

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมซีเมนต์แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง
พอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิ-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต
สำหรับงานทางการแพทย์



T107733



นางสาวนฤมล ต้นตินุกูล
นางสาววริยา ติมมงคล
นางสาวศิรินารถ มาภักดี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107733
วัน,เดือน,ปี 10 พ.ค. 2553

b.....1221081x.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation CS/PMMA-PHEMA Cement for Medical Application



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Industrial Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การเตรียมซีเมนต์แคลเซียมซิติเกิดกับพอลิเมอร์ร่วม
ระหว่างพอลิเมทาคริลेटและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทา
คริลेट (CS/PMMA-PHEMA) สำหรับงานทางการแพทย์

นักศึกษา

นางสาวนฤมล ตันตินุกูล 45050111
นางสาววริยา ลิ้มมงคล 45050144
นางสาวศิรินารถ มากักดี 45050152

ภาควิชา

เคมี คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา

2548

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.บุญฉมา ศิริพันธ์โนน

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย	
กรรมการ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	
กรรมการ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมซีเมนต์แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทาคริเลตและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (CS/PMMA-PHEMA) สำหรับงานทางการแพทย์
นักศึกษา	นางสาวนฤมล ตันตินุกูล 45050111 นางสาววริยา ถิมมงคล 45050144 นางสาวศรินารธ มาภักดี 45050152
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ภัทธราช มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการเตรียมซีเมนต์แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทาคริเลตและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (CS/PMMA-PHEMA) สำหรับงานทางการแพทย์ สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมซีเมนต์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ วัสดุภาคของเหลว คือ มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA), มอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-HEMA) และ เอ็น, เอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (DMT) และวัสดุภาคของแข็งคือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA), แคลเซียมซิลิเกต (CS) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สูตรที่ใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง PMMA:CS เป็น 3:7 และ 4:6 มีการกระจายตัวของอนุภาค CS ใน PMMA เมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ จึงนำ 2-HEMA มาผสมลงในซีเมนต์ทั้งสองสูตรนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์ให้ดียิ่งขึ้น โดยได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง MMA:HEMA ในวัสดุภาคของเหลวในช่วง 0:100 ถึง 100:0 โดยน้ำหนัก สารตั้งต้นทั้งสองส่วนจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ซีเมนต์เซตตัวและคงรูป ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน จะมีการคายความร้อนเกิดขึ้น ส่งผลถึงอุณหภูมิซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 37.6 °C จากอุณหภูมิห้อง ซึ่งค่า Mw MWD ของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นภายในซีเมนต์ ซึ่งตรวจสอบโดยเทคนิค GPC นั้นมีค่าอยู่ในช่วง 105,000-153,000 และ 1.77-5.14 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีมอนอเมอร์ที่ยังหลงเหลืออยู่ในซีเมนต์ ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยอาศัยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์มอนอเมอร์ที่เหลืออยู่เทียบกับน้ำหนักซีเมนต์มีค่าถึง 4.5% และผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าซีเมนต์สูตรที่มีอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PMMA:CS เป็น 3:7 และมีอัตราส่วน MMA:HEMA เป็น 70:30 มีค่าความแข็งกดที่ 10% และค่ามอดูลัสของยัง เท่ากับ 2008.93 และ 269.82 นิวตัน ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation CS/PMMA-PHEMA Cement for Medical Application	
Name	Miss Narumol Tantinukul	ID 45050111
	Miss Variya Limmongkon	ID 45050144
	Miss Sirinart Marpakdee	ID 45050152
Degree	Bachelor of Science	
Program	Industrial Chemistry	
Academic Year	2006	
Special Project Advisor	Asst.Prof.Dr. Punnama Siripunnon	
Special Project Co-Advisor	Asst.Prof.Dr. Pathavuth Monvisade	

ABSTRACT

This special project studied on preparation of Calcium Silicate/Poly(methyl methacrylate)-co-2-Poly(hydroxyl ethyl methacrylate) (CS/PMMA-co-HEMA) for medical application. The start materials consisted of two main component which are liquid phase i.e., Methyl methacrylate monomer (MMA), 2-Hydroxy ethyl methacrylate monomer (2-HEMA) and N, N-4-dimethyltoluidene (DMT) activator and solid phase i.e., Poly(methyl methacrylate), Calcium Silicate and Benzoyl Peroxide (BPO). The ratios of PMMA:CS were fixed at 3:7 and 4:6. The weight ratios of MMA:HEMA were varied between 100:0 and 0:100 by weight. After well mixing the monomers were polymerizations to copolymer at ambient temperature resulting in cylindrical cement. During polymerization process, the exothermic reaction was occurred resulting in the raise of temperature up to 37.6 °C from room temperature. Mw and MWD of polymerization in the cements characterized by GPC are in the range of 1.05-1.53 x 10⁵ and 1.77-5.14 respectively. However, small amount of monomers left from the cement was observed by ¹H-NMR. The calculation results from NMR showed the unreaction monomers up to 4.5% mol/wt of cement. The results from mechanical properties testing showed that cement from formula 2 (MMA:HEMA is 70:30) gave the highest values strength at 10 % and compressive strength of 2008.93 and 269.82 N respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิจกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือ ความร่วมมือตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยจากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปยุตธมา ศิริพันธ์ โนน และ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่กรุณาแนะนำและให้คำปรึกษาและกรุณาตรวจทาน แก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย และ ผศ.ดร. ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ อาจารย์คณะกรรมการที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พัทธนี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค NMR

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการดำเนินงานมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ
อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษขอความขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นฤมล ตันตินุกูล
วริยา ลิ้มมงคล
ศิรินารด มากักดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิจกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 แคลเซียมซิติเกต	4
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิติเกต	4
2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ	4
2.1.3 สมบัติเด่นของแคลเซียมซิติเกต	4
2.1.4 การประยุกต์การใช้งานของแคลเซียมซิติเกต	4
2.1.5 การสังเคราะห์แคลเซียมซิติเกต	5
2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต	5
2.2.1 การสังเคราะห์แบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระ	7
2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์	10
2.3 พอลิ 2-ไฮดรอกซีเมทิลเมทาคริเลต	11
2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ	11
2.3.2 สมบัติเด่นของพอลิ 2-ไฮดรอกซีเมทิลเมทาคริเลต	11
2.4 วัสดุเซรามิกชีวภาพ	12
2.4.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1	สารเคมี	20
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือ	21
3.3	การสังเคราะห์แคลเซียมซิติเกต	23
3.4	การสกัดด้วยขี้ผึ้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต	25
3.5	การสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลต	27
3.6	การเตรียมซีเมนต์ระหว่างแคลเซียมซิติเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับ 2-ไฮดรอกซีเมทิลเมทาคริเลต	28
3.6.1	การเตรียมแม่แบบซิลิโคน	28
3.6.2	การเตรียมซีเมนต์เพสต์	28
3.6.2.1	การวัดอุณหภูมิของซีเมนต์	28
3.6.2.2	การผสมซีเมนต์เพสต์	29
3.7	การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์	30
3.7.1	การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลือ	30
3.7.2	การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
3.7.3	การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลและการหาการกระจายของโมเลกุลของสายโซ่	30
3.7.4	การหาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	30
3.7.5	การหาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี	31
3.8	การทดสอบความแข็งกดของซีเมนต์	31

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1	ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมซิติเกตที่สังเคราะห์ได้	32
4.2	การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้	33
4.3	ซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	33
4.3.1	ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค DSC	33
4.3.2	โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์	35
4.3.3	ความหนาแน่นของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4	การทดสอบสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	38
4.3.5	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	40
4.3.6	ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล PMMA-PHEMA ในซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA ด้วยเทคนิค GPC	41
4.3.7	ผลการวิเคราะห์หามอนอเมอร์ที่คงเหลือจากเทคนิค NMR	43
4.3.8	ผลการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์	47
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	50
5.1	สรุปผลการทดลอง	50
5.2	ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง		52
ภาคผนวก ก	รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของ CS จากฐานข้อมูล JCPDS	54
ภาคผนวก ข	โครมาโทแกรมจากเครื่อง GPC	58
ภาคผนวก ค	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SEM	65
ภาคผนวก ง	สมบัติความแข็งกด	76
ภาคผนวก จ	การหาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์	86
ภาคผนวก ฉ	นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม	89
ภาคผนวก ช	อุณหภูมิในการแข็งตัวของซีเมนต์	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	13
ตารางที่ 2.2	13
ตารางที่ 2.3	18
ตารางที่ 3.1	29
ตารางที่ 4.1	32
ตารางที่ 4.2	40
ตารางที่ 4.3	42
ตารางที่ 4.4	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิติเลต	24
รูปที่ 3.2 แผนงานการสกัดด้วยยั้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต	26
รูปที่ 3.3 แม่แบบซิติโคน	28
รูปที่ 3.4 แสดงการเผาด้วยตะเกียงบุนเซน	31
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้ภายหลังการแคลไซน์ ที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	33
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (T _g) ของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	34
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการกระจายตัวของ CS ภายในซีเมนต์	36
รูปที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	38
รูปที่ 4.5 ค่าค่าความแข็งแรงกดที่ 10 เปอร์เซ็นต์ (Compressive strength at 10%) ของซีเมนต์	38
รูปที่ 4.6 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ของซีเมนต์	39
รูปที่ 4.7 สเปกตรัม ¹ H-NMR ของ พอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ในซีเมนต์สูตร 2 (PMMA:CS เป็น 3:7 และ MMA:HEMA เป็น 70:30)	44
รูปที่ 4.8 อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดต่อน้ำหนักของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	48
รูปที่ 4.9 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำหนักโดยเฉลี่ยของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BPO	Benzoyl peroxide
CS	Calcium silicate
CS/PMMA-PHEMA	Calcium silicate / Poly (methyl methacrylate) – Poly (2-hydroxy ethyl methacrylate)
MMA	Methyl methacrylate
PMMA	Poly (methyl methacrylate)
HEMA	2- Hydroxyethyl methacrylate
TEOS	Tetraethylorthosilicate
GPC	Gel Permeation Chromatography
XRD	X-ray Diffraction
XRF	X-ray Fluorescence
SEM	Scanning Electron Microscopy
DSC	Differential Scanning Calorimetry



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในปัจจุบันวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้ก้าวหน้าไกล จนสามารถหาวิธีการใหม่ๆ เพื่อรักษาหรือพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยให้ดียิ่งขึ้น ด้วยการหาสิ่งทดแทนส่วนต่างๆ ที่ร่างกายสูญเสียไปหรือไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ การรักษาโรคโดยวิธีการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะจากเนื้อเยื่อธรรมชาติ (Transplantation) เป็นการผ่าตัดเอาเนื้อเยื่อหรืออวัยวะเดิมที่มีข้อบกพร่องออกแล้วแทนที่ด้วยอวัยวะใหม่ ซึ่งได้จากตัวผู้ป่วยเองหรือจากผู้บริจาคหรือทำการเปลี่ยนถ่ายจากวัสดุสังเคราะห์ ถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ประสบความสำเร็จในทางการแพทย์

สำหรับผู้ป่วยที่ร่างกายไม่ได้รับความเสียหายมากและยังสามารถใช้อวัยวะเดิมของตนได้ ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องทำการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ เพียงแต่ทำการซ่อมแซมส่วนที่ได้รับความเสียหาย เช่น ทำการเชื่อมกระดูกแทนการเปลี่ยนกระดูก ก็สามารถทำให้อวัยวะนั้นกลับมาใช้งานได้เหมือนเดิม ซึ่งในการเชื่อมต่อรอยร้าวของกระดูกนั้น ควรใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดและมีสมบัติในการยึดติดที่ดี ซึ่งก็คือซีเมนต์นั่นเอง ดังนั้นซีเมนต์จึงถูกนำมาใช้สำหรับซ่อมแซมส่วนที่บกพร่องและทำหน้าที่เสมือนเป็นกาวยึดกระดูกเพื่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้อาจใช้ในการอุดหรือซ่อมแซม รอยแตกที่เกิดขึ้นในกระดูกและฟัน เพื่อป้องกันการแพร่ของรอยแตกและทำให้อวัยวะบริเวณนั้นสามารถกลับมาใช้งานดังเดิม

ประมาณปี ค.ศ. 1961 [1] ศัลยแพทย์ชาวอังกฤษ John Charnley ได้นำซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริลิต (PMMA cement) มาใช้ในการยึดติดกระดูกกับกระดูกสะโพกเทียม ตั้งแต่นั้นมาก็ได้มีการนำ PMMA cement มาใช้ในวงการแพทย์กันอย่างแพร่หลาย แต่ภายหลังพบว่าก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ไม่เกิดการเชื่อมติดกับกระดูก ความแข็งแรงเชิงกลต่ำ เกิดความร้อนสูงขณะแข็งตัวเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและก่อให้เกิดอาการแพ้ เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าว มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาซีเมนต์เชื่อมกระดูกที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive Bone Cement) ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถเกิดการเชื่อมติดกันกับเนื้อเยื่อของกระดูกได้ เมื่อแข็งตัวพบว่ามีกายความร้อนต่ำกว่า และมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีกว่า PMMA cement

แคลเซียมซิลิเกต ชนิด Wollastonite มีการศึกษาวิจัยระบุว่า มีความว่องไวทางชีวภาพสูง สามารถกระตุ้นให้มีการก่อตัวของเนื้อเยื่อกระดูกใหม่ในรูปของไฮดรอกซีเอปาทาइटได้ในสภาวะจำลองของร่างกายมนุษย์ [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [26] ได้เตรียมซีเมนต์ระหว่างแคลเซียมซิลิเกต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ PMMA นั้นพบว่าอัตราส่วนของ PMMA : CS (Calcium Silicate) ที่มีการผสมเข้ากันดีและให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดคือ 3:7 และ 4:6 นอกจากนี้ซีเมนต์ทั้งสองสูตรมีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขณะขึ้นรูปน้อยที่สุด แต่ในการใช้งานพบว่าการถ่ายเทความร้อนของซีเมนต์นั้นยังถือเป็นอุปสรรคที่สำคัญอยู่ อย่างไรก็ตามซีเมนต์ที่ดีควรมีความยืดหยุ่นเล็กน้อยเพื่อให้มีความเข้ากันได้ดีกับร่างกาย ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาซีเมนต์โดยเตรียมจากแคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วม PMMA-PHEMA

พอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (Poly 2- hydroxyethyl methacrylate, PHEMA) เป็นอนุพันธ์ของเมทาคริเลตซึ่งมีสมบัติคล้ายพอลิเมทิลเมทาคริเลตแต่มีความอ่อนตัวมากกว่า เนื่องจากพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต นั้นมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้วัสดุที่ได้ขึ้นเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีและมีน้ำในองค์ประกอบมากทำให้ซีเมนต์ที่ได้ มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีความแข็งแรงอยู่ ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกและฟันในลักษณะที่เป็นวัสดุประกอบระหว่างแคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต พร้อมทั้งศึกษาสถานะการแข็งตัวของซีเมนต์ที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมซีเมนต์ในการเชื่อมกระดูกและฟันจากพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของซีเมนต์แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมเมทิลเมทาคริเลตและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์จากแคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมซีเมนต์จากแคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต โดยวิธีการผสมที่อุณหภูมิห้อง โดยเริ่มจากการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมและสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย จากนั้นนำวัตถุดิบที่สังเคราะห์ได้มาเตรียมซีเมนต์ ในอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตที่แตกต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแคลเซียมซิลิเกต, มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต, พอลิเมทิลเมทาคริเลต และพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ผสมวัตถุดิบในอัตราส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 แคลเซียมซิลิเกต (CS)

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกต [3]

แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate, CaSiO_3) หรือที่เรียกกันว่า Wollastonite สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ และสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ มีสูตรทางเคมีเป็น CaSiO_3 แร่ดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาของหินปูนซึ่งมีแร่ Calcite (CaO) และซิลิกาเป็นองค์ประกอบ โดยอาศัยความร้อนจากของเหลวร้อนจากปล่องภูเขาไฟ (Magma) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



แร่ Wollastonite สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ในปัจจุบันแร่ Wollastonite มีความสำคัญในการผลิตเซรามิกส์ทนความร้อน (Refractory ceramics) และที่ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี

2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

- ของแข็งสีขาว
- โครงผลึกอยู่ในรูป Triclinic
- ความแข็งกดอยู่ระหว่าง 5-5.5
- ความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.8-2.9
- ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก

2.1.3 สมบัติเด่นของแคลเซียมซิลิเกต

1. แคลเซียมซิลิเกตมีความเหนียวมากถึงแม้ว่าจะละลายได้ดีในกรดไฮโดรคลอริก แต่ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นในระหว่างการนำไปใช้งานหรือหลังจากผ่านกระบวนการผลิตแล้ว
2. แคลเซียมซิลิเกตมีความเป็นกรดต่ำสูง มี pH ประมาณ 9.9

2.1.4 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกตใช้เป็นหินตกแต่งเพื่อความสวยงาม และได้มีการนำแคลเซียมซิลิเกตไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำแคลเซียมซิลิเกตมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยมีการนำแคลเซียมซิลิเกตมาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมในร่างกายมนุษย์เพื่อทดแทนอวัยวะที่สูญเสียไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 การสังเคราะห์แคลเซียมซลิเกต

แคลเซียมซลิเกตมักจะสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโลหะเป็นแคโทดไอออนและออกซิเจนเป็นแอนไอออน

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์โดยทั่วไป ได้แก่

1. การสังเคราะห์แคลเซียมซลิเกตโดยการทำปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [4-5]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ส่วนมากจะเป็นพวกออกไซด์ผสม โดยมีขนาดอะตอมและสถานะออกซิเดชันเป็นตัวกำหนดโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์

2. การสังเคราะห์แคลเซียมซลิเกตโดยเทคนิคโซลเจล (Sol-gel synthesis) [6]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ส่วนมากจะได้เป็นสารประกอบพวกออกไซด์ผสม ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) สารตั้งต้นที่นิยมใช้คือสารจำพวกโลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) ซึ่งอาจใช้หนึ่งชนิดหรือมากกว่าก็ได้

3. การสังเคราะห์แคลเซียมซลิเกตโดยการตกตะกอนร่วม (Cocprecipitation) [7]

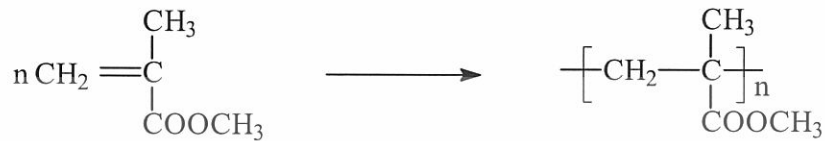
เทคนิคการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมวิธีหนึ่งที่ได้ผลดีมากที่มีคุณภาพ ทำโดยนำสารละลายที่มีแคโทดไอออนของสารที่ต้องการตกตะกอนร่วมกันไปผสมกับสารช่วยตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ตะกอนร่วมของสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น

2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA)

ในปี 1932 Rohm และ Bauer ได้ทำการผลิตแผ่นใสจากการพอลิเมอไรเซชันมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate, MMA) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลแบบอะแทกติก (Atactic) ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบจึงทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous polymer) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีสมบัติโปร่งใส (ความโปร่งใส 92 % เท่ากับแก้วซึ่งเป็นสารอนินทรีย์) ละลายได้ในเมทานอล (Methanol) และเอทานอล (Ethanol) มีความมันเงาสูง ค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.49 มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) เท่ากับ 105 องศาเซลเซียส พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความทนทานต่อสภาวะอากาศสูง ดูดซึมน้ำได้ต่ำ สึกกร่อนยาก ด้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี แต่มีความต้านทานต่อสารเคมีต่ำ ในการขึ้นรูปพอลิเมทิลเมทาคริเลตอาจมีการปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยการเติมสารเติมแต่งเช่น สี (Pigment) สารหน่วงไฟ (Flame retardant) สารดูดซับรังสียูวี (UV absorbers) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



(2)

เมทิลเมทาคริเลต

พอลิเมทิลเมทาคริเลต

จุดเดือด 100 °C

เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีสมบัติทางแสงที่ดีเยี่ยม มีความต้านทานต่อสภาวะอากาศ ทนทานต่อแรงกระแทก มีน้ำหนักเบา มีเสถียรภาพทางรูปร่างดี ทนต่อความร้อนและง่ายต่อการขึ้นรูป ทำให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น คอนแทคเลนส์ แผ่นอะคริลิก เป็นต้น

พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ทางการแพทย์นั้น มีผลต่อร่างกายเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามในการใช้งานไม่ควรมีมอนอเมอร์เหลืออยู่ เพราะเมทิลเมทาคริเลตอาจก่อให้เกิดอาการแพ้และอาการข้างเคียง เนื่องจากจะมีการคายความร้อนออกมาตอนเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อบริเวณนั้นเสียหายได้ พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นที่นิยมใช้ในทางการแพทย์เนื่องจากก่อให้เกิดการตอบสนองต่อภูมิคุ้มกันในร่างกายต่ำ ซึ่งในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในร่างกายของนักบิน พบว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีความเหนียวต่อเนื้อเยื่อในร่างกายสูง เคลื่อนย้ายไปส่วนอื่นของร่างกายได้ยาก และไม่สามารถสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ จึงทำให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตคงอยู่ในร่างกายตลอดชีวิต

ปัจจุบันมีอนุพันธ์ของเมทิลเมทาคริเลตมากมาย อะคิเลตและไคเมทิลอะคริเลตซึ่งจัดเป็นอนุพันธ์ของเมทิลเมทาคริเลตสามารถนำมาใช้ในงานด้านชีวภาพ เช่น ซีเมนต์ยึดกระดูก วัสดุในการอุดฟัน และคอนแทคเลนส์ชนิดอ่อนและแข็ง เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีสมบัติทางแสงที่ดีเยี่ยมและเหนียวต่อปฏิกิริยาทำให้สามารถใช้แทนที่กระจกตาของผู้ป่วยโรคต้อกระจกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระ

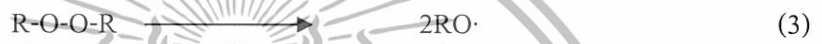
(Free radical addition polymerization)

พอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่มีกระบวนการหลักอยู่ 3 ขั้นตอน คือ

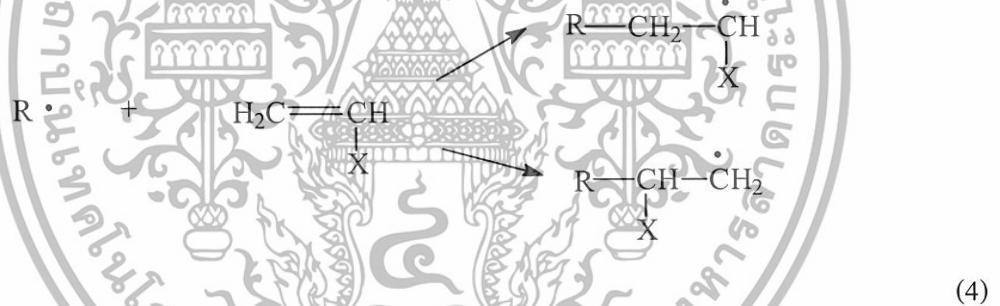
1. ขั้นเริ่มต้นสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain – initiation)

เป็นกระบวนการเกิดหมู่ที่ว่องไว (Active site) หรืออนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม โดยอนุมูลอิสระของตัวริเริ่มจะทำปฏิกิริยาแบบพันธะคู่ในมอนอเมอร์เกิดอนุมูลอิสระใหม่เป็นการตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์

การเกิดอนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม

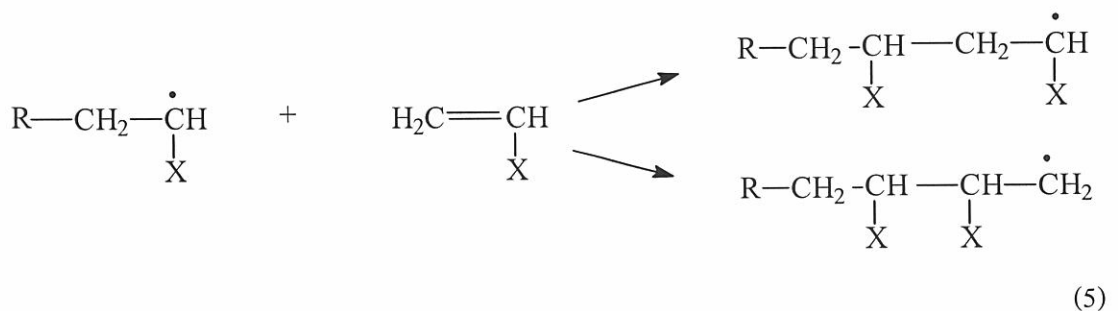


อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์



2. ขั้นแผ่ขยายสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain – propagation)

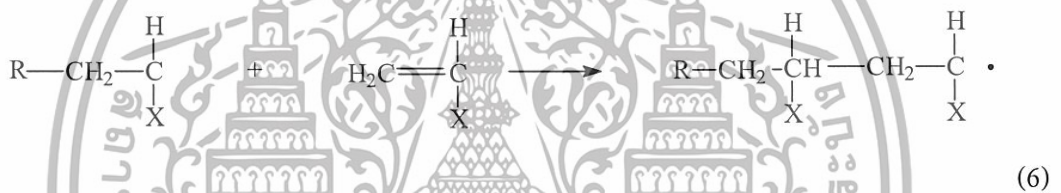
เป็นกระบวนการที่อนุมูลอิสระที่เป็นตัวตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โมเลกุลที่สอง สาม สี่ ไปเรื่อยๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสายโซ่พอลิเมอร์ที่ว่องไวนั้นคือ (Abstract) ไฮโดรเจนอะตอมจากโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกันจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่ว่องไว และโมเลกุลที่สูญเสียอะตอมให้ไฮโดรเจนไปนั้นจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ที่พร้อมจะเริ่มต้นสายโซ่ใหม่ต่อไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การย้ายสายโซ่ (Chain transfer) โมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมให้กับพอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตนั้นอาจเป็นมอนอเมอร์ ตัวทำละลายหรือสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์อื่น กระบวนการนี้ไม่ทำให้จำนวนอนุมูลอิสระในขณะนั้นเปลี่ยนแปลงแต่ทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวสายโซ่ (Average chain length) ของพอลิเมอร์ลดลง ถ้าโมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมนั้นเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์โซ่อื่นอาจทำให้เกิดโซ่กิ่ง

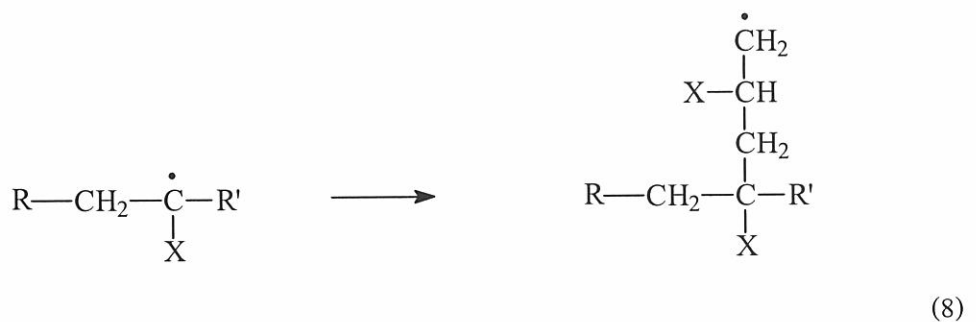
การขยายสายโซ่ตามปกติ



การขยายสายโซ่เมื่อมีการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอมเกิดขึ้น



ถ้าตำแหน่งของไฮโดรเจนที่ถูกดึงอยู่ในสายโซ่จะก่อให้เกิดกิ่งก้านสาขา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Chain – termination)

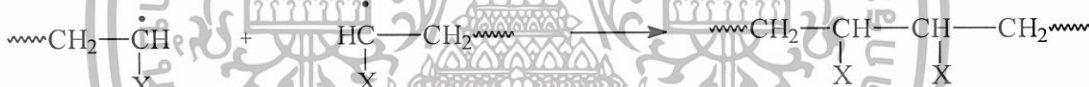
อนุมูลอิสระบนพอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตจะสิ้นสุดหรือหยุดแผ่ขยายได้มีหลายกรณี

กรณีที่ 1 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม ปฏิกิริยานี้ไม่ดี เพราะทำให้อัตราเร็วของขั้นริเริ่มสายโซ่ลดลง



(9)

กรณีที่ 2 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ 2 สายโซ่มาทำปฏิกิริยากัน แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่
ก. รวมกัน (Combination) ปฏิกิริยาสิ้นสุดแบบรวมกันนี้เกิดอนุมูลมีต่ำและจะพบพอลิเมอร์ที่เกิดพันธะแบบ Head to head สายโซ่พอลิเมอร์ที่สิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น



(10)

ข. เกิดการถ่ายโอนอะตอมปกติคือ ไฮโดรเจนจากอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์หนึ่งไปยังอนุมูลอิสระของอีกพอลิเมอร์หนึ่ง พอลิเมอร์ที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมจะเกิดปลายโซ่อิ่มตัวเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Disproportionation ในกรณีสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้ส่วนมากเกิดที่อนุมูลมีสูงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเป็นครึ่งหนึ่งของการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมตัว



(11)

มอนอเมอร์สำหรับพอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

พอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระส่วนใหญ่เกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่เรียกว่า ไวนิลมอนอเมอร์ (Vinyl monomer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกสำหรับการเกิดอนุมูลอิสระ

การเกิดอนุมูลอิสระอาจเกิดจากตัวริเริ่มหรือจากพันธะคู่ของมอนอเมอร์เอง โดยกลไกที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระมีหลายประเภทเช่น ความร้อนสามารถทำให้ตัวริเริ่มแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Thermal initiation of an initiator) หรือทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนพันธะคู่ของมอนอเมอร์ (Direct thermal initiation of a monomer) หรือใช้แสงในการทำให้ตัวริเริ่มแตกตัว (Photo – initiation of an initiator)

ตัวริเริ่มสำหรับพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

สารเคมีที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระสำหรับกลไกการเกิดพอลิเมอร์ด้วยอนุมูลอิสระนั้นมีหลายประเภท เช่น เปอร์ออกไซด์ (R-O-O-R) เป็นต้น นอกจากนี้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น ความร้อน แสงอัลตราไวโอเล็ต หรือรังสีพลังงานสูง เช่น แกมมาและกระแสไฟฟ้าสามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระบนพันธะคู่ของมอนอเมอร์ได้

2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์ [9]

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยทั่วไป แบ่งเป็น 4 เทคนิค ได้แก่

1. เทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization)

เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุด โดยการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์และตัวริเริ่ม เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยความหนืดของระบบอาจเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า เมื่อเทียบกับความหนืดของมอนอเมอร์และเกิดการถ่ายความร้อน ไม่นิยมนำไปใช้ผลิตพอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน และพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น

2. เทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization)

การเกิดพอลิเมอร์โดยเทคนิคแบบสารละลายนี้สามารถแก้ปัญหาของเทคนิคแบบบัลค์ได้ เนื่องจากตัวทำละลายจะทำหน้าที่ระบายและส่งผ่านความร้อนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ตัวทำละลายทำให้ความหนืดลดลง การควบคุมความร้อนทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับแบบบัลค์ แต่การใช้ตัวทำละลายทำให้เกิดปัญหาการถ่ายโอนสายโซ่และตัวทำละลายยังอาจปนเปื้อนอยู่ในสารพลาสติก ทำให้สมบัติพอลิเมอร์เปลี่ยน

3. เทคนิคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension polymerization)

ปัญหาเนื่องจากความเป็นพิษและการติดไฟของตัวทำละลาย จึงได้คิดวิธีที่จะหลีกเลี่ยงตัวทำละลายอินทรีย์คือ วิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย วิธีนี้มอนอเมอร์จะแขวนลอยเป็นหยดเล็กๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-500 ไมโครเมตร (ขนาดใหญ่กว่าเทคนิคอิมัลชัน) ในของเหลวที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเช่น น้ำ หยดของพอลิเมอร์จะถูกปั่นกวอนอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกาะกันเป็นก้อนและอาจมีการเติมสารคงสภาพ (Dispersants) ด้วย โดยสารคงสภาพจะละลายปนเปื้อนอยู่ในชั้นน้ำเพื่อป้องกันการเกิดเป็นเจลของพอลิเมอร์

มอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆคล้ายไข่มุก บางครั้งเรียกวิธีนี้ว่า Pearl polymerization

4. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนามาจากวิธีแบบแขวนลอย ใช้มากในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ วิธีนี้แตกต่างจากแบบแขวนลอยตรงที่ตัวริเริ่มไม่ละลายในมอนอเมอร์แต่ละสายในตัวกลางซึ่ง โดยส่วนใหญ่คือน้ำ แล้วแพร่เข้าไปในหยดมอนอเมอร์ ขนาดของหยดมอนอเมอร์จะมีขนาดเล็กกว่าแบบแขวนลอยคือ อยู่ในช่วง 0.05 – 5 ไมโครเมตรปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของระบบจะคล้ายน้ำนม อนุภาคของอิมัลชันไม่ตกตะกอนทันทีที่หยุดปั่นกวนเพราะสารก่ออิมัลชันซึ่งอยู่บนผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ จึงเรียกลักษณะของพอลิเมอร์ที่ได้ว่าลาเท็กซ์ (Latex)

2.3 พอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (Poly 2-hydroxyethyl methacrylate, PHEMA)

2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ [10]

- ของเหลวใส
- ไม่ละลายน้ำ
- มีจุดเดือด 205 °C
- มีกลิ่นคล้ายผลไม้
- มีความไวต่อแสง ความชื้นและความร้อน

2.3.2 สมบัติเด่นของพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต [11-12]

1. ดูดซับน้ำได้ดี
2. มีความเข้ากันได้ดีกับร่างกายไม่เป็นพิษ
3. สามารถเพิ่มสมบัติการส่งถ่ายแรงให้กับวัสดุได้ดีเพิ่มความอ่อนตัวให้กับวัสดุได้มาก

พอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต หรือ PHEMA นั้นเป็นอนุพันธ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งมีสมบัติเป็น hydrophobic (ส่วนชอบน้ำ) เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซีอยู่ในโครงสร้างจากสมบัติที่เป็น Hydrogel นี้เองทำให้วัสดุประกอบที่เติม PHEMA ลงไปนั้นมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่ง PHEMA นั้นเป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษคือมีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อในร่างกายมีความเป็นพิษน้อย อีกทั้งยังมีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้เมื่อเข้าไปอยู่ในร่างกายแล้วเส้นเลือดฝอยสามารถเจริญเติบโตเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อบริเวณเหล่านั้นได้ และมีเลือดไหลเวียนได้สะดวก จากสาเหตุเหล่านี้เอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ในปัจจุบันได้มีการนำ PHEMA มาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมให้กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับร่างกาย เช่น คอนแทกเลนส์ หรือซีเมนต์เชื่อมกระดูกที่มีสมบัติความยืดหยุ่นสูง [13]

2.4 วัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ [14]

ในปัจจุบันนี้ได้นำวัสดุเซรามิกส์มาพัฒนาปรับปรุงให้ดีขึ้น เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยการนำมาทำเป็นวัสดุชีวภาพในการผลิตวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) และอวัยวะเทียม (Implant) เพื่อใช้ทดแทนอวัยวะในร่างกายมนุษย์ เช่น กระดูกโครงสร้าง กระดูกโคนขา วัสดุยึดติด ฟันเทียม รากฟันเทียม กระดูกข้อต่อ เป็นต้น ข้อดีของเซรามิกส์ก็คือ เข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อในร่างกาย แต่มีข้อเสียคือ เปราะ และสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุง วัสดุเซรามิกส์มาทำเป็นวัสดุประกอบ (Composite) [9] กับพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงของเซรามิกส์ การนำวัสดุเซรามิกส์ชีวภาพและพอลิเมอร์ผสมกันเพื่อทำเป็น วัสดุประกอบเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำวัสดุประกอบที่ได้ไปประยุกต์เป็นชีวภาพและ อวัยวะเทียม

2.4.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม (Biomaterials and Implant)

วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมคือ วัสดุที่มนุษย์ผลิตขึ้นมาเพื่อทดแทนอวัยวะเดิมของร่างกาย ซึ่งสูญเสียไปอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุ ความเจ็บป่วย หรือเนื่องมาจากการที่อวัยวะเดิมไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ โดยการนำวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมเข้าไปในร่างกายเพื่อทดแทนอวัยวะนั้นๆ แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่มีการผลิตให้ครอบคลุมกับทุกอวัยวะของร่างกายวัสดุประเภทนี้ สามารถผลิตได้มากมายตามความต้องการและไม่มีปัญหาด้านคุณภาพของวัสดุ เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณ และคุณภาพในการผลิตได้และมีการทดสอบความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย และการปลดปล่อยสารที่เป็นพิษต่อร่างกายก่อนการนำไปใช้จริง ถ้าพบว่าวัสดุนั้นไม่เหมาะสมก็สามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุอย่างอื่นแทนได้ ทำให้โอกาสในการ เกิดอาการแทรกซ้อนลดลง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้มีอายุการใช้งานที่จำกัดไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ อีกทั้งไม่สามารถปรับปรุงโครงสร้าง และสมบัติให้เหมาะสมกับสภาวะร่างกายได้ดีเท่ากับอวัยวะจริงของร่างกายที่มนุษย์สร้างขึ้นเอง

วัสดุสังเคราะห์อื่นๆ ที่นิยมนำมาผลิตอวัยวะเทียม เช่น โลหะปลอดสนิม (Stainless steel), โลหะผสม Ti-Al-V และ Ni-Cr, พอลิอะซิทัล (Polyacetal), ซีเมนต์เมทิลเมทาคริเลต (PMMA-Cement), AL_2O_3 , ZrO_2 -TZP เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 วัสดุชีวภาพที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน [15]

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

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของกระดูกและวัสดุชีวภาพที่ใช้เพื่อทดแทนข้อต่อ [16]

วัสดุ	มอดุลัสของยัง (GPa)
อะลูมินา	365
ไฮดรอกซีอะปาทาइट	85
กระดูกแข็ง	7-25
กระดูกที่มีรูพรุน	0.1-10
พอลิเมทิลเมทาคริลेट	770
พอลิเอทิลีน	1

กลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุชีวภาพ

สามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 4 ประเภท คือ [17]

1. วัสดุค่อนข้างเฉื่อย (Nearly inert materials)

วัสดุประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออยู่ในสภาวะร่างกายเป็นเวลานาน เนื้อเยื่อและอวัยวะภายในร่างกายบริเวณนั้นจะสร้างเนื้อเยื่อใหม่ขึ้นมาห่อหุ้มวัสดุ เมื่อเนื้อเยื่อใหม่มีความหนาแน่นมากขึ้นอาจจะทำให้เกิดการเลื่อนหลุดของวัสดุชีวภาพได้

2. วัสดุที่มีรูพรุน (Porous materials)

วัสดุประเภทนี้จะมีรูพรุนซึ่งลดปัญหาการเลื่อนหลุดของวัสดุที่เกิดกับประเภทแรกได้ เนื่องจากเนื้อเยื่อใหม่ที่สร้างขึ้นจะเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนที่พื้นผิวของวัสดุ เป็นตัวช่วยยึดระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อและอวัยวะใกล้เคียง ขนาดรูพรุนในวัสดุควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยเจริญเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อในรูพรุนได้ แต่ถ้ามีการเคลื่อนที่

เพียงเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุชีวภาพกับเนื้อเยื่อสามารถทำให้เส้นเลือดฝอยขาด ส่งผลทำให้เนื้อเยื่อตายและเกิดการอักเสบได้ หรือการแข็งตัวของเลือดในเนื้อเยื่อที่ติดกับเนื้อเยื่อใหม่ อาจเป็นอุปสรรคต่อการงอกใหม่ของเนื้อเยื่อได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เนื้อเยื่อที่อยู่ภายในรูพรุนตาย เกิดอักเสบและทำลายเสถียรภาพที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุชีวภาพกับเนื้อเยื่อ

3. วัสดุที่สามารถถูกดูดซับหรือกักเก็บได้ (Resorbable or Biodegradable materials)

วัสดุประเภทนี้จะค่อยเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ และถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อที่ร่างกายสร้างขึ้นมา การเลือกวัสดุประเภทนี้มีข้อกำหนดที่สำคัญคือ วัสดุจะต้องสามารถถูกย่อยสลายด้วยระบบของร่างกาย และอัตราการถูกดูดซับของวัสดุประเภทนี้จะต้องสอดคล้องกับอัตราการสร้างเนื้อเยื่อขึ้นมาทดแทน โดยสารที่ปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อระบบร่างกาย และสามารถถูกกำจัดได้ด้วยระบบร่างกาย

4. วัสดุที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive materials)

ลักษณะที่สำคัญของวัสดุประเภทนี้คือสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีพื้นผิวของวัสดุภายใต้สภาวะร่างกายซึ่งจะทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อข้างเคียง จึงสามารถลดปัญหาเรื่องการเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อได้

การทดสอบวัสดุทางชีวภาพ [18]

โดยทั่วไปกระทำใน 2 ลักษณะ คือ

1. การทดสอบนอกร่างกาย

มีวัตถุประสงค์สำคัญ 3 ประการ ดังนี้

- สังเกตการทำงานและประเมินผลประสิทธิภาพของวัสดุชีวภาพ
- สามารถบอกสมรรถภาพของวัสดุชีวภาพได้สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน ได้
- ประเมินความเชื่อถือ และความคงทนของวัสดุชีวภาพได้

เนื่องจากการนำวัสดุชีวภาพไปใช้งานจริงจะต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อ ของเหลว และอวัยวะต่างๆ ในร่างกาย ซึ่งสภาวะแวดล้อมต่างๆ นี้ อาจทำให้สมบัติบางประการของวัสดุชีวภาพเปลี่ยนไป ดังนั้นการทดสอบภายนอกจึงมีข้อจำกัดมากในการนำข้อมูลไปใช้เพื่อประเมินผลนำไปใช้งานจริง ดังนั้นจึงต้องออกแบบการทดลองให้มีสภาวะคล้ายกับในร่างกาย เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้นั้นมีผลถูกต้องมากที่สุดหรือมีความผิดพลาดน้อยที่สุด เช่น การทดสอบโดยใช้ของเหลวที่มีองค์ประกอบคล้ายเลือดหรือพลาสมา

2. การทดสอบภายในร่างกาย

วิธีนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าการทดลองภายนอก เพราะสภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นสภาวะจริงในร่างกายสิ่งมีชีวิต ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. การประเมินในสัตว์ทดลองที่สุขภาพดี

วิธีนี้จะทำได้โดยการผ่าตัดเพื่อใส่วัสดุทางชีวภาพเข้าไปในร่างกายของสัตว์ที่มีสุขภาพดี โดยต้องใส่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด แต่วิธีนี้มีข้อจำกัด ได้แก่ วงจรชีวิต และ อายุขัยที่ไม่เท่ากัน สรีระองค์ประกอบในร่างกายบางส่วนที่ไม่เหมือนกัน

ข. ประเมินในสัตว์ทดลองที่เป็นโรค

จะได้ผลการทดลองที่แตกต่างกับสัตว์ทดลองที่สุขภาพดี เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระหว่างวัสดุชีวภาพกับอวัยวะที่เป็น โรคและไม่เป็น โรคต่างกัน การทดลองในสัตว์ที่มีสุขภาพดี ไม่สามารถประเมินผลได้ จึงต้องทำการทดลองในสัตว์ที่เป็นโรค

ค. การศึกษาจากกลุ่มผู้ป่วยในทางคลินิก

เป็นการทดลองในร่างกายมนุษย์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของวัสดุชีวภาพและโรคแทรกซ้อนที่อาจเกิดจากการใช้วัสดุทางชีวภาพ

ง. การใช้ทางคลินิกทั่วไป

วัสดุทางชีวภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้นต้องผ่านการทดสอบและรับรองโดยองค์กรที่ทำหน้าที่ควบคุมก่อนนำไปใช้งานกับผู้ป่วยในการทดสอบภายในร่างกาย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ H.G. Kuzczyk [19] ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตจากหินปูนและควอตซ์ (Quartz) บดละเอียดที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area ประมาณ 2 ตารางมิลลิเมตร/กรัม) อย่างไรก็ตามในการสังเคราะห์วิธีนี้ต้องเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นผลึกของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งการผลิตดังกล่าวมีต้นทุนค่อนข้างสูงและมีการเจือปนของสารเจือปนเนื่องจากกระบวนการบด

งานวิจัยของ A. Balogh และคณะ [20] ได้ทำการสังเคราะห์ β -wollastonite โดยใช้หินปูนในสถานะของแข็งทำปฏิกิริยากับไอของซิลิกาชนิดละออง (Fume silica) ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่ได้จากโรงงานโดยการผลิตวิธีการดังกล่าวพบว่ามีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง

งานวิจัยของ P.Siriphannon และคณะ [21] ได้ทำการเตรียมแคลเซียมซิลิเกตโดยใช้ ปฏิกิริยาเคมีในสารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, TEOS) และแคลเซียมไนเตรดเตตระไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารตกตะกอน พบว่าโซเดียมไอออนสามารถตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปน โซเดียม ไอออนออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียม คือใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.33 โมล/ลิตร และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการล้างตะกอน 2 ครั้ง เพื่อให้โซเดียมไอออนที่เป็นสารเจือปนเหลืออยู่น้อยที่สุด สารที่สังเคราะห์ได้จะถูกแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อที่จะให้เกิดผลึกของแคลเซียมซลิเกต ซึ่งแคลเซียมซลิเกตที่ได้เมื่อนำไปทดสอบในสภาวะจำลองของร่างกายโดยใช้สารละลายจำลองของร่างกายโดยใช้สารละลายจำลองของร่างกาย (SBF) พบว่าจะเกิดขึ้นไฮดรอกซีเอปาทิตบนพื้นผิวของแคลเซียมซลิเกต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแคลเซียมซลิเกตมีความสามารถในการเข้ากันได้ดีกับระบบชีวภาพ ของร่างกายได้ดี

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 มีความว่องไวทางชีวภาพ จึงสามารถเกิดการเชื่อมติดกับกระดูกภายในร่างกายได้ภายในเวลา 4-8 สัปดาห์ เมื่อทำการทดลองโดยฉีดซีเมนต์ทั้งสองชนิดเพื่อเชื่อมกระดูกสะโพกเทียบกับกระดูกขาอ่อนของสุนัข พบว่าความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างกระดูกกับ BA cement จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งให้ผลดีกว่า PMMA cement นอกจากนี้เคยมีการใช้ BA cement สำหรับการเชื่อมต่อกระดูกสะโพกเทียมหรือรอยแตกเปราะในผู้สูงอายุ จากการศึกษาผลในผู้ป่วยเหล่านี้พบว่า อายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดคือในเวลา 4 ปี ซึ่งในระหว่างนี้ไม่พบที่เกิดผลข้างเคียงใดๆ

งานวิจัยของ B. Pascual และคณะ [22] ได้ทำการทดลองถึงผลของขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของพอลิเมทิลเมทาครีเลต ที่มีผลต่อการคายความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่าขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มากขึ้น จะทำให้มีการคายความร้อนขณะที่ซีเมนต์แข็งตัวน้อยลง ส่วนทางด้านสมบัติสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคที่มากขึ้น แรงเค้นดึง (tensile stress) และค่ามอดุลัสแรงดึง (Compressive modulus) มีค่าลดลง แต่แรงเค้นกด (Compressive stress) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสดึง (Tensile modulus) และค่าการยืด (%Elongation) เปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่ง DMT พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิขณะแข็งตัวของซีเมนต์สูงขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (Setting time) และมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่มีค่าลดลง ส่วนทางด้านสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเติมตัวเร่งมากขึ้น แรงเค้นดึงและแรงเค้นกดมีค่าลดลง ส่วนมอดุลัสดึง, ค่ามอดุลัสกดและค่าการยืดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

งานวิจัยของ Calos Evira และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amines) ที่มีโครงสร้างคล้ายกับ Dimethyl-4-toluidine (DMT) ซึ่งทำหน้าที่เป็น “ตัวกระตุ้น” ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อไรเซชันแบบผ่านอนุมูลอิสระ โดยเอมีนดังกล่าวคือ 4-Dimethylaminobenzyl alcohol (DMOH) และ 4-Dimethylaminobenzyl methacrylate (DMMO) จากการศึกษาจลนศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยา บัลค์พอลิเมอไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลต (MMA) ที่มีระบบรีดอกซ์ BPO-amine เป็นตัวริเริ่ม ปฏิกิริยาด้วยเทคนิคดิฟฟิวเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC) ที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-40 °C พบว่า DMT DMOH และ DMMO เป็นเอมีนตติยภูมิที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับปฏิกิริยา Cool polymerization ของอะคริลิกมอนอเมอร์ โดยมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มที่สภาวะ อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ DMMO ยังสามารถเข้าร่วมในปฏิกิริยาโดยจะกระตุ้นที่ปลายสายโซ่เกิดการ ขยายสายโซ่ทำให้สายโซ่ยาวขึ้นและมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้นและสามารถป้องกันการหลุดออก ของอนุพันธ์เอมีนจากสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีการนำมาประยุกต์ทาง Biomedical และยังสามารถนำระบบ ตัวกระตุ้นนี้มาใช้ในการเกิด Cool polymerization ของซีเมนต์บางชนิด และใช้ในการอุดฟันด้วย แต่ข้อเสียของระบบนี้คือ สารประเภทดังกล่าว มีความเป็นพิษต่อร่างกาย

งานวิจัยของ J.A. Mendez [24] ได้ทำการศึกษาการเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกชนิดอะคริลิก ที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive acrylic bone cement) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็น PMMA กับ Bioactive glass ในระบบ $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ โดยมี 2-phosphonoxibenzoic acid (Fosfosal) เป็น ยาต้านการอักเสบและการบรรเทาอาการปวด ซึ่งซีเมนต์ที่เตรียมขึ้นจะประกอบด้วยวัสดุของแข็ง และของเหลว โดยมีอัตราส่วน 1.7 : 1 ตามลำดับ ในส่วนของวัสดุของเหลวประกอบด้วย MMA monomer และ DMOH (1% โดยน้ำหนักคิดเทียบกับวัสดุของเหลว) ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยา สำหรับองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วย PMMA แก้วที่มีความว่องไวทาง ชีวภาพ ด้วย fososal และ BPO (1.5% โดยน้ำหนักคิดเทียบกับวัสดุของแข็ง) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัว ริเริ่มปฏิกิริยา ในการทดลองทำการเตรียมซีเมนต์ซึ่งในขั้นแรกจะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ PMMA แก้วที่มีความว่องไวทางชีวภาพ และด้วย fososal เป็น 20 40 และ 60 % โดยน้ำหนัก ต่อมา เปลี่ยนแปลงสูตรโดยใช้ปริมาณของแก้วที่มีความว่องไวทางชีวภาพ 40 % ผสมกับ fososal 20 และ 30 % โดยน้ำหนักตามลำดับ

107733

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเบื้องต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของวิฏภาคของแข็ง

Formulation	PMMA (wt%)	BV (wt%)	fofosal (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
BV-60	38.5	60	-	1.5
BV-40-FS-20	38.5	20	20	1.5
BV-40-FS-30	28.5	20	30	1.5

FS = fofosal BV = bioactive glass

เมื่อเตรียมซีเมนต์เฟสที่แล้วทำการฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง ซีเมนต์จะเกิดการแข็งตัวโดยการคายความร้อนออกมานี้เนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำการหาปริมาณของมอนอเมอร์ที่คงเหลือด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ spectroscopy โดยนำซีเมนต์ตัวอย่างมาละลายใน deuterated chloroform (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และใช้ tetramethylsilane เป็น internal standard จากนั้นนำมากรองเพื่อกำจัดองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์แล้วเก็บไว้ในที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการวิเคราะห์ ทำการทดสอบความแข็งแรงกดอัดและความว่องไวทางชีวภาพ ซึ่งจะนำซีเมนต์ตัวอย่างไปแช่ไว้ในสารละลาย SBF แล้วศึกษาต้นฐานวิทยาด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี

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

งานวิจัยของ J.M.Seidel and S.M. Malmonge [12] ได้มีการเตรียมพอลิ 2- ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตเพื่อใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ ซึ่งพอลิ 2- ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตเป็นสารประเภทไฮโดรเจลที่มีสมบัติการดูดซับน้ำได้ดี มีความอ่อนตัวสูง สมบัติคล้ายยาง แรงตึงผิวต่ำ มีการซึมผ่านของน้ำได้ดี มีความคงทนในระยะยาว เมื่อพอลิ 2- ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตเกิดปฏิกิริยาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิเมอโรเซชันภายในร่างกายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถถูกกำจัดออกจากร่างกายได้โดยใช้ของเหลวในร่างกายเป็นตัวพา และจากการวิจัยพบว่าสามารถสังเคราะห์พอลิ 2- ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตได้ 2 วิธีคือ การสังเคราะห์โดยเทคนิคบัลค์จะได้พอลิ 2- ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตแบบที่ไม่มีรูพรุน ส่วนการสังเคราะห์โดยเทคนิคสารละลายจะได้ พอลิ 2- ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตแบบที่มีรูพรุน ทั้งนี้การเลือกวิธีจะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. เอทานอล 95 % (Ethanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
2. เมทานอล (Methanol, CH_3OH) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
3. โทลูอีน (Toluene, C_7H_8) บริษัท LAB SCAN เกรดวึเคราะห์
4. เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
5. แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calcium nitrate tetrahydrate, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
6. มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate monomer, $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) บริษัท Aldrich เกรดวึเคราะห์
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
8. แอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous sodium sulfate, Na_2SO_4) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
9. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
10. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) บริษัท CARLO ERBA เกรดวึเคราะห์
11. เอ็น, เอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (N, N-Dimethyl-4-toluidene, $\text{C}_9\text{H}_{13}\text{N}$) บริษัท Aldrich เกรดวึเคราะห์
12. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, CH_2Cl_2) บริษัท LAB SCAN เกรดวึเคราะห์
13. 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-hydroxyethyl methacrylate, 2-HEMA) บริษัท Fluka เกรดวึเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

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

คอลัมน์ : PL. Gel 10 μm Mixed B 2 Columns

ขนาด 7.8 x 300 μm

วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500 – 10,000,000

ใช้พอลิสไตรีนเป็นสารมาตรฐาน

สารละลาย : เตตระไฮโดรฟูแรน (THF)

อุณหภูมิคอลัมน์ : 30 $^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ injector : 30 $^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ solvent / pump : 30 $^{\circ}\text{C}$

อัตราการไหล : 1.0 ml / min

ปริมาณในการฉีด : 100 μl

เวลาในการวิเคราะห์ : 22 นาที

Detector : Refractive index

การเตรียมตัวอย่าง : ละลายด้วย THF

4. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Nuclear magnetic resonance spectrometer, NMR) บริษัท Bruker AG รุ่น NMR 300 Ultra Shield ความถี่ 300 MHz ใช้เตตระเมทิลซิลเลน (TMS) เป็นสารมาตรฐาน
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท LEO รุ่น LV 4

การเตรียมตัวอย่าง : หักชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องแล้วนำชิ้นงานที่หักได้ไปเคลือบด้วยทองเพื่อส่องดูพื้นผิวภายในชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) บริษัท

Mettler Toledo DSC^o

ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ	: 50-250 °C
อัตราการให้ความร้อน	: 10 °C / min
อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน	: 60 ml / min
ปริมาณสารที่ใช้วิเคราะห์	: 13 – 15 mg

7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)

อัตราเร็วหัวกด	: 2.5 ± 0.25
Load cell	: 30 kN
Maximum load	: 25,000 N

การเตรียมตัวอย่าง :- ใช้หัวกดแบบหน้าเรียบในการทดสอบความแข็งแรง
กดโดยวางให้แนบชิดกับชิ้นงานพอดี
- ทำการกดอัดและบันทึกค่าต่าง ๆ เพื่อนำไป
คำนวณหาค่าความแข็งแรงและมอดุลัส

8. อ่างควบคุมอุณหภูมิ

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 Isotemp

14. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000

15. โกร่งบดสาร

16. เครื่องบด Rock Lab

17. ครุฑิเบิลชนิดพอร์ซเลนและอลูมินา (Crucible)

18. จานเพาะเชื้อ (Plate)

19. เครื่องอัดขึ้นรูป

20. เครื่องคัดขนาด

21. ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช

22. ไตรแองเกิล (triangle)

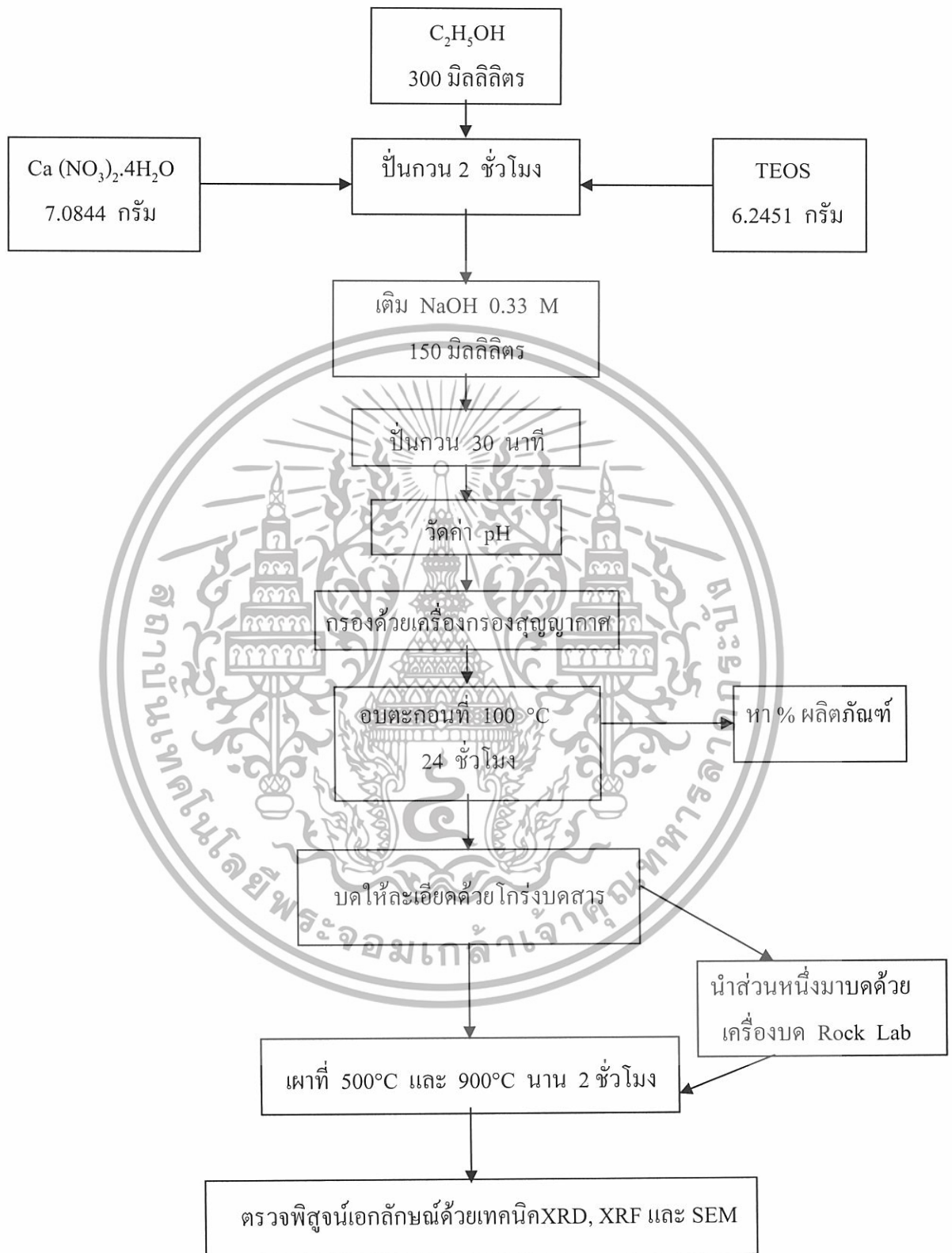
23. ตะเกียงบุนเซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต (Calciumsilicate, CS) โดยวิธีการตกตะกอนร่วม

1. ชั่งเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) ปริมาณ 6.2451 กรัม
2. ตวงเอทานอล ปริมาตร 300 มิลลิลิตร
3. ชั่งแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ปริมาณ 7.0844 กรัม
4. ผสมสารในข้อที่ 1. ถึงข้อที่ 3. พร้อมทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบีกเกอร์พลาสติก
5. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร วัดค่า pH ของสารละลายและบันทึกผล
6. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ และปั่นกวนของผสมต่อไปอีก 30 นาที
7. วัดค่าของสารละลาย บันทึกผล
8. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 300 ml 1 ครั้ง
9. นำตะกอนแคลเซียมซิลิเกตที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. ชั่งน้ำหนักและหาเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์
11. บดแคลเซียมซิลิเกตที่ได้ให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร (ขนาดอนุภาคอย่างหยาบ)
12. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
13. แบ่งแคลเซียมซิลิเกตจากข้อที่ 12 มาบดด้วยเครื่องบด Rock Lab (ขนาดอนุภาคอย่างละเอียด)
14. ตรวจสอบพลังงานเอกซเรย์เพื่อหาวัฏภาคที่เป็นผลึกของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) และเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเพื่อหาขนาดของอนุภาคสารที่สังเคราะห์ได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.1 แผนงานสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสกัดด้วยวิธีออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA)

1. เท MMA 10 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในกรวยแยก เขย่าให้สารทั้งสองผสมกัน รอจนแยกชั้นซึ่งชั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะอยู่ด้านล่าง
2. โขขึ้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทิ้ง แล้วเทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงไปอีกครั้งและเขย่าสารทั้งสองให้ผสมกัน
3. รอจนแยกชั้นจึง โขขึ้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง
4. ล้างมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่อยู่ในกรวยแยกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ไหลไม่เปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัสจากแดงเป็นน้ำเงิน ซึ่งแสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกล้างออกหมดแล้ว
5. เติมสารละลายอิมิตัวโซเดียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้ผสมกัน รอจนแยกชั้นจึงใสสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทิ้ง
6. นำมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดด้วยวิธีแล้วมาเติมสารคู่ความชื้นแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)
7. กรองแยกของแข็งออก
8. นำมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่ทำการสกัดด้วยวิธีแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.2 แผนงานการสกัดตัวขั้วยั้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย

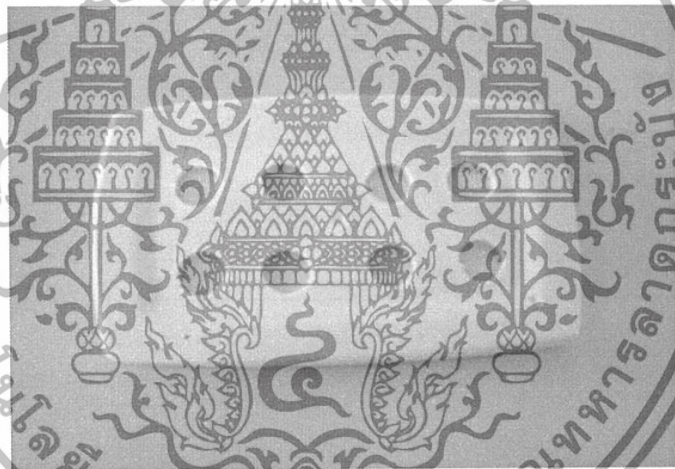
1. เหมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดด้วยปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ชั่งเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์น้ำหนัก 0.010 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. ตวงสารละลายโทลูอีนปริมาณ 40 มิลลิลิตร นำไปละลายเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ แล้วเทลงในขวดก้นกลมที่มีมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตอยู่
4. ผ่านแก๊สไนโตรเจนลงในสารละลายผสมนาน 15-30 นาที ปิดด้วยจุกคอร์กที่ต่อกับลูกโป่งที่บรรจุแก๊สไนโตรเจนแล้วทันที และหุ้มทับด้วยพาราฟิล์มให้สนิท
5. นำขวดก้นกลมมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำขวดออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. ตกตะกอนพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยหยดของเหลวใส่ที่ไต้ลงในเมทานอลปริมาณ 600 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ พร้อมทำการปั่นกว
8. นำมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยเมทานอล
9. บดพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กรองได้ให้มีขนาดเล็กลง ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
10. นำมาบดด้วยโกรนบดสารจนได้ตะกอนละเอียด
11. ทำการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
12. วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การเตรียมซีเมนต์ระหว่างแคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลต และพอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต

3.6.1 การเตรียมแม่แบบซิลิโคน

1. ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 2 กรัม แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปจะได้ของแข็งที่มีลักษณะคล้ายเม็ดยา
2. ผสมซิลิโคนกับสารทำให้แข็งตัว (hardener) โดยใช้สารทำให้แข็งตัว 2-5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักซิลิโคน
3. เทซิลิโคนลงบนเม็ดแคลเซียมคาร์บอเนตที่วางอยู่ในแม่แบบพลาสติก ทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน ให้ซิลิโคนแข็งตัว
4. แกะซิลิโคนออกจากแม่แบบ



รูป 3.3 แม่แบบซิลิโคน

3.6.2 การเตรียมซีเมนต์เพสต์

ในการเตรียมซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่าง ภูมิภาคของแข็ง : ภูมิภาคของเหลว เท่ากับ 1 : 0.6 โดยมีองค์ประกอบดังนี้

ภูมิภาคของเหลว

- มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดด้วยขี้ผึ้งแล้ว
- มอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต
- เอ็น, เอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิน (DMT) 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับภูมิภาคของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุของแข็ง

- พอลิเมทิลเมทาคริเลต
- แคลเซียมซิติเกต
- เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับวัสดุของแข็ง

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนองค์ประกอบซีเมนต์เฟสท์

สูตร ที่	อัตราส่วน MMA:HEMA	PMMA (กรัม)	CS (กรัม)	BPO (กรัม)	MMA (กรัม)	2-HEMA (กรัม)	DMT (หยด)
PMMA:CS = 3:7							
1	100:0	0.285	0.7005	0.0145	0.60	0	1
2	70:30	0.285	0.7015	0.0135	0.42	0.18	1
3	50:50	0.285	0.7022	0.0128	0.30	0.30	1
4	30:70	0.285	0.7028	0.0122	0.18	0.42	1
5	0:100	0.285	0.7038	0.0112	0	0.60	1
PMMA:CS = 4:6							
6	100:0	0.385	0.6005	0.0145	0.60	0	1
7	70:30	0.385	0.6015	0.0135	0.42	0.18	1
8	50:50	0.385	0.6022	0.0128	0.30	0.30	1
9	30:70	0.385	0.6028	0.0122	0.18	0.42	1
10	0:100	0.385	0.6038	0.0112	0	0.60	1

3.6.2.1 การวัดคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสท์

1. ผสมสารเคมีในส่วนวัสดุของแข็งต่อวัสดุของเหลว ดังตารางที่ 3.1 ใส่ลงในแม่แบบซิลิโคน ปิดด้วยแท่งซิลิโคนดันที่เสียบด้วยเทอร์โมคัปเปิล
2. ทำการอ่านอุณหภูมิทุก 5 วินาที จนครบ 30 นาที พร้อมทั้งบันทึกผล
3. ทำการวัดอุณหภูมิสูตรละ 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.2 วิธีการผสมซีเมนต์เพสต์

1. ชั่งสารเคมีในส่วนวิภาคของแข็งต่อวิภาคของเหลว ดังตารางที่ 3.1
2. ผสมวิภาคของแข็งลงในชามระเหย คนให้เข้ากันทุกส่วน จากนั้นเทส่วนของเหลวลงในของแข็งแล้วคนให้เข้ากัน
3. นำตัวอย่างที่ผสมสูตรแล้ว ใส่ในแม่แบบซิลิโคน อัดตัวอย่างด้วยแท่งเหล็กตันผิวเรียบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางพอดีกับแม่แบบซิลิโคนทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที เพื่อให้ซีเมนต์แข็งตัว

3.7 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์

3.7.1 การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ

1. ทำการหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ spectroscopy โดยใช้ไดคลอโรมีเทน (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก) และใช้เตตระเมทิลไซเลนเป็นสารละลายมาตรฐาน (Internal Standard)
2. นำไปกรองเพื่อกำจัดองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์
3. เก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้องก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ Spectroscopy

3.7.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1. เตรียมตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูป โดยตัดแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ผิวด้านนอกและด้านใน
2. นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาเคลือบด้วยทอง (Au)
3. นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM

3.7.3 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปมาละลายในสารละลายเตตระไฮโดรฟูแลน
2. กรองแคลเซียมที่ตกตะกอนออก แล้วนำส่วนสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค เจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี (GPC)

3.7.4 การหาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์

1. นำครุชิวเบล ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำมาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนักของครุชิวเบล (W_1)
2. นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาใส่ในครุชิวเบล จากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก (W_2) แล้วนำมาเผาด้วยตะเกียงบุนเซน จนหมดควัน
3. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นที่ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำมาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนัก (W_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.4 แสดงการเผาด้วยตะเกียงเบนเซน

3.7.5 การหาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC)

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูป น้ำหนักประมาณ 13 - 15 มิลลิกรัม
2. วิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลว โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบในช่วง 50-250 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.8 การทดสอบสมบัติความแข็งกดของซีเมนต์

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบกับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)
2. บันทึกผลและคำนวณค่าความแข็งกดที่ 10 เปอร์เซ็นต์ (Compressive strength at 10%) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้

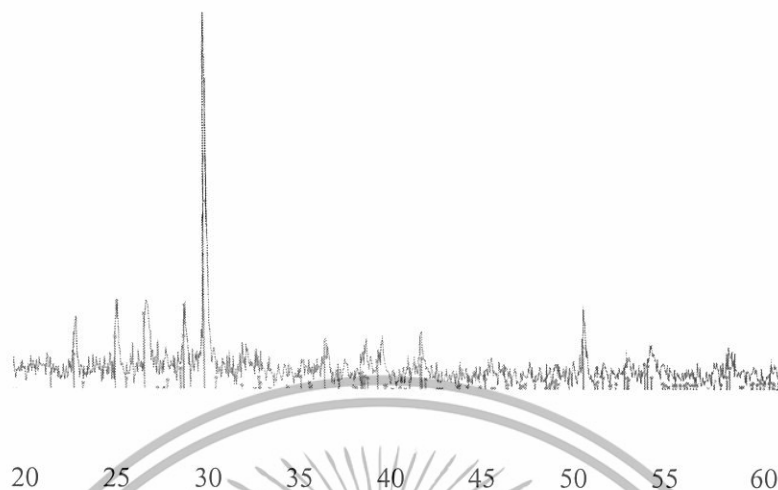
องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF พบว่า แคลเซียมซิลิเกต (CS) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอนร่วมนั้นมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ ($\text{CaO}:\text{SiO}_2$) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

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

สารตัวอย่างที่	CaO %wt	SiO ₂ %wt	อัตราส่วนโดยโมล CaO:SiO ₂
1	53.50	45.80	1.25
2	51.80	46.20	1.21
3	49.50	49.20	1.08
เฉลี่ย	51.60	47.07	1.18
ค่าทางทฤษฎี	48.28	51.72	1.00

จากผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกต พบว่าสัดส่วนโดยโมลของ $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.18 ซึ่งมากกว่าทางทฤษฎีเล็กน้อย แต่เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบพิกที่สำคัญที่ตำแหน่ง 2θ 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 ซึ่งเป็นพิกของ CS ที่มีวัฏภาคองค์ประกอบเป็น Wollastonite ชนิดเบต้า (CaSiO_3) มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก ดังแสดงรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงรังสีเอกซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้
 ภายหลังจากการเคลือบที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้

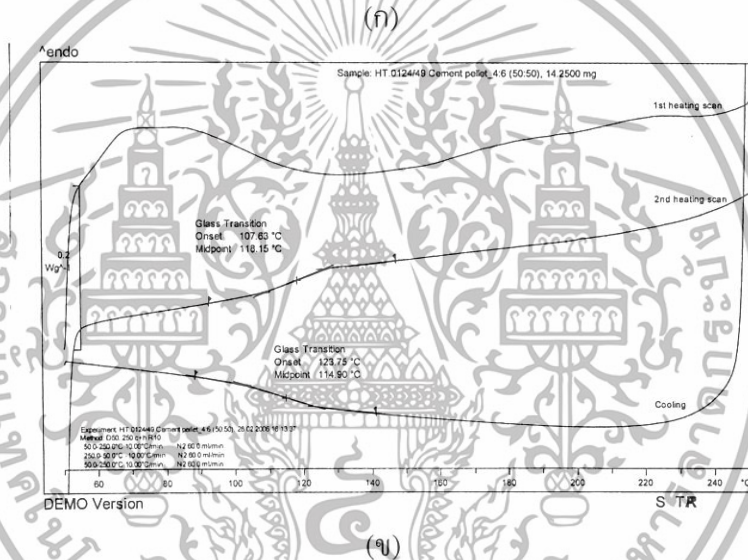
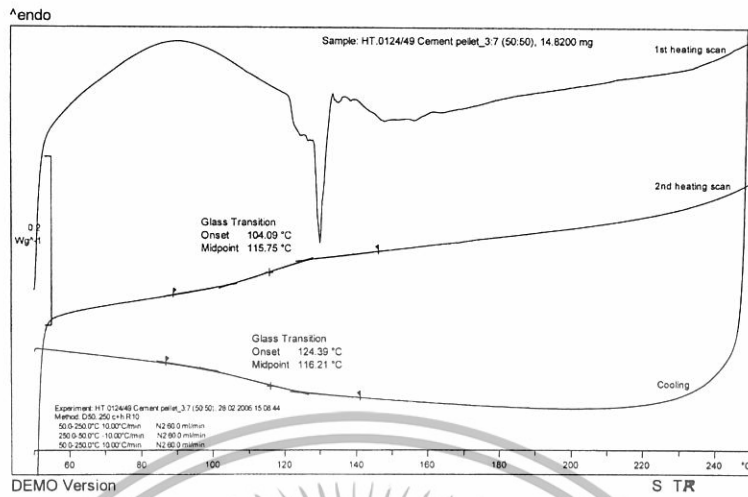
PMMA ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย มีเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
 อยู่ในช่วง 48-57 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายไปวิเคราะห์หา
 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC (ภาคผนวก ข) พบว่า PMMA มี
 M_n , M_w และ MWD เท่ากับ 41,100 กรัม/โมล, 85,600 กรัม/โมล และ 2.08 ตามลำดับ

4.3 ซิเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

4.3.1 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค DSC

เมื่อนำซิเมนต์ที่มีอัตราส่วน MMA:HEMA ก่อนเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 50:50
 ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC) พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยน
 สถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PMMA และ PMMA-co-PHEMA แบบ Onset
 อยู่ในช่วง 104.09-107.63 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 เทอร์โมแกรมของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA (ก) PMMA:CS=3:7 สูตร 3 (MMA:HEMA = 50:50) (ข) PMMA:CS=4:6 สูตร 3 (MMA:HEMA = 50:50)

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า ได้ผลเป็นพิกเดียวไม่มีการแยกพิกเกิดขึ้น แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมมีการเข้ากันได้ดี (Miscible) ทั้งนี้เนื่องจาก PMMA และ PHEMA นั้นมีค่า T_g ใกล้เคียงกัน (PMMA ประมาณ 95 °C และ PHEMA ประมาณ 115 °C) อีกทั้ง MMA และ HEMA ต่างเป็นอนุพันธ์ของอะคริลิกมอนอเมอร์ (Acrylic monomer) ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรวมตัวเข้ากับพอลิเมอร์ร่วมได้ดียิ่งขึ้น โดยมีแรงดึงดูดระหว่างขั้วของหมู่อะซิเตตที่อยู่ใน MMA และมีพันธะไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่ใน HEMA ซึ่งแรงทั้งสองนี้ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอยู่ร่วมกันไม่แยกเป็น 2 วัฏภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

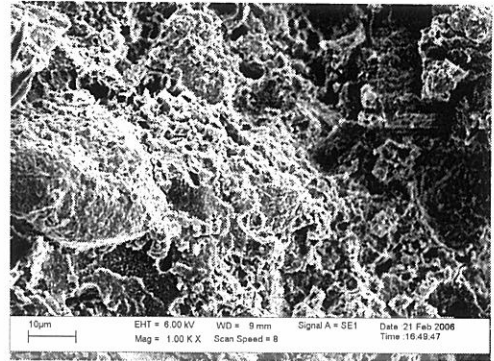
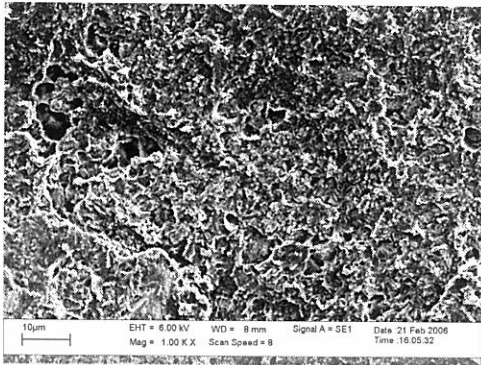
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์

ในซีเมนต์ผสมจะประกอบด้วยวิภาคหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นของเหลวประกอบด้วย HEMA และ PMMA ละลายใน MMA (PMMA-MMA) และส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งประกอบด้วยอนุภาคแคลเซียมซิติเกต (CS) และตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) โดยได้ใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง PMMA:CS เป็น 3:7 และ 4:6 เนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาค CS ใน PMMA เมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ [26] แต่ได้เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง MMA-HEMA อยู่ใน ช่วง 0:100 ถึง 100:0 เมื่อทำการผสมวิภาคของแข็งและของเหลวเข้าด้วยกัน โดยใช้เอ็น.เอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (DMT) เป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดการคายความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วม PMMA-PHEMA

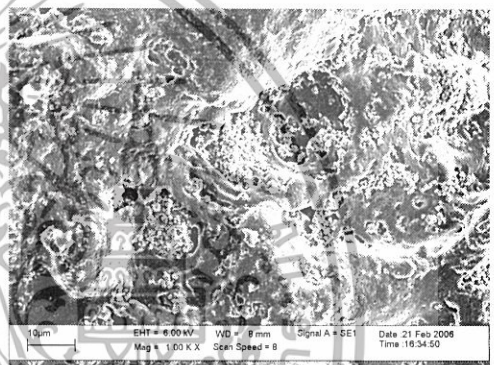
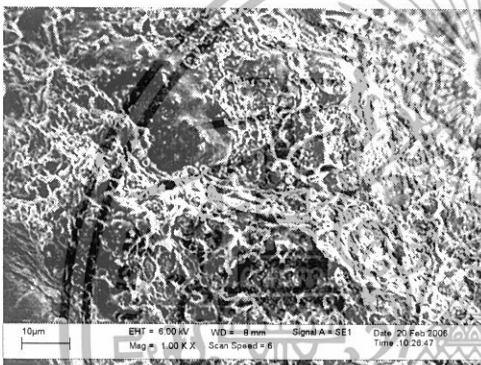
เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสูตรที่มีอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 และ 4:6 พบว่าอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 จะได้ของผสม (Paste) ที่มีลักษณะเหลวกว่าสูตร 3:7 ทั้งนี้เนื่องจากการหยด MMA มอนอเมอร์ลงไปของผสม MMA มอนอเมอร์จะไปละลาย PMMA ส่วนหนึ่งที่อยู่ ในวิภาคของแข็งซึ่งสูตร 4:6 นั้นมีปริมาณ PMMA มากกว่า จึงทำให้ PMMA สามารถละลายออกมาได้มากและเหลือวิภาคของแข็งที่อยู่ในเศษที่น้อยกว่าสูตร 3:7 ของผสมที่ได้จึงมีลักษณะเหลวกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก PMMA ที่ละลายออกมามีความหนืดค่อนข้างสูง

ทั้งนี้ความเหลวของของผสมที่ได้ยังพบว่า เมื่อเติม HEMA ลงไปจะได้ของผสมที่มีความหนืดมากขึ้น เนื่องจาก HEMA นั้นเป็นมอนอเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ความหนืดมาก ทำให้ความหนืดของของผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ HEMA ยังมีผลต่อการละลายของ PMMA ในของผสม กล่าวคือ เมื่อทำการทดสอบการละลายของ PMMA ใน HEMA เทียบกับการละลายของ PMMA ใน MMA พบว่า PMMA ละลาย HEMA ได้น้อยกว่าใน MMA ดังนั้น การเพิ่มปริมาณ HEMA จึงส่งผลให้ความหนืดของเศษที่มากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของวิภาคของแข็งที่ไม่ละลายมากกว่า

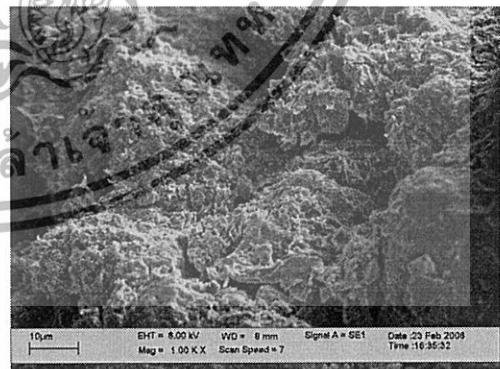
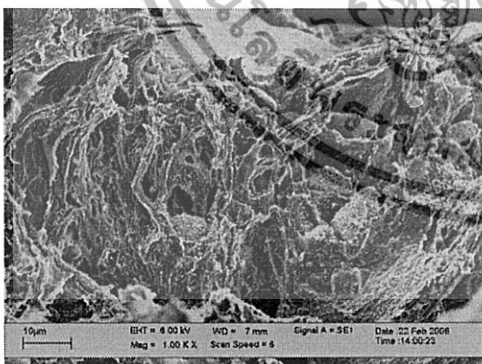
จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น อัตราส่วนของซีเมนต์ที่ผสมได้ดี คือ สูตรที่ 1, 2, 6, 7 และ 8 จากนั้นนำซีเมนต์ที่ได้มาศึกษาโครงสร้างจุลภาค เพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาค CS ในก้อนซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA ซึ่งผลการตรวจสอบโดยใช้เทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า ในก้อนซีเมนต์ประกอบด้วยวิภาคต่อเนื่องนั้นเป็นวิภาคของสารอินทรีย์ ส่วนที่เห็นเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายตัวอยู่นั้นเป็นวิภาคของสารอนินทรีย์ จากรูปจะเห็นว่า ซีเมนต์ทั้ง 10 สูตรมีการกระจายตัวในลักษณะที่คล้ายกัน โดยส่วนของพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นวิภาคที่ต่อเนื่องและมีอนุภาคของ CS กระจายอยู่ ซึ่งอาจมีบางส่วนที่มีลักษณะของการเกาะกลุ่มกันของ CS



(ก) สูตร1 PMMA:CS=3:7(MMA:HEMA=100:0) (ข) สูตร2 PMMA:CS=3:7(MMA:HEMA=70:30)



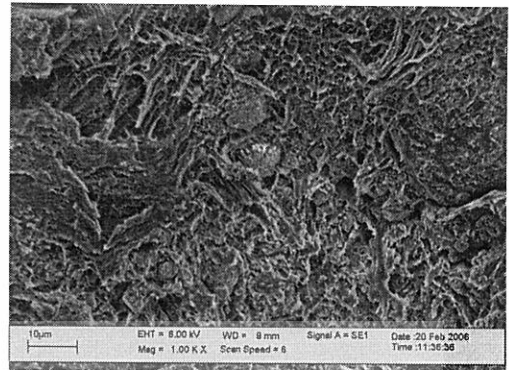
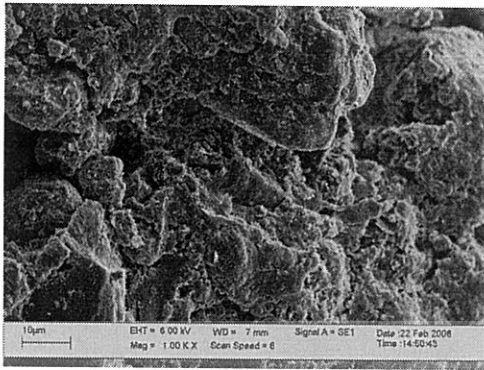
(ค) สูตร3 PMMA:CS=3:7(MMA:HEMA=50:50) (ง) สูตร4 PMMA:CS=3:7(MMA:HEMA=30:70)



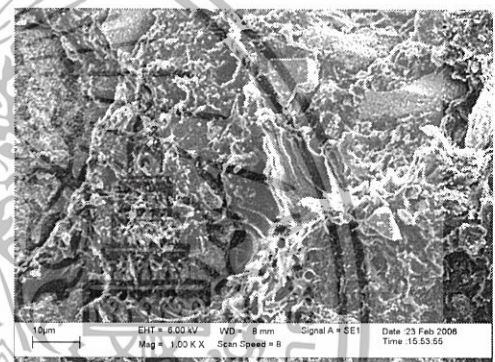
(จ) สูตร5 PMMA:CS=3:7(MMA:HEMA=0:100) (ฉ) สูตร6 PMMA:CS=4:6 (MMA:HEMA=100:0)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการกระจายตัวของ CS ภายในซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สูตร 7 PMMA:CS=4:6(MMA:HEMA=70:30) (ค) สูตร 8 PMMA:CS=4:6(MMA:HEMA=50:50)



(ง) สูตร 9 PMMA:CS=4:6(MMA:HEMA=30:70) (ฉ) สูตร 10 PMMA:CS=4:6(MMA:HEMA=0:100)

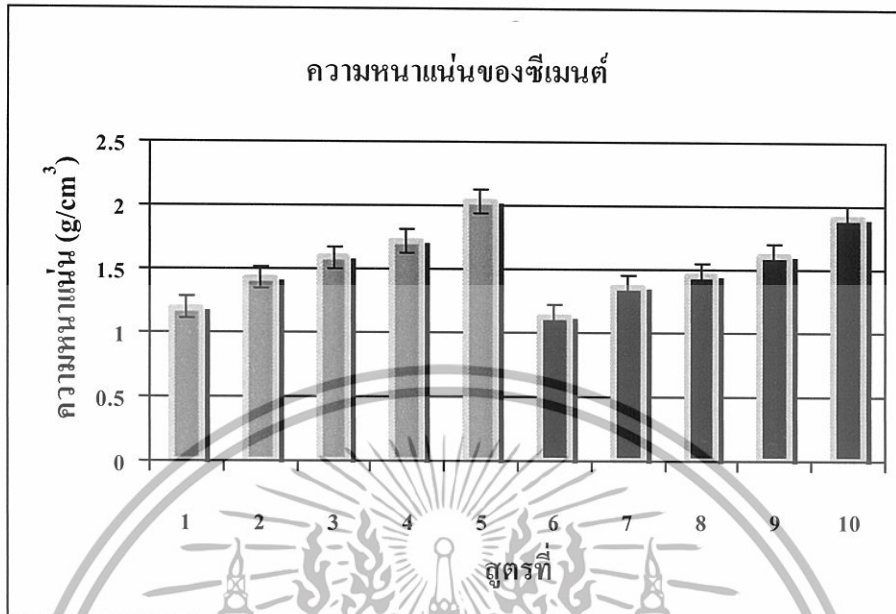
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงการกระจายตัวของ CS ภายในซีเมนต์ (ต่อ)

4.3.3 ความหนาแน่นของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

รูป 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA ที่เตรียมได้ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วน CS ซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีความหนาแน่นสูงในซีเมนต์นั้นลดลง ความหนาแน่นจะมีค่าลดลงด้วย และเนื่องจากปริมาณของ CS ในสูตรที่ 1-5 (อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7) นั้นมีอยู่ประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สูตรที่ 6-10 (อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6) มีปริมาณของ CS อยู่ประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความหนาแน่นของสูตรที่ 1-5 มีค่ามากกว่าสูตรที่ 6-10 เมื่อเทียบกันระหว่างอัตราส่วน MMA:HEMA ที่เท่ากัน

ในขณะที่เมื่ออัตราส่วน MMA ในซีเมนต์ลดลง ซึ่งหมายความว่าอัตราส่วนของ HEMA จะเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของซีเมนต์ก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก HEMA เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า MMA จึงมีความหนืดสูง ทำให้ซีเมนต์ที่มีปริมาณ HEMA สูง จะมีน้ำหนักสูงขึ้นมา

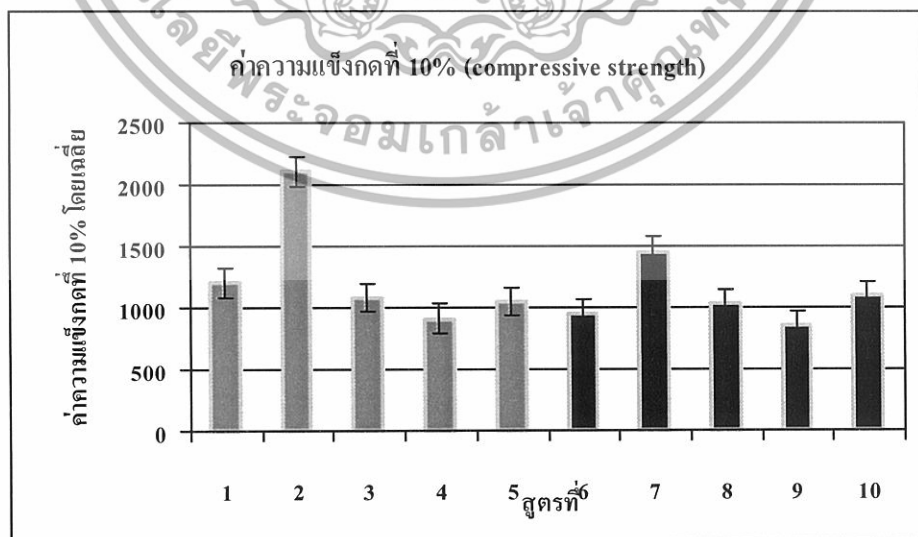
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

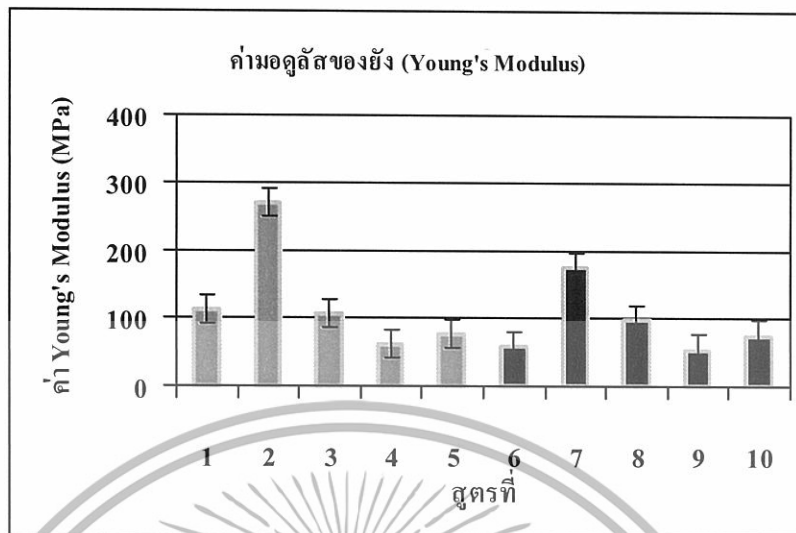
4.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

เมื่อนำซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ เมื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณ ได้ผลดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 (ภาคผนวก ง-1 และ ง-8)



รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงที่ 10 เปอร์เซ็นต์ (Compressive strength at 10%) ของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ของซีเมนต์

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสูตรที่ 1 และสูตรที่ 5 นั้น พบว่าซีเมนต์สูตรที่ 1 มีค่าความแข็งกตสูงกว่า และเป็นเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ 6 และสูตรที่ 10 โดยสูตรที่ 1 และ 6 นั้นมีองค์ประกอบเป็น PMMA ในขณะที่สูตรที่ 5 และ 10 มีองค์ประกอบเป็น PHEMA โดยสูตรที่ 1 และ 5 (MMA:HEMA เป็น 100:0) มีอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 ส่วนสูตรที่ 6 และ 10 (MMA:HEMA เป็น 0:100) มีอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 โดยสูตรที่ 5 และ 10 สามารถรับแรงได้น้อยกว่า แต่ความยืดหยุ่นมีแนวโน้มที่มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก PMMA นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PHEMA แล้ว สามารถรับแรงได้มากกว่า แต่ PHEMA สามารถถ่ายเทแรงได้ดีกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกันทั้งหมดในสูตรที่ 1-5 พบว่าสูตรที่ 2 และ 3 มีค่าสมบัติเชิงกลสูงกว่าสูตรที่ 1, 4 และ 5 เช่นเดียวกับกับสูตรที่ 6-10 คือ สูตรที่ 7 และ 8 ก็ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าสูตรอื่น ซึ่งสูตรที่ 2 กับ 7 และสูตรที่ 3 กับ 8 มีปริมาณ MMA:HEMA เป็น 70:30 และ 50:50 ตามลำดับ เนื่องจากตอนที่ผสมได้ลักษณะที่เป็นเพสต์ (paste) ความหนืดไม่มาก เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานน้อย ทำให้ค่าความแข็งกตที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และค่ามอดูลัสของยังมีค่ามากกว่าสูตรอื่น

สูตรที่ 2 และ 7 ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าสูตรที่ 1 และ 6 เนื่องจากสูตร 2 และ 7 มีองค์ประกอบของ HEMA ทำให้สามารถถ่ายเทแรงได้ดี มีความยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนั้นสูตรที่ 2 และ 7 ยังให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าสูตรที่ 5 และ 10 เพราะสูตร 2 และ 7 มีองค์ประกอบของ MMA ทำให้สามารถรับแรงได้ดี ทนต่อแรงกดได้มาก ค่าสมบัติเชิงกลจึงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่มีอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 มีแนวโน้มค่าความแข็งกมากกว่าสูตรที่มีอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 เพราะมีปริมาณของ CS มากกว่า ซึ่ง CS เป็นสารอนินทรีย์ที่มีแข็งแรงมากค่าความแข็งกจึงสูง

เพราะฉะนั้นจากสาเหตุข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า สูตรที่ 2 และ 7 เป็นสูตรที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเพราะเป็นสูตรที่มีค่าความแข็งกค่อนข้างสูง

4.3.5 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

เมื่อนำซีเมนต์ที่ได้มาเผาด้วยตะเกียงเบนเซน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เพื่อหาปริมาณของส่วนที่เป็น CS และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ซึ่งมีองค์ประกอบของ PMMA และ PHEMA ที่มีอยู่จริงในก้อนซีเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของ CS และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณ CS และส่วนพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในก้อนซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	ปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์ (%wt)			
		CS (เริ่มต้น)	CS (จากการเผา)	พอลิเมอร์ (เริ่มต้น)	พอลิเมอร์ (จากการเผา)
3:7	100:0	44	50	56	50
	70:30	44	49	56	51
	50:50	44	46	56	54
	30:70	44	45	56	55
	0:100	44	45	56	55
4:6	100:0	38	43	62	57
	70:30	38	41	62	59
	50:50	38	40	62	60
	30:70	38	40	62	60
	0:100	38	39	62	61

หมายเหตุ* การคำนวณปริมาณองค์ประกอบในซีเมนต์ (แสดงในภาคผนวก จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ที่ได้จากการคำนวณตอนเริ่มต้นนั้นมีค่าสูงกว่าเปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ที่คำนวณได้จริงหลังการเผา ทั้งนี้เนื่องจากในองค์ประกอบของซีเมนต์นั้นมี MMA ซึ่งเป็นสารที่มีจุดเดือดต่ำ ระเหยง่าย อีกทั้งในขั้นตอนการขึ้นรูปนั้นมีความร้อนเกิดขึ้นสูง และก่อนที่จะนำมาเผา นั้น ได้ตั้งทิ้งไว้หลังจากขึ้นรูปเป็นเวลานานทำให้ MMA บางส่วนระเหยออกไปส่วนหนึ่ง ซึ่งในสูตรที่ 1 และสูตรที่ 6 เป็นสูตรที่มีอัตราส่วน MMA มากที่สุด ทำให้เปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ที่คำนวณได้หลังการเผามีค่าแตกต่างจากเปอร์เซ็นต์ที่คำนวณในตอนต้นมากกว่าสูตรอื่นๆ

ส่วนสูตรที่ 2- 5 และสูตรที่ 7- 10 นั้น มีปริมาณ MMA ลดลง แต่มีปริมาณของ HEMA มากขึ้น ซึ่ง HEMA นั้นเป็นสารที่มีพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซี ทำให้มีสมบัติเป็นสารที่มีจุดเดือดสูง จึงระเหยยาก ทำให้เปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์หลังการเผาที่คำนวณได้ของสูตรที่มีอัตราส่วน MMA น้อยลง และมีปริมาณ HEMA มากขึ้น จึงมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์ที่คำนวณได้ในตอนต้นมากขึ้นตามลำดับ

4.3.6 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง PMMA-PHEMA ในซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA ด้วยเทคนิค GPC

เมื่อนำซีเมนต์ในอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 ที่ได้ไปวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วม PMMA-PHEMA ในซีเมนต์ พบว่าค่า M_n อยู่ในช่วง 20,500-86,900 กรัม/โมล ค่า M_w อยู่ในช่วง 105,000-153,000 กรัม/โมล และค่า MWD อยู่ในช่วง 1.77- 5.14 ดังตารางที่ 4.3

อย่างไรก็ตามน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วม PMMA-PHEMA ที่วิเคราะห์จากเทคนิค GPC มาจาก PMMA เริ่มต้น (สังเคราะห์ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันด้วยสารละลาย, PMMA₁) ร่วมกับ PMMA และ PHEMA ที่ได้จากพอลิเมอไรเซชันที่เกิดจากการขึ้นรูป (PMMA₂ และ PHEMA) ดังนั้นสามารถคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลที่เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของ MMA และ HEMA (Mw-PMMA₂-PHEMA) ได้ดังต่อไปนี้

การคำนวณ

ตัวอย่าง จากสูตรที่ 2

องค์ประกอบของ MMA, HEMA และ PMMA₁ ในสารตั้งต้น เท่ากับ 0.42, 0.18 และ 0.285 กรัม ตามลำดับ ดังนั้นพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง PMMA-PHEMA ทั้งหมดที่เกิดจาก PMMA₁, MMA ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (PMMA₂) และ HEMA ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (PHEMA) มีค่าเท่ากับ 0.885 กรัม โดยสามารถคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วม PMMA-PHEMA ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

M_w -PMMA₁ คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA เริ่มต้น

M_w -PMMA₂-PHEMA คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA-PHEMA จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA และ HEMA มอนอเมอร์

$$M_w \text{ จาก GPC} = M_w\text{-PMMA}_1 + M_w\text{-PMMA}_2\text{-PHEMA}$$

$$= (M_w\text{-PMMA}_1 \times \frac{\text{ปริมาณของ PMMA}_1}{\text{ปริมาณของ PMMA}_1 + \text{PMMA}_2\text{-PHEMA}}) + (X \times \frac{\text{ปริมาณของมอนอเมอร์ MMA+HEMA}}{\text{ปริมาณของ PMMA}_1 + \text{PMMA}_2\text{-PHEMA}})$$

$$105000 = \frac{(85,600 * 0.285)}{0.885} + \frac{(X * 0.6)}{0.885}$$

$$X = 115,000 \text{ กรัม/โมล}$$

ซึ่ง X คือ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์รวม PMMA-PHEMA ที่เกิดจาก MMA และ HEMA

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA-PHEMA ในซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

สูตร	อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	ผลจาก GPC			Mw ที่ได้เมื่อคำนวณ จากเทคนิค GPC
			Mn	Mw	MWD	
1	3:7	100:0	67,700	145,000	2.15	174,000
2	3:7	70:30	20,500	105,000	5.14	115,000
3	3:7	50:50	86,900	153,000	1.77	186,000
4	3:7	30:70	77,200	153,000	1.98	185,000
5	3:7	0:100	39,900	119,000	2.98	135,000
PMMA ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค พอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย			41,000	85,600	2.08	-

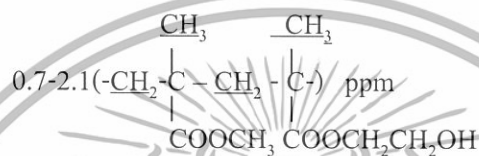
จากผล M_w ที่ได้จากการคำนวณ พบว่า มีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้นจากน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ แสดงให้เห็นว่า MMA และ HEMA เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันไปเป็นพอลิเมอร์ระหว่าง PMMA-PHEMA ยกเว้นสูตรที่ 1 และ 5 ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น PMMA และ PHEMA ตามลำดับ โดยค่า Mn, Mw และ MWD อยู่ในช่วง 20,500-86,900 กรัม/โมล, 105,000-153,000 กรัม/โมล และ 1.77-5.14 ตามลำดับ

4.3.7 ผลการวิเคราะห์หามอนอเมอร์ที่คงเหลือจากเทคนิค NMR

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

$^1\text{H-NMR}$ (CDCl_3) δ 6.11 ($\text{H}_a, \text{d}, \text{H}_2\text{C}=\text{C}$) 5.55 ($\text{H}_b, \text{d}, \text{H}_2\text{C}=\text{C}$) 3.6 (3H, br, $-\text{OCH}_3$, $-\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$)



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบสัญญาณที่สำคัญดังนี้ สัญญาณที่ 6.11 ppm (สัญญาณ a) เป็นสัญญาณของโปรตอนจาก อัลคีน-โปรตอน ตำแหน่ง a (H_a) สัญญาณที่ 5.55 ppm (สัญญาณ b) เป็นสัญญาณของโปรตอนจาก อัลคีน-โปรตอน ตำแหน่ง b (H_b) ซึ่ง 2 สัญญาณข้างต้น เป็นสัญญาณของมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) และมอนอเมอร์ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (HEMA) ที่เหลืออยู่ ส่วนสัญญาณที่ 3.6 ppm (สัญญาณ c) เป็นสัญญาณของโปรตอนจากหมู่เมทิลที่ติดกับตำแหน่ง ester-oxygen ของ PMMA-PHEMA ซึ่งสัญญาณจาก PMMA ประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ PMMA จากสารตั้งต้นในการเตรียมซีเมนต์ ร่วมกับ PMMA ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA ส่วนสัญญาณที่อยู่ในช่วง 0.7-2.1 ppm (สัญญาณ d) เป็นสัญญาณที่เกิดจาก 3 ส่วนหลัก ได้แก่ โปรตอนจาก อัลฟา-เมทิล ที่ติดกับพันธะคู่ในโครงสร้างของ MMA และ HEMA, สัญญาณโปรตอนจาก อัลฟา-เมทิล ที่ติดกับคาร์บอนของสายโซ่หลักในโครงสร้างของ PMMA-PHEMA และสัญญาณโปรตอนจาก หมู่เมทิลีน (Methylene group) ในสายโซ่หลักของ PMMA-PHEMA

ก) การคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยตรงจากสัญญาณ NMR

ปริมาณของมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันนั้น สามารถคำนวณได้ด้วยการคำนวณจากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคของสัญญาณ NMR ของมอนอเมอร์ (สัญญาณที่ 6.11, 5.55 ppm) และสัญญาณของพอลิเมอร์ (สัญญาณที่ 0.7-2.1 ppm) แล้วคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่ตามตัวอย่างวิธีการคำนวณมีดังนี้

ตัวอย่าง

สูตรที่ 2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ PMMA:CS:MMA:HEMA ในก้อนซีเมนต์เท่ากับ

0.4:0.6:0.48:0.12

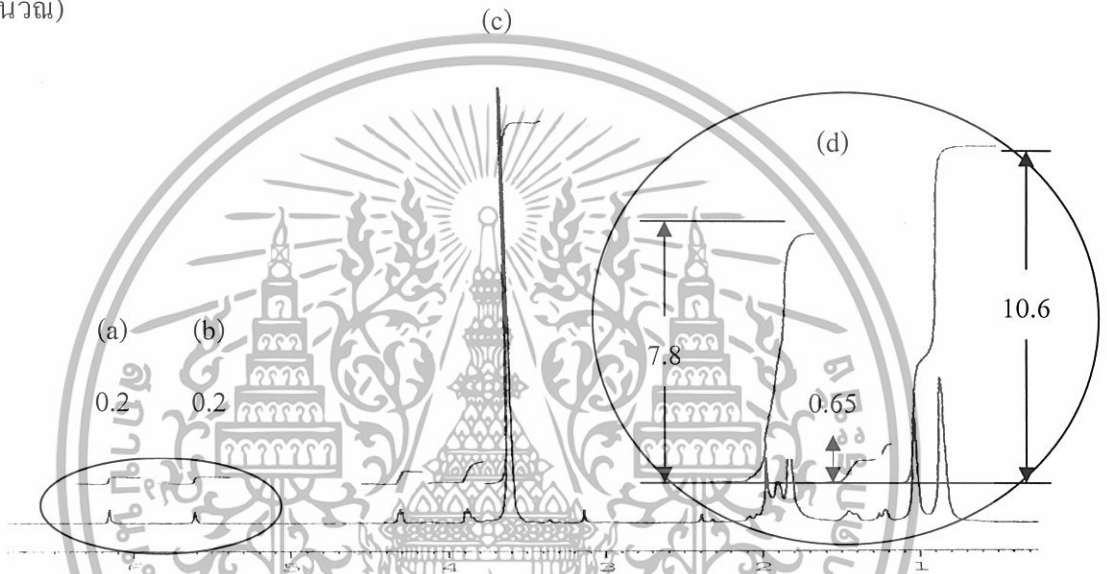
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-มอนอเมอร์ สัญญาณที่ 6.11 ppm (a) ค่าการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีค เท่ากับ 0.2

-มอนอเมอร์ สัญญาณที่ 5.55 ppm (b) ค่าการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีค เท่ากับ 0.2

-พอลิเมอร์ สัญญาณระหว่าง 0.7 ppm ถึงสัญญาณที่ 2.1 ppm (d) ค่าการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคทั้งหมด เท่ากับ 3.81

(เมื่อค่าการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคของสัญญาณที่ 6.11 ppm เท่ากับค่าการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคของสัญญาณที่ 5.55 ดังนั้นกำหนดให้ใช้ค่าการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคของสัญญาณที่ 6.11 ในการคำนวณ)



รูปที่ 4.7 สเปกตรัม ¹H-NMR ของ พอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตในซีเมนตสูตร 2 (PMMA:CS เป็น 3:7 และ MMA:HEMA เป็น 70:30)

การคำนวณ

$$a = \frac{\text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} \times \text{จำนวนโปรตอน}}{5E} \tag{1}$$

$$d = 5E \tag{2}$$

$$d/5 = E \tag{2}$$

แทนค่า (2) ใน (1)

ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ	=	$\frac{5a}{E+a}$
เปอร์เซ็นต์มอนอเมอร์ที่เหลือ	=	ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ x 100

หมายเหตุ* 5E คือ โปรตรอนจาก -CH₂ และ -CH₃ ของ PMMA ที่เติมลงไปขณะผสมรวมกับ

PMMA ที่เกิดจากการพอลิเมอไรเซชันของ MMA และจาก ของ PHEMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าจากสูตรที่ 2 ลงในสมการ (1) และ (2)

$$\begin{aligned} \text{ค่า } a &= \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ } \times \text{ จำนวน โพรตอน} & (1) \\ \text{ค่า } d &= 5E \\ 19.05 / 5 &= E \\ E &= 3.81 & (2) \end{aligned}$$

แทนค่า (2) ใน (1)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= 0.2 / (3.81 + 0.2) \\ &= 0.0500 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= 0.0500 \times 100 \\ &= 5.0 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือในสูตร 2 พบว่าได้เท่ากับ 5.0 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์ทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบในซีเมนต์

สำหรับการคำนวณหาปริมาณของมอนอเมอร์ในสูตรที่เหลือนั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีเดียวกันกับข้างต้น ซึ่งผลจากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิค NMR

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	มอนอเมอร์ที่เหลือ ¹ จาก NMR (%)	มอนอเมอร์ที่เหลือเทียบกับมอนอเมอร์เริ่มต้น ² (%)	มอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยา ³ (%)	มอนอเมอร์ที่เหลือเทียบกับน้ำหนักรวม ⁴ (%)
3:7	100:0	0.5	0.8	99.2	0.3
	70:30	5.0	7.5	92.5	2.8
	50:50	1.0	1.5	98.5	0.6
	30:70	1.2	1.8	98.2	0.7
	0:100	5.1	7.7	92.3	2.9
4:6	100:0	0.3	0.5	99.5	0.2
	70:30	0.6	1.0	99.0	0.4
	50:50	2.9	4.8	95.2	1.8
	30:70	3.7	6.2	93.8	2.3
	0:100	7.2	12.0	88.0	4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยคิดเทียบกับปริมาณมอนอเมอร์เริ่มต้น

ในทุกสูตรที่ทำการผสมนั้นมีปริมาณของมอนอเมอร์เริ่มต้นคงที่เท่ากับ 0.6 แต่จะมีสัดส่วนของ PMMA ที่แตกต่างกัน เป็น 30% ในสูตรที่ 1-5 และเป็น 40% ในสูตรที่ 6-10 ดังนั้นหากนำค่าคงที่ที่ได้จากการคำนวณในข้อ ก มาคิดเทียบกับปริมาณ PMMA และ มอนอเมอร์เริ่มต้นที่ใช้ จะทำให้ทราบปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่จริง ดังตัวอย่างในการคำนวณต่อไปนี้

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= \frac{\text{เปอร์เซ็นต์มอนอเมอร์ที่เหลือ}(\text{ก}) \times \text{ปริมาณ}(\text{PMMA} + \text{มอนอเมอร์}) \text{เริ่มต้น}}{\text{ปริมาณมอนอเมอร์}} \\ \text{ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= \frac{\text{เปอร์เซ็นต์มอนอเมอร์ที่เหลือ}(\text{ก}) \times \text{ปริมาณ}(\text{PMMA} + 0.6) \text{ เริ่มต้น}}{0.6} \end{aligned}$$

จากข้อ ก การคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือของสูตรที่ 2 มีค่าเท่ากับ 5.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณ PMMA และมอนอเมอร์ที่ใช้เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.3 และ 0.6 ตามลำดับ ดังนั้น ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ

$$= \frac{5.0 \times (0.3 + 0.6)}{0.6} = 7.5 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ค) การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยา

จากการคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือในข้อ ข สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาได้โดยการคำนวณ ดังนี้

การคำนวณ

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

จากการคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยคิดเทียบกับปริมาณของมอนอเมอร์ในสูตรที่ 2 ในข้างต้น เท่ากับ 7.8 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยา} &= 100 - 7.5 \\ &= 92.5 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง) การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือโดยคิดเทียบกับปริมาณสารตั้งต้นทั้งหมด

ในทุกสูตรของการผสมซีเมนต์มีองค์ประกอบ 4 ส่วน คือ CS PMMA MMA และ HEMA โดยมีปริมาณสุทธิเท่ากับ 1.6 กรัม โดยมีปริมาณของ PMMA และ CS เป็น 3:7 ในสูตรที่ 1-5 และเป็น 4:6 ในสูตรที่ 6-10 และมีปริมาณ MMA และ HEMA เปลี่ยนแปลงอัตราส่วน ดังตารางข้างต้น ดังนั้น จึงสามารถคำนวณปริมาณของมอนอเมอร์ที่คงเหลือเทียบกับปริมาณสุทธิของผลิตภัณฑ์ ดังสูตรต่อไปนี้

การคำนวณ

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

จากผลการคำนวณปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือของสูตรที่ 2 ในข้างต้น เท่ากับ 5.2 เปอร์เซ็นต์

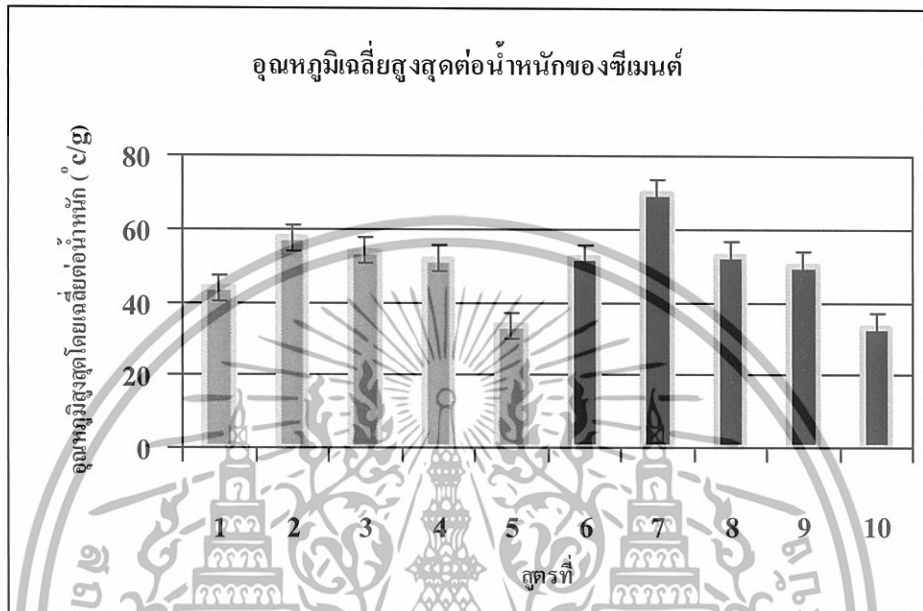
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลือ} &= \frac{5.0 \times (0.3 + 0.6)}{1.6} \\ &= 2.8 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NMR พบว่า ซีเมนต์ที่ได้ภายหลังจากการผสมมีปริมาณมอนอเมอร์เหลืออยู่ในช่วง 0.3-7.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำหนักสุทธิของซีเมนต์และปริมาณมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 88.0-99.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า มอนอเมอร์ส่วนใหญ่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันไปเป็นพอลิเมอร์ สำหรับสูตรที่ 1, 3, 6 และ 7 มีปริมาณมอนอเมอร์คงเหลือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์นั้น จะถือว่าปริมาณมอนอเมอร์เหลือน้อยมาก สาเหตุหลักมาจากธรรมชาติของ PMMA นั้น จะมี MMA มอนอเมอร์เหลืออยู่โดยเฉลี่ยประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และ MMA มีจุดเดือดต่ำ ระเหยง่าย จึงทำให้มีปริมาณมอนอเมอร์เหลือน้อยมาก แต่ในกรณีที่มีบางสูตรที่มีมอนอเมอร์เหลือมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์นั้น น่าจะมีสาเหตุมาจาก CS ที่กระจายตัวอยู่ในของผสมนั้น เป็นตัวขวางการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

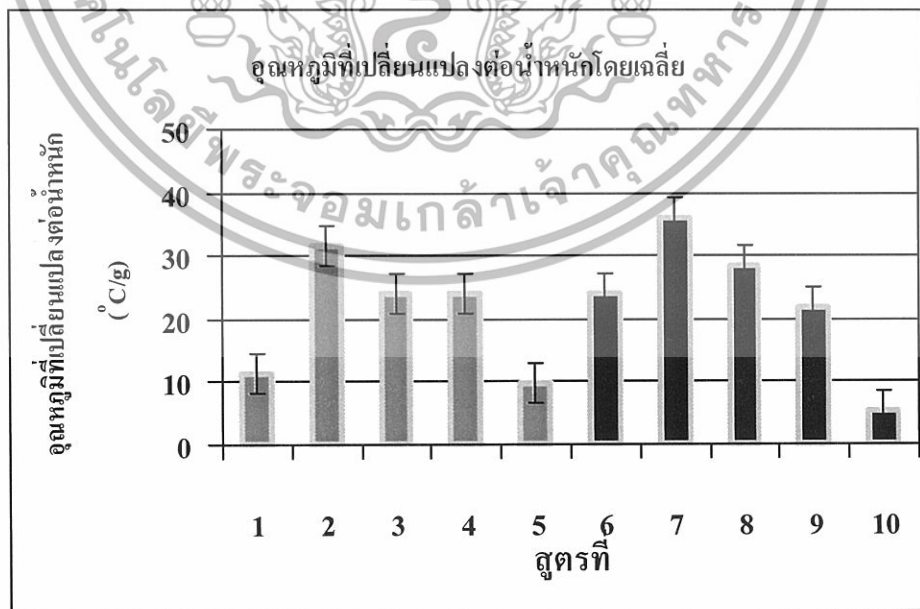
4.3.8 ผลการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของซีเมนต์

ในการผสมซีเมนต์จะเกิดการแข็งตัวของซีเมนต์ ซึ่งในขณะที่เกิดการแข็งตัวจะเกิดการคายความร้อนขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิสูงสุด พบว่าเมื่อปริมาณของ HEMA มากขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลง ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดต่อน้ำหนักของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA



รูปที่ 4.9 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำหนักโดยเฉลี่ยของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าสูตรที่มีปริมาณ HEMA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การคายความร้อนลดลง เนื่องจาก HEMA มีสมบัติชอบน้ำ ทำให้ซีเมนต์ที่ได้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น แต่สูตร 1 (MMA:HEMA เป็น 100:0) มีการคายความร้อนต่ำกว่าสูตรที่ 2 (MMA:HEMA เป็น 70:30) เพราะสองสูตรนี้มีสารตั้งต้นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่างกัน และมอนอเมอร์ทั้งสองอาจมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ต่างชนิดมากกว่าที่จะทำปฏิกิริยากับตัวเอง จึงทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในสูตรที่ 2 จึงเกิดมากกว่า ทำให้คายความร้อนออกมามากกว่าสูตรที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA เตรียมได้จากการผสมมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) มอนอเมอร์ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (2-HEMA) แคลเซียมซิลิเกต (CS) ตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) และกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอ็น, เอ็น-ไดเมทิล-4-โทลูอิดีน (DMT) โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง PMMA/CS เป็น 3:7 และ 4:6 เนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาค CS ใน PMMA เมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ แต่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง MMA:HEMA ในช่วง 100:0 ถึง 0:100 โดยซีเมนต์จะเซตตัวเป็นของแข็ง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA และ HEMA ไปเป็น PMMA-PHEMA

2. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นพบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ CS และ HEMA โดยสมบัติเชิงกลสูตรที่ 2 ซึ่งมีอัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 และมีอัตราส่วน MMA:HEMA เป็น 70:30 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยมีค่าความแข็งแรงที่ 10% และค่ามอดุลัสของยัง เท่ากับ 2008.93 และ 269.82 นิวตัน ตามลำดับ

3. สูตรที่เกิดปฏิกิริยาไปเป็นพอลิเมอร์รวมจะมีอุณหภูมิสูงกว่าสูตรที่มีการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นไฮโมพอลิเมอร์ โดยสูตรที่มีปริมาณ HEMA มากจะมีแนวโน้มที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสูตรที่มี MMA มาก

4. เมื่อนำ PMMA-PHEMA ในก๊อซีเมนต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA-PHEMA ที่เตรียมได้ ซึ่งในสูตรที่มีอัตราส่วน PMMA:CS เท่ากับ 3:7 อัตราส่วน MMA:HEMA เท่ากับ 50:50 มีค่ามากที่สุด โดยจะมีค่า Mn, Mw และ MWD อยู่ในช่วง 20,500-86,900 กรัม/โมล, 105,000-153,000 กรัม/โมล และ 1.77-5.14 ตามลำดับ

5. จากการทดสอบการละลายของ PMMA ใน HEMA เทียบกับการละลายของ PMMA ใน MMA พบว่า PMMA ละลาย HEMA ได้น้อยกว่าใน MMA เพราะฉะนั้น การเพิ่มปริมาณ HEMA จึงส่งผลให้ความหนืดของพาสท์มากขึ้น เมื่อทำการขึ้นรูปซีเมนต์ จึงทำให้อากาศอาจจะถูกกักอยู่ภายในชิ้นงานมากขึ้น ดังนั้น ซีเมนต์ในสูตร 2 และ 7 (อัตราส่วน MMA:HEMA เท่ากับ 70:30) จึงมีค่าการแข็งกตและอุณหภูมิในการคายความร้อนมากกว่าสูตรอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการขึ้นรูปซีเมนต์โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ (Redox) ซึ่งควรมีการศึกษาการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอื่นๆต่อไป เช่น อาศัยการเกิดปฏิกิริยาที่เริ่มต้นด้วยแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น เป็นต้น
2. ในโครงการวิจัยนี้เป็นการเตรียมเซรามิกส์ที่มีวัฏภาคอนินทรีย์เป็นแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นสารที่มีความแข็งแรงสูง แต่ไม่ใช่สารประเภทเดียวกันกับร่างกาย จึงควรมีการปรับปรุงในส่วนนี้เพื่อให้เกิดการเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นกับร่างกาย โดยสามารถเปลี่ยนเป็นไฮดรอกซีเอปาทิตแทนแคลเซียมซิลิเกต เป็นต้น แล้วทำการศึกษาความเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบต่อไป
3. ควรมีการตรวจสอบซีเมนต์ที่เตรียมได้ว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ภายในร่างกายได้หรือไม่ เช่น การตรวจสอบความว่องไวทางชีวภาพ เป็นต้น
4. จากเทคนิค GPC พบว่า น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของซีเมนต์ในสูตร MMA:HEMA เป็น 70:30 มีค่าที่แตกต่างจากสูตรอื่น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมว่ามีผลเกี่ยวเนื่องมาจากโครงสร้างของพอลิเมอร์หรือไม่

เอกสารอ้างอิง

1. T.Yamamuro, Devoplement of bioactive bone cement and its clinical applications, Japan, 1998.
2. Xuanyong, Mechanisim of apatite formation on wollastonie coating in simulated body fluids, Hong Kong, 2004
3. Amethyst Galleries.Inc., 1996.THE MINERAL WOLLASTONITE.[online], Avalliable: <http://mineral.halleries.com/minerals/silicate/class.htm>
4. A. Ulioh, Introduction to Industrial Polymer 2 nd, Hanser Publisher, Germany, 1993
5. Parker, S.P., Encyclopidia of chemistry Vol 3, MaGraw-Hill Inc.,USA., 1993
6. M.B.Smith, Organic Synthesis International edition, McGraw-Hill Inc., Germany, 1993
7. B.Dietoich, P.Viout and J.M.Lehn, In Machrocyclic Chemistry, VCM, Weineim, 1993
8. Goodfellow Cambridge Limited., Material Information Polymethylmethacrylate PMMA, Acrilic.[online], Avariable:
9. มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์, เคมีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2540
10. ศูนย์ข้อมูลวัสดุอันตรายและเคมีภัณฑ์, 2 - Hydroxymethyl methacrylate, เข้าได้ถึงจาก :<http://www.pcd.go.th>
11. V.P.Bavareso, C.A.C. Zavaglia, S.M. Malmonge and M.C. Reis., 2002. Viability of pHEMA Hydrogel as Coating in Human Synouial Joint Prosynthesis.[online], Avariable : <http://www.Scielo Brazil.com>
12. J.M.Seidel and S.M. Malmonge., 2000. Synthesis of pHEMA Hydrolysis for using as Biomaterial. Bulk and Solution Radical-Initiated Polymerization Technique.[online], Avariable:<http://www.Scielo Brazil.com>
13. Jie Song, Eduardo Saiz and Carolyn R. Bertozzi, Preparation of pHEMA-CP composites with high interfacial adhesion via template-driven mineralization, Ceramic Society, 23 (2003) 2905-2919.
14. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2002, ไฮดรอกซีเอปาทิต (Hydroxyapatite) วัสดุทดแทนกระดูก.[online], เข้าถึงได้จาก:http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool12.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<http://www.goodfellow.com/csp/active/static/E/ME30.html>

15. Azom.com, Bismaterial-An Overvie. [online], Available:

<http://www.azom.com/detial.asp?ArticleID=108>

16. Azom.com, Hydroxyapatite Composite Biomaterial-Evolution and Application. [online],

Available <http://www.azom.com/detial.asp?ArticleID=1718>

17. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน เอกสารประกอบวิชาวัสดุศาสตร์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

18. ชูศักดิ์ เวชแพศย์ และสมศรี คาวฉาย โครงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทางชีวภาพทางการแพทย์ สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหิดล

19. H.G.Kurzcyk and J.Wahrer, Synthesis wollastonite and its use in ceramic boys, Interceram. NR., 2(1999)119-225

20. A.Balogh and I. Kotsis, Synthesis of wollastonite, University of Veszprem, Institute of Silicate Chemistry and Technology, Ceramic International, 15(1989)79-85

21. P. Silipannon, S. Hayshi, A. Yasumori and K.Okada, Preparation and sintering of CaSiO₃ from coprecipitated powder using NaOH as precipitant and its apatite formation in simulated body fluid solution, J. Mater Res., 14(1999)529-540

22. B. Pascual, B. Bazquaz, M. Curruchaca, I. Coni, M. P. Cincara, S.J. Cil, J.A. Pannell, B. Lencsels and J. San Roman, New aspect of the effects of size and distribution on the setting parameters and mechanical properties of acrylic bone cements, biomaterials, (1996) 509-518

23. Carlos Elvira, Belén Levenfeld, Blanca Vázquez and Julio San Román, Amine activators for the cool peroxide initiated polymerization of acrylic monomer, J. Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry, 34(1996) 2783-2789.

24. J.A Méndez, M. Fernández, A. González-Corchón, M. Salvado, F. Collia, J.A. de Pedro, B. Levenfeld, A. López-Bravo, B. Vázquez, J. San Román, Injectable self-curing bioactive acrylic-glass composite charged with specific anti-inflammatory/analgesic agent, Biomaterials, 25 (2004)2381-2392.

25. C. Supanee, Preparation of composite from hydroxyapatite and poly(ethylene adipate)-copoly (ethylene terephthalate), 2004.

26. ศิริพร และสาตี และอรรธรณ จันทร์คำ, การเตรียมซีเมนต์แคลเซียมซิลิเกตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตสำหรับงานทางการแพทย์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 73-1110 Radiation = 1.540598 Quality : Calculated

Ca Si O ₃							2th			I			h		
Wollastonite / Calcium Silicate							11.502	12	1	0	0	0	*51 933	8	0
							12.425	<1	0	0	1	0	52 068	5	-4
							12.569	1	0	0	1	0	52 164	4	-1
							14.847	<1	-1	0	1	0	52 978	12	-3
							16.223	1	-1	0	1	0	*52 978	12	-2
							17.503	<1	0	-1	1	1	53 162	11	-4
							17.913	4	1	0	1	1	53 351	5	0
							*17.913	4	0	1	1	1	*53 351	5	0
							18.849	2	1	1	1	0	53 929	2	-4
							18.952	4	-1	1	1	1	*53 929	2	0
							20.030	2	1	-1	1	1	54 078	2	0
							21.917	10	1	-1	1	1	54 252	<1	-3
							23.123	20	2	0	0	0	*54 252	<1	-1
							23.582	5	-2	1	0	0	54 485	1	1
							25.292	29	-2	0	0	1	54 620	1	1
							*25.292	29	0	0	0	2	*54 620	1	-4
							25.857	7	-2	1	1	1	54 850	1	-2
							26.809	41	-1	0	2	2	55 055	1	4
							27.471	2	-2	0	1	1	55 205	2	1
							27.803	2	-1	2	1	1	*55 205	2	-2
							*27.803	2	0	-2	1	1	55 373	1	4
							28.006	6	0	-1	2	2	55 561	1	-3
							28.713	12	-1	1	2	2	*55 561	1	-3
							28.883	29	2	1	0	0	55 687	1	0
							*28.883	29	1	0	2	2	56 296	<1	-4
							29.950	100	-2	0	0	0	56 630	3	1
							*29.950	100	1	2	0	0	*56 630	3	-1
							30.554	7	-2	-1	1	1	56 937	1	-1
							*30.554	7	-1	-1	2	2	57 274	5	4
							31.922	3	-2	-2	1	1	57 438	10	-2
							*31.922	3	-1	-2	1	1	*57 438	10	0
							32.996	1	2	1	1	2	57 944	<1	-1
							*32.996	1	2	1	1	2	*57 944	<1	-2
							33.347	1	1	2	1	1	58 074	<1	2
							*33.347	1	-2	1	2	2	58 545	1	2
							34.291	2	-3	1	0	0	58 545	1	-5
							*34.291	2	-3	1	0	0	58 545	1	-5
							34.990	7	3	0	0	0	58 623	2	0
							*34.990	7	3	0	0	0	58 623	2	0
							35.432	4	0	-2	2	2	58 845	1	3
							*35.432	4	-1	2	2	2	59 013	2	1
							35.529	2	-3	1	1	1	*59 013	2	0
							36.243	17	1	-2	2	2	59 196	1	-3
							*36.243	17	0	2	2	2	59 457	2	-1
							36.943	<1	-1	3	0	0	*59 457	2	-2
							*36.943	<1	-2	-1	2	2	59 570	2	-4
							37.755	2	2	-1	1	1	59 735	1	4
							*37.755	2	2	-1	1	1	*59 735	1	2
							37.990	1	0	3	0	0	59 972	2	1
							*37.990	1	0	3	0	0	*59 972	2	1
							38.160	7	-3	2	2	0	60 138	3	-5
							*38.160	7	-3	2	2	0	60 366	2	-5
							38.234	9	2	2	0	0	*60 366	2	-4
							*38.234	9	2	2	0	0	60 886	3	-3
							38.342	7	0	0	3	3	*60 886	3	-1
							*38.342	7	0	0	3	3	61 482	<1	3
							38.501	6	-1	0	3	3	62 236	1	4
							*38.501	6	3	0	0	1	*62 236	1	-4
							39.020	15	-1	0	3	3	62 359	1	2
							*39.020	15	-1	0	3	3	62 551	2	-4
							39.882	7	-3	2	2	2	62 746	5	2
							*39.882	7	-3	2	2	2	62 811	5	1
							39.452	2	-2	2	1	1	62 895	3	3
							*39.452	2	-2	2	1	1	63 036	3	3
							39.781	<1	0	-5	1	1	*63 036	3	-3
							*39.781	<1	0	-5	1	1	63 417	2	-5
							40.167	1	0	-1	3	3	63 492	2	-4
							*40.167	1	0	-1	3	3	63 619	6	-2
							40.443	<1	2	1	2	2	63 619	6	-5
							*40.443	<1	2	1	2	2	64 195	-1	-2
							40.707	4	2	-2	2	2	64 353	-1	4
							*40.707	4	2	-2	2	2	64 511	1	1
							41.252	12	3	-2	2	1	64 511	1	-1
							*41.252	12	3	-2	2	1	64 713	1	2
							41.252	12	1	0	3	3	64 999	3	0
							*41.252	12	1	0	3	3	*64 999	3	0
							41.332	16	2	2	1	1	65 173	3	1
							*41.332	16	2	2	1	1	65 173	3	1
							41.332	16	-2	3	1	1	65 508	-1	4
							*41.332	16	-2	3	1	1	65 508	-1	2
							41.517	5	-3	0	2	2	65 553	1	4
							*41.517	5	-3	0	2	2	65 553	1	4
							42.138	<1	1	-1	3	3	65 900	-1	2
							*42.138	<1	1	-1	3	3	65 900	-1	2
							42.231	<1	2	-3	0	0	65 989	-1	-2
							*42.231	<1	2	-3	0	0	65 989	-1	-2
							43.168	1	2	0	3	3	66 135	<1	3
							*43.168	1	2	0	3	3			
							43.304	2	3	1	1	1			
							*43.304	2	3	1	1	1			
							43.705	1	-2	1	3	3			
							*43.705	1	-2	1	3	3			
							43.705	1	-1	-3	1	1			
							*43.705	1	-1	-3	1	1			
							44.377	1	1	1	3	3			
							*44.377	1	1	1	3	3			
							44.646	3	-3	2	2	2			
							*44.646	3	-3	2	2	2			
							44.648	3	-2	2	2	2			
							*44.648	3	-2	2	2	2			
							44.885	<1	1	3	1	1			
							*44.885	<1	1	3	1	1			
							44.985	<1	3	-1	2	2			
							*44.985	<1	3	-1	2	2			
							45.127	<1	-1	3	2	2			
							*45.127	<1	-1	3	2	2			
							45.731	4	3	0	2	2			
							*45.731	4	3	0	2	2			
							45.818	2	-1	2	3	3			
							*45.818	2	-1	2	3	3			
							46.453	<1	-2	-1	3	3			
							*46.453	<1	-2	-1	3	3			
							46.622	1	-4	1	1	1			
							*46.622	1	-4	1	1	1			
							46.622	1	0	3	2	2			
							*46.622	1	0	3	2	2			
							46.765	2	-3	3	1	1			
							*46.765	2	-3	3	1	1			
							46.765	2	0	2	3	3			
							*46.765	2	0	2	3	3			
							47.261	4	4	0	0	0			
							*47.261	4	4	0	0	0			
							47.261	4	2	0	3	3			
							*47.261	4	2	0	3	3			
							47.809	<1	-4	0	1	1			
							*47.809	<1	-4	0	1	1			
							47.977	1	-1	-2	3	3			
							*47.977	1	-1	-2	3	3			
							47.977	1	3	-2	2	2			
							*47.977	1	3	-2	2	2			
							48.059	2	2	2	2	2			
							*48.059	2	2	2	2	2			
							48.245	3	3	-3	1	1			
							*48.245	3	3	-3	1	1			
							48.331	4	3	2	0	0			
							*48.331	4	3	2	0	0			
							48.443	2	2	-3	2	2			
							*48.443	2	2	-3	2	2			
							49.025	5	4	-1	1	1			
							*49.025	5	4	-1	1	1			
							49.025	5	3	-2	1	1			
							*49.025	5	3	-2	1	1			
							49.786	21							



รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้ ภายหลังจากแคลเซินที่ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



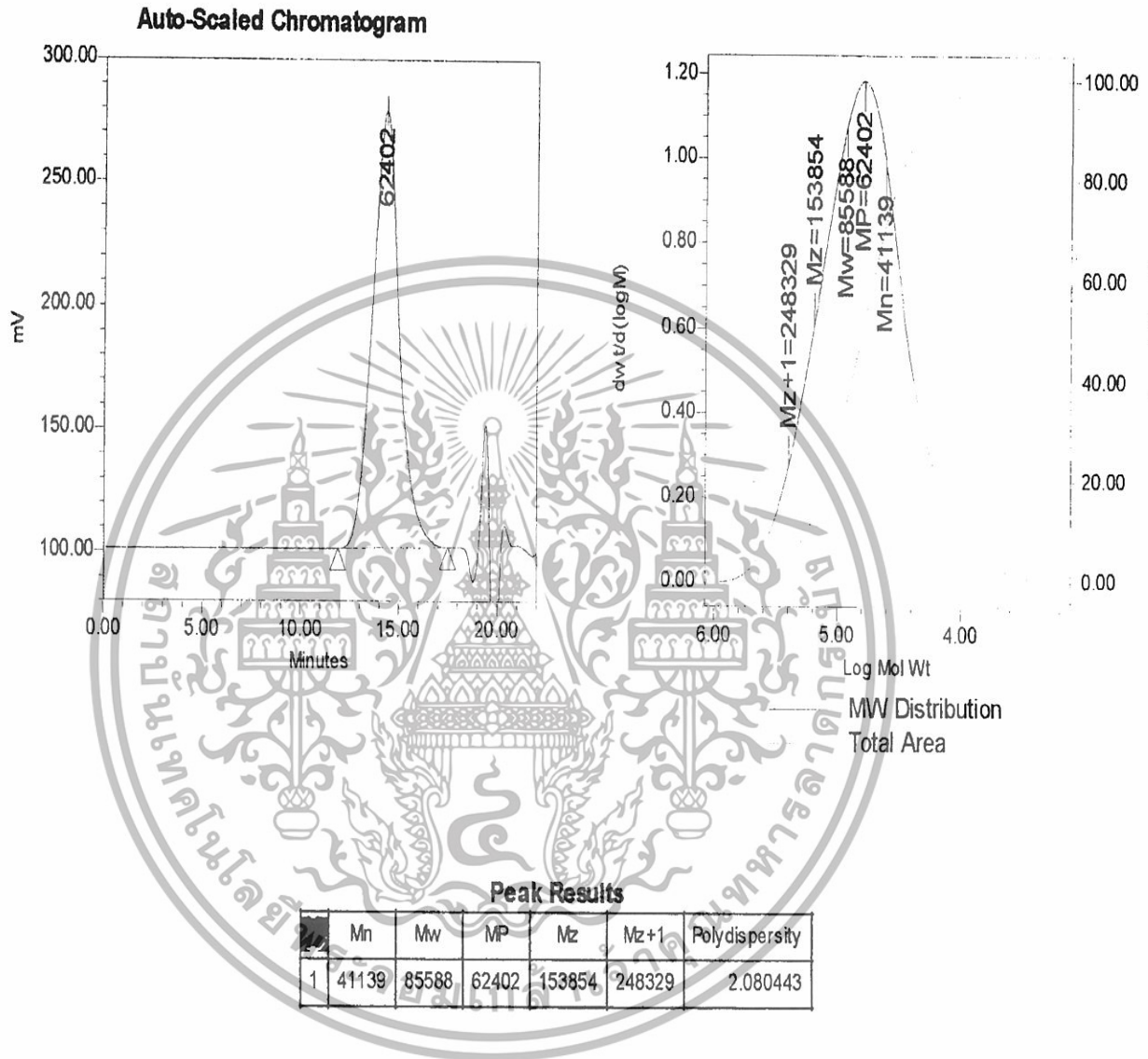
รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CS ที่สังเคราะห์ได้ ภายหลังจากการแคลไซน์ที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



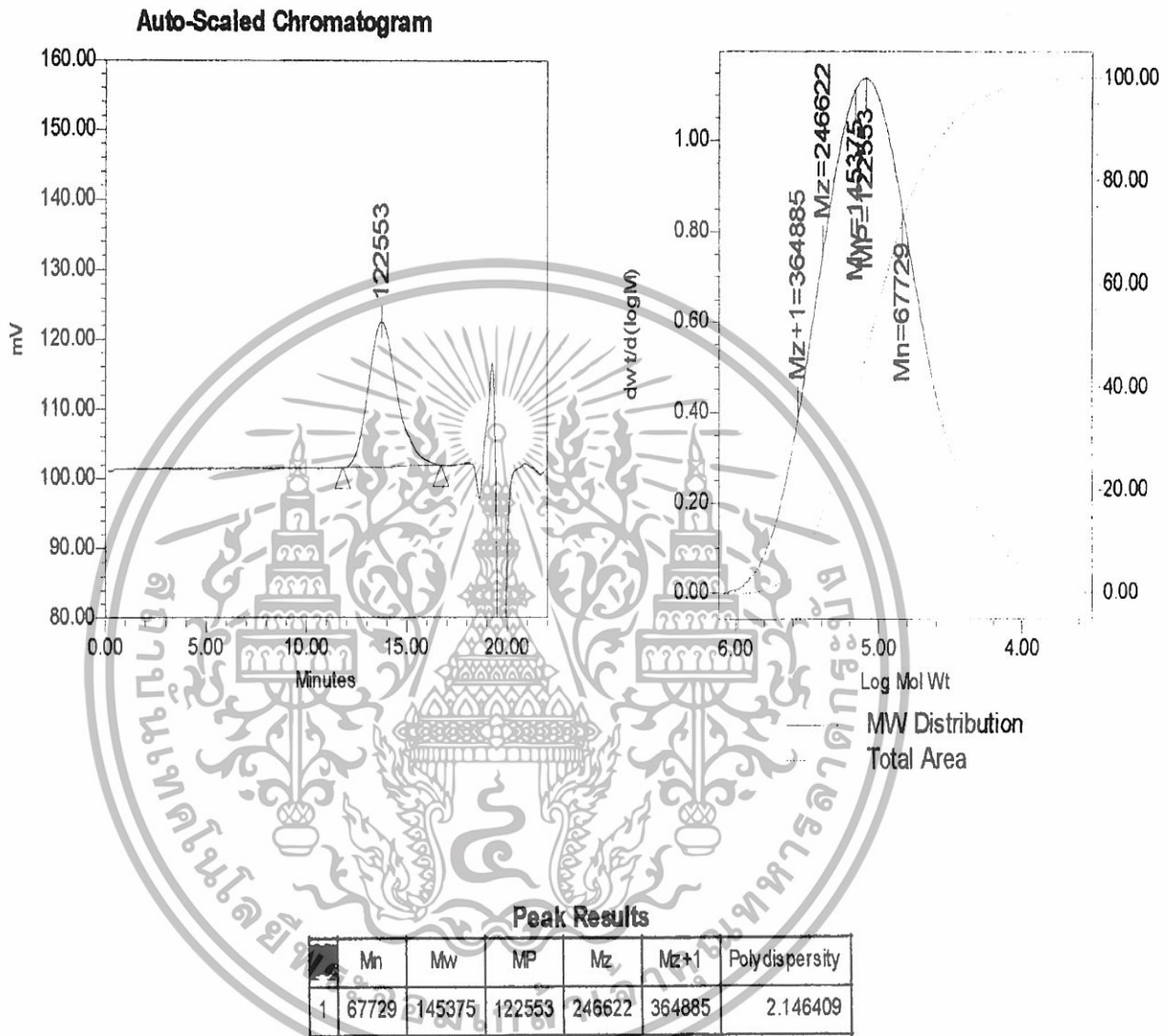
ภาคผนวก ข
โครงมาโทรแกรมจากเครื่อง GPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



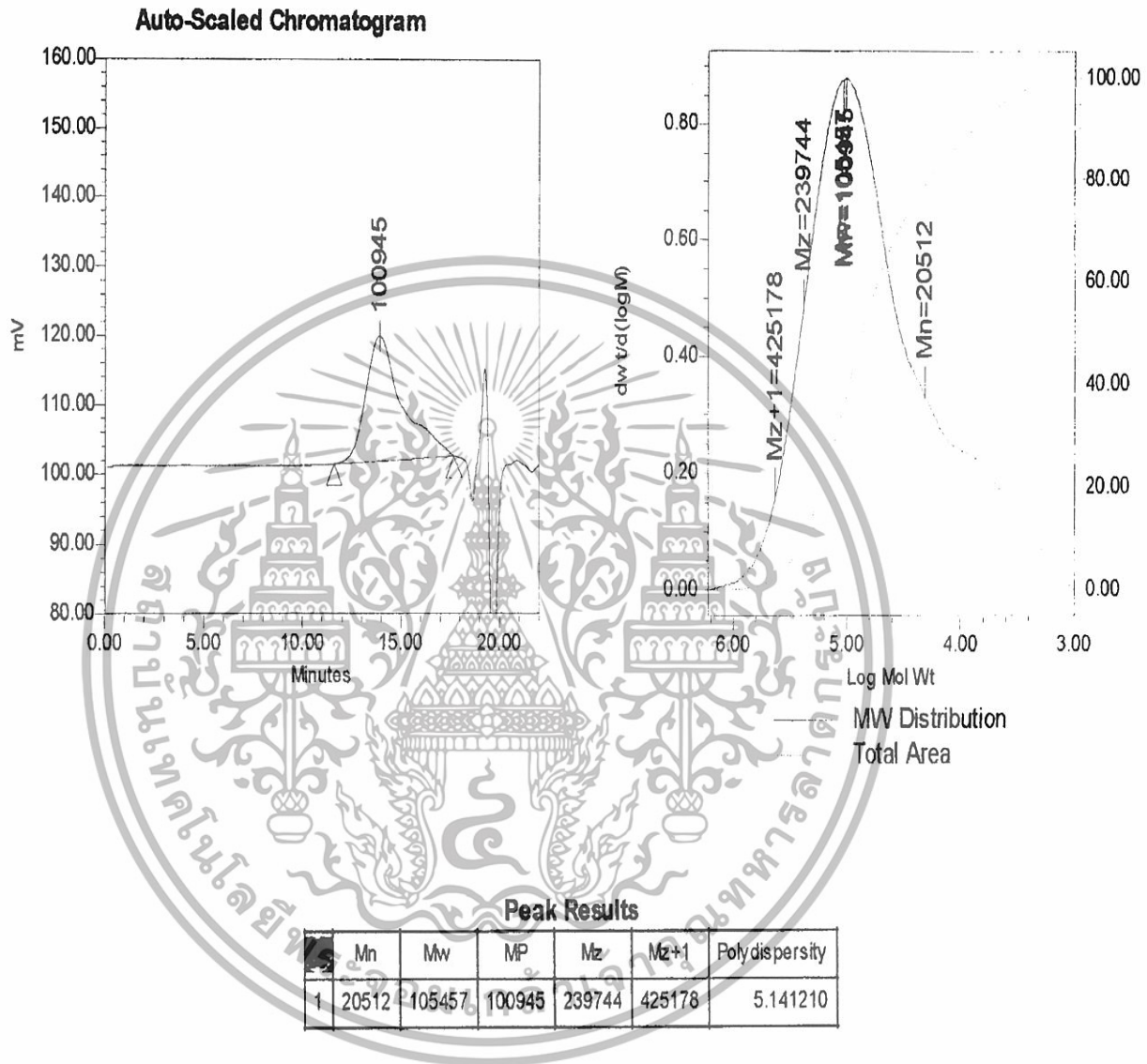
รูปที่ ข-1 โครมาโทแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



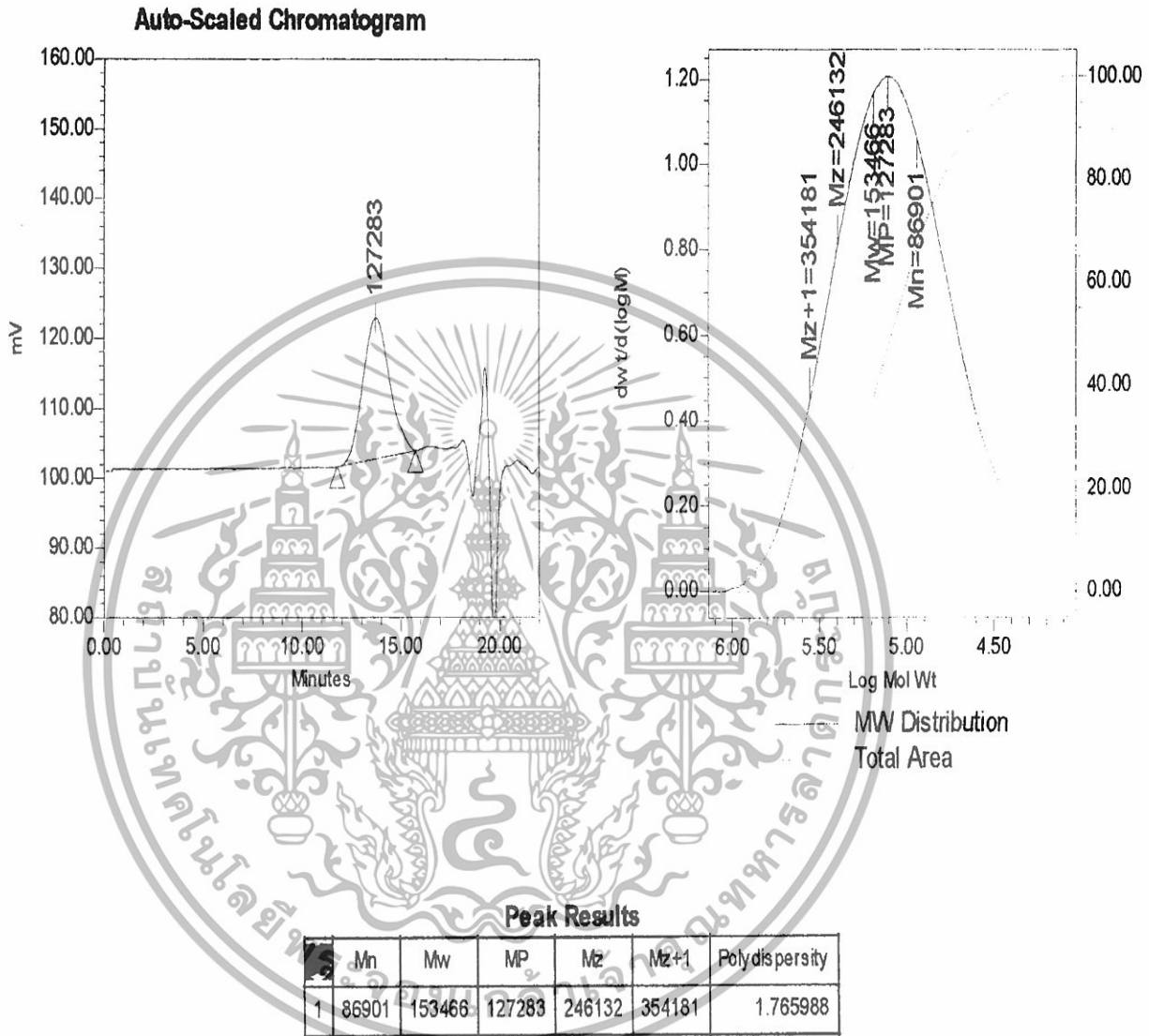
รูปที่ ข-2 โครมาโทแกรมของซีเมนต์ สูตรที่ 1 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 100:0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



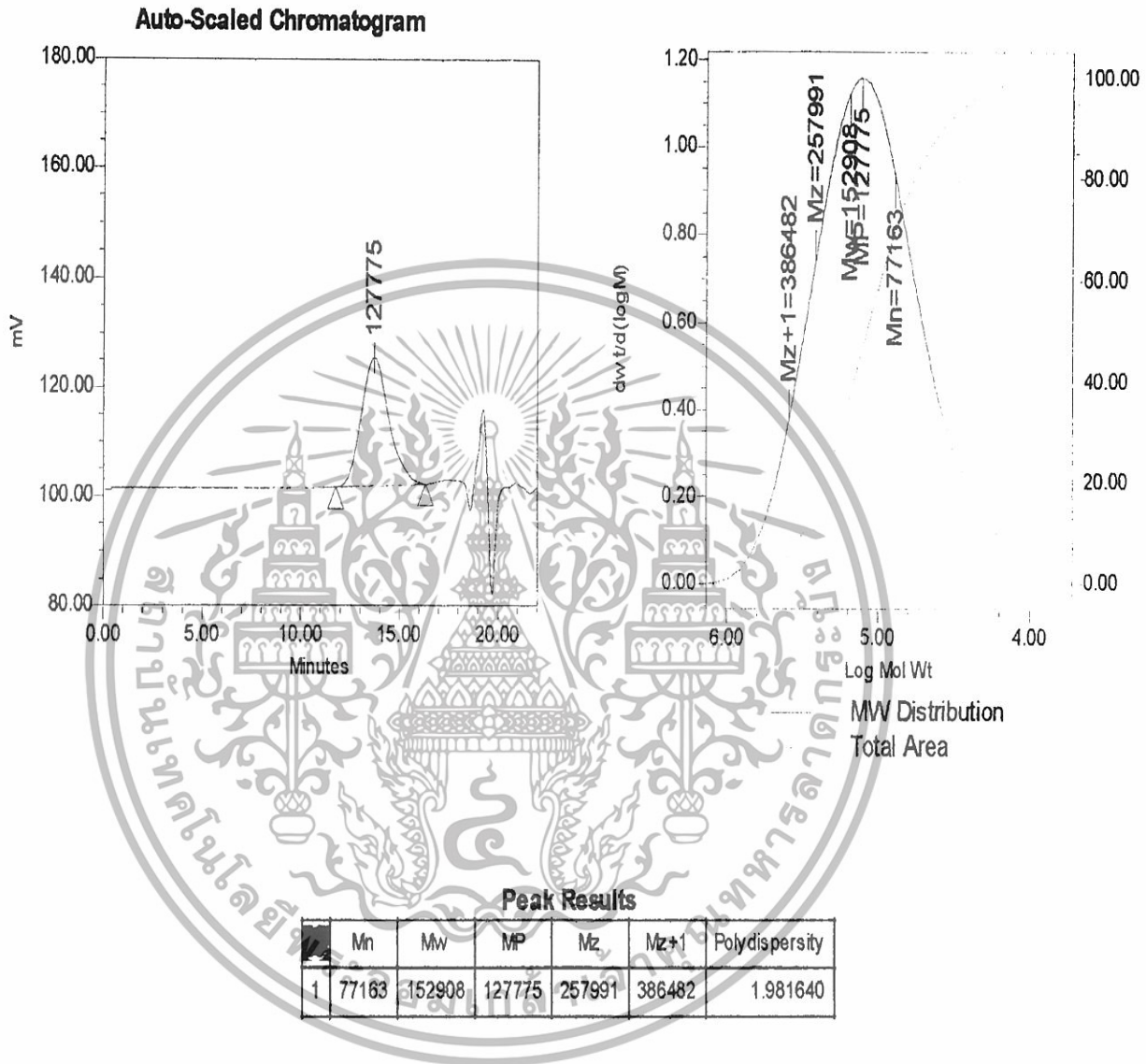
รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมของซีเมนต์ สูตรที่ 2 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 70:30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



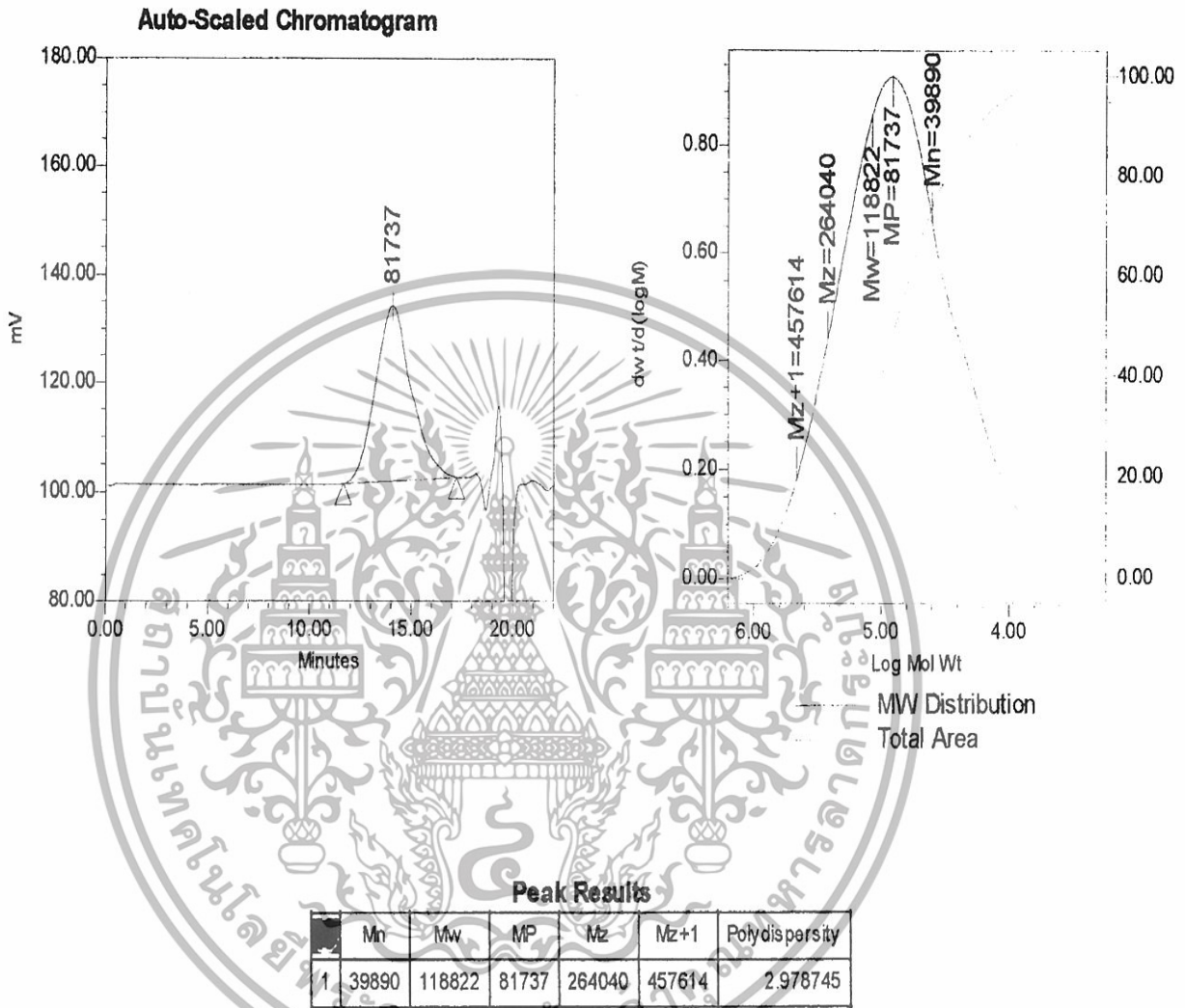
รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมของซีเมนต์ สูตรที่ 3 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 50:50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 โครมาโทแกรมของซีเมนต์ สูตรที่ 4 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 30:70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

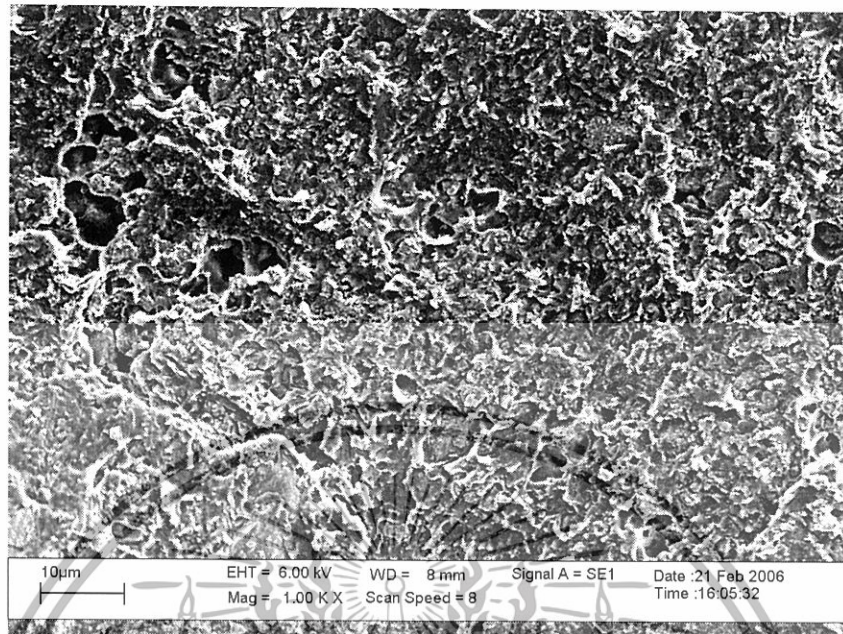


รูปที่ ข-6 โครมาโทแกรมของซีเมนต์ สูตรที่ 5 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 0:100)

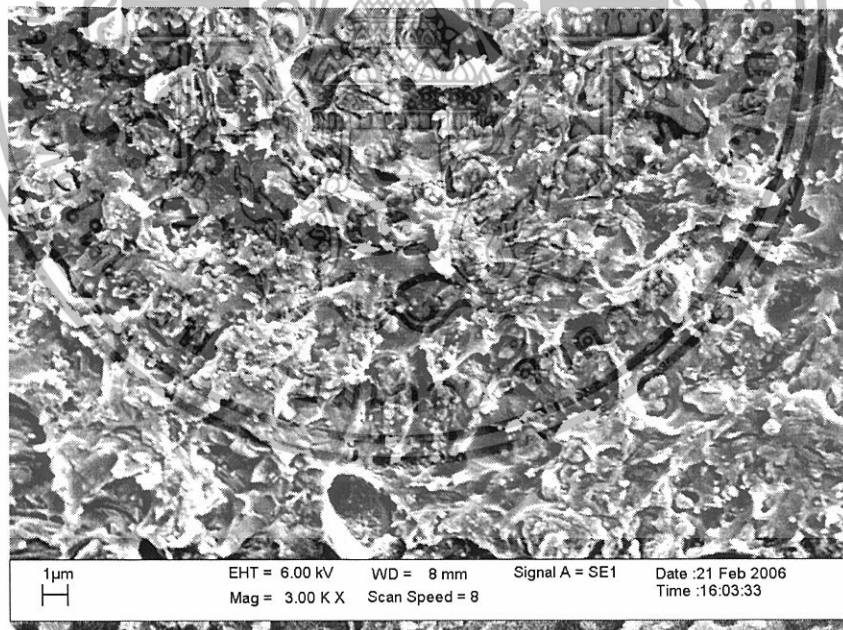
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



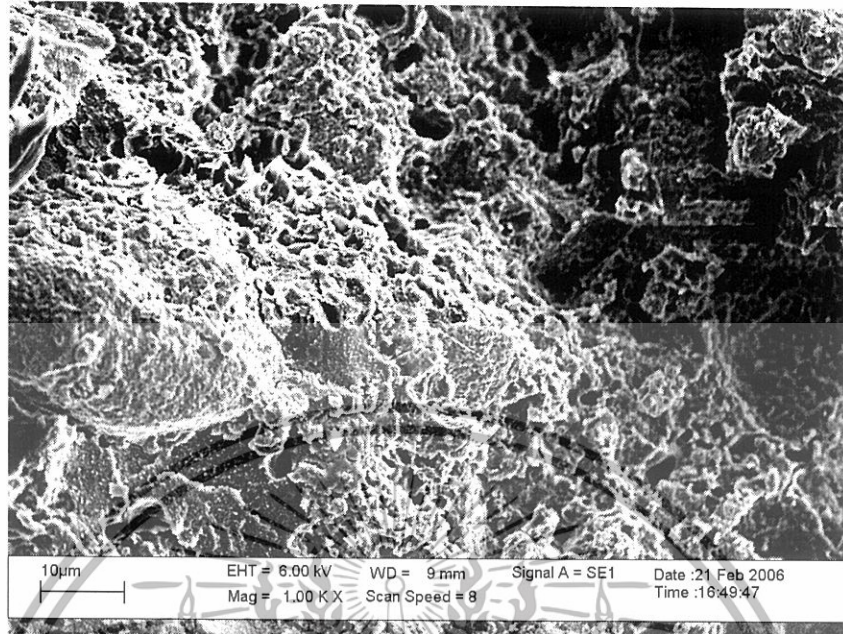
(b)

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

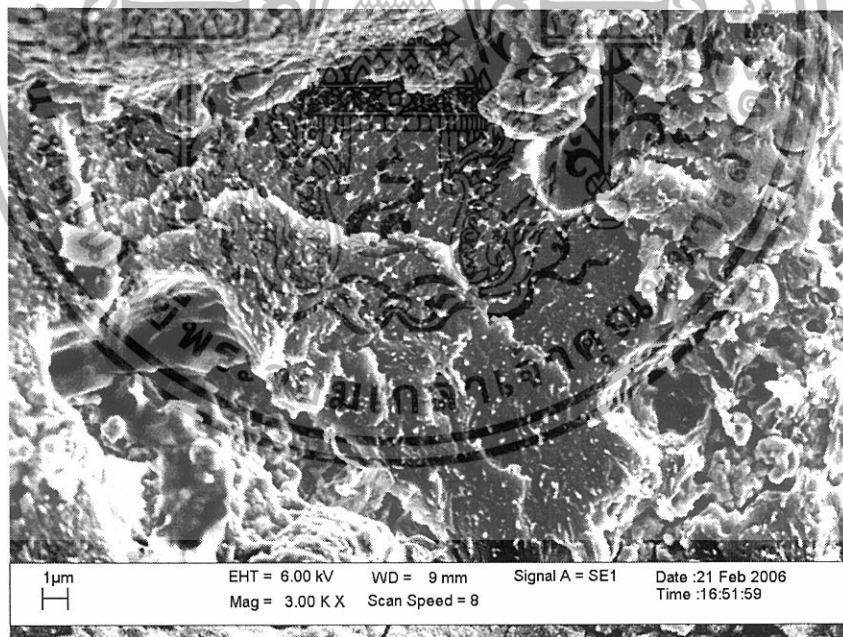
สูตรที่ 1 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 100:0)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



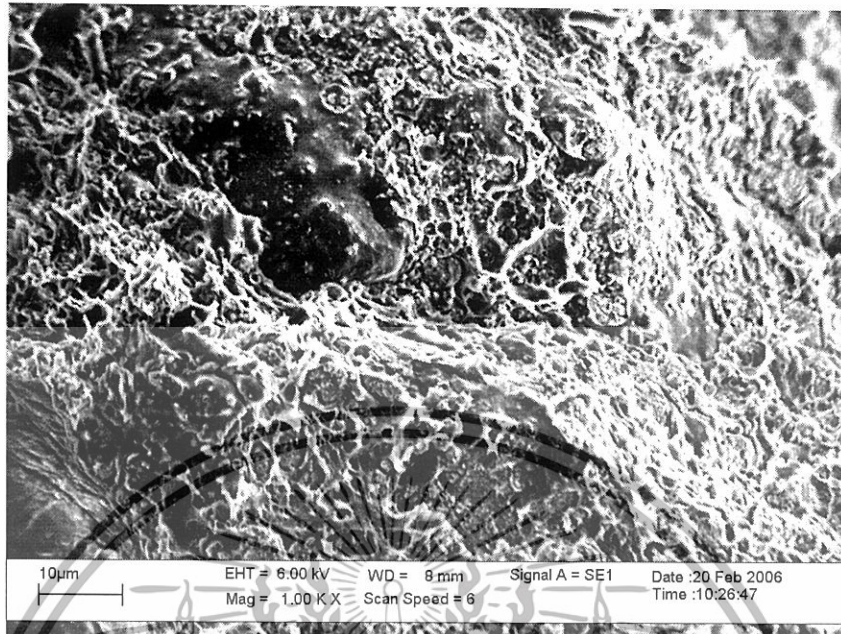
(b)

รูปที่ ค-2 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

สูตรที่ 2 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 70:30)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



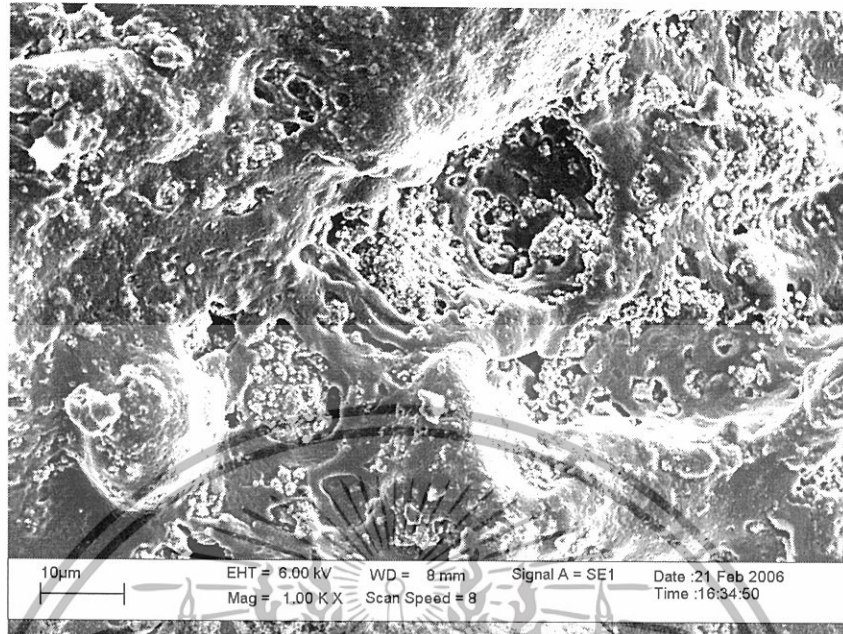
(b)

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

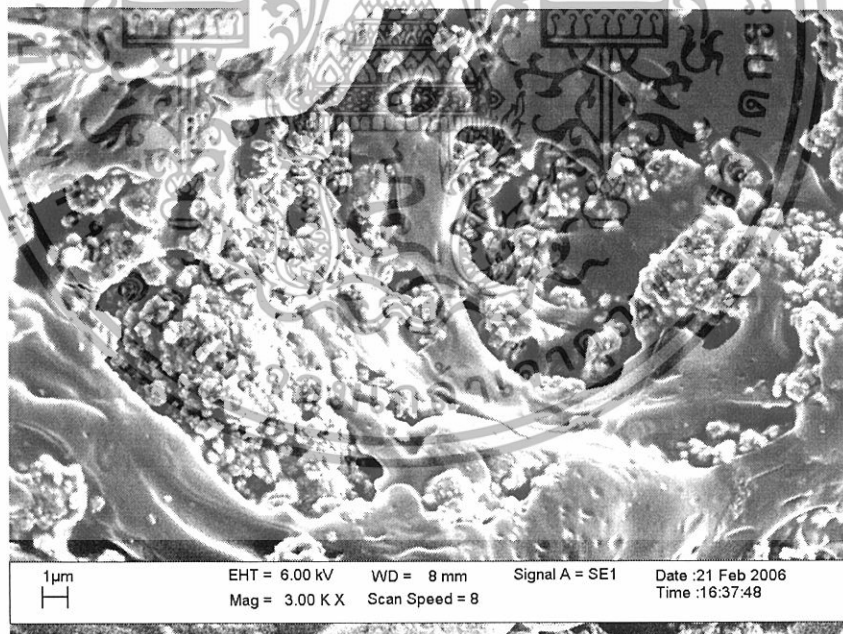
สูตรที่ 3 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 50:50)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



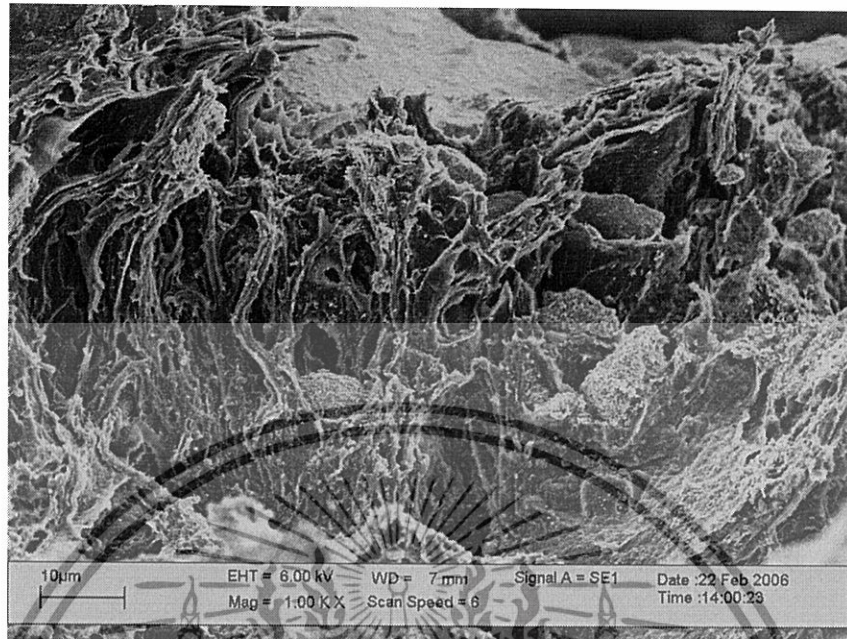
(b)

รูปที่ ค-4 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

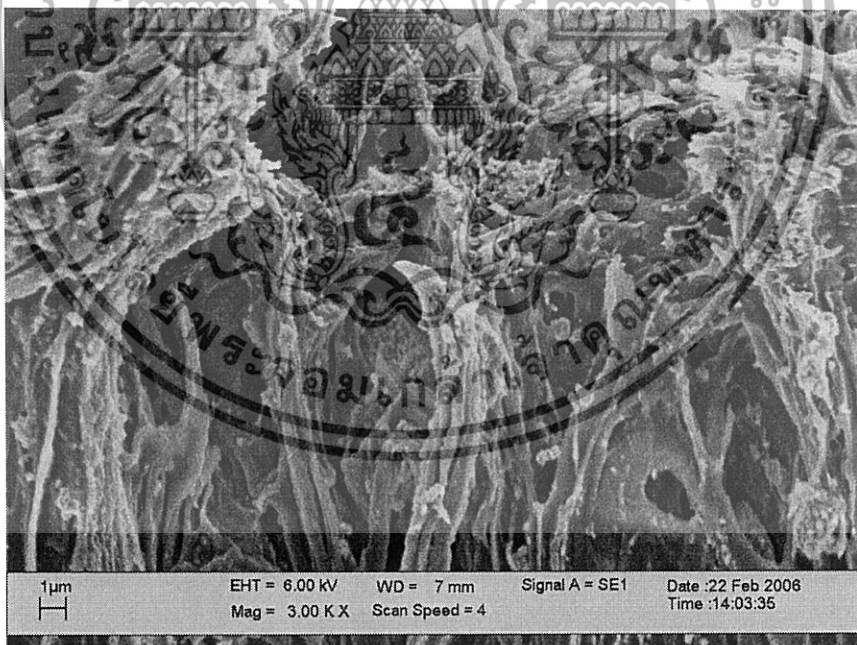
สูตรที่ 4 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 30:70)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



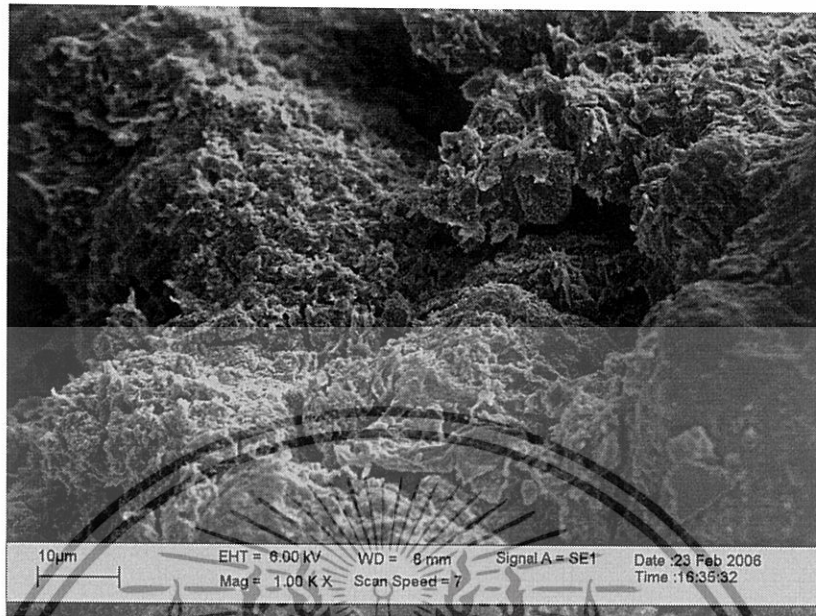
(b)

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

สูตรที่ 5 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 0:100)

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

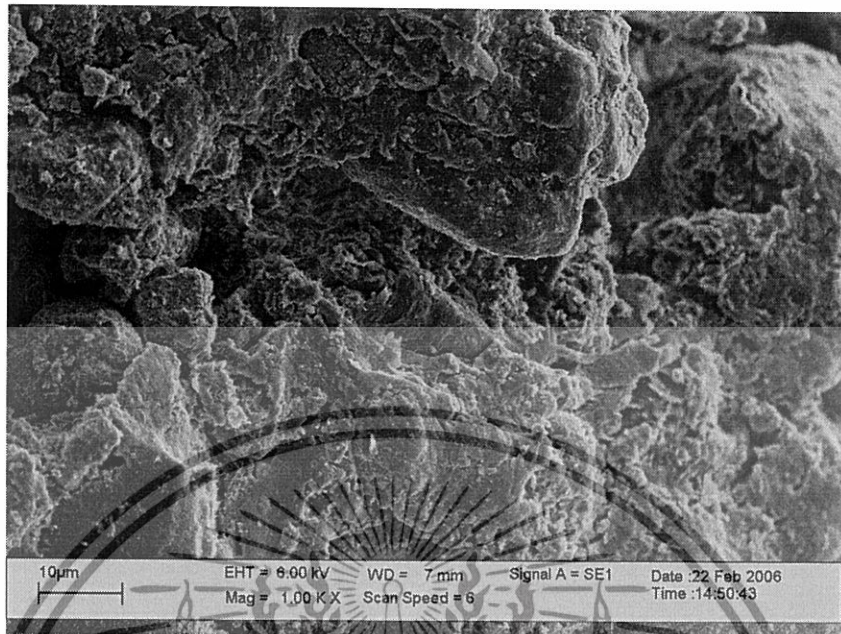
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ ค-6 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA
 สูตรที่ 6 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 100:0)
 กำลังขยาย 1000 เท่า (a) กำลังขยาย 3000 เท่า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



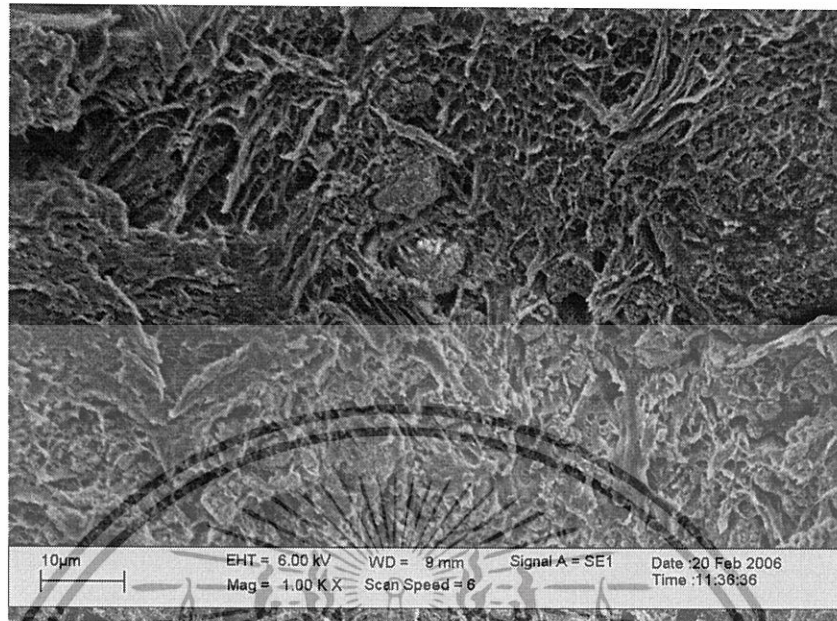
(b)

รูปที่ ค-7 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

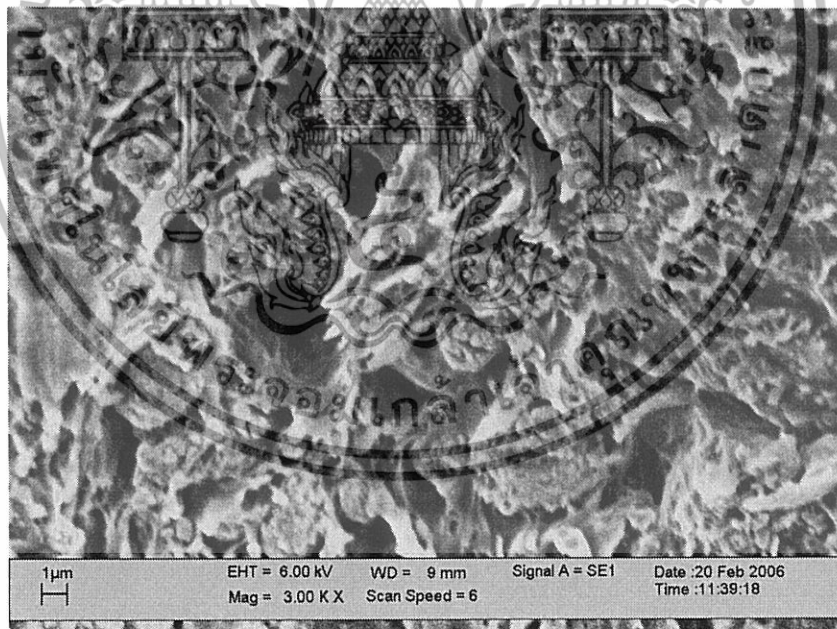
สูตรที่ 7 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 70:30)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



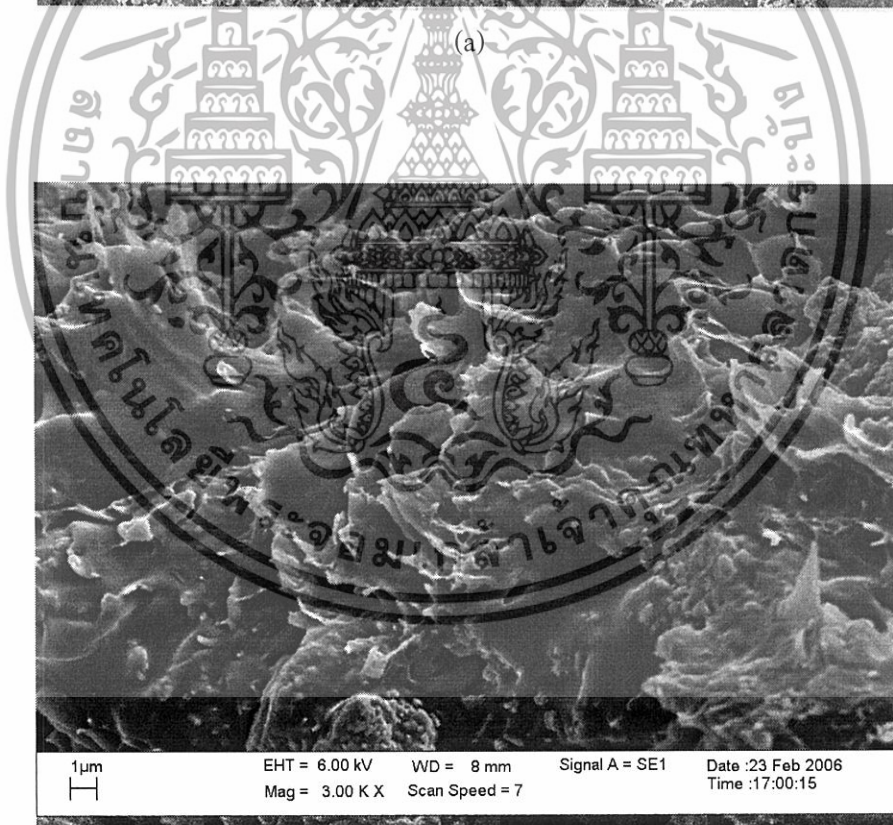
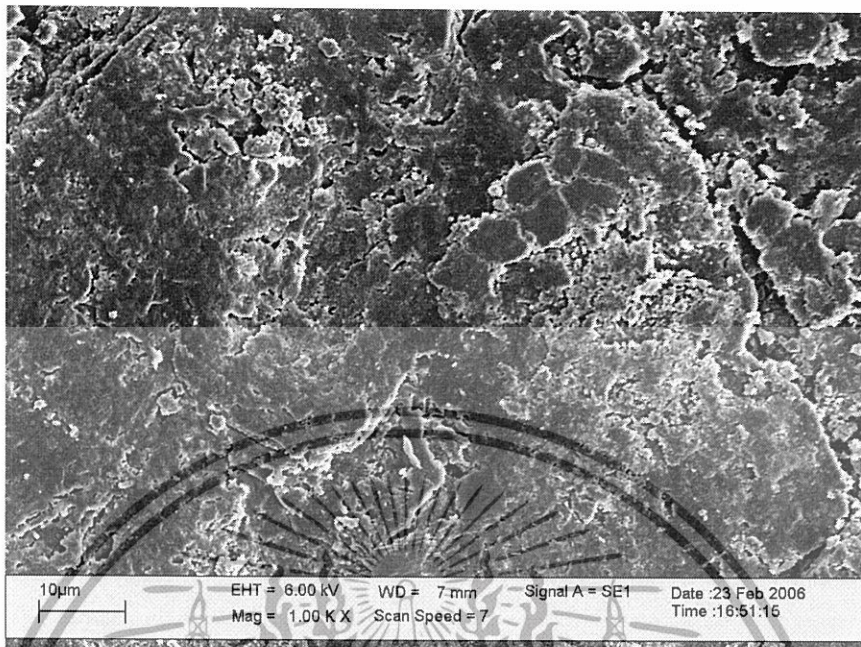
(b)

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

สูตรที่ 8 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 50:50)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

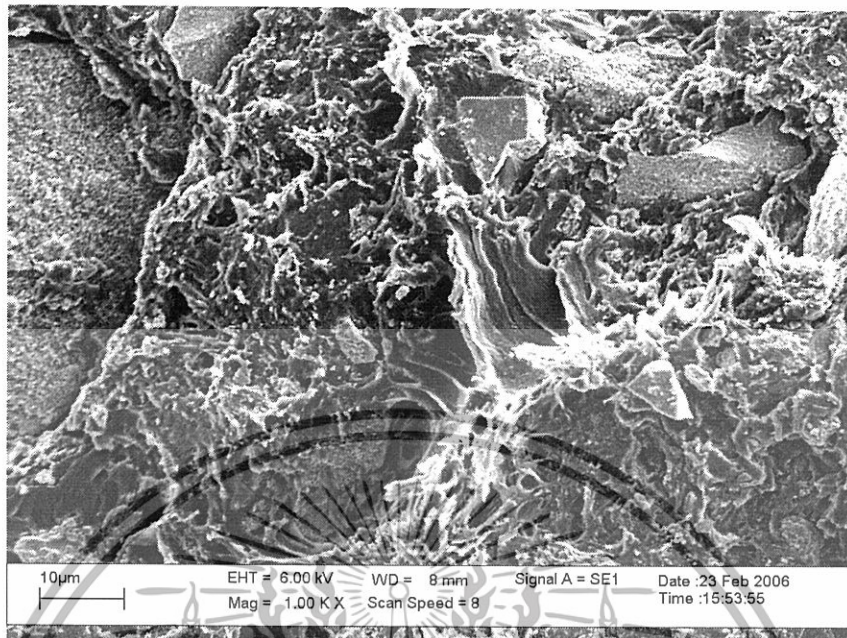


(b)

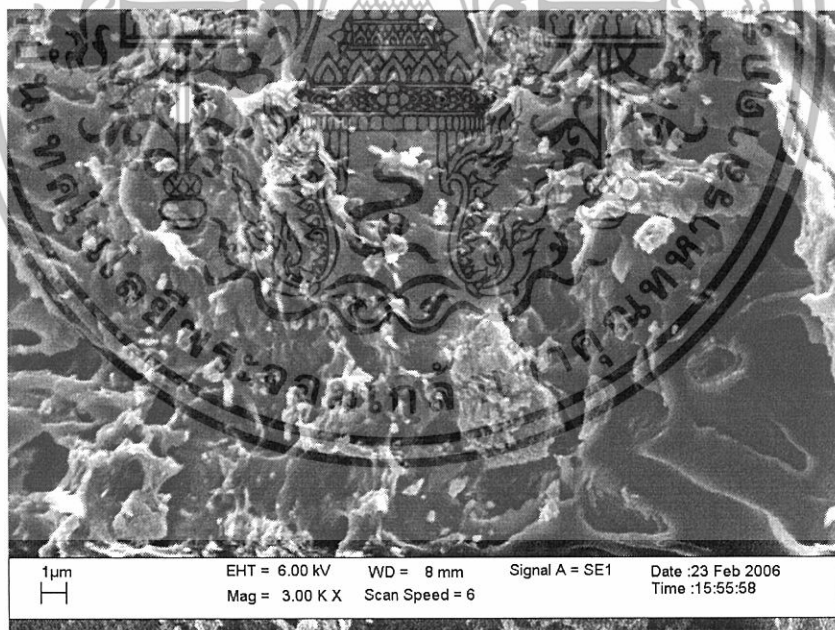
รูปที่ ค-9 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ CS/PMMA-PHEMA

สูตรที่ 9 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 30:70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

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

สูตรที่ 10 อัตราส่วน PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 0:100)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	ค่าความแข็งแรงกดที่ 10 เปอร์เซ็นต์			ค่าความแข็งแรงกดที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย
		1	2	3	
3:7	100:0	1178.37	1220.26	1208.72	1202.45 ± 21.64
	70:30	2090.78	2107.69	2122.45	2106.97 ± 37.83
	50:50	1094.84	1001.62	1145.72	1083.39 ± 73.15
	30:70	855.42	943.40	926.50	908.43 ± 46.68
	0:100	1079.26	1051.88	1003.76	1044.96 ± 38.22
4:6	100:0	953.24	933.33	954.86	947.17 ± 11.99
	70:30	1587.83	1380.80	1405.40	1458.01 ± 113.09
	50:50	1036.18	1044.34	1026.98	1035.83 ± 8.69
	30:70	899.20	821.88	828.21	849.76 ± 42.93
	0:100	1073.94	1041.64	1176.23	1097.27 ± 70.26

ตาราง ง-1 ค่าความแข็งแรงกดที่ 10 เปอร์เซ็นต์ (Compressive strength at 10%) ของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	ค่า Young's Modulus			ค่า Young's Modulus โดยเฉลี่ย
		1	2	3	
3:7	100:0	143.8076	83.0400	113.4843	113.4440 ± 30.3838
	70:30	286.2500	247.9846	275.8506	269.8284 ± 20.1204
	50:50	93.1573	95.8694	129.0447	106.0238 ± 19.9827
	30:70	61.8835	56.1514	67.7009	61.9119 ± 5.7748
	0:100	75.8361	75.4899	78.1709	76.4990 ± 1.4582
4:6	100:0	67.9231	53.9986	58.6325	60.1847 ± 7.0908
	70:30	181.4513	163.9982	176.7293	174.0596 ± 9.0276
	50:50	104.5809	110.9707	101.1569	105.6028 ± 4.9812
	30:70	56.1446	50.6680	57.3519	54.7215 ± 3.6177
	0:100	78.0933	72.8251	74.7724	75.2303 ± 3.7432

ตาราง ง-2 ค่า Young's Modulus ของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน MMA:HEMA	ΔF_m (N)	Diameter (mm)	$A \text{ (TD}^3/4)$ (mm ²)	$\Delta F_m / A$ (N/mm ²)	ความหนา (mm)	ΔL (mm)	$\Delta L / L_0$	Young's Modulus
100:0	1450.8929	15.20	181.4588	7.9957	4.00	0.30	0.0556	143.8076
70:30	3683.0356	15.70	198.5570	18.5480	5.40	0.35	0.0648	286.2500
50:50	1785.7142	16.27	207.9055	8.5891	5.15	0.475	0.0922	93.1573
30:70	1116.0714	16.25	207.3947	5.3814	5.75	0.50	0.0870	61.8835
0:100	1116.0714	16.20	206.1204	5.4147	5.60	0.40	0.0714	75.8361

ตาราง 3-3 ค่า Young's Modulus ของซีเมนต์ อีทีราส่วน PMMA:CS 3:7 ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน PMMA:HEMA	ΔF_m (N)	Diameter (mm)	A ($\pi D^2/4$) : mm ²	$\Delta F_m / A$ (N/mm ²)	ความหนา (mm)	ΔL (mm)	$\Delta L / L_0$	Young's Modulus
100:0	1785.7143	14.80	172.0340	10.3800	5.00	0.65	0.1250	83.0400
70:30	1562.5000	16.40	211.2412	7.368	6.70	0.20	0.0299	247.3846
50:50	2008.9285	16.50	213.8252	9.3952	5.10	0.50	0.0980	95.8694
30:70	1339.2857	16.30	208.6729	6.4181	5.25	0.60	0.1143	56.1514
0:100	1339.2857	16.35	209.9551	6.3789	5.50	0.465	0.0845	75.4899

ตาราง ง-4 ค่า Young's Modulus ของต้นแบบ อีตราส่วน PMMA:CS 3:7 ครึ่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน MMA:HEMA	ΔF_m (N)	Diameter (mm)	A ($7D^2/4$) : mm ²	$\Delta F_m / A$ (N/mm ²)	ความหนา (mm)	ΔL (mm)	$\Delta L / L_0$	Young's Modulus
100:0	1116.0714	15.70	193.5332	5.7650	5.90	0.30	0.0508	113.4843
70:30	1897.3213	16.34	209.6983	9.0479	6.10	0.20	0.0328	275.8506
50:50	2008.9286	16.90	224.3381	8.9557	3.60	0.25	0.0694	129.0447
30:70	892.8571	16.30	208.6729	4.2787	4.75	0.30	0.0632	67.7009
0:100	1339.2857	16.25	207.3947	6.4577	5.75	0.475	0.0826	78.1709

ตาราง ง-5 ค่า Young's Modulus ของซีเมนต์ อีตราส่วน PMMA:CS 3:7 ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน MMA:HEMA	ΔF_m (N)	Diameter (mm)	A (mm ²)	$\Delta F_m / A$ (N/mm ²)	ความหนา (mm)	ΔL (mm)	$\Delta L / L_0$	Young's Modulus
100:0	2009.5702	16.38	210.7263	9.5364	5.70	0.80	0.1404	67.9213
70:30	1629.4642	16.48	213.3071	7.6391	5.70	0.24	0.0421	181.4513
50:50	3124.9992	16.58	215.9036	14.4740	5.60	0.775	0.1384	104.5809
30:70	377.1497	16.40	211.2412	1.7854	6.28	0.20	0.0318	56.1446
0:100	446.4285	16.48	213.3071	2.0929	5.60	0.15	0.0268	78.0933

ตารางที่ 6 ค่า Young's Modulus ของชิ้นเนื้อ อีตราส่วน PMMA:CS 4:6 ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน MMA:HEMA	ΔF_m (N)	Diameter (mm)	A (TD ^{3/4}) mm	$\Delta F_m / A$ (N/mm ²)	ความหนา (mm)	ΔL (mm)	$\Delta L / L_0$	Young's Modulus
100:0	1629.4643	16.20	206.1204	7.9054	5.60	0.82	0.1464	53.9986
70:30	2008.9286	16.60	216.9248	9.2823	5.30	0.30	0.0566	163.9982
50:50	3325.8928	16.48	213.3071	15.5920	5.70	0.70	0.1228	110.9707
30:70	533.8540	16.38	210.7263	2.5334	6.00	0.30	0.0500	50.6680
0:100	1146.0714	15.90	198.5570	5.6209	6.38	0.45	0.0705	79.7292

ตาราง ง-7 ค่า Young's Modulus ของชิ้นเนื้อ อีตราส่วน PMMA:CS 4:6 ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน MMA:HEMA	ΔF_m (N)	Diameter (mm)	A (mm^2)	$\Delta F_m / A$ (N/mm ²)	ความหนา (mm)	ΔL (mm)	$\Delta L / L_0$	Young's Modulus
100:0	1316.96433	16.48	213.3071	6.1740	5.70	0.60	0.1053	58.6325
70:30	1339.2857	16.58	215.9036	6.2032	5.70	0.20	0.0351	176.7293
50:50	2678.5714	16.38	210.7263	12.7111	5.50	1.125	0.2045	101.1569
30:70	1162.1935	16.52	214.3438	5.4221	5.70	0.40	0.0702	57.3519
0:100	446.4283	16.08	203.0781	2.1983	6.80	0.20	0.0294	74.7724

ตาราง 8-8 ค่า Young's Modulus ของซีเมนต์ อีตราส่วน PMMA:CS 4:6 ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่ามอดูลัสของยัง

การคำนวณค่ามอดูลัสของยัง สามารถคำนวณหาได้จาก

$$\text{ค่ามอดูลัสของยัง} = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{\Delta F_m / A}{\Delta L / L_0}$$

โดยกำหนดให้

ΔF_m คือ ค่าแรงที่เปลี่ยนแปลงไป (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

ΔL คือ ระยะของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากการรับแรง (mm)

L_0 คือ ความหนาของชิ้นงานเริ่มต้น (mm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-1 แสดงปริมาณองค์ประกอบในซีเมนต์

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	W ₁ (g)	W ₂ (g)	W ₃ (g)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (g)	น้ำหนัก CS (g)
3:7	100:0	34.4680	35.6362	35.0563	1.1682	0.5883
	70:30	31.9977	33.4360	32.7065	1.4383	0.7088
	50:50	29.6183	30.9256	30.2155	1.3073	0.5972
	30:70	33.8315	35.0918	34.3939	1.2603	0.5624
	0:100	35.2112	36.5257	35.7204	1.3145	0.5091
4:6	100:0	23.3326	24.5072	23.8323	1.1746	0.4997
	70:30	29.4136	30.6363	29.9121	1.2227	0.4985
	50:50	32.3325	34.2425	33.0965	1.9100	0.7640
	30:70	34.4001	35.6200	35.1320	1.2199	0.7394
	0:100	33.7715	35.9632	34.6263	2.1917	0.8548

การคำนวณหาปริมาณ CS และ ส่วนพอลิเมอร์จากการเผา

สูตรการคำนวณ

$$\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)} = W_2 - W_1$$

$$\text{น้ำหนัก CS จากการเผา (g)} = W_3 - W_1$$

$$\text{น้ำหนัก CS จากการเผา (\%)} = \frac{\text{น้ำหนัก CS จากการเผา (g)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}} \times 100$$

$$\text{น้ำหนักพอลิเมอร์จากการเผา (\%)} = 100 - \text{น้ำหนัก CS จากการเผา (\%)}$$

หมายเหตุ* W₁ คือ น้ำหนักของครุชชีเบ็ด (g)

W₂ คือ น้ำหนักของครุชชีเบ็ด + สารตัวอย่างก่อนเผา (g)

W₃ คือ น้ำหนักของครุชชีเบ็ด + สารตัวอย่างหลังเผา (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาปริมาณ CS และ ส่วนพอลิเมอร์เริ่มต้น

สูตรการคำนวณ

$$\text{น้ำหนัก CS เริ่มต้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนัก CS (g)}}{\text{น้ำหนักรวม (g)}} \times 100$$

$$\text{น้ำหนักพอลิเมอร์เริ่มต้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนัก MMA(g)} + \text{น้ำหนัก PMMA(g)} + \text{น้ำหนัก HEMA(g)}}{\text{น้ำหนักรวม (g)}} \times 100$$

$$\text{หรือ} = 100 - \text{น้ำหนัก CS เริ่มต้น (\%)}$$

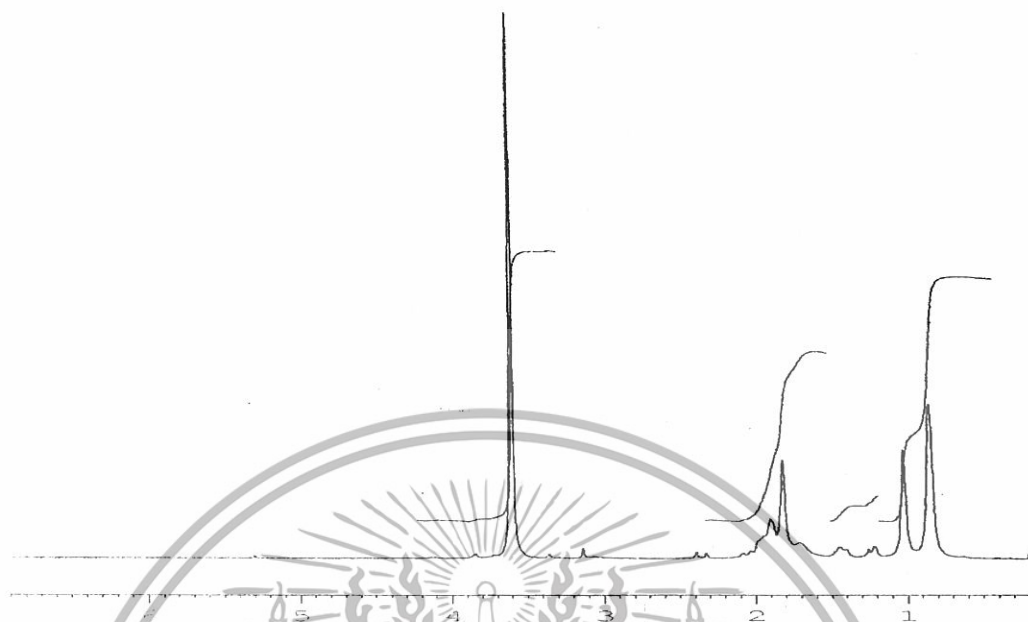
หมายเหตุ น้ำหนักรวม คือ น้ำหนัก CS (g) + น้ำหนัก MMA (g) + น้ำหนัก PMMA (g) + น้ำหนัก HEMA (g)



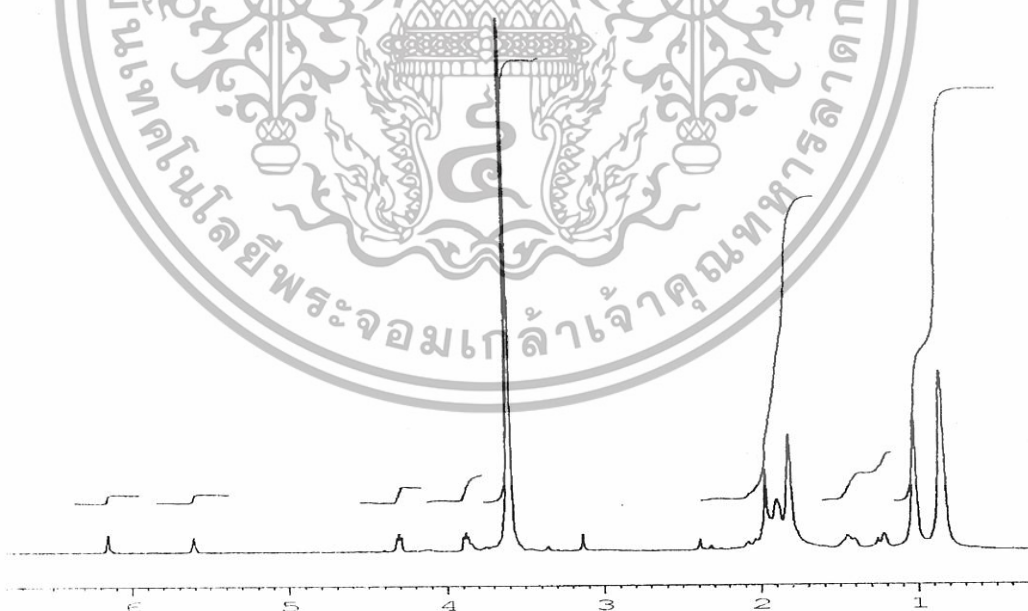
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

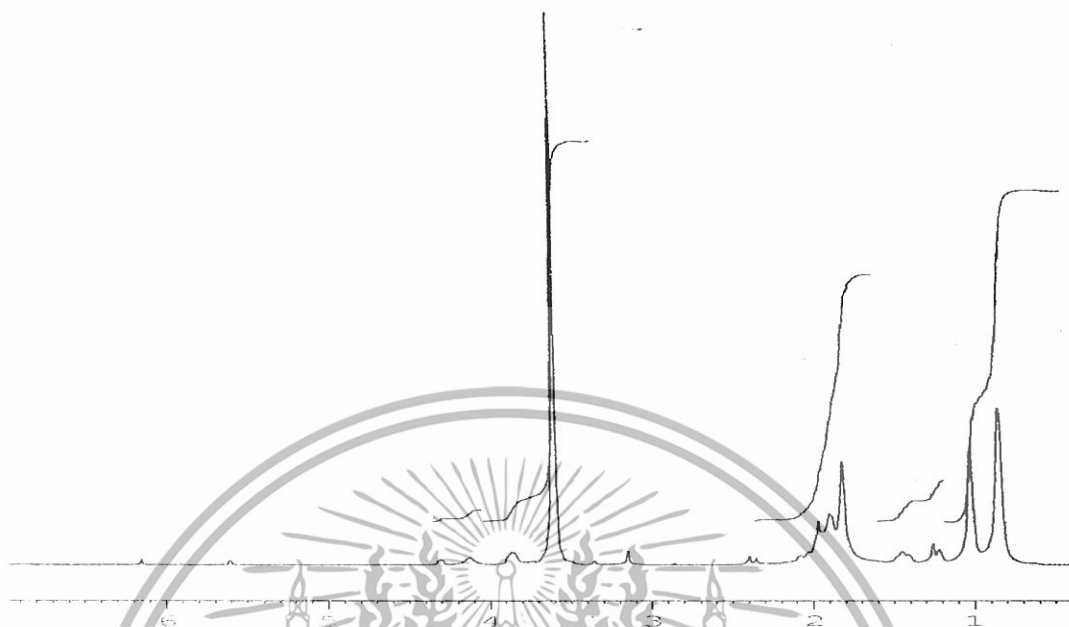


รูป จ-1 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 1 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 100:0)



รูป จ-2 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 2 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 70:30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

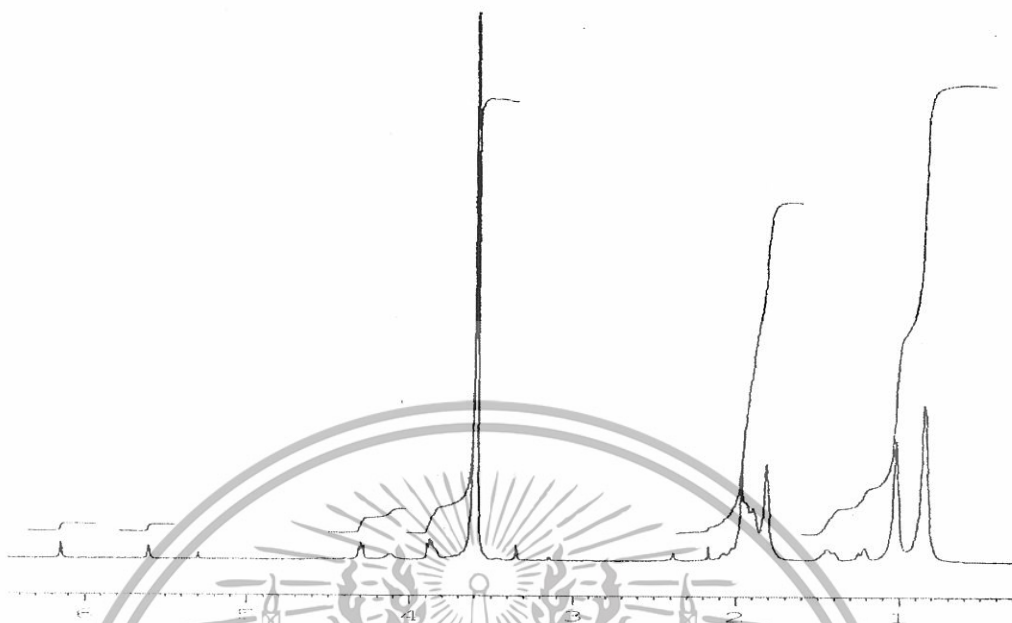


รูป จ-3 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 3 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 50:50)

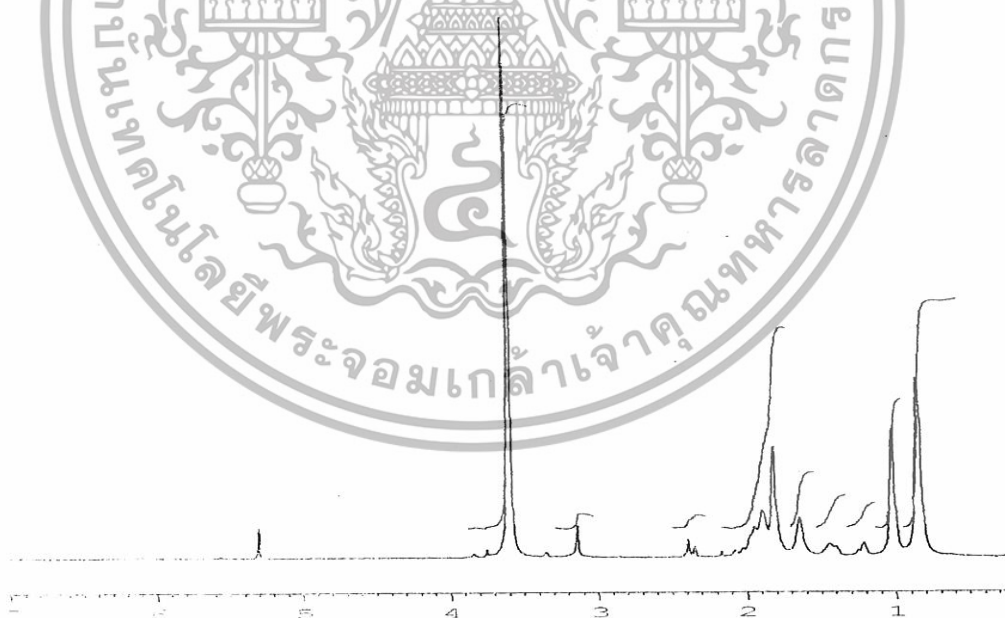


รูป จ-4 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 4 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 30:70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

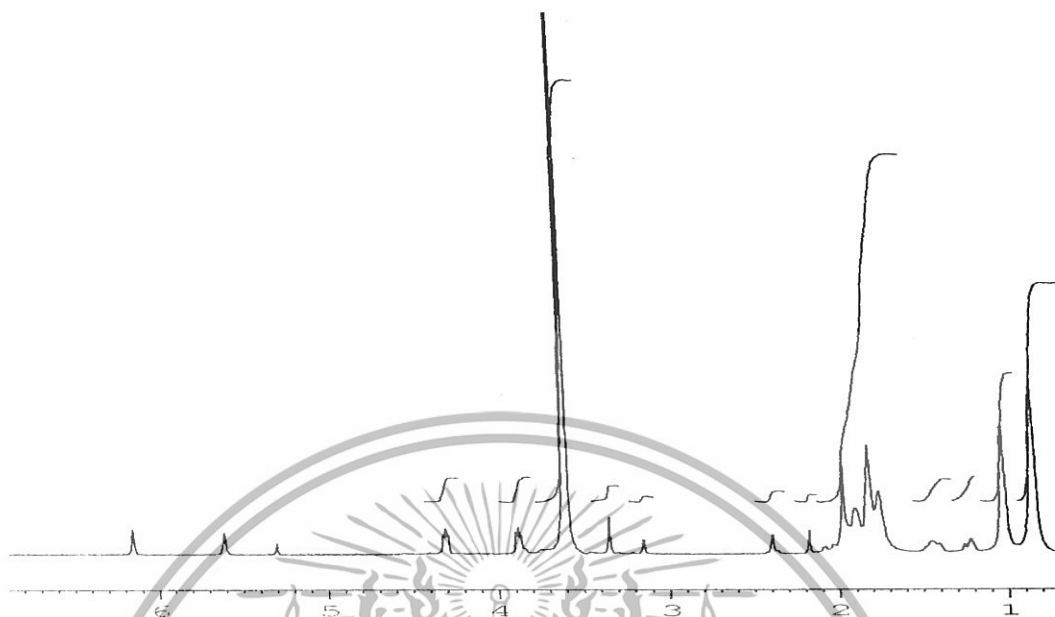


รูป จ-5 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 5 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 0:100)

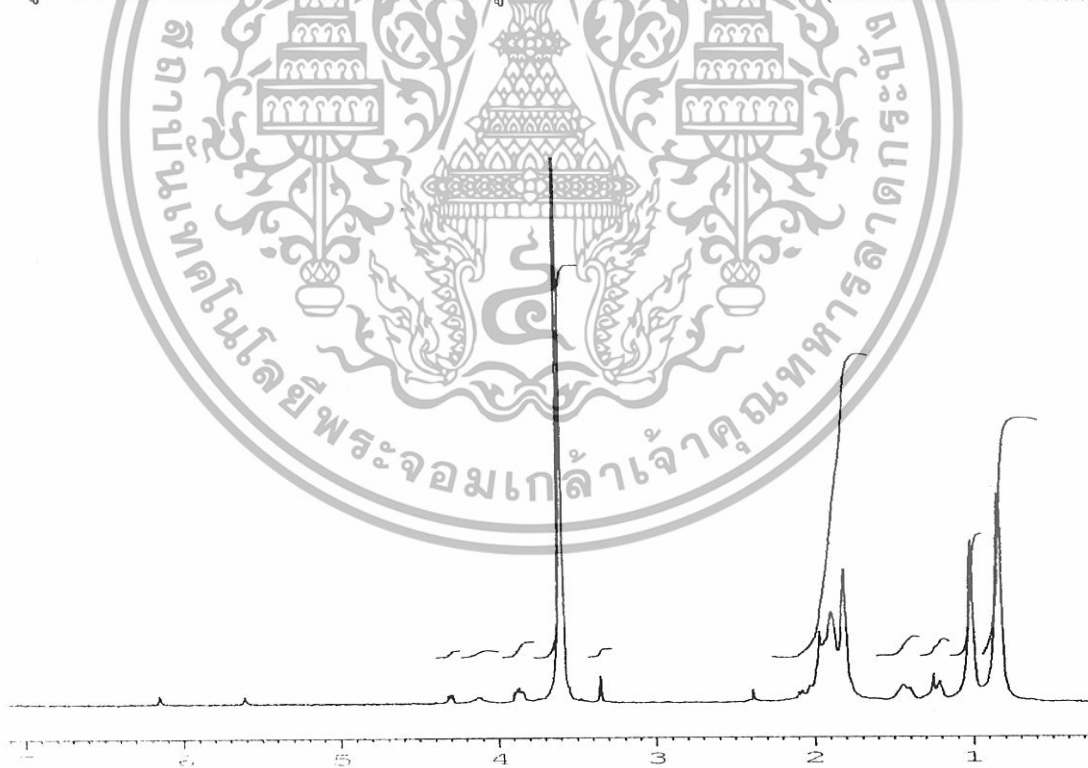


รูป จ-6 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 6 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 100:0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

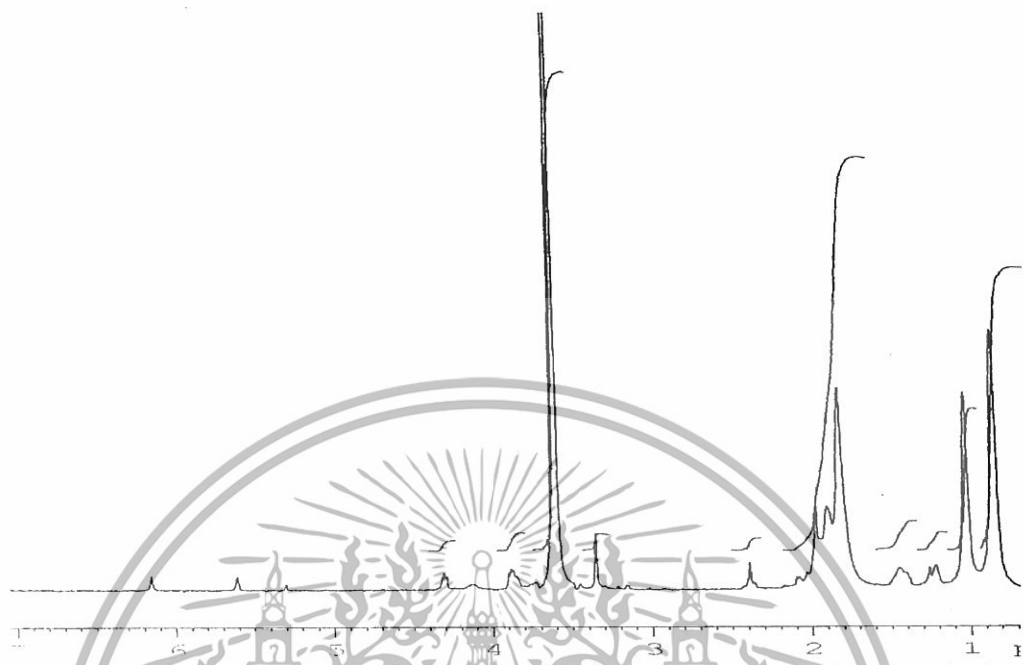


รูป จ-7 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 7 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 70:30)

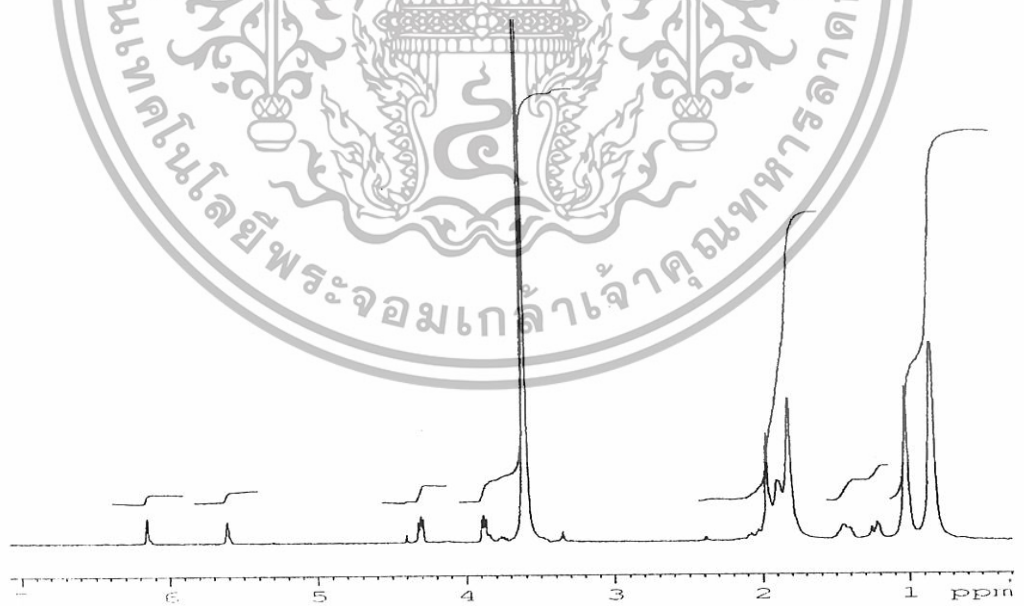


รูป ฉ-8 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 8 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 50:50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป จ-9 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 9 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 30:70)



รูป จ-10 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของซีเมนต์ สูตรที่ 10 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 0:100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำหนักและเวลาที่อุณหภูมิขึ้นสูงสุดโดยเฉลี่ย

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	$\Delta T /$ น้ำหนัก			$\Delta T /$ น้ำหนัก โดยเฉลี่ย	เวลาที่อุณหภูมิ ขึ้นสูงสุด โดยเฉลี่ย (S)
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3		
3:7	100:0	11.4955	11.4623	10.7609	11.4789	377.5
	70:30	30.1310	33.3183	37.6878	31.7247	55
	50:50	24.0952	31.6572	24.0411	24.0682	37.5
	30:70	22.7446	25.1237	29.4379	23.9342	22.5
	0:100	5.6258	8.4090	11.0680	9.7385	40
4:6	100:0	23.1581	25.0942	29.4394	24.1262	150
	70:30	37.6027	34.3902	45.1090	35.9965	55
	50:50	26.8414	30.3239	37.7501	28.5827	40
	30:70	21.0300	22.6205	26.1927	21.8253	55
	0:100	3.4964	5.1232	5.6358	5.3795	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำหนักและเวลาที่อุณหภูมิขึ้นสูงสุด ครั้งที่ 1

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิ สูงสุด (°C)	ΔT	น้ำหนัก ซีเมนต์ (g)	$\Delta T /$ น้ำหนัก	เวลาที่ อุณหภูมิขึ้น สูงสุด (S)
3:7	100:0	29.3	39.7	10.4	0.9047	11.4955	370
	70:30	28.3	61.2	32.9	1.0919	30.1310	60
	50:50	28.3	53.6	25.3	1.0500	24.0952	30
	30:70	30.0	53.9	23.9	1.0508	22.7446	20
	0:100	28.7	35.2	6.5	1.1554	5.6258	35
4:6	100:0	25.5	44.8	19.3	0.8334	23.1581	85
	70:30	29.3	58.6	29.3	0.7792	37.6027	60
	50:50	27.8	57.9	30.1	1.1214	26.8414	35
	30:70	26.8	47.3	20.5	0.9748	21.0300	20
	0:100	27.6	31.0	3.4	0.9723	3.4969	40

* หมายเหตุ $\Delta T =$ อุณหภูมิสูงสุด (°C) - อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำหนักและเวลาที่อุณหภูมิขึ้นสูงสุด ครั้งที่ 2

อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิ สูงสุด (°C)	ΔT	น้ำหนัก ซีเมนต์ (g)	$\Delta T /$ น้ำหนัก	เวลาที่ อุณหภูมิขึ้น สูงสุด (S)
3:7	100:0	29.3	39.2	9.9	0.8637	11.4623	385
	70:30	28.3	65.3	37.0	1.1105	33.3183	50
	50:50	28.3	64.5	36.2	1.1435	31.6572	30
	30:70	30.0	56.4	26.4	1.0508	28.1237	25
	0:100	28.7	37.5	8.8	1.0465	8.4090	40
4:6	100:0	25.5	50.8	25.3	1.0082	25.0942	215
	70:30	29.3	62.6	33.3	0.9683	34.3902	50
	50:50	27.8	63.1	35.3	1.1641	30.3239	45
	30:70	26.8	50.4	23.8	1.0433	22.6205	50
	0:100	27.6	32.3	4.7	0.9174	5.1232	85

* หมายเหตุ $\Delta T =$ อุณหภูมิสูงสุด (°C) - อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

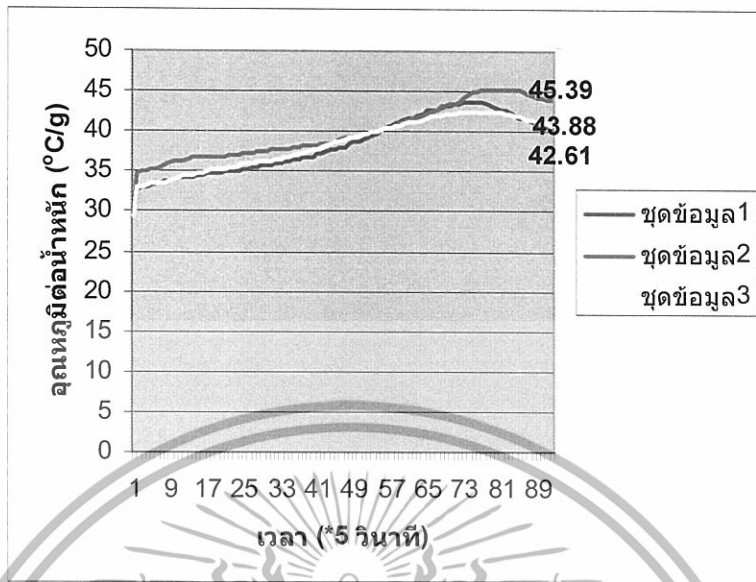
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-4 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำหนักและเวลาที่อุณหภูมิขึ้นสูงสุด ครั้งที่ 3

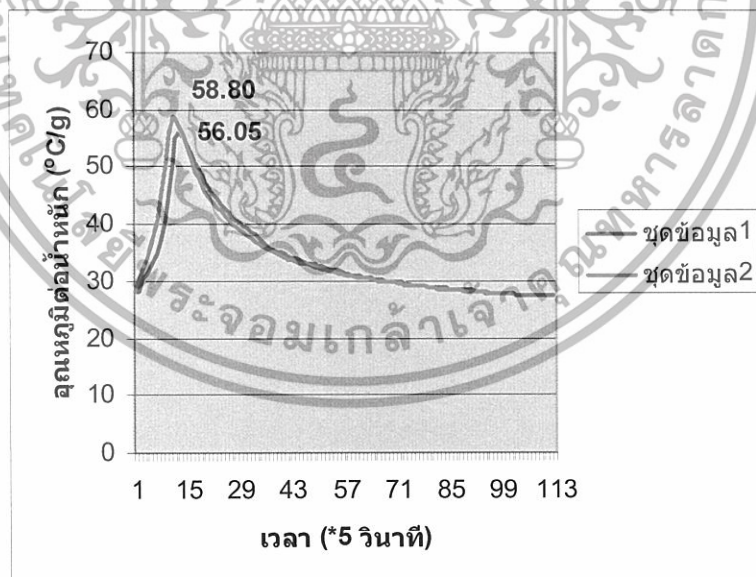
อัตราส่วน PMMA:CS	อัตราส่วน MMA:HEMA	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิ สูงสุด (°C)	ΔT	น้ำหนัก ซีเมนต์ (g)	$\Delta T /$ น้ำหนัก	เวลาที่ อุณหภูมิขึ้น สูงสุด (S)
3:7	100:0	29.3	39.2	9.9	0.92	10.7609	355
	70:30	28.3	69.7	41.4	1.0985	37.6878	55
	50:50	28.3	50.3	22.0	0.9151	24.0411	25
	30:70	30.0	59.8	29.8	1.0123	29.4379	35
	0:100	28.7	42.4	13.7	1.2378	11.0680	40
4:6	100:0	25.5	50.6	25.1	0.8526	29.4394	150
	70:30	29.3	64.9	35.6	0.7892	45.1090	55
	50:50	27.8	62.7	34.9	0.9245	37.7501	40
	30:70	26.8	52.0	25.2	0.9621	26.1927	60
	0:100	27.6	33.3	5.7	1.0114	5.6358	30

* หมายถึง $\Delta T =$ อุณหภูมิสูงสุด (°C) - อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

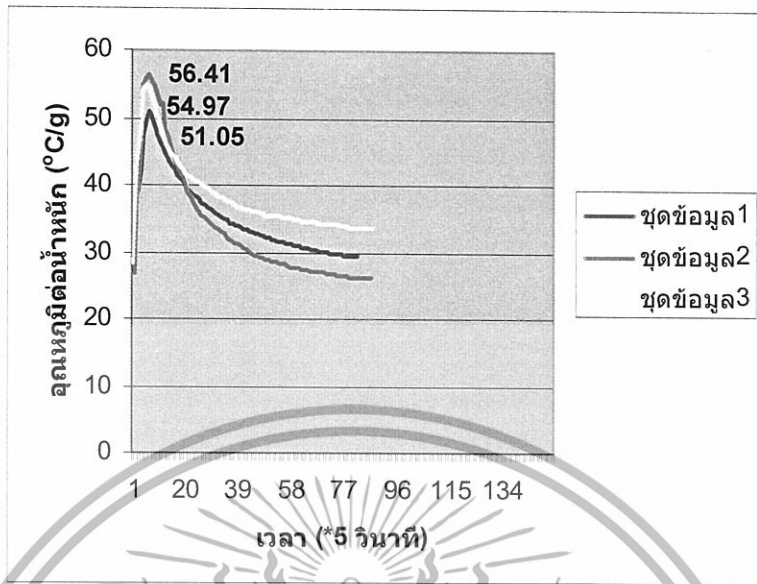


รูป ช-1 อุณหภูมิต่อเนื่องของซีเมนต์ สูตรที่ 1 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 100:0)

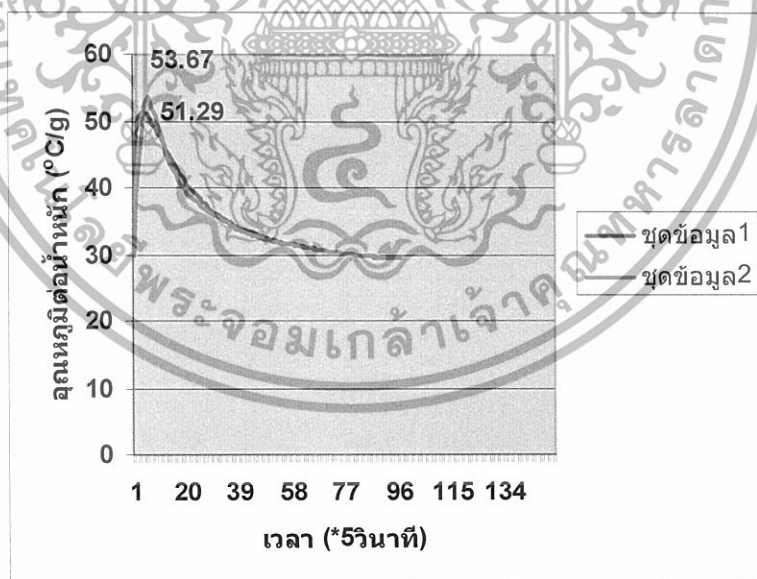


รูป ช-2 อุณหภูมิต่อเนื่องของซีเมนต์ สูตรที่ 2 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 70:30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

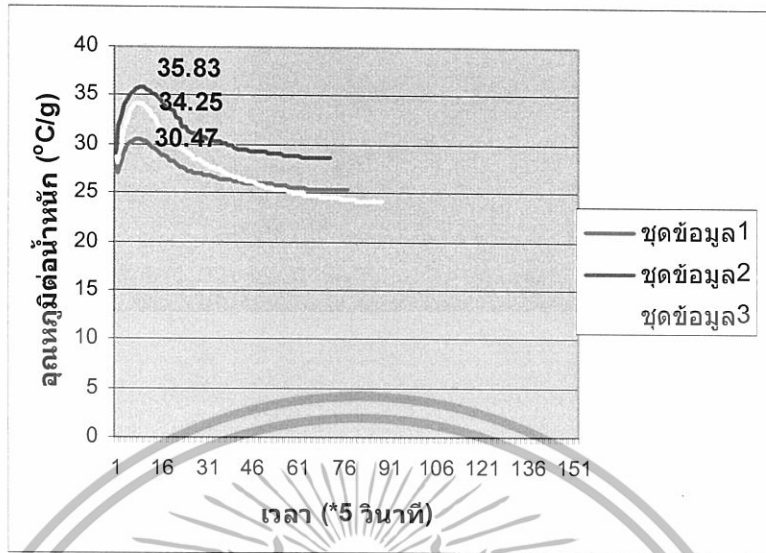


รูป ช-3 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 3 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 50:50)

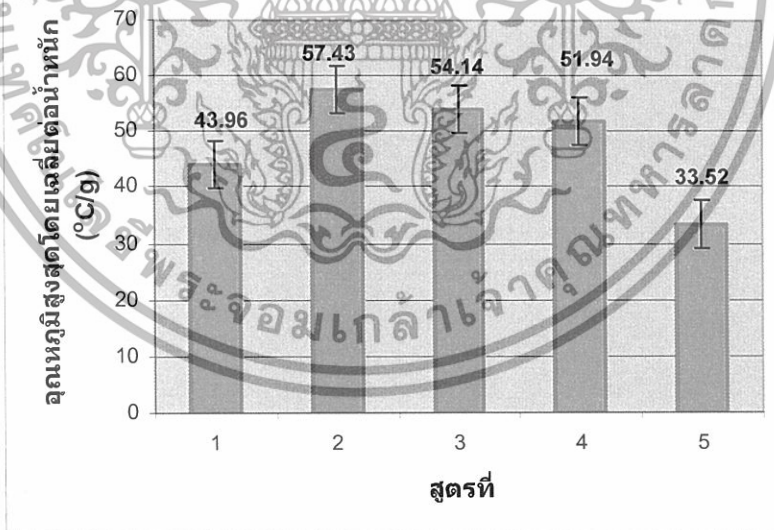


รูป ช-4 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 4 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 30:70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

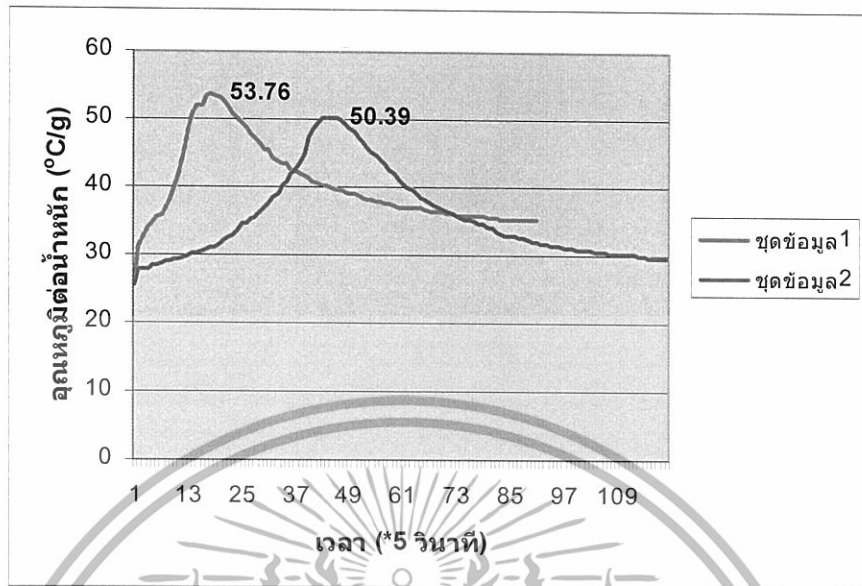


รูป ช-5 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 5 PMMA:CS เป็น 3:7 (MMA:HEMA = 0:100)

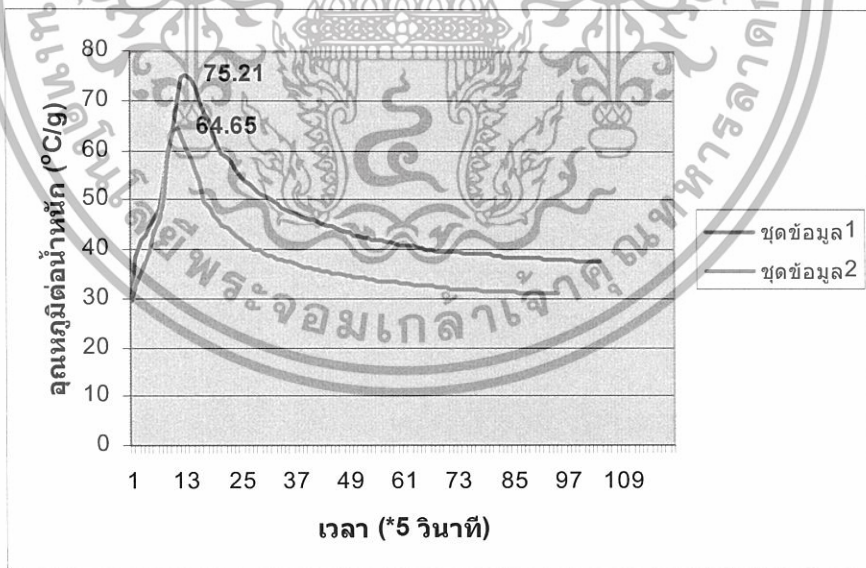


รูป ช-6 อุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยต่อน้ำหนักของซีเมนต์ PMMA:CS เป็น 3:7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

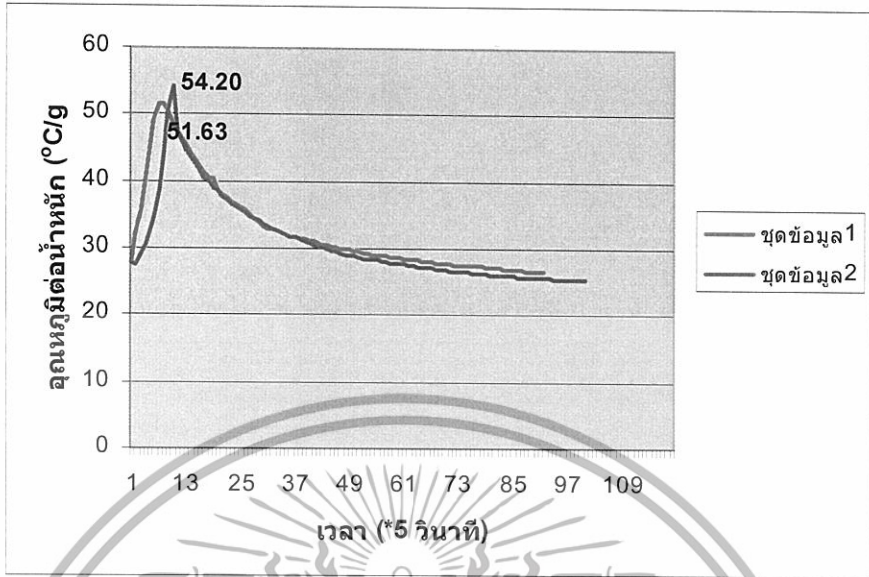


รูป ช-7 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 6 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 100:0)

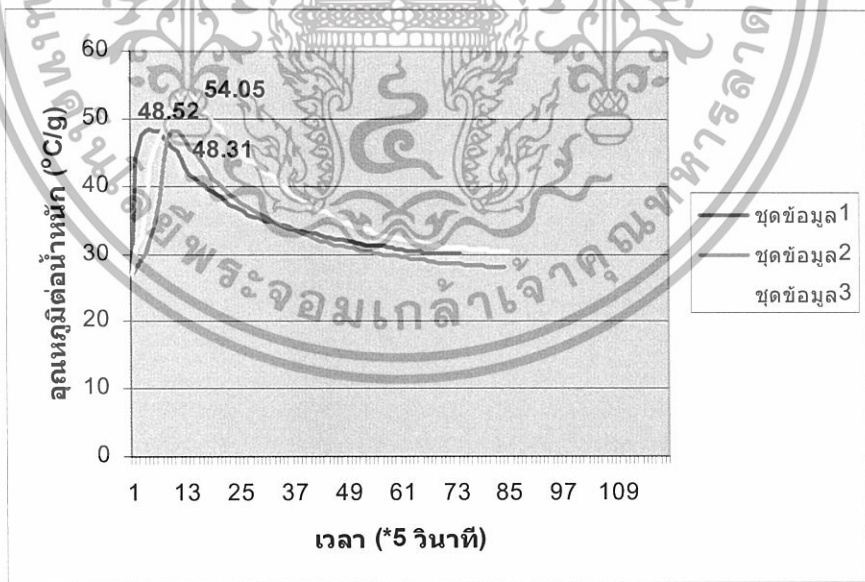


รูป ช-8 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 7 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 70:30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

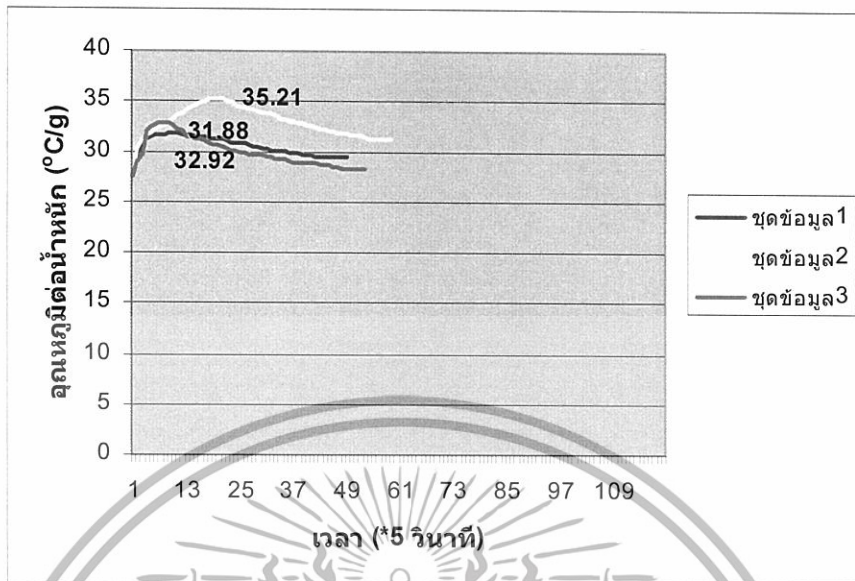


รูป ช-9 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 8 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 50:50)

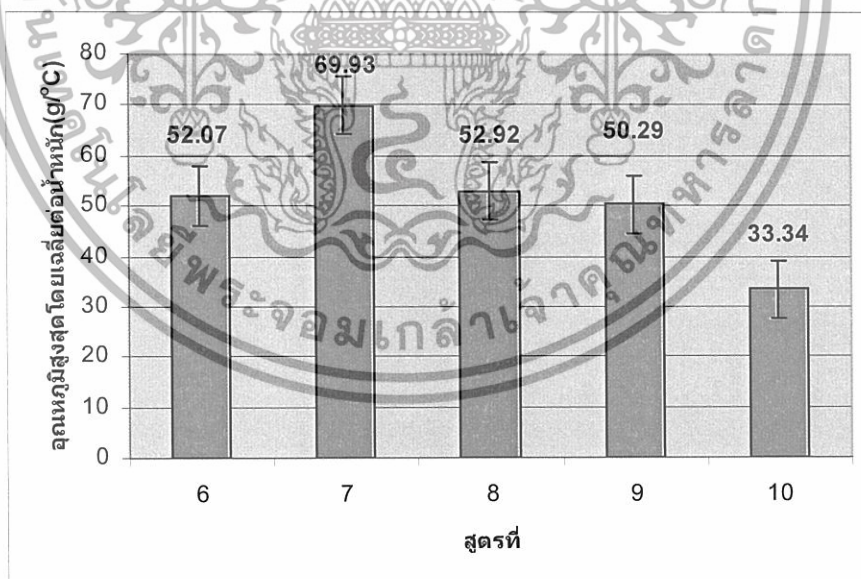


รูป ช-10 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 9 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 30:70)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

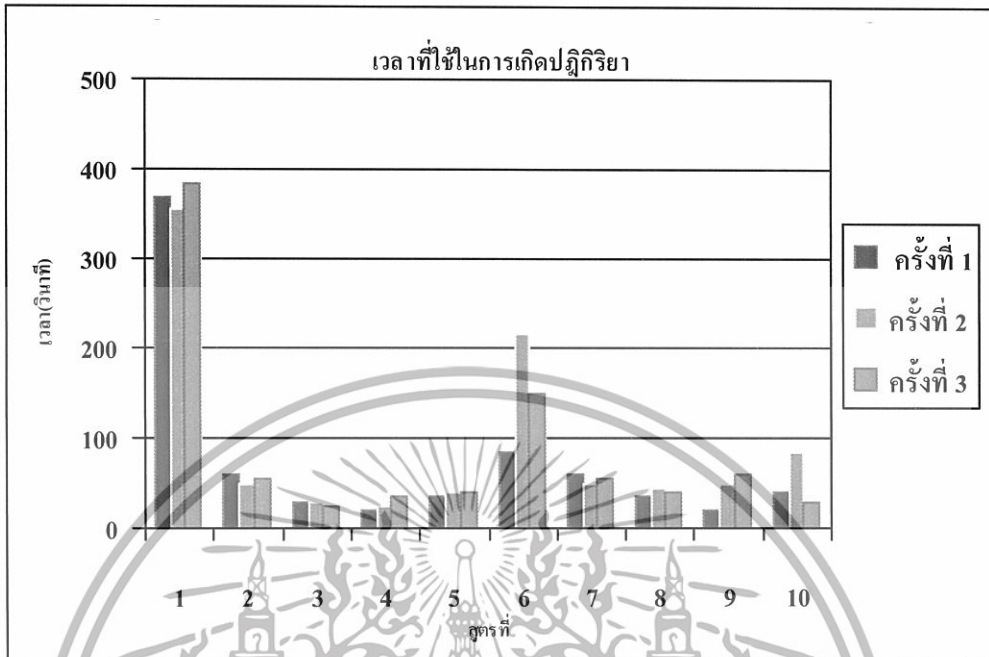


รูป ช-11 อุณหภูมิต่อน้ำหนักของซีเมนต์ สูตรที่ 10 PMMA:CS เป็น 4:6 (MMA:HEMA = 0:100)



รูป ช-12 อุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยต่อน้ำหนักของซีเมนต์ PMMA:CS เป็น 4:6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-13 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้