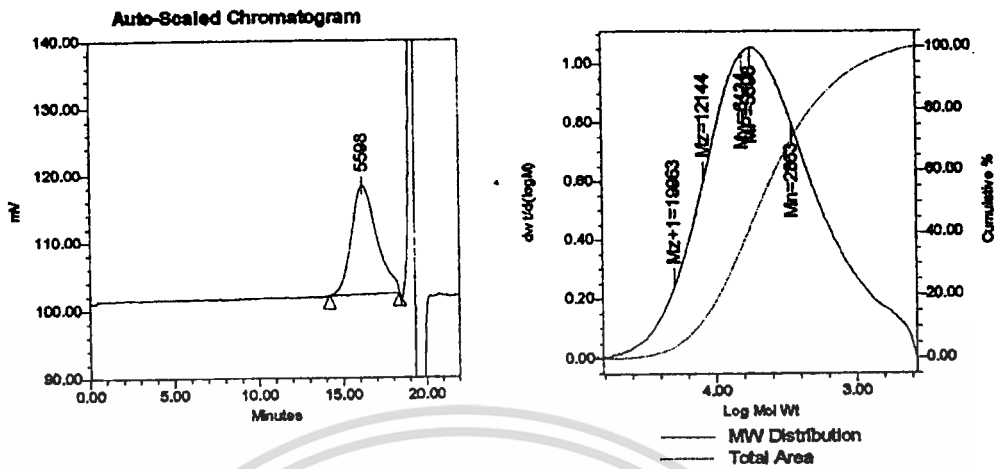


รูปที่ ข-5 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 72 ชั่วโมง



รูปที่ ข-6 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 24 ชั่วโมง

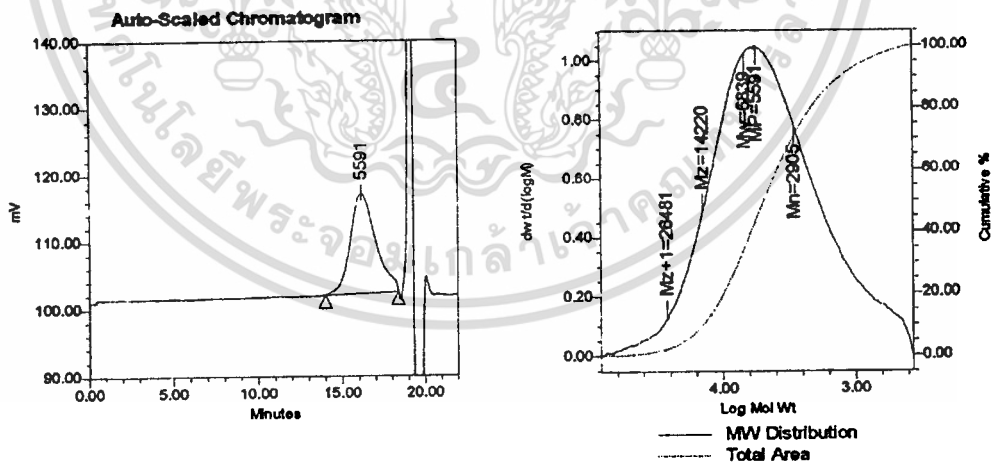
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	2863	6434	5598	12144	19663	2.247589

รูปที่ ข-7 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 48 ชั่วโมง

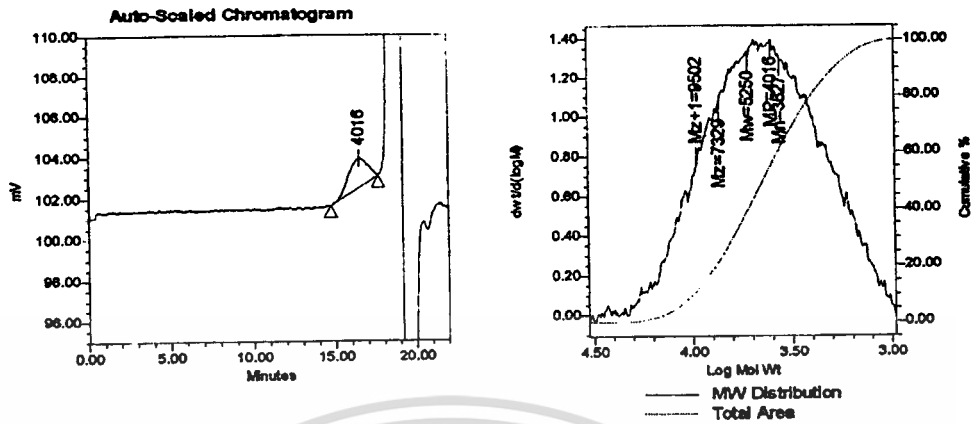


**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	2905	6839	5591	14220	26481	2.354165

รูปที่ ข-8 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 72 ชั่วโมง

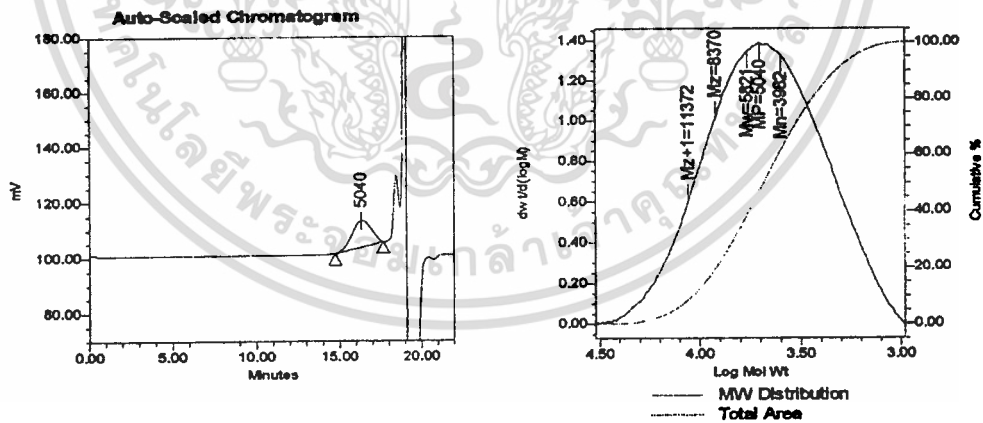
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	3627	5250	4016	7329	9502	1.447285
2						
3						

รูปที่ ข-9 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 24 ชั่วโมง

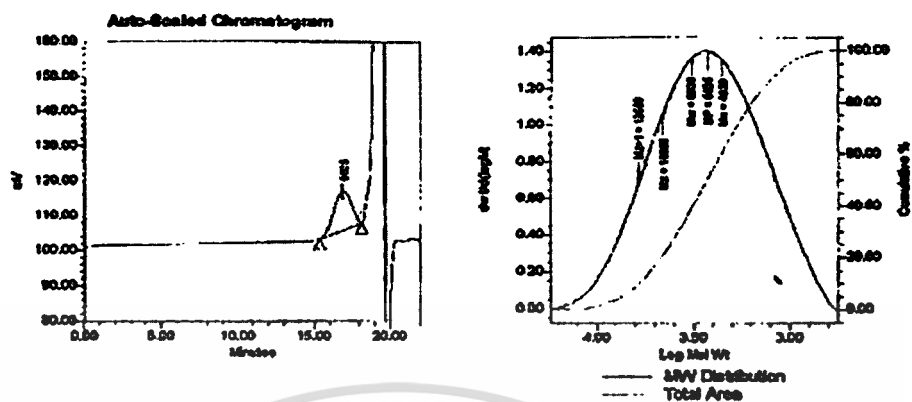


**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	3982	5821	5040	8370	11372	1.461816
2						
3						

รูปที่ ข-10 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HAP/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Peak Results**

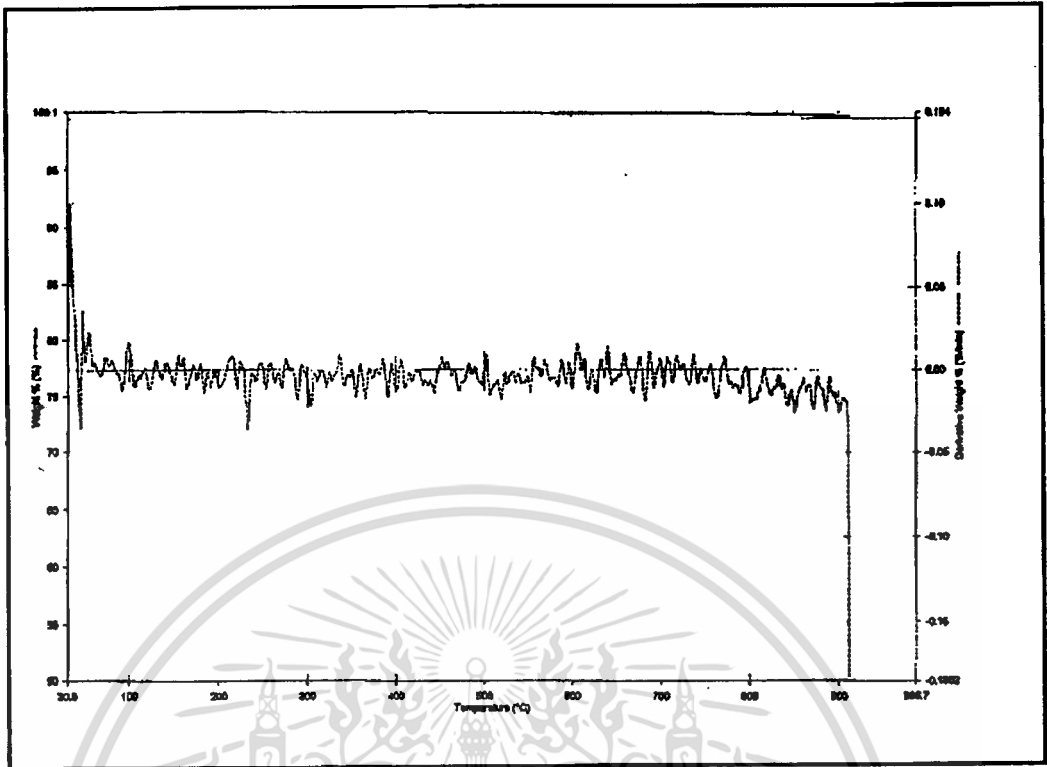
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	4828	8621	.8028	10458	12589	1.433287

รูปที่ ข-11 โครมาโทแกรมของ PEG ในวัสดุเชิงประกอบ HA<sub>p</sub>/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 72 ชั่วโมง

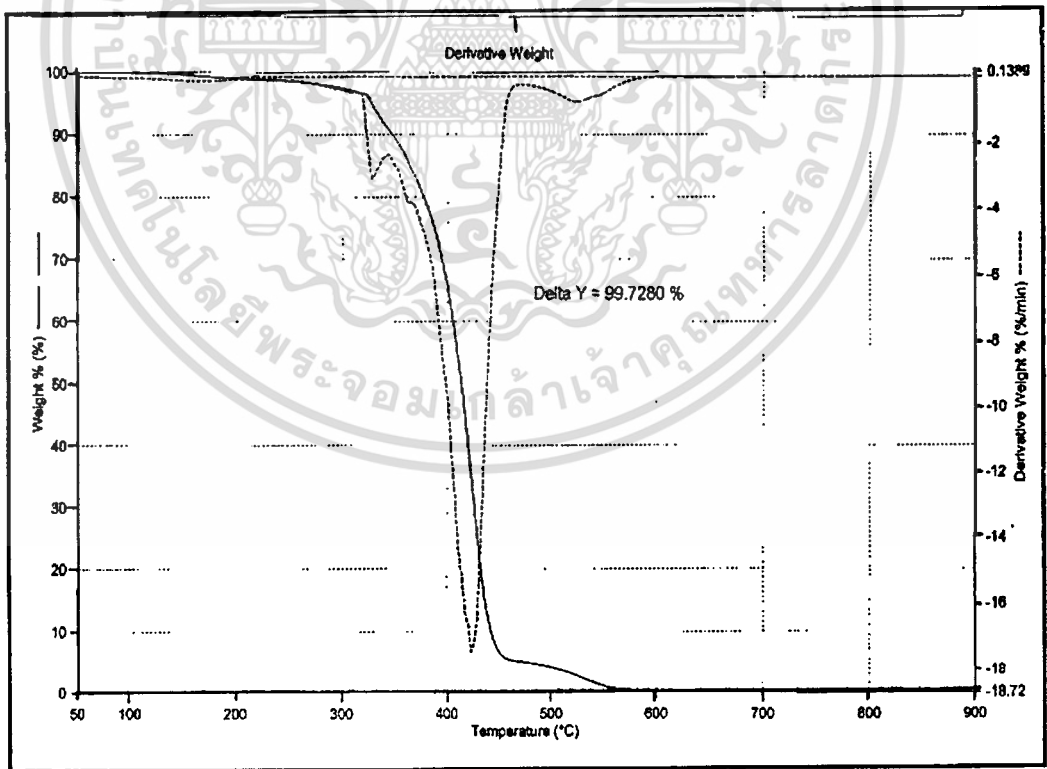
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

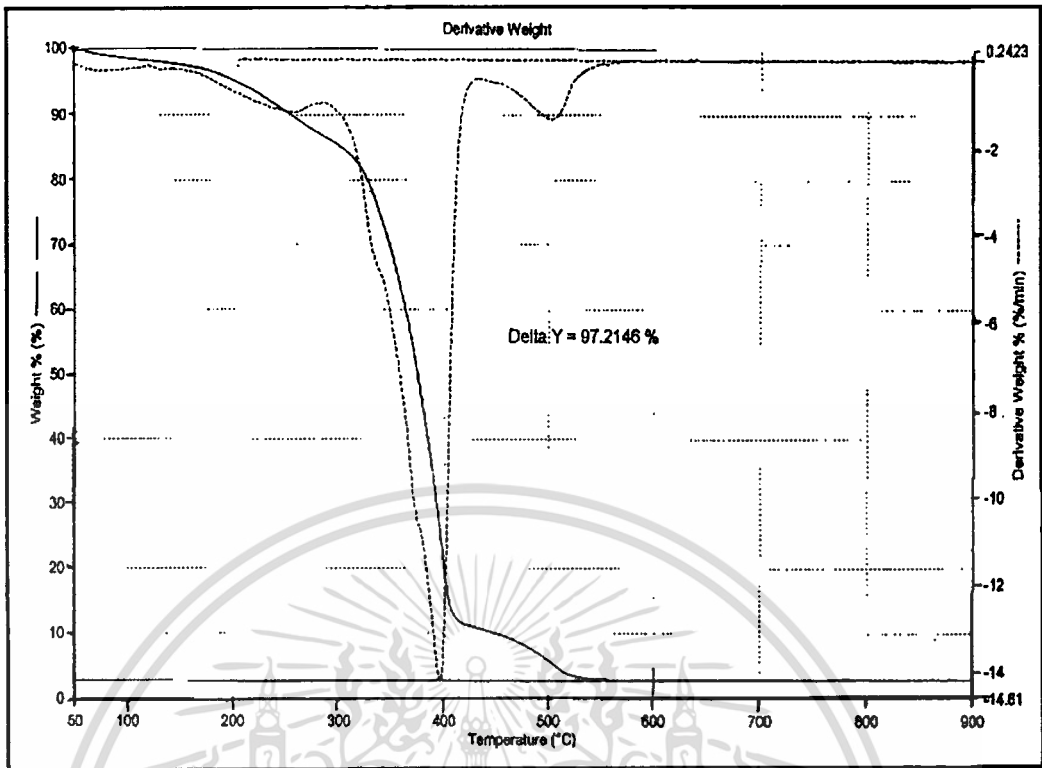


รูปที่ ซ-1 เทอร์โมแกรมของไฮดรอกซีแอปาทาइटที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100°C

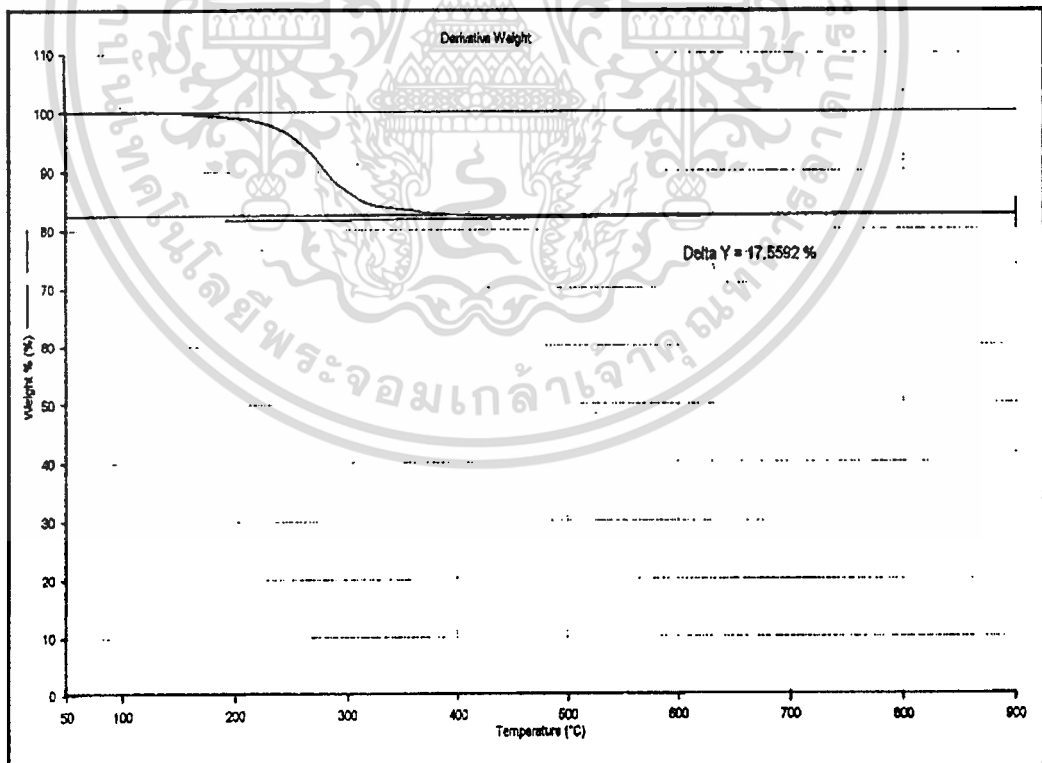


รูปที่ ซ-2 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนกลูตาเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

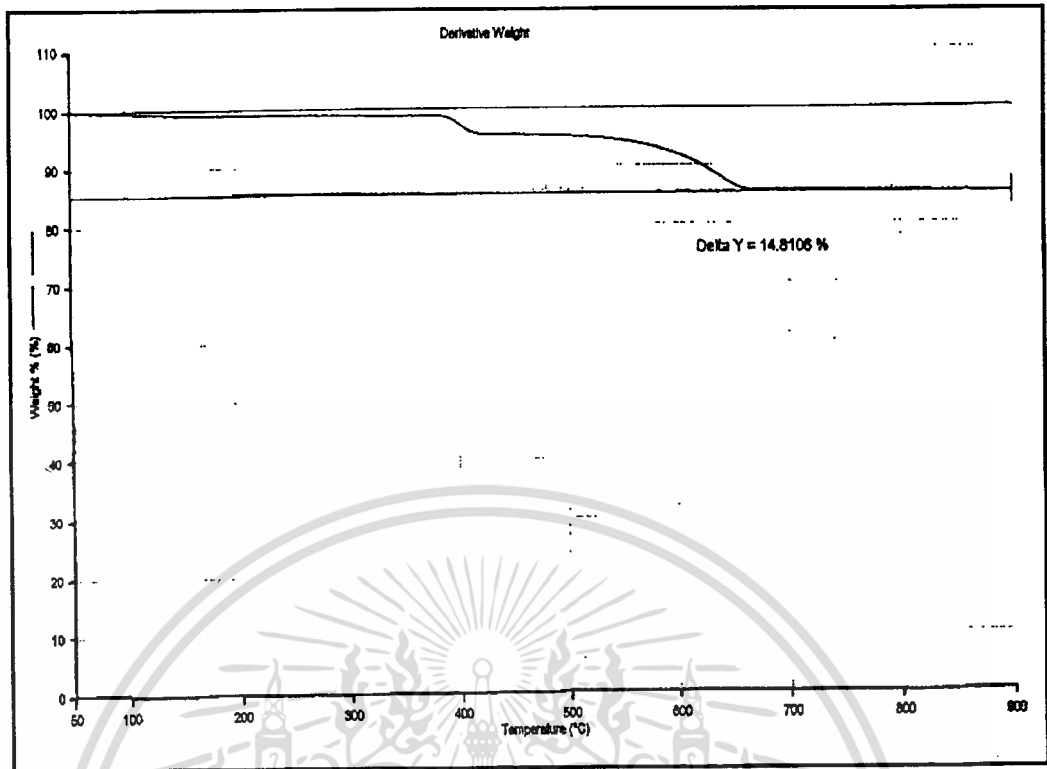


รูปที่ ๓-3 เทอร์โมแกรมของสารประกอบวง โอลิโกเอทิลีนกลูตาเรต

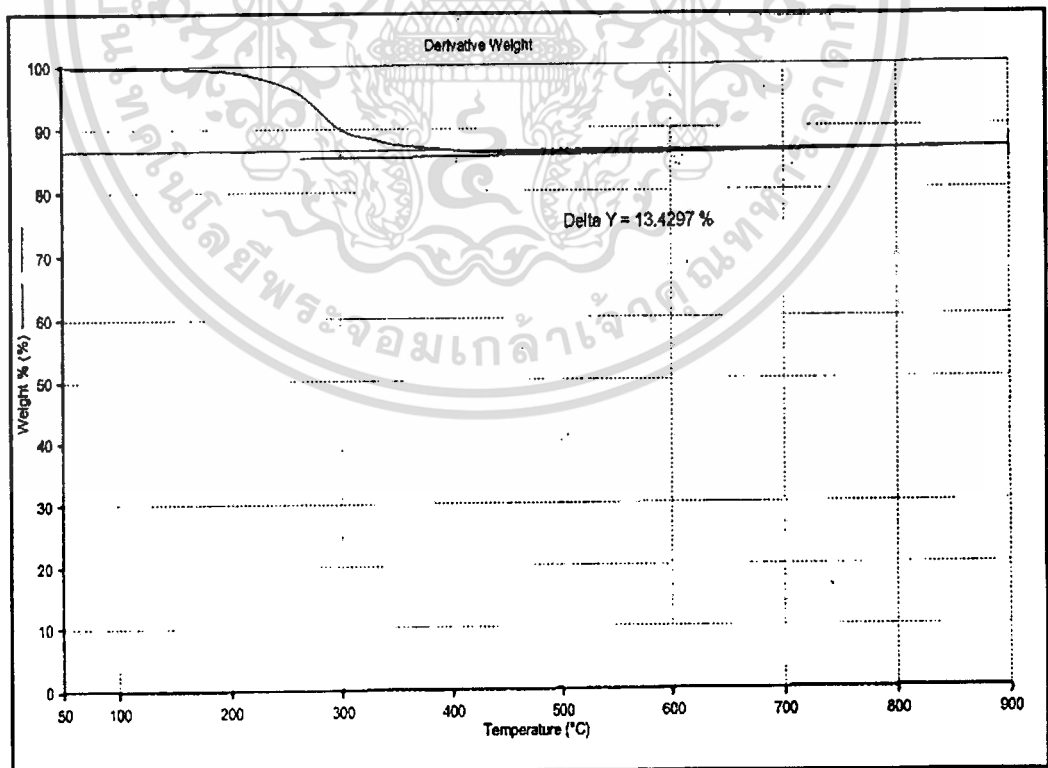


รูปที่ ๓-4 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C. 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

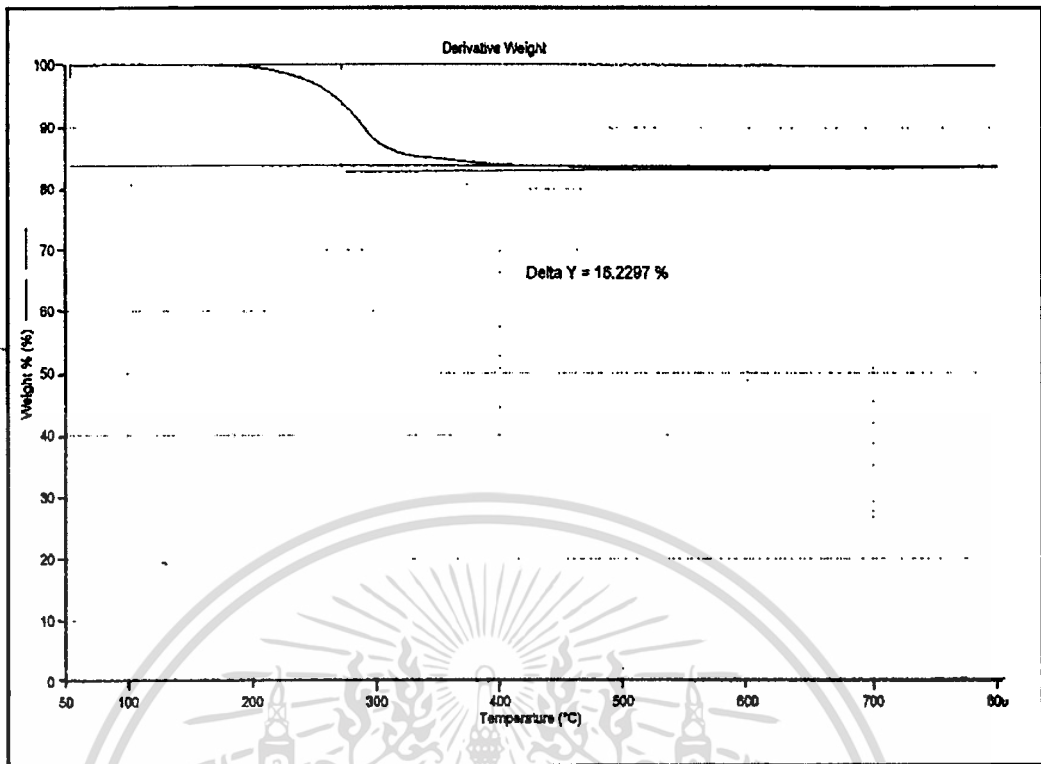


รูปที่ ข-5 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 48 ชั่วโมง

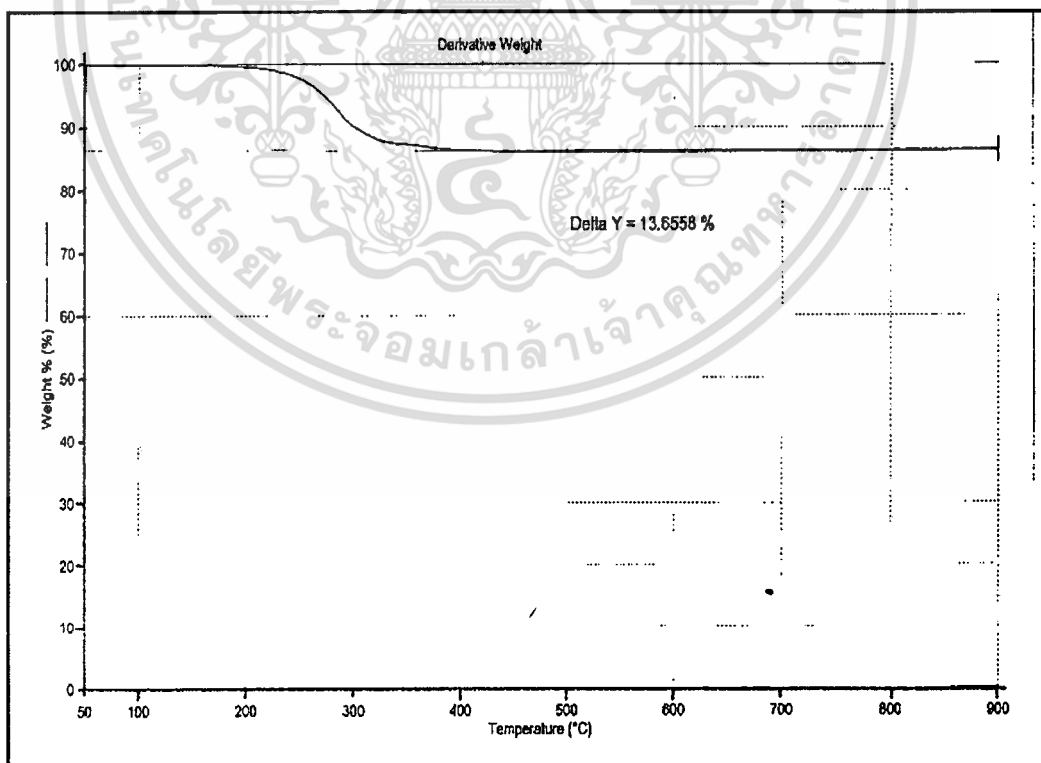


รูปที่ ข-6 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 180°C, 72 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

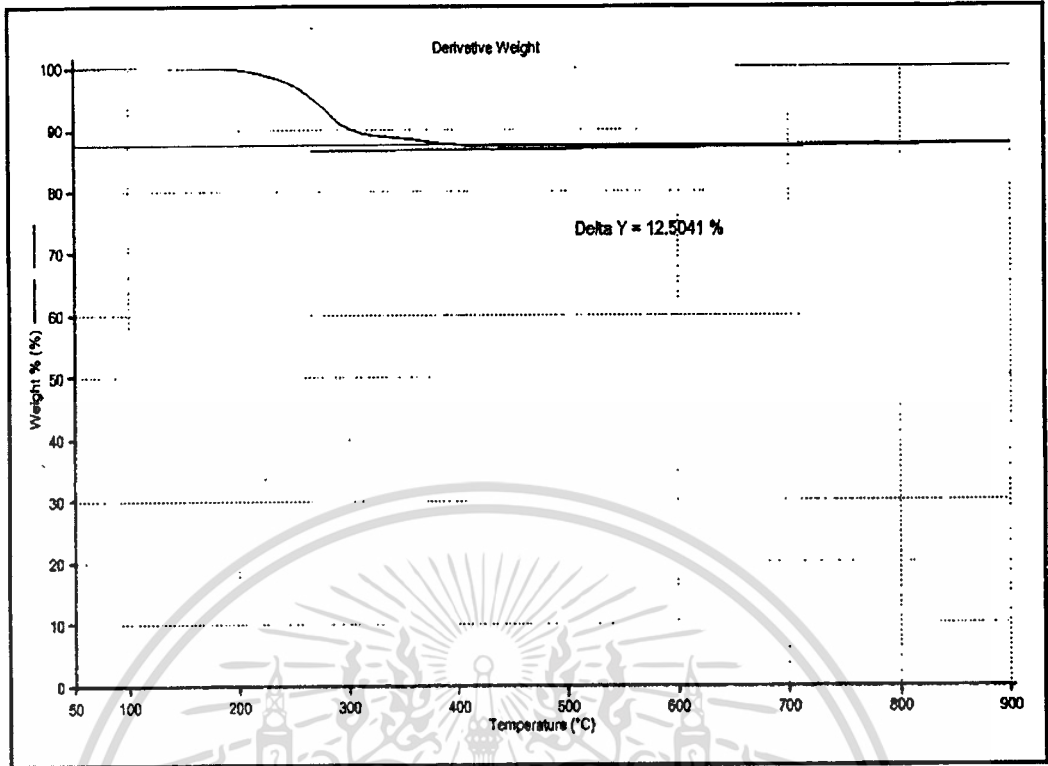


รูปที่ ซ-7 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 24 ชั่วโมง

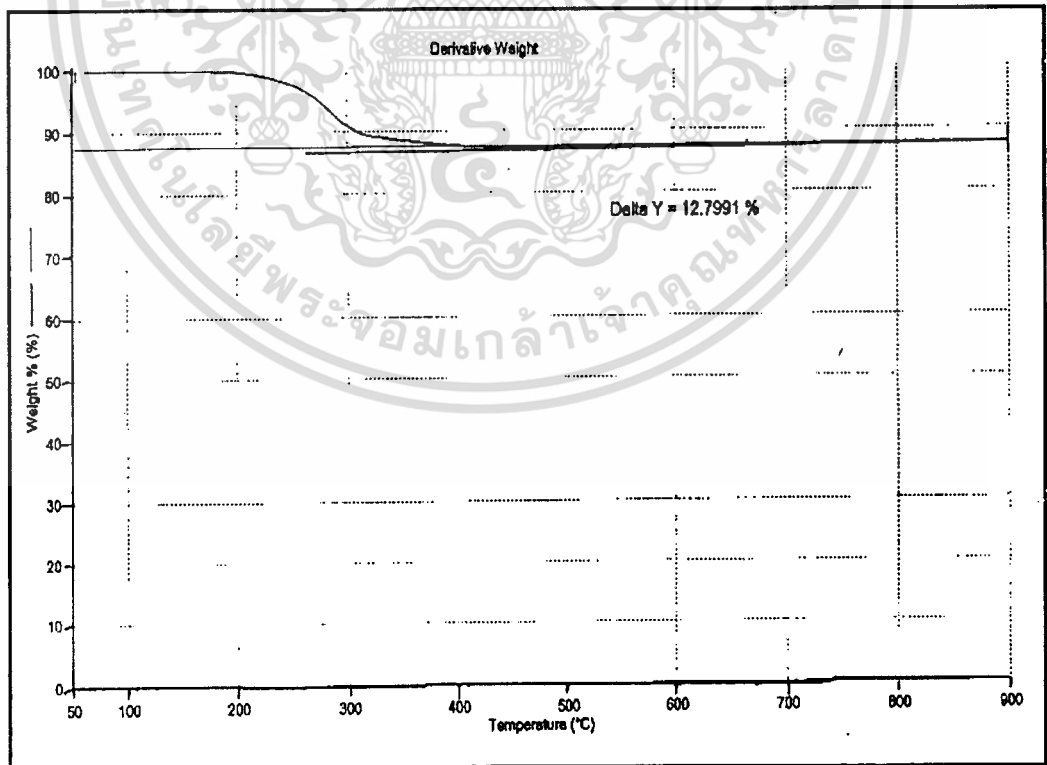


รูปที่ ซ-8 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

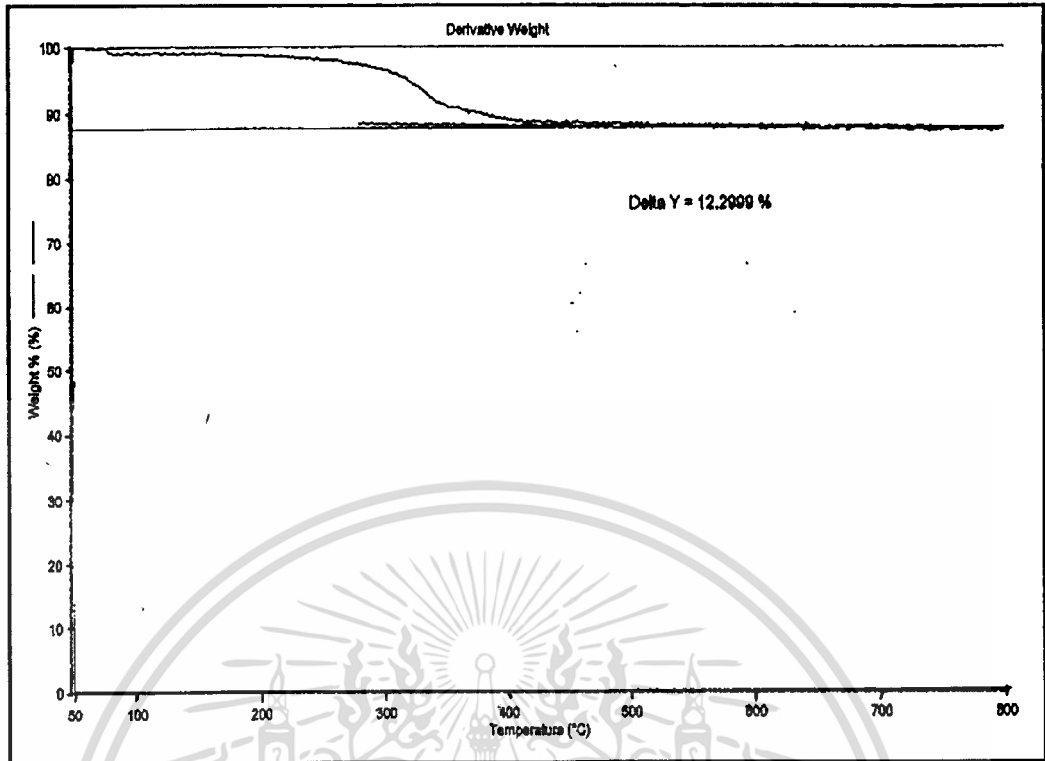


รูปที่ ซ-9 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 200°C, 72 ชั่วโมง

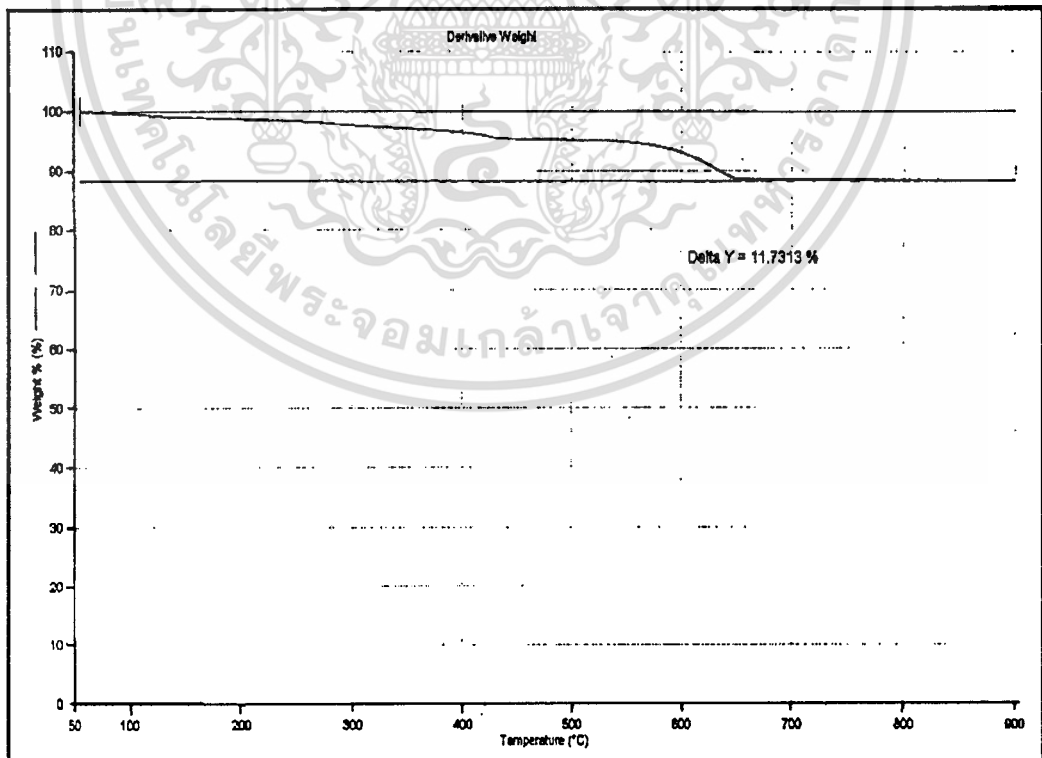


รูปที่ ซ-10 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-11 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 48 ชั่วโมง

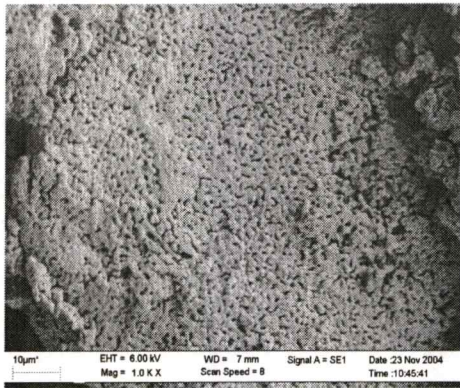


รูปที่ ข-12 เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ HAp/PEG ที่สภาวะในการทำปฏิกิริยา ROP 220°C, 72 ชั่วโมง

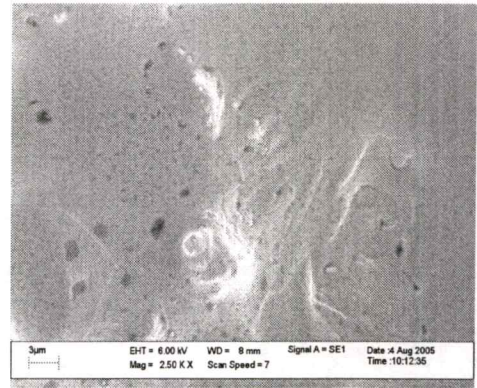
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



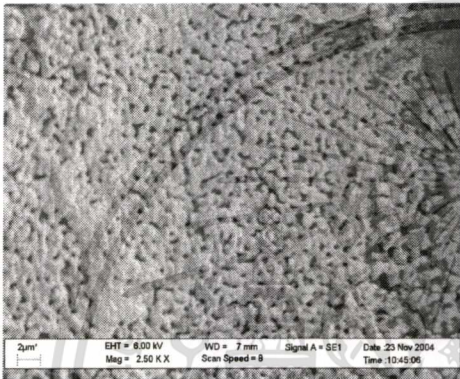
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กำลังขยาย 1000 เท่า



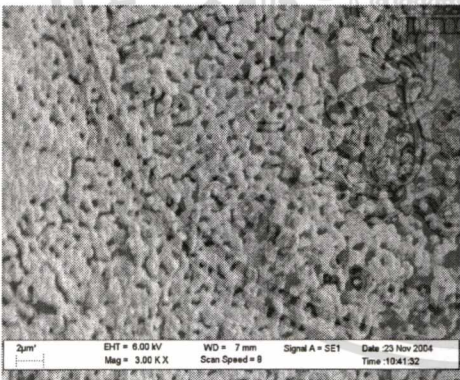
(a) 24 ชั่วโมง



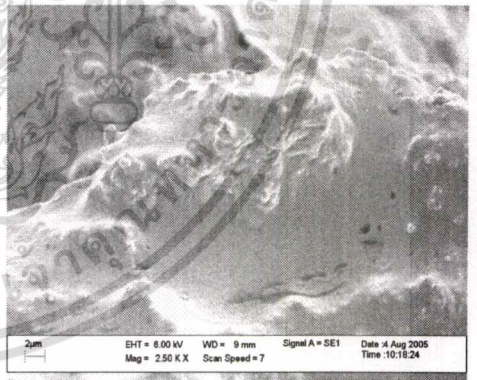
(b) กำลังขยาย 2500 เท่า



(b) 48 ชั่วโมง



(c) กำลังขยาย 3000 เท่า

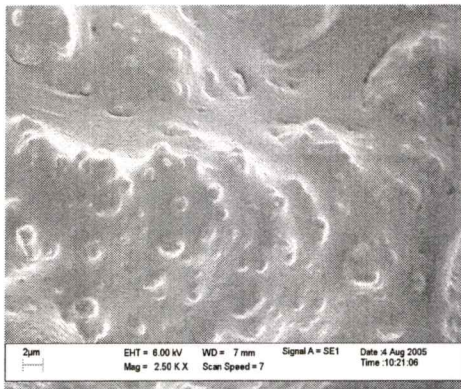


(c) 72 ชั่วโมง

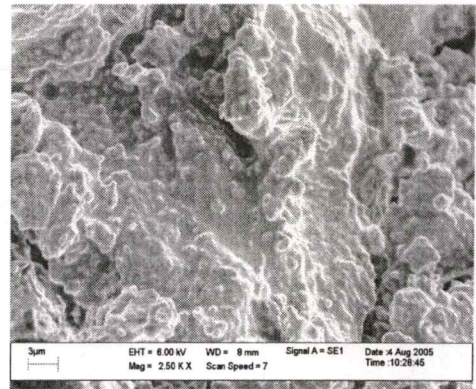
**รูปที่ ๓-1** โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของ HAp บริสุทธิ์ ขึ้นรูปแบบกรองลดความดัน (a) กำลังขยาย 1,000 เท่า (b) กำลังขยาย 2,500 เท่า และ (c) กำลังขยาย 3,000 เท่า

**รูปที่ ๓-2** โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของของวัสดุประกอบ ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 180°C (กำลังขยาย 2,500 เท่า)

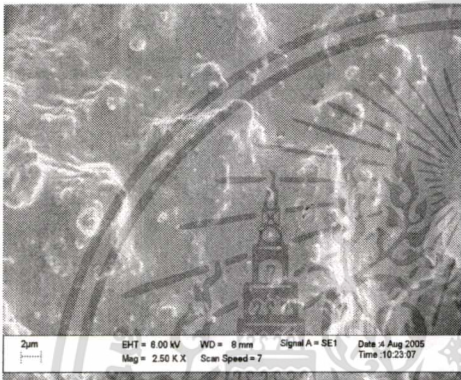
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



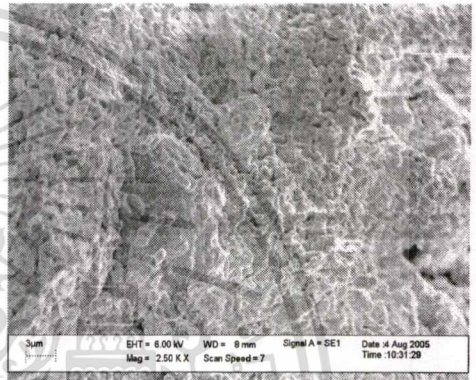
(a) 24 ชั่วโมง



(a) 24 ชั่วโมง



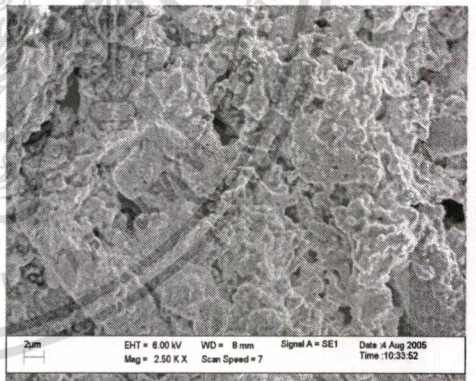
(b) 48 ชั่วโมง



(b) 48 ชั่วโมง



(c) 72 ชั่วโมง

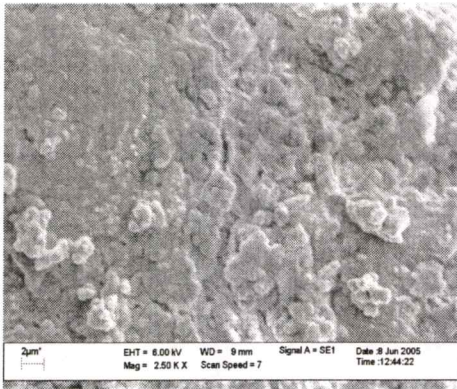


(c) 72 ชั่วโมง

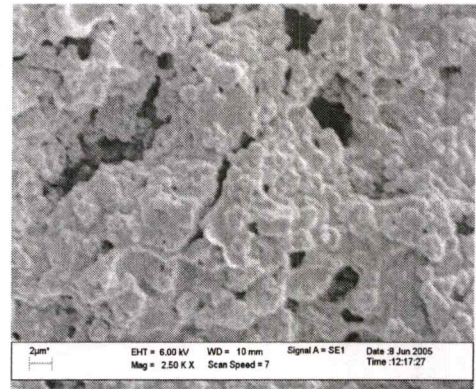
**รูปที่ ๓-3** โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของวัสดุประกอบ ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 200°C (กำลังขยาย 2,500 เท่า)

**รูปที่ ๓-4** โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของวัสดุประกอบ ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 220°C (กำลังขยาย 2,500 เท่า)

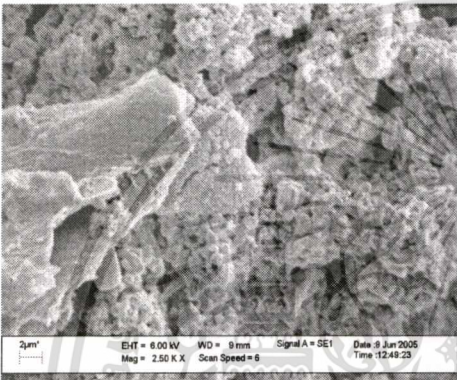
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



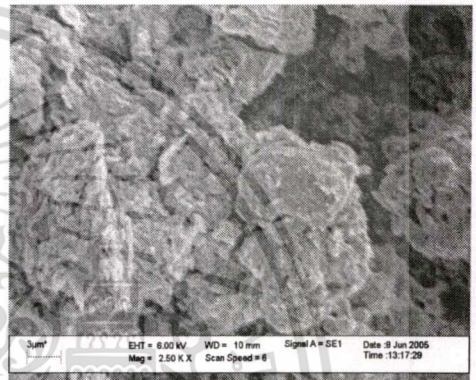
(a) 24 ชั่วโมง



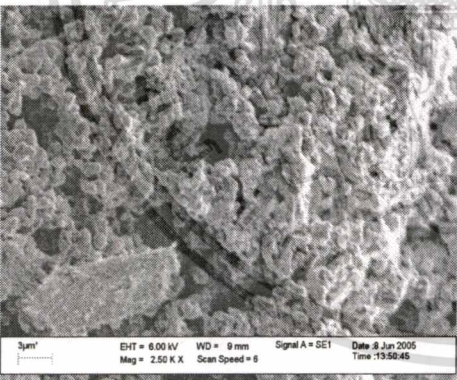
(a) 24 ชั่วโมง



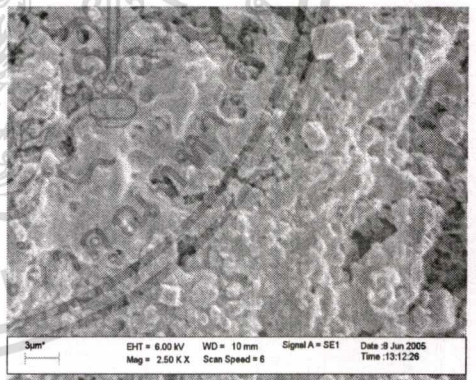
(b) 48 ชั่วโมง



(b) 48 ชั่วโมง



(c) 72 ชั่วโมง

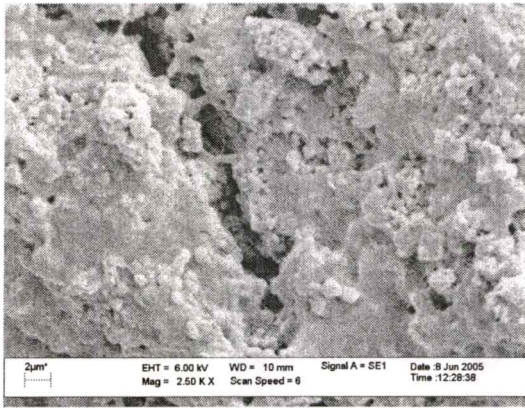


(c) 72 ชั่วโมง

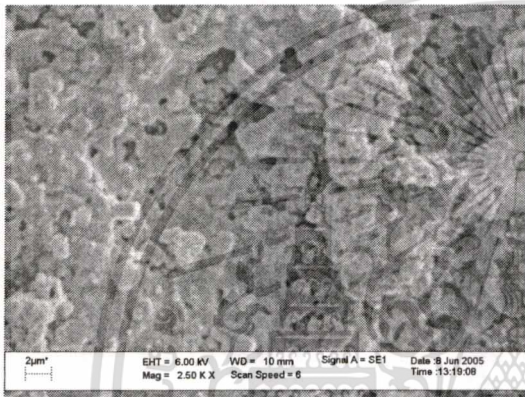
**รูปที่ ๕-5** โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของวัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 180°C หลังการแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน ในระบบไหลผ่าน (กำลังขยาย 2,500 เท่า)

**รูปที่ ๕-6** โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของวัสดุประกอบที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 200°C หลังการแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน ในระบบไหลผ่าน (กำลังขยาย 2,500 เท่า)

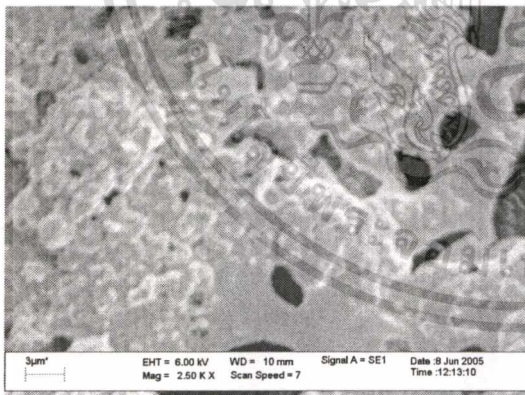
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) 24 ชั่วโมง



(b) 48 ชั่วโมง



(c) 72 ชั่วโมง

**รูปที่ ๗-7** โครงสร้างจุลภาคพื้นผิวของ  
วัสดุประกอบที่เตรียมได้จาก  
ปฏิกิริยา ROP อุณหภูมิ 220°C  
หลังการแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน  
ในระบบไหลผ่าน

(กำลังขยาย 2,500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

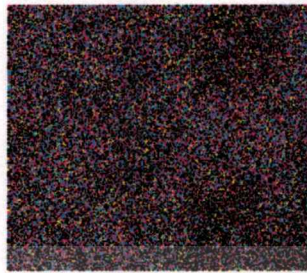


ภาคผนวก ญ

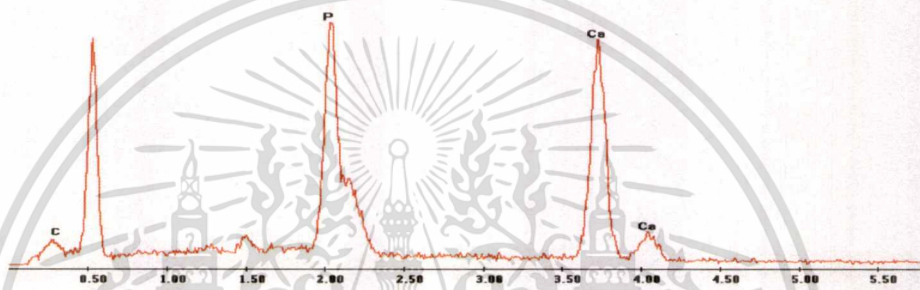
**SEM-EDS แสดงธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิว  
และการกระจายของธาตุนบนพื้นผิว**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon



Element	Weight %	Atomic %
C K	9.26	31.71
P K	25.79	25.75
Ca K	64.95	42.54
Total	100	100

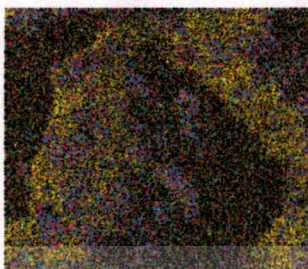


รูปที่ ๑-1 ภาพถ่าย SEM-EDS ของ HAp บริสุทธิ์ ที่สังเคราะห์ได้ เผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

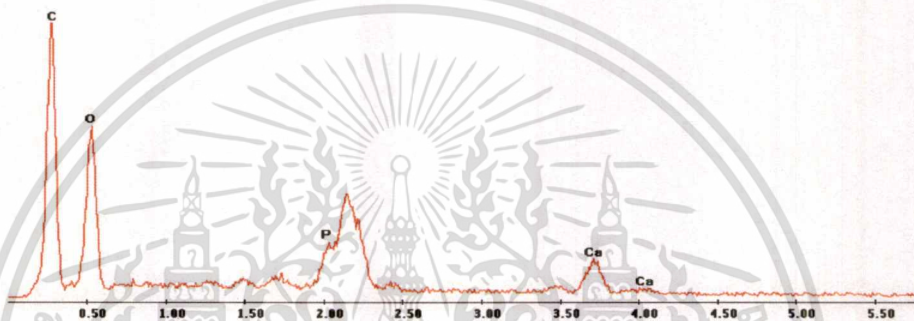
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

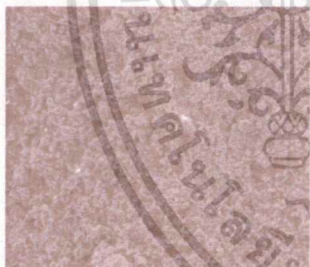
(a)



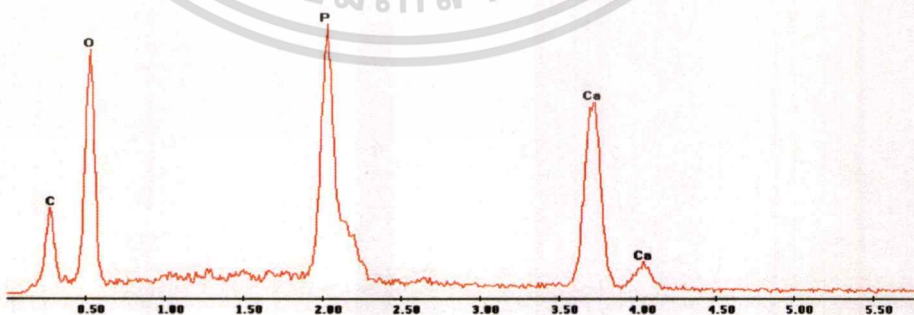
Element	Weight %	Atomic %
C K	73.32	89.24
P K	9.64	4.55
Ca K	17.04	6.21
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	22.71	47.21
P K	25.40	20.47
Ca K	51.89	32.32
Total	100	100

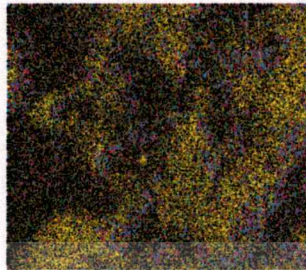
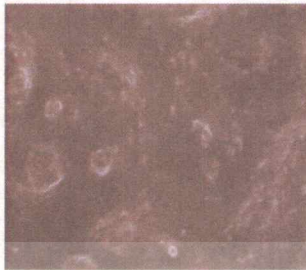


**รูปที่ ๒-2** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

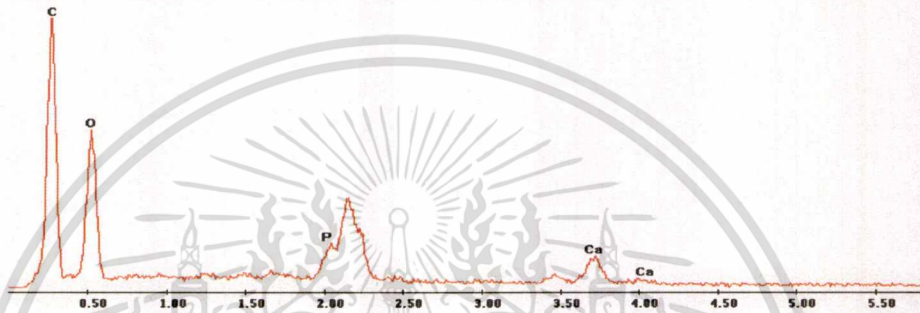
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนการเผยแพร่ทางวิชาการ หากมีผู้อื่นได้อ่านเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

(a)



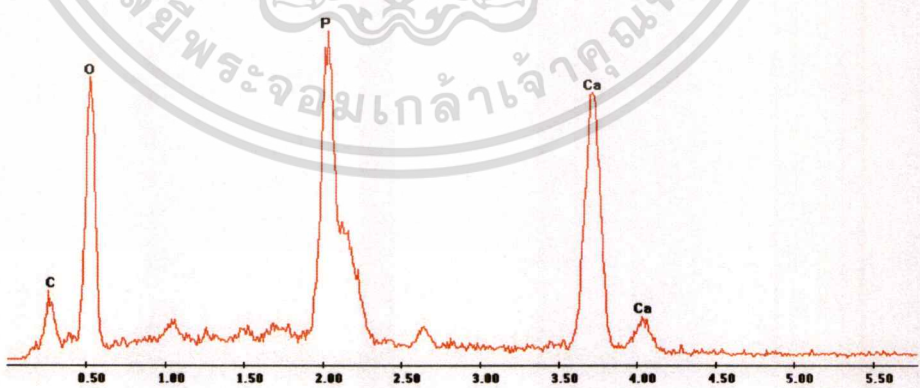
Element	Weight %	Atomic %
C K	76.04	90.57
P K	8.40	3.88
Ca K	15.55	5.55
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	14.30	33.77
P K	26.93	24.65
Ca K	58.77	41.58
Total	100	100

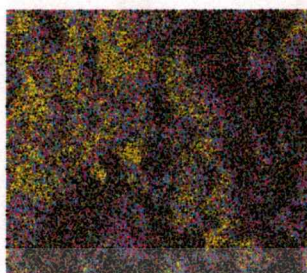


**รูปที่ ๓-3** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

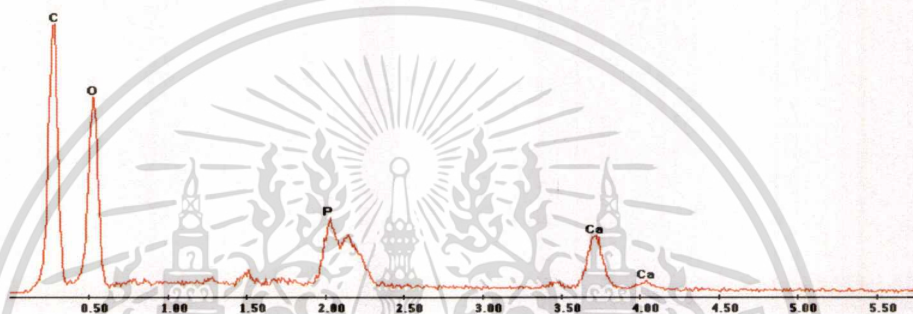
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

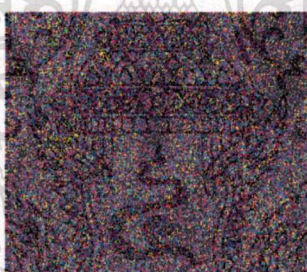
(a)



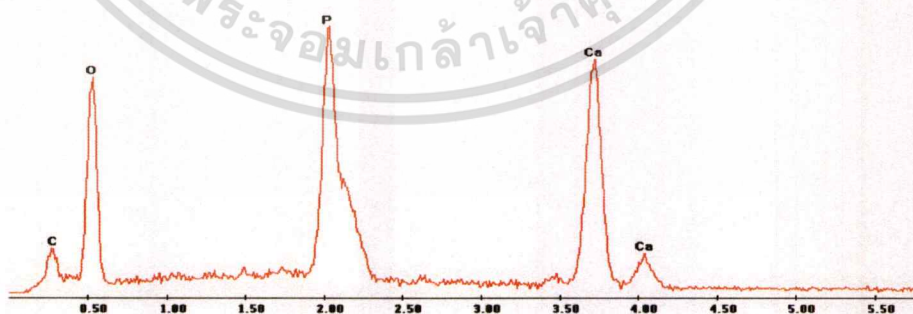
Element	Weight %	Atomic %
C K	66.45	85.78
P K	10.88	5.45
Ca K	22.67	8.77
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	12.75	30.91
P K	26.75	25.15
Ca K	60.50	43.95
Total	100	100

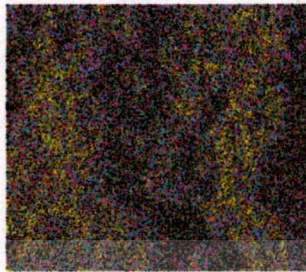
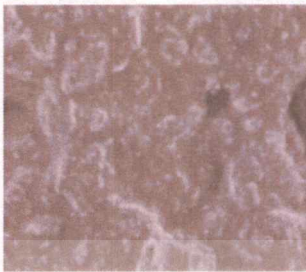


**รูปที่ ๓-๔** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 180°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

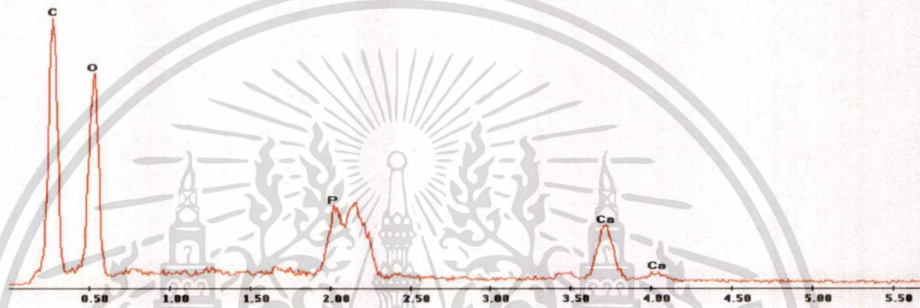
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

(a)



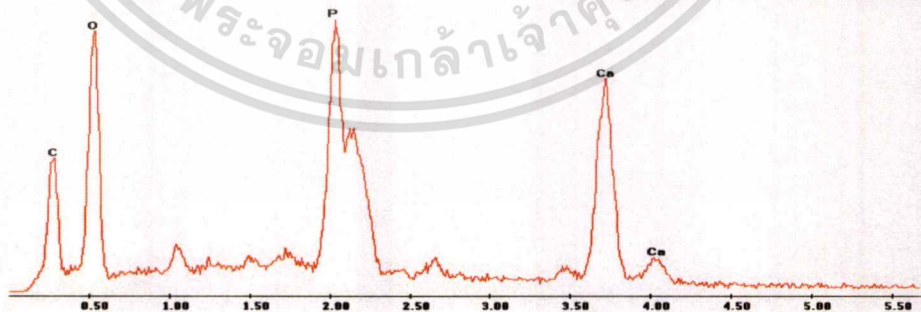
Element	Weight %	Atomic %
C K	65.36	85.16
P K	11.48	5.80
Ca K	23.17	9.05
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	30.11	56.75
P K	22.81	16.67
Ca K	47.08	26.59
Total	100	100

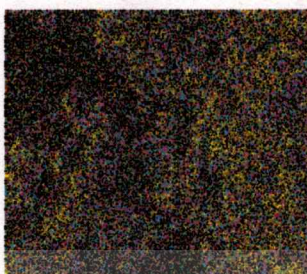
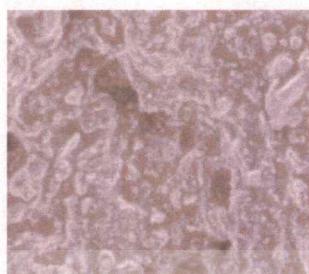


**รูปที่ ๕-5** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

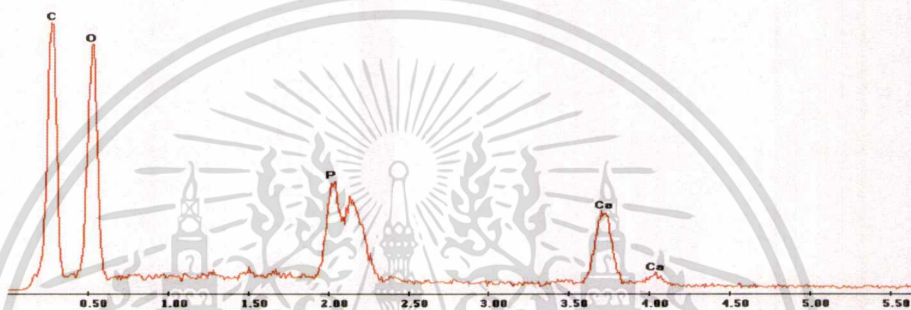
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานอกโรงเรียน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

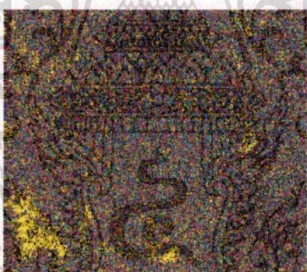
(a)



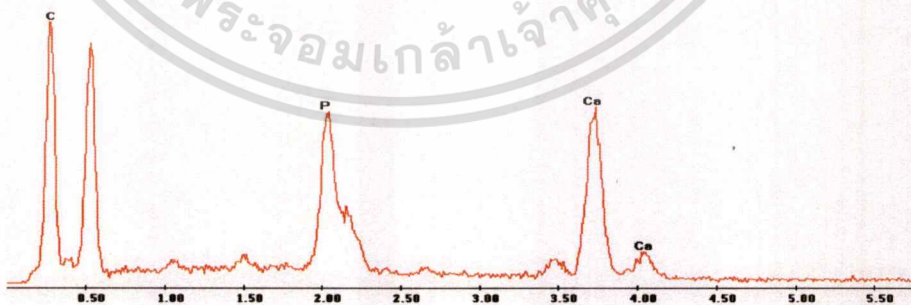
Element	Weight %	Atomic %
C K	60.29	82.19
P K	13.23	6.99
Ca K	26.48	10.82
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	45.52	69.02
P K	15.43	12.47
Ca K	39.05	18.51
Total	100	100

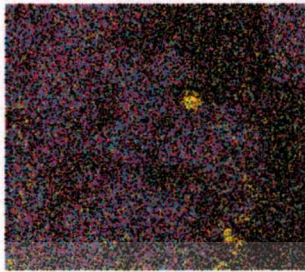
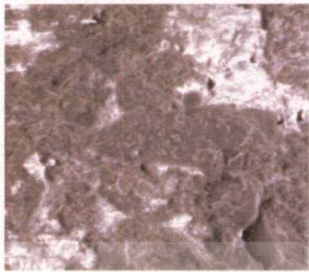


**รูปที่ ๖-6** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และหลังแช่ในสารละลาย SBF (b) 7 วัน (c) 14 วัน (d) 21 วัน (e) 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

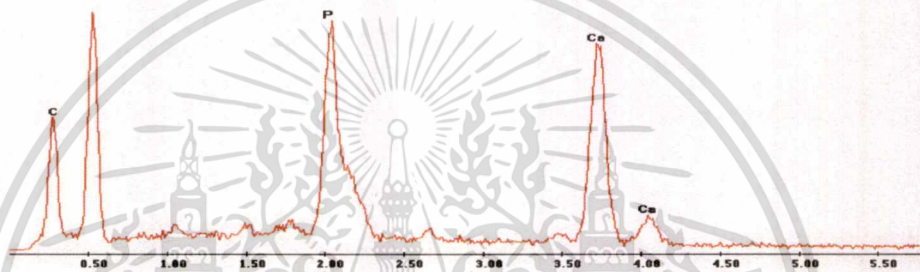
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์ได้ดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

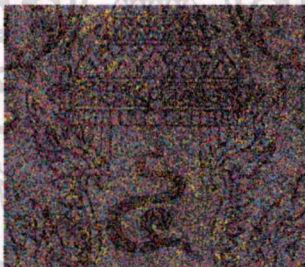
(c)



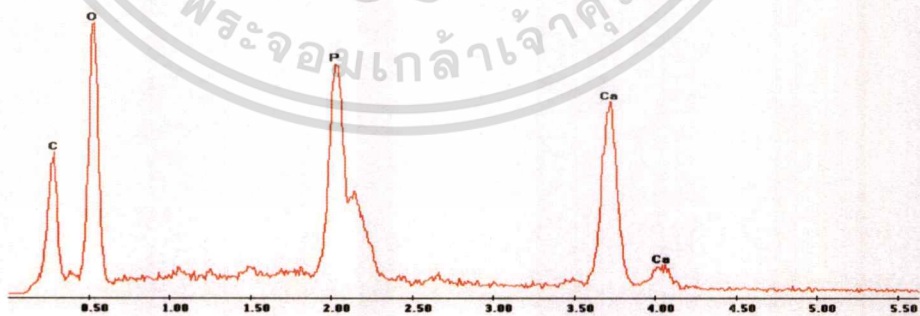
Element	Weight %	Atomic %
C K	32.14	59.05
P K	22.17	15.79
Ca K	45.70	25.16
Total	100	100



(d)



Element	Weight %	Atomic %
C K	29.63	54.48
P K	20.79	17.25
Ca K	49.58	28.27
Total	100	100

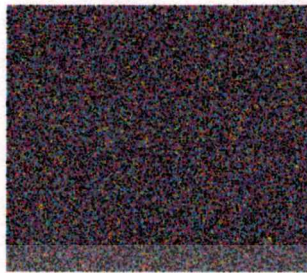


**รูปที่ ๖-๖ (ต่อ)** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และหลังแช่ในสารละลาย SBF (b) 7 วัน (c) 14 วัน (d) 21 วัน (e) 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

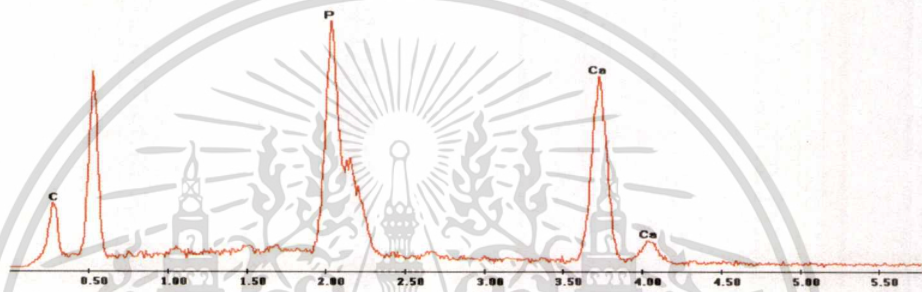
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

(e)



Element	Weight %	Atomic %
C K	19.89	44.01
P K	26.61	21.31
Ca K	53.50	34.68
Total	100	100

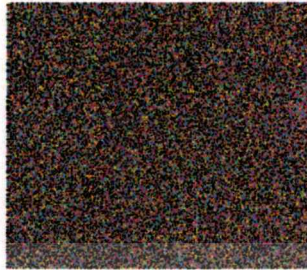
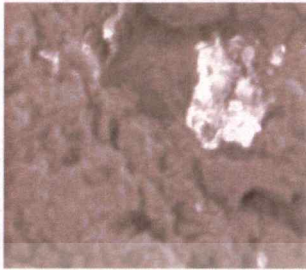


รูปที่ ๖-๖ (ต่อ) ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และหลังแช่ในสารละลาย SBF (b) 7 วัน (c) 14 วัน (d) 21 วัน (e) 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

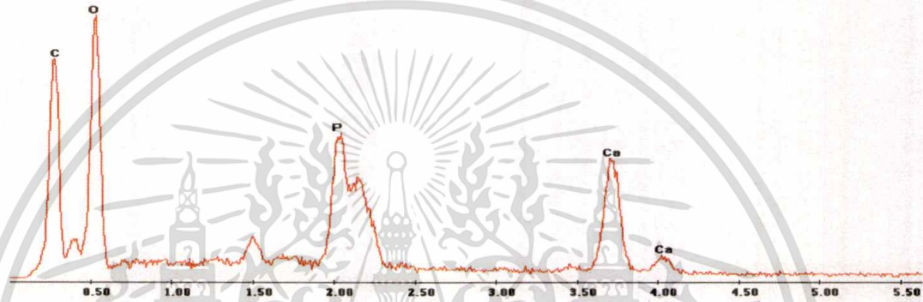
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

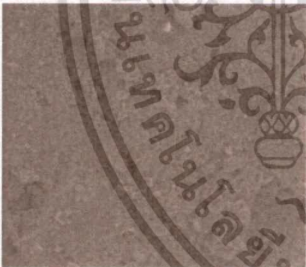
(a)



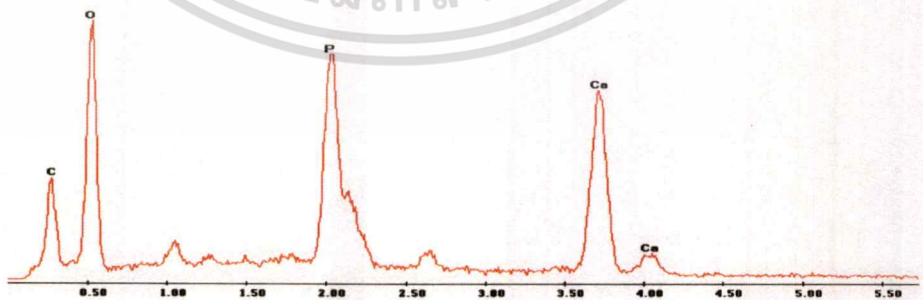
Element	Weight %	Atomic %
C K	49.98	79.37
P K	15.28	7.93
Ca K	34.74	12.70
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	26.74	53.65
P K	23.79	17.16
Ca K	49.47	29.19
Total	100	100

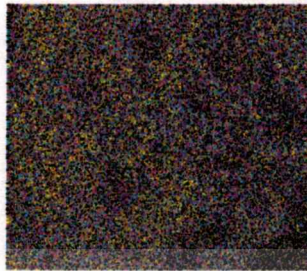


**รูปที่ ๗-7** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 200°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

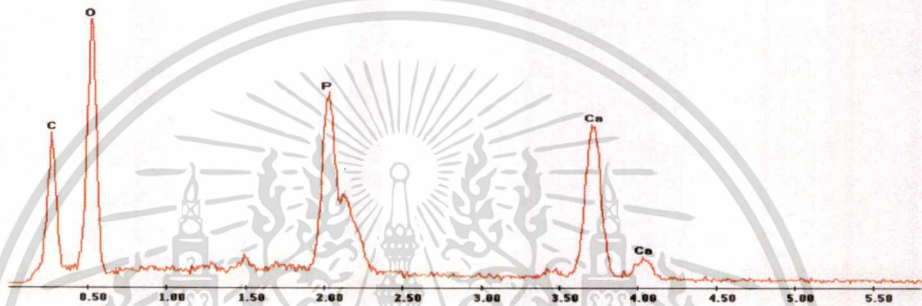
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งการเผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

(a)



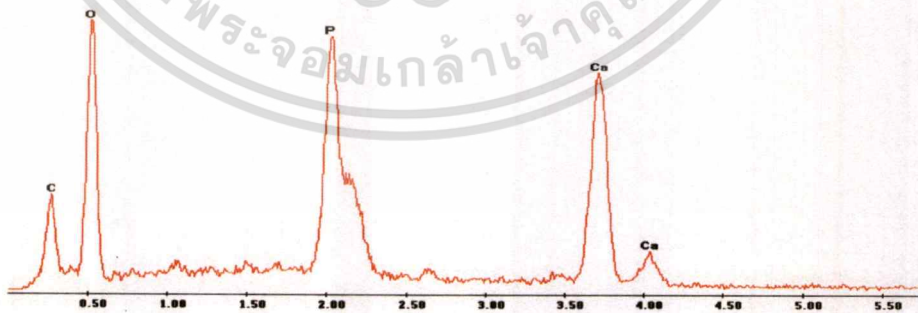
Element	Weight %	Atomic %
C K	34.85	63.06
P K	20.26	13.99
Ca K	44.88	22.95
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	22.44	45.98
P K	23.62	20.18
Ca K	53.94	33.84
Total	100	100

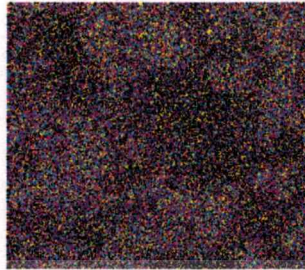
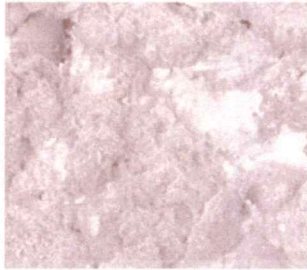


**รูปที่ ๘-8** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

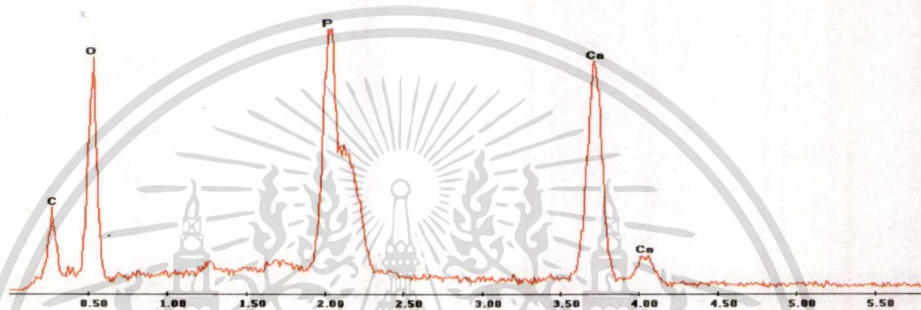
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

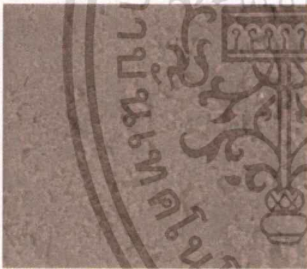
(a)



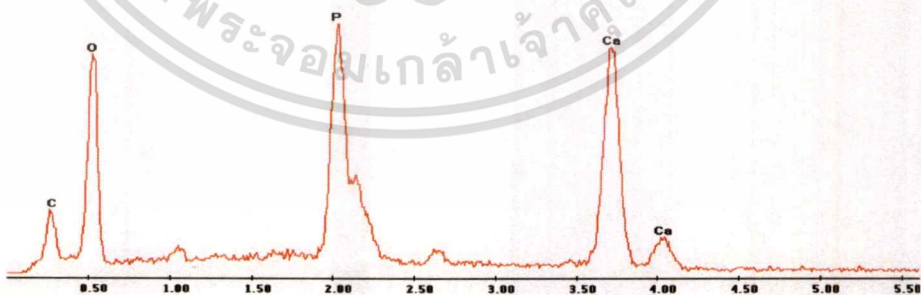
Element	Weight %	Atomic %
C K	18.79	41.40
P K	25.78	22.02
Ca K	55.42	36.58
<b>Total</b>	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	16.61	34.97
P K	24.39	24.62
Ca K	59.00	40.41
<b>Total</b>	100	100

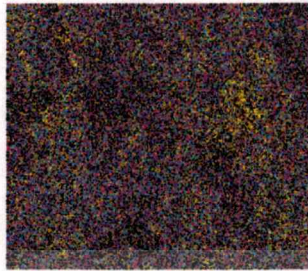
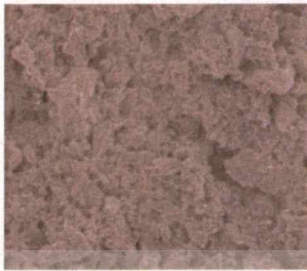


**รูปที่ ๙-9** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสถานะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 48 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

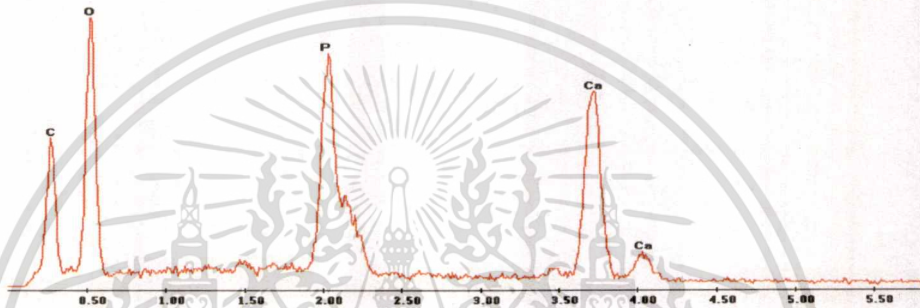
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● Calcium      ● Phosphorous      ● Carbon

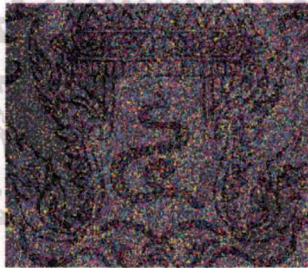
(a)



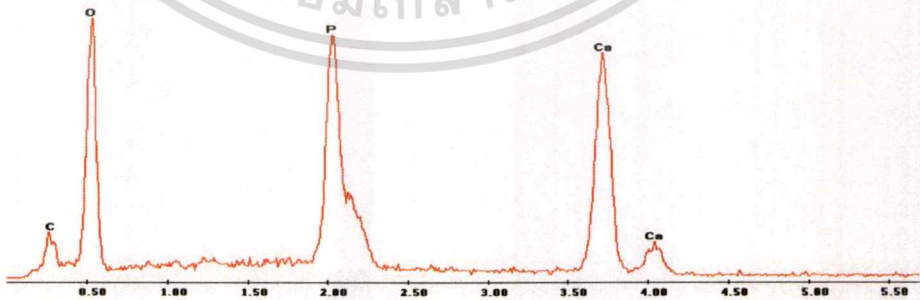
Element	Weight %	Atomic %
C K	31.45	60.44
P K	20.72	14.93
Ca K	47.83	24.63
Total	100	100



(b)



Element	Weight %	Atomic %
C K	13.16	35.72
P K	26.16	24.45
Ca K	60.68	39.83
Total	100	100



**รูปที่ ๑๐-10** ภาพถ่าย SEM-EDS ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากสภาวะอุณหภูมิ 220°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 72 ชั่วโมง (a) ก่อนการแช่ในสารละลาย SBF และ (b) หลังแช่ในสารละลาย SBF 28 วัน (กำลังขยาย 1,000 เท่า).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ – นามสกุล** นางสาว วไลลักษณ์ ทัพเจริญ
- วัน เดือน ปีเกิด** 2 ตุลาคม 2518
- ที่อยู่** 50/42 หมู่บ้าน กฤษดานคร 28 ถนน บางนา – ตราด ตำบล บางแก้ว  
อำเภอ บางพลี จังหวัด สมุทรปราการ โทร. 0 – 2728 – 4644 – 5
- ประวัติการศึกษา** 2539 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- 2543 ประกาศนียบัตรบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้