

การเตรียมซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริเลต  
กับแคลเซียมซิติเรตสำหรับงานทางการแพทย์

ก



นางสาวศิริพร และสาตี

นางสาวอรรวรรณ จันทร์คำ

รพ.  
๕๔๖๓๗  
๒๕๔๗

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

62141

31 ก.ค. 2549

b.....  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation PMMA/CS Cements for Medical Applications



Siriporn Leahsalee

Orawan Chankam

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

Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การเตรียมซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกต  
(PMMA/CS) สำหรับงานทางการแพทย์

นักศึกษา

นางสาวศิริพร และสาลี  
นางสาวอรรวรรณ จันทร์คำ

ภาควิชา

เคมี

สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2547

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน  
ผศ.ดร. ภัทรารุช มนต์วิเศษ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด	
กรรมการ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย	
กรรมการ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน	

.....  
(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิติเกต (PMMA/CS) สำหรับงานทางการแพทย์		
นักศึกษา	นางสาวศิริพร	และสาตี	44050127
	นางสาวอรรณณ	จันทร์คำ	44050147
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2547		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปทุมมา	ศิริพันธ์์โนน	
	ผศ.ดร.ภัทราวุธ	มนต์วิเศษ	

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริเลต/แคลเซียมซิติเกต (PMMA/CS) สำหรับประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมซีเมนต์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ วัสดุของเหลวคือมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) และเอ็น, เอ็น-4-ไดเมทิลโทลูอิดีน (DMT) และวัสดุของแข็งคือพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) แคลเซียมซิติเกต (CS) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) โดยกำหนดให้ปริมาณของ MMA DMT และ BPO ในทุกสูตรผสมคงที่ แต่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง PMMA:CS ในวัสดุของแข็งในช่วง 1:9 ถึง 10:0 โดยน้ำหนัก เมื่อสารตั้งต้นทั้งสองส่วนถูกผสมให้เข้ากันดี MMA จะปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิห้องทำให้ซีเมนต์เซตตัวคงรูป จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของก๊อนซีเมนต์ พบว่า สูตรที่ใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง PMMA:CS เป็น 3:7 และ 4:6 มีการกระจายตัวของอนุภาค CS ใน PMMA เมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากซีเมนต์ทั้งสองสูตรมีการผสมเข้ากันของสารตั้งต้นได้ดีที่สุด ดังนั้นสมบัติด้านความแข็งแรงกด ณ จุดเสียดสภาพ (Compressive strength at yield) และค่ามอดุลัส ณ จุดเสียดสภาพ (Modulus at yield) ของซีเมนต์ทั้งสองสูตรนี้จึงมีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้ปริมาณ CS ในส่วนผสมของซีเมนต์ลดลงจะเป็นผลให้ความหนาแน่น ค่าความแข็งแรงกด และค่ามอดุลัส ณ จุดเสียดสภาพของก๊อนซีเมนต์ลดลง แต่ค่าอัตราการคายความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาการเซตตัวของซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Preparation PMMA/CS Cements for Medical Applications		
<b>Name</b>	Miss Siriporn Lehsalee	44050127	
	Miss Orawan Chankam	44050147	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science		
<b>Program</b>	Industrial Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2004		
<b>Special Project Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Punnama Siripunnon		
<b>Special Project Co-advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Pathavuth Monvisade		

### ABSTRACT

This special project studied on preparation of poly (methyl methacrylate)-calcium silicate (PMMA/CS) for medical applications. Starting materials consisted of two main components which were liquid phases ,i.e., methyl methacrylate monomer (MMA) and N,N-4-dimethyltoluidene (DMT) activator and solid phases ,i.e., poly (methyl methacrylate) (PMMA), calcium silicate (CS) and benzoyl peroxide (BPO). The amounts of MMA, DMT and BPO as well as their ratios were fixed for all formula of the cements. The ratios of PMMA:CS were varied between 1:9 and 10:0 by weight. After well mixing the MMA was polymerized at ambient temperature resulting in cement shaping. From the morphological study, the cement with the PMMS:CS ratios of 3:7 and 4:6 showed well dispersion of CS particles in PMMA matrix. Comparatively , these two formula cements gave the significant high values of compressive strength and modulus at yield. Furthermore, the decrease of CS in cements resulted in the declination of density, compressive strength and modulus at yield whereas exothermic rate and maximum temperature causing from PMMA polymerization reaction during curing process increased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือ ความร่วมมือตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่กรุณาแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนกรุณาตรวจทาน แก้ไข โครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย รศ.ดร. อธิพิล แจ่มชัด อาจารย์คณะกรรมการที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และ ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พัทณี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค NMR

ขอขอบพระคุณครอบครัวอันเป็นที่รักที่ให้การกำลังใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษขอความขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ศิริพร และสาตี

อรวรรณ จันทร์คำ

## 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 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 แคลเซียมซิติเกต	3
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิติเกต	3
2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ	3
2.1.3 สมบัติเด่นของแคลเซียมซิติเกต	3
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิติเกต	3
2.1.5 การสังเคราะห์แคลเซียมซิติเกต	4
2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต	4
2.2.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระ	6
2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์	9
2.3 วัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ	10
2.3.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	18
3.1 สารเคมี	18
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	20
3.3 การสังเคราะห์แคลเซียมซิติเกต	22
3.4 การสกัดด้วยขี้เถ้าจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต	24
3.5 การสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย	26
3.6 การเตรียมซีเมนต์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิติเกต	27
3.6.1 การเตรียมแม่แบบซิลิโคน	27
3.6.2 การเตรียมซีเมนต์เฟสท์	27
3.6.2.1 วิธีการผสมซีเมนต์เฟสท์	28
3.6.2.2 การขึ้นรูป	29
3.7 การวัดอุณหภูมิของซีเมนต์เฟสท์	29
3.8 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์	29
3.8.1 การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลือ	29
3.8.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	29
3.8.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	29
3.8.4 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GPC	30
3.9 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกดของซีเมนต์	30
3.10 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพในระบบจำลองของร่างกาย	30
3.10.1 การเตรียมสารละลายที่มีองค์ประกอบความเข้มข้นของไอออนอินทรีย์และค่าความเป็นกรด-เบส ใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์	30
3.10.2 การศึกษาการเติบโตของชั้นแอปพาไทต์	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	32
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมซิติเกตที่สังเคราะห์ได้	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในวงกว้าง การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ซิเมนต์ PMMA/CS	32
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์	32
4.3.2 ความหนาแน่นของซีเมนต์ PMMA/CS	36
4.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ PMMA/CS	36
4.3.4 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค TGA	39
4.3.5 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค NMR	40
4.3.6 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล PMMA ในซีเมนต์ PMMA/CS ด้วยเทคนิค GPC	45
4.3.7 ผลการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์	48
4.3.8 ผลการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ โดยการแช่ ในสารละลาย SBF	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของ CS จากฐานข้อมูล JCPDS	55
ภาคผนวก ข โครมาโทแกรมจากเครื่อง GPC	57
ภาคผนวก ค ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SEM	69
ภาคผนวก ง ความหนาแน่นของซีเมนต์	80
ภาคผนวก จ สมบัติความแข็งแรงกด ณ จุดเสียสภาพและมอดูลัส ณ จุดเสียสภาพ	82
ภาคผนวก ฉ เทอร์โมแกรมจากเครื่อง TGA	91
ภาคผนวก ช นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรา	97
ภาคผนวก ซ อุณหภูมิในการแข็งตัวของซีเมนต์	103
ภาคผนวก ฌ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SEM แสดงการเกิดขึ้น HAp	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	วัสดุชีวภาพที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน	11
ตารางที่ 2.2	สมบัติเชิงกลของกระดูกและวัสดุชีวภาพเพื่อใช้ทดแทนข้อต่อ	11
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบของวัสดุของแข็ง	16
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนองค์ประกอบของซีเมนต์เฟสท์	28
ตารางที่ 3.2	สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SBF	30
ตารางที่ 3.3	ความเข้มข้นของไอออนอินทรีย์ในสารละลาย SBF และ Human Blood Plasma	31
ตารางที่ 4.1	อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ ของ CS ที่สังเคราะห์ได้	32
ตารางที่ 4.2	ปริมาณ PMMA และ CS ที่มีอยู่ในก้อนซีเมนต์ PMMA/CS	39
ตารางที่ 4.3	ค่าแสดงผลวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิค NMR	43
ตารางที่ 4.4	น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในซีเมนต์	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิติเลต	23
รูปที่ 3.2 แผนงานการสกัดตัวยั้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต	25
รูปที่ 3.3 รูปแม่แบบซิติโคน	27
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้ภายหลังการแคลไซต์ที่ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	33
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการกระจายของ CS ในซีเมนต์ PMMA/CS	35
รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ PMMA/CS	37
รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงกด ณ จุดเสถียรภาพของซีเมนต์ PMMA/CS	37
รูปที่ 4.5 ค่ามอดูลัส ณ จุดเสถียรภาพของซีเมนต์ PMMA/CS	38
รูปที่ 4.6 สเปกตรัม <sup>1</sup> H-NMR ของ พอลิเมทิลเมทาคริเลตในซีเมนต์สูตร 4	41
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของซีเมนต์ระหว่างการแข็งตัว	48
รูปที่ 4.8 อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของซีเมนต์	49
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการเกิดชั้นแอปาทิต	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในปัจจุบันวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้ก้าวหน้าไปไกล จนสามารถหาวิธีการใหม่ๆ เพื่อรักษาหรือพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยให้ดียิ่งขึ้น ด้วยการหาสิ่งทดแทนส่วนต่างๆ ที่ร่างกายสูญเสียไปหรือไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ ถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อใช้แทนที่การรักษาโดยวิธีการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะจากเนื้อเยื่อธรรมชาติ (Transplantation) ซึ่งเป็นการผ่าตัดเอาเนื้อเยื่อหรืออวัยวะเดิมที่มีข้อบกพร่องออกแล้วแทนที่ด้วยอวัยวะใหม่ ซึ่งได้จากตัวผู้ป่วยเองหรือจากผู้บริจาค หรือทำการเปลี่ยนถ่ายจากวัสดุสังเคราะห์

สำหรับผู้ป่วยที่ร่างกายไม่ได้รับความเสียหายมากและยังสามารถใช้อวัยวะเดิมของตนเองได้ก็ไม่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ เพียงแต่ทำการซ่อมแซมส่วนที่ได้รับความเสียหาย เช่น ทำการเชื่อมกระดูกแทนการเปลี่ยนกระดูก ก็สามารถทำให้อวัยวะนั้นกลับมาใช้งานได้เหมือนเดิม ซึ่งในการเชื่อมกระดูกนั้น วัสดุที่นำมาใช้ควรมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดและมีสมบัติในการยึดติดที่ดี ซึ่งก็คือซีเมนต์นั่นเอง ดังนั้นซีเมนต์จึงถูกนำมาใช้สำหรับซ่อมแซมส่วนที่บกพร่องและทำหน้าที่เสมือนเป็นกาวยึดกระดูกเพื่อให้ความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้อาจใช้ในการอุดหรือซ่อมแซมรอยแตกที่เกิดขึ้นในกระดูกและฟัน เพื่อป้องกันการแพร่ของรอยแตกและทำให้อวัยวะบริเวณนั้นสามารถกลับมาใช้งานดังเดิม

ประมาณปี ค.ศ. 1961 [1] ศัลยแพทย์ชาวอังกฤษ John Charnley ได้นำซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA Cement) มาใช้ในการยึดติดกระดูกกับกระดูกสะโพกเทียม ตั้งแต่นั้นมาก็ได้มีการนำ PMMA Cement มาใช้ในวงการแพทย์กันอย่างแพร่หลาย แต่ภายหลังพบว่าก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ไม่เกิดการเชื่อมติดกับกระดูก ความแข็งแรงเชิงกลต่ำ เกิดความร้อนสูงขณะแข็งตัวเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและก่อให้เกิดอาการแพ้ เป็นต้น จึงได้มีการพัฒนามาเป็นซีเมนต์เชื่อมกระดูกที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive Bone Cement) ซึ่งมีข้อดีคือสามารถเกิดการเชื่อมติดกันกับเนื้อเยื่อของกระดูกได้ เมื่อแข็งตัวพบว่ามี การคายความร้อนต่ำกว่า และมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีกว่า PMMA Cement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมซิลิเกต หรือ Wollastonite มีการศึกษาวิจัยระบุว่า มีความว่องไวทางชีวภาพสูง สามารถกระตุ้นให้มีการก่อตัวของเนื้อเยื่อกระดูกใหม่ในรูปของไฮดรอกซีแอปพาไทต์ได้ในสภาพจำลองของร่างกายมนุษย์ [2] ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกและฟันในลักษณะที่เป็นวัสดุประกอบระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตและแคลเซียมซิลิเกต พร้อมทั้งศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์ที่เตรียมได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมซีเมนต์ในการเชื่อมกระดูกและฟันจากพอลิเมทิลเมทาคริเลต กับแคลเซียมซิลิเกต
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกต

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมซีเมนต์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกต โดยวิธีการผสมด้วยมือที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเริ่มจากการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตด้วยวิธีตกตะกอนร่วมและสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย จากนั้นนำวัตถุดิบที่สังเคราะห์ได้มาเตรียมซีเมนต์ ซึ่งมีอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกตที่แตกต่างกัน เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแคลเซียมซิลิเกตและมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ในระบบซีเมนต์ประกอบด้วยสองวัสดุภาคคือวัสดุภาคของเหลวและวัสดุภาคของแข็ง มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด เมื่อทำการผสมด้วยมือเพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันโดยอาศัยตัวริเริ่มในการทำปฏิกิริยาทำให้ซีเมนต์เกิดการแข็งตัว หลังจากนั้นทำการทดสอบสมบัติความแข็งแรงและพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ แล้วนำซีเมนต์ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติความว่องไวทางชีวภาพในระบบจำลองของร่างกาย

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกและฟันจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกตได้ ด้วยการหาสัดส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมในการเตรียมซีเมนต์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกต
2. ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยจะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 แคลเซียมซิลิเกต (CS)

##### 2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกต [3]

แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate,  $\text{CaSiO}_3$ ) หรือที่เรียกกันว่า Wollastonite สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ และสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ มีสูตรทางเคมีเป็น  $\text{CaSiO}_3$  แร่ดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาของหินปูนซึ่งมีแร่ Calcite ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบกับซิลิกา โดยอาศัยความร้อนจากของเหลวร้อนจากปล่องภูเขาไฟ (Magma) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



แร่ Wollastonite สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ ในปัจจุบันแร่ Wollastonite มีความสำคัญในการผลิตเซรามิกทนความร้อน (Refractory ceramics) และที่ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี

##### 2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

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

##### 2.1.3 สมบัติเด่นของแคลเซียมซิลิเกต

1. แคลเซียมซิลิเกตมีความเหนียวมากถึงแม้ว่าจะสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก แต่ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นในระหว่างการนำไปใช้งานหรือหลังจากผ่านกระบวนการผลิตแล้ว

2. แคลเซียมซิลิเกตมีค่าความเป็นกรด่างสูง

##### 2.1.4 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกตใช้เป็นหินตกแต่งเพื่อความสวยงาม และมีการนำแคลเซียมซิลิเกตไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการนำแคลเซียมซิลิเกตมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์อีกด้วย โดยมีการนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมซิติลิกเกิดมาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมในร่างกายมนุษย์เพื่อทดแทนอวัยวะที่สูญเสียไป

### 2.1.5 การสังเคราะห์แคลเซียมซิติลิก

แคลเซียมซิติลิกเกิดมักจะสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของสารประกอบโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโลหะเป็นแคโทดไอออนและออกซิเจนเป็นแอนไอออน

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์โดยทั่วไป ได้แก่

1. การสังเคราะห์แคลเซียมซิติลิกโดยการทำปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [4-5]  
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ส่วนมากจะเป็นพวกออกไซด์ผสม สิ่งที่กำหนดโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ขนาดของอะตอม สถานะออกซิเดชัน
2. การสังเคราะห์แคลเซียมซิติลิกโดยเทคนิคโซลเจล (Sol-gel synthesis) [6]  
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ส่วนมากจะได้เป็นสารประกอบพวกออกไซด์ผสม ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) สารตั้งต้นที่นิยมใช้คือสารจำพวกโลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) ซึ่งอาจใช้หนึ่งชนิดหรือมากกว่าก็ได้
3. การสังเคราะห์แคลเซียมซิติลิกโดยการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) [7]  
เทคนิคการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมวิธีหนึ่งที่ได้ผงเซรามิกส์ที่มีคุณภาพ ทำโดยนำสารละลายที่มีแคโทดไอออนของสารที่ต้องการตกตะกอนร่วมกันไปผสมกับสารช่วยตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ตะกอนร่วมของสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น

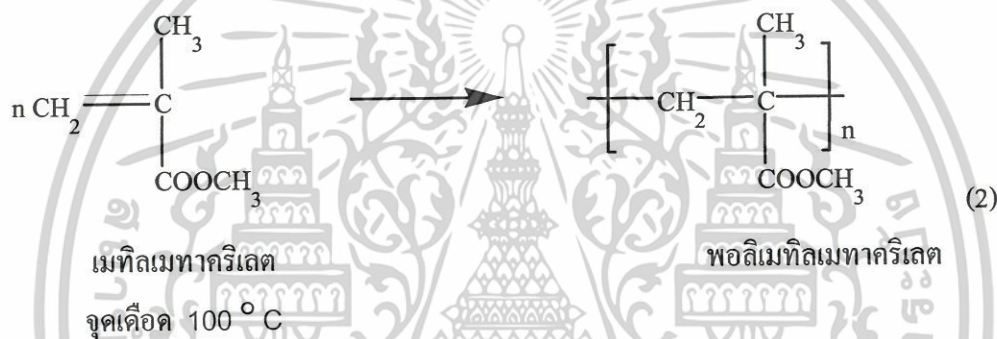
## 2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA)

ในปี 1932 Rohm และ Bauer ได้ทำการผลิตแผ่นใสจากการพอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate, MMA) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methylmethacrylate), PMMA) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลแบบอะแทคติก (Atactic) ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบจึงทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous polymer) มีสมบัติโปร่งใส (ความโปร่งใส 92% เท่ากับแก้ว ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์) มีความมันเงาสูง ค่าดัชนีการหักเหแสง 1.49 แข็งแต่เปราะ มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) เท่ากับ 105 องศาเซลเซียส พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความทนทานต่อสภาวะอากาศสูง ดูดซึมน้ำได้ต่ำ สึกกร่อนยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี แต่มีความต้านทานต่อสารเคมีต่ำ ในการขึ้นรูปพอลิเมทิลเมทาคริเลตอาจมีการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยการเติมสารเติมแต่ง เช่น สี (Pigments) สารหน่วงไฟ (Flame retardant) สารดูดซับรังสียูวี (UV absorbents) [8]

การสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมหรือแบบลูกโซ่ (Addition or Chain Polymerization) ที่เกิดจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) ซึ่งโดยทั่วไปเกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



เนื่องจากสมบัติทางแสงดีเยี่ยม มีความต้านทานต่อสภาวะอากาศ น้ำหนักเบา ทนทานต่อแรงกระแทก มีเสถียรภาพทางรูปร่างดี ทนต่อความร้อนและง่ายต่อการขึ้นรูป ทำให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

พอลิเมทิลเมทาคริเลตเกรดที่ใช้ทางการแพทย์นั้นมีผลต่อร่างกายเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามในการใช้งานไม่ควรมียอนอเมอร์เหลืออยู่ เนื่องจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตอาจก่อให้เกิดอาการแพ้และอาการข้างเคียง พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นที่นิยมใช้ในทางการแพทย์เนื่องจากก่อให้เกิดการตอบสนองต่อภูมิคุ้มกันในร่างกายต่ำ ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในร่างกายของนักบิน ซึ่งพบว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีความเฉื่อยต่อเนื้อเยื่อในร่างกายสูง เคลื่อนย้ายไปยังส่วนอื่นของร่างกายได้ยาก และไม่สามารถสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ จึงทำให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตคงอยู่ในร่างกายตลอดชีวิต

ปัจจุบันได้มีการนำเอาพอลิเมทิลเมทาคริเลตไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย รวมทั้งนำมาใช้งานทางด้านชีวภาพ เช่น ซีเมนต์ยึดกระดูก วัสดุในการอุดฟัน และคอนแทกเลนส์ชนิดอ่อนและแข็งเนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีคุณสมบัติทางแสงดีเยี่ยมและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทำให้สามารถใช้แทนที่กระจกตาของผู้ป่วยโรคต้อกระจกได้ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระ

พอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่มีกระบวนการหลักอยู่ 3 ขั้น คือ

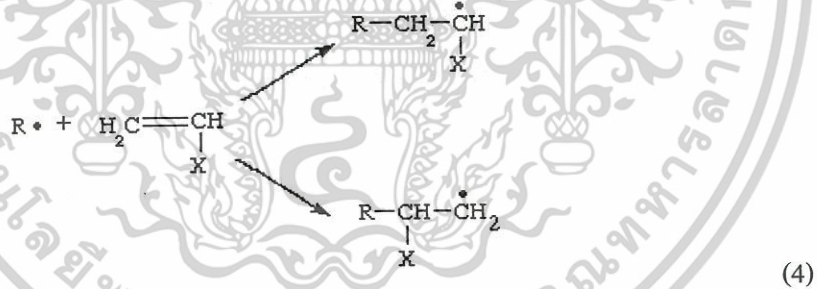
#### 1. ขั้นเริ่มต้นสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain-initiation)

เป็นกระบวนการเกิดหมู่ที่ว่องไว (Active site) หรืออนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม จากนั้นอนุมูลอิสระของตัวริเริ่มจะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์เกิดอนุมูลอิสระใหม่เป็นการตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์

การเกิดอนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม

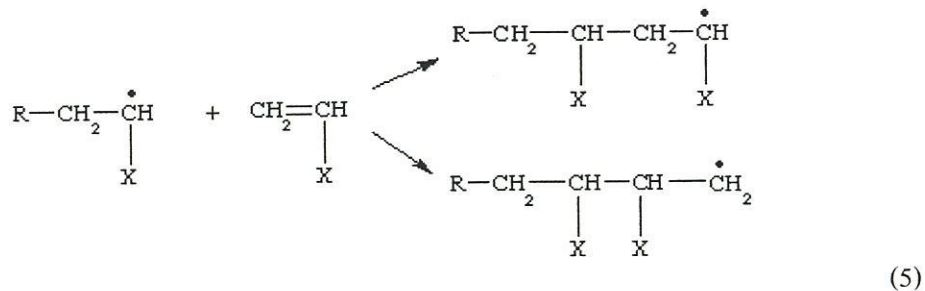


อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์



#### 2. ขั้นแผ่ขยายสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain-propagation)

เป็นกระบวนการที่อนุมูลอิสระที่เป็นตัวตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โมเลกุลที่สอง สาม สี่ ไปเรื่อยๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสายโซ่พอลิเมอร์ที่ว่องไวนั้นดึงไฮโดรเจนอะตอมจากโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่ว่องไว และโมเลกุลที่สูญเสียอะตอมไฮโดรเจนไปนั้นจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ที่พร้อมจะเริ่มค้นสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ต่อไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การย้ายสายโซ่ (Chain transfer) โมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมให้กับพอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตนั้นอาจเป็นมอนอเมอร์ตัวทำละลาย หรือสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์อื่น กระบวนการนี้ไม่ทำให้จำนวนอนุมูลอิสระในขณะนั้นเปลี่ยนแปลงแต่ทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวสายโซ่ (Average chain length) ของพอลิเมอร์ลดลง ถ้าโมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมนั้นเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์โซ่อื่นอาจทำให้เกิดโซ่กิ่ง

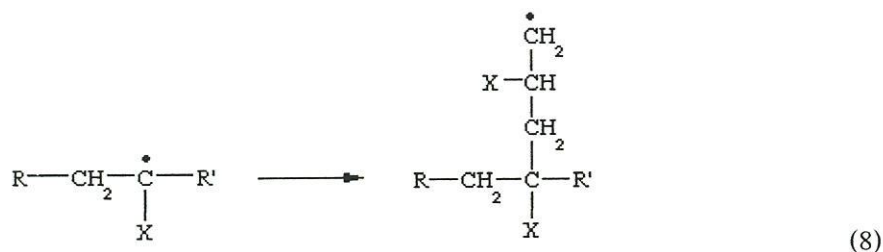
การขยายสายโซ่ตามปกติ



การขยายสายโซ่เมื่อมีการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอมเกิดขึ้น



ถ้าตำแหน่งของไฮโดรเจนที่ถูกดึงอยู่ในสายโซ่จะก่อให้เกิดกิ่งสาขา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Chain-termination)

อนุมูลอิสระบนพอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตจะสิ้นสุดหรือหยุดแผ่ขยายได้มีหลายกรณี

กรณีที่ 1 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม ปฏิกิริยานี้ไม่ดี เพราะทำให้อัตราเร็วของขั้นริเริ่มสายโซ่ลดลง



กรณีที่ 2 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ 2 สายโซ่มาทำปฏิกิริยากัน แบ่งเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. รวมกัน (Combination) ปฏิกิริยาสิ้นสุดแบบรวมกันนี้เกิดอนุมูลิต่ำและจะพบพอลิเมอร์ที่เกิดพันธะแบบ Head to head สายโซ่พอลิเมอร์ที่สิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น



ข. เกิดการถ่ายโอนอะตอมปกติ คือไฮโดรเจนจากอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์หนึ่งไปยังอนุมูลอิสระของอีกพอลิเมอร์หนึ่ง พอลิเมอร์ที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมจะเกิดปลายโซ่ที่มีพันธะคู่ สายโซ่พอลิเมอร์ที่รับไฮโดรเจนอะตอมจะเกิดปลายโซ่อิ่มตัว เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Disproportionation ในกรณีสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้ส่วนมากเกิดที่อนุมูลิต่าง น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเป็นครึ่งหนึ่งของการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมตัว



มอนอเมอร์สำหรับพอลิเมอร์เชิงเส้นด้วยอนุมูลอิสระ

พอลิเมอร์เชิงเส้นด้วยอนุมูลอิสระส่วนใหญ่เกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ เรียกว่า ไวนิล

มอนอเมอร์ (Vinyl monomer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กลไกสำหรับการเกิดอนุมูลอิสระ

การเกิดอนุมูลอิสระอาจเกิดจากตัวริเริ่มหรือจากพันธะคู่ของมอนอเมอร์เอง โดยกลไกที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระมีหลายประเภท เช่น ความร้อนสามารถทำให้ตัวริเริ่มแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Thermal initiation of initiator) หรือทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนพันธะคู่ของมอนอเมอร์ (Direct thermal initiation of monomer) หรือใช้แสงในการทำให้ตัวริเริ่มแตกตัว (Photo-initiation of initiator)

### ตัวริเริ่มสำหรับพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

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

#### 2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์ [10]

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยทั่วไป แบ่งเป็น 4 เทคนิค ได้แก่

##### 1. เทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization)

เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุด โดยการทำให้สังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์และตัวริเริ่ม เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความหนืดของระบบอาจเพิ่มขึ้นถึง  $10^4$  เท่า เมื่อเทียบกับความหนืดของมอนอเมอร์ และเกิดการคายความร้อน ไม่นิยมนำไปใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน และพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น

##### 2. เทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization)

การเกิดพอลิเมอร์โดยเทคนิคแบบสารละลายนี้ สามารถแก้ปัญหาของเทคนิคแบบบัลค์ได้ เนื่องจากตัวทำละลายจะทำหน้าที่ระบายและส่งผ่านความร้อนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ตัวทำละลายทำให้ความหนืดลดลง การควบคุมความร้อนทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับแบบบัลค์ แต่การใช้ตัวทำละลายทำให้เกิดปัญหาการถ่ายโอนสายโซ่ และตัวทำละลายยังอาจปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยน

##### 3. เทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension polymerization)

ปัญหาเนื่องจากความเป็นพิษและการติดไฟของตัวทำละลาย จึงได้คิดวิธีที่จะหลีกเลี่ยงตัวทำละลายอินทรีย์ คือวิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย วิธีนี้มอนอเมอร์จะแขวนลอยเป็นหยดเล็กๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-500 ไมโครเมตร (ขนาดใหญ่กว่าเทคนิคอิมัลชัน) ในของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น น้ำ หยคของพอลิเมอร์จะถูกปั่นกวนอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการเกาะกันเป็นก้อน และอาจมีการเติมสารคงสภาพ (Dispersants) ด้วย โดยสารคงสภาพจะละลายปนอยู่ในชั้นน้ำเพื่อป้องกันการเกิดเป็นเจลของพอลิเมอร์

มอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคนี้ควรเกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระและละลายในน้ำได้น้อยมาก พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ คล้ายไข่มุกบางครั้งจึงเรียกวิธีนี้ว่า Pearl polymerization

#### 4. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนามาจากวิธีแบบแขวนลอย ใช้มากในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ วิธีนี้ต่างจากแบบแขวนลอยตรงที่ตัวริเริ่มไม่ละลายในมอนอเมอร์ แต่ละลายในตัวกลาง ซึ่งโดยส่วนใหญ่ คือน้ำ แล้วแพร่เข้าไปในหยดมอนอเมอร์ ขนาดของหยดมอนอเมอร์จะมีขนาดเล็กกว่าแบบแขวนลอย คืออยู่ในช่วง 0.05-5 ไมโครเมตร ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของระบบจะคล้ายน้ำนม อนุภาคในระบบอิมัลชันไม่ตกตะกอนทันทีที่หยุดปั่นกวนเพราะสารก่ออิมัลชันซึ่งอยู่บนผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ จึงเรียกลักษณะของพอลิเมอร์ที่ได้ว่า ลาเท็กซ์ (Latex)

### 2.3 วัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ [11]

ในปัจจุบันนี้ได้นำวัสดุเซรามิกส์มาพัฒนาปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยการนำมาทำเป็นวัสดุคิป์ในการผลิตวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) และอวัยวะเทียม (Implants) เพื่อใช้ทดแทนอวัยวะในร่างกายมนุษย์ เช่น กระดูกโครงสร้าง กระดูกโคนขา วัสดุยึดติดฟันเทียม รากฟันเทียม กระดูกข้อต่อ เป็นต้น ข้อดีของเซรามิกส์ก็คือ เข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อร่างกาย แต่มีข้อเสียคือ เปราะ และสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงวัสดุเซรามิกส์มาทำเป็นวัสดุประกอบ (Composites) กับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงของเซรามิกส์

#### 2.3.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม (Biomaterials and Implants)

วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมคือ วัสดุที่มนุษย์ผลิตขึ้นมาเพื่อทดแทนอวัยวะเดิมของร่างกายซึ่งสูญเสียไปอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุ ความเจ็บป่วย หรือเนื่องมาจากการที่อวัยวะเดิมไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ โดยการนำวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมเข้าไปในร่างกายเพื่อทดแทนอวัยวะนั้นๆ แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่มีการผลิตให้ครอบคลุมกับทุกอวัยวะของร่างกาย วัสดุประเภทนี้สามารถผลิตได้มากมายตามความต้องการ และไม่มีปัญหาด้านคุณภาพของวัสดุ เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการผลิตได้ และมีการทดสอบความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย และการปลดปล่อยสารที่เป็นพิษต่อร่างกายก่อนนำไปใช้งานจริง ถ้าพบว่าวัสดุนั้นไม่เหมาะสมก็สามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุอย่างอื่นแทนได้ ทำให้โอกาสเกิดอาการแทรกซ้อนลดลง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้มีอายุการใช้งานที่จำกัด ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ อีกทั้งไม่สามารถปรับปรุงโครงสร้าง และสมบัติให้เหมาะสมกับสภาวะร่างกายได้ดีใกล้เคียงกับอวัยวะตามธรรมชาติของร่างกาย

วัสดุสังเคราะห์อื่นๆที่นิยมนำมาผลิตอวัยวะเทียม เช่น โลหะปลอดสนิม (Stainless steel), โลหะผสม Ti-Al-V และ Ni-Cr, พอลิอะซิเตด (Polyacetal), ซีเมนต์เมทิลเมทาคริเลต (PMMA-Cement),  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ -TZP เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 วัสดุชีวภาพที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน [12]

โลหะ	เซรามิกส์	พอลิเมอร์
316L สแตนเลสสตีล โครเมียม/โครบอลด์ อัลลอยด์ ไททานเนียม ไททานเนียมชนิด 6A/4V	อะลูมินา เซอร์โคเนียม คาร์บอน ไฮดรอกซีแอปาไทต์	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิยูรีเทน

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของกระดูกและวัสดุชีวภาพที่ใช้เพื่อทดแทนข้อต่อ [13]

วัสดุ	มอดุลัสของแข็ง (GPa)
อะลูมินา	365
ไฮดรอกซีแอปาไทต์	85
กระดูกแข็ง	7-25
กระดูกที่มีรูพรุน	0.1-1.0
พอลิเมทิลเมทาคริเลต	770
พอลิเอทิลีน	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุชีวภาพ

สามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 4 ประเภท คือ [14]

#### 1. วัสดุค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert materials)

วัสดุประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออยู่ในสภาวะร่างกายเป็นเวลานาน เนื้อเยื่อและอวัยวะในร่างกายบริเวณนั้นจะสร้างเนื้อเยื่อใหม่ขึ้นมาห่อหุ้มวัสดุ เมื่อเนื้อเยื่อใหม่มีความหนาแน่นมากขึ้นอาจจะทำให้เกิดการเคลื่อนหลุดของวัสดุชีวภาพได้

#### 2. วัสดุที่มีรูพรุน (Porous materials)

วัสดุประเภทนี้สามารถลดปัญหาการเคลื่อนหลุดของวัสดุที่เกิดกับประเภทแรกได้ เนื่องจากเนื้อเยื่อใหม่ที่สร้างขึ้นจะเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนที่พื้นผิววัสดุ เป็นตัวช่วยยึดระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อและอวัยวะใกล้เคียง ขนาดรูพรุนของวัสดุจะต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยเจริญเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อภายในรูพรุนได้ การเคลื่อนที่แม้เพียงเล็กน้อยที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุชีวภาพกับเนื้อเยื่อสามารถทำให้เส้นเลือดฝอยขาด ส่งผลให้เนื้อเยื่อที่อยู่ในรูพรุนตาย เกิดการอักเสบและทำลายเสถียรภาพที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุชีวภาพกับเนื้อเยื่อ

#### 3. วัสดุที่สามารถถูกดูดซับหรือกัดเซาะได้ (Resorbable or Erodible materials)

วัสดุประเภทนี้จะค่อยๆเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ และถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อที่ร่างกายสร้างขึ้นมา การเลือกวัสดุประเภทนี้มีข้อกำหนดที่สำคัญคือ วัสดุจะต้องสามารถถูกย่อยสลายด้วยระบบของร่างกาย และอัตราการถูกดูดซับของวัสดุจะต้องสอดคล้องกับการสร้างเนื้อเยื่อขึ้นมาทดแทน โดยสารที่ปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อระบบร่างกาย และสามารถถูกกำจัดได้ด้วยระบบร่างกาย

#### 4. วัสดุที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive materials)

ลักษณะที่สำคัญของวัสดุประเภทนี้คือ สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่พื้นผิวของวัสดุภายใต้สภาวะร่างกายซึ่งจะทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อข้างเคียง จึงสามารถลดปัญหาเรื่องการเคลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อได้

### การทดสอบวัสดุทางชีวภาพ [15]

โดยทั่วไปกระทำใน 2 ลักษณะคือ

#### 1. การทดสอบภายนอกร่างกาย

มีวัตถุประสงค์สำคัญ 3 ประการ ดังนี้

- สังเกตการทำงานและประเมินผลประสิทธิภาพของวัสดุชีวภาพ
- สามารถบอกสมรรถภาพของวัสดุชีวภาพได้สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประเมินความเชื่อถือ และความคงทนของวัสดุชีวภาพได้

เนื่องจากการนำวัสดุชีวภาพไปใช้งานจริงจะต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อ ของเหลว และอวัยวะต่างๆในร่างกาย ซึ่งสภาวะแวดล้อมต่างๆ นี้อาจทำให้สมบัติบางประการของวัสดุชีวภาพเปลี่ยนไป ดังนั้นการทดสอบภายนอกร่างกายจึงมีข้อจำกัดมากในการนำข้อมูลไปใช้เพื่อประเมินผลนำไปใช้งานจริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบการทดลองให้มีสภาวะคล้ายกับในร่างกาย เช่น การทดสอบโดยใช้ของเหลวที่มีองค์ประกอบคล้ายเลือดหรือพลาสมาในร่างกาย

2. การทดสอบภายในร่างกาย

วิธีนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าการทดสอบภายนอกร่างกาย เพราะสภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นสภาวะจริงในร่างกายสิ่งมีชีวิต ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ก. การประเมินในสัตว์ทดลองที่สุขภาพดี

วิธีทดลองนี้จะทำโดยการผ่าตัดเพื่อใส่วัสดุชีวภาพเข้าไปในร่างกายของสัตว์ทดลองที่มีสุขภาพดี โดยต้องใส่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด แต่วิธีนี้มีข้อจำกัด ได้แก่ วงจรชีวิตและอายุขัยที่ไม่เท่ากัน สรีระองค์ประกอบในร่างกายบางส่วนไม่เหมือนกัน

ข. ประเมินในสัตว์ทดลองที่เป็นโรค

การทดลองขั้นนี้จะได้ผลที่แตกต่างกับการทดลองกับสัตว์สุขภาพดี เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุชีวภาพกับอวัยวะที่เป็นโรคและไม่เป็นโรคต่างกัน การทดลองในสัตว์ที่มีสุขภาพดีไม่สามารถประเมินผลได้ จึงต้องทำการทดลองในสัตว์ที่เป็นโรค

ค. การศึกษาจากกลุ่มผู้ป่วยในทางคลินิก

ขั้นนี้เป็นการทดลองในร่างกายมนุษย์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของวัสดุชีวภาพและโรคแทรกซ้อนที่อาจเกิดจากการใช้วัสดุชีวภาพ

ง. การใช้ทางคลินิกทั่วไป

วัสดุชีวภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้นต้องผ่านการทดสอบและรับรอง โดยองค์กรที่ทำหน้าที่ควบคุมก่อนนำไปใช้งานกับผู้ป่วยในการทดสอบภายในร่างกาย

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ H.G. Kurczyk [16] ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตจากหินปูนและควอตซ์ (Quartz) บดละเอียดที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ประมาณ 2 ตารางมิลลิเมตร/กรัม อย่างไรก็ตามในการสังเคราะห์วิธีนี้ ต้องเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นผลึกของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งการผลิตดังกล่าวมีต้นทุนค่อนข้างสูงและมีสารเจือปนเนื่องจากกระบวนการบด

งานวิจัยของ A. Balogh และคณะ [17] ได้ทำการสังเคราะห์  $\beta$ -wollastonite โดยใช้หินปูนในสถานะของแข็งทำปฏิกิริยากับไอของซิลิกาชนิดระเหย (Fumed  $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่ได้จากโรงงานซึ่งการผลิตวิธีการผลิตดังกล่าวพบว่ามีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง

งานวิจัยของ P. Siriphannon และคณะ [18] ได้ทำการเตรียมแคลเซียมซิลิเกตโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีในสารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, TEOS) และแคลเซียมไนเตรดเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็นสารตกตะกอนพบว่าโซเดียมไอออนสามารถตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปนโซเดียมไอออนออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมคือ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.33 โมล/ลิตร และทำการล้างตะกอน 2 ครั้ง เพื่อให้โซเดียมไอออนที่เป็นสารเจือปนเหลืออยู่น้อยที่สุด สารที่สังเคราะห์ได้จะถูกแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อที่จะให้เกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตที่ได้ เมื่อนำไปทดสอบในสภาวะจำลองของร่างกายโดยใช้สารละลายจำลองของร่างกาย (SBF) พบว่าจะเกิดชั้นไฮดรอกซีแอปพาไทต์บนพื้นผิวของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการเข้ากันได้กับระบบชีวภาพของร่างกายได้ดี

งานวิจัยของ T. Yamamuro และคณะ [1] ได้ทำการเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive bone cement, BA cement) โดยมี  $\text{CaO-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-MgO-CaF}_2$  (AW glass-ceramic) และ bisphenol-a-glycidyl methacrylate (Bis-GMA) resin เป็นองค์ประกอบหลัก จากการศึกษาพบว่า BA cement สามารถแข็งตัวภายใน 1-2 นาทีด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่า PMMA cement นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเช่นกัน เนื่องจาก BA cement มีความว่องไวทางชีวภาพจึงสามารถเกิดการเชื่อมติดกับกระดูกภายในร่างกายได้ภายในระยะเวลา 4-8 สัปดาห์ เมื่อทำการทดลองกับโคชนิดซีเมนต์ทั้งสองชนิดเพื่อเชื่อมติดระหว่างกระดูกสะโพกเทียมกับกระดูกขาอ่อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสุนัข พบว่าความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างกระดูกกับ BA cement จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งให้ผลที่ดีกว่า PMMA cement นอกจากนี้เคยมีการใช้ BA cement สำหรับการเชื่อมต่อกระดูก สะโพกเทียมหรือรอยแตกเปราะในผู้สูงอายุ จากการติดตามศึกษาผลในผู้ป่วยเหล่านี้พบว่าอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดในคือระยะเวลา 4 ปี ซึ่งในระหว่างนี้ไม่พบว่าเกิดผลข้างเคียงใดๆ

งานวิจัยของ B. Pascual และคณะ[19] ได้ทำการทดลองถึงผลของขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อการคายความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่าขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มากขึ้น จะทำให้มีการคายความร้อนขณะที่ซีเมนต์แข็งตัวน้อยลง ส่วนทางด้านสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มากขึ้น แรงเค้นดึง (Tensile stress) และค่ามอดุลัสเชิงกด (Compressive modulus) มีค่าลดลง แต่แรงเค้นกด (Compressive stress) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนมอดุลัสดึง (Tensile modulus) และค่าการยืด (% Elongation) เปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่ง DMT พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิขณะแข็งตัวของซีเมนต์สูงขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (setting time) และมอดุลัสที่เหลืออยู่ลดลง ส่วนทางด้านสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเติมตัวเร่งมากขึ้น แรงเค้นดึงและแรงเค้นกด มีค่าลดลง ส่วนมอดุลัสดึง ค่ามอดุลัสเชิงกด และค่าการยืดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

งานวิจัยของ C. Elvira และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amines) ที่มีโครงสร้างคล้ายกับไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (Dimethyl-4-toluidine, DMT) ซึ่งทำหน้าที่เป็น “ตัวกระตุ้น” ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบผ่านอนุมูลอิสระ โดยเอมีนดังกล่าวคือ 4-ไดเมทิลอะมิโนเบนซิลแอลกอฮอล์ (4-Dimethylaminobenzyl alcohol, DMOH) และ 4-ไดเมทิลอะมิโน-เบนซิล เมทาคริเลต (4-Dimethylaminobenzyl methacrylate, DMMO) จากการศึกษาจลนศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาบัลด์พอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลต (MMA) ที่มีระบบริดอกซ์ BPO-amine เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาด้วยเทคนิคดิฟฟิวเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC) ที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-40 °C พบว่า DMT, DMOH และ DMMO เป็นเอมีนตติยภูมิที่มีประสิทธิภาพ เหมาะกับปฏิกิริยา “Cool” Polymerization ของอะคริลิกมอนอเมอร์ โดยมี BPO เป็นตัวริเริ่มที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ DMMO เป็นอนุพันธ์ของอะคริลิกที่มีหมู่แทนที่เป็นเอมีนตติยภูมิที่มีความว่องไว นอกจากนี้ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นแล้ว DMMO ยังสามารถเข้าร่วมในปฏิกิริยาโดยจะกระตุ้นที่ปลายสายโซ่ทำให้เกิดการขยายสายโซ่ทำให้สายโซ่ยาวขึ้นและมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้นและสามารถป้องกันการหลุดออกของอนุพันธ์เอมีนจากสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีการนำมาประยุกต์ทาง Biomedical และยังนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตัวกระตุ้นนี้มาใช้ในการเกิด Cool polymerization ของซีเมนต์บางชนิดและใช้ในการอุดฟัน ด้วยแต่ข้อเสียของระบบนี้คือสารประเภทดังกล่าวมีความเป็นพิษต่อร่างกาย

งานวิจัยของ J.A. Mendez [21] ได้ทำการศึกษาการเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกชนิดอะคริลิก ที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive acrylic bone cement) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็น PMMA กับ แก้วที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive glass) ในระบบ  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$  โดยมี 2-phosphonoxibenzoic acid (Fosfosol) เป็นยาต้านการอักเสบและบรรเทาอาการปวด ซึ่งซีเมนต์ที่เตรียมขึ้นจะประกอบด้วยวัสดุภาคของแข็งและของเหลว โดยมีอัตราส่วน 1.7 : 1 ตามลำดับ ในส่วนของวัสดุภาคของเหลวประกอบด้วยมอนอเมอร์ MMA และ DMOH (1 % โดยน้ำหนักคิดเทียบกับวัสดุภาคของเหลว) ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา สำหรับองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วยเม็ด PMMA แก้วที่มีความว่องไวทางชีวภาพ ตัวยา Fosfosol และ BPO (1.5 % โดยน้ำหนักคิดเทียบกับวัสดุภาคของแข็ง) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในการทดลองทำการเตรียมซีเมนต์ซึ่งในขั้นแรกจะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ PMMA beads Bioactive glass และตัวยา Fosfosol เป็น 20 40 และ 60 % โดยน้ำหนัก ต่อมาเปลี่ยนแปลงสูตรโดยใช้ปริมาณของ Bioactive glass 40 % ผสมกับ Fosfosol 20 และ 30 % โดยน้ำหนักตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของวัสดุภาคของแข็ง

Fomulation	PMMA (wt%)	BV (wt%)	Fosfosol (wt%)	BPO (wt%)
PMMA	98.5	-	-	1.5
FS-20	78.5	-	20	1.5
FS-30	68.5	-	30	1.5
BV-20	78.5	20	-	1.5
BV-40	58.5	40	-	1.5
BV60	38.5	60	-	1.5
BV-40-FS-20	38.5	40	20	1.5
BV-40-FS-30	28.5	40	30	1.5

FS = Fosfosol BV = Bioactive glass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเตรียมซีเมนต์เพสต์แล้วทำการฉีดที่อุณหภูมิห้อง ซีเมนต์จะเกิดการแข็งตัวโดยมีการคายความร้อนออกมาเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำการหาปริมาณของมอนอเมอร์ที่คงเหลืออยู่ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  spectroscopy โดยนำซีเมนต์ตัวอย่างมาละลายใน Deuterated chloroform (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และใช้เตตระเมทิลไซเลน (Tetramethylsilane) เป็นสารมาตรฐานจากนั้นนำมากรองเพื่อกำจัดองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันก่อนทำการวิเคราะห์ ทำการทดสอบความแข็งแรงกดและความว่องไวทางชีวภาพ โดยจะนำซีเมนต์ตัวอย่างไปแช่ไว้ในสารละลาย SBF แล้วศึกษาสัญญาณวิทยาด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลืออยู่พบว่าส่วนใหญ่จะมีประมาณ 5% และความแข็งแรงกดอัดอยู่ในช่วง 80-95 MPa แต่ว่าจะมีค่าลดลงเมื่อนำไปแช่ในสารละลาย SBF (อยู่ในช่วง 30-50 MPa) จากผลการทดสอบความว่องไวทางชีวภาพ พบว่าเกิดการสร้างขึ้นของแอปไทต์ห่อหุ้มล้อมรอบพื้นผิวของซีเมนต์

62141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. เอทานอล 95 % (Ethanol,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
2. เมทานอล (Methanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
3. โทลูอิน (Toluene,  $\text{C}_7\text{H}_8$ ) บริษัท LAB SCAN เกรควิเคราะห์
4. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate,  $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
5. แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calciumnitrate tetrahydrate,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
6. มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methymethacrylate monomer,  $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ ) บริษัท Aldrich เกรควิเคราะห์
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
8. แอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous sodiumsulphate,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
9. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride,  $\text{NaCl}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
10. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
11. เอ็น,เอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (N,N-Dimethyl-4-toluidine,  $\text{C}_9\text{H}_{13}\text{N}$ ) บริษัท Aldrich เกรควิเคราะห์
12. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) บริษัท LAB SCAN เกรควิเคราะห์
13. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbobnate ,  $\text{NaHCO}_3$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
14. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride,  $\text{KCl}$ ) บริษัท Univar เกรควิเคราะห์
15. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไตรไฮเดรต (Dipotassium hydrogen phosphate trihydrate,  $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Magnesium chloride hexahydrate,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
17. สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 % (Hydrochloric acid fuming 37%, HCl) บริษัท Merck เกรควิเคราะห์
18. แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (Calcium chloride dihydrate,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
19. โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate,  $Na_2SO_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรควิเคราะห์
20. ทริสไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทน (Tris(hydroxymethyl) aminomethane,  $(CH_2OH)_3CNH_2$ ) บริษัท Univar เกรควิเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 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. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (Nuclear magnetic resonance spectrometer, NMR) บริษัท Bruker AG รุ่น NMR 300 Ultra Shield ความถี่ 300 MHz ใช้เตตระเมทิลไซเลน (TMS) เป็นสารมาตรฐาน
4. เครื่องเจลเพอเมชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatograph, GPC) บริษัท Milipore รุ่น Water 150-CV

คอลัมน์	: PL Gel 10 $\mu\text{m}$ Mixed B 2 Columns
	ขนาด 7.8 x 300 $\mu\text{m}$
	วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500-10,000,000
	ใช้พอลิสไตรีนเป็นสารมาตรฐาน (PS)
สารละลาย	: เตตระไฮโดรฟูแรน (THF)
อุณหภูมิคอลัมน์	: 30°C
อุณหภูมิ injector	: 30°C
อุณหภูมิ solvent/pump	: 30°C
อัตราการไหล	: 1.0 ml/min
ปริมาณในการฉีด	: 100 $\mu\text{l}$
เวลาในการวิเคราะห์	: 22 นาที
Detector	: Refractive index
การเตรียมตัวอย่าง	: ละลายด้วย THF

5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

บริษัท JEOL รุ่น JSM-5410

การเตรียมตัวอย่าง : หักชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องแล้วนำชิ้นงานที่หักได้ไปเคลือบด้วยทองเพื่อส่องดูพื้นผิวภายในของชิ้นงาน

6. เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris1 TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงอุณหภูมิวิเคราะห์	: 50-900 °C
อัตราการให้ความร้อน	: 10 °C/min
อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน	: 20 cm <sup>3</sup> /min
อัตราการไหล Air Zero	: 40 cm <sup>3</sup> /min
ปริมาณสารที่ใช้ในการวิเคราะห์	: 10-20 mg

7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)

อัตราเร็วหัวกด	: 2.5±0.25 mm/min
Load cell	: 30 kN
Maximum load	: 25000 N
การเตรียมตัวอย่าง	: -ใช้หัวกดแบบหน้าเรียบในการทดสอบความแข็งแรง กดโดยวางให้แนบชิดกับชิ้นงานพอดี : -ทำการกดอัด และบันทึกค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปคำนวณหา ค่าความแข็งแรงกดและมอดุลัส

8. อ่างควบคุมอุณหภูมิ และ Immersion circular (FT01) รุ่น Isotherm

9. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท Buchi รุ่น B-169

10. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 225

11. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Ney Dental รุ่น 14H

12. เครื่องซั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254

13. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isotherm

14. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000

15. โกร่งบดสาร

16. เครื่องบด Rock Lab

17. ครุชชีเบลชนิดก้นทึบและอลูมินา (Crucible)

18. จานเพาะเชื้อ (Plate)

19. เครื่องอัดขึ้นรูป

20. เครื่องคัดขนาด บริษัท Retsch

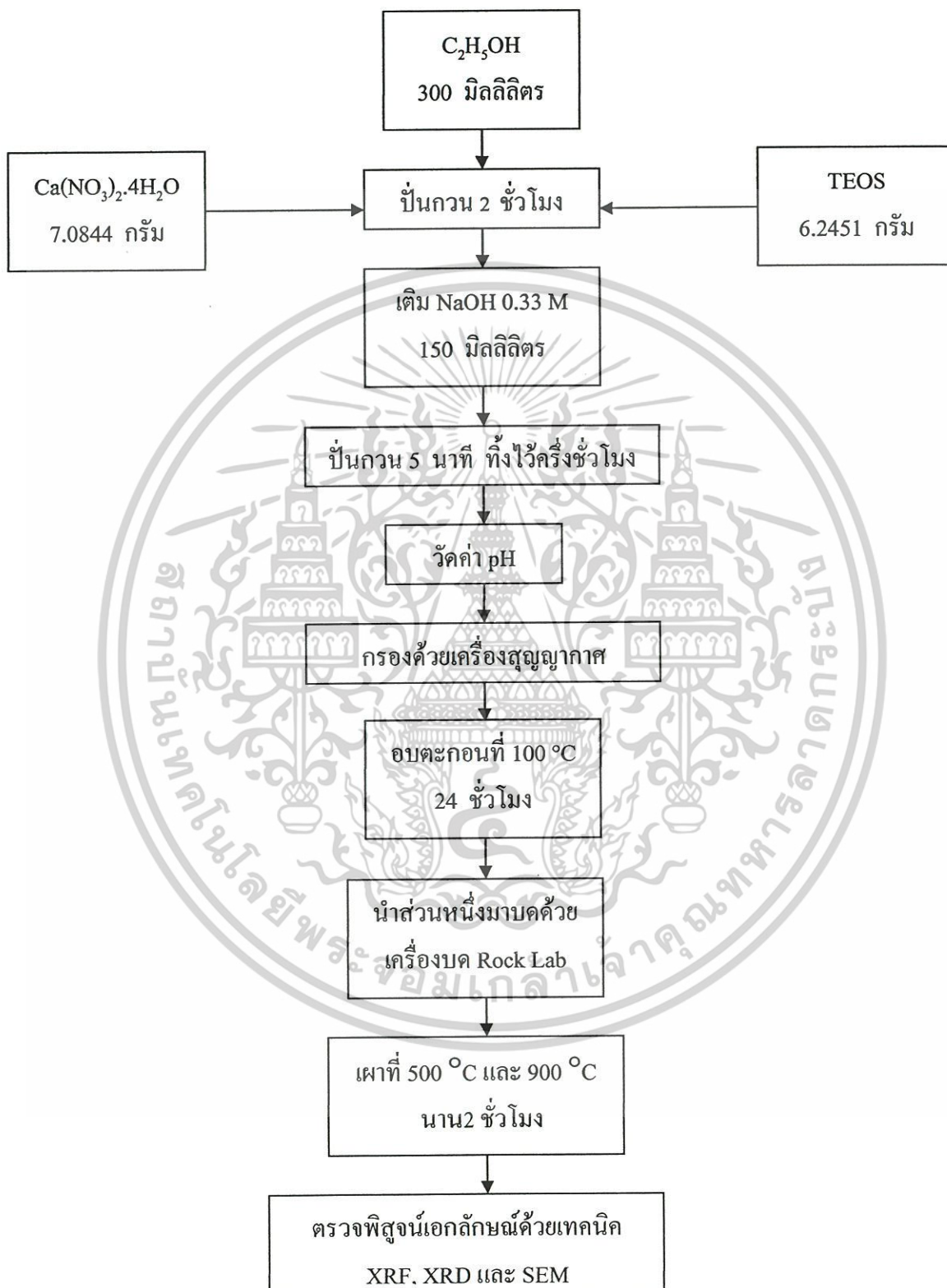
21. ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต (Calciumsilicate, CS) โดยวิธีการตกตะกอนร่วม

1. ชั่งเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) ปริมาณ 6.2451 กรัม
2. ตวงเอทานอล ปริมาตร 300 มิลลิลิตร
3. ชั่งแคลเซียมไนเตรดเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) ปริมาณ 7.0844 กรัม
4. ผสมสารในข้อที่ 1. ถึงข้อที่ 3. พร้อมทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบีกเกอร์พลาสติก
5. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.33 โมล/ลิตร โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร วัดค่า pH ของสารละลายและบันทึกผล
6. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ และปั่นกวนของผสมต่อไปอีก 5 นาที แล้วทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง
7. วัดค่า pH ของสารละลาย บันทึกผล
8. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร 1 ครั้ง
9. นำตะกอนแคลเซียมซิลิเกตที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. บดแคลเซียมซิลิเกตให้ละเอียดด้วยโม่บดสาร
11. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
12. ตรวจสอบคุณสมบัติเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) และเพื่อหาวิฤภาคที่เป็นผลึกของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

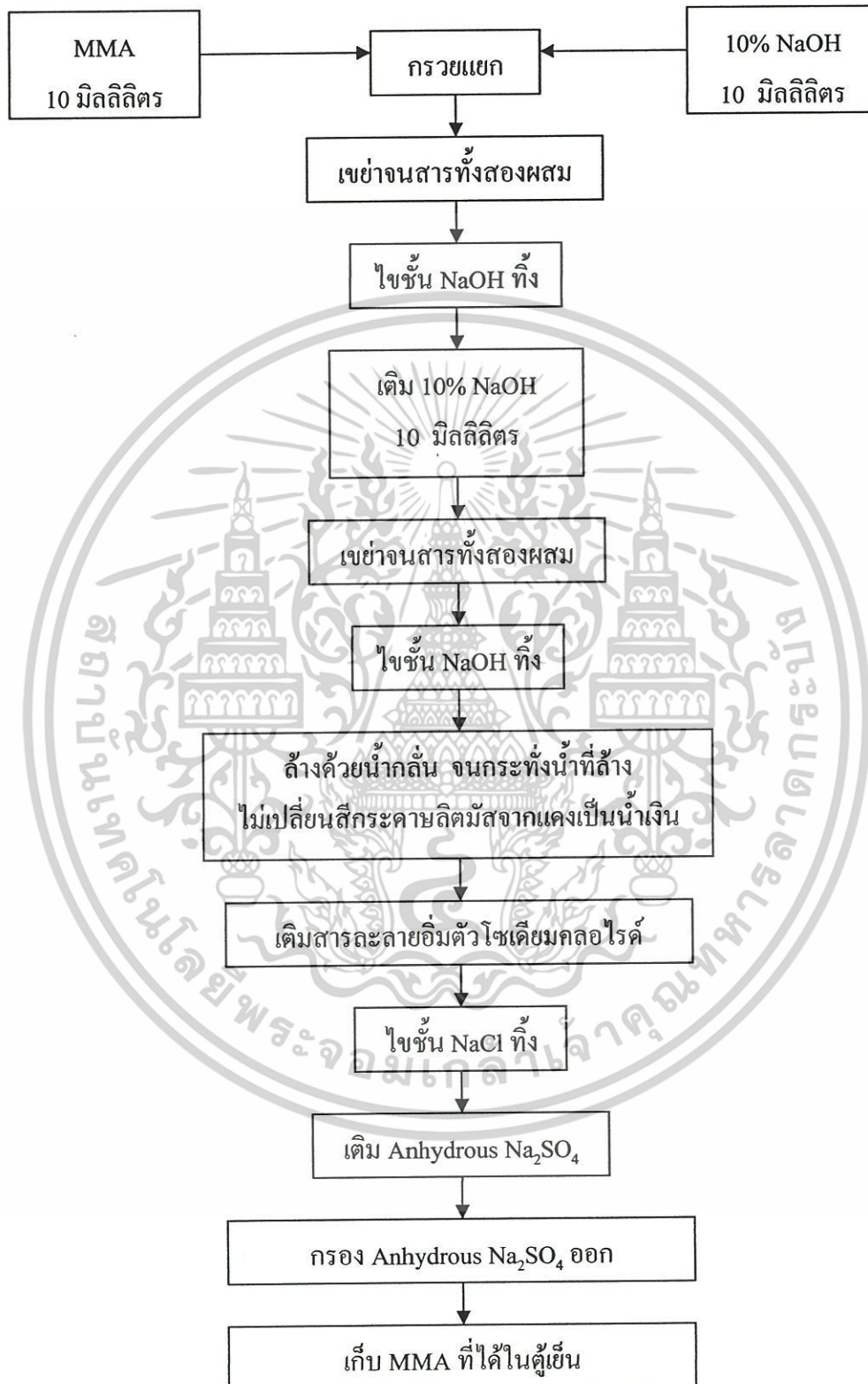


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การสกัดตัวยับยั้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA)

1. เท MMA 10 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในกรวยแยก เขย่าให้สารทั้งสองผสมกัน รอจนแยกชั้น ไขมันของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง
2. ล้างมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในกรวยแยกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ใช้ล้างไม่เปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัสจากแดงเป็นน้ำเงิน ซึ่งแสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกล้างออกหมดแล้ว
3. เติมสารละลายอิมิตัวโซเดียมคลอไรด์ แล้วเขย่าให้ผสมกัน รอจนแยกชั้นจึงไขมันสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทิ้ง
4. นำมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดตัวยับยั้งแล้วมาเติมสารคู่ความชื้นแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
5. กรองแยกของแข็งออก
6. นำมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่ทำการสกัดตัวยับยั้งแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนงานการสกัดตัวยับยั้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย

1. เหมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดด้วยยั้งปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ชั่งเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ 0.010 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. ตวงสารละลายโทลูอีนปริมาตร 40 มิลลิลิตร นำไปละลายเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ แล้วเทลงในขวดก้นกลมที่มีมอนอเมอร์อยู่
4. ผ่านแก๊สไนโตรเจนลงในสารละลายผสมนาน 10 นาที ปิดด้วยจุกคออร์กที่ต่อกับลูกโป่งที่บรรจุแก๊สไนโตรเจนแล้วทันที และหุ้มทับด้วยพาราฟิล์มให้สนิท
5. นำขวดก้นกลมมาแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำขวดออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. ทำการตกตะกอนพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยหยดของเหลวใส่ที่ได้ลงในเมทานอลปริมาตร 600 มิลลิลิตรอย่างช้าๆ พร้อมทั้งทำการปั่นกววน
8. นำมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยเมทานอล
9. บดพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กรองได้ให้มีขนาดเล็กลง ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
10. นำมาบดด้วยโม่บดสารจนได้ตะกอนละเอียด
11. ทำการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
12. วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชัน โครมาโทกราฟี (GPC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การเตรียมซีเมนต์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซลิเกต

#### 3.6.1 การเตรียมแม่แบบซลิโคน

1. ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 2 กรัม แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปจะได้ของแข็งที่มีลักษณะคล้ายเม็ดทราย
2. ผสมซลิโคนกับสารทำให้แข็งตัว (hardener) โดยใช้สารทำให้แข็งตัว 2-5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักซลิโคน
3. เทซลิโคนลงบนเม็ดแคลเซียมคาร์บอเนตที่วางอยู่ในแม่แบบพลาสติก ทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน ให้ซลิโคนแข็งตัว
4. แกะซลิโคนออกจากแม่แบบ



รูปที่ 3.3 แม่แบบซลิโคน

#### 3.6.2 การเตรียมซีเมนต์เพสต์

ในการเตรียมซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่าง วิทยาภาของแข็ง : วิทยาภาของเหลว เท่ากับ 1:0.6 โดยมีองค์ประกอบดังนี้

##### วิทยาภาของเหลว

- มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดตัวเรียบร้อยแล้ว
- เอ็น,เอ็น-ไดเมทิล-4- โทลูอิดีน (DMT) 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับวิทยาภาของเหลว

##### วิทยาภาของแข็ง

- พอลิเมทิลเมทาคริเลต
- แคลเซียมซลิเกต
- เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับวิทยาภาของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2.1 วิธีการผสมซีเมนต์เพสต์

ซังสารเคมีในส่วนน้ำหนักของแข็งและของเหลวดังนี้

1. มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต 0.6 กรัม
2. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.0150 กรัม (1.5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักของแข็ง)  
หมายเหตุ ซังสารเคมีสองชนิดนี้คงที่ตลอดการทดลอง
3. พอลิเมทิลเมทาคริเลต 0.0850 กรัม
4. แคลเซียมซลิเกต 0.9000 กรัม
5. หยดเอ็น,เอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (DMT) 1 หยด ลงในมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต
6. ผสมน้ำหนักของแข็งลงในชามระเหย คนให้เข้ากันทั่วทุกส่วน จากนั้นเทของเหลวลงในของแข็งแล้วคนให้เข้ากัน
7. ทำการผสมสูตรที่เหลือโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซลิเกต ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนขององค์ประกอบซีเมนต์เพสต์

สูตร	น้ำหนักของแข็ง			น้ำหนักของเหลว	
	PMMA (g)	CS (g)	BPO (g)	MMA(g)	DMT(หยด)
1	0.085	0.9	0.015	0.6	1
2	0.185	0.8	0.015	0.6	1
3	0.285	0.7	0.015	0.6	1
4	0.385	0.6	0.015	0.6	1
5	0.485	0.5	0.015	0.6	1
6	0.585	0.4	0.015	0.6	1
7	0.685	0.3	0.015	0.6	1
8	0.785	0.2	0.015	0.6	1
9	0.885	0.1	0.015	0.6	1
10	0.985	0	0.015	0.6	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2.2 การขึ้นรูป

1. นำตัวอย่างที่ผสมสูตรแล้ว ใส่ในแม่แบบซิลิโคน
2. อัดตัวอย่างด้วยแท่งเหล็กตันผิวเรียบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพอดีกับแม่แบบซิลิโคน
3. ทิ้งไว้ประมาณ 5 นาทีเพื่อให้ซีเมนต์แข็งตัว

### 3.7 การวัดคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสท์

1. นำซีเมนต์ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.6.2.1 ใส่ลงในแม่แบบซิลิโคน ปิดด้วยแท่งซิลิโคนตันที่เสียบด้วยเทอร์โมคัปเปิล
2. ทำการอ่านอุณหภูมิ ทุก 5 วินาที จนกระทั่งครบ 30 นาที พร้อมทั้งบันทึกผล
3. ทำการวัดอุณหภูมิสูตรที่เหลือ สูตรละ 3 ครั้ง

### 3.8 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์

#### 3.8.1 การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลือ

1. ทำการหาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลือด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  spectroscopy โดยใช้ไดคลอโรโรมีเทน (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก) และใช้เตตระเมทิลไซเลนเป็นสารละลายมาตรฐาน (Internal Standard)
2. นำไปกรองเพื่อกำจัดองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์
3. เก็บตัวอย่างที่เตรียมได้ไว้เป็นเวลา 7 วันก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  spectroscopy

#### 3.8.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ด้วยเทคนิค TGA

1. ชั่งตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูป (3.6.2.1) น้ำหนักประมาณ 8-10 มิลลิกรัม
2. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 50-900 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

#### 3.8.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1. เตรียมตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูป โดยหักชิ้นงานและแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ผิวด้านนอกและผิวด้านใน
2. นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาเคลือบด้วยทอง (Au)
3. นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.4 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปมาละลายในสารละลายเตตระไฮโดรฟูแรน
2. กรองแคลเซียมซัลเฟตที่ตกตะกอนออก แล้วนำส่วนสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี (GPC)

### 3.9 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงของซีเมนต์

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูป มาทดสอบกับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)
2. บันทึกผลและคำนวณค่าความแข็งแรงกด ณ จุดเสียสภาพ (Compressive strength at yield) ค่ามอดูลัส ณ จุดเสียสภาพ (Modulus at yield)

### 3.10 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพของวัสดุประกอบในระบบจำลองของร่างกาย

#### 3.10.1 การเตรียมสารละลายที่มีองค์ประกอบความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์และค่าความเป็นกรด-เบสใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายมนุษย์ [22]

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย Simulated body fluid (SBF)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารละลายดังนี้

จุ่มบีกเกอร์พลาสติกที่บรรจุน้ำกลั่น 1400 มิลลิลิตร ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 36-37 °C ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ค่อย ๆ ละลายสารเคมีทีละตัวในน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ตั้งแต่สารตัวที่ 1 จนถึงตัวที่ 8 ยกเว้นสารเคมีตัวที่ 6 จะแบ่งใส่ลงไปเพียง 30 มิลลิลิตรก่อน พร้อมวัดค่า pH ของสารละลายในระหว่างการผสม เติมสารตัวที่ 9 ลงไปที่ละน้อย จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH ประมาณ 7.4 จากนั้นจึงเติมสารตัวที่ 6 ที่เหลือลงไปเพื่อปรับ pH ให้เป็น 7.3 (ค่า pH ไม่ควรเกิน 7.5 เพราะจะทำให้เกิดตะกอน) ทำเช่นนี้สลับกันจนกระทั่งสารตัวที่ 9 หหมด จะได้สารละลายมีค่า pH ประมาณ 7.4 ปรับปริมาตรสารละลายที่เตรียมได้ให้เป็น 2000 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลาย SBF ไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 5 °C โดยสารละลาย SBF ที่เตรียมได้มีความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นของไอออนอนินทรีย์ในสารละลาย SBF และ Human Blood Plasma

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

### 3.10.2 การศึกษาการเติบโตของชั้นแอปไทต์

1. นำซีเมนต์ตัวอย่างที่เตรียมได้ในสภาวะที่เหมาะสมมาแช่ในสารละลาย SBF นาน 21 วัน
2. นำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้

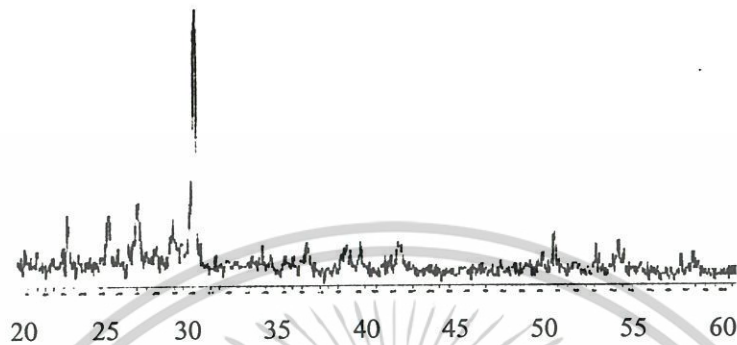
องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าแคลเซียมซิลิเกต (CS) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการตกตะกอนร่วมมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ ) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  ของ CS ที่สังเคราะห์ได้

สารตัวอย่างที่	CaO %wt	SiO <sub>2</sub> %wt	อัตราส่วนโดยโมล CaO:SiO <sub>2</sub>
1	50.00	46.70	1.14
2	50.80	46.10	1.18
3	53.80	43.70	1.32
เฉลี่ย	51.53	45.50	1.21
ค่าทางทฤษฎี	48.28	51.72	1.00

จากผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ CS พบว่าสัดส่วนโดยโมลของ  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.21 ซึ่งมากกว่าทฤษฎีเล็กน้อย แต่เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบพิกสำคัญที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 23.12, 25.29, 26.81, 28.88, 29.95, 36.24, 39.02, 41.25, 49.79, 52.97, 53.16 และ 57.44 องศา (ภาคผนวก ก) ซึ่งเป็นพิกของ CS ที่มีวัฏภาคองค์ประกอบเป็น Wollastonite ชนิดเบต้า ( $\text{CaSiO}_3$ ) มีโครงสร้างผลึกแบบเป็นไตรคลินิก แสดงดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้  
 ภายหลังจากแคลไซน์ที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้

PMMA ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย มีเปอร์เซ็นต์ผลึกภัณฑ์  
 อยู่ในช่วง 46-57 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายไปวิเคราะห์หา  
 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC (ภาคผนวก ข รูป ข-1) พบว่า  
 PMMA มี  $M_n$ ,  $M_w$  และ MWD เท่ากับ 61,420 กรัม/โมล 132,790 กรัม/โมล และ 2.16  
 ตามลำดับ

#### 4.3 ซีเมนต์ PMMA/CS

##### 4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์

ในซีเมนต์ผสมจะประกอบด้วยวัฏภาคหลัก 2 ส่วน คือวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคของแข็ง  
 ซึ่งในส่วนของของเหลวประกอบด้วยมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) และเอ็น,เอ็น-ไดเมทิล-  
 4-โทลูอิดีน (DMT) ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาและส่วนของของแข็งประกอบด้วยอนุภาค  
 แคลเซียมซิลิเกต (CS) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) และตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์  
 (BPO) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบระหว่าง PMMA:CS อยู่ในช่วง 1:9 ถึง 10:0  
 เมื่อทำการผสมวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคของเหลวเข้าด้วยกัน วัฏภาคของเหลวในส่วนของ MMA  
 สามารถละลายวัฏภาคของแข็งในส่วนของ PMMA และ BPO ได้ ซึ่งในสูตรที่มี PMMA น้อย

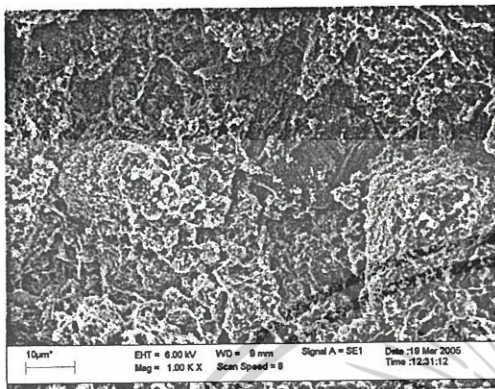
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PMMA ก็สามารถละลายได้หมด แต่จะมีความหนืดในส่วนของของเหลวน้อย และเมื่อ PMMA มากขึ้น ความหนืดในส่วนของของเหลวก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งความหนืดที่เปลี่ยนไปนี้ จะส่งผลต่อการผสมและการกระจายตัวของ CS ในเนื้อซีเมนต์ ซึ่งซีเมนต์ที่ผสมจะประกอบด้วย PMMA ซึ่งเป็นส่วนต่อเนื่อง และ CS ซึ่งเป็นส่วนเสริมแรง กระจายตัวอยู่ในเนื้อ PMMA (PMMA matrix) และเมื่อนำซีเมนต์ที่ทำการผสมได้ไปวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาเพื่อศึกษาการกระจายตัวของ CS ในซีเมนต์ PMMA/CS (ภาคผนวก ก) แสดงในรูปที่ 4.2 (ก-ข) พบว่าสูตร 1 และ 2 ซึ่งมีปริมาณขององค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น CS ในขณะที่ส่วนของเหลว PMMA-MMA ซึ่งเป็นส่วนต่อเนื่องมีปริมาณน้อยและมีความหนืดต่ำ ส่งผลให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยจะเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานขึ้น

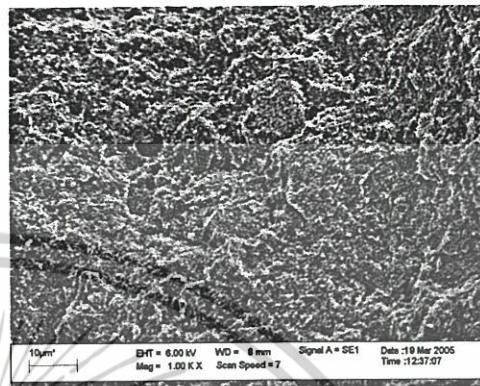
เมื่อปริมาณ CS ในซีเมนต์ลดลง ในขณะที่ปริมาณของ PMMA เพิ่มขึ้น (สูตรที่ 3-7) ส่งผลให้ความหนืดในส่วนของของเหลวเพิ่มขึ้น ทำให้การผสมเข้ากันกับอนุภาค CS ดีขึ้น ทำให้ CS กระจายตัวได้ดีในเนื้อ PMMA ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.2 (ก-ข)

ในสูตรที่ 8-9 ซึ่งมีปริมาณ PMMA สูงเกินกว่าที่จะละลายใน MMA ได้หมด เป็นผลให้ยังมีปริมาณ PMMA ซึ่งเป็นของแข็งหลงเหลืออยู่ อีกทั้งส่วนของของเหลว PMMA-MMA มีความหนืดสูงจึงทำให้ความสม่ำเสมอในการเข้ากันของ 2 วัฏภาคน้อย ดังนั้นส่วนของของแข็งจึงประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ CS และ PMMA ที่ละลายไม่หมด ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.2 (ข-ฉ) ซึ่งแสดงถึงการเกาะกลุ่มกันของ CS ในเนื้อ PMMA และมี PMMA เหลืออยู่ในเนื้อ PMMA

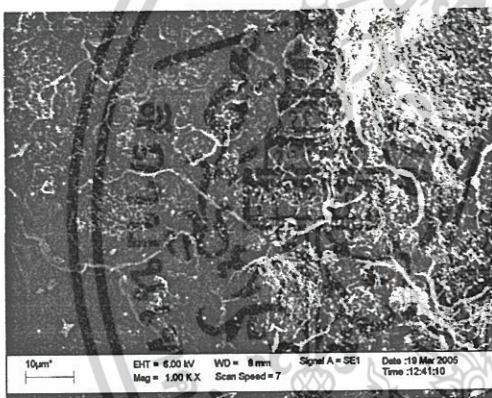
สำหรับสูตรที่ 10 ซึ่งไม่มี CS เป็นองค์ประกอบ และมีปริมาณ PMMA สูงเกินกว่าที่จะละลายใน MMA ได้หมด จากภาพถ่าย SEM พบว่ามีอนุภาคของ PMMA ส่วนที่ไม่ละลายกระจายตัวอยู่ในเนื้อ PMMA ที่เกิดจากการพอลิเมอไรเซชัน ดังรูปที่ 4.2 (ญ)



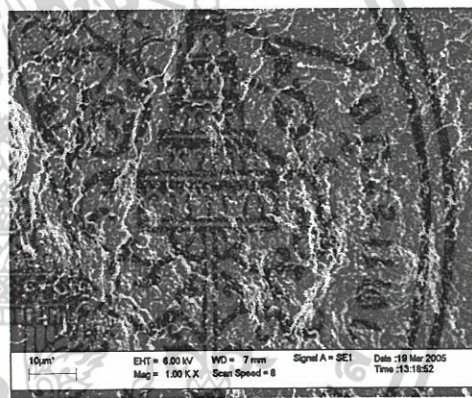
(ก) สูตร 1 (PMMA:CS=1:9)



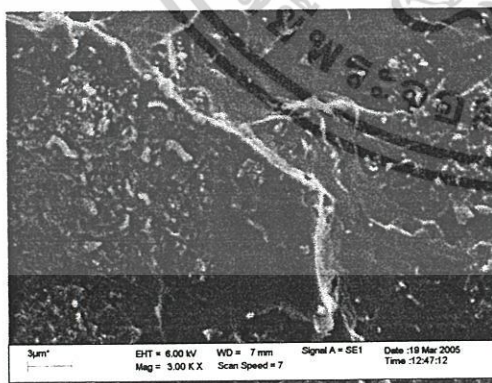
(ข) สูตร 2 (PMMA:CS=2:8)



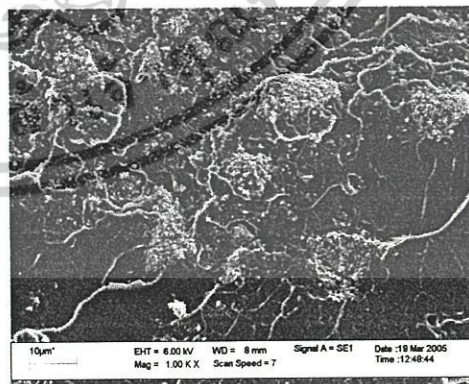
(ค) สูตร 3 (PMMA:CS=3:7)



(ง) สูตร 4 (PMMA:CS=4:6)



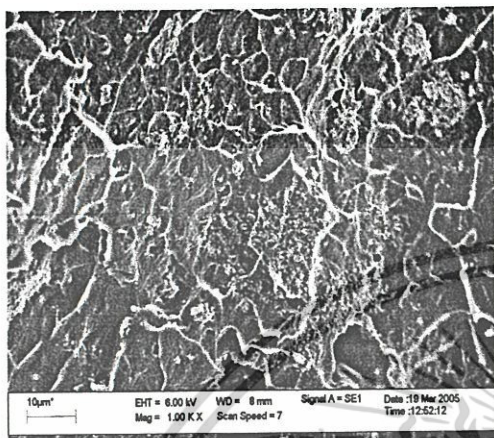
(จ) สูตร 5 (PMMA:CS=5:5)



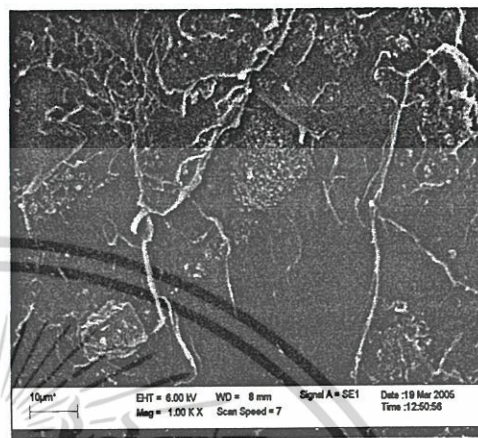
(ฉ) สูตร 6 (PMMA:CS=6:4)

#### รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการกระจายตัวของ CS ภายในซีเมนต์

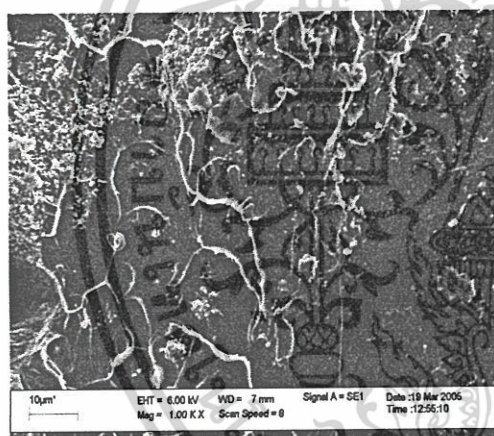
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



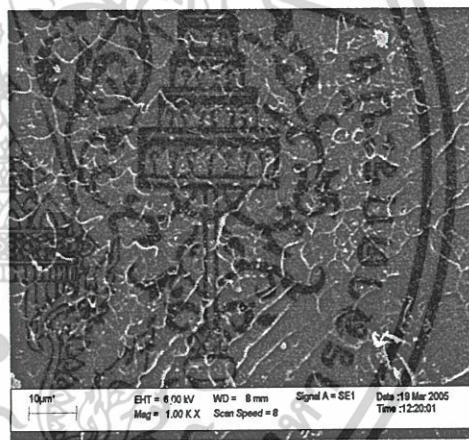
(ข) สูตร 7 (PMMA:CS=7:3)



(ค) สูตร 8 (PMMA:CS=8:2)



(ง) สูตร 9 (PMMA:CS=9:1)



(จ) สูตร 10 (PMMA:CS=10:0)

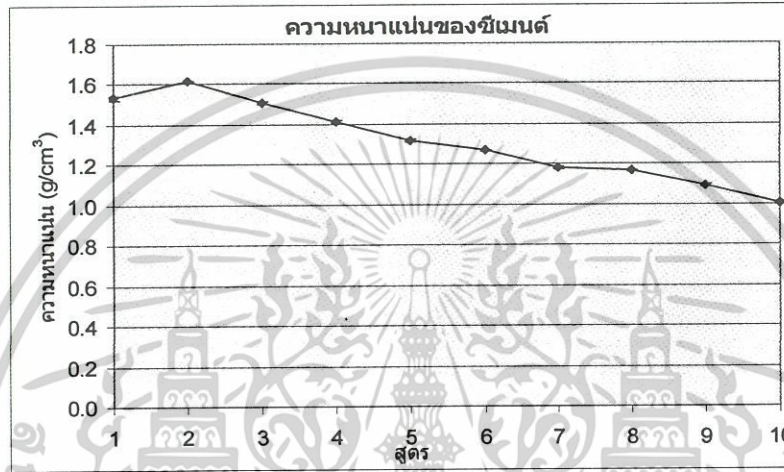
รูปที่ 4.2 (ต่อ)

#### 4.3.2 ความหนาแน่นของซีเมนต์ PMMA/CS

รูปที่ 4.3 แสดงความหนาแน่นของซีเมนต์ PMMA/CS ที่เตรียมในอัตราส่วนต่างๆพบว่า เมื่ออัตราส่วนของ CS ในซีเมนต์ลดลง ความหนาแน่นของซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงด้วย เนื่องจากปริมาณของ CS ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า PMMA มีปริมาณลดลง แต่สำหรับสูตรที่ 1 ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณ CS สูงที่สุดกลับพบว่า มีความหนาแน่นน้อยกว่าสูตรที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสูตรที่ 1 มีการผสมเข้ากันระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลวที่ไม่ดี ทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งในปริมาณมาก ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.2 (ก) ช่องว่างดังกล่าวเป็นผลให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

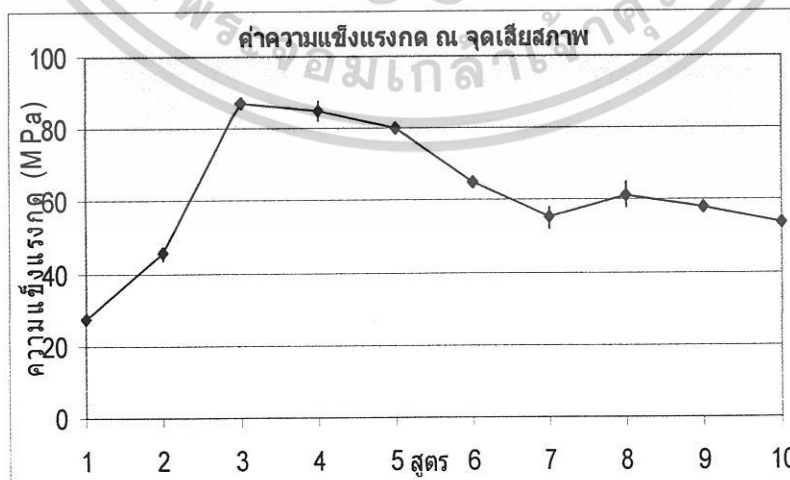
หนาแน่นของซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าสูตรที่ 2 ซึ่งมีการอัดตัวของเนื้อซีเมนต์ค่อนข้างดี มีช่องว่างน้อยกว่าสูตรที่ 1 (ภาคผนวก ง)



รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ PMMA/CS

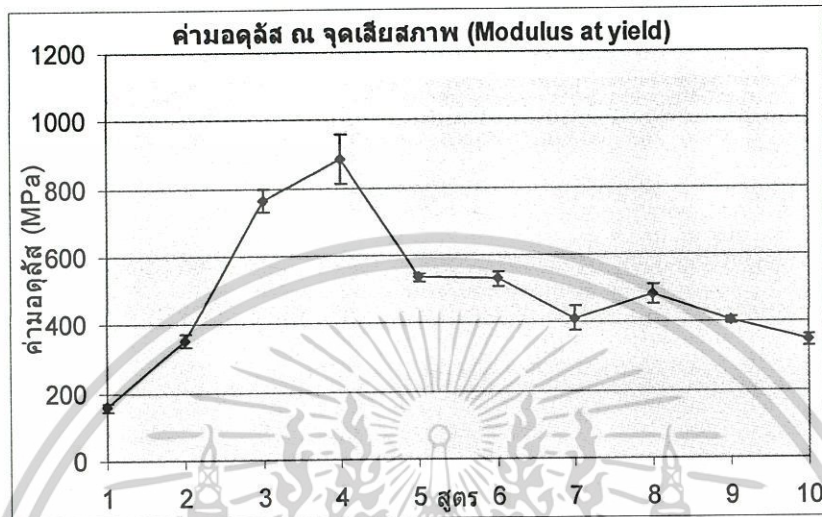
#### 4.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ PMMA/CS

เมื่อนำซีเมนต์ PMMA/CS ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงกดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ เมื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณ (ภาคผนวก จ) ได้ผลดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงกด ณ จุดเสียดสภาพ (Compressive strength) ของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่ามอดุลัส ณ จุดเสียดสภาพ (Modulus at yield) ของซีเมนต์

สำหรับสูตรที่ 1-2 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงกคต่ำ เนื่องจากการผสมไม่ดีทำให้เกิดช่องว่างมากภายในเนื้อซีเมนต์ ซึ่งช่องว่างดังกล่าวเป็นรอยค้ำหนึ่กก่อให้เกิดการเสียดสภาพเมื่อได้รับแรงกระทำ แต่ในสูตรที่ 2 ช่องว่างในซีเมนต์ลดลง ทำให้มีค่าความกคสูงขึ้น

สูตรที่ 3-4 มีการผสมที่ดีและมีปริมาณช่องว่างในเนื้อซีเมนต์น้อย ดังนั้นค่าความแข็งแรงกคจึงเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณ CS ในเนื้อซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องมาจาก CS เป็นสารอนินทรีย์ที่มีค่าความแข็งแรงกคสูงกว่า PMMA ดังนั้นสูตรที่ 3-4 จึงมีค่าความแข็งแรงกคสูงที่สุด โดยในสูตรที่ 3 มีปริมาณ CS มากกว่าสูตร 4 จึงทำให้สูตรที่ 3 มีค่าความแข็งแรงกคที่สูงกว่าสูตรที่ 4

สำหรับสูตรที่ 5-10 ค่าความแข็งแรงกคมีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก CS ซึ่งเป็นส่วนเสริมแรงมีปริมาณลดลง ทำให้ความสามารถในการรับแรงกคน้อยลง นอกจากนี้ในสูตรที่ 8-9 ยังพบว่ามีการกระจายตัวของ CS ที่ไม่ดี ซึ่งน่าจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้สมบัติในการรับแรงของซีเมนต์ลดลง

สำหรับค่ามอดุลัส ณ จุดเสียดสภาพ พบว่า มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันกับค่าความแข็งแรงกค ณ จุดเสียดสภาพ

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค TGA

เมื่อนำซีเมนต์ที่ทำการผสมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อหาปริมาณ PMMA และ CS ที่มีอยู่จริงในก้อนซีเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของ PMMA และ CS เริ่มต้น ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณ PMMA และ CS ที่มีอยู่ในก้อนซีเมนต์ PMMA/CS

สูตร	อัตราส่วน PMMA:CS	ปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์ (%wt)			
		PMMA (เริ่มต้น)	PMMA (TGA)	CS (เริ่มต้น)	CS (TGA)
1	1:9	43.75	21.25	56.25	78.75
2	2:8	50.00	41.54	50.00	58.46
3	3:7	56.25	53.33	43.75	46.67
4	4:6	62.50	64.62	37.50	35.38
5	5:5	68.75	65.00	31.25	35.00
6	6:4	75.00	75.49	25.00	24.51
7	7:3	81.25	80.56	18.75	19.44
8	8:2	87.50	87.78	12.50	12.22
9	9:1	93.75	96.11	6.25	3.89
10	10:0	100.00	100.00	0.00	0.00

หมายเหตุ\* การคำนวณปริมาณองค์ประกอบในซีเมนต์ (แสดงในภาคผนวก จ)

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณองค์ประกอบในซีเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณองค์ประกอบเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นสูตรที่ 1 และ 9 โดยเฉพาะสูตรที่ 9 เนื่องจากองค์ประกอบมีอัตราส่วนระหว่าง PMMA กับ CS ที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นการเลือกชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบ มีโอกาสที่จะเจอบริเวณที่มี PMMA อยู่มากกว่าที่จะมี CS จึงทำให้องค์ประกอบที่ตรวจวัดได้ TGA กับองค์ประกอบเริ่มต้นต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ PMMA ในซีเมนต์อยู่ในช่วง 200-600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค NMR

เมื่อนำซีเมนต์ที่ทำการผสมได้มาตรวจวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่ พบว่าได้ผลดังนี้

$^1\text{H-NMR}$  ( $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  6.11 ( $\text{H}_a, \text{d}, \text{CH}_2$ ) 5.55 ( $\text{H}_b, \text{d}, \text{CH}_2$ ) 3.75 ( $3\text{H}, \text{s}, -\text{OCH}_3$ ) 3.65 ( $3\text{H}, \text{br}, -\text{OCH}_3$ )

0.7-2.1 ( $-\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\underset{|}{\text{C}}}-, -\overset{\text{CH}_3}{\underset{|}{\text{C}}}-$ ) ppm (รูปที่ 4.6, ภาคผนวก ข-1)

ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  พบสัญญาณที่สำคัญ 4 สัญญาณ คือ สัญญาณที่ 6.11 ppm (สัญญาณ a) เป็นสัญญาณของโปรตอนจาก อัลคีน-โปรตอน ตำแหน่ง a ( $\text{H}_a$ ) สัญญาณที่ 5.55 ppm (สัญญาณ b) เป็นสัญญาณโปรตอนจาก อัลคีน-โปรตอน ตำแหน่ง b ( $\text{H}_b$ ) และสัญญาณที่ 3.75 ppm (สัญญาณ c) เป็นสัญญาณโปรตอนจาก อัลฟา-เมทิลีน ( $\alpha$ -Methylene) ที่ติดกับ ester-oxygen ซึ่ง 3 สัญญาณข้างต้นเป็นสัญญาณของ มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) ที่เหลืออยู่ ส่วนสัญญาณ 3.65 ppm (สัญญาณ d) เป็นสัญญาณโปรตอนจาก อัลฟา-เมทิลีน ( $\alpha$ -Methylene) ที่ติดกับ ester-oxygen ของ PMMA ซึ่งประกอบด้วย PMMA 2 ส่วน ได้แก่ PMMA จากสารตั้งต้นในการเตรียมซีเมนต์ร่วมกับ PMMA ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA ส่วนสัญญาณที่อยู่ในช่วง 0.7-2.1 ppm (สัญญาณ e) เป็นสัญญาณที่เกิดจาก 3 ส่วนหลัก ได้แก่ โปรตอนจาก อัลฟา-เมทิลีน ( $\alpha$ -Methylene) ที่ติดกับพันธะคู่ในโครงสร้างของ MMA สัญญาณโปรตอนจากอัลฟา-เมทิลีน ( $\alpha$ -Methylene) ที่ติดกับคาร์บอนของสายโซ่หลักในโครงสร้างของ PMMA และสัญญาณ โปรตอนจาก หมู่เมทิลีน (Methylene group) ในสายโซ่หลักของ PMMA

##### ก) การคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยตรงจากสัญญาณ NMR

ปริมาณมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันนั้นสามารถคำนวณได้ด้วยการคำนวณความสูงของสัญญาณ MMA (สัญญาณที่ 6.11, 5.55, 3.75) และสัญญาณของ PMMA (สัญญาณที่ 3.65 ppm) แล้วคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่ตามตัวอย่างวิธีการคำนวณดังนี้

### ตัวอย่าง

สูตรที่ 4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง PMMA : CS : MMA ในก้อนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 : 0.6 : 0.6

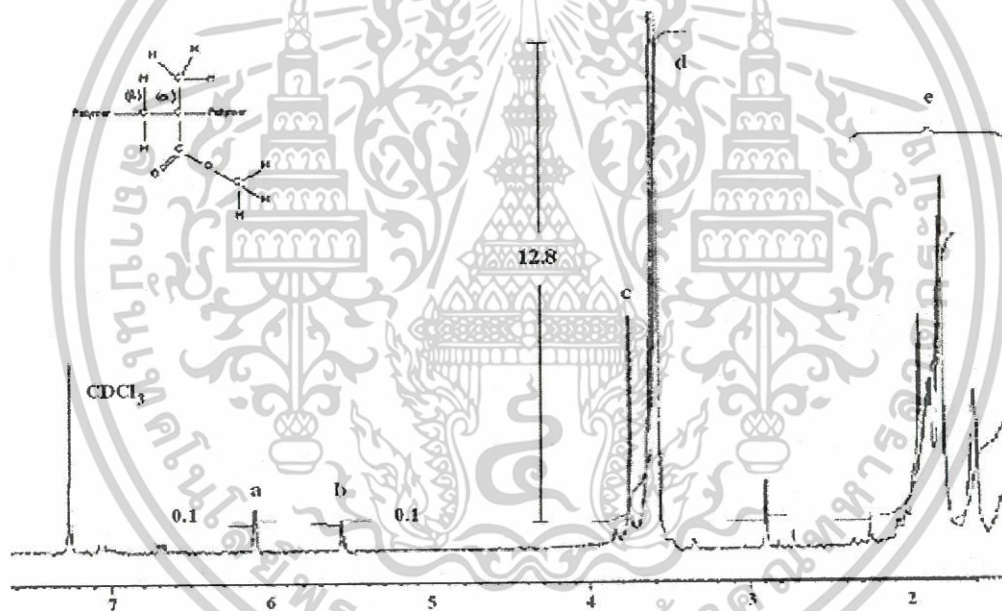
-MMA สัญญาณที่ 6.11 ppm (a) ความสูงทั้งหมดของ เท่ากับ 0.1

-MMA สัญญาณที่ 5.55 ppm (b) ความสูงทั้งหมดของ เท่ากับ 0.1

-MMA สัญญาณที่ 3.75 ppm (c) รวมกับ PMMA สัญญาณที่ 3.65 ppm (d) ความสูงทั้งหมดเท่ากับ 12.8

(เมื่อความสูงทั้งหมดของสัญญาณที่ 6.11 = ความสูงทั้งหมดของสัญญาณที่ 5.55

ดังนั้น กำหนดให้ใช้ความสูงทั้งหมดของสัญญาณที่ 6.11 ในการคำนวณ)



รูปที่ 4.6 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของ พอลิเมทิลเมทาครีเลตในซีเมนต์สูตร 4

### การคำนวณ

$$a = \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} \times \text{จำนวนโปรตอน (H)} \quad (1)$$

$$c+d = 3H *$$

$$\frac{c+d}{3} = H \quad (2)$$

3

แทนค่า (2) ใน (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} = \frac{3a}{c+d}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์มอนอเมอร์ที่เหลือ} = \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} \times 100$$

หมายเหตุ\* 3H คือ โปรตอนจาก  $-\text{OCH}_3$  ของ PMMA ที่เติมลงไปขณะผสมรวมกับ PMMA ที่เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของ MMA

แทนค่าจากสูตรที่ 4 ลงในสมการ (1) และ (2)

$$0.10 = \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} \times H \quad (1)$$

$$12.80 = 3H$$

$$12.80 / 3 = H$$

$$4.27 = H \quad (2)$$

แทนค่า (2) ใน (1)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= 0.10 / 4.27 \\ &= 0.0234 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= 0.0234 \times 100 \\ &= 2.34 \quad \text{เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณปริมาณของมอนอเมอร์ที่เหลือในสูตรที่ 4 พบว่าได้เท่ากับ 2.34 เปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์ทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบในซีเมนต์ สำหรับการคำนวณหาปริมาณของพอลิเมอร์ในสูตรที่เหลือนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีเดียวกันกับข้างต้นนี้ ซึ่งผลจากการคำนวณดังแสดงตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิค NMR

สูตรที่	อัตราส่วน PMMA:CS	MMA ที่เหลือ <sup>ก</sup> จาก NMR (%)	MMA เทียบ มอนอเมอร์ <sup>ข</sup> เริ่มต้น (%)	MMA ที่ เกิดปฏิกิริยา <sup>ค</sup> (%)	MMA ที่เหลือเทียบ น้ำหนักรวม <sup>ง</sup> (%)
1	1:9	0.00	0.00	100.00	0.00
2	2:8	3.70	4.93	95.07	1.85
3	3:7	2.75	4.12	95.88	1.54
4	4:6	2.34	3.90	96.10	1.46
5	5:5	2.36	4.33	95.67	1.62
6	6:4	4.84	9.68	90.32	3.63
7	7:3	4.84	10.49	89.51	3.93
8	8:2	2.50	5.83	94.17	2.19
9	9:1	5.56	13.9	86.10	5.12
10	10:0	2.42	6.45	93.55	2.42

ข) การคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยคิดเทียบกับปริมาณมอนอเมอร์เริ่มต้น

ในทุกสูตรที่ทำการผสมนั้นมีปริมาณของมอนอเมอร์เริ่มต้นคงที่เท่ากับ 0.6 แต่สัดส่วนของ PMMA มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนดังตารางข้างต้น ดังนั้นหากนำค่าที่จากการคำนวณในข้อ ก มาคิดเทียบกับปริมาณ PMMA และ MMA เริ่มต้นที่ใช้ จะทำให้ทราบปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่จริง ดังตัวอย่างในการคำนวณต่อไปนี้

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} = \frac{\text{เปอร์เซ็นต์มอนอเมอร์ที่เหลือ (ก)} \times \text{ปริมาณ(PMMA+MMA)เริ่มต้น}}{\text{ปริมาณ MMA}}$$

$$\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} = \frac{\text{เปอร์เซ็นต์มอนอเมอร์ที่เหลือ} \times \text{ปริมาณ(PMMA+0.6)เริ่มต้น}}{0.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อ ก การคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือของสูตรที่ 4 มีค่าเท่ากับ 2.34 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณ PMMA และ MMA ที่ใช้เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.4 และ 0.6 ตามลำดับ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= \frac{2.34}{0.6} (0.4+0.6) \\ &= 3.90 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ค) การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยา  
จากการคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือในข้อ ข สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาได้โดยการคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยา} = 100 - \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ}$$

จากผลการคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยคิดเทียบกับปริมาณของมอนอเมอร์ของสูตรที่ 4 ในข้างต้น เท่ากับ 3.90 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยา} &= 100 - 3.90 \\ &= 96.10 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ง) วิธีการหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยคิดเทียบกับปริมาณสารตั้งต้นทั้งหมด

ในทุกสูตรของการผสมซีเมนต์มีองค์ประกอบ 3 ส่วนคือ PMMA MMA และ CS โดยมีปริมาณสุทธิเท่ากับ 1.6 กรัม โดยมีปริมาณของ PMMA และ CS เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนดังตารางข้างต้น ดังนั้นจึงสามารถคำนวณปริมาณของมอนอเมอร์ที่เหลือเทียบกับปริมาณสุทธิตั้งแต่ครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= \frac{\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ (จาก ก.)} \times \text{ปริมาณ(PMMA+MMA)}}{\text{ปริมาณ(PMMA+MMA+CS)}} \\ &= \frac{\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ (จาก ก.)} \times \text{ปริมาณ(PMMA+0.6)}}{1.6} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือของสูตรที่ 4 ในข้างต้น เท่ากับ 3.72 เปอร์เซ็นต์  
ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= \frac{2.34 \times (0.4+0.6)}{1.6} \\ &= 1.46 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR พบว่าซีเมนต์ที่ได้หลังจากการผสมมีปริมาณมอนอเมอร์เหลืออยู่ในช่วง 1.40-5.20 เปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักสุทธิของซีเมนต์และปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 86.10-96.10 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า MMA ส่วนใหญ่เกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ผลิตภัณฑ์เป็น PMMA

#### 4.3.6 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล PMMA ในซีเมนต์ PMMA/CS ด้วยเทคนิค GPC

เมื่อนำซีเมนต์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในซีเมนต์ พบว่าค่า  $M_n$  อยู่ในช่วง 37,000-68,000 กรัม/โมล  $M_w$  อยู่ในช่วง 160,000-310,000 กรัม/โมล และ MWD อยู่ในช่วง 1.7-3.9 ดังตารางที่ 4.4 (ภาคผนวก ข)

อย่างไรก็ตามน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่วิเคราะห์จากเทคนิค GPC มาจาก PMMA เริ่มต้น (สังเคราะห์ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย, PMMA<sub>1</sub>) รวมกับ PMMA ที่ได้จากการพอลิเมอไรเซชัน (PMMA<sub>2</sub>) ดังนั้นสามารถคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลที่เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของ MMA ( $M_w$ -PMMA<sub>2</sub>) นั้น คำนวณได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณตัวอย่างจากสูตรที่ 1

องค์ประกอบของ MMA และ PMMA<sub>1</sub> ในสารตั้งต้นเท่ากับ 0.6 และ 0.1 กรัม ตามลำดับ ดังนั้น PMMA ทั้งหมดที่เกิดจาก PMMA<sub>1</sub> และ MMA ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (PMMA<sub>2</sub>) มีค่าเท่ากับ 0.7 กรัม โดยสามารถคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของ MMA ได้ดังนี้ กำหนดให้

Mw-PMMA<sub>1</sub> คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA เริ่มต้น

Mw-PMMA<sub>2</sub> คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA

$$\begin{aligned} \text{Mw จาก GPC} &= \text{Mw-PMMA}_1 + \text{Mw-PMMA}_2 \\ &= (\text{Mw-PMMA}_1 \times \text{ปริมาณของ PMMA}_1) + (X \times \text{ปริมาณของ MMA}) \\ &\quad \text{ปริมาณของ PMMA}_1 + \text{PMMA}_2 \quad \text{ปริมาณของ PMMA}_1 + \text{PMMA}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 163,360 &= (132,790 \times \frac{1}{7}) + (X \times \frac{6}{7}) \\ X &= 168,455 \quad \text{กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ซึ่ง X คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่เกิดจาก MMA พอลิเมอไรเซชันไปเป็น PMMA

สำหรับการคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่ได้จากพอลิเมอไรเซชันของ MMA ในสูตรที่เหลือนั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีเดียวกันกับวิธีข้างต้นนี้ ซึ่งผลจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในซีเมนต์ PMMA/CS

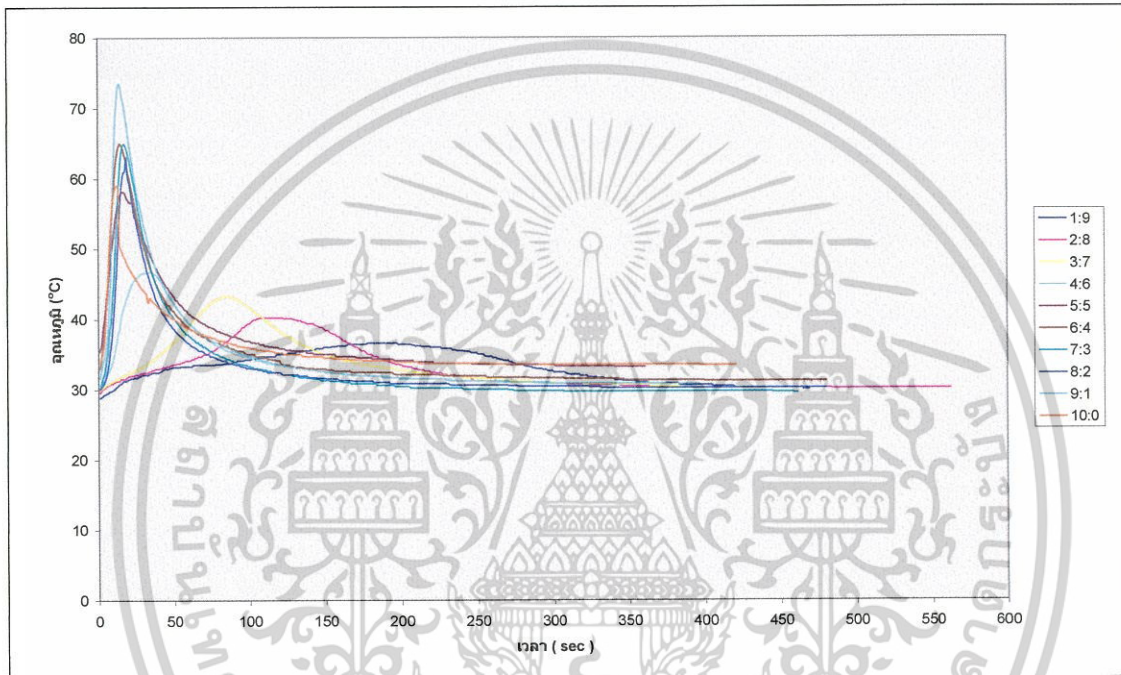
สูตร	อัตราส่วน PMMA:MMA	ผลจาก GPC			Mw (คำนวณ)
		Mn	Mw	MWD	
1	1:9	93,290	163,360	1.75	168,455
2	2:8	37,140	301,410	8.12	357,620
3	3:7	39,790	194,480	4.89	225,325
4	4:6	52,470	204,680	3.9	252,610
5	5:5	60,170	206,770	3.44	268,420
6	6:4	59,900	222,650	3.72	312,510
7	7:3	59,190	210,960	3.56	302,160
8	8:2	65,750	216,380	3.29	327,830
9	9:1	54,670	156,030	2.85	190,890
10	10:0	67,880	212,310	3.13	433,370

จากผลการคำนวณ MW ของ PMMA ในซีเมนต์ พบว่ามีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ (4.2) แสดงให้เห็นว่า MMA เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันไปเป็น PMMA จริง นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในก้อนซีเมนต์มีค่ามากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย ทั้งนี้เนื่องจาก PMMA ในก้อนซีเมนต์นั้นเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบบับเบิล ซึ่งในระหว่างที่ปฏิกิริยาดำเนินไป ระบบจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Trommsdorff-Norrish effect” หรือ “gel effect” ซึ่งจะทำให้การสิ้นสุดของปฏิกิริยาช้าลงโดยสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีปลายว่องไวจะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ต่อไปเรื่อยๆก่อนที่จะเข้าสู่การสิ้นสุดปฏิกิริยา ส่งผลให้ PMMA ในก้อนซีเมนต์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าน้ำหนักของ PMMA เริ่มต้นซึ่งได้จากการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.7 ผลการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์

จากการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ ได้ผลค่าอุณหภูมิสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.7



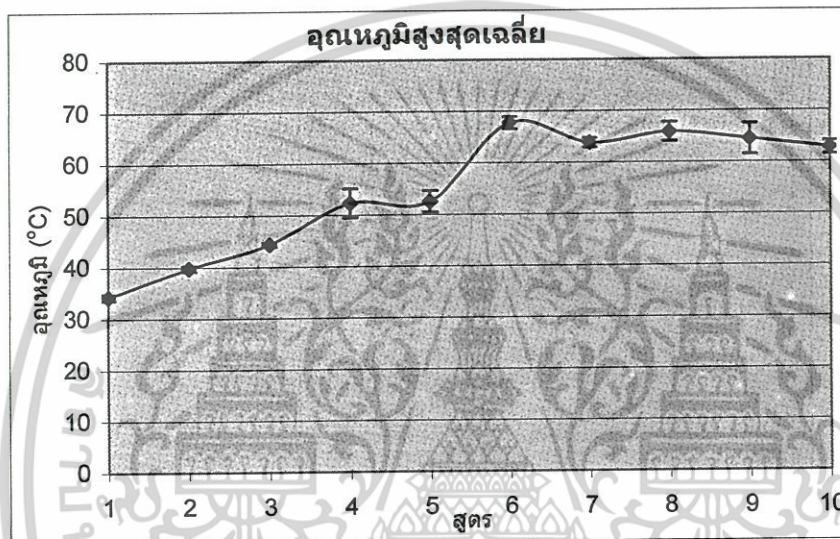
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของซีเมนต์ระหว่างการแข็งตัว

ในการผสมซีเมนต์จะเกิดการแข็งตัวของซีเมนต์ ซึ่งในขณะที่เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์จะเกิดการคายความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันของ MMA ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น

ในช่วงแรกลักษณะของอุณหภูมิ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อมีปริมาณ CS มาก และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณ CS ลดลง ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.7 เมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อปริมาณ CS มากขึ้น และจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณของ CS ลดลง เช่นเดียวกัน

ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิสูงสุด พบว่าในสูตรที่ 1-6 อุณหภูมิสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CS ลดลง ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเนื่องจาก CS เป็นฉนวนทางความร้อน จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนออกมามีประสิทธิภาพน้อยลงไปได้อย่างช้า ๆ ดังนั้นซีเมนต์ในสูตรที่ 1-6 ซึ่งมี

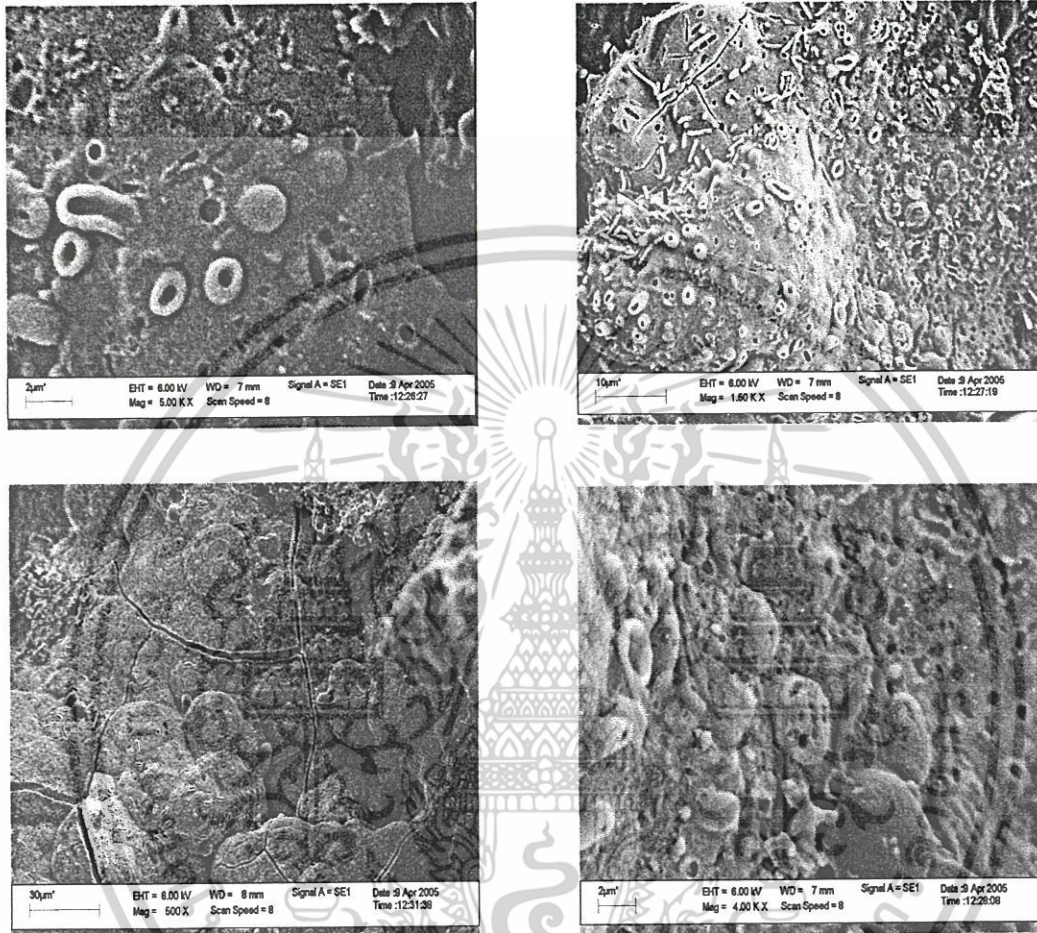
ปริมาณ CS มาก จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าต่ำ และตั้งแต่สูตรที่ 6 ขึ้นไป อุณหภูมิสูงสุดเริ่มมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของ CS มีน้อยกว่าปริมาณ PMMA มาก ดังรูปที่ 4.8 (ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของซีเมนต์

#### 4.3.8 การทดสอบความว่องไวทางชีวภาพโดยการแช่ในสารละลาย SBF

เมื่อนำซีเมนต์ที่เตรียมได้แช่ลงในสารละลาย SBF เป็นเวลา 21 วัน แล้วนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM แสดงผลดังรูปที่ 4.9 พบว่าที่พื้นผิวของซีเมนต์ภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF มีการก่อขึ้นของผลึก HAp ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นผิวขรุขระ ประกอบด้วยกลุ่มอนุภาคทรงกลมคล้ายดอกกะหล่ำและในบางบริเวณมีลักษณะคล้ายตัวหนอน ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะของผลึก HAp ที่ก่อตัวขึ้นจากสารละลาย SBF (ภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการเกิดของชั้นแอมพาไทต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ซีเมนต์ PMMA/CS เตรียมได้จากการผสมมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) พอลิเมทาคริเลต (PMMA) แคลเซียมซิลิเกต (CS) ตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) และตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอ็นเอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (DMT) โดยใช้ปริมาณ MMA BPO และ DMT คงที่ แต่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง PMMA:CS ในช่วง 1:9 ถึง 10:0 ซีเมนต์จะเซตตัวเป็นของแข็ง เนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA ได้เป็นก้อนซีเมนต์ที่มีอนุภาค CS กระจายตัวใน PMMA เมทริกซ์
2. ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนผสม PMMA:CS เป็น 3:7 และ 4:6 เป็นสูตรที่มีการผสมเข้ากันขององค์ประกอบต่าง ๆ ได้ดีที่สุดในแง่การกระจายตัวที่ดี มีช่องว่างน้อย จึงมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงกด ณ จุดเสียดสภาพและมอดูลัส ณ จุดเสียดสภาพสูงที่สุด และเมื่อปริมาณ CS ในซีเมนต์ลดเป็นผลให้ค่าสมบัติเชิงกลลดลง
3. เมื่อศึกษาอัตราการคายความร้อนและอุณหภูมิที่สูงสุดของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA พบว่า สูตรที่มี CS อยู่มาก มีแนวโน้มที่จะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ต่ำลง รวมทั้งมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้า ๆ ทั้งนี้เนื่องมาจาก CS มีสมบัติเป็นฉนวนทางความร้อน
4. เมื่อนำ PMMA ในก้อนซีเมนต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่า  $M_n$   $M_w$  และ MWD อยู่ในช่วง 52,470-93,290 กรัม/โมล 156,030-301,410 กรัม/โมล และ 1.75-4.89 ตามลำดับ
5. เมื่อนำซีเมนต์ที่เตรียมได้ไปทดสอบความว่องไวทางชีวภาพด้วยเทคนิค SEM พบว่า ซีเมนต์เกิดชั้นแอปพาไทต์ขึ้น แสดงว่าซีเมนต์ที่เตรียมได้มีความว่องไวทางชีวภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ เนื่องจาก MMA เป็นพิษต่อร่างกายและเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์
2. ควรจะทดลองเปลี่ยนระบบ Curing System เช่น การพอลิเมอไรเซชันด้วยการฉายแสงในคลื่นความถี่ช่วงของอัลตราไวโอเลตถึงแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Near ultraviolet-visible light)
3. ในการเตรียมซีเมนต์ ควรเตรียมซีเมนต์ให้มีปริมาณที่มากขึ้น เพื่อศึกษาถึงเวลาในการเซตตัวของซีเมนต์ (Setting time) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบสมบัติการยึดติด (Adhesive test)



## เอกสารอ้างอิง

1. T. Yamamuro, T. Nakamura, H. Iida, K. Kawanabe, Y. Matsuda, K. Ido, J. Tamura and Y. Senaha.1998. "Development of bioactive bone cement and its clinical applications." **Biomaterials**. 19 : 1479-1482.
2. Xuanyong Liu, Chuanxian Ding and Paul K. Chu.2004. "Mechanism of apatite formation on wollastonite coatings in simulated body fluids." **Biomaterials**. 25 : 1755-1761.
3. Amethyst Galleries, Inc. 1996. **THE MINERAL WOLLASTONITE**. [Online]. Available: <http://mineral.halleries.com/minerals/silicate/class.html>
4. S.P. Parker. 1993. **Encyclopedia of Chemistry**. Vol 3. USA. McGraw-Hill Inc.
5. B. Dietoich, P. Viout and J.M. Lehn. 1993. **In Macrocyclic Chemistry**. VCM. Weinheim.
6. M.B. Smith. 1993. **Organic Synthesis**. Germany. MCGraw-Hill.
7. R.Z. LeGeros. 1991. "Calcium Phosphate in Oral Biology and Medicine." **Monographs in Oral Science**. 15.
8. Goodfellow Cambridge Limited.2003. **Material Information Polymethymetharylate**. [Online]. Available:<http://www.goodfellow.com/csp/active/static/E/ME30.html>
9. Scholar Library Limited. 2002. **Poly (methyl methacrylate)[90011-14-7]**. [Online]. Available: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12202001-135708/unrestricted/ThesisChapter2Part1B.PDF>
10. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์.2540. เคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ. โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
11. 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)
12. Azom.com. 2003. **Bismaterials-An Overview**. [Online]. Available:<http://www.azom.com/detail.asp?ArticleID=108>
13. Azom.com. 2003. **Hydroxyapatite Composite Biomaterials-Evolution and Applications**. [Online]. Available:<http://www.azom.com/detail.asp?ArticleID=1718>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุศาสตร์. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
15. ชูศักดิ์ เวชแพศย์ และสมศรี คาวฉาย.ม.ป.ป. โครงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทางชีวภาพทางการแพทย์. กรุงเทพฯ. สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหิดล
16. H.G. Kurczyk and J. Wuhrer. 1997. "Synthetic wollastonite and its use in ceramic bodies". *Interceramic*. 2 : 119-125.
17. I. Kotsis and A. Balogh. 1989. "Synthesis of wollastonite". *Ceramics International*. 15 : 79-85.
18. 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.
19. B. Pascual, B. Bazquez, M. Curruchaca, I. Coni, M. P. Cineara, S.J. Cil, J.A. Pannell, B. Lencenseld and J. San Roman. 1996. "New aspects of the effects of size and size distribution on the setting parameters and mechanical properties of acrylic bone cements". *Biomaterials*. 17 : 509-518.
20. Carlos Elvira, Belén Levenfeld, Blanca Vázquez and Julio San Román. 1996. "Amine activators for the cool peroxide initiated polymerization of acrylic monomers". *Journal of Polymer Science:Part A: Polymer Chemistry*. 34 : 2783-2789.
21. J.A. Méndez, M. Fernández, A. González-Corchón, M. Salvado, F. Collía, J.A. de Pedro, B.L. Levenfeld, A. López-Bravo, B. Vázquez and J. San Román. 2004. "Injectable self-curing bioactive acrylic-glass composites charged with specific anti-inflammatory/analgesic agent". *Biomaterials*. 25 : 2381-2392.
22. สุภาณี ชนะวงศ์. 2547. การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างไฮดรอกซีเอปอไซด์กับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนอะดิเปตกับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

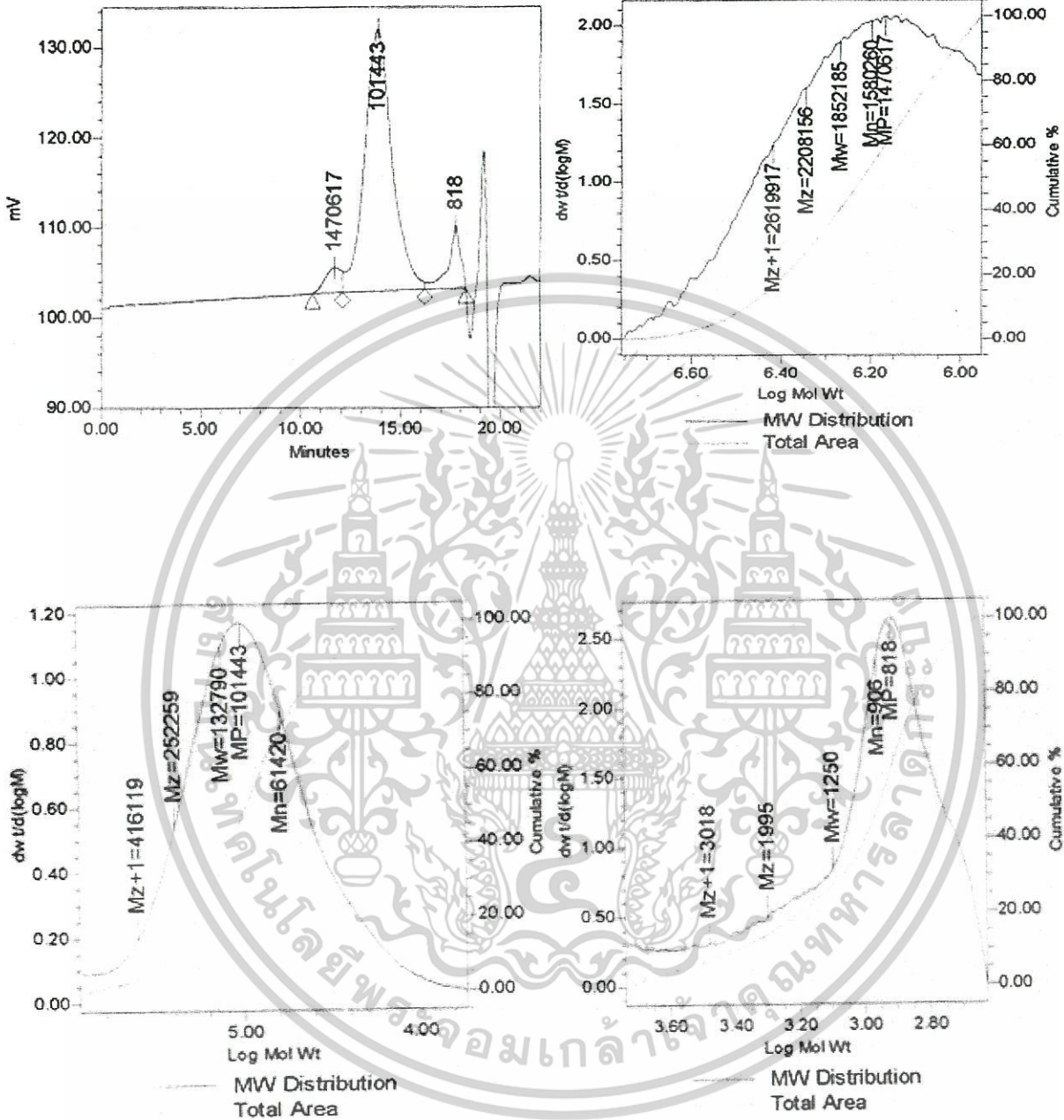
Patient : 73-1110		Refraction = 1.54000		Quality : Calculated	
<p><b>Ca Si O<sub>2</sub></b></p> <p>Wavelength / Calculated Refractive</p> <p>Indices : Anomalous (birefringent)      Mol weight = 110.10</p> <p>3.0 : P-1 (2)      Volume (CC) = 347.82</p> <p>a = 7.84000      Alpha = 60.00      D<sub>n</sub> = 2.909</p> <p>b = 7.32000      Gamma = 05.37</p> <p>c = 7.07000      Gamma = 103.43</p> <p>nd = 1.08470      Z = 4      Rho = 0.87</p> <p>cd = 0.96385</p> <p>ICSD COLLECTION CODE : 625467            TEST FROM ICSD : At least one TF missing.            SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Boodman from Hokkaido, Japan.</p> <p>Calculated from ICSD using POWD-12+e. (1997) primary reference :            Proc. Int. Acad. Volume 43, page 913. (1997) :            No. 7, Saganagi, R., Takatori, Y., Tokumasa, M.</p> <p>Refraction : Calc'd      Power : Not specified</p> <p>Lambda : 1.54000      d-ep : Calculated spacings</p>					
200	1	1	1	200	1
19.900	10	1	0	19.900	10
18.470	11	1	0	18.470	11
17.040	12	1	0	17.040	12
15.610	13	1	0	15.610	13
14.180	14	1	0	14.180	14
12.750	15	1	0	12.750	15
11.320	16	1	0	11.320	16
9.890	17	1	0	9.890	17
8.460	18	1	0	8.460	18
7.030	19	1	0	7.030	19
5.600	20	1	0	5.600	20
4.170	21	1	0	4.170	21
2.740	22	1	0	2.740	22
1.310	23	1	0	1.310	23
0.880	24	1	0	0.880	24
0.450	25	1	0	0.450	25
0.020	26	1	0	0.020	26
0.000	27	1	0	0.000	27
0.000	28	1	0	0.000	28
0.000	29	1	0	0.000	29
0.000	30	1	0	0.000	30
0.000	31	1	0	0.000	31
0.000	32	1	0	0.000	32
0.000	33	1	0	0.000	33
0.000	34	1	0	0.000	34
0.000	35	1	0	0.000	35
0.000	36	1	0	0.000	36
0.000	37	1	0	0.000	37
0.000	38	1	0	0.000	38
0.000	39	1	0	0.000	39
0.000	40	1	0	0.000	40
0.000	41	1	0	0.000	41
0.000	42	1	0	0.000	42
0.000	43	1	0	0.000	43
0.000	44	1	0	0.000	44
0.000	45	1	0	0.000	45
0.000	46	1	0	0.000	46
0.000	47	1	0	0.000	47
0.000	48	1	0	0.000	48
0.000	49	1	0	0.000	49
0.000	50	1	0	0.000	50
0.000	51	1	0	0.000	51
0.000	52	1	0	0.000	52
0.000	53	1	0	0.000	53
0.000	54	1	0	0.000	54
0.000	55	1	0	0.000	55
0.000	56	1	0	0.000	56
0.000	57	1	0	0.000	57
0.000	58	1	0	0.000	58
0.000	59	1	0	0.000	59
0.000	60	1	0	0.000	60
0.000	61	1	0	0.000	61
0.000	62	1	0	0.000	62
0.000	63	1	0	0.000	63
0.000	64	1	0	0.000	64
0.000	65	1	0	0.000	65
0.000	66	1	0	0.000	66
0.000	67	1	0	0.000	67
0.000	68	1	0	0.000	68
0.000	69	1	0	0.000	69
0.000	70	1	0	0.000	70
0.000	71	1	0	0.000	71
0.000	72	1	0	0.000	72
0.000	73	1	0	0.000	73
0.000	74	1	0	0.000	74
0.000	75	1	0	0.000	75
0.000	76	1	0	0.000	76
0.000	77	1	0	0.000	77
0.000	78	1	0	0.000	78
0.000	79	1	0	0.000	79
0.000	80	1	0	0.000	80
0.000	81	1	0	0.000	81
0.000	82	1	0	0.000	82
0.000	83	1	0	0.000	83
0.000	84	1	0	0.000	84
0.000	85	1	0	0.000	85
0.000	86	1	0	0.000	86
0.000	87	1	0	0.000	87
0.000	88	1	0	0.000	88
0.000	89	1	0	0.000	89
0.000	90	1	0	0.000	90
0.000	91	1	0	0.000	91
0.000	92	1	0	0.000	92
0.000	93	1	0	0.000	93
0.000	94	1	0	0.000	94
0.000	95	1	0	0.000	95
0.000	96	1	0	0.000	96
0.000	97	1	0	0.000	97
0.000	98	1	0	0.000	98
0.000	99	1	0	0.000	99
0.000	100	1	0	0.000	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Auto-Scaled Chromatogram

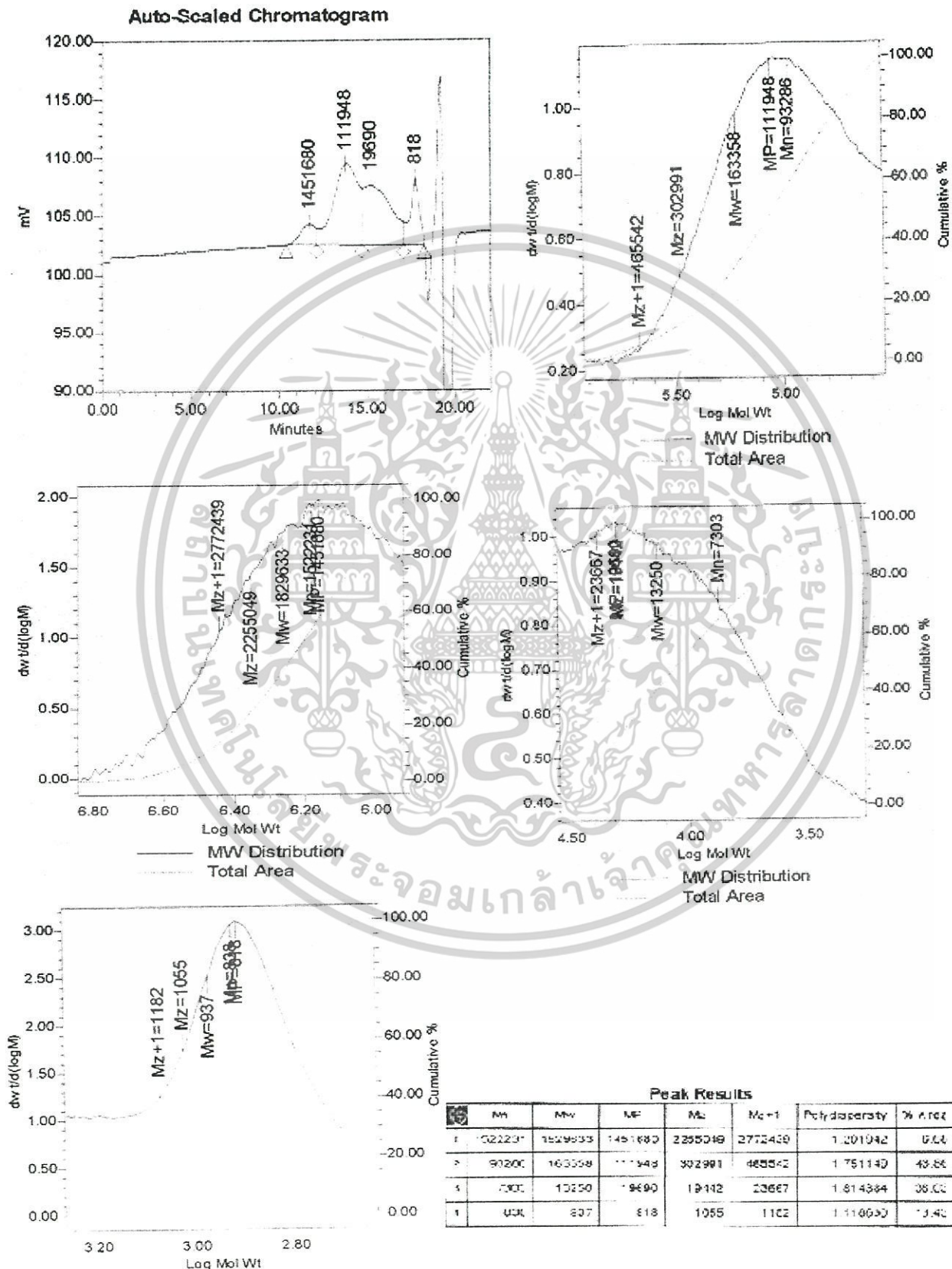


Peak Results

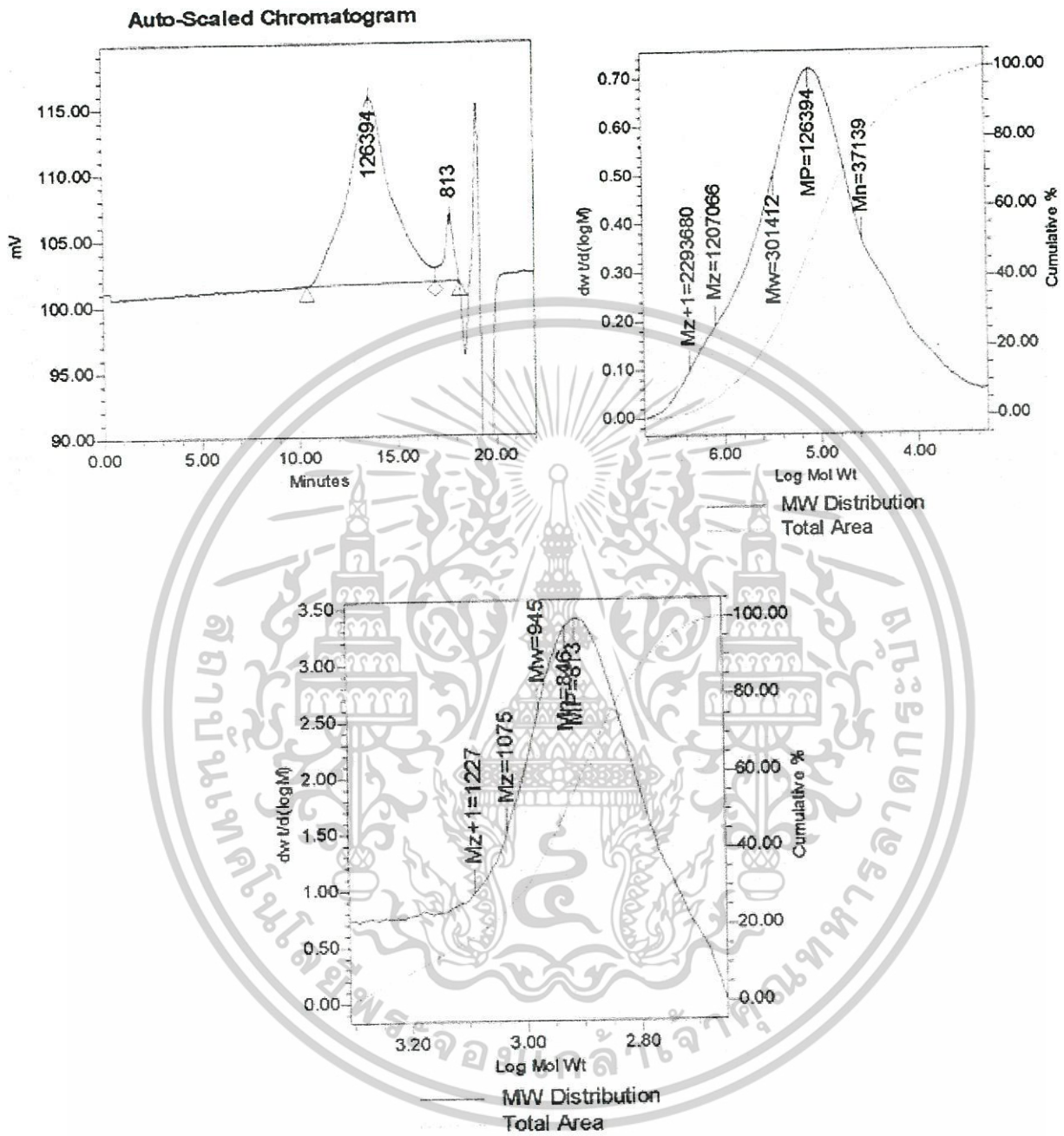
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	1580260	1852185	1470617	2208156	2619917	1.172076	4.76
2	61420	132790	101443	252259	416119	2.161996	86.13
3	906	1250	818	1995	3018	1.379144	9.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไปสู่บุคคลใด ๆ ทั้งสิ้น การนำข้อมูลนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

รูปที่ ข-1 โคลรมาโทแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้จากถ่านเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสสารละลายใช้



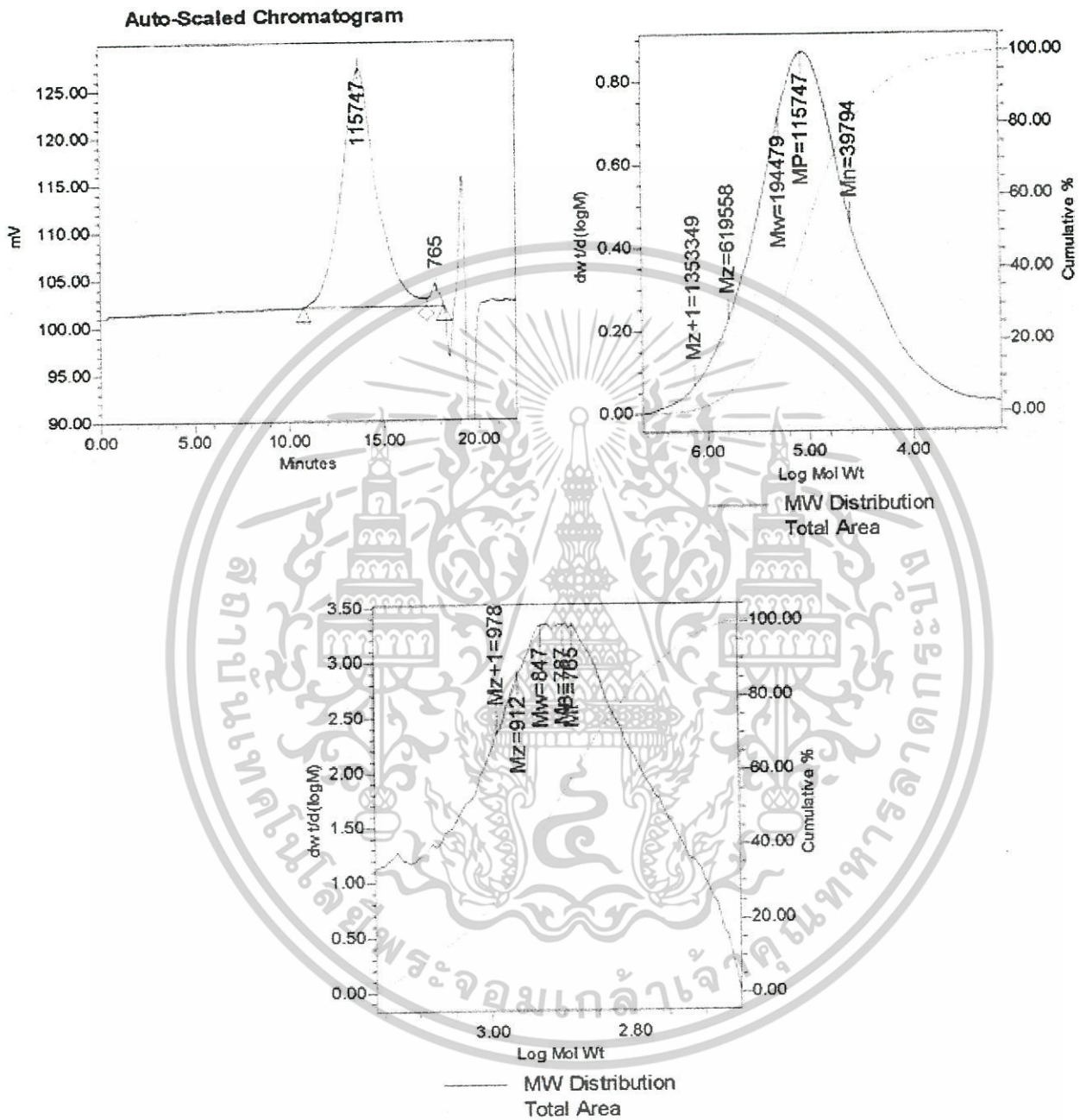
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ ข-2 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 1 (PMMA:CS = 1:9)



Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	37139	301412	126394	1207066	2293680	8.115730	92.98
2	846	945	813	1075	1227	1.117085	7.02

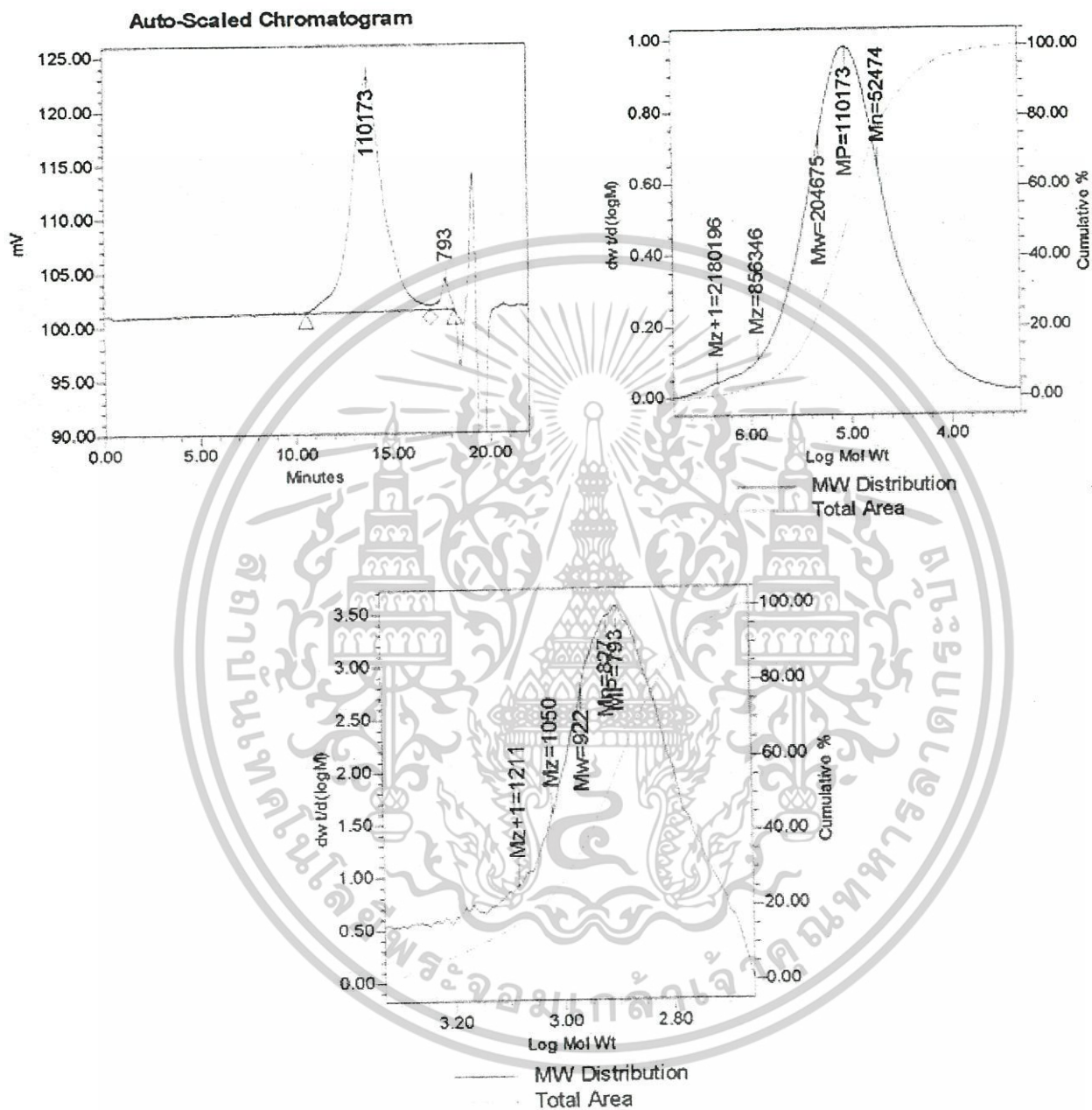
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมของซีเมนตัสูตรที่2 (PMMA:CS = 2:8)



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	39794	194479	115747	619558	1353349	4.887122	97.67
2	787	847	765	912	978	1.076239	2.33

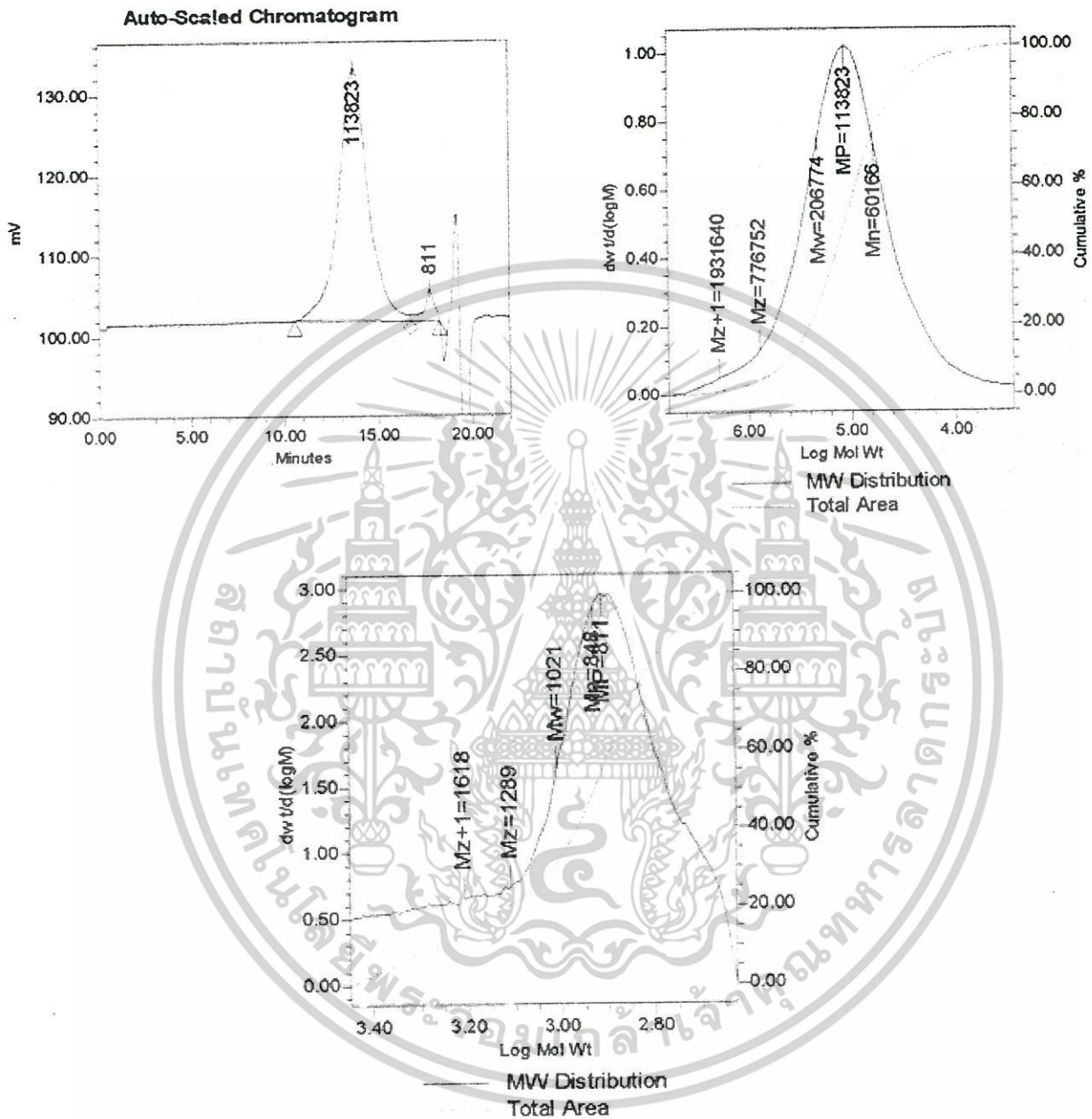
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตรที่3 (PMMA:CS = 3:7)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	52474	204675	110173	856346	2180196	3.900500	96.39
2	827	922	793	1050	1211	1.114034	3.61

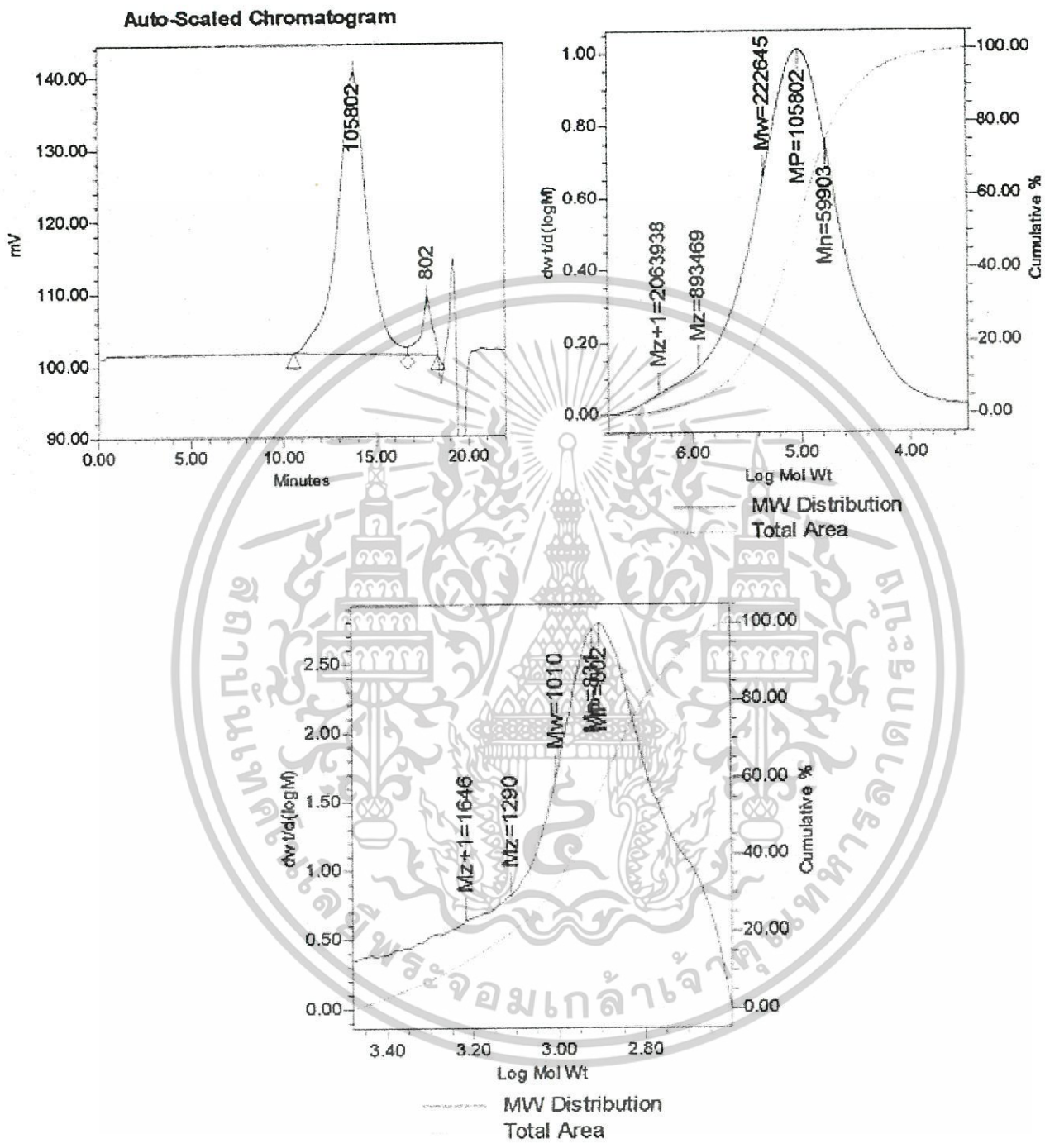
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ก้ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ ๗-5 โครมาโทแกรมของซเมนตูดรที่ 4 (PMMA:CS = 4:6)



Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	60166	206774	113823	776752	1931640	3.436704	95.93
2	848	1021	811	1289	1618	1.204992	4.07

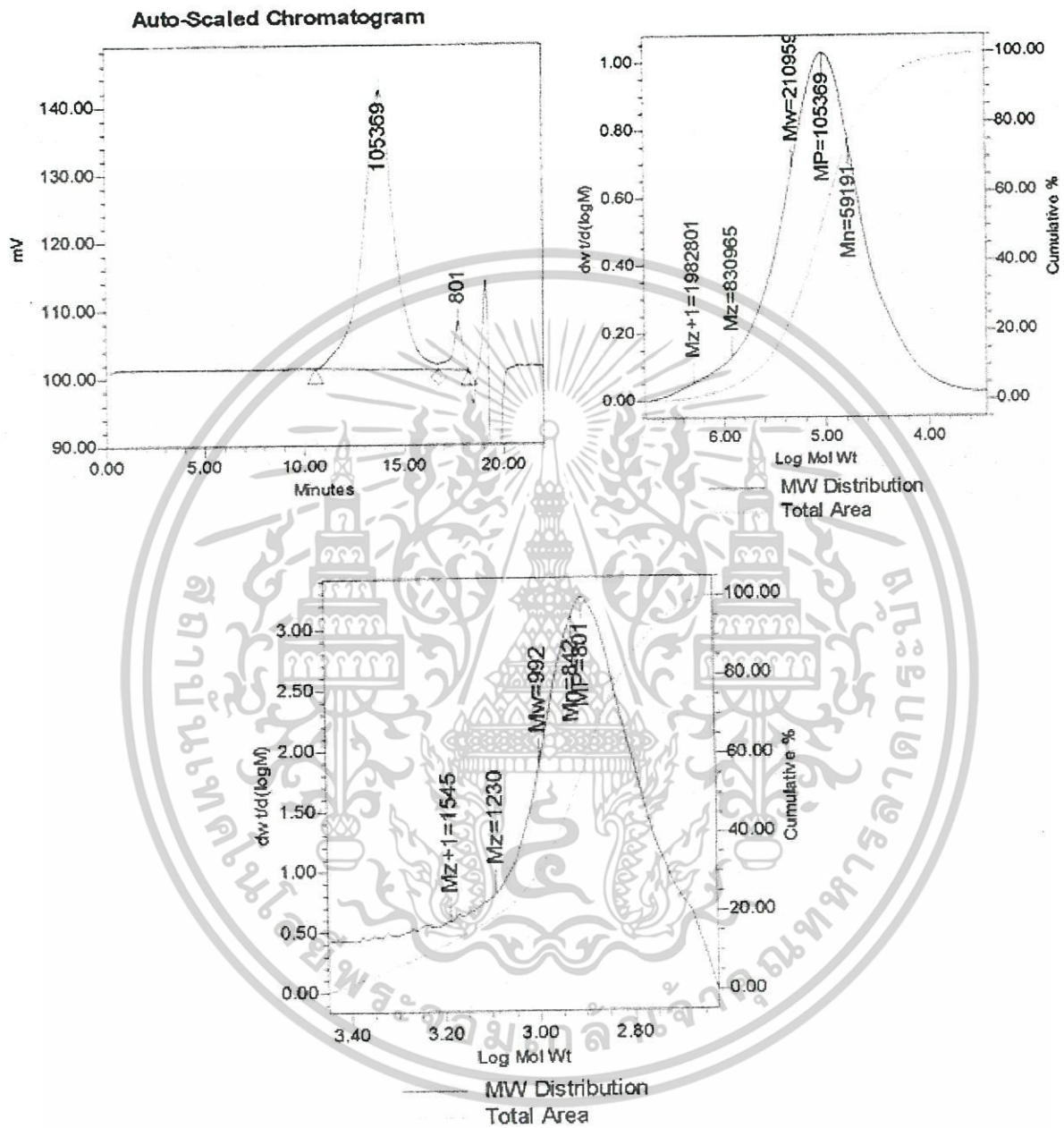
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งรูปที่ ๖-๕ โครมาโทแกรมของทีเมนคัสเจอร์ที่ 5 (PMMA:CS = 5:5) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	59903	222645	105802	893469	2063938	3.716780	92.98
2	831	1010	802	1290	1646	1.215723	7.02

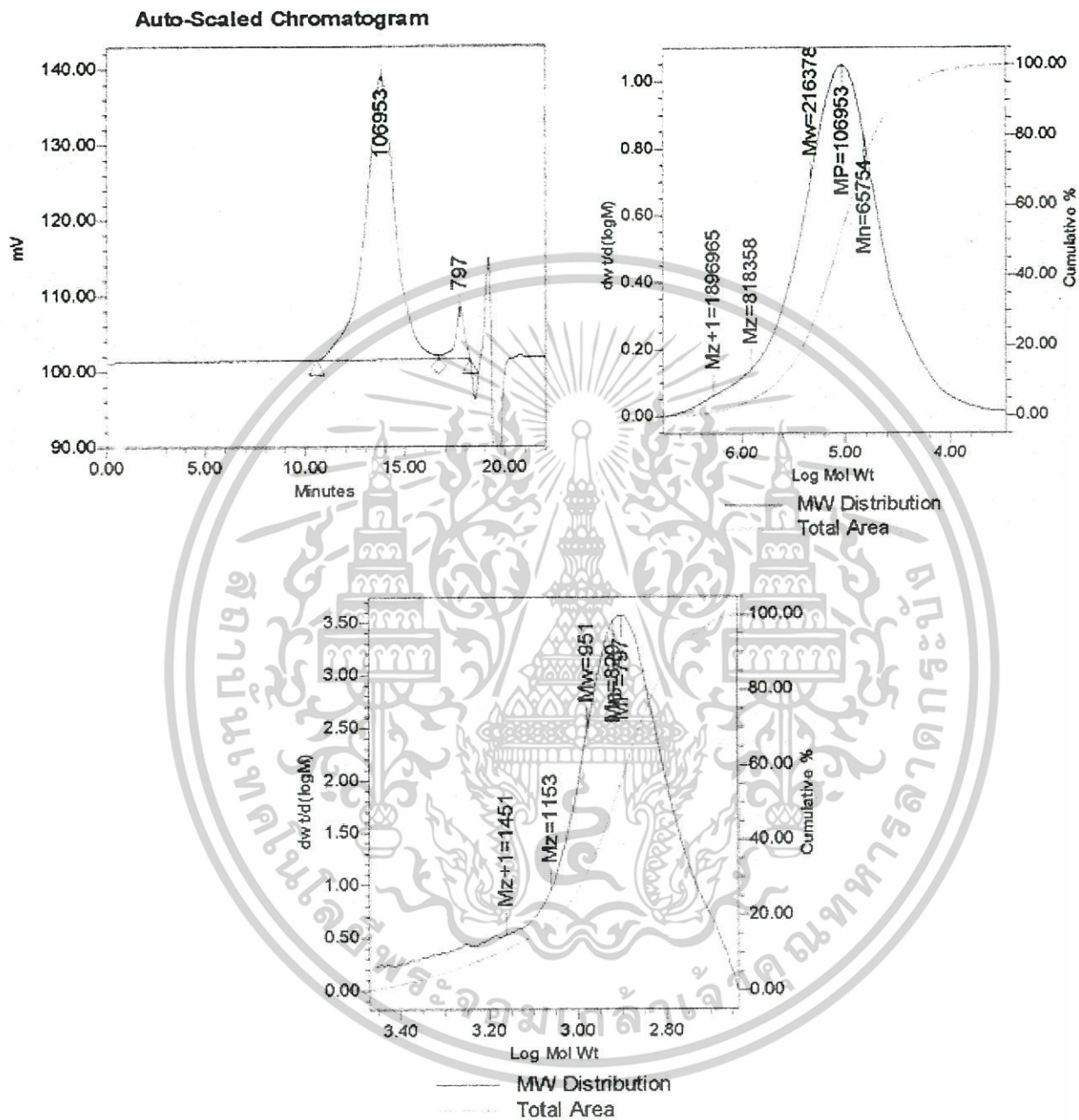
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ ข-7 โครมาโทแกรมของขเมนตสูตรที่ 6 (PMMA:CS = 6:4)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	59191	210959	105369	830965	1982801	3.564059	94.70
2	842	992	801	1230	1545	1.178616	5.30

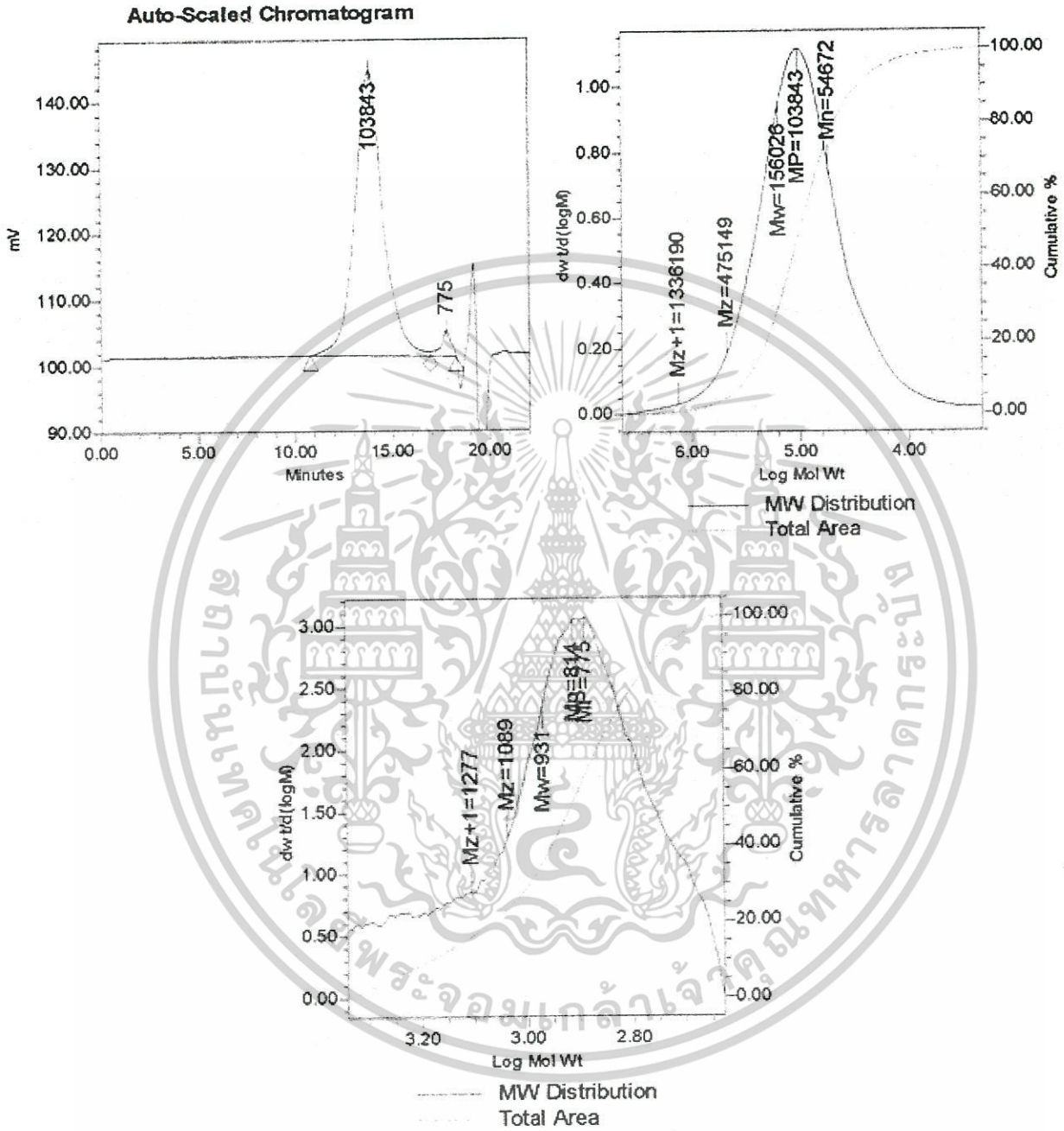
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งรูปที่ ๘ ที่ โครโมโทแกรมของซีเมนตัสสูตรที่ 7 (PMMA:CS=๓:7:3) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	65754	216378	106953	818358	1896965	3.290724	94.85
2	829	951	797	1153	1451	1.146672	5.15

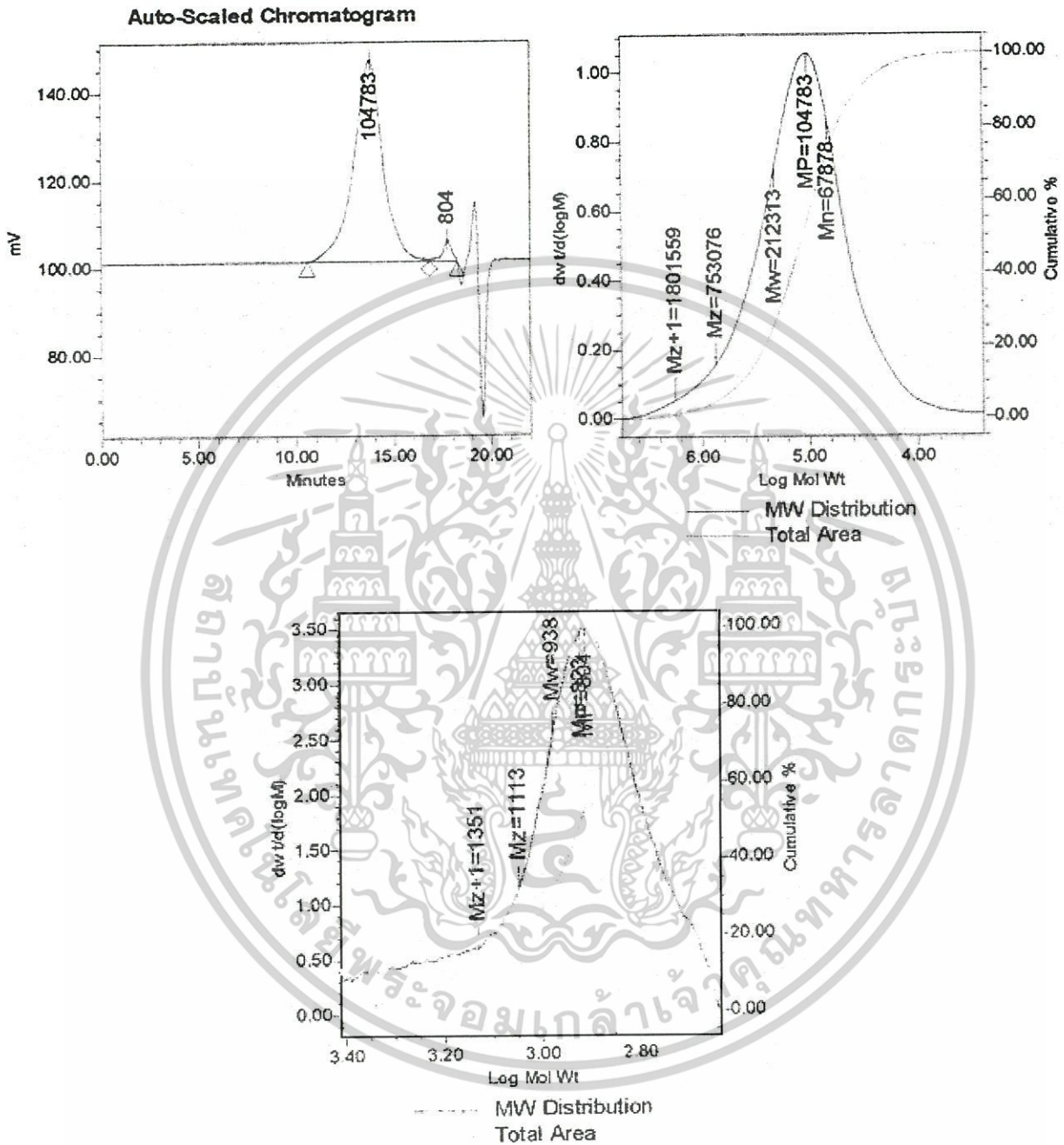
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งรูปที่ ๑-๙ ที่โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 8 (PMMA:CS=8:2) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	54672	156026	103843	475149	1336190	2.853871	96.83
2	814	931	775	1089	1277	1.143506	3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งรูปที่ข-10 โครมาโทแกรมของซีเมนตัสเจอร์ที่ 9 (PMMA:CS = 9:1)



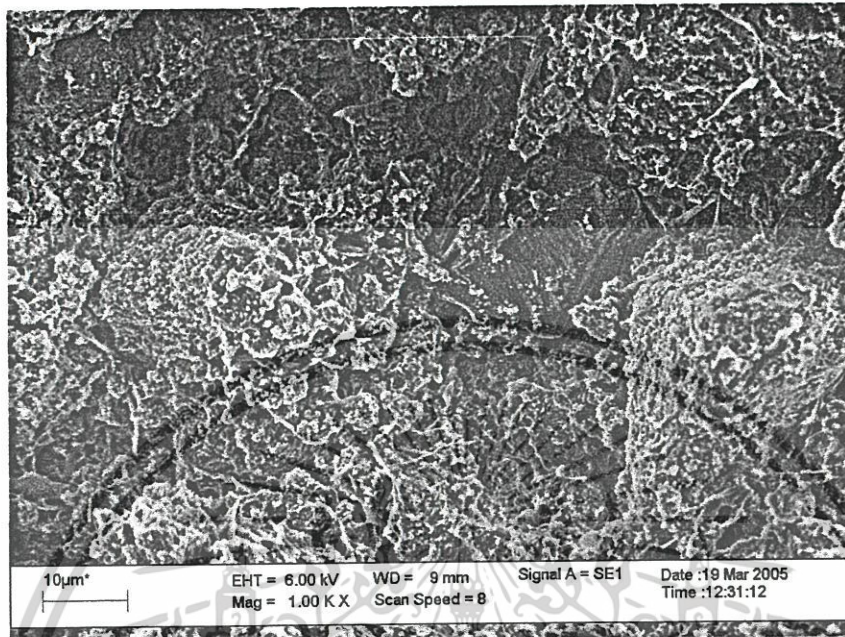
Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	67878	212313	104783	753076	1801559	3.127859
2	823	938	804	1113	1351	1.139679

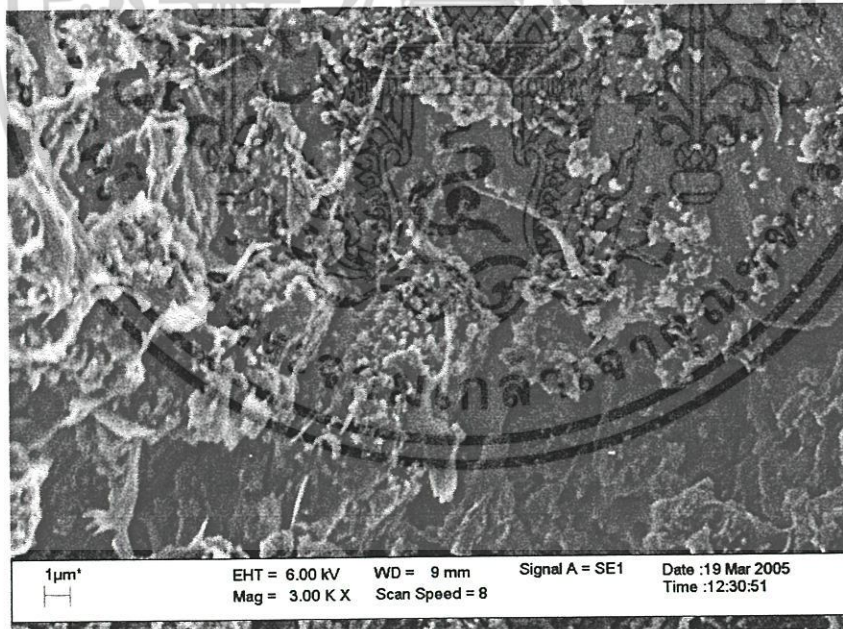
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ ข-11 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 10 (PMMA:CS = 10:0)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

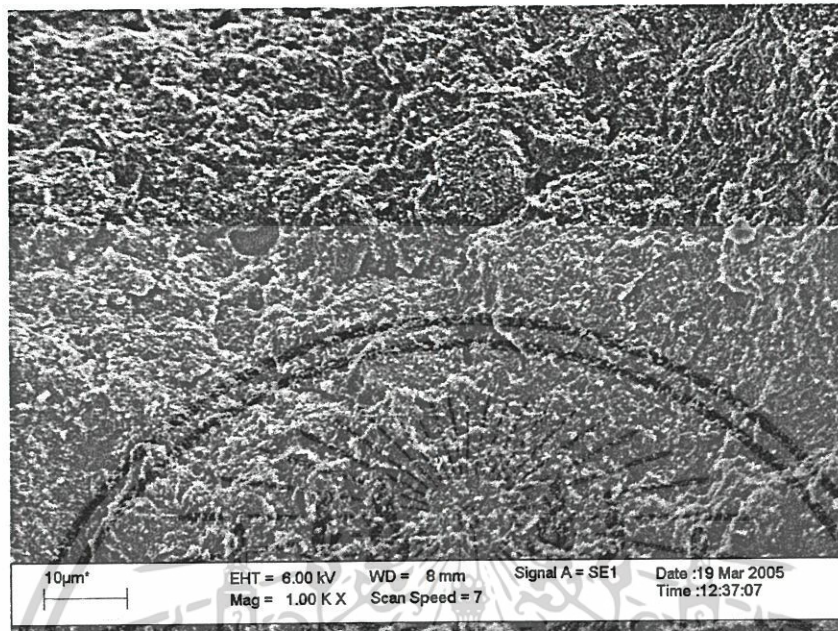


(b)

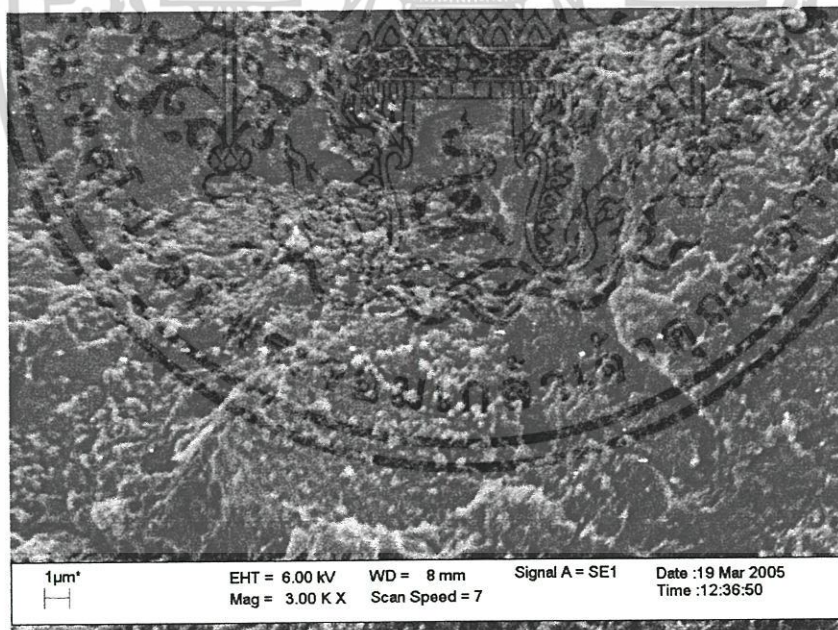
รูปที่ ค-1 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 1

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

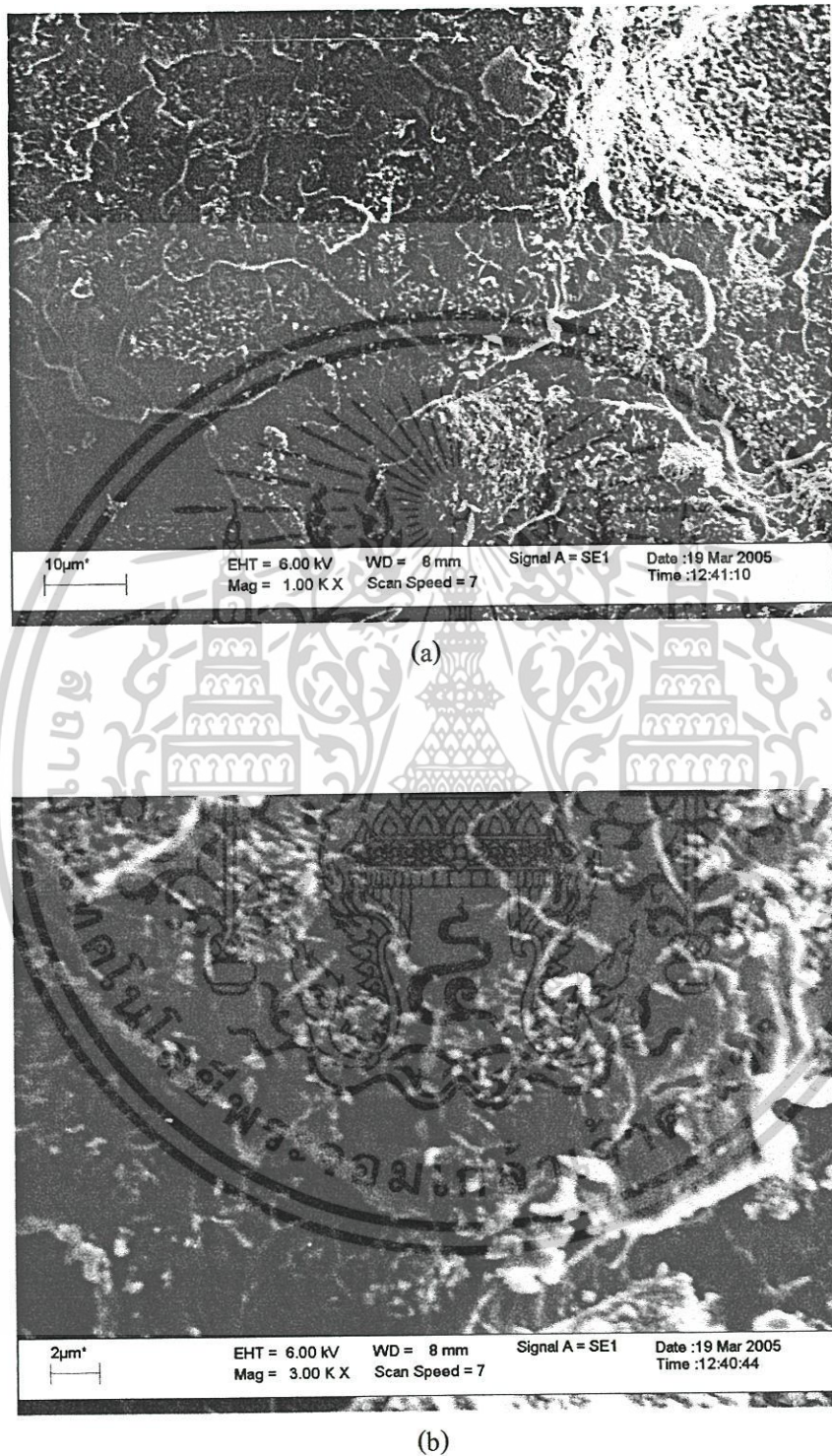


(b)

รูปที่ ก-2 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 2

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

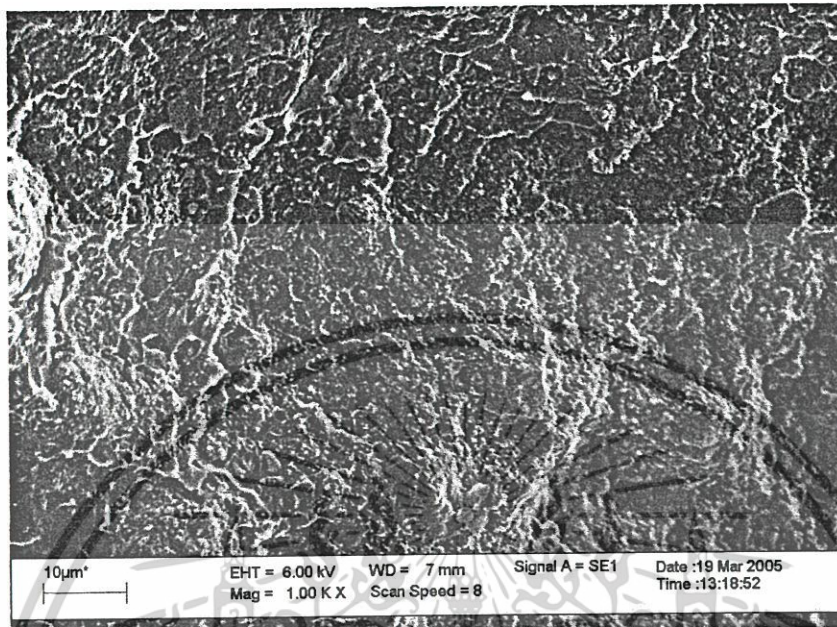
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



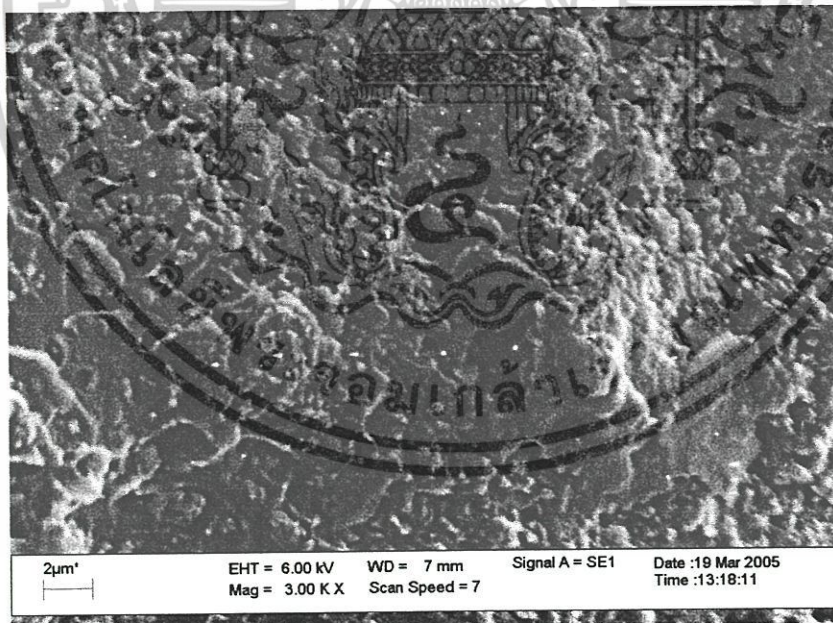
รูปที่ ค-3 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 3

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



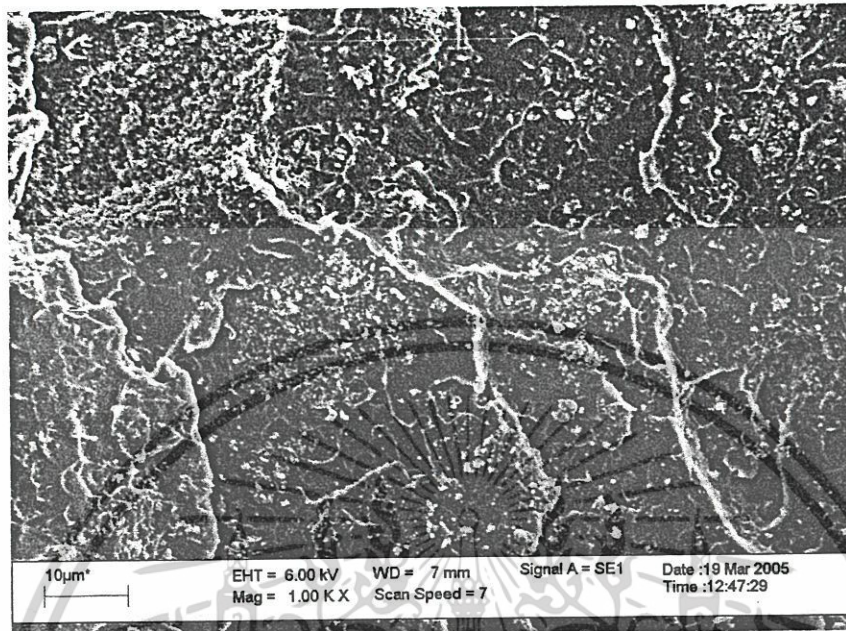
(a)



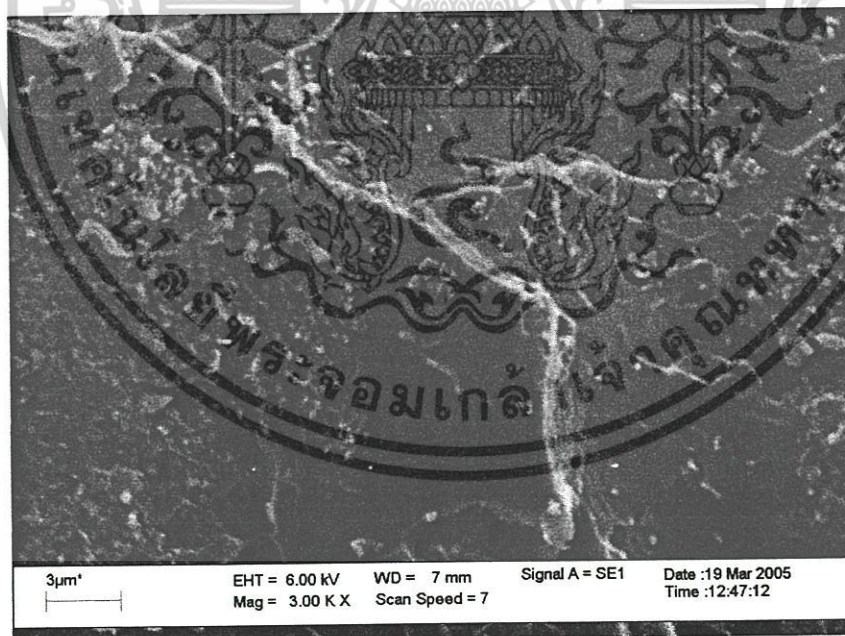
(b)

รูปที่ ค-4 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 4  
กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

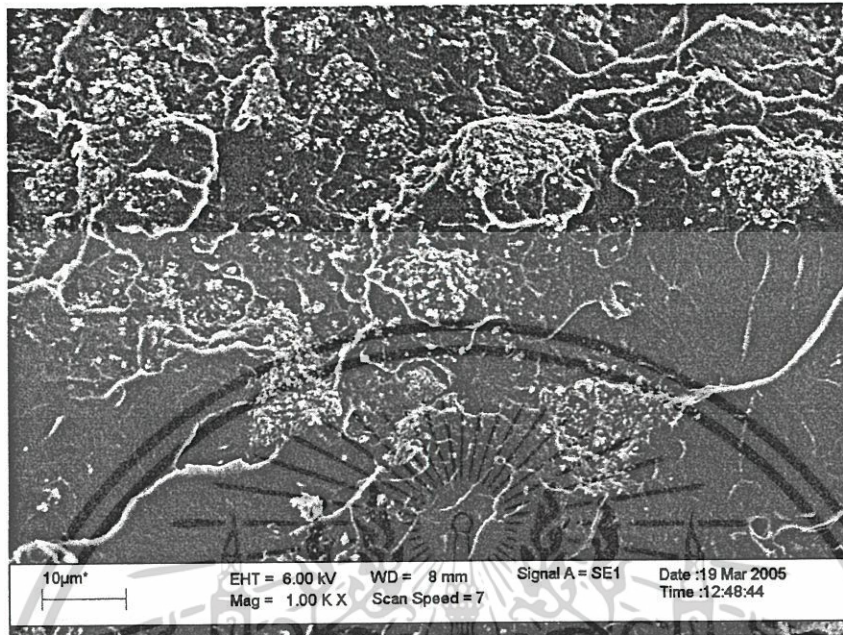


(b)

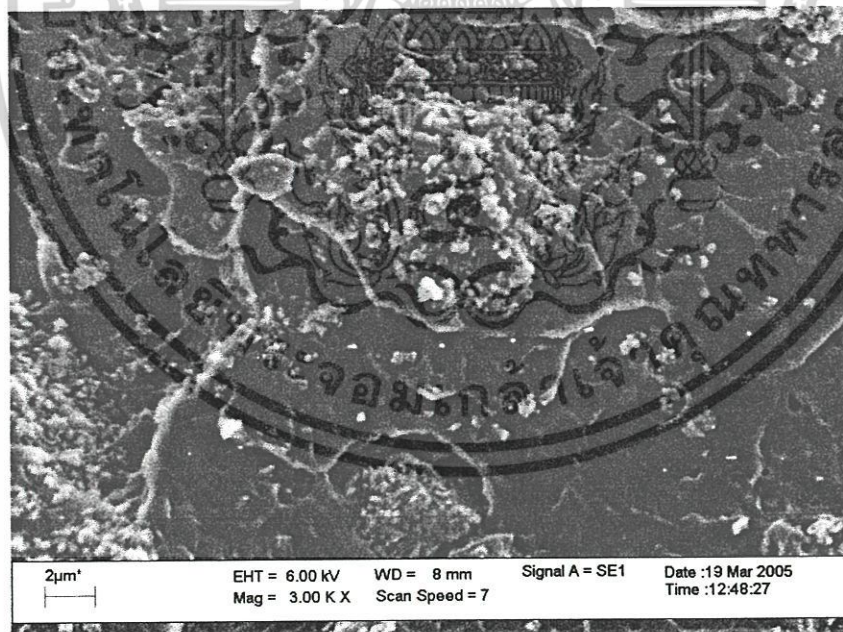
รูปที่ ค-5 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 5

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

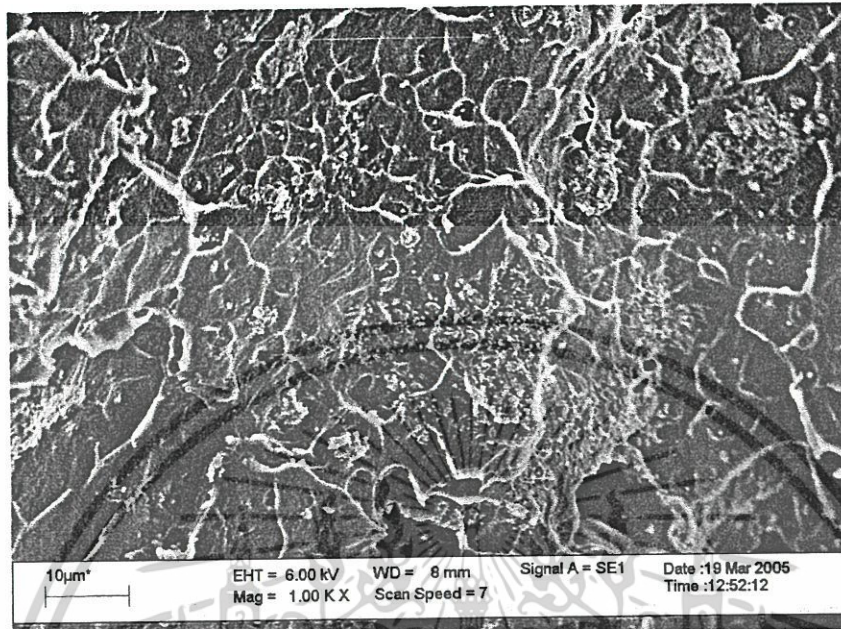


(b)

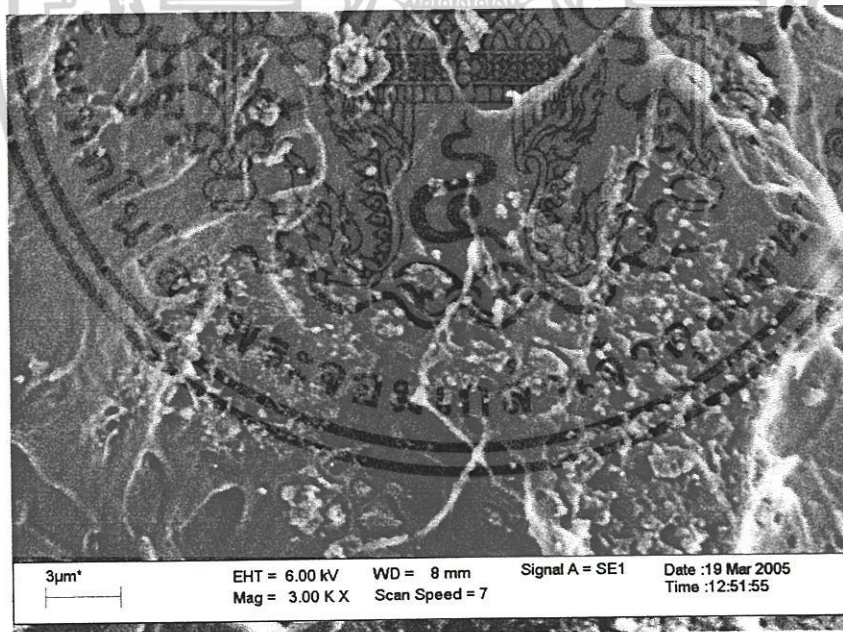
รูปที่ ก-6 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 6

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

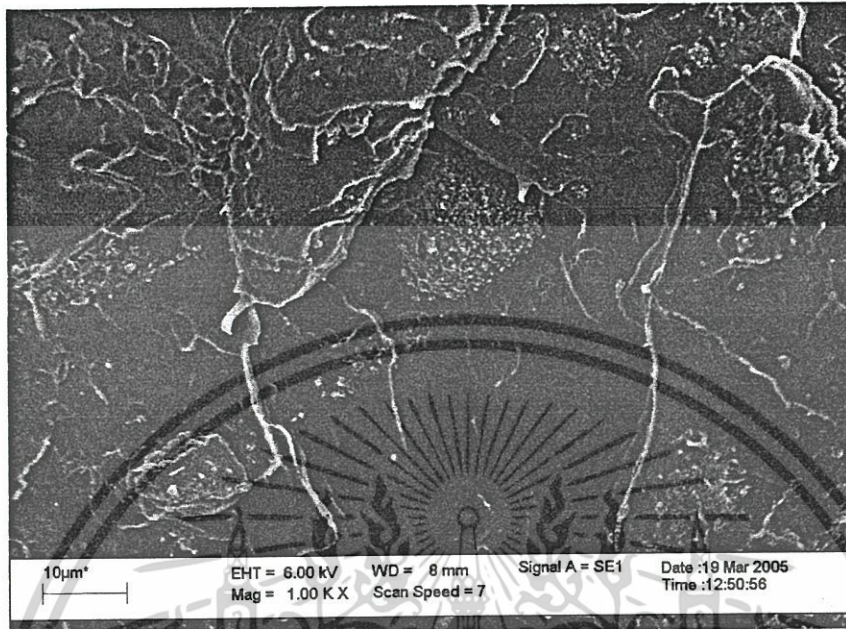


(b)

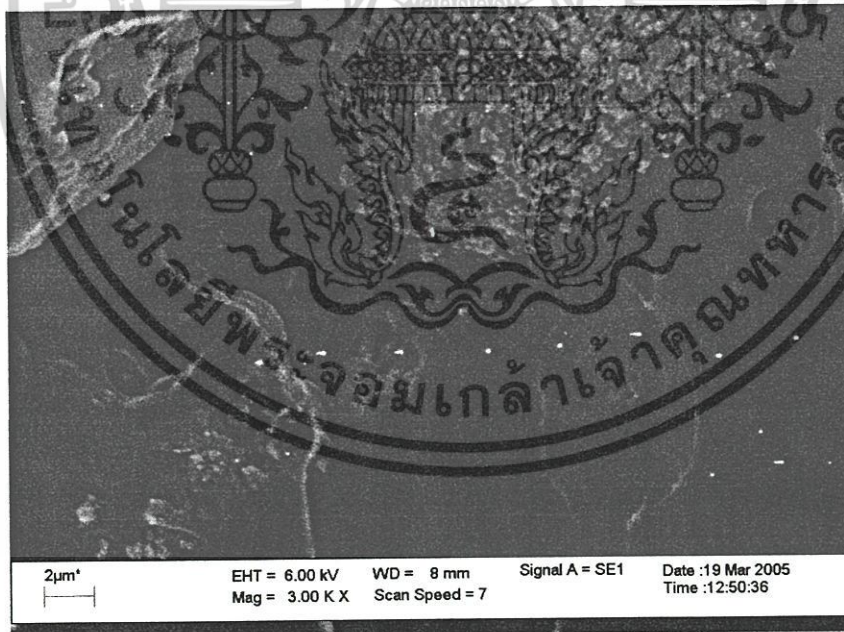
รูปที่ ก-7 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 7

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

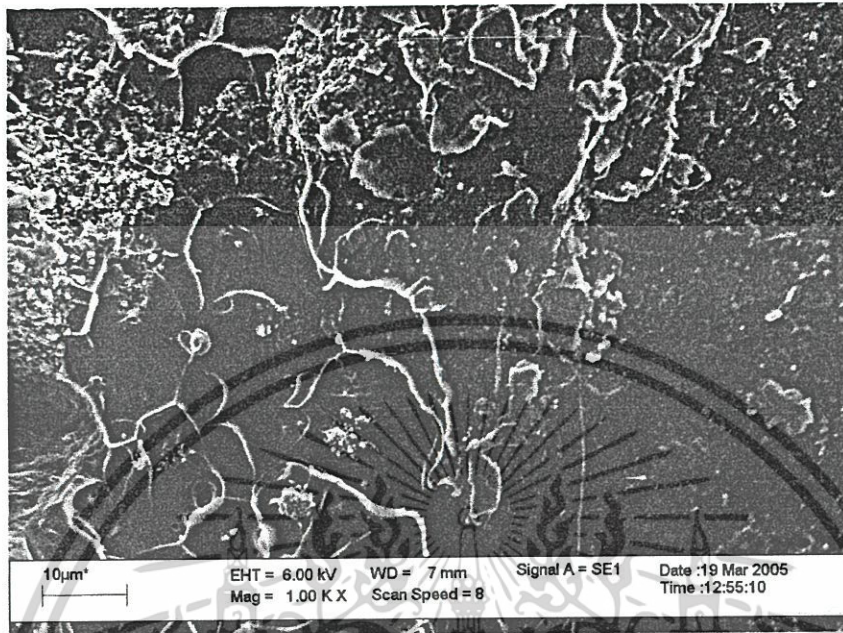


(b)

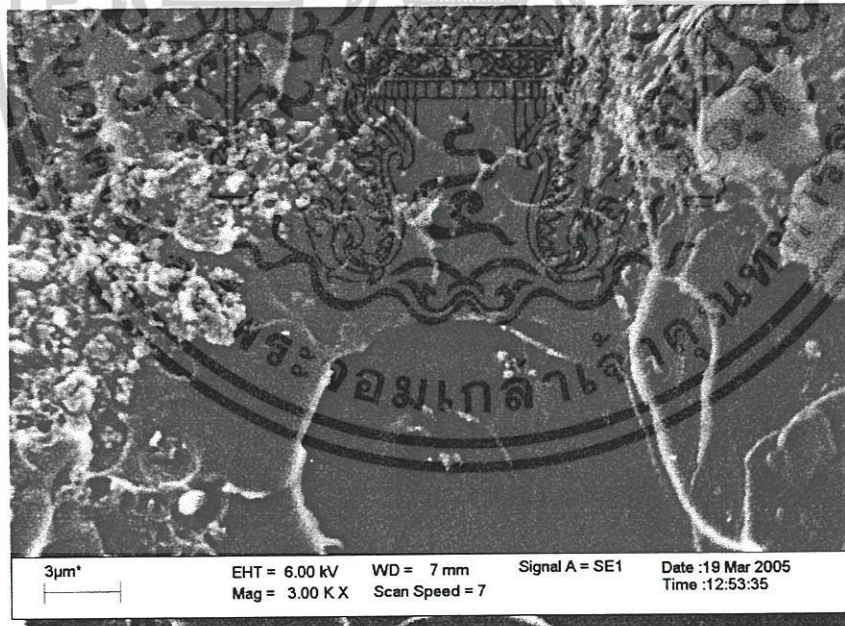
รูปที่ ค-8 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 8

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

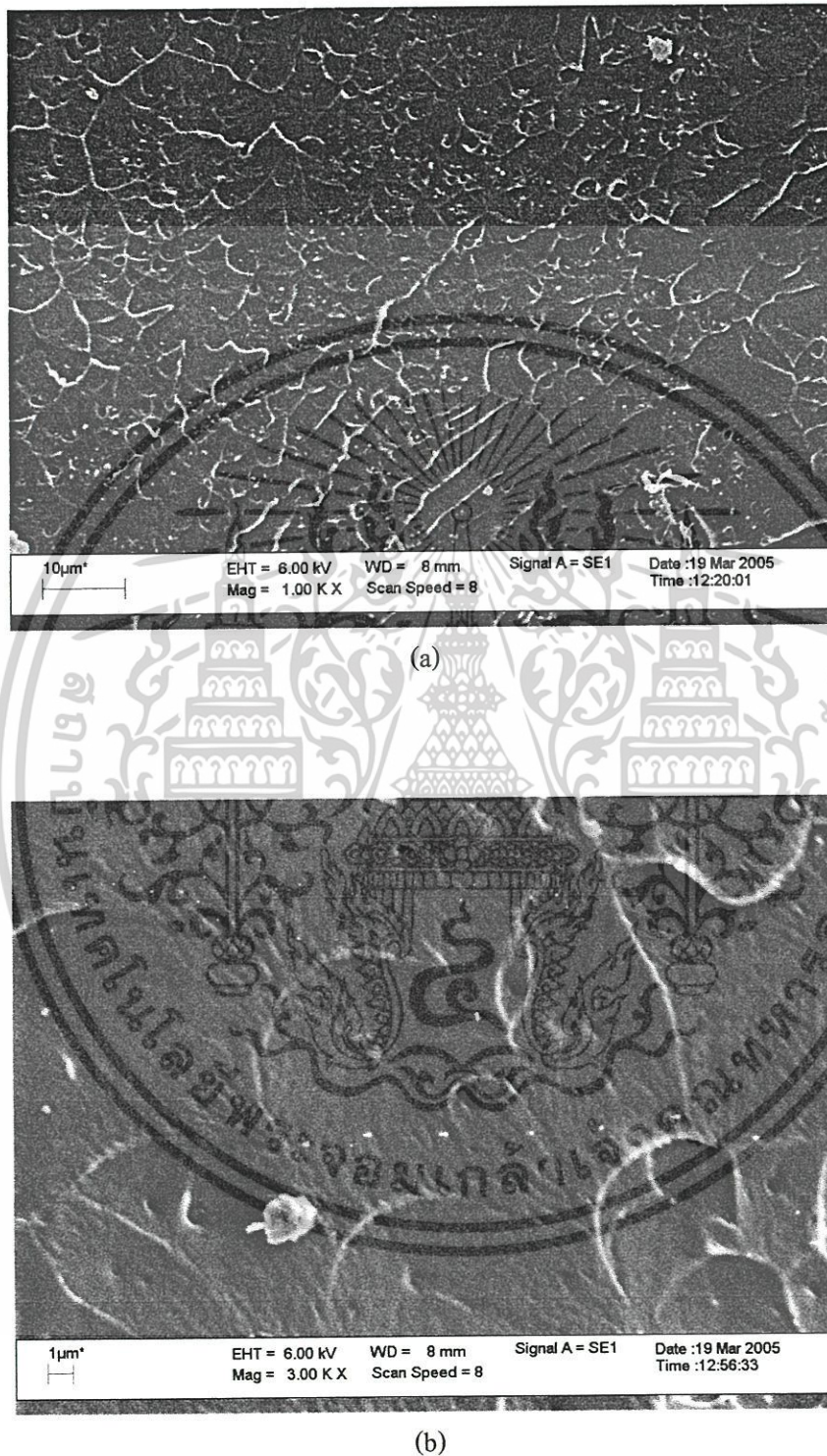


(b)

รูปที่ ก-9 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 9

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-10 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ PMMA/CS สูตร 10

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	PMMA:CS	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย ( $g/cm^3$ )
1:9	1:9	1.5975	1.6096	1.3934	1.5335
2:8	2:8	1.5738	1.6240	1.6428	1.6135
3:7	3:7	1.4577	1.5779	1.4902	1.5086
4:6	4:6	1.3076	1.4878	1.4464	1.4139
5:5	5:5	1.2350	1.3705	1.3487	1.3181
6:4	6:4	1.2469	1.2415	1.3197	1.2694
7:3	7:3	1.1709	1.2417	1.1308	1.1811
8:2	8:2	1.1492	1.2252	1.1269	1.1671
9:1	9:1	1.0518	1.1412	1.0870	1.0933
10:0	10:0	0.9186	1.0397	1.0588	1.0057

ตาราง ง ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	อัตราส่วน PMMA:CS	ความแข็งแรงกด ณ จุดเสียหาย (MPa)				ความแข็งแรงกดเฉลี่ย (MPa)
		1	2	3	4	
1	1:9	30.45	26.22	25.92	28.07	27.67
2	2:8	57.16	36.70	45.34	42.97	45.54
3	3:7	82.24	87.48	89.03	90.69	87.36
4	4:6	67.15	89.66	89.08	93.66	84.89
5	5:5	78.74	89.78	72.84	78.39	79.94
6	6:4	65.44	71.36	60.32	63.18	65.08
7	7:3	55.67	74.37	40.27	50.61	55.23
8	8:2	44.67	80.87	55.90	64.78	61.56
9	9:1	65.20	58.32	56.65	51.06	57.81
10	10:0	56.12	57.72	54.34	47.44	53.91

ตาราง จ-1 ความแข็งแรงกด ณ จุดเสียหาย

### การคำนวณค่าความแข็งแกร่ง ณ จุดเสียดสภาพ

การคำนวณค่าความแข็งแกร่ง ณ จุดเสียดสภาพสามารถคำนวณหาได้จาก

$$\text{ค่าความแข็งแกร่ง} = \frac{F_m}{A}$$

โดยกำหนดให้

- $F_m$  คือ ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียดสภาพ (N)  
 เนื่องจากชิ้นงานไม่ได้เกิดการแตกหักเมื่อรับแรง แต่จะเกิดการยุบตัวลงจึง  
 ทำให้ลักษณะของกราฟไม่มีจุดสูงสุดที่เกิดจากการรับแรงแล้วเกิดการแตกหัก  
 ดังนั้นในการคำนวณหา ค่าแรงสูงสุด ( $F_m$ ) โดยการตัดกันของเส้นกราฟ ณ จุด  
 ที่มีความชันเปลี่ยนแปลง
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ( $\pi R^2 / 2$ ) หน่วย มิลลิเมตร

สูตร	อัตราส่วน PMMA:CS	ค่ามอดุลัส ณ จุดเสียดภาพ (MPa)				ค่ามอดุลัสเฉลี่ย (MPa)
		1	2	3	4	
1:9	1:9	204.64	83.20	139.57	205.91	158.33
2:8	2:8	385.12	219.68	413.36	394.23	353.10
3:7	3:7	593.77	862.83	663.32	938.73	764.66
4:6	4:6	480.69	1219.34	748.32	1095.83	886.05
5:5	5:5	545.90	507.46	484.82	605.16	535.84
6:4	6:4	511.93	485.90	457.19	666.93	530.49
7:3	7:3	463.79	436.95	177.94	572.94	412.91
8:2	8:2	341.02	466.95	460.05	669.76	484.45
9:1	9:1	453.76	400.29	346.92	428.05	407.26
10:0	10:0	290.49	386.99	264.34	442.58	346.10

ตาราง จ-2 ค่ามอดุลัส ณ จุดเสียดภาพ

## การคำนวณค่ามอดูลัส ณ จุดเสียดสภาพ

การคำนวณหาค่ามอดูลัส ณ จุดเสียดสภาพสามารถหาได้โดย

$$\text{ค่ามอดูลัส ณ จุดเสียดสภาพ} = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{F_m / A}{\Delta L / L_0}$$

โดยกำหนดให้

$F_m$  คือ ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียดสภาพ (N)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

$\Delta L$  คือ ระยะของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากรับแรง (mm)  
โดยจะวัดจากจุดเริ่มต้นถึงจุดที่ชิ้นงานเสียดสภาพ

$L_0$  คือ ความหนาของชิ้นงานเริ่มต้น (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	PMMA:CS	Fm (N)	Diameter (cm)	Diameter (mm)	$A=\pi D^2/4$ (mm <sup>2</sup> )	$\sqrt{L}$ (mm)	L=ความหนา (mm)
1:9	1:9	3845.45	1.268	12.68	126.278	0.875	5.88
2:8	2:8	6681.82	1.220	12.20	116.899	0.938	6.32
3:7	3:7	9613.63	1.220	12.20	116.899	1.000	7.22
4:6	4:6	8400.00	1.262	12.62	125.086	1.031	7.38
5:5	5:5	10226.82	1.286	12.86	129.889	1.125	7.80
6:4	6:4	9119.35	1.332	13.32	139.347	0.969	7.58
7:3	7:3	8181.95	1.368	13.68	146.981	0.953	7.94
8:2	8:2	6981.82	1.414	14.14	157.032	1.000	7.67
9:1	9:1	10795.45	1.452	14.52	165.586	1.125	7.83
10:0	10:0	9375.00	1.458	14.58	166.957	1.500	7.76

ตาราง จ-3 ข้อมูลในการคำนวณความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสครั้งที่ 1

สูตร	PMMA:CS	Fm (N)	Diameter (cm)	Diameter (mm)	$A = \pi D^2 / 4$ (mm <sup>2</sup> )	$\sqrt{L}$ (mm)	L=ความหนา (mm)
1:9	1:9	3218.18	1.250	12.50	122.718	1.516	4.81
2:8	2:8	4375.00	1.232	12.32	119.210	0.984	5.89
3:7	3:7	10908.27	1.260	12.60	124.690	0.656	6.47
4:6	4:6	11645.45	1.286	12.86	129.889	0.500	6.80
5:5	5:5	12100.82	1.310	13.10	134.782	1.219	6.89
6:4	6:4	10397.18	1.362	13.62	145.695	1.078	7.34
7:3	7:3	11645.45	1.412	14.12	156.588	1.078	6.98
8:2	8:2	12271.18	1.390	13.90	151.747	1.188	6.86
9:1	9:1	8977.27	1.400	14.00	153.938	1.188	8.58
10:0	10:0	9375.00	1.438	14.38	162.408	1.250	8.38

ตาราง จ-4 ข้อมูลในการคำนวณความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสครั้งที่ 2

สูตร	PMMA:CS	Fm (N)	Diameter (cm)	Diameter (mm)	$A = \pi D^2 / 4$ (mm <sup>2</sup> )	$\sqrt{L}$ (mm)	L=ความหนา (mm)
1:9	1:9	3283.00	1.270	12.70	126.677	0.921	4.96
2:8	2:8	5618.18	1.256	12.56	123.899	0.656	5.98
3:7	3:7	11636.36	1.290	12.90	130.698	0.906	6.75
4:6	4:6	11249.00	1.268	12.68	126.278	0.844	7.09
5:5	5:5	10768.18	1.372	13.72	147.842	0.969	6.45
6:4	6:4	8608.04	1.348	13.48	142.715	0.938	7.11
7:3	7:3	6613.64	1.446	14.46	164.220	1.281	7.18
8:2	8:2	9204.56	1.448	14.48	164.675	1.625	7.07
9:1	9:1	8400.00	1.374	13.74	148.273	0.859	8.61
10:0	10:0	9500.00	1.492	14.92	174.835	1.406	6.84

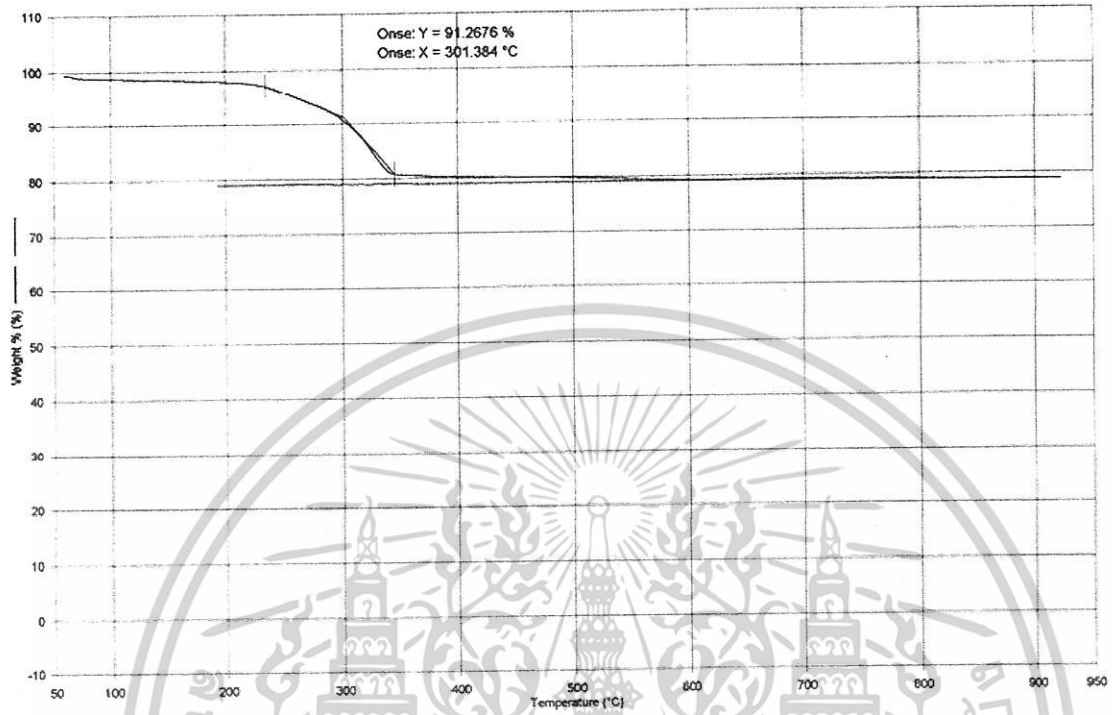
ตาราง จ-5 ข้อมูลในการคำนวณความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสครั้งที่ 3

สูตร	PMMA:CS	Fm (N)	Diameter (cm)	Diameter (mm)	A ( $\pi D^2/4$ ):mm <sup>2</sup>	$\nabla L$ (mm)	ค.หนาหักลบ (mm)
1:9	1:9	3782.73	1.310	13.10	134.782	0.781	5.73
2:8	2:8	5272.73	1.250	12.50	122.718	0.656	6.02
3:7	3:7	11780.00	1.286	12.86	129.889	0.656	6.79
4:6	4:6	12127.27	1.284	12.84	129.485	0.594	6.95
5:5	5:5	10727.27	1.320	13.20	136.848	1.000	7.72
6:4	6:4	8386.36	1.300	13.00	132.732	0.828	8.74
7:3	7:3	7159.09	1.342	13.42	141.447	1.031	8.49
8:2	8:2	9000.00	1.330	13.30	138.929	0.750	8.24
9:1	9:1	7636.36	1.380	13.80	149.571	0.797	7.99
10:0	10:0	7513.64	1.420	14.20	158.368	0.953	8.89

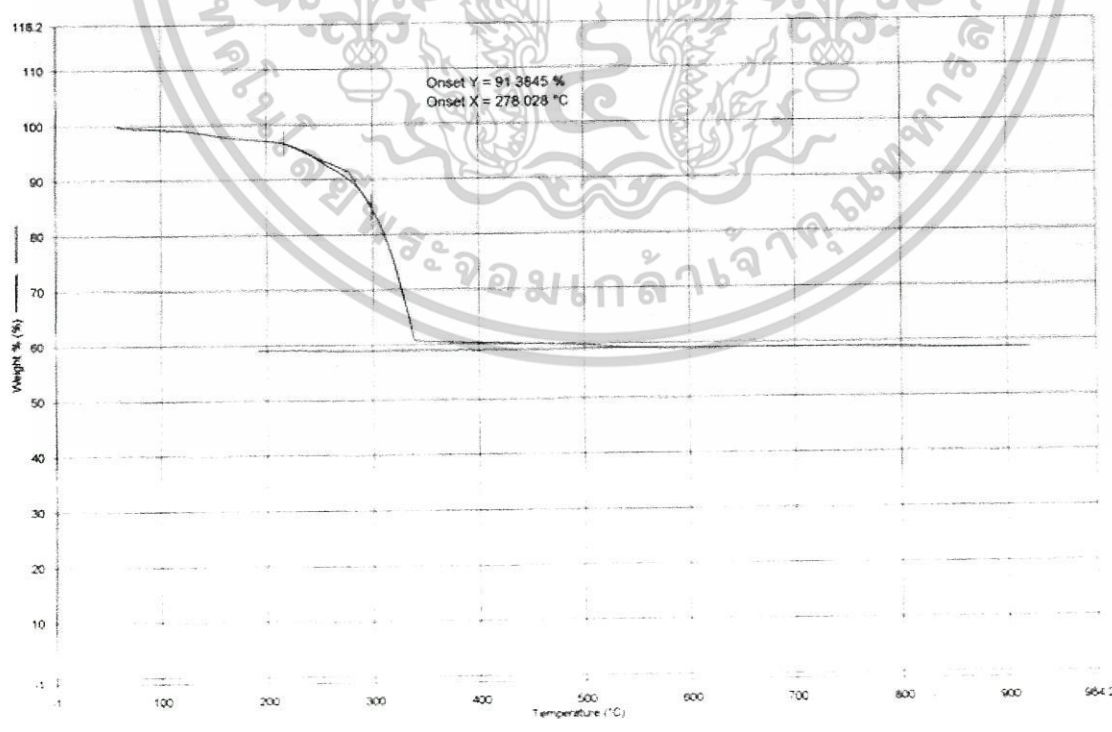
ตาราง จ-6 ข้อมูลในการคำนวณความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสครั้งที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

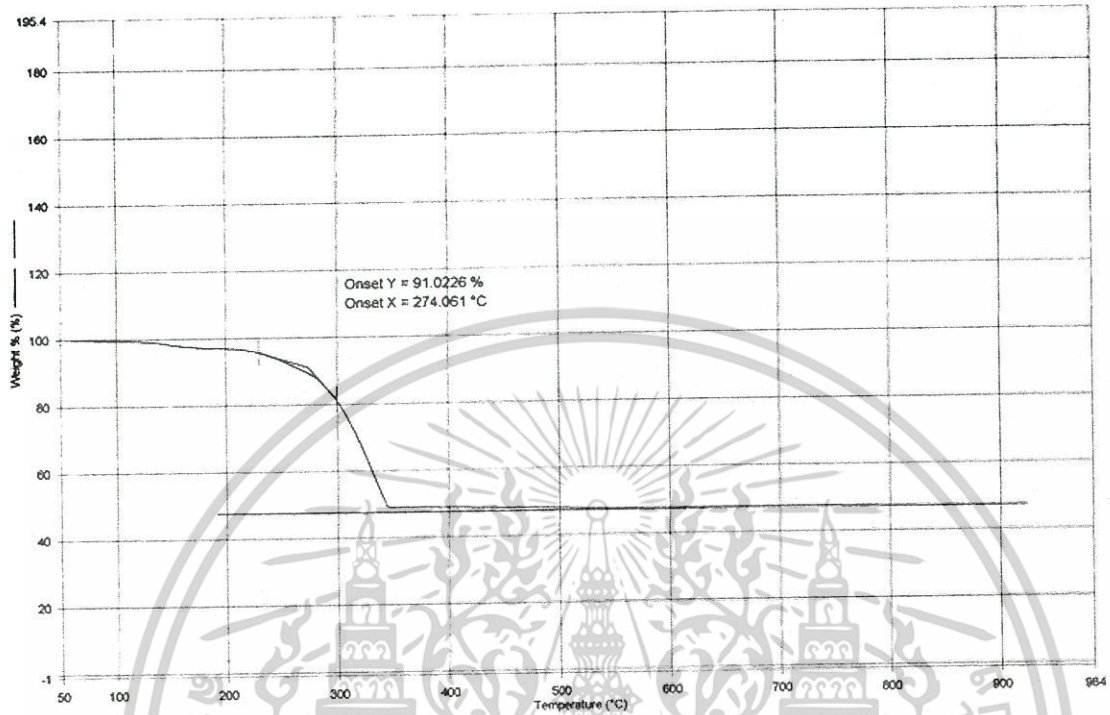


รูปที่ ๑-1 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 1 (PMMA:CS = 1:9)

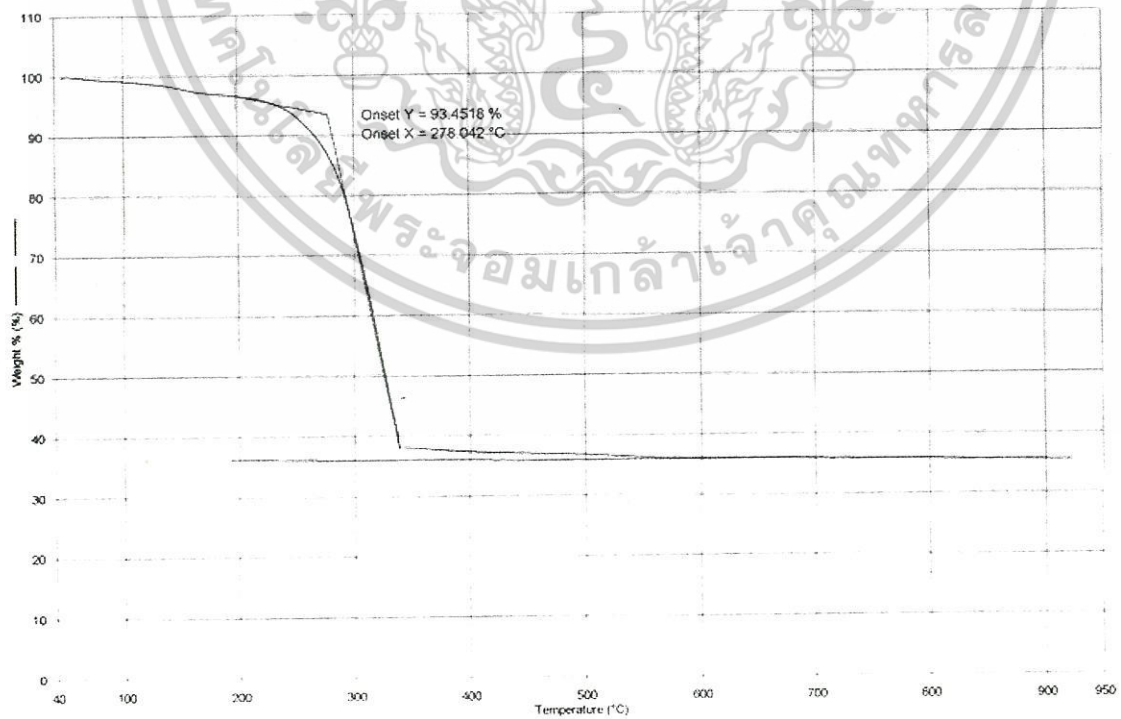


รูปที่ ๑-2 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 2 (PMMA:CS = 2:8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

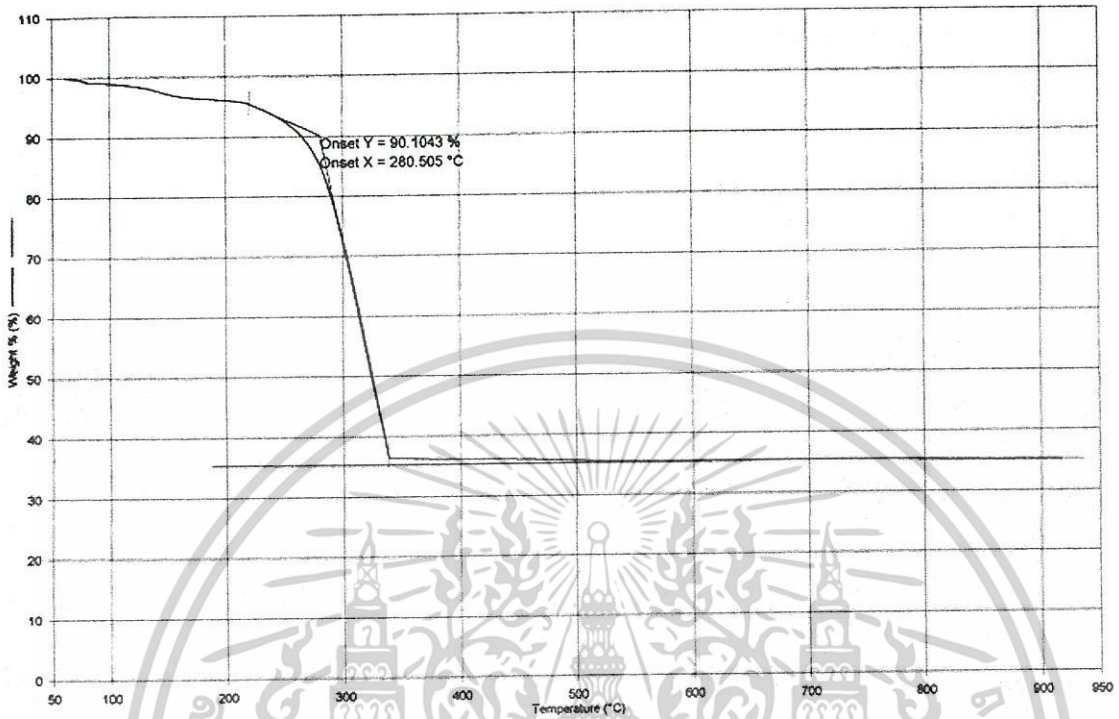


รูปที่ ๓-3 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 3 (PMMA:CS = 3:7)

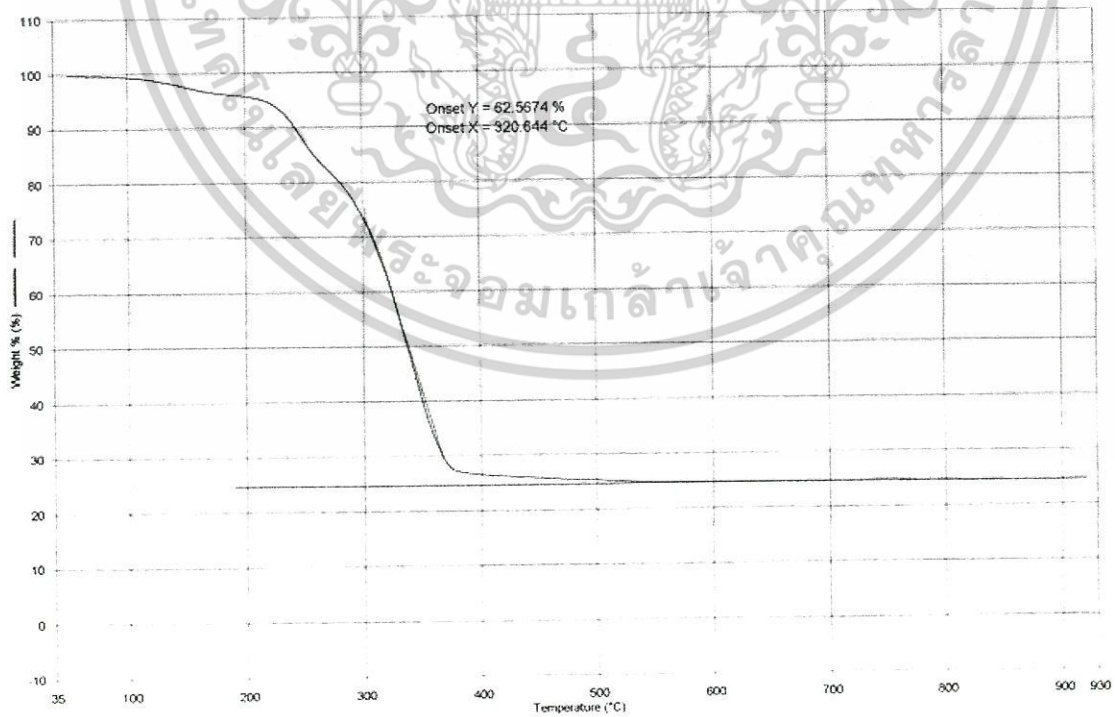


รูปที่ ๓-4 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 4 (PMMA:CS = 4:6)

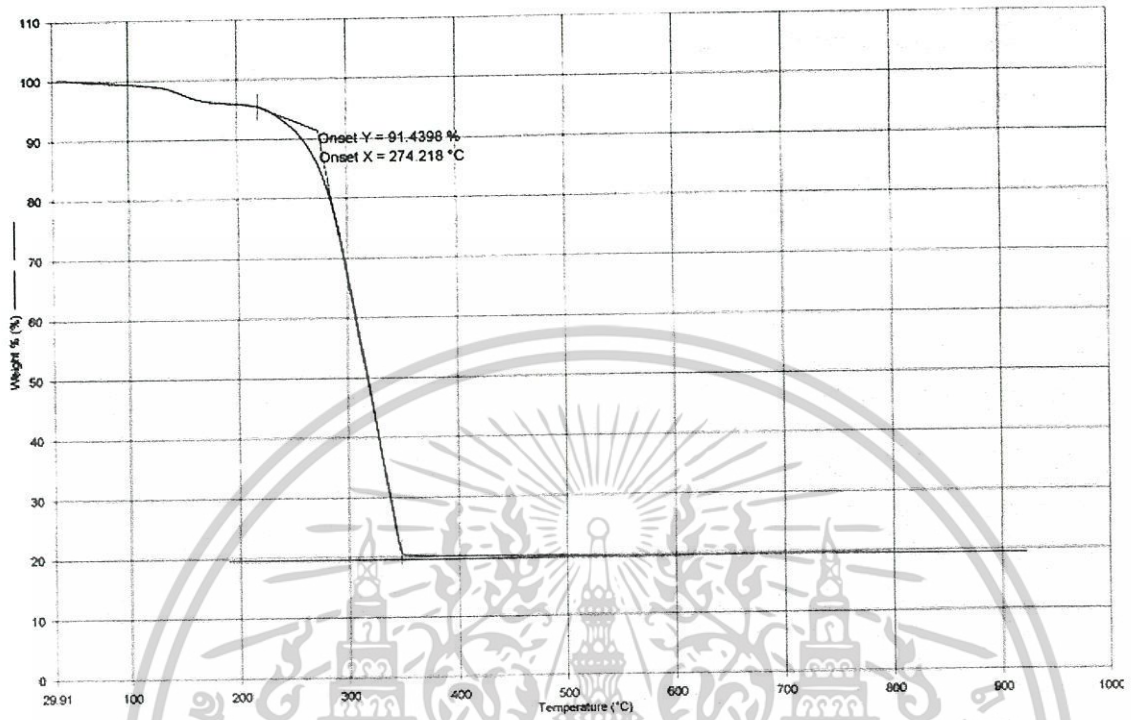
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



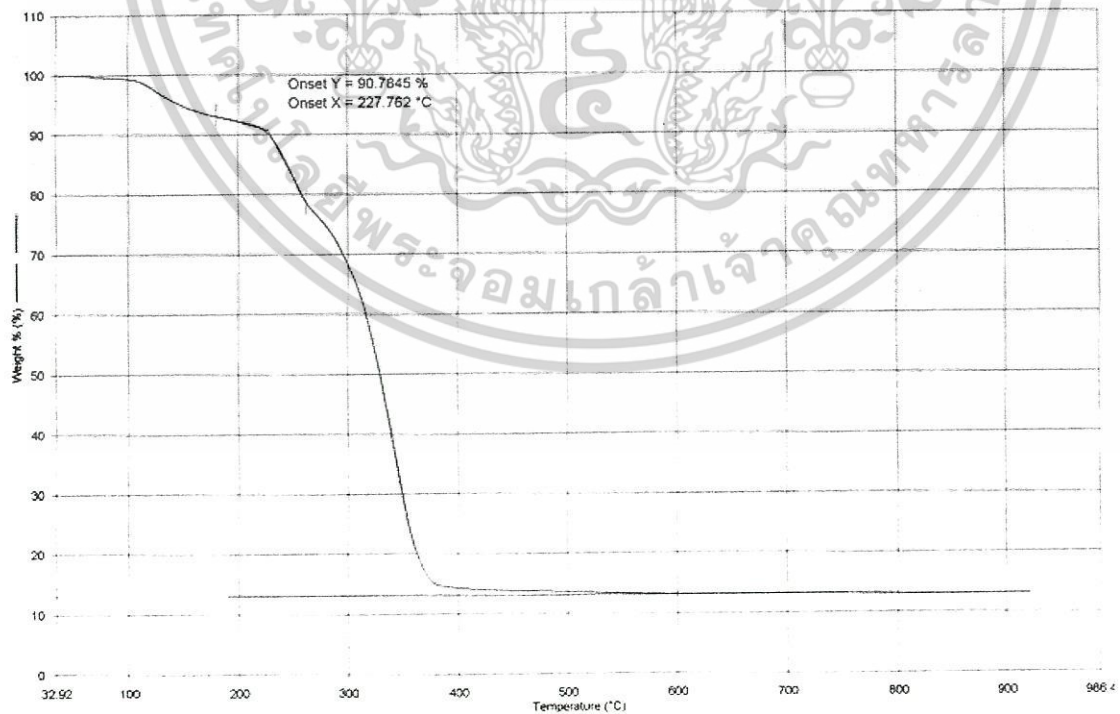
รูปที่ ๓-5 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 5 (PMMA:CS = 5:5)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
รูปที่ ๓-6 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 6 (PMMA:CS = 6:4) ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

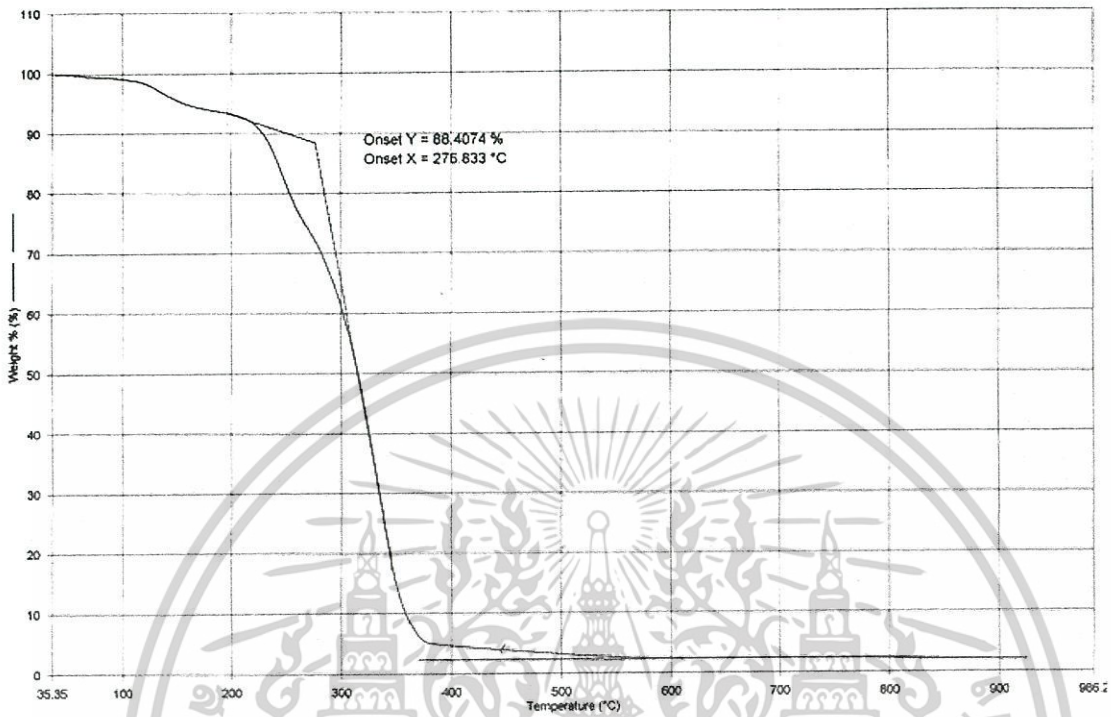


รูปที่ ๗-7 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 7 (PMMA:CS = 7:3)

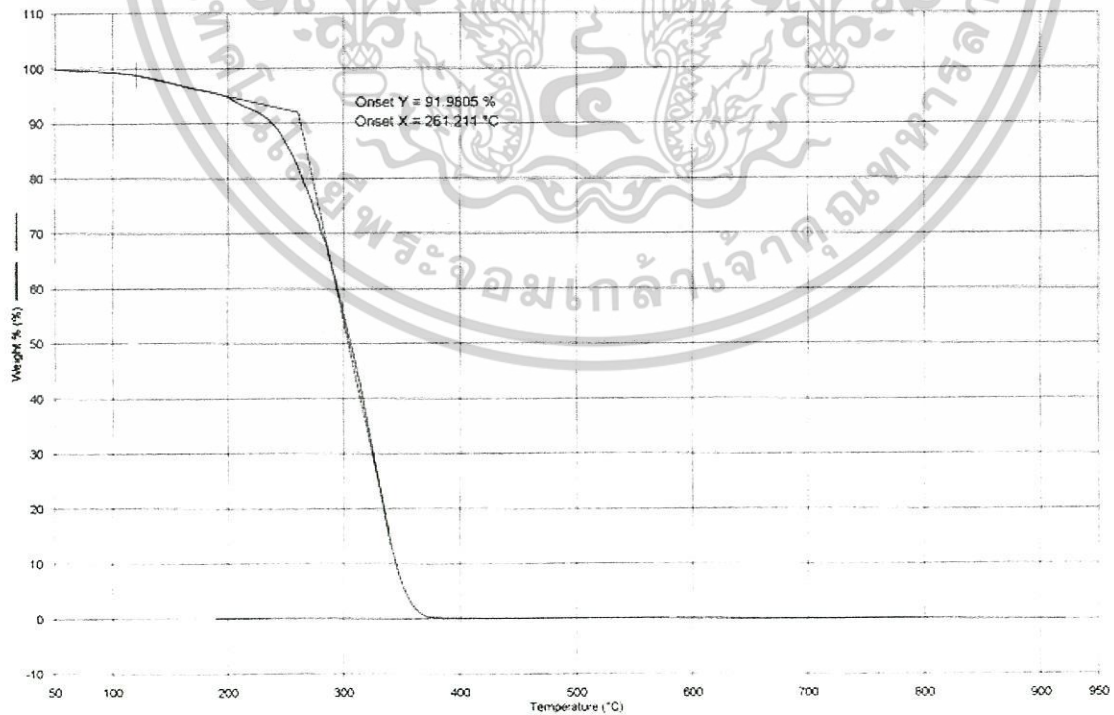


รูปที่ ๗-8 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 8 (PMMA:CS = 8:2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับวงกว้างเพื่อความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน ไม่ควรแจกจ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๙-9 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 9 (PMMA:CS = 9:1)



รูปที่ ๙-10 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์สูตรที่ 10 (PMMA:CS = 10:0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานที่ออกสตูดิโอเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-2 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตรที่ 2 (PMMA:CS = 2:8)

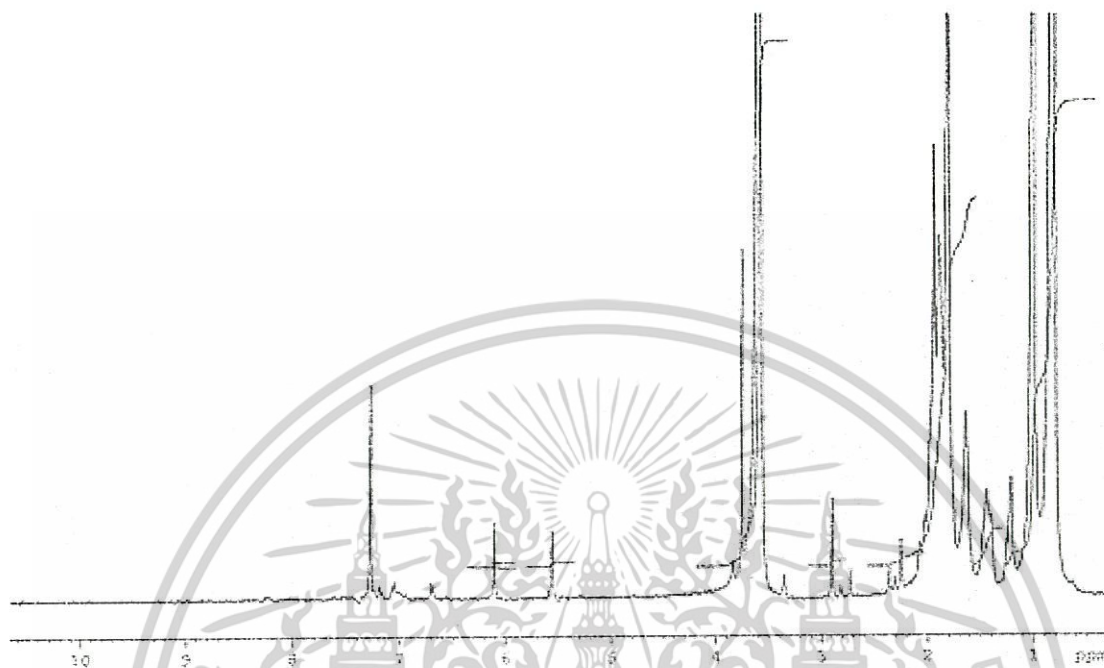
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามและประทับการเซ็นเพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-3 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตรที่ 3 (PMMA:CS = 3:7)

รูป ข-4 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตรที่ 4 (PMMA:CS = 4:6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ช-5 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตรที่ 5 (PMMA:CS = 5:5)



รูป ช-6 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตรที่ 6 (PMMA:CS = 6:4)

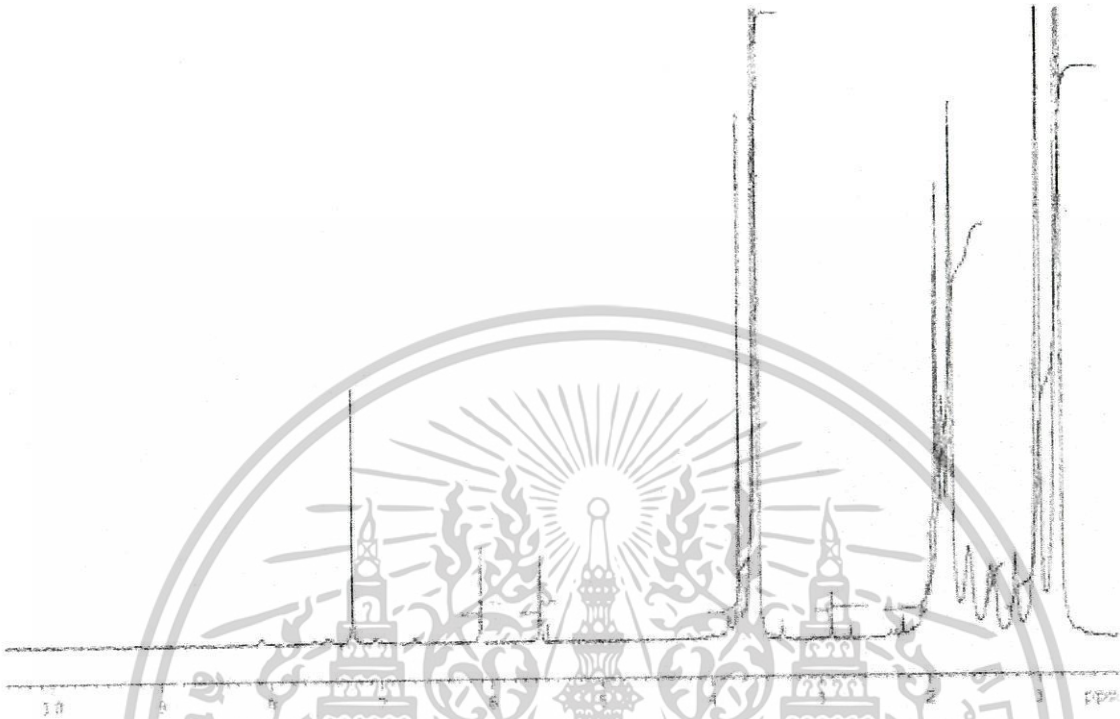
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-7 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตรที่ 7 (PMMA:CS = 7:3)

รูป ข-8 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตรที่ 8 (PMMA:CS = 8:2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข-9 สเปกตรัม <sup>1</sup>H-NMR ของซีเมนต์สูตรที่ 9 (PMMA:CS = 9:1)

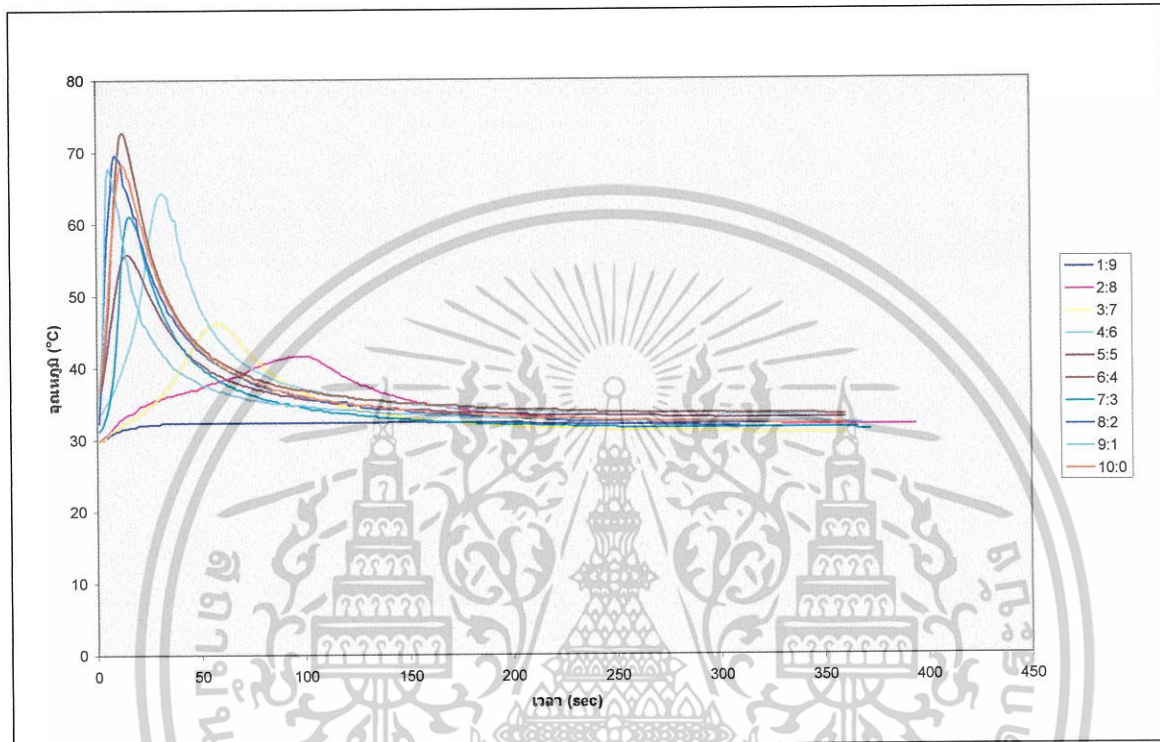


รูป ข-10 สเปกตรัม <sup>1</sup>H-NMR ของซีเมนต์สูตรที่ 10 (PMMA:CS = 10:0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

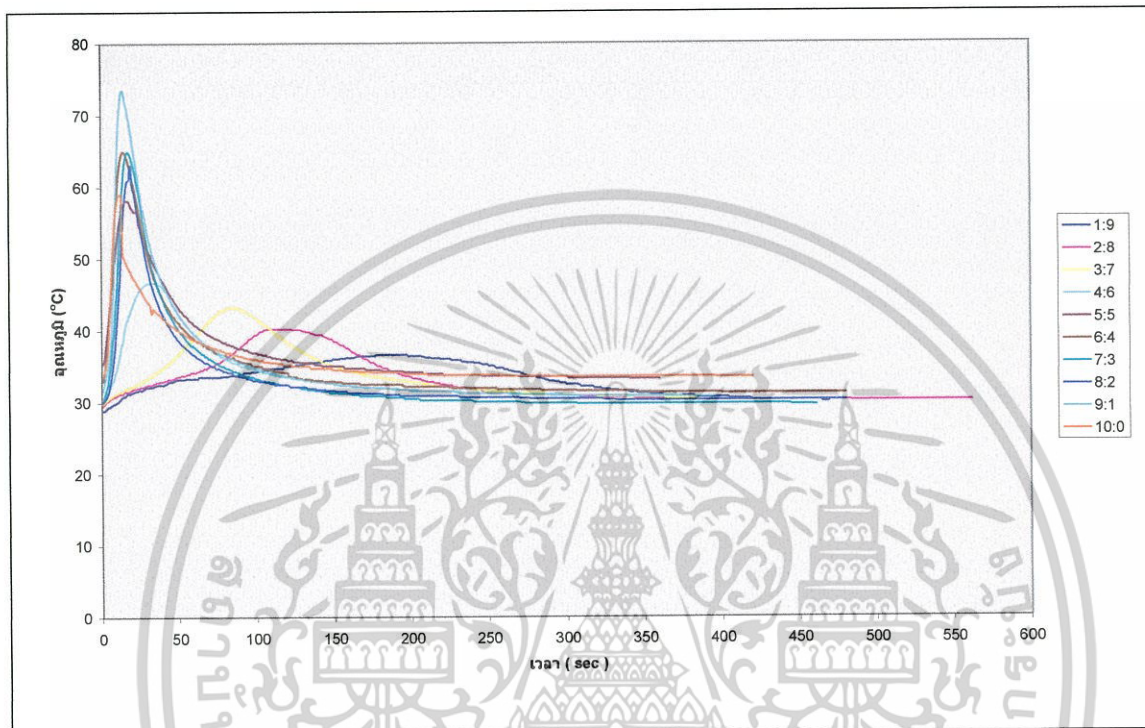


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



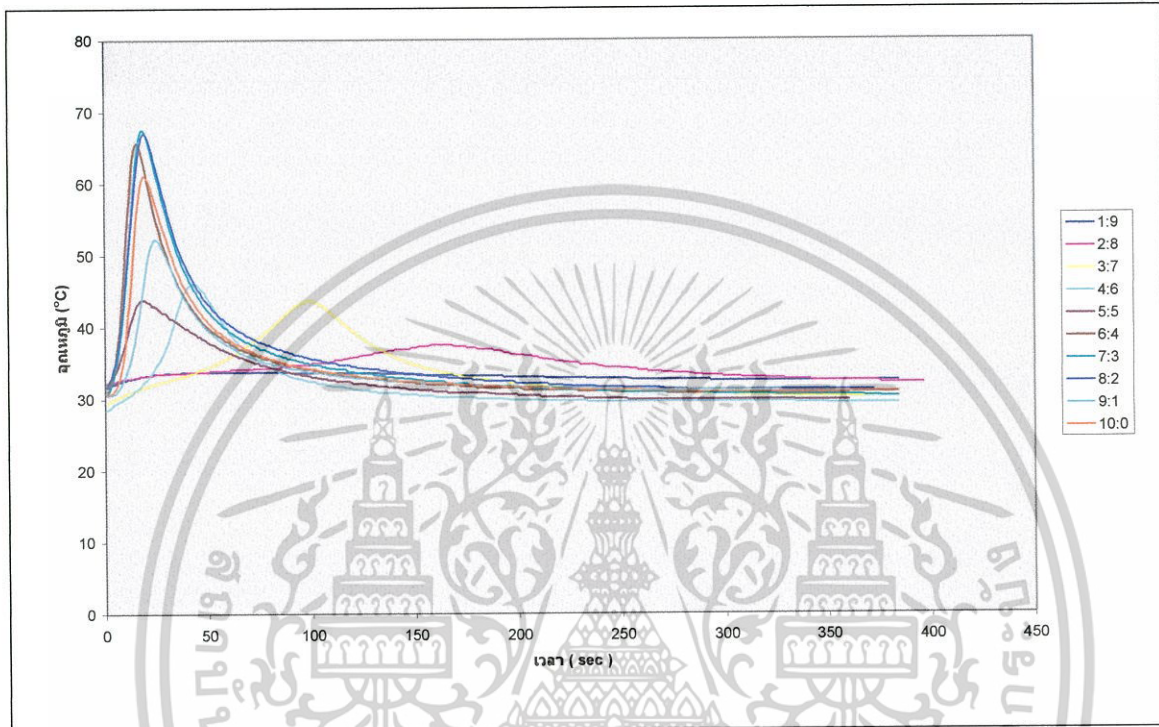
รูปที่ ๙-1 กราฟแสดงอุณหภูมิการแข็งตัวของซีเมนต์ทั้ง 10 สูตร ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗-2 กราฟแสดงอุณหภูมิจำลองการแข็งตัวของซีเมนต์ทั้ง 10 สูตร ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ที่ ๗-3 กราฟแสดงอุณหภูมิการแข็งตัวของซีเมนต์ทั้ง 10 สูตร ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	อัตราส่วน PMMA/CS	พื้นที่ให้กราฟ (°C.sec)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	1:9	15,340	24,240	14,780
2	2:8	21,430	27,720	20,230
3	3:7	20,120	21,820	20,770
4	4:6	22,650	20,280	21,330
5	5:5	19,520	21,880	17,300
6	6:4	22,460	26,820	19,600
7	7:3	20,550	24,400	25,360
8	8:2	23,580	23,800	25,190
9	9:1	19,670	23,570	19,620
10	10:0	23,290	22,680	21,660

ตารางที่ ๗ พื้นที่ได้กราฟของซีเมนต์

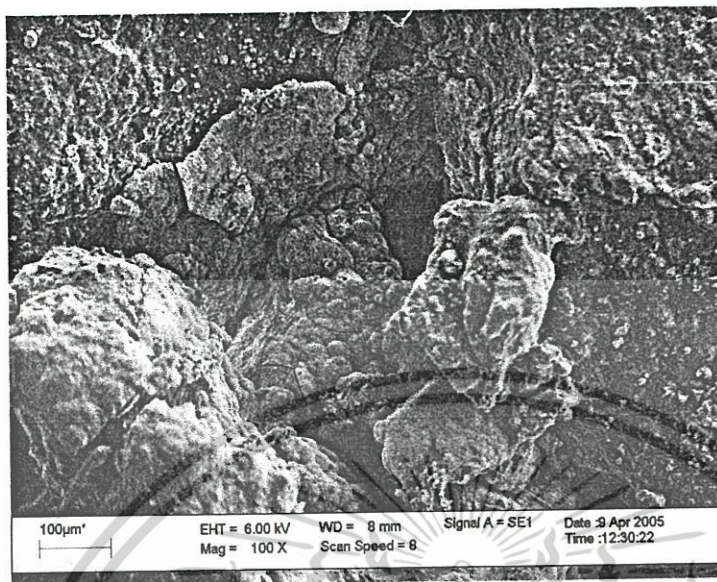
การคำนวณพื้นที่ได้กราฟ

พื้นที่ได้กราฟ (°C.s) = ผลรวม[(อุณหภูมิ ณ เวลาใด ๆ - อุณหภูมิเริ่มต้น) x 5]

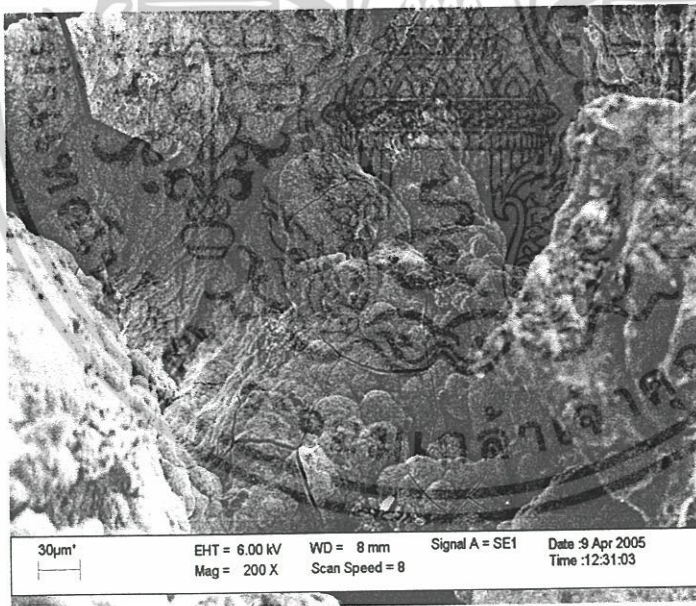
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

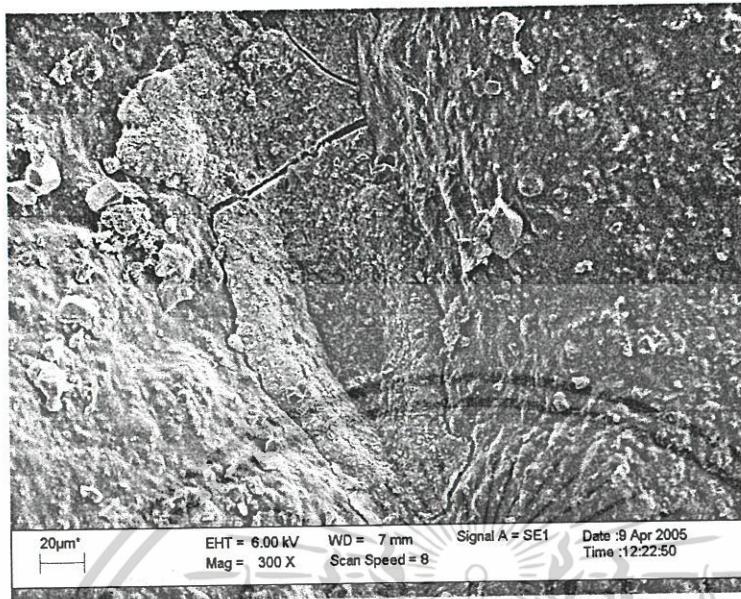


(b)

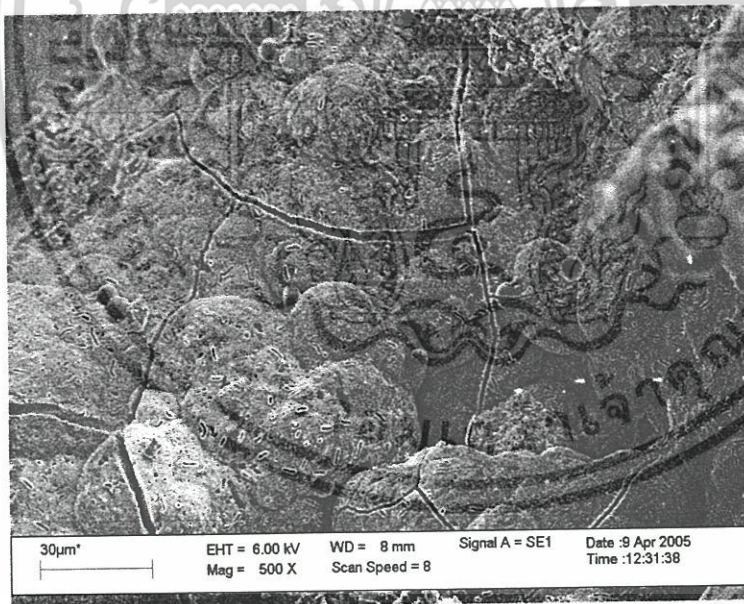
ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการเกิดขึ้นแอปไทต์ภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF

กำลังขยาย 100 เท่า (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

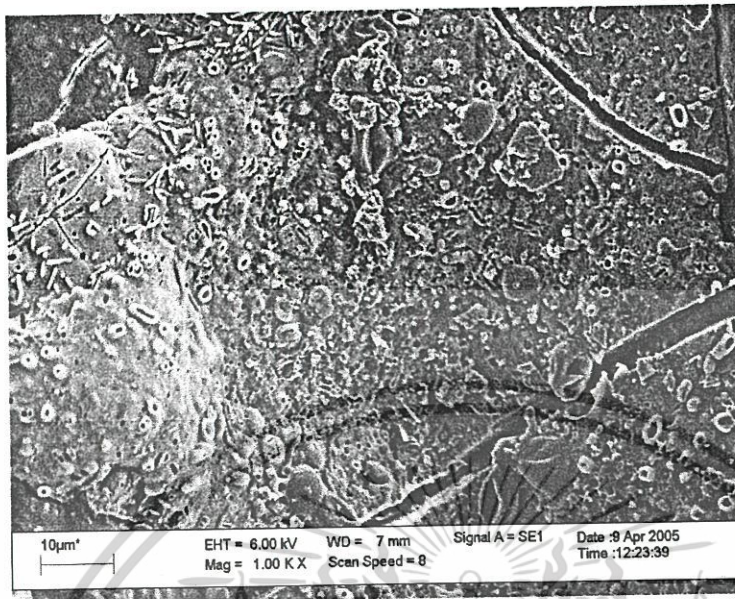


(b)

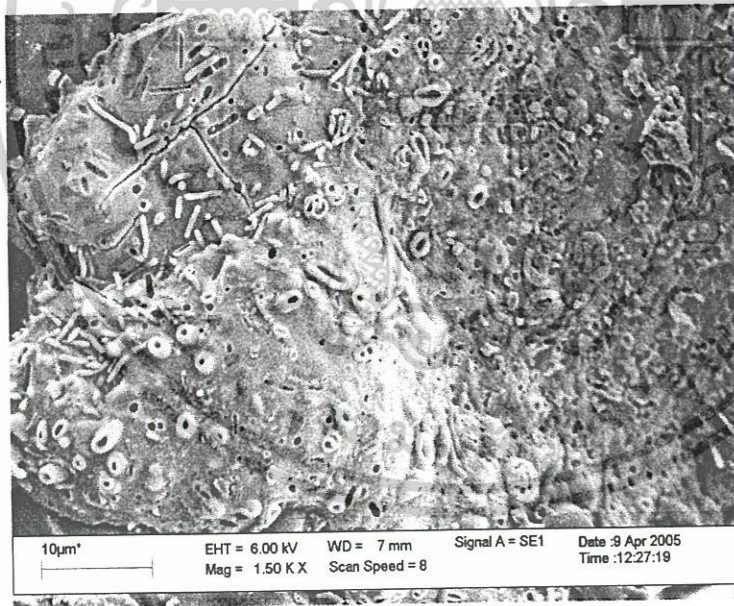
ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการเกิดชั้นแอปพาไทต์ภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF

กำลังขยาย 300 เท่า (a) กำลังขยาย 500 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

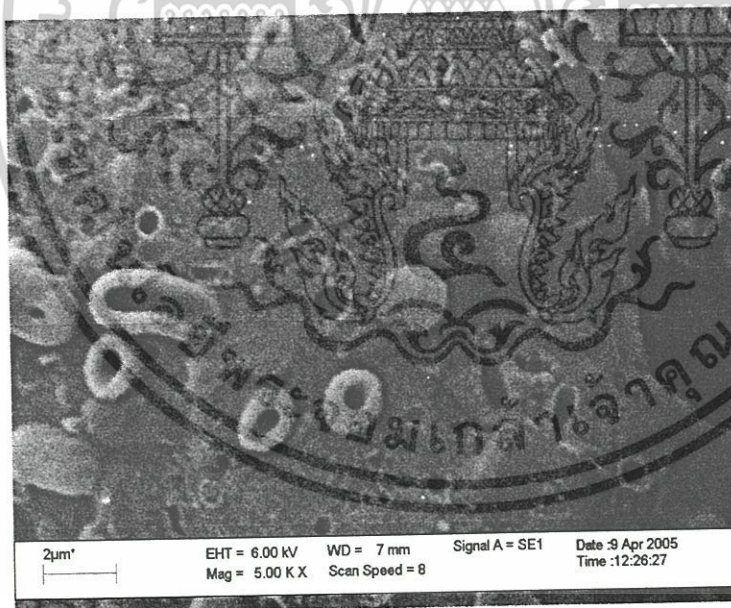
ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการเกิดขึ้นแอปไทต์ภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF

กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 1500 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการเกิดชั้นเอนาไปไทต์ภายหลังการแช่ในสารละลาย SBF

กำลังขยาย 4000 เท่า (a) กำลังขยาย 5000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้