

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปอ์ไทต์กับ  
พอลิเมทิลเมทาคริเลตและแคลเซียมซิติลิกเตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

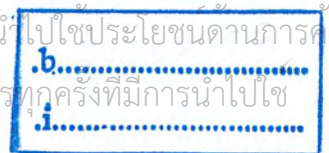
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....55584

วัน,เดือน,ปี 19 พ.ค. 2548



**Synthesis of Hydroxyapatite/Poly(Methyl Methacrylate) Composites  
and Calcium Silicate/Poly(Methyl Methacrylate) Composites**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the**

**Degree of Bachelor of Science**

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

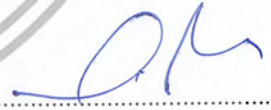
**Academic Year 2003**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสังเคราะห์วัสดุประกอบไฮดรอกซีเอปาทาท์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตและแคลเซียมซilikेटกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต	
นักศึกษา	นางสาวระพี เจริญสูงเนิน	
	นางสาวสิริรัตน์ รัตนาศิ	
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปยุตธมา ศิริพันธ์ โนน	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ภัทธวรุช มนต์วิเศษ	

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ดร.สุภารัตน์	รักษลธิ	
กรรมการ	ผศ.ดร.อิทธิพล	แจ้งชัด	
กรรมการ	ดร.ชลลดา	อุตวีรุฬห์	

  
.....  
(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)  
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หัวข้อโครงการพิเศษ

การสังเคราะห์วัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทาइटกับ  
พอลิเมทิลเมทาคริเลตและแคลเซียมซิติเกตกับพอลิเม-  
ทิลเมทาคริเลต

## นักศึกษา

นางสาวระพี เจิมสูงเนิน

นางสาวสิริรัตน์ รัตนาบดี

## ภาควิชา

เคมี คณะวิทยาศาสตร์

## สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

## ปีการศึกษา

2546

## อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ปณณา ศิริพันธ์ โนน

## อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร.ภักทวุธ มนต์วิเศษ

## บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (HAp/PMMA) และแคลเซียมซิติเกตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (CS/PMMA) และทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของวัสดุประกอบ ในขั้นแรกทำการสังเคราะห์วัสดุเซรามิกส์โดยการสังเคราะห์ HAp จากกรดฟอสฟอริกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสังเคราะห์ CS จากเตตระเอทิลออร์โทซิติเกตกับแคลเซียมไนเตรดเตรไฮเดรต ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาหาวิธีการที่เหมาะสมในการขึ้นรูปก้อนเซรามิกส์พบว่า วิธีขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ การขึ้นรูปก้อนเซรามิกส์โดยการผสมผงของวัสดุเซรามิกส์กับสารตัวเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแกนเดียว (Uniaxial press) จากนั้นนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดผลึกอย่างสมบูรณ์และเกิดเป็นรูพรุนเนื่องจากการสลายตัวของ PVA ขั้นตอนที่ 3 ทำการเตรียมวัสดุประกอบโดยการแช่ในสารละลายผสมของมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ BPO 0.1 และ 0.5% โมล เพื่อศึกษาปริมาณของ BPO ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป จากนั้นนำก้อนเซรามิกส์ไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบบัตช์ ที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ BPO ที่เหมาะสมคือ 0.1% โมล PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแบบจำนวนเท่ากับ 152,700 และ 154,500 กรัม/โมล ตามลำดับ ผลจากเทคนิค Thermogravimetric Analyzer (TGA) พบว่าปริมาณ PMMA ในวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA มีค่าเท่ากับ 13 และ 26% โดยน้ำหนักตามลำดับ ค่าความแข็งแรงของวัสดุประกอบ HAp/PMMA มีค่าเท่ากับ 131 MPa ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า HAp บริสุทธิ์ 11 เท่า และวัสดุประกอบ CS/PMMA มีค่าความแข็งแรง 90 MPa ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า CS บริสุทธิ์ 25 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Synthesis of Hydroxyapatite/Poly(Methyl Methacrylate) and Calcium Silicate/Poly(Methyl Methacrylate) Composites
<b>Name</b>	Miss Rapee Jermsungnern Miss Sirirat Rattanabodee
<b>Department</b>	Chemistry, Faculty of Science
<b>Program</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic Year</b>	2003
<b>Special Project Advisor</b>	Dr. Punnama Siriphannon
<b>Special Project Co-Advisor</b>	Dr. Pathavuth Monvisade

### ABSTRACT

This project studied on synthesis of hydroxyapatite/poly(methyl methacrylate) (HAp/PMMA) and calcium silicate/poly(methyl methacrylate) (CS/PMMA) composites and measuring compressive strength. First, the HAp powder was synthesized from phosphoric acid and calcium hydroxide, and the CS powder was synthesized from tetraethylorthosilicate and calciumnitrate tetrahydrate. The second step was focused on seeking the optimized method for ceramic pallet preparation. It was found that a suitable method was by mixing the ceramic powder with poly(vinyl alcohol) (PVA) and shaping them by uniaxial pressing. The green bodies were calcined at a high temperature to complete crystallization process and generate porous structures due to decomposition of PVA. The final step was to prepare the composites by soaking the pallets in the mixture of methyl methacrylate and 0.1 or 0.5%mol of benzoyl peroxide (BPO) for 24 hours. The pre-composites were then bulk polymerized at 85°C for 24 hours. It was found that a suitable quantity of BPO is 0.1%mol with  $M_n$  of 152,700 for HAp/PMMA and  $M_n$  of 154,000 for CS/PMMA. The results of Thermogravimetric Analyzer (TGA) indicated the percent weights of PMMA in the HAp/PMMA and CS/PMMA were 13 and 26, respectively. In addition, the compressive strength of HAp/PMMA was 131 MPa (11 folds of virgin HAp) and that of CS/PMMA was 90 MPa (25 folds of virgin CS).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน และ ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.พัชนี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารด้วยเทคนิค NMR

ขอขอบพระคุณ พี่สุภาณี ชนะวงษ์ (พี่จอย) สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาคิวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุก ๆ ฝ่าย ที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่าง ๆ

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ซึ่งมีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ระพี เจริญเนิน  
ศิริรัตน์ รัตนาบดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 แคลเซียมซิติเลท (CS)	3
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของ CS	3
2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ	3
2.1.3 สมบัติเด่นของ CS	3
2.1.4 การประยุกต์ใช้งาน CS	3
2.1.5 การสังเคราะห์ CS	4
2.2 ไฮดรอกซีเอปาทาइट (HAp)	4
2.2.1 สมบัติทั่วไปของ HAp	5
2.2.2 การสังเคราะห์ HAp	6
2.2.3 การประยุกต์ใช้งาน HAp ในร่างกาย	7
2.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)	7
2.3.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกแบบเติมผ่านกลไกอนุพลอิสระ	8
2.3.2 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์	11
2.4 วัสดุเซรามิกชีวภาพ	12
2.4.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	19
3.1 สารเคมี	19
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	19
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	21
3.3.1 การสังเคราะห์ HAp	22
3.3.2 การสังเคราะห์ CS	24
3.3.3 การสกัดตัวบ่งชี้จาก MMA	26
3.3.4 การขึ้นรูป HAp และ CS	28
3.3.5 การเตรียมวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PMMA และ CS/PMMA	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	37
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้	37
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของ HAp	37
4.1.2 ภูมิภาคที่เป็นผลึกของ HAp	37
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของ HAp	38
4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้	38
4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของ CS	38
4.2.2 ภูมิภาคที่เป็นผลึกของ CS	39
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของ CS	39
4.3 วัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA	40
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะต่าง ๆ	40
4.3.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR	42
4.3.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ด้วยเทคนิค GPC	42
4.3.4 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค TGA	43
4.3.5 ภูมิภาคที่เป็นผลึกของวัสดุประกอบ	43
4.3.6 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประกอบ	44
4.3.7 ความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบ	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของ HAp จากฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee Powder Diffraction Standard)	50
ภาคผนวก ข รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของ CS จากฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee Powder Diffraction Standard)	53
ภาคผนวก ค อินฟราเรดสเปกตรัม	56
ภาคผนวก ง โครมาโทแกรมจากเครื่อง GPC	58
ภาคผนวก จ เทอร์โมแกรมจากเครื่อง TGA	63
ภาคผนวก ฉ โครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SEM	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 วัสดุชีวภาพที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน	13
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของกระดูกและวัสดุชีวภาพที่ใช้เพื่อใช้ทดแทนข้อต่อ	13
ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา HAp ที่ขึ้นรูป	16
ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา HAp	30
ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา CS	30
ตารางที่ 3.3 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะต่าง ๆ	34
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca:P ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้	37
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง CaO:Si <sub>2</sub> O ของ CS ที่สังเคราะห์ได้	39
ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะต่าง ๆ	40
ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้	42
ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PMMA ในวัสดุประกอบ	43
ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งกดของวัสดุประกอบเทียบกับเซรามิกส์เริ่มต้น	46



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์ HAp	23
รูปที่ 3.2 แผนงานการสังเคราะห์ CS .	25
รูปที่ 3.3 แผนงานการสกัดด้วยขี้ผึ้งออกจาก MMA	27
รูปที่ 3.4 แผนงานการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 1	28
รูปที่ 3.5 แผนงานการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 2	29
รูปที่ 3.6 แผนงานการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 3	31
รูปที่ 3.7 แผนงานการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 4	32
รูปที่ 3.8 แผนงานการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 5	33
รูปที่ 3.9 แผนงานการเตรียมวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PMMA และ CS/PMMA	36
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้ภายหลัง แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	38
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดง โครงสร้างจุลภาคของ HAp ที่ผ่านการขึ้นรูป	38
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้ภายหลัง แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	39
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดง โครงสร้างจุลภาคของ CS ที่ผ่านการขึ้นรูป	40
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบ HAp/PMMA	43
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบ CS/PMMA	44
รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของ HAp (a) กับลักษณะทางกายภาพของ HAp/PMMA (b)	45
รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของ CS (a) กับลักษณะทางกายภาพของ CS/PMMA (b)	45
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดง โครงสร้างจุลภาคภายในก้อน HAp ก่อนเตรียม วัสดุประกอบ (a) และภายในก้อนวัสดุประกอบ HAp/PMMA (b)	45
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดง โครงสร้างจุลภาคภายในก้อน CS ก่อนเตรียม วัสดุประกอบ (a) และภายในก้อนวัสดุประกอบ CS/PMMA (b)	46

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\nu$	เลขคลื่น
BPO	Benzoyl peroxide
CS	Calcium silicate
CS/PMMA	Calcium silicate-Poly(methyl methacrylate) Composites
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrophotometry
GPC	Gel Permeation Chromatography
HAp	Hydroxyapatite
HAp/PMMA	Hydroxyapatite-Poly(methyl methacrylate) Composites
MMA	Methyl methacrylate monomer
$M_n$	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน
$M_w$	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก
MWD	ค่าการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล
PMMA	Poly(methyl methacrylate)
PVA	Poly(vinyl alcohol)
SEM	Scanning Electron Microscopy
TEOS	Tetraethylorthosilicate
TGA	Thermogravimetric Analysis
XRD	X-ray Diffraction
XRF	X-ray Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากผู้พิการหรือผู้ที่มีสุขภาพอ่อนแอเนื่องจากอุบัติเหตุ ผู้ที่ป่วยด้วยโรคที่ทำให้ต้องสูญเสียอวัยวะ และผู้ที่มีปัญหาอวัยวะในร่างกายไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ มักได้รับความทุกข์ทรมานทั้งทางด้านร่างกาย และจิตใจ ซ้ำยังมีความยากลำบากในการดำรงชีวิตอย่างปกติในสังคม ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางการแพทย์ได้ถูกพัฒนาให้มีความเจริญก้าวหน้ามากขึ้น จนสามารถช่วยเหลือผู้พิการ ผู้ที่สูญเสียอวัยวะหรือผู้ที่มีอวัยวะเสื่อมสภาพ รวมถึงผู้ที่ต้องการศัลยกรรมบางอวัยวะให้ดีขึ้น เช่น จมูก กาง กราม เป็นต้น

วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมเริ่มเข้ามามีบทบาทอย่างมากเพื่อทดแทนการปลูกถ่ายอวัยวะจากธรรมชาติ (Transplantation) ซึ่งเป็นการผ่าตัดเอาเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่บกพร่องออกแล้วแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ เนื้อเยื่อจากร่างกายของผู้ป่วยเอง เนื้อเยื่อผู้บริจาคหรือเนื้อเยื่อจากสิ่งมีชีวิตอื่น การรักษาวินิจฉัยมีข้อจำกัดด้านปริมาณและแหล่งที่มาของเนื้อเยื่อ คุณภาพเนื้อเยื่อระบบภูมิคุ้มกัน และปัญหาด้านศีลธรรม แต่การใช้วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมทดแทนการปลูกถ่ายอวัยวะจะช่วยลดปัญหาแทรกซ้อนที่อาจจะเกิดขึ้น นอกจากนี้วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมสามารถผลิตขึ้นได้จำนวนมากตามความต้องการ ไม่ต้องรอรับบริจาค วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญที่จะช่วยแก้ไขปัญหามือที่มีปัญหาทางด้านนี้

การใช้วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมในอดีต แพทย์มักจะนำวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายหรือมีอยู่แล้วมาใช้ งาน ตัวอย่างเช่น ชาวอียิปต์โบราณและชาวกรีกใช้เส้นใยพืชหรือสัตว์ [1] ในการเย็บบาดแผล และใช้ไม้ทำเป็นแขน ขาเทียม ต่อมาเริ่มมีการนำโลหะชนิดต่าง ๆ มาใช้งานทางทันตกรรมและมีการนำเหล็กสแตนเลส (Stainless steel) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี มาใช้เป็นอวัยวะเทียม แต่พื้นผิวของวัสดุเหล่านี้ไม่มีสมบัติทางชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับเนื้อเยื่อที่อยู่ล้อมรอบ จึงมักเกิดปฏิกิริยาตอบสนองจากร่างกาย ที่เรียกว่า Foreign body response ในบริเวณที่ใช้วัสดุเหล่านี้ทดแทนอวัยวะจริงในร่างกาย

ดังนั้นจากความต้องการวัสดุที่มีลักษณะพิเศษสำหรับการใช้งานด้านการแพทย์ ทำให้เกิดแรงจูงใจในกลุ่มนักวิจัยด้านวัสดุ เคมี เคมีวิศวกรรม และนักวิจัยสาขาอื่น ๆ ในการพัฒนาหรือประดิษฐ์วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมที่มีสมบัติพิเศษ เหมาะสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่างและออกแบบจากความเข้าใจในเรื่องกลไกการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างวัสดุและเซลล์ ให้มีสมบัติทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับความต้องการในแต่ละการใช้งานมากที่สุด วัสดุสังเคราะห์ใหม่ ๆ ที่นำมาใช้งานได้แก่ วัสดุพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ และวัสดุที่ได้จากการคัดแปรสารจากธรรมชาติ ซึ่งจะออกแบบมาเพื่อการใช้งานต่าง ๆ เช่น การใช้งานด้านกระดูกและข้อพันกระดูก ระบบการปลดปล่อยยา และใช้เป็นวัสดุโครงสร้าง (Scaffold) สำหรับงานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นต้น

ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ (HAp) [2] เป็นวัสดุคิบที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการผลิตวัสดุชีวภาพ เนื่องจาก HAp เป็นส่วนประกอบหลักของกระดูกและฟัน ดังนั้นจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับร่างกาย แต่ HAp ก็มีข้อเสีย คือ เปราะ และมีสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ HAp โดยนำวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เช่น พอลิเมอร์ มาขึ้นรูปร่วมกับ HAp เป็นวัสดุประกอบ (Composite) [3]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ HAp และ CS
2. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA ด้วยวิธีการพอลิเมอไรเซชันภายในรูปพรุนของวัสดุเซรามิกส์ทั้ง 2 ชนิด

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA โดยทำการสังเคราะห์ HAp และ CS แล้วทำการขึ้นรูปสารประกอบทั้ง 2 ชนิด ด้วยวิธีการต่าง ๆ จากนั้นทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA ภายในรูปพรุนของ HAp และ CS ที่ขึ้นรูปแล้ว โดยอาศัยตัวริเริ่มในการทำปฏิกิริยา สารที่สังเคราะห์ได้จะนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ โดยอาศัยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว จะเป็นแนวทางในการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุประกอบดังกล่าวมาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมเพื่อใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ต่อไป

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียม HAp และ CS ได้
2. สามารถเตรียมวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA ได้
3. ทราบสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ PMMA ภายในรูปพรุนของ HAp และ CS โดยอาศัยตัวริเริ่มปฏิกิริยา

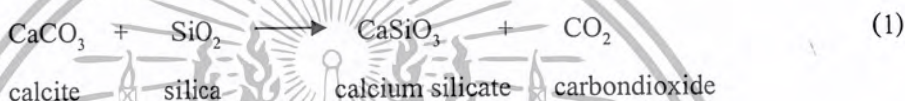
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 แคลเซียมซิลิเกต (CS)

##### 2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของ CS [4]

CS หรือแร่ Wollastonite สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ และสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{CaSiO}_3$  ตามธรรมชาติแร่ดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาของหินปูนซึ่งมีแร่ Calcite ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบกับซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) โดยอาศัยความร้อนจากของเหลวร้อนจากปล่องภูเขาไฟ (Magma) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



ในปัจจุบันแร่ Wollastonite มีความสำคัญในการผลิตเซรามิกส์ทนความร้อน (Refractory ceramics) และที่ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี

##### 2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

- โครงผลึกอยู่ในรูป Triclinic
- ความแข็งแรงกดอยู่ระหว่าง 5-5.5
- ความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.8-2.9
- ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก

##### 2.1.3 สมบัติเด่นของ CS

1. CS มีความเหนียวมากถึงแม้ว่าจะสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก แต่ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นในระหว่างการนำไปใช้งานหรือหลังจากผ่านกระบวนการผลิตแล้ว
2. CS มีค่าความเป็นกรดต่างสูงใน 10% ของของเหลวชั้นหนืดจึงสามารถคงเสถียรภาพได้ดี

##### 2.1.4 การประยุกต์ใช้งาน CS

CS ใช้เป็นหินตกแต่งเพื่อความสวยงาม และมีการนำ CS ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นต้น และนอกจากนี้ยังมีการนำ CS มาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์อีกด้วย โดยการนำ CS มาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมในร่างกายของมนุษย์เพื่อทดแทนอวัยวะที่สูญเสียไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 การสังเคราะห์ CS

CS มักจะสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของสารประกอบโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโลหะเป็นแคทไอออนและออกซิเจนเป็นแอนไอออน

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์โดยทั่วไป ได้แก่

#### 1. การสังเคราะห์ CS โดยการทำให้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [5-6]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ส่วนมากจะเป็นพวกออกไซด์ผสม สิ่งที่กำหนดโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ขนาดของอะตอม สถานะออกซิเดชัน และการมีพันธะกับกับแคทไอออน

#### 2. การสังเคราะห์ CS โดยเทคนิคโซล-เจล (Sol-gel synthesis) [7]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ส่วนมากจะได้เป็นสารประกอบพวกออกไซด์ผสมซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) สารตั้งต้นที่นิยมใช้คือสารจำพวกโลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) ซึ่งอาจใช้ 1 ชนิดหรือมากกว่าก็ได้

#### 3. การสังเคราะห์ CS โดยการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) [8]

เทคนิคการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมวิธีหนึ่งที่ได้ผงเซรามิกส์ที่มีคุณภาพ ทำโดยนำสารละลายที่มีแคทไอออนของสารที่ต้องการตกตะกอนร่วมกันไปผสมกับสารช่วยตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ตะกอนร่วมของสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น

การเตรียม CS โดยการตกตะกอนร่วมอาศัยการใช้ปฏิกิริยาเคมีในสารละลายเตตระเอทิลออร์ซิเลต (TEOS) และ แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารช่วยตกตะกอน โซเดียมไอออนจะตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงต้องทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปนโซเดียมไอออนออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมโดยใช้ NaOH เข้มข้น 0.33 โมล/ลิตร สารที่สังเคราะห์ได้จะถูกแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 900 °C เพื่อที่จะให้เกิดผลึกของ CS

## 2.2 ไฮดรอกซีแอปาทิต (HAp)

กระดูกเป็นอวัยวะที่มีชีวิต (Living organism) ประกอบไปด้วย [9]

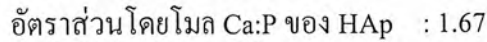
#### 1. ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อ (Tissues)

ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อนั้นเป็นสารอินทรีย์ ประกอบไปด้วยเซลล์ สารจำพวกไขมัน และพอลิเมอร์ตามธรรมชาติ เช่น พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) คอลลาเจน (Collagen) พอลิฟอสเฟต (Polyphosphates) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ส่วนที่เป็นแร่ธาตุ

ส่วนที่เป็นแร่ธาตุนั้นเป็นสารอนินทรีย์จะมีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก ซึ่งมี HAp เป็นแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในกระดูกและฟันของร่างกาย ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate) [10]



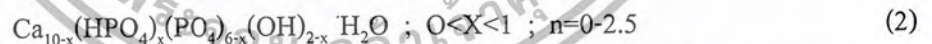
### 2.2.1 สมบัติทั่วไปของ HAp

#### 2.2.1.1 ความสามารถในการละลายของ HAp

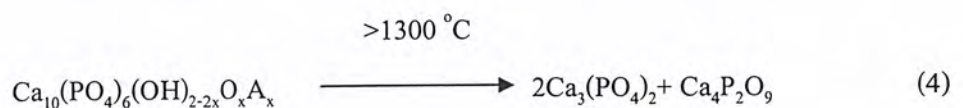
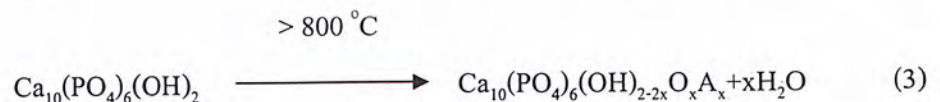
HAp สามารถละลายได้ในสารละลายกรด และละลายได้เล็กน้อยในน้ำกลั่นแต่ไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอัลคาไลน์ ความสามารถในการละลายในน้ำกลั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ลงไป แต่ความสามารถในการละลายของ HAp จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีกรดอะมิโน โพรตีนเอนไซม์ และสารอินทรีย์อื่น ๆ สมบัติด้านการละลายนี้สัมพันธ์กับความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) กับเนื้อเยื่อ และปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม อัตราการละลายยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูปร่าง ความมีรูพรุน ขนาดผลึก ความเป็นผลึก และการเสียรูปเนื่องจากความเครียด (Strain defects) เมื่อนำ HAp ไปเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

#### 2.2.1.2 พฤติกรรมของ HAp ที่อุณหภูมิสูง

HAp ที่ได้จากการสังเคราะห์จะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction pattern) ที่มีพีกกว้าง เนื่องจากยังไม่มีระเบียบตัวของอะตอมต่าง ๆ ที่สมบูรณ์ สูตรทั่วไปที่ใช้แทน HAp ดังกล่าวคือ



สาร HAp สูญเสียหมู่ OH ที่ละน้อยเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C และจะแตกตัวให้  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  และ  $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$  [11]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การสังเคราะห์ HAp

วิธีการสังเคราะห์ HAp สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยม ได้แก่ วิธีการตกตะกอนทางเคมี (Precipitation method) วิธีไฮโดรลิซิส (Hydrolysis method) การทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) วิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method) และวิธีอัลคอกไซด์ (Alkoxide method) ซึ่งแต่่วิธีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [12]

### 1. วิธีตกตะกอนทางเคมี (Precipitation method)

ในการเตรียม HAp จากวิธีนี้สามารถเตรียมได้จากสารตั้งต้นหลายชนิด โดยการนำกรดและเบสมาทำปฏิกิริยากันโดยตรง ดังสมการที่ 5



วิธีนี้จะมีค่า pH และความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ HAp ที่ได้จากวิธีตกตะกอนจะมีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด และการจับตัวเป็นโครงสร้างที่มีรูปผลึกที่ไม่สมบูรณ์

### 2. การใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Method)

HAp สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของแคลเซียมฟอสเฟต เช่น ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , DCPD) ออกตะแคลเซียมฟอสเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{C}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , OCP) ไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส ( $\text{CaHPO}_4$ , DCP) ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

### 3. การทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)

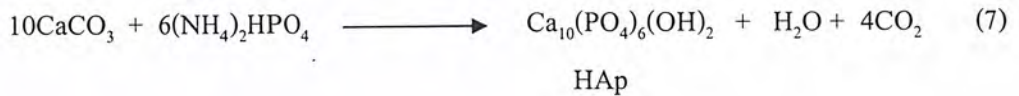
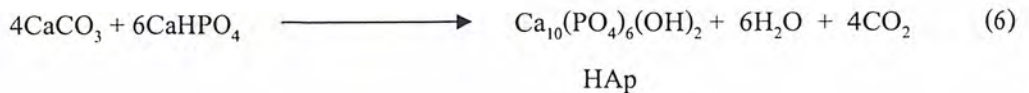
HAp ที่ได้จากวิธีนี้ทำได้โดยนำสารเคมีในสถานะของแข็ง มาทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิสูงกว่า  $950^\circ\text{C}$  HAp ที่ได้จากวิธีนี้จะเป็นผงละเอียดและเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่ดี

### 4. วิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method)

ทำได้โดยนำสารเคมีที่เป็นเกลือของแคลเซียมและฟอสเฟตมาทำปฏิกิริยากันภายในบรรยากาศที่มีความดันและอุณหภูมิสูง เช่น การทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลภายใต้ความดันไอน้ำ  $12,000\text{ psi}$  อุณหภูมิ  $275^\circ\text{C}$  [13]

$\text{CaCO}_3$  เมื่อทำปฏิกิริยากับ  $\text{CaHPO}_4$  หรือ  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสามารถเปลี่ยนเป็น HAp ได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 5. วิธีอัลคอกไซด์ (Alkoxide)

วิธีนี้เป็นหนึ่งที่ใช้เตรียมฟิล์มบางของ HAp โดยเตรียมจากแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮดรอกไซด์กับไตรเมทิลฟอสเฟตละลายในเอทานอล ระเหยตัวทำละลาย จากนั้นนำส่วนที่เหลือไปผ่านความร้อนที่ 500-1000 °C

### 2.2.3 การประยุกต์ใช้งาน HAp ในร่างกาย [9]

#### 1. สาร HAp แบบผง

สาร HAp แบบผงสามารถใช้เคลือบลงบนสะโพกเทียมในส่วนที่เป็นแกนโลหะ เพื่อให้ทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวภายในร่างกายที่โดยปกติจะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ อยู่แล้ว และหากเกิดการเจ็บป่วย สภาพภายในร่างกายก็จะมีความเป็นกรดยิ่งขึ้น ดังนั้นการใช้สาร HAp เคลือบบนผิวข้อสะโพกเทียมจะทำให้วัสดุมีความทนทานมากยิ่งขึ้น และยังช่วยสร้างพันธะระหว่างข้อสะโพกเทียมกับกระดูกของผู้ป่วยด้วย

#### 2. สาร HAp แบบชิ้นเนื้อแน่น

สาร HAp แบบเนื้อแน่นจะมีสมบัติเชิงกลดีกว่าแบบรูพรุน จึงสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า มักนำไปใช้ทดแทนในส่วนกระดูกสันหลังของผู้ป่วย สาร HAp ก็จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อให้มาเกาะและทำให้ระบบในร่างกายทำงานได้ดีขึ้น

#### 3. สาร HAp แบบรูพรุน

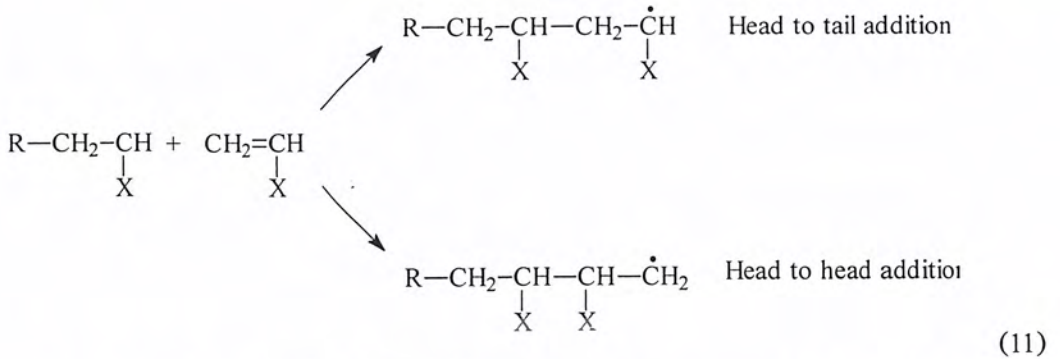
สาร HAp แบบรูพรุนใช้ทดแทนกระดูกของผู้ป่วย สำหรับบริเวณต่าง ๆ ของร่างกายที่มีการสูญเสียกระดูกไม่ว่าจะเนื่องมาจากโรคมะเร็ง การติดเชื้อ หรืออุบัติเหตุก็ตาม โดยอาศัยความเป็นรูพรุนทำให้เซลล์และเลือดนำพาแร่ธาตุต่าง ๆ เข้าไปได้อย่างทั่วถึง ช่วยให้เกิดการสร้างกระดูกเพื่อเชื่อมต่อได้ดี

### 2.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)

PMMA จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีสมบัติโปร่งใส ไม่มีสี แข็งแต่เปราะ ดูดซับน้ำได้ต่ำ สึกกร่อนยาก ด้านทนรังสีอัลตราไวโอเลตได้ดี ไม่มีการเติมสารเติมแต่งจึงมีความบริสุทธิ์มาก นิยมนำมาทำเลนส์ อ่างอาบน้ำ เป็นสารเคลือบเพื่อป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



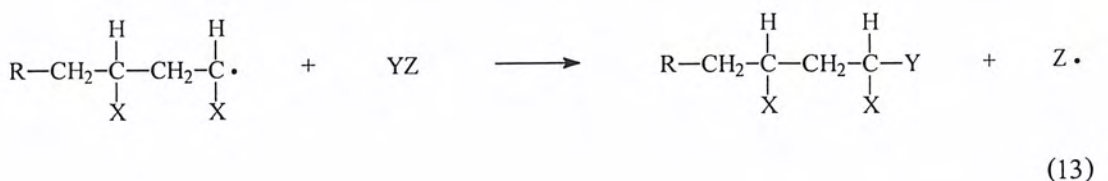


ถ้าสายโซ่พอลิเมอร์ที่ว่องไวนั้นคิง (Abstract) ไฮโดรเจนอะตอมจากโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียง จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่ว่องไว และโมเลกุลที่สูญเสียอะตอมไฮโดรเจนไปนั้นจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ที่พร้อมจะเริ่มต้นสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ต่อไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การถ่ายโอนสายโซ่ (Chain transfer) โมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมให้กับพอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตนั้นอาจเป็นมอนอเมอร์ ตัวทำละลาย หรือสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์อื่น กระบวนการนี้ไม่ทำให้จำนวนอนุมูลอิสระในขณะนั้นเปลี่ยนแปลงแต่ทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวสายโซ่ (Average chain length) ของพอลิเมอร์ลดลง ถ้าโมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมไปนั้นเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์โซ่อื่นอาจทำให้เกิดโซ่กิ่ง

การขยายสายโซ่ตามปกติ

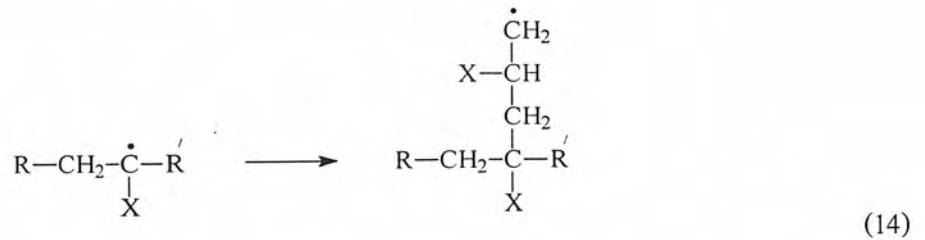


การขยายสายโซ่เมื่อมีการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอมเกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าตำแหน่งของไฮโดรเจนที่ถูกดึงอยู่ในสายโซ่จะก่อให้เกิดกิ่งสาขา



### 3. ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Chain-termination)

อนุมูลอิสระบนพอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตจะสิ้นสุดหรือหยุดแผ่ขยายได้มีหลายกรณี

กรณีที่ 1 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยานี้ไม่ดี เพราะทำให้อัตราเร็วของขั้นริเริ่มสายโซ่ลดลง



กรณีที่ 2 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ 2 สายโซ่มาทำปฏิกิริยากัน แบ่งเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. รวมกัน (Combination) ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้เกิดที่อุณหภูมิต่ำและจะพบพอลิเมอร์ที่เกิดพันธะแบบ Head to head สายโซ่พอลิเมอร์ที่สิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น



ข. เกิดการถ่ายโอนอะตอมปกติ คือไฮโดรเจนจากอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์หนึ่งไปยังอนุมูลอิสระของอีกพอลิเมอร์หนึ่ง พอลิเมอร์ที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมจะเกิดปลายสายโซ่ที่มีพันธะคู่ สายโซ่พอลิเมอร์ที่รับไฮโดรเจนอะตอมจะเกิดปลายโซ่อิ่มตัว เรียกปฏิกิริยาแบบนี้ว่า Disproportionation ในกรณีสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้ส่วนมากเกิดที่อุณหภูมิสูง น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเป็นครึ่งหนึ่งของการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### มอนอเมอร์สำหรับพอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

พอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระส่วนใหญ่เกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ เรียกว่า ไวนิล-มอนอเมอร์ (Vinyl monomer)

### ตัวริเริ่มสำหรับพอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

สารเคมีที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระสำหรับกลไกการเกิดพอลิเมอร์ด้วยอนุมูลอิสระมีหลายประเภท เช่น เปอร์ออกไซด์ (R-O-O-R) เป็นต้น นอกจากนี้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ความร้อน แสงอัลตราไวโอเลต หรือรังสีพลังงานสูง เช่น แกมมาและกระแสไฟฟ้าสามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระบนพันธะคู่ของมอนอเมอร์ได้

### 2.3.2 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์ [15]

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยทั่วไป แบ่งเป็น 4 เทคนิค ได้แก่

#### 1. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization)

เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดโดยทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ล้วน ๆ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความหนืดของระบบอาจเพิ่มขึ้นถึง  $10^4$  เท่าเมื่อเทียบกับความหนืดของมอนอเมอร์ และเกิดการคายความร้อน ไม่นิยมนำไปใช้ผลิตพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระเนื่องจากควบคุมความร้อนและความหนืดยาก แต่ยังใช้กับมอนอเมอร์บางชนิด เช่น เอทิลีน สไตรีน และเมทิลเมทาครีเลต เป็นต้น

#### 2. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization)

การเกิดพอลิเมอร์โดยเทคนิคแบบสารละลายนี้ สามารถแก้ปัญหาของเทคนิคแบบบัลค์ได้เนื่องจากตัวทำละลายจะทำหน้าที่เจือจางและส่งผ่านความร้อนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ตัวทำละลายทำให้ความหนืดลดลง การควบคุมความร้อนทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับแบบบัลค์ แต่การใช้ตัวทำละลายทำให้เกิดปัญหาการถ่ายโอนสายโซ่ และตัวทำละลายยังอาจปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกทำให้สมบัติพอลิเมอร์เปลี่ยน

เทคนิคนี้สามารถใช้ได้กับกลไกปฏิกิริยาที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ สารประกอบเชิงซ้อนหรือไอออนิก

#### 3. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension polymerization)

ปัญหาเนื่องจากความเป็นพิษและการติดไฟของตัวทำละลาย จึงได้คิดวิธีที่จะหลีกเลี่ยงตัวทำละลายอินทรีย์ คือวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย วิธีนี้มอนอเมอร์จะแขวนลอยเป็นหยดเล็ก ๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-500 ไมครอน (ขนาดใหญ่กว่าเทคนิคอิมัลชัน) ในของเหลวที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น น้ำ หยดของพอลิเมอร์จะถูกปั่นกวอย่างเร็วเพื่อป้องกันการ

เกาะกันเป็นก้อนและอาจมีการเติมสารคงสภาพ (Dispersants) ด้วย โดยสารคงสภาพจะละลายปนอยู่ในชั้นน้ำเพื่อป้องกันการเกิดเป็นเจลของพอลิเมอร์

มอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคนี้ควรเกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระและละลายในน้ำได้น้อยมาก พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ๆ คล้ายไข่มุกบางครั้งจึงเรียกวินี้ว่า Pearl polymerization

#### 4. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนามาจากวิธีแบบแขวนลอย ใช้มากในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ วิธีนี้ต่างจากแบบแขวนลอยตรงที่ตัวริเริ่มไม่ละลายในมอนอเมอร์ แต่ละลายในตัวกลาง คือน้ำ แล้วแพร่เข้าไปในหยดมอนอเมอร์ ขนาดของหยดมอนอเมอร์จะมีขนาดเล็กกว่าแบบแขวนลอย คืออยู่ในช่วง 0.05-5 ไมครอน ปฏิบัติการที่เกิดขึ้นของระบบจะคล้ายน้ำนม อนุภาคในระบบแบบอิมัลชันไม่ตกตะกอนทันทีที่หยุดปั่นกวนเพราะสารก่ออิมัลชันซึ่งอยู่บนผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ จึงเรียกลักษณะของพอลิเมอร์ที่ได้ว่า ลาเท็กซ์ (Latex)

#### 2.4 วัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ [9]

ในปัจจุบันนี้ได้นำวัสดุเซรามิกส์มาพัฒนาปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยการนำมาทำเป็นวัสดุค้ำในการผลิตวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) และอวัยวะเทียม (Implants) เพื่อใช้ทดแทนอวัยวะในร่างกายมนุษย์ เช่น กระดูกโครงสร้าง กระดูกโคนขา วัสดุยึดติดฟันเทียม รากฟันเทียม กระดูกข้อต่อ เป็นต้น ข้อดีของเซรามิกส์ก็คือ เข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อในร่างกาย แต่ก็มีข้อเสียคือ เปราะ และสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงได้ปรับปรุงวัสดุเซรามิกส์โดยนำมาทำเป็นวัสดุประกอบ [15] กับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงของเซรามิกส์

##### 2.4.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม

วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมคือ วัสดุที่มนุษย์ผลิตขึ้นมาเพื่อทดแทนอวัยวะเดิมของร่างกาย ซึ่งสูญเสียไปอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุ ความเจ็บป่วย หรือเนื่องมาจากการที่อวัยวะเดิมไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ โดยการนำเข้าไปในร่างกายเพื่อทดแทนอวัยวะนั้น ๆ แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่มีการผลิตให้ได้ครอบคลุมกับทุกอวัยวะของร่างกาย วัสดุประเภทนี้สามารถผลิตได้มากมายตามความต้องการ และไม่มีปัญหาด้านคุณภาพของวัสดุ เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณได้ขณะผลิต และมีการทดสอบเพื่อตรวจสอบความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย และสารที่เป็นพิษต่อร่างกาย ถ้าพบว่าวัสดุนั้นไม่เหมาะสมก็สามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุอื่นทดแทนได้ ทำให้โอกาสเกิดอาการแทรกซ้อนลดลง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้มีอายุการใช้งานที่จำกัด ไม่สามารถ

เจริญเติบโตได้ ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ อีกทั้งไม่สามารถปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติให้เหมาะสมกับสภาวะร่างกายได้ดีเท่ากับอวัยวะจริงของร่างกายที่มนุษย์สร้างขึ้นเอง

วัสดุอื่น ๆ ที่นิยมนำมาผลิตอวัยวะเทียม เช่น สแตนเลสสตีล, Ti-Al-V, Ni-Cr, Polyacetal, PMMA-Cement,  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ -TZP เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 วัสดุชีวภาพที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน [16]

โลหะ	เซรามิกส์	พอลิเมอร์
316L สแตนเลสสตีล	อะลูมินา	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
โครเมียม/โคบอลต์ อัลลอยด์	เซอร์โคเนีย	พอลิยูรีเทน
ไททานเนียม	คาร์บอน	
ไททานเนียมชนิด 6A/4V	ไฮดรอกซีแอปพาไทต์	

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของกระดูกและวัสดุชีวภาพที่ใช้เพื่อทดแทนข้อต่อ [17]

วัสดุ	Young's modulus (GPa)
อะลูมินา	365
ไฮดรอกซีแอปพาไทต์	85
Cortical Bone	7-25
Cancellous Bone	0.1-1.0
พอลิเมทิลเมทาครีเลต	770
พอลิเอทิลีน	1

กลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อ และวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม

สามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 4 ประเภท คือ [18]

1. เซรามิกส์ค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert ceramics)

เซรามิกส์ประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออยู่ในสภาวะร่างกายเป็นเวลานาน เนื้อเยื่อและอวัยวะภายในร่างกายบริเวณนั้นจะสร้างเนื้อเยื่อใหม่ขึ้นมาห่อหุ้มวัสดุ เมื่อเนื้อเยื่อใหม่มีความหนาแน่นมากขึ้นอาจจะทำให้เกิดการเคลื่อนหลุดของวัสดุเซรามิกส์ชีวภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. เซรามิกส์และโลหะที่มีรูพรุน (Porous ceramics and porous metal)

เซรามิกส์ประเภทนี้จะมีรูพรุนซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเลื่อนหลุดได้ โดยเนื้อเยื่อใหม่ที่สร้างขึ้นจะเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนของวัสดุ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยึดระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อและอวัยวะข้างเคียง ขนาดรูพรุนภายในวัสดุควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยเจริญเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อภายในรูพรุนได้ แต่ถ้ามีการเคลื่อนที่ตรงบริเวณรอยต่อบ่อย ๆ อาจจะทำให้เส้นเลือดฝอยขาด ทำให้เนื้อเยื่อที่อยู่ในรูพรุนตาย เกิดการอักเสบและติดเชื้อได้

## 3. เซรามิกส์ที่สามารถถูกดูดซับหรือกักเก็บได้ (Resorbable/Biodegradable ceramics)

วัสดุประเภทนี้จะค่อย ๆ เกิดการสลายตัวอย่างช้า ๆ และจะถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อที่ร่างกายสร้างขึ้นมา การเลือกวัสดุประเภทใดนี้มีข้อกำหนดที่สำคัญคือ วัสดุจะต้องสามารถถูกย่อยสลายด้วยระบบของร่างกาย และอัตราการถูกดูดซับของวัสดุจะต้องสอดคล้องกับการสร้างเนื้อเยื่อขึ้นมาทดแทน โดยสารที่ปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อระบบของร่างกาย และสามารถถูกกำจัดออกได้ด้วยระบบร่างกาย

## 4. เซรามิกส์ที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive ceramics)

วัสดุนี้มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่  $\text{CaSiO}_3$  และ  $\text{P}_2\text{O}_5$  และลักษณะที่สำคัญของวัสดุประเภทนี้คือ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่พื้นผิวของวัสดุภายใต้สภาวะร่างกายซึ่งจะทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อข้างเคียง จึงสามารถช่วยลดปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อได้

### การทดสอบวัสดุทางชีวภาพ

โดยทั่วไปกระทำใน 2 ลักษณะคือ [19]

#### 1. การทดสอบภายนอกร่างกาย

มีวัตถุประสงค์สำคัญ 3 ประการดังนี้

- สังเกตการทำงานและประเมินผลประสิทธิภาพของวัสดุชีวภาพ
- สามารถบอกสมรรถภาพของวัสดุชีวภาพภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันได้
- ประเมินความเชื่อถือและความคงทนของวัสดุชีวภาพได้

เนื่องจากการนำวัสดุทางชีวภาพไปใช้งานจริงจะต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อ ของเหลว และอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย ซึ่งสภาพแวดล้อมต่าง ๆ นี้ อาจทำให้สมบัติบางประการของวัสดุทางชีวภาพเปลี่ยนไป ดังนั้นการทดสอบภายนอกร่างกายจึงมีข้อจำกัดมากในการศึกษาเพื่อนำไปใช้งานจริงนั้นจะต้องออกแบบการทดลองให้มีสภาวะแวดล้อมคล้ายกับในร่างกายเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้นั้นมีผลถูกต้องมากที่สุดหรือมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เช่น การทดสอบโดยใช้ของเหลวที่มีองค์ประกอบคล้ายเลือดหรือพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การทดสอบภายในร่างกาย

วิธีนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าการทดสอบภายนอกในร่างกาย เพราะสถานะที่ใช้ในการทดลอง เป็นสถานะจริงในร่างกายสิ่งมีชีวิต ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น สามารถแบ่งได้ เป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

### ก. การประเมินในสัตว์ทดลองที่สุขภาพดี

วิธีการทดลองนี้จะทำโดยการผ่าตัดเพื่อใส่วัสดุทางชีวภาพเข้าไปในร่างกายของ สัตว์ทดลองที่มีสุขภาพดี โดยต้องใส่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับที่ความต้องการมากที่สุด แต่วิธีนี้มี ข้อจำกัด ได้แก่ วงจรชีวิตและอายุขัยที่ไม่เท่ากัน สรีระและองค์ประกอบในร่างกายบางส่วนที่ไม่ เหมือนกัน

### ข. การประเมินในสัตว์ทดลองที่เป็นโรค

จะได้ผลที่แตกต่างกับการทดสอบกับสัตว์ที่สุขภาพดี เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง วัสดุทางชีวภาพกับอวัยวะที่เป็นโรคและไม่เป็นโรคต่างกัน การทดลองในสัตว์ที่มีสุขภาพดีไม่ สามารถประเมินผลได้ จึงต้องทำการทดลองในสัตว์ที่เป็นโรค

### ค. การศึกษาจากกลุ่มผู้ป่วยในทางคลินิก

เป็นการทดลองในร่างกายมนุษย์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของวัสดุทางชีวภาพและโรคแทรกซ้อนที่อาจเกิดจากการใช้วัสดุทางชีวภาพ

### ง. การใช้ทางคลินิกทั่วไป

วัสดุทางชีวภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้นต้องผ่านการทดสอบและรับรองโดยองค์กรที่ ทำหน้าที่ควบคุมก่อนนำไปใช้งานกับผู้ป่วยในการทดสอบภายในร่างกาย

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ N.O. Engin และ A.C. Tas [20] ได้ทำการสังเคราะห์ HAp ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนจากวิธีตกตะกอนทางเคมี โดยนำแคลเซียมในเตรดเตระไฮเดรต 0.152 โมล และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.009 โมล ละลายในน้ำกลั่น 1450 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 25 % โดยปริมาตร 340 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 90 นาที พร้อมทำการปั่นกวน จากนั้นให้ความร้อนต่อจนของผสมเดือด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้ของผสมเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ทิ้งให้ตกตะกอน 1 คืน นำของผสมไปกรองและนำตะกอนที่ได้ไปขึ้นรูปโดยใช้เมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 8-13 กรัม/ลิตร ละลายในน้ำกลั่น 400-800 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปใส่ฟองอากาศด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 45 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัดชิ้นงานเป็นรูปลูกบาศก์ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิและเวลาดังแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา HAp ที่ขึ้นรูป

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (°C)	เวลาในการเผา (นาที)
25-250	400
250	20
250-1250	300
1250	300

จากงานวิจัยนี้พบว่า HAp ที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P เท่ากับ 1.674 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.65 ไมครอน และมีพื้นที่ผิว 45-50 ตารางเมตร/กรัม เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความเป็นรูพรุนและขนาดของรูพรุน พบว่า ชิ้นงานของ HAp มีขนาดของรูพรุนตั้งแต่ 200-400 ไมครอน และความเป็นรูพรุนอยู่ในช่วง 80-92% จากนั้นนำชิ้นงานของ HAp ไปทดสอบความแข็งโค้งงอ (Flexure strength) พบว่า ชิ้นงาน HAp มีค่าความแข็งโค้งงอเท่ากับ  $3.5 \pm 0.15$  MPa

งานวิจัยของ M.R. Sacri และคณะ [21] ได้ทำการสังเคราะห์ HAp จากวิธีตกตะกอนทางเคมี โดยเริ่มต้นจากการหยดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมล/ลิตร ลงในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร ด้วยอัตราการหยด 0.5 หยด/วินาที ที่อุณหภูมิ  $40 \pm 2$  °C แล้วทำการปรับ pH ของสารละลายโดยใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ pH ไม่ต่ำกว่า 7.5 เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของ HAp จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน พบว่า ไม่มีผลต่อขนาดผลึกและโครงสร้างผลึกของ HAp

งานวิจัยของ T.K. Anee และคณะ [22] ได้เสนอการสังเคราะห์ HAp โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) และ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) สารละลายแอมโมเนีย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และใช้ Agarose เป็นตัวกลางในการสังเคราะห์ ซึ่งทำการเตรียมสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเข้มข้น 0.5 โมล/ลิตร ในสารละลายเจลของ Agarose ที่มีความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการสังเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคโซล-เจล ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 85 °C นำตะกอนที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเผาที่ 1200 °C นาน 2 ชั่วโมง จากผลการศึกษา พบว่า HAp ที่ได้จะไม่มีสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟตเจือปน

งานวิจัยของ P.Siriphannon และ คณะ [23] ได้ทำการเตรียม CS โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีในสารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) และแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารตกตะกอน พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปนโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมคือใช้ NaOH เข้มข้น 0.33 โมล/ลิตร และทำการล้างตะกอน 2 ครั้ง เพื่อให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารเจือปนหลงเหลืออยู่น้อยที่สุด สารที่สังเคราะห์ได้จะถูกแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500 °C และ 900 °C เพื่อที่จะให้เกิดผลึกของ CS CS ที่ได้เมื่อนำไปทดสอบในสภาวะจำลองของร่างกายโดยใช้สารละลายจำลองของร่างกาย (SBF) พบว่าจะเกิดชั้น HAp บนพื้นผิวของ CS ซึ่งชี้ให้เห็นว่า CS มีความสามารถในการเข้ากันได้กับระบบชีวภาพของร่างกายได้ดี

งานวิจัยของ H.G. Kurczyk [24] ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ CS จากหินปูนและควอตซ์บดละเอียดที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ประมาณ 2 ตารางมิลลิเมตร/กรัม อย่างไรก็ตามในการสังเคราะห์วิธีนี้ ต้องเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นผลึกของ CS ซึ่งการผลิตดังกล่าวจะมีต้นทุนค่อนข้างสูง และมีสารเจือปนเนื่องจากกระบวนการบด

งานวิจัยของ A. Balogh และคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์  $\beta$ -wollastonite โดยใช้หินปูนในสถานะของแข็ง ทำปฏิกิริยากับ ไซของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่ได้จากโรงงานซึ่งการผลิตดังกล่าวพบว่ามีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง

งานวิจัยของ A.M. Moursi และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาผลการตอบสนองของเซลล์สร้างกระดูกบริเวณส่วนโค้งด้านบนของกะโหลกศีรษะหนูต่อวัสดุประกอบ HAp/PMMA เทียบกับ PMMA ซึ่ง HAp ที่ใช้เตรียมได้จากการละลายแคลเซียมอะซิเตด 1 โมล ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 75 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้ได้เท่ากับ 4 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น จากนั้นเติมกรดฟอสฟอริก 0.6 โมลตามด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจางเพื่อปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11 กรองและล้างตะกอน HAp ที่ได้ด้วยน้ำกลั่น นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ส่วนวัสดุประกอบ HAp/PMMA เตรียมโดยนำสารละลายผสมของ PMMA:MMA ในอัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนักมาเติม 1%BPO และ HAp ที่ผ่านการเผาและบดละเอียด 20 % โดยน้ำหนัก ปั่นกวนอย่างแรง เทสารละลายผสมที่ได้ในหลอดทดลอง ปิดฝาและตั้งทิ้งไว้ 1 คืน แล้วเก็บไว้ที่ 37 °C จากนั้นนำไปใส่ตู้อบอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และขึ้นรูปวัสดุประกอบเป็นรูปแท่งโดยอัดให้มีความหนา 2 มิลลิเมตร

เมื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงของวัสดุทั้งสอง พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 40-48 MPa ของ PMMA เป็น 72-94 MPa ของวัสดุประกอบ HAp/PMMA เนื่องจาก PMMA ทำหน้าที่เสริมแรงให้กับวัสดุประกอบ และเมื่อนำเซลล์สร้างกระดูกที่ได้จากบริเวณส่วนโค้งด้านบนของกะโหลกศีรษะหนูมาชุบกับวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ PMMA แล้วตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขึ้นของเซลล์สร้างกระดูกภายหลังการชုပ် 2 วัน และ 8 วัน พบว่าวันที่ 2 ปริมาณเซลล์สร้างกระดูกบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ PMMA มีปริมาณใกล้เคียงกันและวันที่ 8 ปริมาณเซลล์สร้างกระดูกบริเวณพื้นผิวของวัสดุประกอบ HAp/PMMA จะมีมากกว่าบริเวณพื้นผิวของ PMMA จึงอาจกล่าวได้ว่า HAp ในวัสดุประกอบมีส่วนช่วยให้เกิดการตอบสนองของเซลล์สร้างกระดูกได้ดีมากกว่าการใช้ PMMA เพียงอย่างเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
3. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
4. เอทานอล 95 % (Ethanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
5. เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate,  $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
6. แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calciumnitrate tetrahydrate,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
8. มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate monomer,  $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
9. แอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous sodiumsulphate,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
10. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide,  $(\text{C}_6\text{H}_5\text{CO})_2\text{O}_2$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดการคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS 3400
2. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance
3. เครื่องเจลเพอเมชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatography, GPC) บริษัท Milipore รุ่น Water 150-CV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คอลัมน์ : PL Gel 10  $\mu\text{m}$  Mixed BZ columns  
 ขนาด 7.8 x 300 mm  
 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500-1,000,000  
 ใช้พอลิสไตรีน (PS) เป็นสารมาตรฐาน
- สารละลาย : เตตระไฮโดรฟูเรน (THF)
- อุณหภูมิคอลัมน์ : 30°C
- อุณหภูมิ injector : 30°C
- อุณหภูมิ solvent/pump : 30°C
- อัตราการไหล : 1 ml/min
- ปริมาณในการฉีด : 100  $\mu\text{L}$
- เวลาในการวิเคราะห์ : 22 นาที
- Detector : Reflective index
- การเตรียมตัวอย่าง : ละลายด้วย THF
4. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR)  
 บริษัท Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX  
 ความยาวคลื่น : 4000-400  $\text{cm}^{-1}$   
 การเตรียมตัวอย่าง : ละลายด้วยคลอโรฟอร์มแล้วทาบน KBr plate
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)  
 บริษัท JEOL รุ่น JSM-5410  
 การเตรียมตัวอย่าง : ทักชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องแล้วนำชิ้นงานที่ทักได้ไปเคลือบด้วยทองเพื่อส่องดูพื้นผิวภายในของชิ้นงาน
6. เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris1 TGA  
 ช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ : 50-800 °C  
 อัตราการให้ความร้อน : 10 °C/min  
 อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน : 20  $\text{cm}^3/\text{min}$   
 อัตราการไหล Air Zero : 40  $\text{cm}^3/\text{min}$   
 ปริมาณสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ : 20-30 mg
7. เครื่องทดสอบแรงกด (Universal testing machine)  
 อัตราเร็วหัวกด : 2.5 $\pm$ 0.25 mm/min  
 Load cell : 30 kN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maximum load	: 25000 N
การเตรียมตัวอย่าง	: -นำก้อนวัสดุประกอบที่เตรียมได้ขัดผิวด้วยกระดาษทรายให้เรียบและวัดความสูงที่แน่นอน -ใช้หัวกดแบบหน้าเรียบในการทดสอบความแข็งแรงกด โดยวางให้แนบชิดกับชิ้นงานพอดี -ทำการกดอัด และบันทึกค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงกด

8. เครื่องบดผสมสารตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท Rock Lab รุ่น Benchmill Nodel 14
9. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ XRF บริษัท Herzog รุ่น TP60/2D
10. อ่างควบคุมอุณหภูมิ และ Immersion circulator (FT01) รุ่น Isoterm
11. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท Buchi รุ่น B-169
12. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 225
13. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Ney Dental รุ่น 14H
14. เครื่องควบคุมอัตราการหยดสาร บริษัท Barnant รุ่น 77120-52
15. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254
16. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific
17. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isoterm
18. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000
19. โกร่งบดสาร
20. ครุชเบิล (Crucible)

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 3.3.1 การสังเคราะห์ HAp
- 3.3.2 การสังเคราะห์ CS
- 3.3.3 การสกัดตัวบัพยังออกจาก MMA
- 3.3.4 การขึ้นรูป HAp และ CS
- 3.3.5 การเตรียมวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

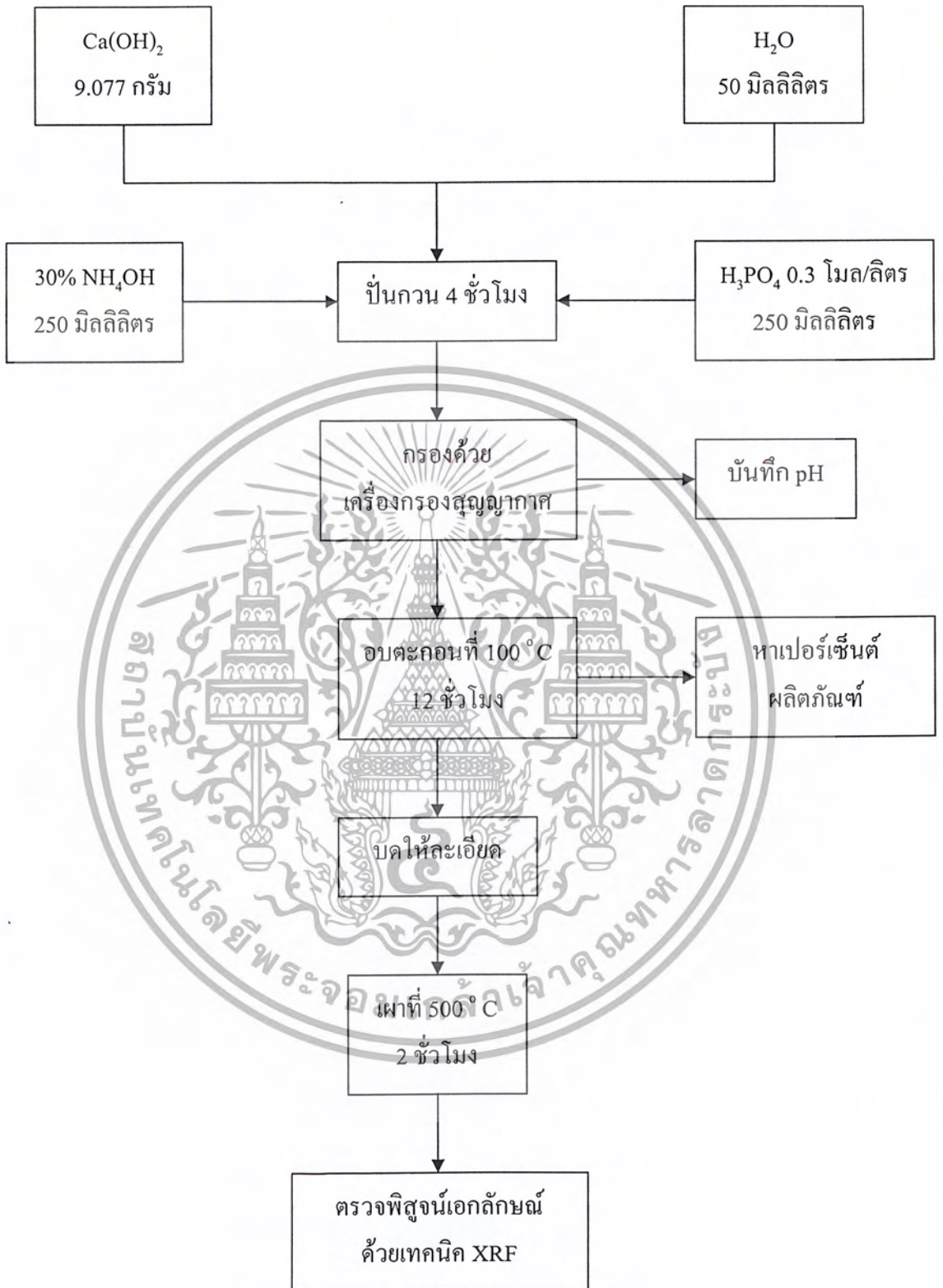
### 3.3.1 การสังเคราะห์ HAp

#### 1. การเตรียมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร

- 1.1 บีเปตรกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85% โดยปริมาตรมา 20 มิลลิลิตร
- 1.2 ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
- 1.3 เขย่าขวดวัดปริมาตรจนแน่ใจว่าสารผสมกันอย่างดีแล้ว

#### 2. การสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอปาทิต

- 2.1 ชั่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 9.077 กรัม (ซึ่งน้ำหนักละเอียด) นำมาละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร ปั่นจนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2.2 วัด pH และบันทึกค่าที่อ่านได้
- 2.3 นำบีกเกอร์ไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 10 °C
- 2.4 ค่อย ๆ หยดแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร และ กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 0.3 โมล/ปริมาตร ที่เตรียมได้จากข้อ 1 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องควบคุมอัตราการหยดสารโดยมีอัตราการหยดประมาณ 1.1 มิลลิลิตร/นาที ลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทำการปั่นจน
- 2.5 เมื่อหยดกรดฟอสฟอริกครบ 250 มิลลิลิตร ทำการปิดเครื่องควบคุมอัตราการหยดสารและหยุดการปั่นจน
- 2.6 อ่านค่า pH ของสารละลาย (pH ไม่ควรต่ำกว่า 12)
- 2.7 กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2.8 ชั่งน้ำหนักและหาเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- 2.9 บด HAp ที่เตรียมได้ให้ละเอียดด้วยโกร้งบดสาร
- 2.10 นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 2.10 ตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิค XRF เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของสารที่สังเคราะห์ได้

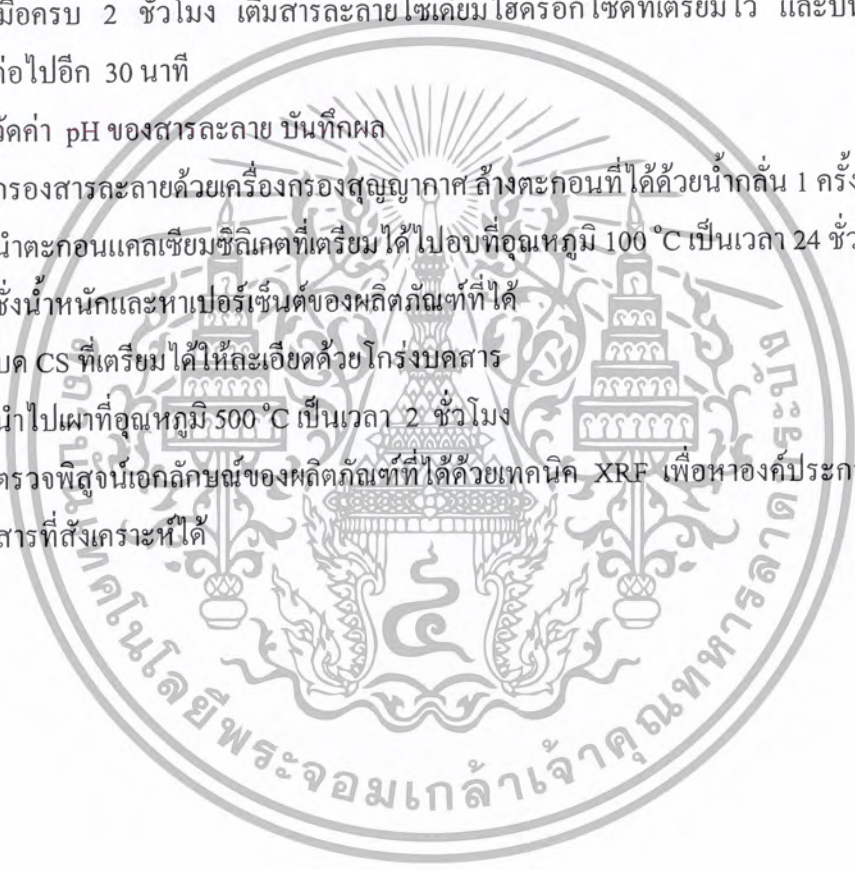


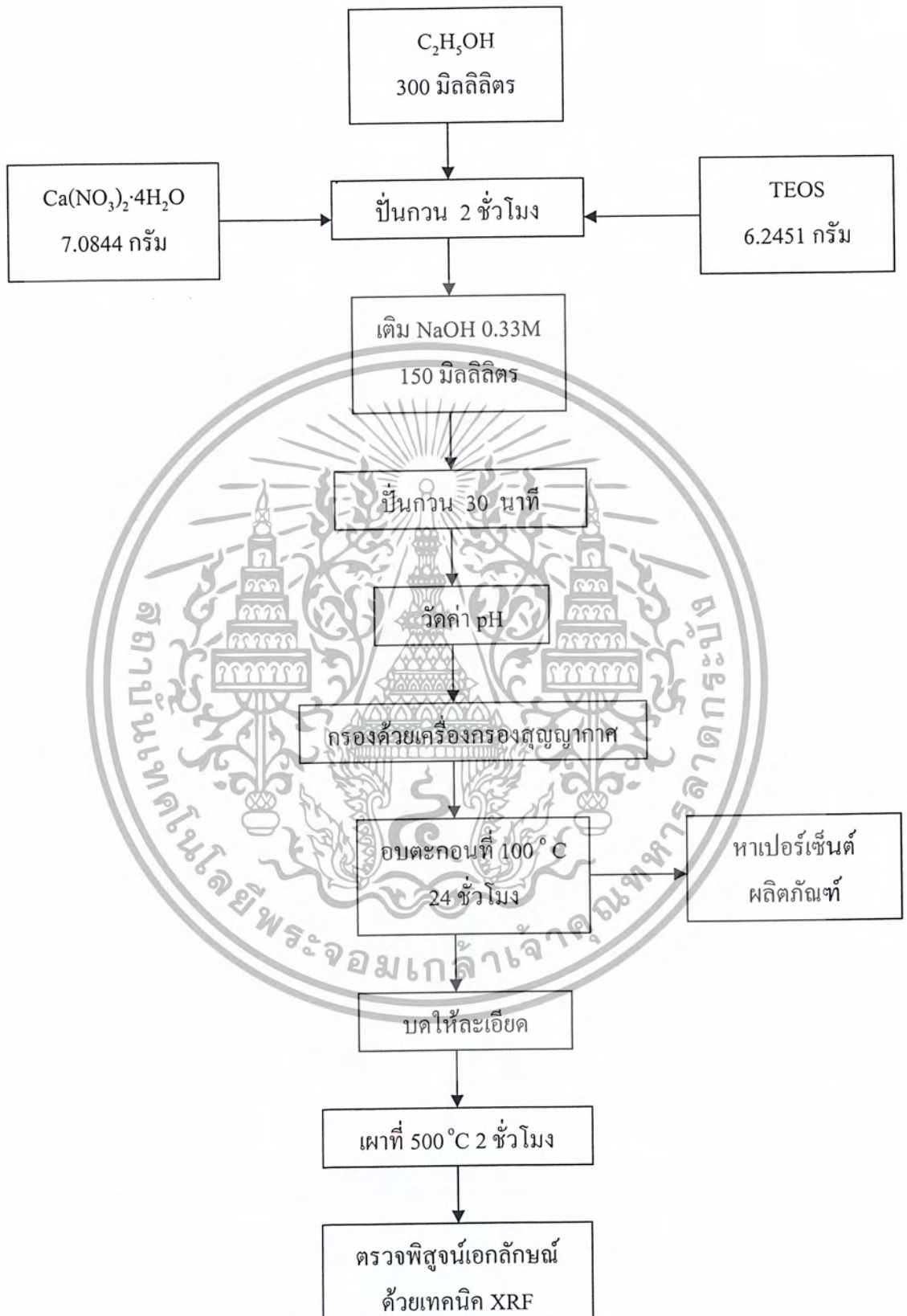
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์ HAp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การสังเคราะห์ CS

1. ชั่งเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) ปริมาณ 6.2451 กรัม
2. ตวงเอทานอล ปริมาตร 300 มิลลิลิตร
3. ชั่งแคลเซียมไนเตรดเตตระไฮเดรต ปริมาณ 7.0844 กรัม
4. ผสมสารในข้อที่ 1. ถึงข้อที่ 3. พร้อมทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบีกเกอร์พลาสติก
5. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร วัดค่า pH ของสารละลาย และบันทึกผล
6. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ และปั่นกวนของผสมต่อไปอีก 30 นาที
7. วัดค่า pH ของสารละลาย บันทึกผล
8. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง
9. นำตะกอนแคลเซียมซิลิเกตที่เตรียมได้ ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. ชั่งน้ำหนักและหาเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้
11. บด CS ที่เตรียมได้ให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร
12. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
13. ตรวจสอบน้ำหนักเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเทคนิค XRF เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของสารที่สังเคราะห์ได้



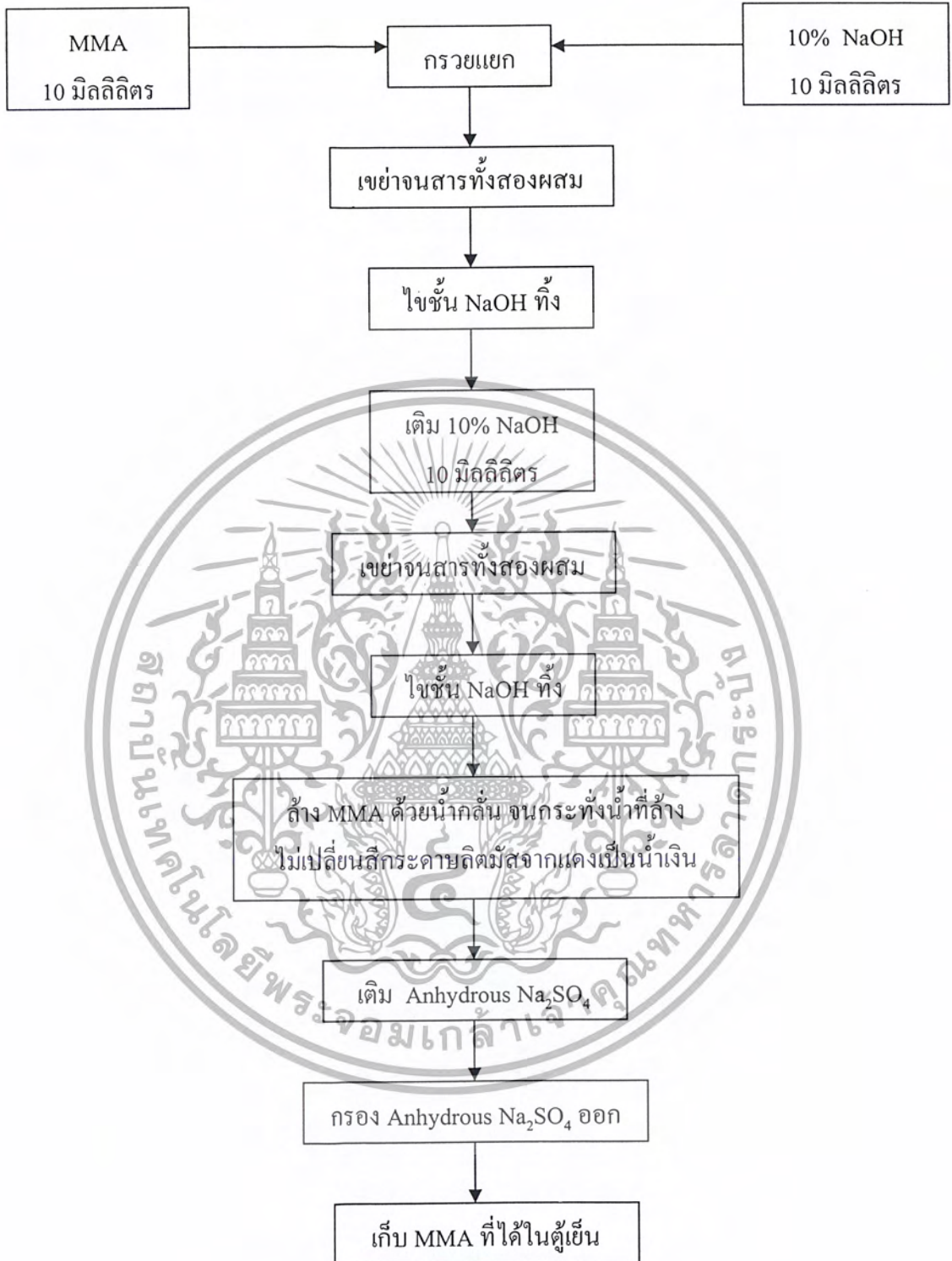


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การสกัดด้วยยิปซั่มออกจาก MMA

1. เท MMA 10 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในกรวยแยก เขย่าให้สารทั้งสองผสมกันรอนจนแยกชั้น ซึ่งชั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะอยู่ด้านล่าง
2. ไขชั้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทิ้ง แล้วเทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงไปอีกครั้ง และเขย่าให้สารทั้งสองผสมกัน
3. รอนจนแยกชั้นจึง ไขชั้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง
4. ล้าง MMA ที่อยู่ในกรวยแยกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ไหลไม่เปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัสจากแดงเป็นน้ำเงิน ซึ่งแสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกล้างออกหมดแล้ว
6. นำ MMA ที่สกัดด้วยยิปซั่มแล้วมาเติมสารคู่ความชื้นแอนไฮดรัส โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
7. กรองแยกของแข็งออก
8. นำ MMA ที่ทำสกัดด้วยยิปซั่มแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น





รูปที่ 3.3 แผนงานการสกัดตัวบัพยั้งออกจาก MMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การขึ้นรูป HAp และ CS

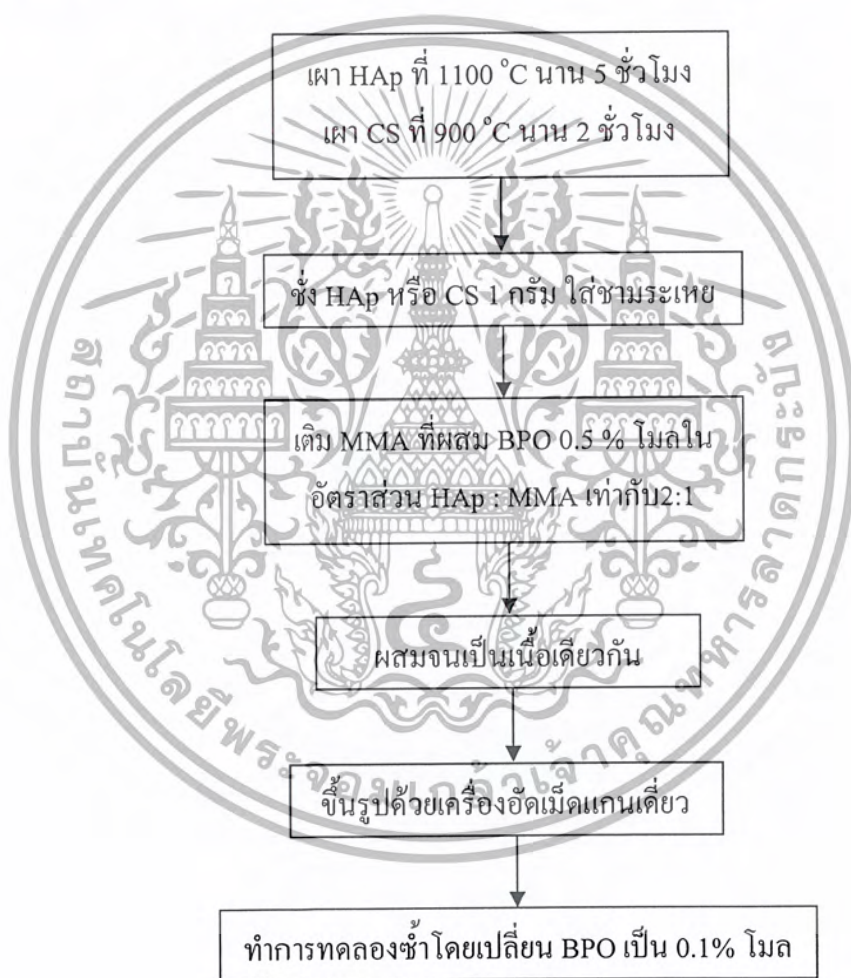
#### แบบที่ 1

1. นำ HAp ที่เตรียมได้เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และ CS ที่เตรียมได้เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ชั่ง HAp หรือ CS ประมาณ 1 กรัม แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแกนเดี่ยว



## แบบที่ 2

1. นำ HAp ที่เตรียมได้เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงและ CS ที่เตรียมได้เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ชั่ง HAp หรือ CS ประมาณ 1 กรัมใส่ในชามระเหย
3. เติม MMA ที่ผสม BPO 0.5% โมลในอัตราส่วน HAp หรือ CS ต่อ MMA เท่ากับ 2 : 1
4. ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ด
5. ทำการขึ้นรูปแบบที่ 2 ซ้ำโดยใช้ BPO 0.1 % โมล



รูปที่ 3.5 แผนงานการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### แบบที่ 3

1. ชั่ง PVA 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร ปั่นจนจนได้สารละลายใส
2. เติม HAp หรือ CS 20 กรัม ลงในสารละลาย PVA ที่เตรียมไว้ในข้อ 1 ปั่นจนต่อ 20 นาที
3. กรองสารแขวนลอยที่ได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ได้ชั้นตะกอนหนาประมาณ 1 เซนติเมตร
4. ตัดแบ่งตะกอนด้วยมีดผ่าตัดให้ได้ขนาดประมาณ 1x1 ตารางเซนติเมตร
5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำ HAp ที่ขึ้นรูปโดยการผสม PVA ไปเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C โดยมีขั้นตอนการตั้งอุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา HAp

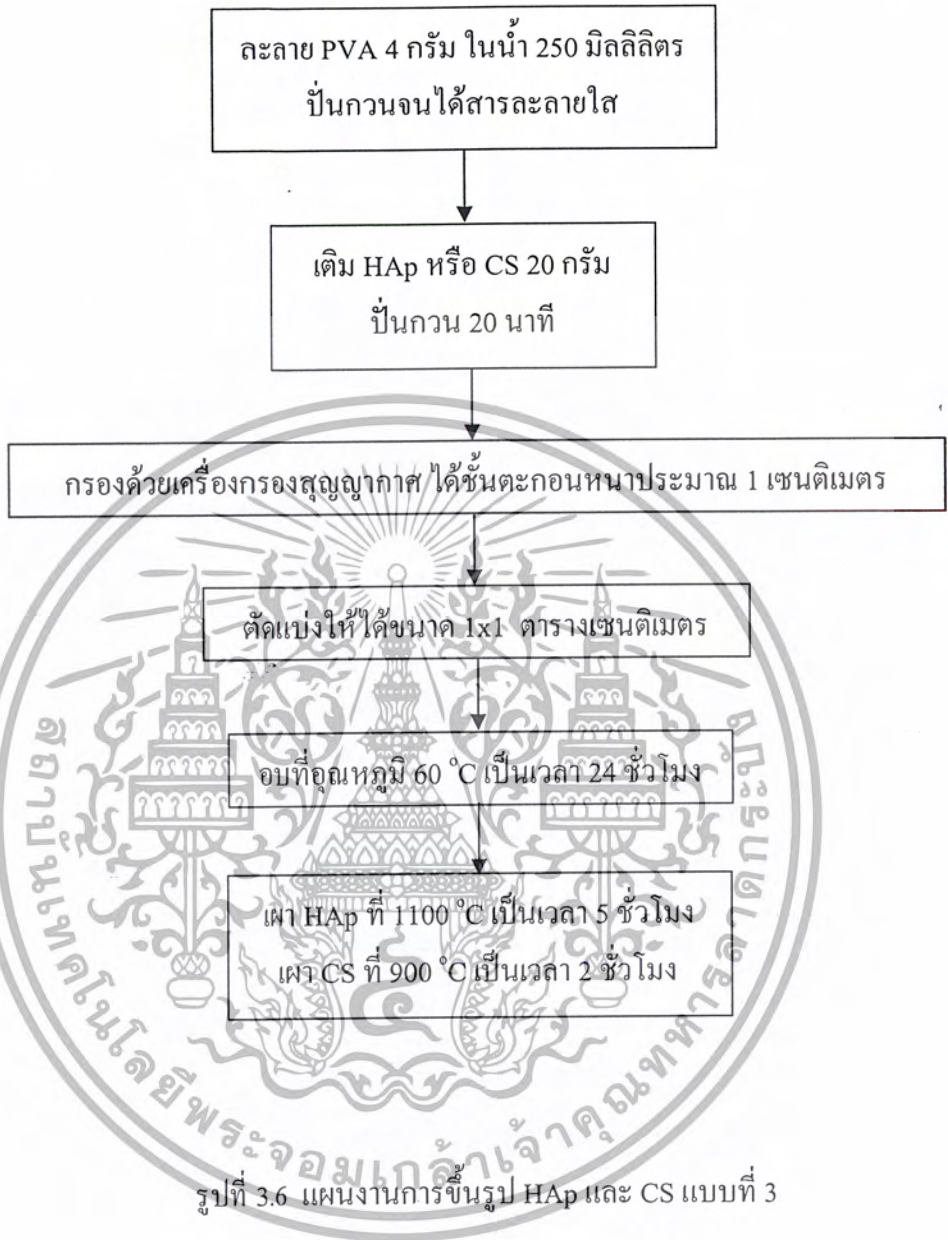
อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่คงไว้ (ชั่วโมง)
250	0.75
450	0.75
650	0.75
850	0.75
1100	5.00

ส่วน CS ที่ขึ้นรูปโดยการผสมกับ PVA เผาที่อุณหภูมิ 900 °C โดยมีขั้นตอนการตั้งอุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา CS

อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่คงไว้ (ชั่วโมง)
250	0.75
450	0.75
650	0.75
900	2.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แบบที่ 4

1. ชั่ง HAp หรือ CS ที่เตรียมได้ประมาณ 1 กรัม แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแกนเดี่ยว
2. นำ HAp ที่ขึ้นรูปแล้วเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C โดยมีขั้นตอนการตั้งอุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.1 และแคลเซียมซัลเฟตที่ขึ้นรูปแล้วเผาที่อุณหภูมิ 900 °C โดยมีขั้นตอนการตั้งอุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.2



## แบบที่ 5

1. ชั่ง PVA 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร และปั่นจนจนได้สารละลายใส
2. เติม HAp หรือ CS 20 กรัม ลงในสารละลายของ PVA ที่เตรียมได้ในข้อ 1 ปั่นจนต่อ 20 นาที
3. กรองสารแขวนลอยที่ได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
4. อบตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. บดตะกอนให้ละเอียด
6. ชั่ง HAp ที่ผสม PVA หรือ CS ที่ผสม PVA ประมาณ 1 กรัม แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแกนเดี่ยว
7. เผา HAp ที่อุณหภูมิ 1100 °C โดยตั้งอุณหภูมิตามตารางที่ 3.1 และเผา CS ที่อุณหภูมิ 900 °C โดยตั้งอุณหภูมิตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.8 แผนงานการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะต่าง ๆ

การขึ้นรูป แบบที่	ลักษณะของชิ้นงาน ก่อนพอลิเมอไรเซชัน	การเผาแคลไซน์ ที่ 1100 °C	PVA	% BPO
1	เม็ดทรงกระบอก	ก่อน	X	0.1 0.5
2	เม็ดทรงกระบอก	ก่อน	X	0.1 0.5
3	เม็ดเหลี่ยมจตุรัส	หลัง	✓	0.1 0.5
4	เม็ดทรงกระบอก	หลัง	X	0.1 0.5
5	เม็ดทรงกระบอก	หลัง	✓	0.1 0.5

หมายเหตุ

- ก่อน หมายถึง การเผาแคลไซน์ HAp และ CS ที่ 1100 °C และ 900 °C ตามลำดับ ก่อนการขึ้นรูป
- หลัง หมายถึง การเผาแคลไซน์ HAp และ CS ที่ 1100 °C และ 900 °C ตามลำดับ หลังการขึ้นรูป
- X หมายถึง ไม่มีการเติม PVA เป็นสารให้รูปทรง
- ✓ หมายถึง มีการเติม PVA เป็นสารให้รูปทรง

### 3.3.5 การเตรียมวัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA

1. เติม BPO ลงใน MMA โดยใช้ BPO 0.5% โมลของ MMA คนสารละลายจนกว่าจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. แช่ HAp และ CS ที่ขึ้นรูปแล้วและทราบน้ำหนักที่แน่นอนใน MMA ที่เติม BPO เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ยกเว้นการขึ้นรูปในแบบที่ 2 ไม่ต้องทำข้อ 1 และข้อ 2)
3. นำ HAp และ CS ที่อิมมัลชันด้วย MMA ห่อด้วยกระดาษฟอยด์แล้วใส่ลงในขวดก้นกลมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน
4. นำขวดก้นกลมในข้อ 3. ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของ MMA
5. ฟันก๊าซไนโตรเจนในขวดก้นกลม 5 นาที และปิดขวดก้นกลม
6. นำขวดก้นกลมแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. เมื่อครบกำหนดเวลาแกะฟอยด์ออกจากวัสดุประกอบ
8. ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุประกอบที่ได้ด้วยเทคนิค TGA, SEM, GPC และ FTIR
9. ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบโดยทดสอบสมบัติความแข็งแรงกด
10. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ BPO เป็น 0.1% โมล





รูปที่ 3.9 แผนงานการเตรียมวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PMMA และ CS/PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของ HAp

จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF พบว่า HAp ที่สังเคราะห์ได้ มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca:P) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca:P ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้

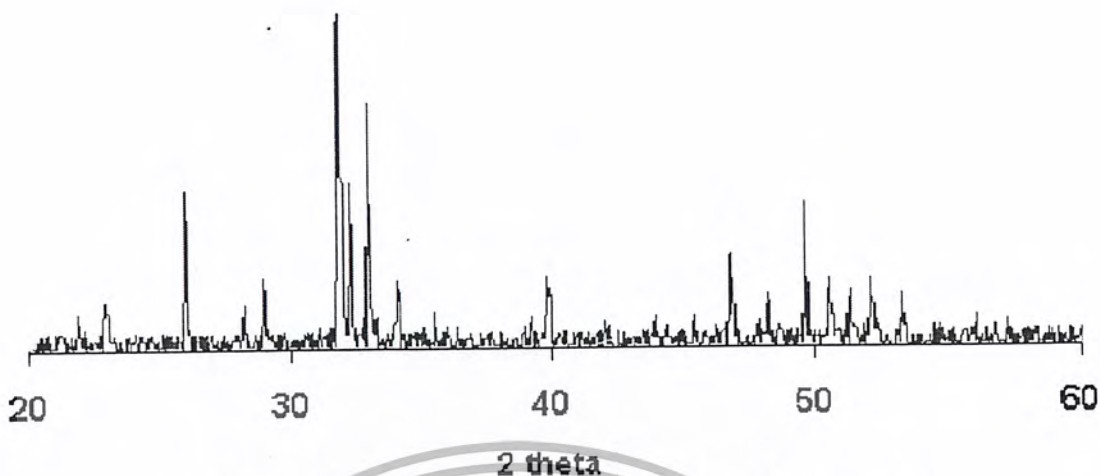
สารตัวอย่างที่	CaO % wt	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % wt	อัตราส่วนโดยโมล Ca:P
1	51.80	48.10	1.36
2	53.00	46.90	1.43
3	50.30	49.50	1.29
4	52.80	46.90	1.43
เฉลี่ย	51.98	47.85	1.38
ค่าทางทฤษฎี	56.90	43.10	1.67

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า HAp ที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca:P โดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.38 จะเห็นได้ว่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีคือ 1.67 อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่า pH ของสารละลายที่ใช้ในการตกตะกอน HAp มีค่าต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมในการตกตะกอนของ HAp ทำให้แคลเซียมตกผลึกไม่สมบูรณ์และแคลเซียมฟอสเฟตอื่น ๆ ที่ตกตะกอนได้ง่ายที่ pH ต่ำกว่า HAp ตกตะกอนเจือปนอยู่ใน HAp ที่สังเคราะห์ได้ ถึงแม้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้จะมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca:P ต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี แต่จากเทคนิค XRD สามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีวิฤภาคองค์ประกอบหลักเป็น HAp

##### 4.1.2 วิฤภาคที่เป็นผลึกของ HAp

สารที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบพีกที่สำคัญที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 25.9, 31.8, 33.0, 34.2, 39.8, 46.8, 49.6 และ 50.6 องศา ซึ่งเป็นพีกของ HAp ดังแสดงในรูปที่ 4.1

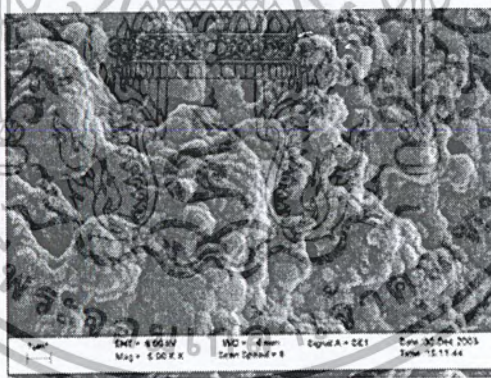
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ HAp ที่สังเคราะห์ได้  
 ภายหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

#### 4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของ HAp

ก้อน HAp ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการผสมกับ PVA แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C เมื่อนำไปส่องด้วยเทคนิค SEM พบว่า HAp มีลักษณะเป็นเกรนหกเหลี่ยมค่อนข้างกลมเกาะรวมตัวกันอยู่ และมีช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวของ PVA บนก้อนของ HAp แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของ HAp ที่ผ่านการขึ้นรูป

#### 4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้

##### 4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของ CS

จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF พบว่า CS ที่สังเคราะห์ได้จากการตกตะกอนร่วมมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ ) ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

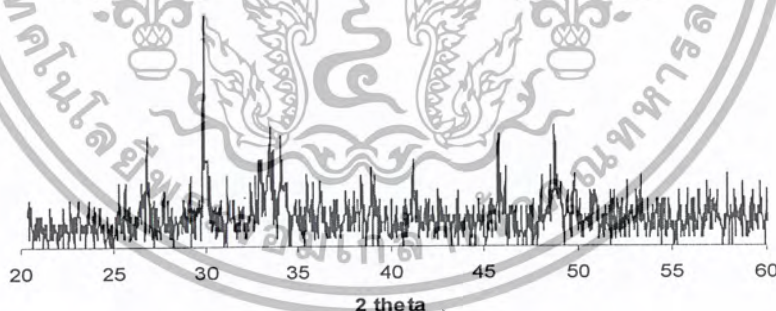
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง CaO:SiO<sub>2</sub> ของ CS ที่สังเคราะห์ได้

สารตัวอย่างที่	CaO %wt	SiO <sub>2</sub> %wt	อัตราส่วนโดยโมล CaO:SiO <sub>2</sub>
1	48.10	51.60	0.99
2	48.20	51.60	1.00
3	48.40	51.80	1.00
เฉลี่ย	48.20	51.70	1.00
ค่าทางทฤษฎี	48.28	51.72	1.00

จากผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ CS พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ CaO:SiO<sub>2</sub> มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 ซึ่งเป็นค่าที่ตรงกับค่าตามทฤษฎี

#### 4.2.2 วัฏภาคที่เป็นผลึกของ CS

สารที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบพิกที่สำคัญที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 23.2, 25.3, 26.8, 29.9, 36.2, 41.2, 49.8, 52.6, 53.3 และ 57.9 องศา ซึ่งเป็นพิกของ CS ที่มีวัฏภาคองค์ประกอบเป็น Wollastonite (CaSiO<sub>3</sub>) มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก ดังแสดงในรูปที่ 4.3

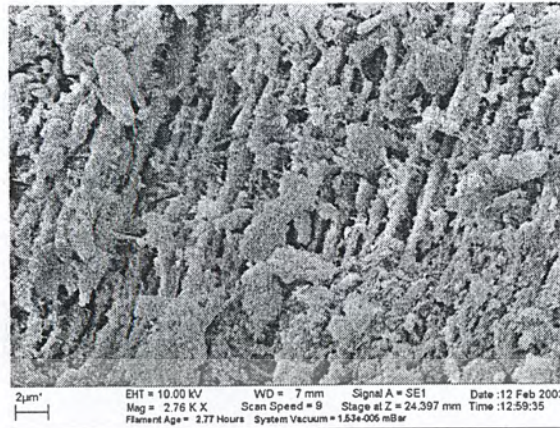


รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้ ภายหลังจากแคลไซน์ที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของ CS

จากการขึ้นรูป CS โดยการผสมกับ PVA แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อนำไปส่องด้วยเทคนิค SEM พบว่า CS มีลักษณะเป็นเกรนสี่เหลี่ยม และมีช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวของ PVA อยู่บนก้อนของ CS แสดงได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดง โครงสร้างทางจุลภาคของ CS ที่ผ่านการขึ้นรูป

### 4.3 วัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA

#### 4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะต่าง ๆ

จากการขึ้นรูป HAp และ CS แบบต่าง ๆ เมื่อนำมาทำเป็นวัสดุประกอบได้ผลดังตาราง

ที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประกอบที่ขึ้นรูปด้วยสภาวะต่าง ๆ

การขึ้นรูป แบบที่	ลักษณะของชิ้นงาน ก่อนพอลิเมอไรเซชัน	การเผา แคลไซน์ ที่ 1100 °C	PVA	% BPO	ลักษณะของชิ้นงาน หลังพอลิเมอไรเซชัน	
					HA/PMMA	CS/PMMA
1	เม็ดทรงกระบอก	ก่อน	X	0.1	แตก	แตก
				0.5	แตก	แตก
2	เม็ดทรงกระบอก	ก่อน	X	0.1	แตก	แตก
				0.5	แตก	แตก
3	สี่เหลี่ยมจตุรัส	หลัง	✓	0.1	แตก	ร้าว
				0.5	แตก	ร้าว
4	เม็ดทรงกระบอก	หลัง	X	0.1	*	ไม่แตก
				0.5	*	ร้าว
5	เม็ดทรงกระบอก	หลัง	✓	0.1	ไม่แตก	ไม่แตก
				0.5	ร้าว	ร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หมายเหตุ

ก่อน หมายถึง การเผาแคลไซน์ HAp และ CS ที่  $1100^{\circ}\text{C}$  และ  $900^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ก่อนการขึ้นรูป  
 หลัง หมายถึง การเผาแคลไซน์ HAp และ CS ที่  $1100^{\circ}\text{C}$  และ  $900^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ หลังการขึ้นรูป

X หมายถึง ไม่มีการเติม PVA เป็นสารให้รูพรุน

✓ หมายถึง มีการเติม PVA เป็นสารให้รูพรุน

\* หมายถึง ไม่สามารถเตรียมเป็นวัสดุประกอบได้เนื่องจากเซรามิกส์ไม่มีรูพรุน

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการขึ้นรูปเซรามิกส์มีผลกับเสถียรภาพทางรูปร่างของวัสดุประกอบ โดยการขึ้นรูปเซรามิกส์แบบที่ 4 และแบบที่ 5 ซึ่งมีการเผาแคลไซน์เซรามิกส์หลังทำการขึ้นรูปแล้วจะทำให้วัสดุประกอบที่ได้มีเสถียรภาพทางรูปร่างดีกว่าแบบอื่น ๆ เนื่องจากการเผาแคลไซน์หลังการขึ้นรูปแล้วจะทำให้ทั้งเซรามิกส์เกิดผลึกเชื่อมต่อกันทำให้โครงสร้างของเซรามิกส์แข็งแรงกว่าการเผาแคลไซน์ก่อนการขึ้นรูป (การขึ้นรูปแบบที่ 1 และ 2) ซึ่งไม่มีผลึกเชื่อมต่อกันภายในโครงสร้าง ส่วนการขึ้นรูปแบบที่ 3 แม้ว่าจะมีการเผาแคลไซน์หลังการขึ้นรูปเช่นเดียวกับแบบที่ 4 และแบบที่ 5 แต่การขึ้นรูปแบบที่ 3 เซรามิกส์เกิดจากการขึ้นรูปโดยวิธีการกรองลดความดันซึ่งใช้ความดันในการขึ้นรูปน้อยกว่าการขึ้นรูปแบบที่ 4 และแบบที่ 5 ซึ่งเซรามิกส์เกิดการกดอัดกันแน่นในแนวตั้ง ทำให้การขึ้นรูปแบบที่ 4 และ 5 อนุภาคเกิดการจัดเรียงตัวแน่นกว่าส่งผลให้การขึ้นรูปแบบที่ 3 เซรามิกส์มีรูพรุนมากกว่า ดังนั้นเมื่อผ่านการเผาแคลไซน์แล้วการขึ้นรูปแบบที่ 4 และแบบที่ 5 เซรามิกส์จึงมีความแข็งแรงมากกว่า ฉะนั้นการขึ้นรูปแบบที่ 3 เมื่อทำเป็นวัสดุประกอบแล้วจึงไม่สามารถคงรูปร่างไว้ได้

ในการขึ้นรูปแบบที่ 4 HAp เมื่อผ่านการแคลไซน์แล้วเกิดการหดตัวเนื่องจากการเกิดเป็นผลึกเชื่อมต่อกัน ทำให้ก้อน HAp ที่ขึ้นรูปได้เกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุน จึงไม่สามารถนำมาเตรียมเป็นวัสดุประกอบได้

การขึ้นรูปในแบบที่ 1 2 และ 3 ไม่อาจคงรูปร่างไว้ได้เมื่อทำเป็นวัสดุประกอบอาจเนื่องมาจาก MMA มีความเป็นกรดอ่อน ๆ ดังนั้นเมื่อนำ HAp และ CS ลงไปแช่ใน MMA จึงทำให้ HAp และ CS ที่เกิดการตกตะกอนที่ pH สูง ๆ ถูกกัดกร่อนทำให้เสียเสถียรภาพทางรูปร่าง

นอกจากนี้ปริมาณ BPO ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาก็มีผลต่อเสถียรภาพของวัสดุประกอบ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ BPO 0.5% โมล จะทำให้โครงสร้างของเม็ดเซรามิกส์แตกออก ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาสูง ๆ การพอลิเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการคายความร้อนอย่างรุนแรงทำให้ระบายความร้อนออกจากวัสดุประกอบไม่ทัน และพอลิเมอร์ที่

เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างรวดเร็ว คือพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้เกิดการหดตัวกว่ามอนอเมอร์ตั้งต้นทำให้ไปบีบโครงสร้างของเซรามิกส์ทำให้เซรามิกส์เกิดการร้าว

ดังนั้นการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการทำวัสดุประกอบคือ การขึ้นรูปแบบที่ 5 และปริมาณ BPO ที่เหมาะสมคือ 0.1% โมล

#### 4.3.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR

PMMA ที่สังเคราะห์ได้ภายในรูปพรุนของ HAp และ CS เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบพิกที่แสดงถึงโครงสร้างของ PMMA ได้ผลดังนี้

$\nu_{\max}$  : 2996, 2950 (C-H,s) 1731 (C=O,s) 1242 (C-O,s)  $\text{cm}^{-1}$  (ภาคผนวก ก รูปที่ ก-1)

โดยที่ไม่พบพิก C=C ที่แสดงถึงสารมอนอเมอร์ตั้งต้น นั่นคือ มอนอเมอร์ที่อยู่ภายในโครงสร้างของ HAp และ CS ได้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและเปลี่ยนเป็น PMMA

#### 4.3.3 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ด้วยเทคนิค GPC

PMMA ที่สังเคราะห์ได้ภายในรูปพรุนของ HAp และ CS ที่ขึ้นรูปแบบที่ 5 เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC (ภาคผนวก ง) พบว่า PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปพรุนของ HAp มี  $M_n$  และ  $M_w$  เมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.1% โมล เท่ากับ 152,700 กรัม/โมล และ 490,800 กรัม/โมล ตามลำดับ และเมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.5% โมล มี  $M_n$  และ  $M_w$  เท่ากับ 29,900 กรัม/โมล และ 72,200 กรัม/โมล ตามลำดับ ส่วน PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปพรุนของ CS มี  $M_n$  และ  $M_w$  เมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.1% โมล เท่ากับ 154,500 กรัม/โมล และ 347,900 กรัม/โมล ตามลำดับ และเมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.5% โมล มี  $M_n$  และ  $M_w$  เท่ากับ 189,600 กรัม/โมล และ 478,500 กรัม/โมล ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้

PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปพรุน	เปอร์เซ็นต์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (%BPO)	น้ำหนักโมเลกุล เฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ )	น้ำหนักโมเลกุล เฉลี่ยโดยน้ำหนัก ( $M_w$ )	การกระจาย น้ำหนักโมเลกุล (MWD)
HAp	0.1	152,700	490,800	3.21
	0.5	29,900	72,200	2.41
CS	0.1	154,500	347,900	2.25
	0.5	189,600	478,500	2.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค TGA

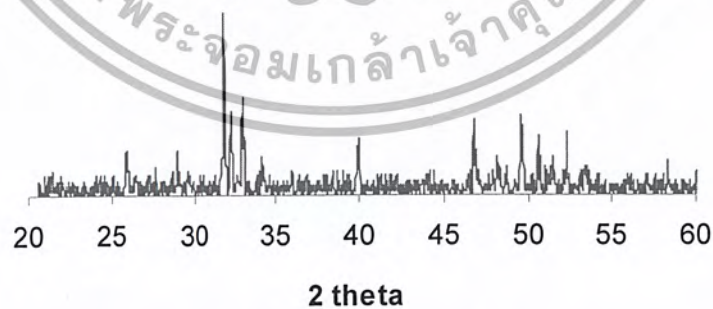
จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PMMA ในวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PMMA และ CS/PMMA ที่ได้จากการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 5 เมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.1% โมล โดยเทคนิค TGA (ภาคผนวก จ) ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ PMMA ในวัสดุประกอบ

วัสดุประกอบ	เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของ PMMA ในวัสดุประกอบ
HAp/PMMA	13
CS/PMMA	26

นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ PMMA ในวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้ อยู่ในช่วง 200-600 °C

#### 4.3.5 ภูมิภาคที่เป็นผลึกของวัสดุประกอบ

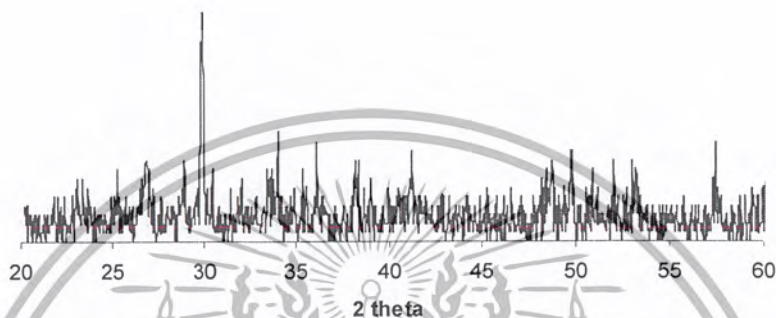


รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบ HAp/PMMA

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงภูมิภาคที่เป็นผลึกของวัสดุประกอบ HAp/PMMA พบว่าวัสดุประกอบระหว่าง HAp/PMMA มีพีกที่แสดงความเป็นผลึกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่ตำแหน่ง 25.9,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31.8, 33.0, 39.8, 46.8, 49.6 และ 50.6 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับพีกที่แสดงความเป็นผลึกของ HAp ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) แต่มีความเข้มของพีกลดลง ซึ่งเนื่องมาจากการมี PMMA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานแทรกอยู่ทั้งภายในและภายนอกกรูพรุน จึงส่งผลให้ความเป็นผลึกของวัสดุประกอบต่ำกว่า HAp บริสุทธิ์



รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบ CS/PMMA

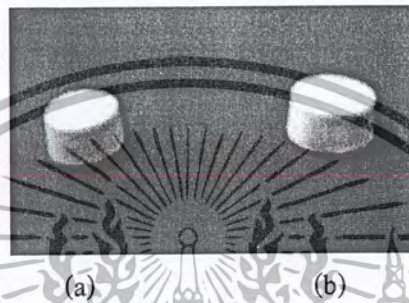
จากรูปที่ 4.6 แสดงวิภูภาคที่เป็นผลึกของวัสดุประกอบ CS/PMMA พบว่า วัสดุประกอบ CS/PMMA มีพีกที่แสดงความเป็นผลึกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 23.2, 25.3, 26.8, 29.8, 36.2, 41.2, 49.8, 52.6, 53.3 และ 57.9 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับพีกที่แสดงความเป็นผลึกของ CS ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) แต่มีความเข้มของพีกลดลง ซึ่งอาจมีผลเนื่องมาจากการมี PMMA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานแทรกอยู่ทั้งภายในและภายนอกกรูพรุน จึงส่งผลให้ความเป็นผลึกของวัสดุประกอบลดลง

#### 4.3.6 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประกอบ

ลักษณะทางกายภาพของ HAp และ CS เป็นของแข็ง สีขาว ซึ่งเมื่อนำไปทำเป็นวัสดุประกอบแล้วยังคงมีลักษณะทางกายภาพคงเดิม เนื่องจาก PMMA เป็นพอลิเมอร์ที่โปร่งใส ดังนั้นจึงไม่เห็นความแตกต่างด้วยตาเปล่าของ HAp กับวัสดุประกอบของ HAp/PMMA และ CS กับวัสดุประกอบของ CS/PMMA

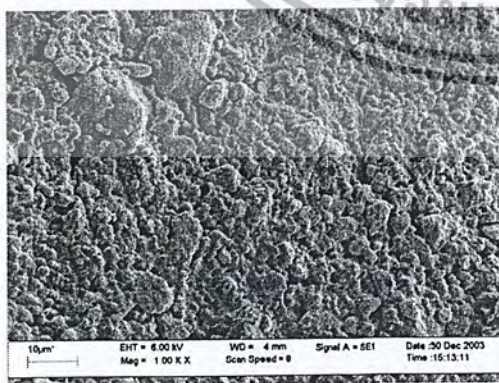


รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของ HAp (a) กับลักษณะทางกายภาพของ HAp/PMMA (b)

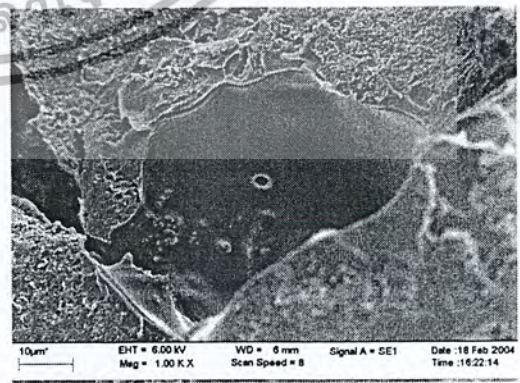


รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของ CS (a) กับลักษณะทางกายภาพของ CS/PMMA (b)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุประกอบด้วยเทคนิค SEM พบว่า HAp ที่เป็นวัสดุเริ่มต้นมีลักษณะเป็นเกรนทึบเหลี่ยมก่อนข้างกลมเกาะรวมตัวกันอยู่ (รูปที่ 4.9 (a)) และ CS ที่เป็นวัสดุเริ่มต้นมีลักษณะเป็นเกรนสี่เหลี่ยม (รูปที่ 4.10 (a)) แต่เมื่อนำมาทำเป็นวัสดุประกอบแล้วพบว่าฟิล์มของพอลิเมอร์บาง ๆ ปกคลุมพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในรูพรุน ทำให้ความคมชัดของเกรนของ HAp (รูปที่ 4.9 (b)) และ CS (รูปที่ 4.10 (b)) ลดลง ซึ่งจะพบลักษณะฟิล์มบางของ PMMA ปกคลุมพื้นผิว HAp และ CS ทั้งภายนอกและภายในก้อนวัสดุประกอบ



(a)

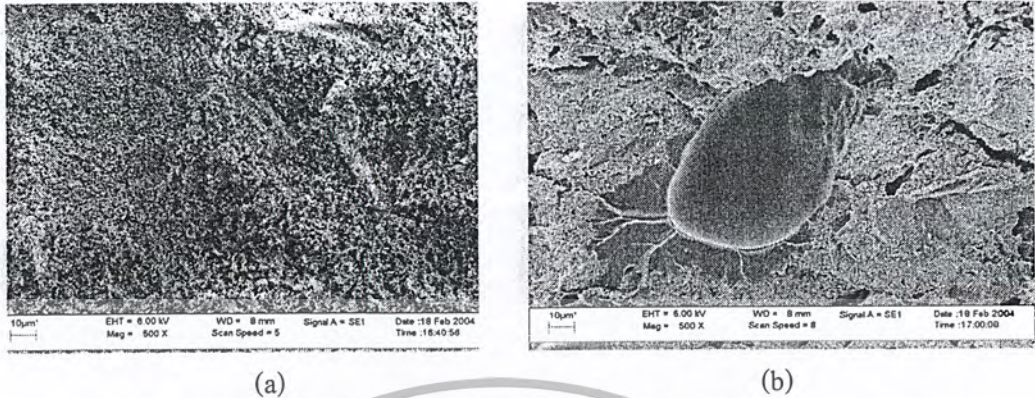


(b)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคภายในก้อน HAp

ก่อนการเตรียมวัสดุประกอบ (a) และภายในก้อนวัสดุประกอบ HAp/PMMA (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภารกิจการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคภายในก้อน CS ก่อนการเตรียมวัสดุประกอบ (a) และภายในก้อนวัสดุประกอบ CS/PMMA (b)

#### 4.3.7 ความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบ

ความแข็งแรงกด (Compressive strength) ของวัสดุประกอบ HAp/PMMA เปรียบเทียบกับ HAp และ CS/PMMA เปรียบเทียบกับ CS ได้ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบเทียบกับเซรามิกส์เริ่มต้น

วัสดุ	ความหนาแน่นของเซรามิกส์ ( $g/cm^3$ )	ค่าความแข็งแรงกด (MPa)
HAp	1.6	12.5
HAp/PMMA	2.0	131.1
CS	1.0	3.2
CS/PMMA	1.7	89.8

จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบที่ได้จากการขึ้นรูป HAp และ CS แบบที่ 5 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1% โมล มีค่าเพิ่มขึ้นกว่าเซรามิกส์เริ่มต้นโดย

- วัสดุประกอบ HAp/PMMA มีค่าความแข็งแรงกดมากกว่า HAp ประมาณ 11 เท่า
- วัสดุประกอบ CS/PMMA มีค่าความแข็งแรงกดมากกว่า CS ประมาณ 25 เท่า

ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก PMMA มีความแข็งแรงมากกว่าเซรามิกส์ PMMA จะช่วยเสริมแรงให้แก่เซรามิกส์ ทำให้วัสดุประกอบที่ได้มีความแข็งแรงมากกว่าเซรามิกส์เริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. HAp ที่ได้จากการสังเคราะห์มีอัตราส่วน โดยโมลของ Ca:P อยู่ในช่วง 1.29-1.43 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี
2. CS ที่ได้จากการสังเคราะห์มีอัตราส่วน โดยโมลของ CaO:SiO<sub>2</sub> อยู่ในช่วง 0.99-1.00 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี
3. การขึ้นรูปวัสดุประกอบที่เหมาะสมที่สุด คือการขึ้นรูปแบบที่ 5 โดยใช้ PVA เป็นสารให้รูพรุน แล้วจึงนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดและเผา
4. ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.1% โมลเหมาะสมกับการเตรียมวัสดุประกอบมากกว่าการใช้ 0.5% โมล
5. วัสดุประกอบ HAp/PMMA และ CS/PMMA มีปริมาณ PMMA โดยเฉลี่ยเท่ากับ 13 และ 26% โดยน้ำหนักตามลำดับ
6. จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงกดของวัสดุประกอบที่ได้จากการขึ้นรูปแบบที่ 5 โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1% โมลพบว่า วัสดุประกอบ HAp/PMMA มีค่าความแข็งแรงกด โดยเฉลี่ยเท่ากับ 131.1 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่า HAp บริสุทธิ์ 11 เท่า สำหรับวัสดุประกอบระหว่าง CS/PMMA พบว่ามีค่าความแข็งแรงกด 89.8 MPa ซึ่งมากกว่า CS บริสุทธิ์ 25 เท่า
7. จากการวิเคราะห์ PMMA ซึ่งสกัดออกมาจากวัสดุประกอบที่ได้จากการขึ้นรูปแบบที่ 5 โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1% โมลด้วยเทคนิค GPC พบว่า

$$\text{HAp} : M_n=152,700 \quad M_w=490,800 \quad \text{MWD}=3.21$$

$$\text{CS} : M_n=154,500 \quad M_w=347,900 \quad \text{MWD}=2.25$$

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้ทดสอบความว่องไวทางชีวภาพในสภาวะจำลองของร่างกาย เพื่อจะทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ ที่จะนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้มาใช้กับร่างกายมนุษย์
2. ควรลดปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุประกอบที่ได้ถูกนำไปใช้กับร่างกายมนุษย์ จึงไม่ควรมีส่วนเจือปนอยู่ในปริมาณสูง
3. การสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอปาทาइट ควรควบคุมให้ pH ของสารละลายไม่ต่ำกว่า 13 เนื่องจากจะทำให้ได้ปริมาณของไฮดรอกซีเอปาทาइटในตะกอนเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. มาลินี ประสิทธิ์ศิลป์. 2002. วัสดุทางการแพทย์ที่มีความพิเศษ. [Online]. Available: [http://www.mtec.or.th/th/news/cool\\_stuff/cool26.html](http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool26.html)
2. H. Aoki. 1994. **Medical Application of Hydroxyapatite**. Tokyo. Ishiyaky Euro America
3. P. Stevens. 1990. **In Polymer Chemistry**. New York. Oxford University
4. Amethyst Galleries, Inc. 1996. **THE MINERAL WOLLASTONITE**. [Online]. Available: <http://mineral.halleries.com/minerals/silicate/class.htm>
5. A. Ulrich. 1993. **Introduction to Industrial Polymer**. 2<sup>nd</sup> ed. Germany. Hanser Publisher.
6. S.P. Parker. 1993. **Encyclopedia of Chemistry**. Vol 3. USA. McGraw-Hill Inc.
7. M.B. Smith. 1993. **Organic Synthesis**. Germany. MCGraw-Hill.
8. B. Dietoich, P. Viout and J.M. Lehn. 1993. **In Macrocyclic Chemistry**. VCM. Weinheim.
9. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. 2002. ไฮดรอกซีแอปาทิต์ (Hydroxyapatite) วัสดุทดแทนกระดูก. [Online]. Available: [http://www.mtec.or.th/th/news/cool\\_stuff/cool2.html](http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool2.html)
10. Azom.com. 2003. **Calcium Phosphate Biomaterials-Solubility of Calcium Phosphates**. [Online]. Available: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2140>
11. Azom.com. 2003. **Hydroxyapatite-Thermal Stability of Synthetic Hydroxyapatite**. [Online]. Available: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1462>
12. L.L Hench and J. Wilson. 1993. **An introduction to Bioceramics**. Singapore. World Scientific Pubish. Co. Ltd.
13. G.Karlis. 2003. **Hydroxyapatite-Synthetic Hydroxyapatite Powders**. [Online]. Available: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1519>
14. Goodfellow Cambridge Limited. 2003. **Material Information Polymethymethacrylate**. [Online]. Available: <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/E/ME30.html>
15. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์. 2540. **เคมีพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ. โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
16. Azom.com. 2003. **Biomaterials-An Overview**. [Online]. Available: <http://www.azom.com/detail.asp?ArticleID=108>
17. Azom.com. 2003. **Hydroxyapatite Composite Biomaterials-Evolution and Applications**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[Online]. Available: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1718>

18. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุศาสตร์. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
19. ชูศักดิ์ เวชแพศย์ และสมศรี คาวฉาย. ม.ป.ป. โครงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทางชีวภาพทางการแพทย์. กรุงเทพฯ. สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหิดล.
20. N.O. Engin and A.C. Tas.2000. "Preparation of Porous  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  and  $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  Bioceramics." **Journal of the American Ceramics Society.** 83 : 1581-1584.
21. M.R. Saeri, A. Afshar, M. Ghorbani, N. Ehsani and C.C. Sorrell. 2003. "The wet precipitation process of hydroxyapatite." **Materials letters.** 57 : 4064-4069.
22. T.K. Anee, M. Ashok, M. Palanichamy and S.N. Kalkura. 2003. "A novel technique to synthesize hydroxyapatite at low temperature." **Materials Chemistry and Physics.** 80 : 725-730.
23. P. Silipannon, S. Hayshi, A. Yasumori and K. Okada. 1999. "Preparation and sintering of  $\text{CaSiO}_3$  from coprecipitated powder using NaOH as precipitant and its apatite formation in simulated body fluid solution." **Journal of Materials Research.** 14 : 529-540.
24. H.G., Kurczyk and J. Wuhrer. 1997. "Synthetic wollastonite and its use in ceramic bodies." **Interceramic.** 2 : 119-125
25. I. Kotsis, A. Balogh. 1989. "Synthesis of wollastonite". **Ceramics International.** 15 : 79-85.
26. A.M. Moursi, V. Alissa, Winnard, L. Phillip, J.J. Winnard and Lannutti. 2002. "Enhanced osteoblast response to a polymethylmethacrylate-hydroxyapatite composite." **Biomaterials.** 23 : 133-144.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 86-1203		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated							
$Ca_9 (PO_4)_6 (OH)_1$		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	l
Hydroxylapatite - synthetic / Calcium Phosphate Hydroxide		10.829	25	1	0	0	83.108	1	4	4	4
		16.861	4	1	0	1	83.428	3	4	3	3
		18.813	13	1	1	0	84.349	2	2	4	4
		21.757	9	2	0	0	84.635	2	0	0	0
		22.869	11	1	1	1	85.093	<1	4	0	0
		25.367	6	2	0	1	85.479	2	5	2	2
		25.937	47	0	0	2	85.759	1	2	6	6
		28.180	10	1	0	2	87.419	2	5	1	1
		28.915	15	2	1	0	*87.419	2	4	4	4
		31.771	100	2	1	1	87.704	3	1	1	1
		32.237	56	1	1	2	88.160	2	2	3	3
		32.889	71	3	0	0	88.473	5	3	5	5
		34.102	28	2	0	2	88.724	2	2	0	0
		35.458	2	3	0	1	89.565	<1	1	1	1
		38.159	<1	2	2	0					
		39.230	8	2	1	2					
		39.782	28	1	3	0					
		40.438	3	2	2	1					
		40.925	1	1	0	3					
		41.986	6	1	3	1					
		43.950	4	1	1	3					
		44.352	1	4	0	0					
		45.401	4	2	0	3					
		46.379	1	4	0	1					
		46.719	32	2	2	2					
		48.105	13	1	3	2					
		48.575	4	2	3	0					
		49.555	27	2	1	3					
		50.472	19	3	2	1					
		51.243	9	4	1	0					
		52.096	12	4	0	2					
		52.186	7	3	0	3					
		53.070	3	1	4	1					
		53.337	15	0	0	4					
		54.599	1	1	0	4					
		55.831	5	3	2	2					
		57.190	3	3	1	3					
		58.022	2	5	0	1					
		58.312	1	4	1	2					
		58.724	1	3	3	0					
		59.910	4	2	4	0					
		60.397	3	3	3	1					
		60.762	<1	4	0	3					
		61.564	3	2	4	1					
		61.807	3	1	2	4					
		62.996	5	5	0	2					
		63.369	1	5	1	0					
		64.098	9	3	0	4					
		64.214	7	3	2	3					
		64.992	9	5	1	1					
		66.460	4	1	4	3					
		67.455	<1	2	2	4					
		68.556	1	1	3	4					
		68.968	1	6	0	0					
		69.349	<1	1	0	5					
		69.683	3	1	5	2					
		70.058	<1	4	3	0					
		70.506	<1	6	0	1					
		70.843	<1	5	0	3					
		71.585	2	4	3	1					
		71.810	2	4	0	4					
		72.214	1	5	2	0					
		72.588	<1	2	0	5					
		72.990	<1	3	3	3					
		73.723	3	2	5	1					
		74.054	3	2	4	3					
		75.004	1	2	3	4					
		*75.004	1	6	0	2					
		75.770	3	2	1	5					
		76.093	2	3	4	2					
		76.454	1	6	1	0					
		77.108	4	4	1	4					
		77.214	4	5	1	3					
		77.934	1	6	1	1					
		78.186	6	2	5	2					
		80.980	<1	2	2	5					
		81.264	<1	5	0	4					
		81.652	1	4	4	0					
		82.012	1	3	1	5					
		82.328	<1	1	6	2					
		82.683	1	7	0	0					
Lattice : Hexagonal S.G. : P63/m (176) a = 9.42600 c = 6.86500 Z = 1		Mol. weight = 959.12 Volume [CD] = 528.23 Dx = 3.015 V/cor = 0.82									
ICSD COLLECTION CODE : 082293 REMARKS FROM ICSD : ATOM H 1+1. 1.68 Atoms not located in unit cell. TEST FROM ICSD : Charge sum slightly deviates from zero. TEMPERATURE FACTOR : ITF											
*Calculated from ICSD using POWD-124+, (1997) primary reference : *J. Solid State Chem., volume 126, page 195, (1995) : Jeanjean, J., McGrellis, S., Rouchaud, J.C., Fedoroff, M., Rondeau, A., Perocheau, S., Dubis, A.											
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings									

รูปที่ ก-1 รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของ HAp จากฐานข้อมูล JCPDS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานน มิอนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 70-795		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
Ca <sub>9</sub> 54 P <sub>5</sub> 96 O <sub>23</sub> 58 Cl <sub>1</sub> 66 (OH) <sub>2</sub> 74		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	
Hydroxylapatite / Calcium Phosphate Chloride Hydroxide		10.698	1	1	0	0	80.464	2	4	4	
		16.816	6	1	0	1	80.972	<1	2	2	
		18.585	2	1	1	0	81.312	<1	1	6	
		21.492	1	2	0	0	81.473	1	7	0	
		22.709	6	1	1	1	81.936	1	4	4	
		25.164	4	2	0	1	*81.936	1	1	3	
		26.041	35	0	0	2	82.620	3	4	3	
		28.225	6	1	0	2	82.842	2	3	3	
		28.559	6	2	1	0	*82.842	2	3	5	
		31.466	100	2	1	1	83.845	5	2	4	
		32.185	55	1	1	2	84.624	1	5	2	
		32.482	94	3	0	0	85.048	1	4	0	
		34.009	23	2	0	2	*85.048	1	0	0	
		35.097	4	3	0	1	85.943	<1	6	2	
		37.682	2	2	2	0	86.047	<1	1	0	
		39.031	6	2	1	2	86.322	<1	4	4	
		39.283	25	1	3	0	86.842	3	5	1	
		40.001	1	2	2	1	87.320	5	7	0	
		41.045	<1	1	0	3	88.042	5	2	3	
		41.526	7	1	3	1	*88.042	5	1	1	
		42.094	1	3	0	2	88.616	<1	1	6	
		43.789	3	4	0	0	89.038	<1	2	0	
		43.992	5	1	1	3	89.471	3	1	7	
		45.408	3	2	0	3					
		45.852	1	4	0	1					
		46.378	29	2	2	2					
		47.739	13	1	3	2					
		47.953	4	2	3	0					
		49.465	28	2	1	3					
		49.882	16	2	3	1					
		50.582	17	4	1	0					
		51.657	10	4	0	2					
		52.038	1	3	0	3					
		52.439	<1	4	1	1					
		53.564	12	0	0	4					
		54.792	3	1	0	4					
		55.374	6	3	2	2					
		55.566	4	5	0	0					
		55.737	1	2	2	3					
		56.933	5	3	1	3					
		57.311	2	5	0	1					
		57.761	2	4	1	2					
		57.948	3	3	3	0					
		58.373	1	2	0	4					
		59.116	2	2	4	0					
		59.648	2	3	3	1					
		60.431	<1	4	0	3					
		60.796	4	2	4	1					
		61.820	6	1	2	4					
		62.359	7	5	0	2					
		62.538	5	5	1	0					
		63.812	5	3	2	3					
		64.056	7	3	0	4					
		64.165	10	5	1	1					
		64.585	1	3	3	2					
		65.683	2	4	2	2					
		66.011	1	1	4	3					
		67.335	<1	2	2	4					
		68.022	1	6	0	0					
		68.411	1	3	1	4					
		68.922	2	5	1	2					
		69.092	2	3	4	0					
		69.628	<1	6	0	1					
		*69.628	<1	1	0	5					
		70.304	<1	5	0	3					
		70.641	3	4	3	1					
		71.210	5	5	2	0					
		71.739	<1	1	1	5					
		72.406	<1	3	3	3					
		72.739	1	5	2	1					
		*72.739	1	2	0	5					
		73.448	4	2	4	3					
		74.173	1	6	0	2					
		74.712	2	2	3	4					
		75.206	4	3	4	2					
		75.370	2	6	1	0					
		75.887	5	2	1	5					
		76.542	4	5	1	3					
		76.768	5	1	4	4					
		77.256	5	2	5	2					
		77.932	<1	3	0	5					
Lattice : Hexagonal S.G. : P63/m (176) a = 9.54100 c = 6.83800 Z = 1		Mol. weight = 1048.18 Volume [CD] = 539.07 Dx = 3.229 Ucor = 1.25									
ICSD COLLECTION CODE : 001708 REMARKS FROM ICSD : ATOM H 1+1 2 74 Atoms not located in unit cell. TEMPERATURE FACTOR : ATF REMARKS FROM ICSD : REM B SO FOR CA 1 ADJUSTED. TEST FROM ICSD : Charge sum slightly deviates from zero. GENERAL COMMENTS : Cl-bearing, syn. ADDITIONAL PATTERN : See PDF 25-166.											
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B, volume 34, page 1401, (1978) : Sudarsanan, K., Young, R.A.											
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings									

รูปที่ ก-2 รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของ HAp จากฐานข้อมูล JCPDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 43-1460

Radiation = 1.540598

Quality : High

Ca Si O <sub>3</sub>										
Wollastonite-2M / Calcium Silicate parawollastonite		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k
		11.513	9	2	0	0	*59.523	3	-5	4
		12.563	1	0	0	1	59.752	2	-9	2
		16.251	2	-2	0	1	*59.752	2	4	0
		17.461	2	0	1	1	60.064	2	6	3
		17.861	3	2	0	1	*60.064	2	-9	2
		18.765	2	1	1	1	60.194	6	10	0
		23.144	40	4	0	0	60.481	4	-7	2
		25.289	50	0	0	2	*60.481	4	3	4
		*25.289	50	-4	0	1	60.912	4	-4	4
		26.840	60	-2	0	2	*60.912	4	5	4
		27.438	4	0	2	1	62.283	2	-6	4
		*27.438	4	4	0	1	62.530	3	9	2
		27.796	3	-1	2	1	*62.530	3	8	2
		28.127	5	0	1	2	62.718	10	3	2
		*28.127	5	-4	1	1	63.041	5	-6	4
		28.861	45	2	0	2	*63.041	5	4	4
		29.356	4	-2	2	1	63.556	4	-9	2
		29.982	100	-3	2	0	*63.556	4	-5	4
		30.304	4	2	2	1	63.765	10	-1	5
		31.948	5	-3	1	2	*63.765	10	-6	3
		*31.948	5	-3	2	1	64.507	1	0	4
		32.840	12	-4	0	2	*64.507	1	10	1
		33.015	7	-5	1	1	64.977	2	0	5
		35.023	14	6	0	0	*64.977	2	-2	4
		35.409	3	-4	2	1	65.444	2	-2	3
		*35.409	3	-1	2	2	*65.444	2	8	0
		36.176	25	-6	0	1	66.399	2	0	0
		*36.176	25	4	0	2	*66.399	2	-7	4
		36.201	14	-5	2	0	66.812	2	-6	4
		38.269	16	-6	1	1	*66.812	2	-9	3
		*38.269	16	4	1	2	67.280	4	6	0
		38.490	12	-3	2	2	68.192	3	3	5
		*38.490	12	6	0	1	*68.192	3	9	2
		39.028	35	-5	1	2	68.820	8	7	4
		*39.028	35	-2	0	3	*68.820	8	5	2
		39.456	2	-5	2	1	68.883	14	2	0
		40.340	2	0	1	3	*68.883	14	10	0
		40.701	5	3	2	2	69.933	3	-10	0
		41.266	25	-4	2	2	*69.933	3	1	5
		*41.266	25	5	2	1	70.160	3	-7	2
		41.604	6	-6	0	2	71.067	1	8	2
		43.232	3	-4	0	3	*71.067	1	-8	4
		44.716	7	-5	2	2	72.442	1	-11	2
		*44.716	7	3	1	3	72.662	2	-10	3
		45.697	7	6	0	2	*72.662	2	6	2
		*45.697	7	6	0	3	73.568	2	8	4
		46.787	2	1	2	3	*73.568	2	-6	0
		47.259	3	4	0	3	73.775	2	4	0
		*47.259	3	8	0	0	73.991	6	12	0
		47.427	7	2	3	2	*73.991	6	7	4
		*47.427	7	6	1	2	74.851	4	-8	4
		47.529	3	-5	3	0	*74.851	4	-9	1
		47.883	1	-8	0	1	74.969	3	-6	1
		47.988	2	5	2	2	*74.969	3	-2	4
		48.134	2	-5	1	3	75.115	2	4	1
		*48.134	2	-7	2	0	*75.115	2	11	2
		48.335	8	-7	1	2	76.772	5	8	0
		49.020	6	-8	1	0	*76.772	5	-7	3
		*49.020	6	-7	2	1	77.609	1	-4	4
		49.749	14	0	4	0	*77.609	1	8	3
		50.381	4	8	0	1	78.683	3	9	4
		50.789	5	3	2	3	*78.683	3	-10	0
		51.217	2	7	2	1	78.760	5	-9	2
		*51.217	2	-2	4	0	*78.760	5	-6	5
		51.524	1	0	4	1				
		51.930	16	0	0	4				
		52.191	6	-2	0	4				
		53.062	16	-5	2	3				
		53.278	18	2	4	1				
		*53.278	18	-1	1	4				
		54.543	18	2	0	4				
		55.310	2	-4	0	4				
		56.676	3	-1	4	2				
		*56.676	3	8	0	2				
		57.324	10	7	2	2				
		*57.324	10	5	2	3				
		58.564	2	2	4	2				
		*58.564	2	3	3	3				
		59.004	2	1	2	4				
		59.212	1	-8	0	3				
		*59.212	1	-9	1	2				
		59.523	3	-3	2	4				

<p>Lattice : Monoclinic</p> <p>S.G. : P21/a (14)</p> <p>a = 15.42900</p> <p>b = 7.32510</p> <p>c = 7.06920</p> <p>a/b = 2.10632</p> <p>c/b = 0.96507</p>	<p>Mol. weight = 116.16</p> <p>Volume [CD] = 795.43</p> <p>Dx = 2.910</p> <p>Dm = 2.910</p> <p>Beta = 95.38</p> <p>Z = 12</p>
--	---

ANALYSIS : Microprobe analysis (wt.%) : Ca 41.44, Si 24.27, O 34.60.  
 SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from San Luis Potosi, Mexico.  
 COLOR : Colorless  
 OPTICAL DATA : A=1.618, B=1.630, Q=1.632, Sign=-, 2V=44 deg.(calc.)  
 ADDITIONAL PATTERN : To replace 10-489 and validated by calculated pattern 27-88.

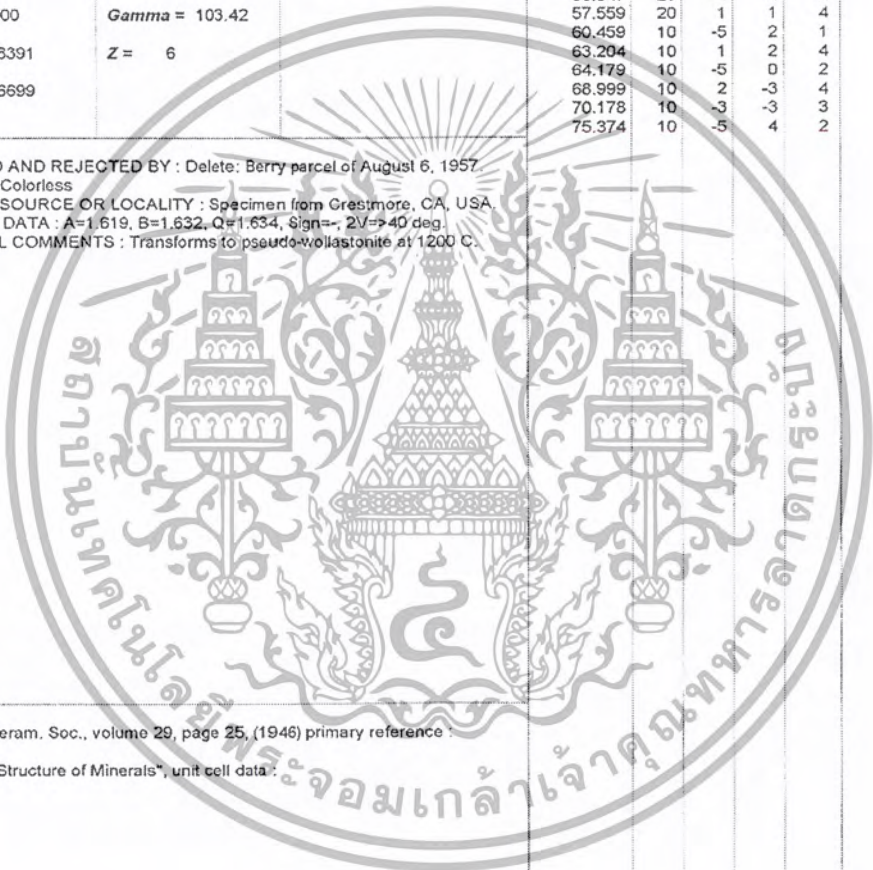
  

\*ICDD Grant-in-Aid, (1989) primary reference : Keller, L., Rask, J., Buseck, P., Arizona State University, Tempe, Arizona, USA.  
 \*Z. Kristallogr., volume 174, page 309, (1986) : Baur, W.  
 \*Rock Forming Minerals, volume 2, page 546, (1978) optical data : Deer, W., Howie, R., Zussman, J.

<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54060</p> <p>SS/FOM : F30= 38(0.0094,84)</p>	<p>Filter : Monochromator crystal</p> <p>d-sp : Diffractometer</p> <p>Internal standard : Si</p>
---	--

รูปที่ ข-1 รูปแบบการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ของ CS จากฐานข้อมูล JCPDS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 3-626		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Ca Si O <sub>3</sub>		<b>2th</b>	<b>l</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Wollastonite / Calcium Silicate		23.205	20	2	0	0
		25.354	40	0	0	2
		26.997	60	-1	0	2
		27.858	10	2	-1	1
		28.776	40	0	1	2
		29.951	100	-2	2	0
		36.496	20	0	2	2
		38.439	10	-3	2	0
		39.134	10	-1	0	3
		41.384	20	-3	1	2
		45.068	10	-2	-2	2
		45.790	10	1	-3	2
		49.786	60	2	3	0
		50.978	10	-2	-3	1
		52.230	20	0	0	4
		53.547	20	-4	2	2
		57.559	20	1	1	4
		60.459	10	-5	2	1
		63.204	10	1	2	4
		64.179	10	-5	0	2
		68.999	10	2	-3	4
		70.178	10	-3	-3	3
		75.374	10	-5	4	2
<b>Lattice</b> : Anorthic (triclinic) <b>S.G.</b> : P-1 (2) <b>a</b> = 7.89000 <b>Alpha</b> = 90.00 <b>b</b> = 7.27000 <b>Beta</b> = 95.27 <b>c</b> = 7.03000 <b>Gamma</b> = 103.42 <b>a/b</b> = 1.08391 <b>Z</b> = 6 <b>c/b</b> = 0.96699		<b>Mol. weight</b> = 116.16 <b>Volume [CD]</b> = 389.98 <b>Dx</b> = 2.968 <b>Dm</b> = 2.906		DELETED AND REJECTED BY : Delete: Berry parcel of August 6, 1957. COLOR : Colorless SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Crestmore, CA, USA OPTICAL DATA : A=1.619, B=1.632, Q=1.634, Sign=-, 2V=>40 deg GENERAL COMMENTS : Transforms to pseudo-wollastonite at 1200 C.		
*J. Am. Ceram. Soc., volume 29, page 25, (1946) primary reference : Clark, C. **"Atomic Structure of Minerals", unit cell data : Bragg.						
<b>Radiation</b> : CoKα <b>Lambda</b> : 1.79020 <b>SS/FOM</b> : F23= 1(0.0670,408)		<b>Filter</b> : Not specified <b>d-sp</b> : Not given				

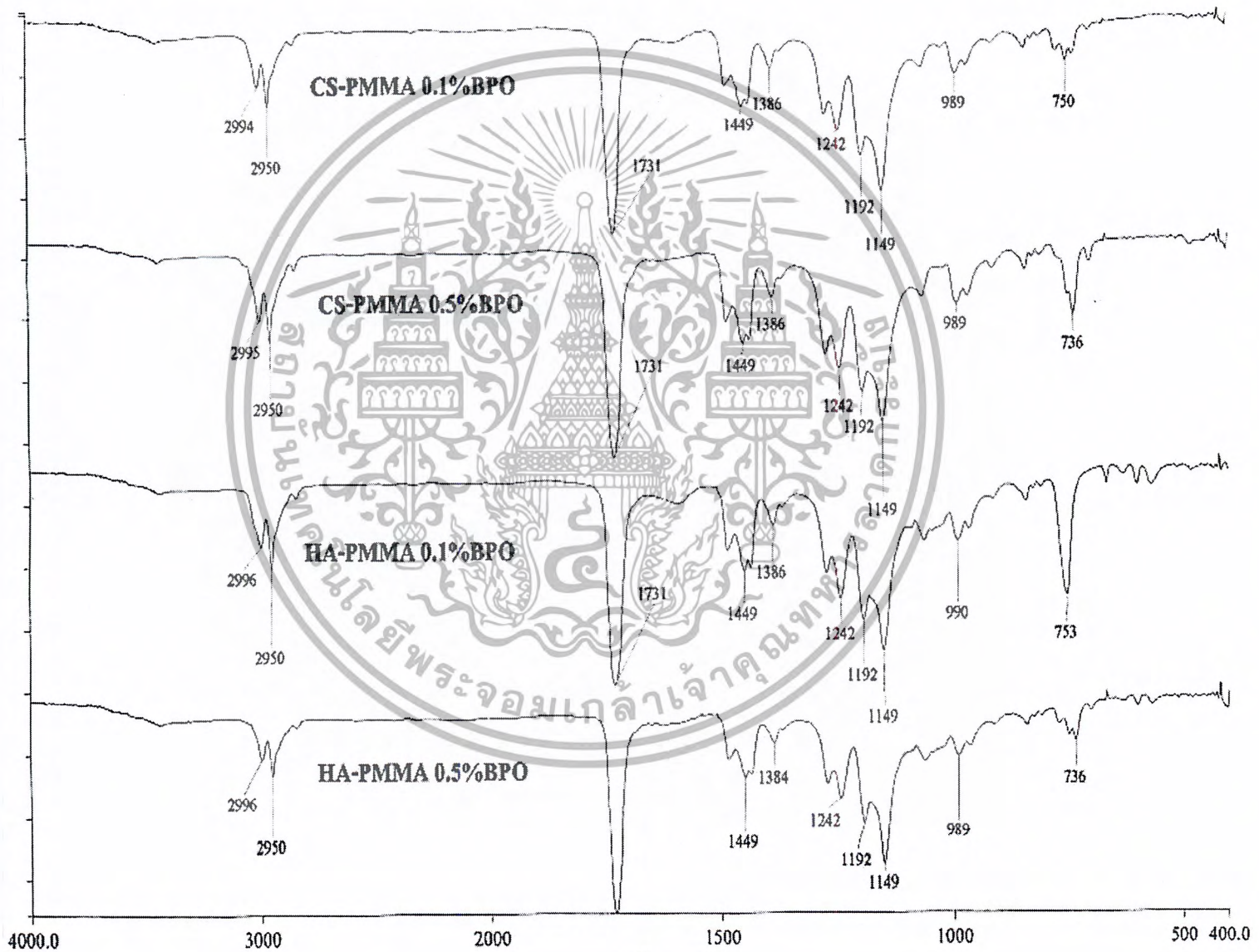
### รูปที่ ข-2 รูปแบบการกระเจิงแสงของรังสีเอ็กซ์ของ CS จากฐานข้อมูล JCPDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



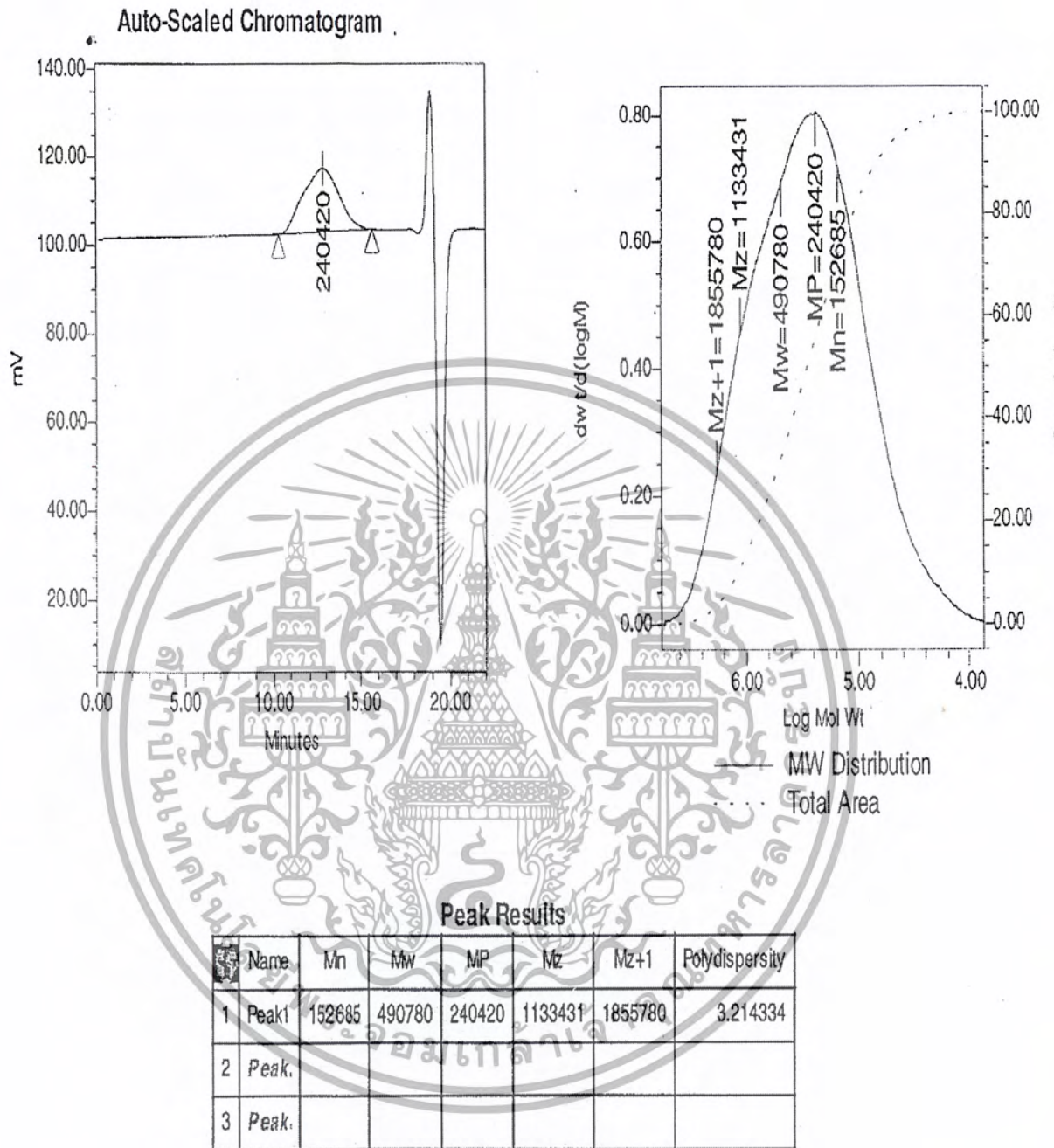
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุประกอบ HA/PMMA และ CS/PMMA เมื่อใช้ 0.1% BPO และ 0.5% BPO



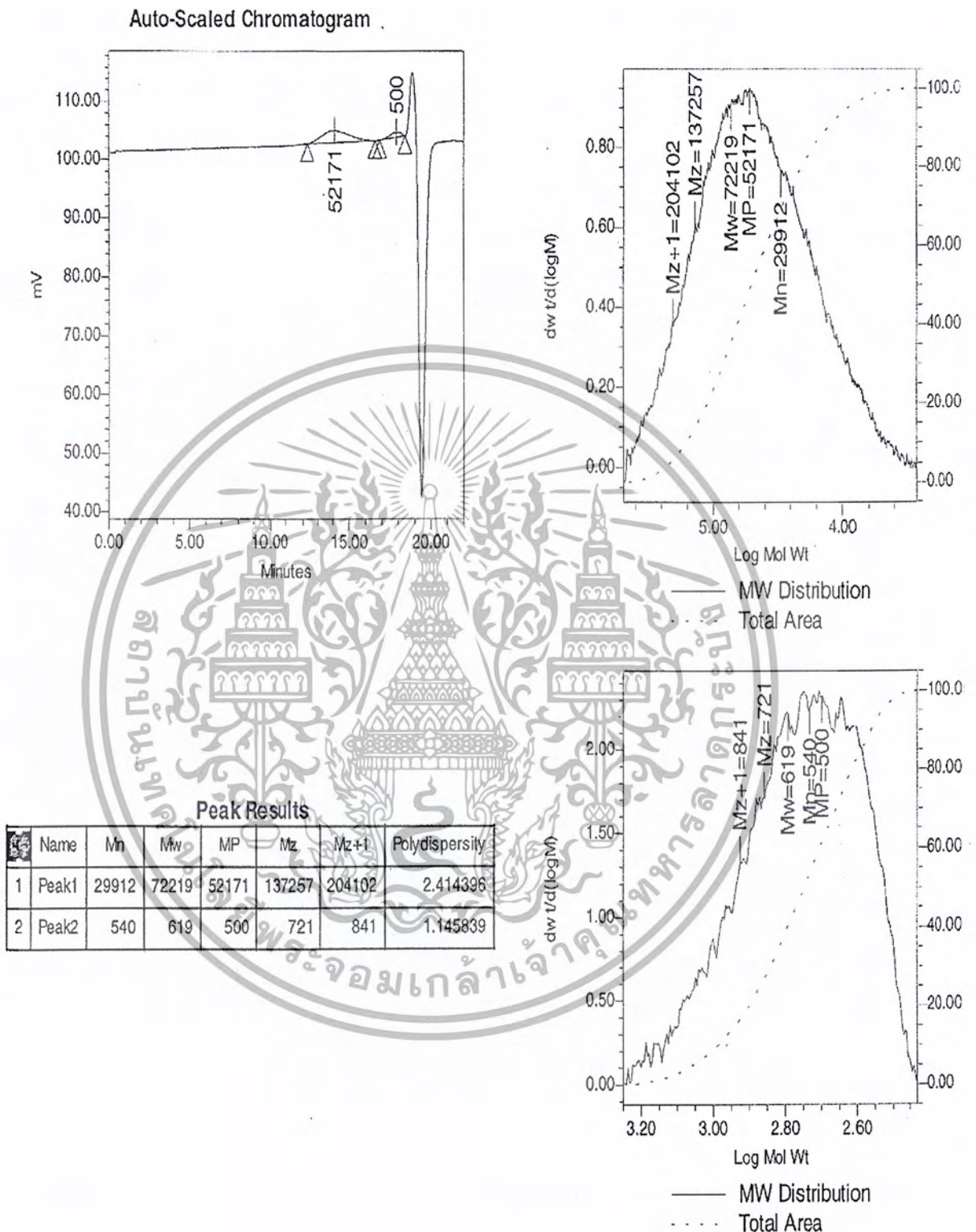


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



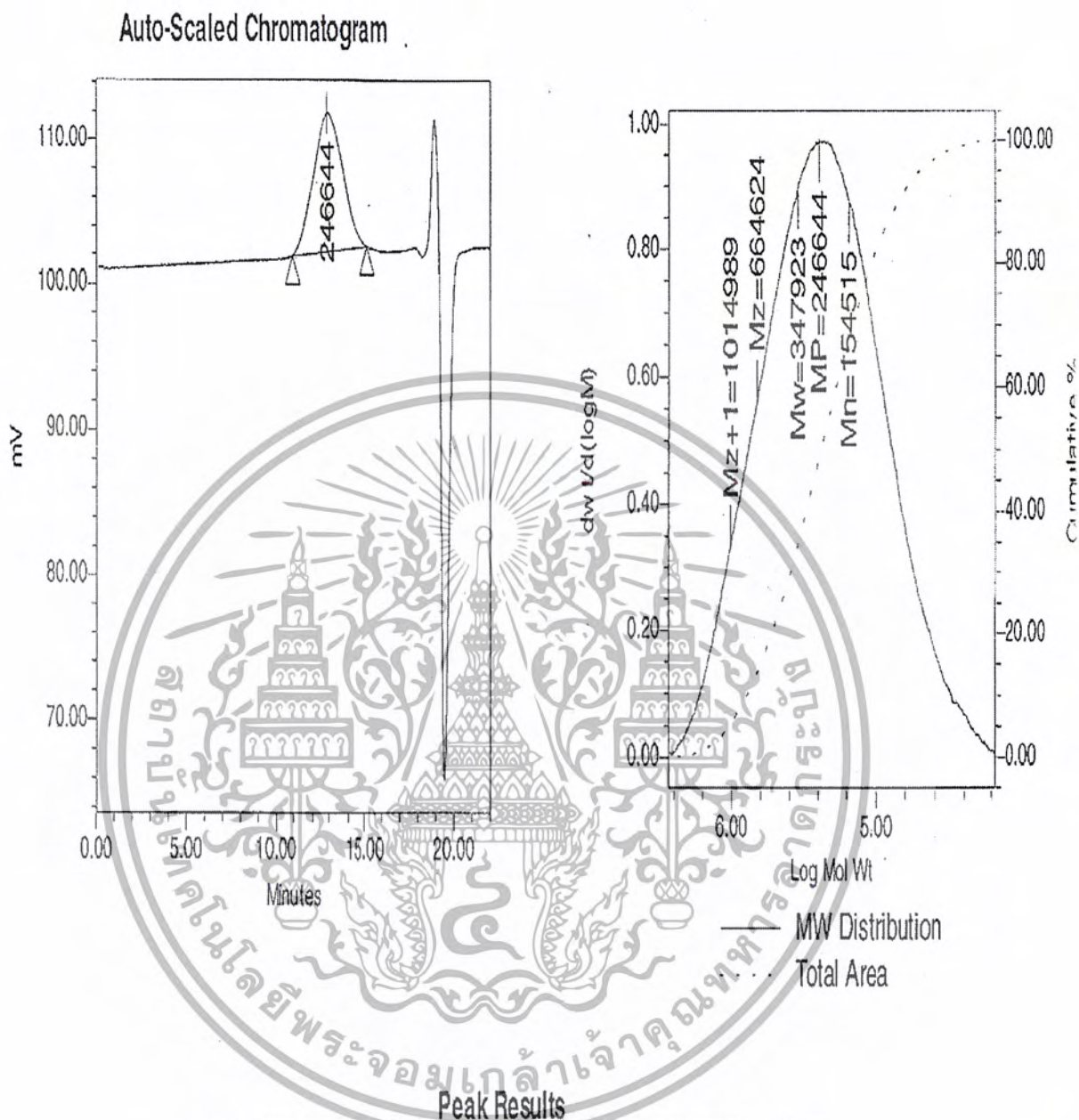
รูปที่ ง-1 โครมาโทแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปurunของ HAp เมื่อใช้ 0.1% BPO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-2 โครมาโทแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปพูนของ HAp เมื่อใช้ 0.5% BPO

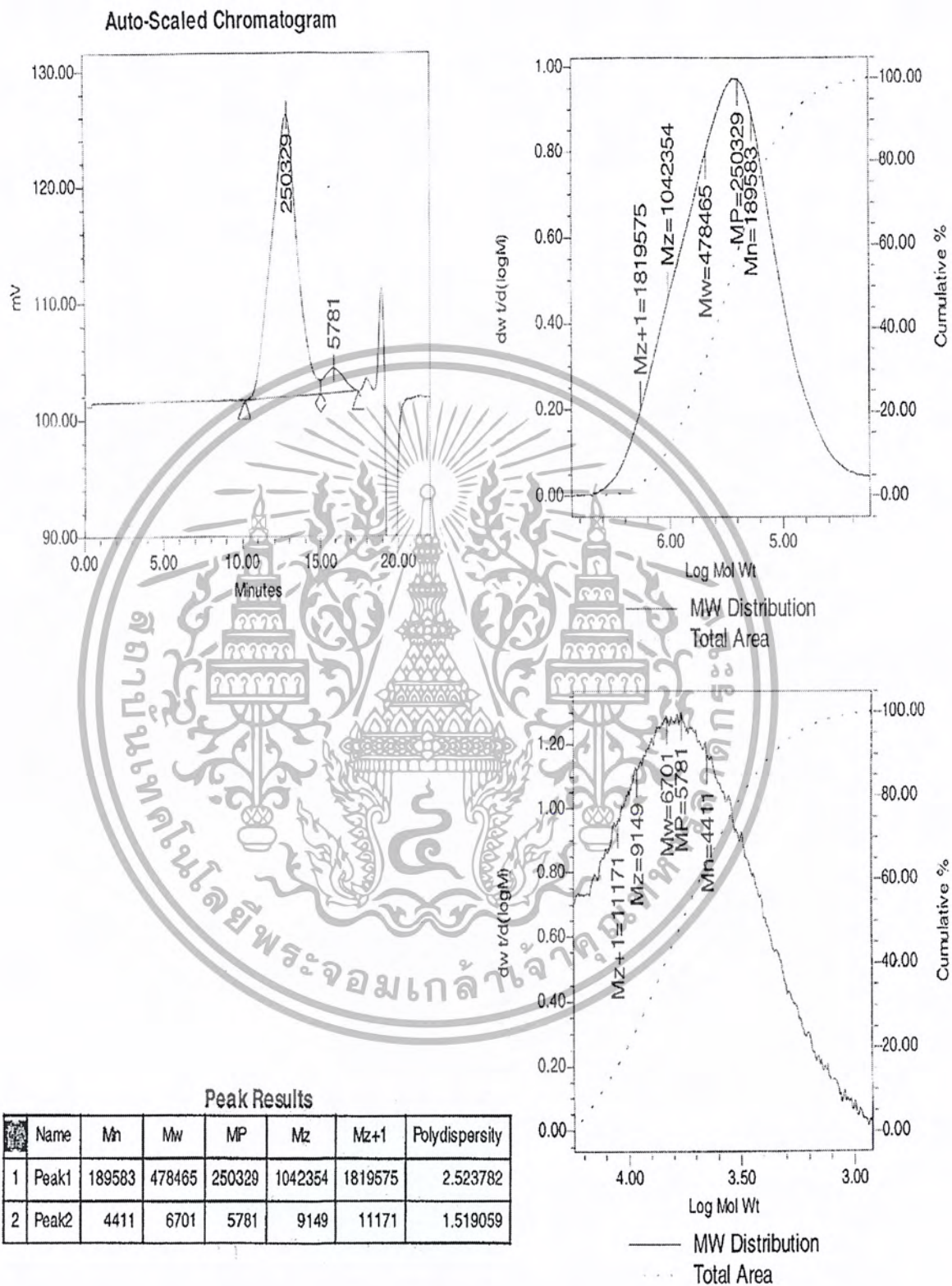
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



	Name	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	Peak1	154515	347923	246644	664624	1014989	2.251704
2	Peak.						

รูปที่ ง-3 โครมาโทแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปพุนของ CS เมื่อใช้ 0.1% BPO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



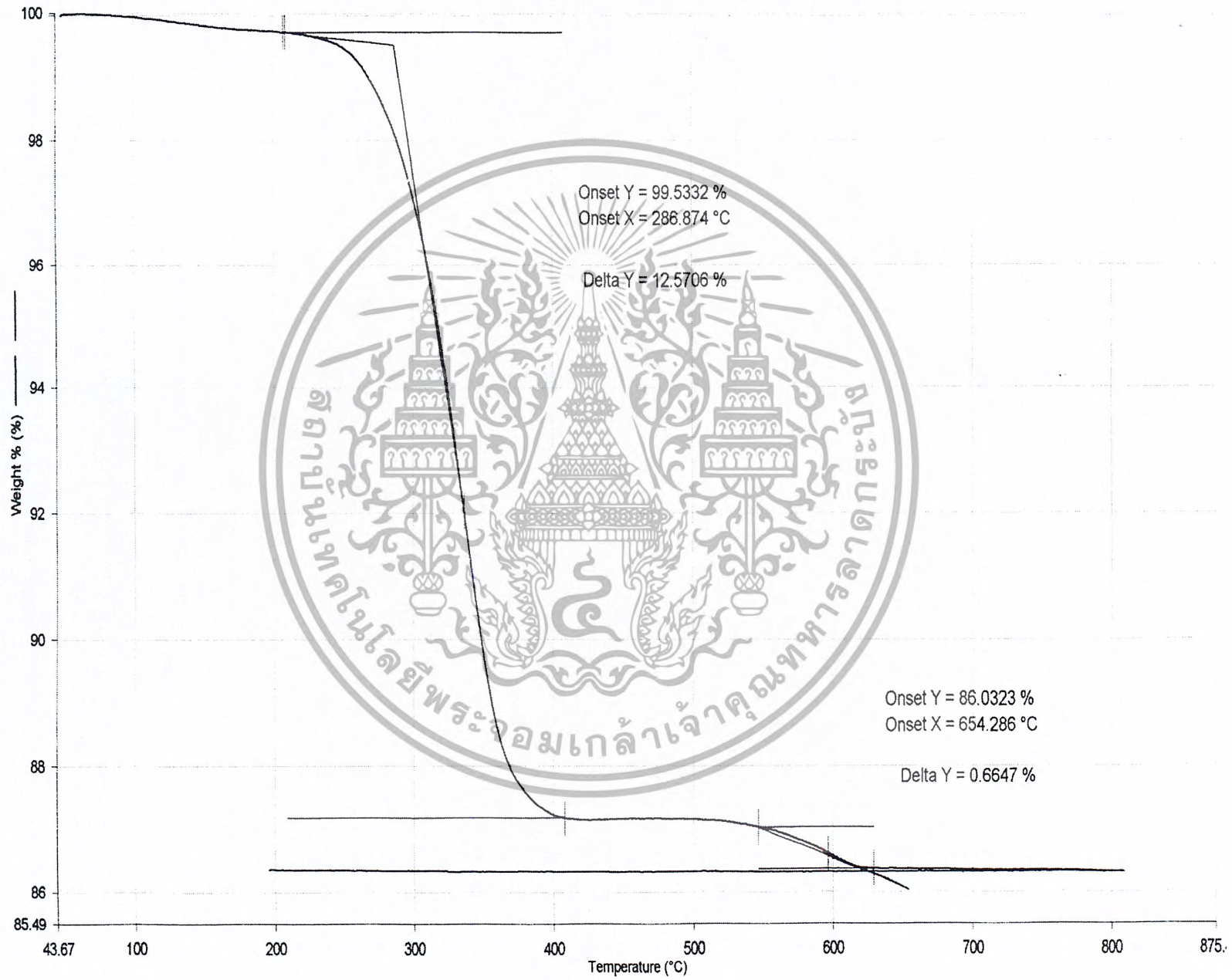
รูปที่ ง-4 โครมาโทแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปฟุนของ CS เมื่อใช้ 0.5% BPO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

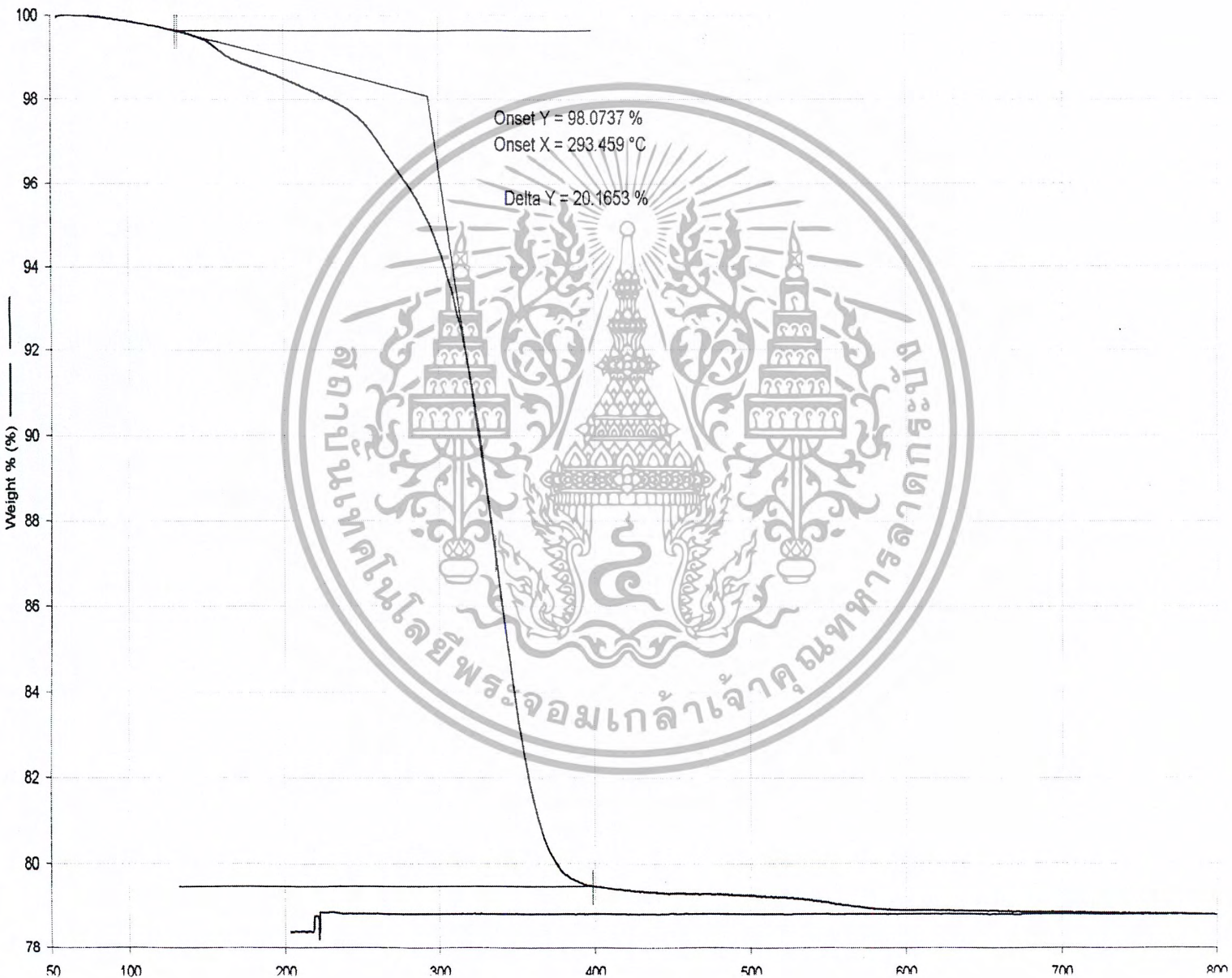


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

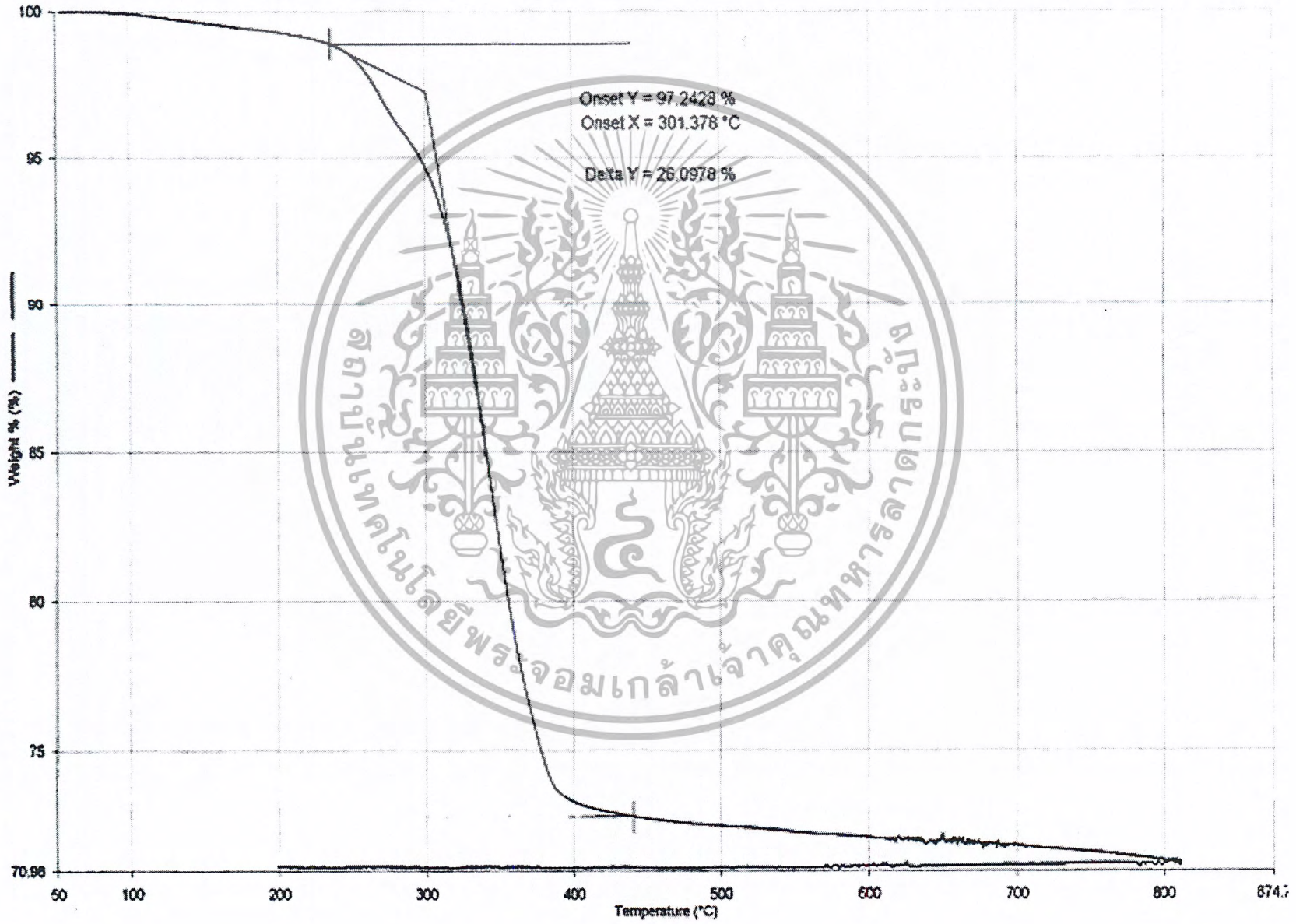
รูปที่ ๑-1 เทอร์โมแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปของ HAP เนื้อ 0.1% BPO



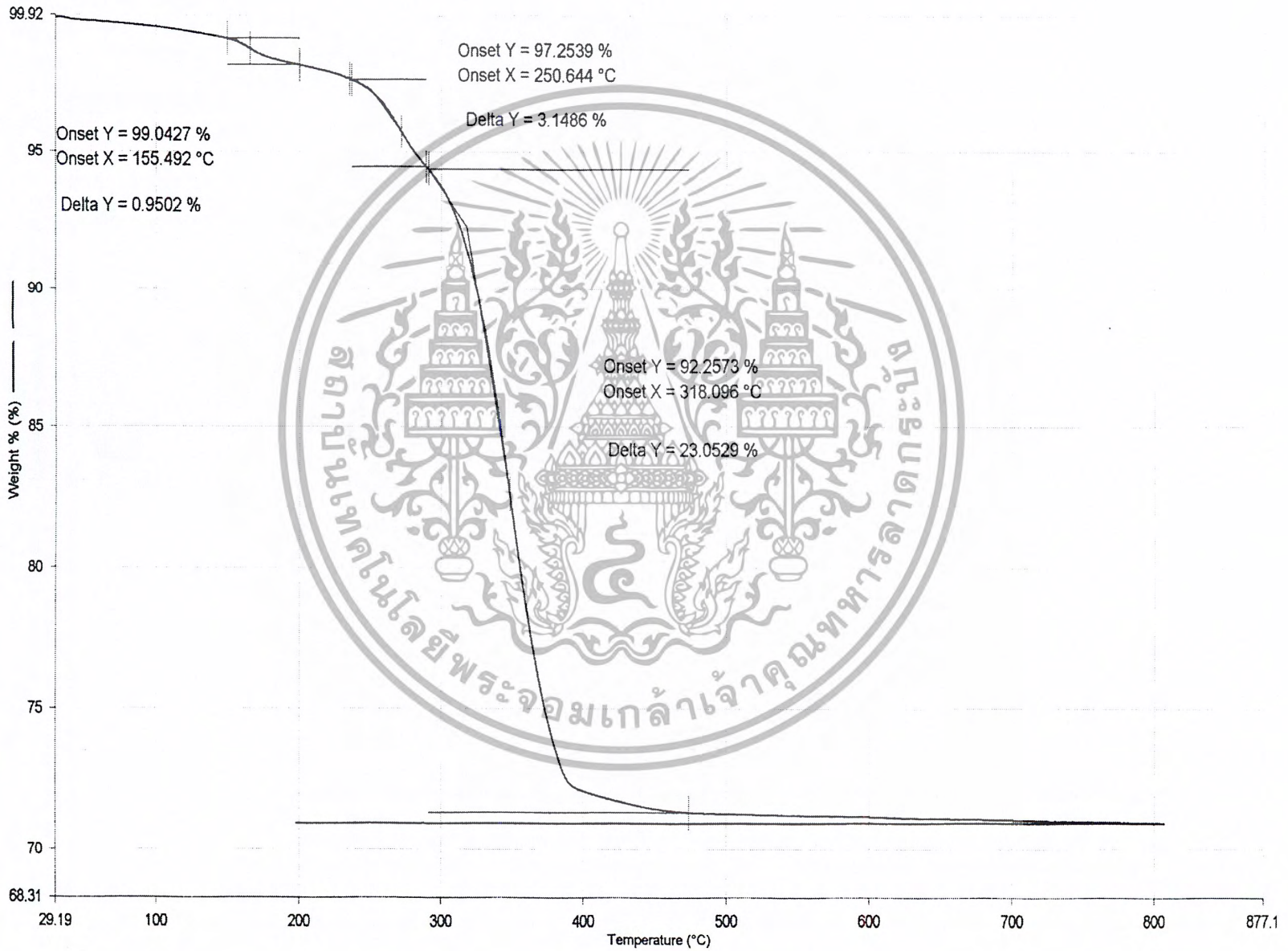
รูปที่ จ-2 เทอร์โมแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปของ HAp เมื่อใช้ 0.5% BPO



รูปที่ ๑-3 เทอร์โมแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปของ CS เมื่อใช้ 0.1% BPO

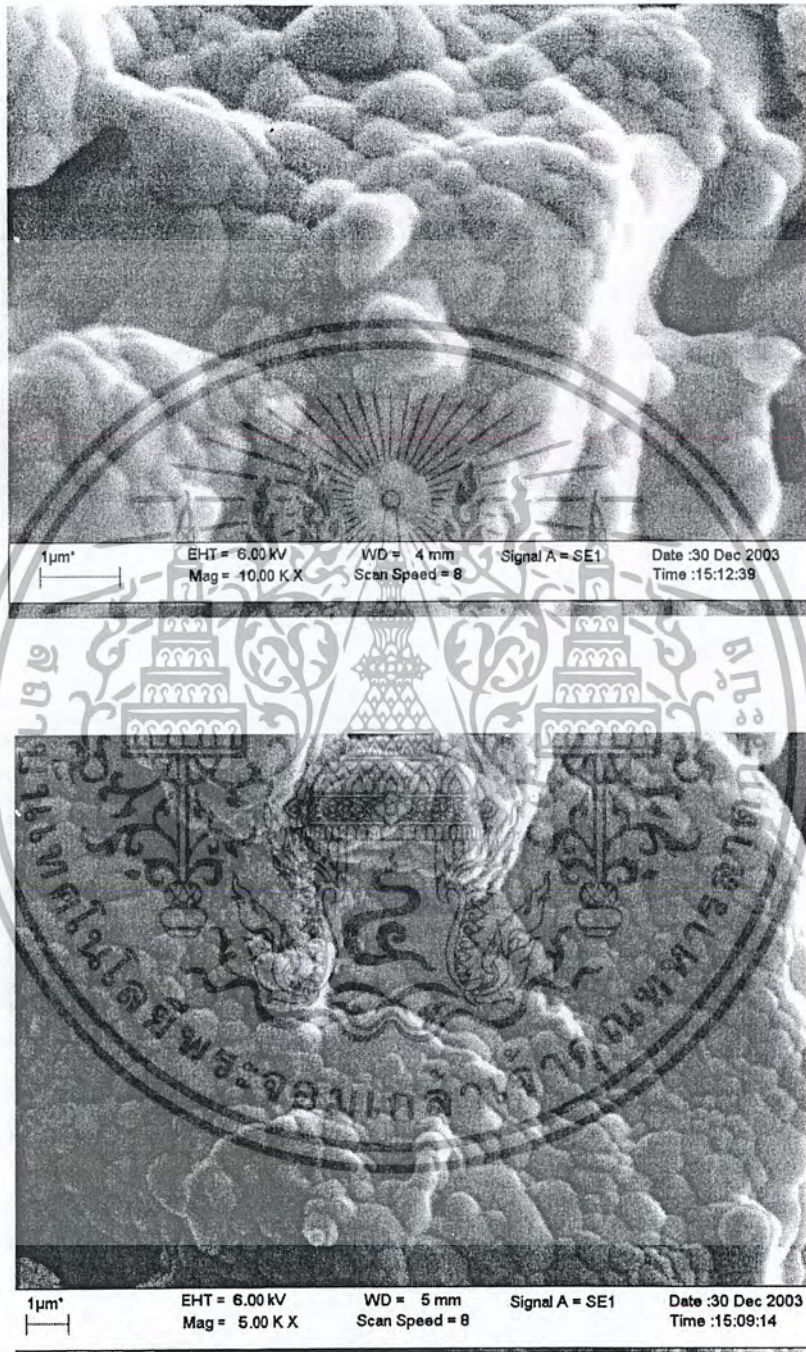


รูปที่ ๑-4 เทอร์โมแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ในรูปของ CS เมื่อใช้ 0.1% BPO



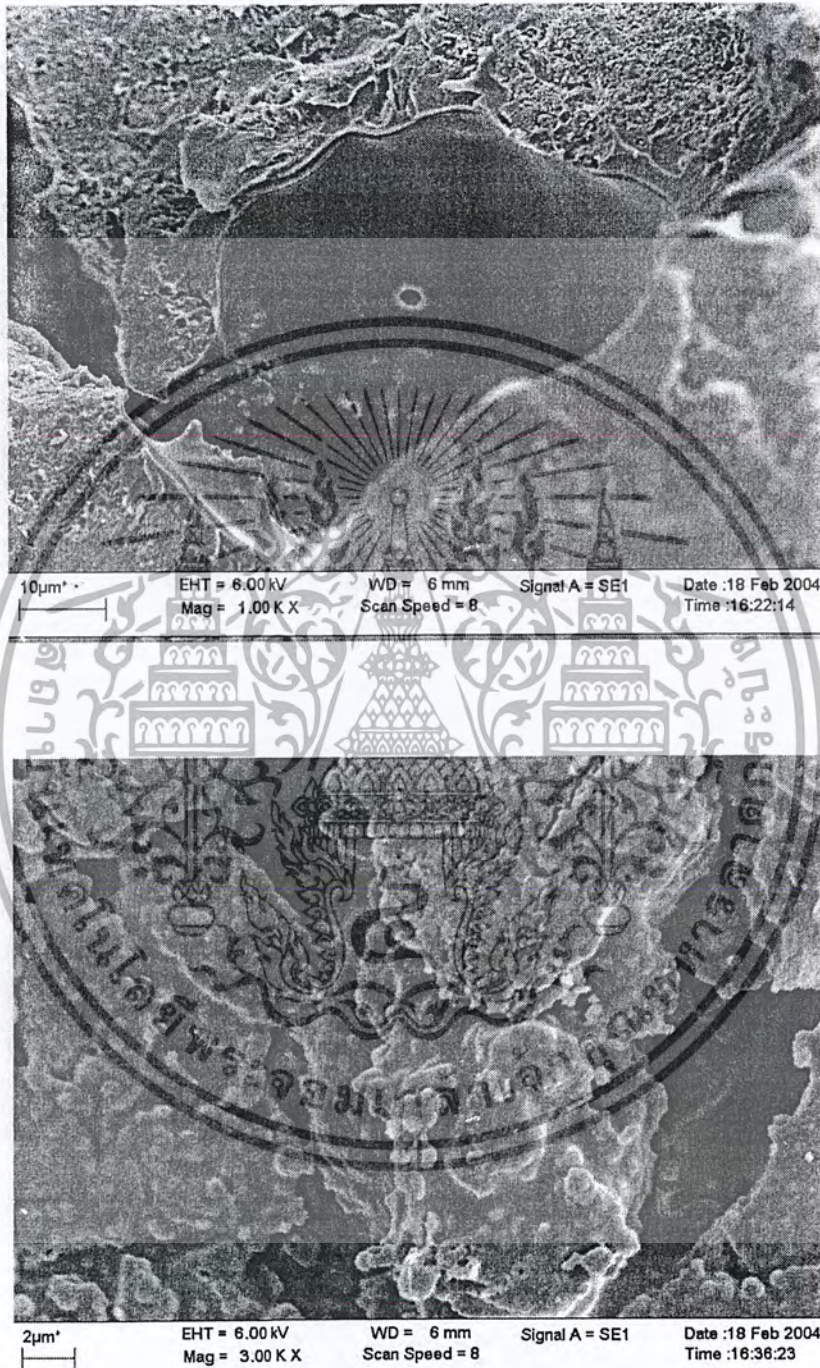


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



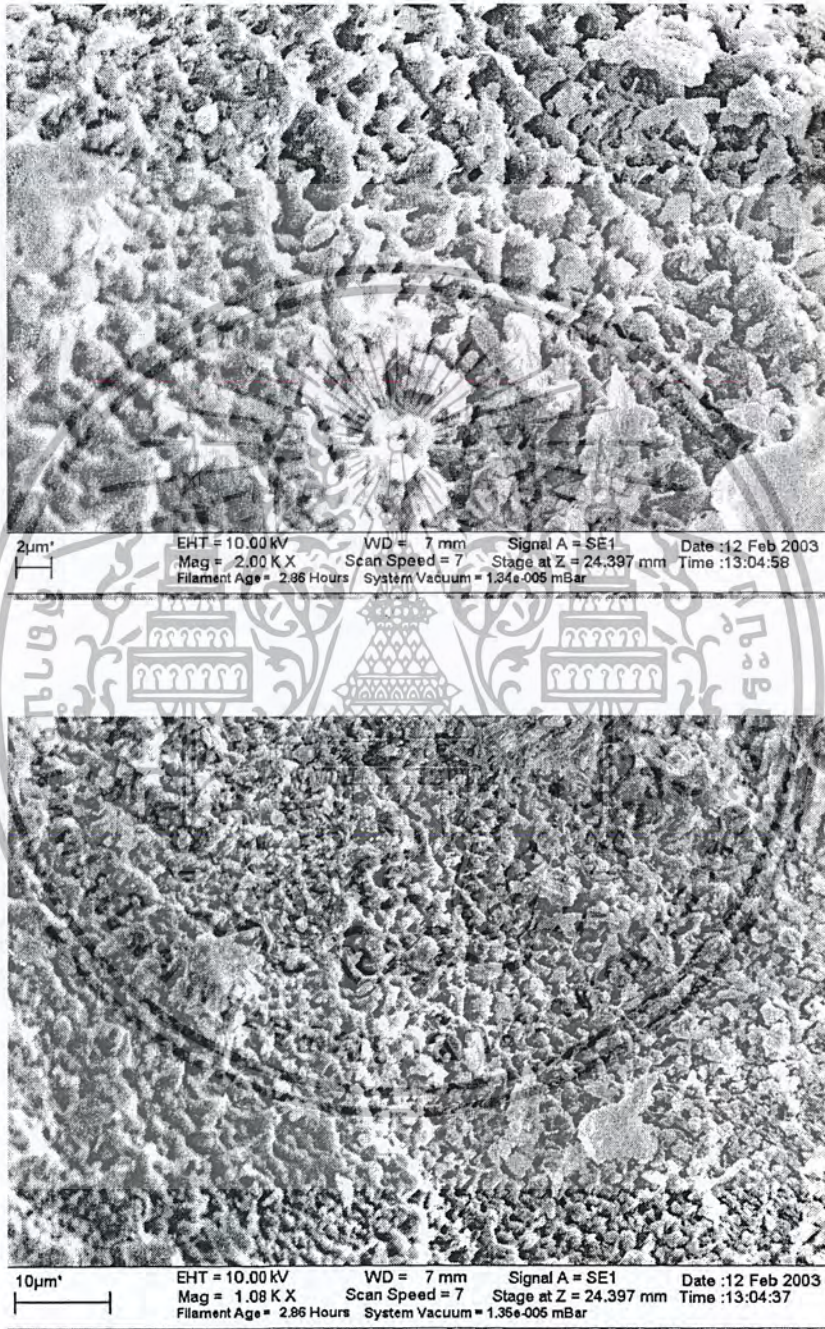
รูปที่ ฉ-1 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของ HAp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



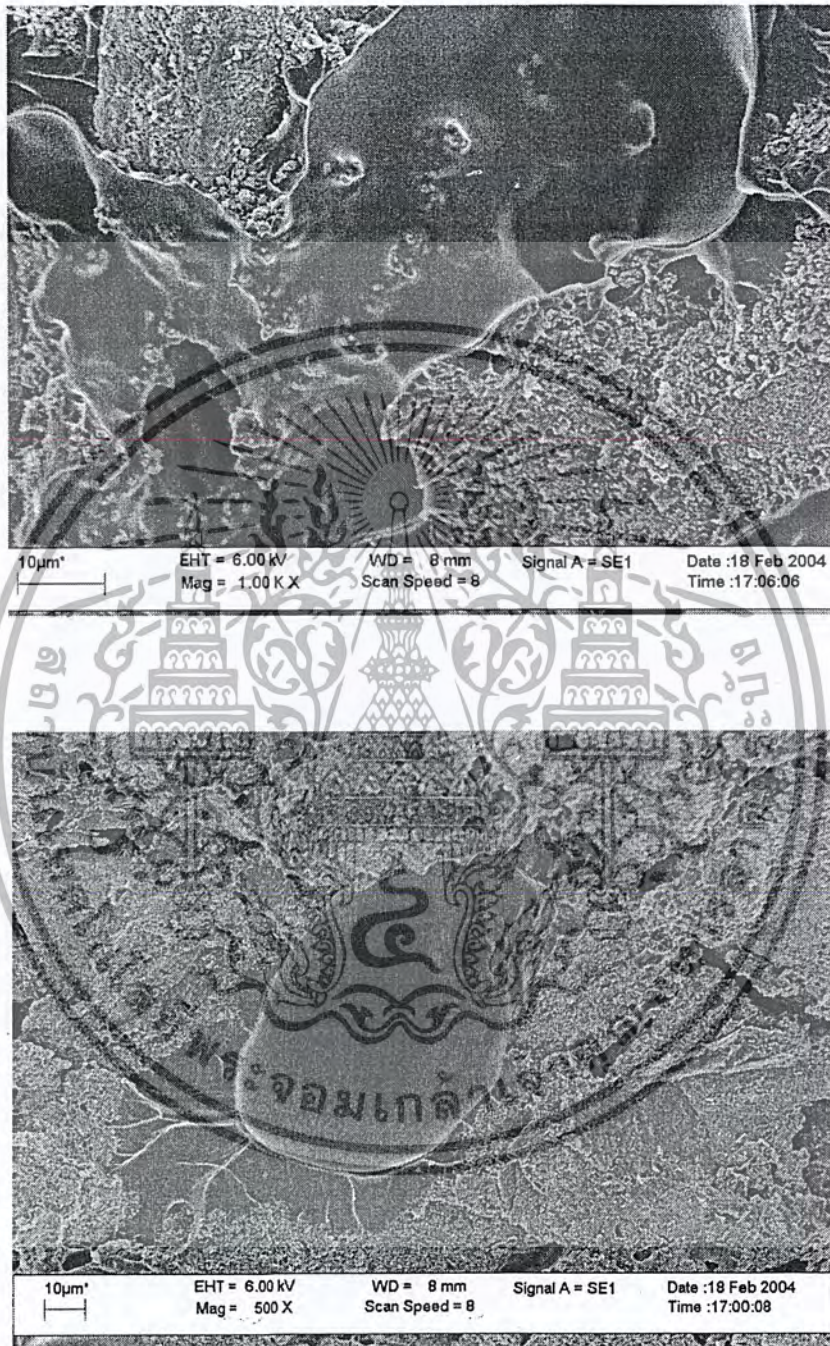
รูปที่ จ-2 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประกอบ HAp/PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓-3 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของ CS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ-4 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุประกอบ CS/PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้