

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมซีเมนต์เคลือบซีเมนต์เชื่อมซีเมนต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (CS/PMMA)  
สำหรับงานทางการแพทย์ ด้วยเทคนิคการฉายแสงอัลตราไวโอเลต



T107734



นางสาวกิตติกร ตียาภักดิ์  
นางสาวจิราพร ไวยปีตา  
นางสาวจุฑามาศ รัตนาญ

กยพ.  
กย 137  
2548

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...107734  
วัน,เดือน,ปี... 10 พ.ค. 2553

b. 12210808  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation PMMA/CS Cements for Medical Applications by Radiation  
Ultra-Violet Technique



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the requirement for the Degree of  
Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมซีเมนต์ CS/PMMA สำหรับงานทางการแพทย์ด้วยเทคนิคการฉายรังสี UV
นักศึกษา	นางสาวกิตติกร ตียาภักดิ์ นางสาวจิราพร ไวยปีตา นางสาวจุฑามาศ รัตนายุ
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทธราช มนต์วีเศษ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์โนน

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย	
กรรมการ	ผศ.ดร.ชลลดา อุตวิรุฬห์	
กรรมการ	ผศ.ดร.ภัทธราช มนต์วีเศษ	



( ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี )

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมซีเมนต์เคลือบเชิงซิติเกิดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (CS/PMMA) สำหรับงานทางการแพทย์ด้วยเทคนิคการฉายแสงอัลตราไวโอเลต
นักศึกษา	นางสาวกิตติกร ตียาภักดิ์ รหัส 45050074 นางสาวจิราพร ไวยปีตา รหัส 45050081 นางสาวจุฑามาศ รัตนาญ รหัส 45050082
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทรวรุท มนต์วิเศษ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ปยุตต์มา ศิริพันธ์ โนน

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่องในการศึกษาการเตรียมซีเมนต์เคลือบเชิงซิติเกิดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต(CS/PMMA) สำหรับประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ ซึ่งได้ศึกษาสภาวะการแข็งตัวของซีเมนต์ ด้วยเทคนิคการฉายแสงอัลตราไวโอเลต โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต การเตรียมซีเมนต์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ วัสดุของเหลวคือมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) และวัสดุของแข็งคือพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เคลือบเชิงซิติเกิด (CS) ตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโซอีลเปอร์ออกไซด์ (BPO) และ ตัวกระตุ้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาซึ่งว่องไวต่อแสง(Photosensitizers) เบนโซฟีโนน (BZP) จากนั้นทำการฉายแสงอัลตราไวโอเลต ในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้อง MMA จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทำให้ซีเมนต์เซตตัวลงรูป โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาสภาวะต่างๆในการเตรียมซีเมนต์ ได้แก่ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง เวลาในการฉายแสง ความหนาของซีเมนต์ และ ปริมาณ BPO และ BZP จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความหนาซีเมนต์ เวลาในการฉายแสง และระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงมีอิทธิพลต่อเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์ ส่วนการปรับเปลี่ยนปริมาณของ BZP และ BPO มีผลต่อการคายความร้อนของซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จึงได้ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมต่อการแห้งผิวและการแข็งตัวของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Preparation PMMA/CS Cements for Medical Applications by Radiation Ultra-Violet Technique
<b>Name</b>	Miss Kitikorn Tiypak 45050074 Miss Chiraporn Waipeta 45050081 Miss Juthamas Rattanayu 45050082
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Program</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic Year</b>	2005
<b>Special Project Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Pathavuth Monvisade
<b>Special Project Co-advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Punnama Siripunnon

### ABSTRACT

This continuous special project studied on preparation of poly (methyl methacrylate)-calcium silicate (PMMA/CS) for medical applications by radiation UV technique with ultraviolet lamp, light source. Preparing materials consisted of two main components which were liquid phase, i.e., methyl methacrylate monomer (MMA) and solid phases, i.e., poly (methyl methacrylate) (PMMA), calcium silicate (CS), benzoyl peroxide (BPO) and benzophenone (BZP). The mixtures of those phases were radiated by UV ray in atmosphere during which the polymerization of MMA occurring at ambient temperature resulting in cement shaping. This special project was focused on the variety of cement exposure distances, radiation time, cement thickness and quantities of BPO and BZP. The result indicated that the cement thickness radiation times and exposure distances have influence on dry-hard time. In addition, the change of quantities of BZP and BPO has effect on exothermic of cement. Set-to-touch time and dry-hard time were investigated to gain the suitable condition for cement preparation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือ ความร่วมมือตลอดจนความแนะนำที่เป็นประโยชน์จากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน ที่กรุณาแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนกรุณาตรวจทาน แก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย ผศ.ดร. ชลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์คณะกรรมกรที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พัทธนี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค NMR

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณ กุศลารามย์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการค้นหาข้อมูลอุปกรณ์ในการวัดความเข้มแสงของหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ขอขอบพระคุณ คุณเต็มศิริ เจ้าหน้าที่บริการเทคนิค GPC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิค GPC

ขอขอบพระคุณครอบครัวอันเป็นที่รักและให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณพี่ๆและเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษขอความขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

กิตติกร ตียาภักดิ์

จิราพร ไวยปีตา

จุฑามาศ รัตนาชู

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 แคลเซียมซิติเลต	4
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิติเลต	4
2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ	4
2.1.3 สมบัติเด่นของแคลเซียมซิติเลต	4
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิติเลต	5
2.1.5 การสังเคราะห์แคลเซียมซิติเลต	5
2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต	6
2.2.1 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมออร์	6
2.2.2 การสังเคราะห์พอลิเมออร์แบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระ	8
2.3 โฟโตพอลิเมอไรเซชัน	11
2.3.1 โฟโตอินิเชียเตอร์สำหรับกลไกแบบอนุมูลอิสระ	12
2.3.2 ตัวกระตุ้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาดับแสง	14
2.4 Ultraviolet	15
2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของรังสีอัลตราไวโอเลต	15
2.4.2 แหล่งกำเนิดแสงของรังสีอัลตราไวโอเลต	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การนำไปใช้งานของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	18
2.5 วัสดุเซรามิกสีชีวภาพ	19
2.5.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	26
3.3 การสังเคราะห์แคลเซียมซิติเกต	29
3.4 การสกัดด้วยขี้ผึ้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต	31
3.5 การสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคสารละลาย	33
3.6 การเตรียมซีเมนต์แคลเซียมซิติเกตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต	34
3.6.1 การผสมซีเมนต์เฟสท์	34
3.6.2 การขึ้นรูปและการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต	35
3.7 การวัดคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสท์	36
3.8 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์	37
3.8.1 การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลือ	37
3.8.2 การวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์	37
3.8.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว	38
3.8.4 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุล	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมซิติเกตที่สังเคราะห์ได้	39
4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่สังเคราะห์ได้	40
4.3 ซีเมนต์ CS/PMMA	40
4.3.1 การทดสอบเวลาในการแข็งผิว	40
4.3.2 การทดสอบเวลาในการแข็งตัว	41
4.3.3 ผลการทดสอบการคายความร้อนของซีเมนต์	44
4.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์	47
4.3.5 การวิเคราะห์จากเทคนิค NMR	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล PMMA ด้วยเทคนิค GPC	51
4.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์	53
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	56
ภาคผนวก ก รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ของ CS จากฐานข้อมูล JCPDS	59
ภาคผนวก ข โครมาโทแกรมจากเครื่อง GPC	61
ภาคผนวก ค เวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์	75
ภาคผนวก ง นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรา	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 วัสดุชีวภาพที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน	20
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของกระดูกและวัสดุอื่นๆที่ใช้เป็นวัสดุชีวภาพ เพื่อใช้ทดแทนข้อต่อ	20
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนองค์ประกอบของซีเมนต์เฟสท์	34
ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองสำหรับการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต	36
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี ของ CS ที่สังเคราะห์ได้	39
ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาในการแห้งผิวของซีเมนต์เฟสท์ สูตรที่ 1	41
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสท์ สูตรที่ 1	42
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสท์ สูตรที่ 2	42
ตารางที่ 4.5 บันทึกน้ำหนักที่ซึ่งได้จากการทดลอง	47
ตารางที่ 4.6 ปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์	49
ตารางที่ 4.7 น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในก้อนซีเมนต์	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของ Cleavable photoinitiator	13
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของ Uncleavable photoinitiator	14
รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของ Photosensitizer	15
รูปที่ 2.4 Deuterium Lamps	16
รูปที่ 2.5 Hallow Cathode Lamps	16
รูปที่ 2.6 Mercury Lamps	17
รูปที่ 2.7 Black Light Lamps	18
รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต	30
รูปที่ 3.2 แผนงานการสกัดด้วยบัพยั้งมอโนเมอร์เมทิลเมทาคริเลต	32
รูปที่ 3.3 แสดงภาพการผสมซีเมนต์เฟสท์	35
รูปที่ 3.4 แสดงภาพการขึ้นรูปซีเมนต์เฟสท์	35
รูปที่ 3.5 แสดงภาพการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต	36
รูปที่ 3.6 ภาพการเผาขึ้นงานซีเมนต์เฟสท์เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบในซีเมนต์	37
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของรังสี CS ที่สังเคราะห์ได้ ภายหลังจากการเคลือบที่ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	40
รูปที่ 4.2 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 1	45
รูปที่ 4.3 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 1	45
รูปที่ 4.4 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 2	46
รูปที่ 4.5 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 2	46
รูปที่ 4.6 สเปกตรัม <sup>1</sup> H-NMR ของ พอลิเมทิลเมทาคริเลต	50
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคภายในซีเมนต์สูตรที่ 1	53
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคภายในซีเมนต์สูตรที่ 2	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้ก้าวหน้าไปไกล ก่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการรักษาสมัยใหม่เป็นผลให้เกิดการพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยให้ดียิ่งขึ้น ด้วยการหาถึงทดแทนส่วนต่างๆที่ร่างกายสูญเสียไปหรือไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อใช้ทดแทนการรักษาโดยวิธีการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะจากเนื้อเยื่อธรรมชาติ (Transplantation) ซึ่งเป็นการผ่าตัดเอาเนื้อเยื่อหรืออวัยวะเดิมที่มีข้อบกพร่องออก แล้วแทนที่ด้วยอวัยวะใหม่ ซึ่งได้จากผู้ป่วยเองหรือจากผู้บริจาค

สำหรับการเปลี่ยนถ่ายกระดูกจากวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ กระดูกของมนุษย์ ซึ่งมีทั้งการใช้กระดูกที่ผ่านการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze dry) จากคลังกระดูก และกระดูกที่ได้จากการผ่าตัดเคลื่อนย้ายมาจากส่วนอื่นๆของร่างกายผู้ป่วยเอง โดยการผ่าตัดเพื่อเคลื่อนย้ายกระดูกนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียและอันตรายจากการผ่าตัดในอีกตำแหน่งหนึ่งได้ ขณะเดียวกันกระดูกที่ได้จากคลังกระดูกนั้นอาจพบปัญหาในเรื่องของการติดเชื้อระบบภูมิคุ้มกัน เป็นต้น

วัสดุสังเคราะห์จึงเริ่มเข้ามามีบทบาทในการใช้ทดแทนกระดูก ตั้งแต่อดีตวัสดุสังเคราะห์ที่นำมาใช้งานมีทั้งเหล็กสแตนเลส โลหะผสมโครเมียม เซรามิกส์ วัสดุประกอบและพลาสติก เป็นต้น เนื่องจากพื้นผิวของวัสดุเหล่านี้ไม่มีสมบัติทางชีวภาพที่เหมาะสมกับเนื้อเยื่อที่อยู่ล้อมรอบ จึงไม่เกิดการเชื่อมติดกับกระดูกจริง ทำให้เกิดข้อด้อยในด้านความสามารถในการรับแรงที่กระทำต่อกระดูก ซีเมนต์หรือวัสดุที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดและมีสมบัติในการยึดติดที่ดี จึงถูกนำมาใช้สำหรับซ่อมแซมส่วนที่บกพร่องและทำหน้าที่เสมือนเป็นกาวยึดอวัยวะเทียมเพื่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้อาจใช้ในการอุดหรือซ่อมแซมรอยแตกที่เกิดขึ้นในกระดูกและฟัน เพื่อป้องกันการแพร่ของรอยแตกและทำให้อวัยวะบริเวณนั้นสามารถกลับมาใช้งานดังเดิม

ประมาณปี ค.ศ.1961 [1] ศัลยแพทย์ชาวอังกฤษ John Charnley ได้นำซีเมนต์พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA Cement) มาใช้ในการยึดติดกระดูกกับกระดูกสะโพกเทียม ตั้งแต่นั้นมาก็ได้มีการนำซีเมนต์ PMMA ไปใช้ในวงการแพทย์กันอย่างแพร่หลาย แต่ภายหลังพบว่าก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ไม่เกิดการเชื่อมติดกับกระดูก ความแข็งแรงเชิงกลต่ำ เกิดความร้อนสูงขณะแข็งตัวเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และก่อให้เกิดอาการแพ้ เป็นต้น จึงได้มีการพัฒนามาเป็นซีเมนต์เชื่อมกระดูกที่มีความว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive Bone Cement) ซึ่งมีข้อดี คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเกิดการเชื่อมติดกันกับเนื้อเยื่อกระดูกได้เมื่อแข็งตัวพบว่ามี การคายความร้อนต่ำกว่าและมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าซีเมนต์จาก PMMA

แคลเซียมซิลิเกต [2] หรือ Wollastonite มีการศึกษาวิจัยระบุว่า มีความว่องไวทางชีวภาพสูง สามารถกระตุ้นให้มีการก่อตัวของเนื้อเยื่อกระดูกใหม่ในรูปของไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ในสภาวะร่างกายของมนุษย์ โครงการวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาการเตรียมซีเมนต์ เชื่อมกระดูกและฟันในลักษณะที่เป็นวัสดุประกอบระหว่าง CS:PMMA โดยมีระบบการ curing เป็นแบบ Redox ที่มีการคายความร้อนสูง และเกิดปฏิกิริยารวดเร็ว จึงได้ทำการปรับปรุงมาเป็นโครงการวิจัยนี้ ที่เปลี่ยนระบบการ curing เป็น UV-Cure คือการฉายแสงอัลตราไวโอเลตให้กับชิ้นงานซีเมนต์และจะยังไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชันถ้ายังไม่ฉายแสง ทำให้มีเวลาในการเตรียมหลังจากการผสมเสร็จแล้วมากกว่า การคายความร้อนมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาสถานะและสมบัติอื่นๆของซีเมนต์เพิ่มเติม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ในการเตรียมซีเมนต์ที่มีผลต่อระยะเวลา ในการแห้งผิวและการแข็งตัวของซีเมนต์ ได้แก่ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงและซีเมนต์ ระยะเวลาการฉายแสง และความหนาของซีเมนต์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
2. ศึกษาถึงผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณ BPO และ BZP ที่มีต่อปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชัน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมซีเมนต์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกตโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งเริ่มจากการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตด้วยวิธีตกตะกอนร่วมและสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคพอลิเมไรเซชันแบบสารละลาย จากนั้นทำการเตรียมซีเมนต์โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ วัฏภาคของเหลวคือมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต(MMA) และวัฏภาคของแข็งคือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) แคลเซียมซิลิเกต(CS) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์(BPO) และเบนโซฟีโนน(BZP) ส่วนผสมของการใช้ CS:PMMA มีอยู่ 2 สูตรคือ 0.7:0.285 และ 0.7:0.251 จากนั้นนำซีเมนต์ไปฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่อุณหภูมิห้อง โดยอาศัย photosensitizer ช่วยรับพลังงาน ในช่วงคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตแล้วส่งต่อไปให้กับ photoinitiator จนเกิดปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชันทำให้ซีเมนต์แข็งตัว สิ่งที่จะทำการศึกษาคือสภาวะที่เหมาะสมในการฉายแสง โดยปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตกับซีเมนต์ ระยะเวลาในการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตความหนาของซีเมนต์ และปริมาณของ BPO และ BZP ที่มีผลต่อ ระยะเวลาในการแห้งผิว (set-to-touch) ระยะเวลาในการแข็งตัว (dry-hard) และการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA สูดทำยทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในแต่ละสถานะที่ทำการทดลอง

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมซีเมนต์เชื่อมกระดูกและฟันจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกตด้วยการหาสถานะในการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตและความหนาที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมซีเมนต์ระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแคลเซียมซิลิเกต
2. ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยสามารถเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในทางการแพทย์ต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 แคลเซียมซิลิเกต

##### 2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกต [3]

แคลเซียมซิลิเกต (Calciumsilicate,  $\text{CaSiO}_3$ ) สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ และสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ มีสูตรทางเคมีเป็น  $\text{CaSiO}_3$  แคลเซียมซิลิเกตหรือที่เรียกกันว่า Wollastonite ตามธรรมชาติ แร่ดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาของหินปูนซึ่งมีแร่ calcite ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบกับซิลิกา (Silica) โดยอาศัยความร้อนจากของเหลวร้อนจากปล่องภูเขาไฟ (Magma) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



แร่ Wollastonite สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ ในปัจจุบันแร่ Wollastonite มีความสำคัญในการผลิตเซรามิกส์ทนความร้อนและที่ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมสี

##### 2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

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

##### 2.1.3 สมบัติเด่นของแคลเซียมซิลิเกต

1. แคลเซียมซิลิเกตมีความเหนียวมากถึงแม้ว่าจะสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก แต่ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นในระหว่างการนำไปใช้งานหรือหลังจากผ่านกระบวนการผลิตแล้ว
2. แคลเซียมซิลิเกตมีค่าความเป็นกรดต่ำสูงใน 10 เปอร์เซ็นต์ของของเหลวชั้นหนืดจึงสามารถงเสถียรภาพได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 การประยุกต์ใช้งานแคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกตใช้เป็นหินตกแต่งเพื่อความสวยงาม และมีการนำแคลเซียมซิลิเกตไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นต้น และนอกจากนี้ยังมีการนำแคลเซียมซิลิเกตมาประยุกต์ใช้ในการแพทย์อีกด้วย โดยมีการนำแคลเซียมซิลิเกตมาพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมในร่างกายมนุษย์เพื่อทดแทนอวัยวะที่สูญเสียไป

#### 2.1.5 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต

แคลเซียมซิลิเกตมักจะสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของสารประกอบโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโลหะเป็นแคโทไอออนและออกซิเจนเป็นแอนไอออน

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์โดยทั่วไป ได้แก่

1. การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตโดยการทำปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [4-5]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ส่วนมากจะเป็นพวกออกไซด์ผสม สิ่งที่กำหนดโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ขนาดของอะตอม สถานะออกซิเดชัน

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

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีนี้ส่วนมากจะได้เป็นสารประกอบพวกออกไซด์ผสม ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏภาคอสัณฐาน (Amorphous phase) สารตั้งต้นที่นิยมคือสารจำพวกโลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) ซึ่งอาจใช้ 1 ชนิดหรือมากกว่าก็ได้

3. การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตโดยการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) [7]

เทคนิคการตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์ผสมวิธีหนึ่งที่ได้ผงเซรามิกส์ที่มีคุณภาพ ทำโดยนำสารละลายที่มีแคโทไอออนของสารที่ต้องการตกตะกอนร่วมกันไปผสมกับสารช่วยตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ตะกอนร่วมของสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้น

การเตรียมแคลเซียมซิลิเกต โดยการตกตะกอนร่วมอาศัยการใช้ปฏิกิริยาเคมีในสารละลายเตตระเอทิลอโรซิลิเกต (TEOS) และแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรท ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารช่วยตกตะกอน โซเดียมไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงต้องทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปนโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.66 โมล/ลิตร และทำการล้างตะกอน 2 ครั้งเพื่อให้ได้โซเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนที่เป็นสารเจือปนเหลืออยู่น้อยที่สุด สารที่สังเคราะห์ได้จะถูกแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดผลึกของแคลเซียมซัลไฟด์

## 2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA)

ในปี 1932 Rohm และ Bauer ได้ทำการผลิตแผ่นใสจากการพอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate), PMMA) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลแบบอะแทกติก (Atactic) โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบจึงทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous polymer) มีสมบัติโปร่งใส (ความโปร่งใส 92% เท่ากับแก้วซึ่งเป็นสารอนินทรีย์) มีความมันเงาสูง ค่าดัชนีการหักเหแสง 1.49 แข็งแต่เปราะ มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) เท่ากับ 105 องศาเซลเซียส พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความทนทานต่อสภาวะอากาศสูง ดูดซึมน้ำได้ต่ำ ตีกร่อนยาก ต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี แต่มีความต้านทานต่อสารเคมีต่ำ ในการขึ้นรูปพอลิเมทิลเมทาคริเลตอาจมีการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยการเติมสารเติมแต่ง เช่น สี (Pigments) สารหน่วงไฟ (Flame retardant) สารดูดซับรังสียูวี (UV absorbents) เป็นต้น [8]

### 2.2.1 เทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์ [9]

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยทั่วไป แบ่งเป็น 4 เทคนิค ได้แก่

#### 1. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization)

เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดโดยการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์และตัวริเริ่ม เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความหนืดของระบบอาจเพิ่มขึ้นถึง  $10^4$  เท่า เมื่อเทียบกับความหนืดของมอนอเมอร์และเกิดการคายความร้อน ไม่นิยมนำไปใช้ผลิตพอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน และพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น

#### 2. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization)

การเกิดพอลิเมอร์โดยเทคนิคแบบสารละลายนี้ สามารถแก้ปัญหาของเทคนิคแบบบัลค์ได้ เนื่องจากตัวทำละลายจะทำหน้าที่ระบายและส่งผ่านความร้อนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ตัวทำละลายทำให้ความหนืดลดลง การควบคุมความร้อนทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับแบบบัลค์ แต่การใช้ตัวทำละลายทำให้เกิดปัญหาการถ่ายโอนสายโซ่ และตัวทำละลายยังอาจปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกทำให้สมบัติพอลิเมอร์เปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension polymerization)

ปัญหาเนื่องจากความเป็นพิษและการติดไฟของตัวทำละลาย จึงได้คิดวิธีที่จะหลีกเลี่ยงตัวทำละลายอินทรีย์ คือวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย วิธีนี้มอนอเมอร์จะแขวนลอยเป็นหยดเล็ก ๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-500 ไมโครเมตร (ขนาดใหญ่กว่าเทคนิคอิมัลชัน) ในของเหลวที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น น้ำ หยดของพอลิเมอร์จะถูกปั่นกวอนอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการเกาะเป็นก้อนและอาจมีการเติมสารคงสภาพ (Dispersants) ด้วย โดยสารคงสภาพจะละลายปนอยู่ในชั้นน้ำเพื่อป้องกันการเกิดเป็นเจลของพอลิเมอร์ มอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ๆ คล้ายไข่มุก บางครั้งจึงเรียกวิธีนี้ว่า Pearl polymerization

### 4. เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนามาจากวิธีแบบแขวนลอย ใช้มากในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่เกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ วิธีนี้ต่างจากแบบแขวนลอยตรงที่ตัวริเริ่มไม่ละลายในมอนอเมอร์ แต่ละลายในตัวกลาง ซึ่งโดยส่วนใหญ่คือน้ำ แล้วแพร่เข้าไปในหยดมอนอเมอร์ ขนาดของหยดมอนอเมอร์จะมีขนาดเล็กกว่าแบบแขวนลอย คืออยู่ในช่วง 0.05 – 5 ไมโครเมตร ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของระบบจะคล้ายน้ำนม อนุภาคในระบบอิมัลชันไม่ตกตะกอนทันทีที่หยุดปั่นกวอนเพราะสารก่ออิมัลชันซึ่งอยู่บนผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ จึงเรียกลักษณะของพอลิเมอร์ที่ได้ว่า ลาเท็กซ์ (Latex)

การสังเคราะห์พอลิเมทาคริเลต เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมหรือแบบลูกโซ่ (Addition or Chain Polymerization) ที่เกิดจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate monomer, MMA) โดยทั่วไปเกิดผ่านกลไกอนุมูลอิสระ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระ

(Free radical addition polymerization)

พอลิเมอร์ไซโซแบบเติมผ่านกลไกอนุมูลอิสระเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่มีกระบวนการหลักอยู่ 3 ขั้น คือ

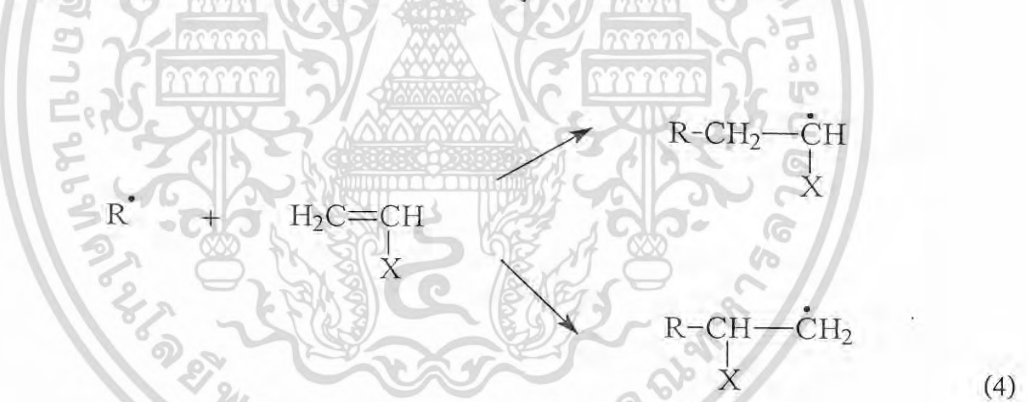
#### 1. ขั้นเริ่มต้นสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain-initiation)

เป็นกระบวนการเกิดหมู่ที่ว่องไว (Active site) หรืออนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม โดยอนุมูลอิสระของตัวริเริ่มจะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์เกิดอนุมูลอิสระใหม่และอนุมูลอิสระของตัวริเริ่มทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

การเกิดอนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม

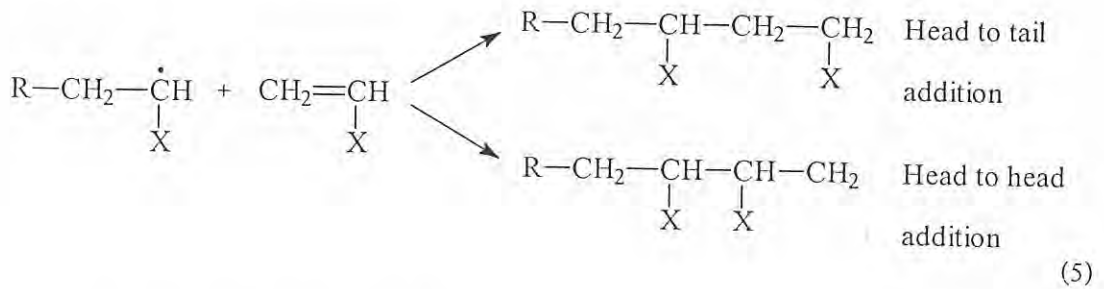


อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์



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

เป็นกระบวนการที่อนุมูลอิสระที่เป็นตัวตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โมเลกุลอื่นจนเกิดสายโซ่พอลิเมอร์ ลักษณะการเข้าทำปฏิกิริยาของสายโซ่พอลิเมอร์และมอนอเมอร์มีสองลักษณะคือ Head to tail และ Head to head ดังสมการที่ (5)

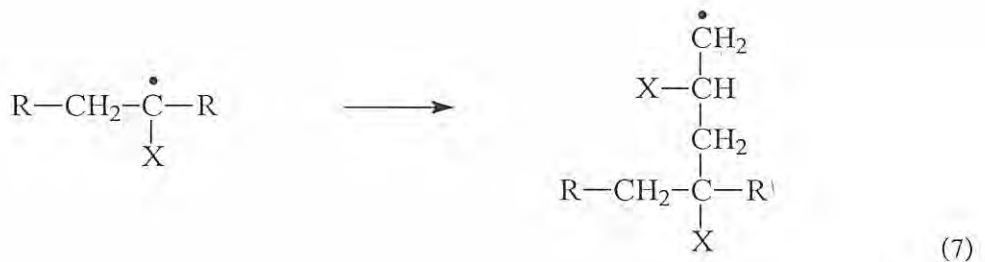


ถ้าสายโซ่พอลิเมอร์ที่ว่องไวนั้นดึง (Abstract) ไฮโดรเจนอะตอมจากโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียง จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่ว่องไว และโมเลกุลที่สูญเสียอะตอมไฮโดรเจนไปนั้นจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ที่พร้อมจะเริ่มต้นสายโซ่พอลิเมอร์ใหม่ต่อไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การย้ายสายโซ่ (Chain transfer) ดังสมการที่ (6) โมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมให้กับพอลิเมอร์ที่กำลังเติบโตนั้นอาจเป็นมอนอเมอร์ ตัวทำละลาย หรือสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์อื่น กระบวนการนี้ไม่ทำให้จำนวนอนุมูลอิสระในขณะนั้นเปลี่ยนแปลงแต่ทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวสายโซ่ (Average chain length) ของพอลิเมอร์ลดลง ถ้าโมเลกุลที่สูญเสียไฮโดรเจนอะตอมนั้นเป็นโมเลกุลพอลิเมอร์โซ่อื่น อาจทำให้เกิดโซ่กิ่ง ดังสมการที่ (7)

การขยายสายโซ่เมื่อมีการถ่ายโอนไฮโดรเจนอะตอมเกิดขึ้น



ถ้าตำแหน่งของไฮโดรเจนที่ถูกดึงอยู่ในสายโซ่จะก่อให้เกิดกิ่งสาขา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Chain-termination)

อนุมูลอิสระบนพอลิเมอร์ที่กำลังเจริญเติบโตจะสิ้นสุดหรือหยุดแผ่ขยายได้มีหลายกรณี

กรณีที่ 1 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของตัวริเริ่ม ดังสมการที่

(8) ปฏิกิริยานี้ไม่ดีเพราะทำให้อัตราเร็วของขั้นริเริ่มสายโซ่ลดลง



(8)

กรณีที่ 2 อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ 2 สายโซ่ทำปฏิกิริยากัน แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ก. รวมกัน (Combination) ปฏิกิริยาสิ้นสุดแบบรวมกันนี้เกิดอนุมูลมีต่ำและจะพบพอลิเมอร์ที่เกิดพันธะแบบ Head to head สายโซ่พอลิเมอร์ที่สิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้ มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (9)



(9)

ข. เกิดการถ่ายโอนอะตอมปกติ คือไฮโดรเจนจากอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์หนึ่งไปยังอนุมูลอิสระของอีกพอลิเมอร์หนึ่ง พอลิเมอร์ที่สูญเสียอะตอมของไฮโดรเจนจะเกิดปลายโซ่อิ่มตัว เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Disproportionation ในกรณีสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้ส่วนมากเกิดที่อนุมูลมีสูง น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเป็นครึ่งหนึ่งของการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมตัว ดังสมการที่ (10)



(10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### มอนอเมอร์สำหรับพอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

พอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระส่วนใหญ่เกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่เรียกว่า ไวนิลมอนอเมอร์ (Vinyl monomer)

### กลไกสำหรับการเกิดอนุมูลอิสระ

การเกิดอนุมูลอิสระอาจเกิดจากตัวริเริ่มหรือจากพันธะคู่ของมอนอเมอร์เอง โดยกลไกที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระมีหลายประเภท เช่น ความร้อนสามารถทำให้ตัวริเริ่มแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Thermal initiation of an initiation) หรือทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนพันธะคู่ของมอนอเมอร์ (Direct thermal initiation of a monomer) หรือการใช้แสงในการทำให้ตัวริเริ่มแตกตัว (Photo - initiation of an initiation)

### ตัวริเริ่มสำหรับพอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

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

## 2.3 โฟโตพอลิเมอไรเซชัน (Photopolymerization) [10]

เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่อาศัยแหล่งแสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระในขั้นริเริ่ม ปฏิกิริยาสิ่งที่ทำให้วิธีนี้เป็นที่น่าสนใจคือ สามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว ใช้พลังงานน้อยและปราศจากสิ่งสกปรกในระบบมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (photoinitiator) และตัวกระตุ้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (Photosensitizer)

### 2.3.1 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับกลไกแบบอนุมูลอิสระ

(Photoinitiator for free-radical processes) [11]

ส่วนใหญ่มักเป็นสารประเภท Aromatic carbonyl ซึ่งจะดูดกลืนพลังงานจากแหล่งแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนจาก singlet state ไปยัง triplet state เพื่อเป็นอนุมูลอิสระในขั้นริเริ่มปฏิกิริยา ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและความว่องไวของตัว photo initiator ซึ่งได้รับอิทธิพลจาก

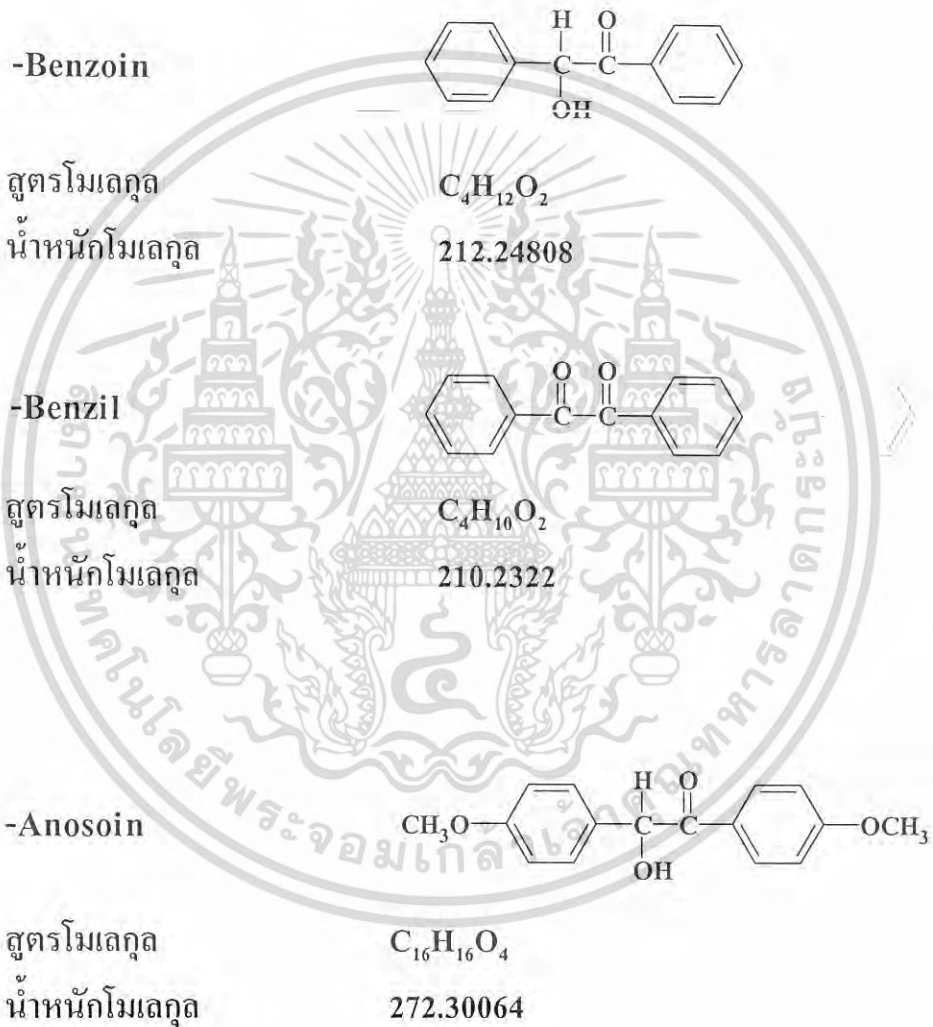
- 1) ลักษณะโครงสร้างโมเลกุล
- 2) ประสิทธิภาพของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น

ประเภทของ Photoinitiator แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) **Cleavable photoinitiator (Unimolecular fragmentation)** มีหลากหลายโครงสร้าง แต่ส่วนใหญ่เมื่อแตกตัวแล้วจะให้ benzoyl radical ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของ ไวนิลมอนอเมอร์

ตัวอย่าง



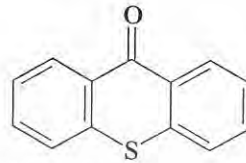
รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของ Cleavable photoinitiator [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) **Uncleavable photoinitiator** ประเภทนี้จะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงพร้อมกับการเกิด hydrogen abstraction จาก H donor เช่น tetrahydrofuran (THF)

ตัวอย่าง

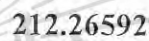
-Thioxanthen-9-one



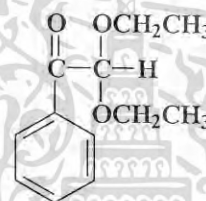
สูตรโมเลกุล



น้ำหนักโมเลกุล



-2,2-Diethoxyacetophenone



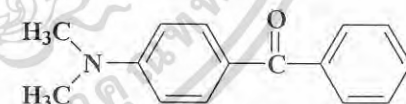
สูตรโมเลกุล



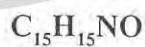
น้ำหนักโมเลกุล



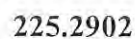
-4-(Dimethylamino)bezophenone



สูตรโมเลกุล



น้ำหนักโมเลกุล



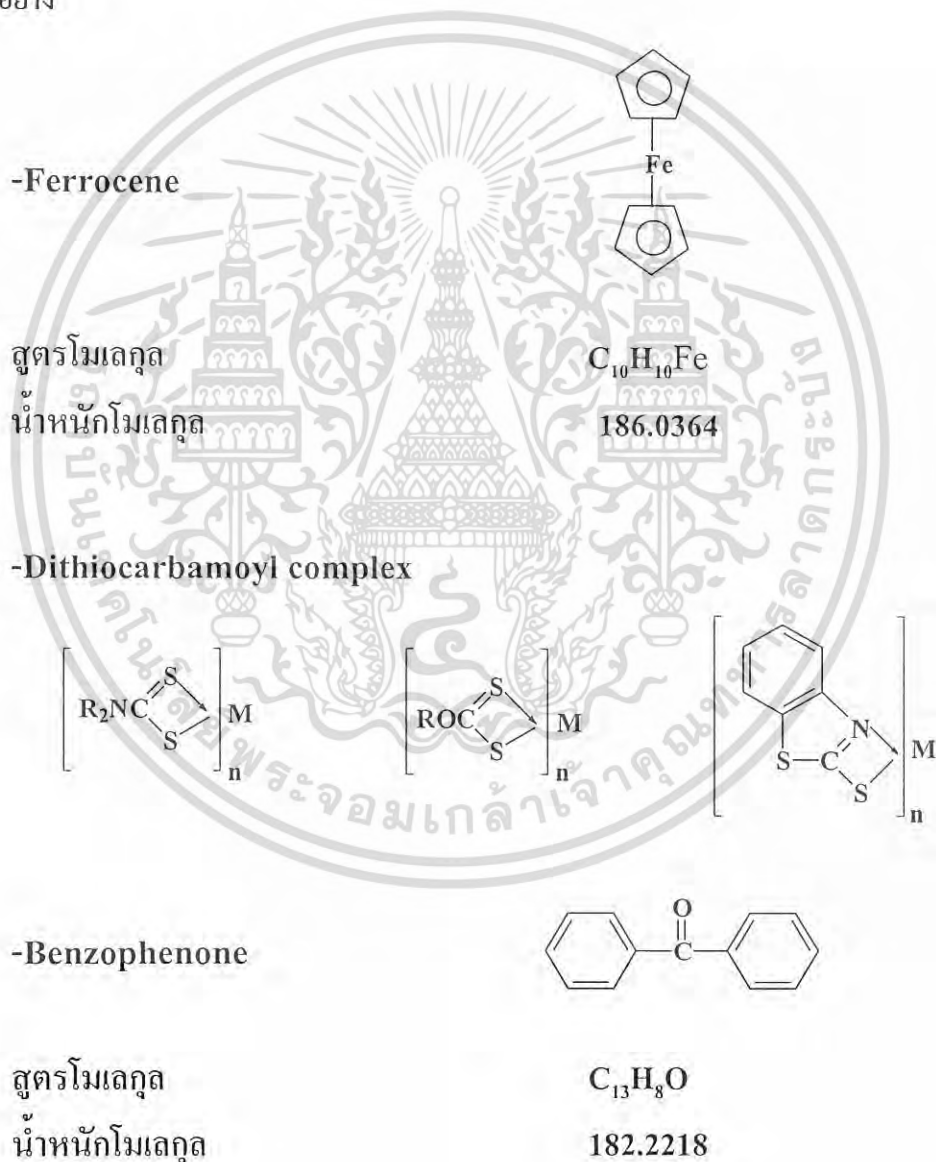
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของ Uncleavable photoinitiator [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ตัวกระตุ้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (Photosensitizer) [13]

เป็นสารที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อช่วยให้ Photoinitiator สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงในช่วงที่กว้างขึ้น กล่าวคือ photosensitizer เป็นตัวช่วยรับและส่งพลังงานจากแหล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ photoinitiator ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นอนุมูลอิสระได้ สามารถแบ่งออกเป็น Transition metal salts, Transition metal complex และ Carbonylic compound

ตัวอย่าง



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของ Photosensitizer [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 อัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) [14]

### 2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของรังสีอัลตราไวโอเลต

เป็นรังสีพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าช่วงคลื่น Visible แต่มีความยาวคลื่นยาวกว่า soft x-ray โดยสามารถแบ่ง UV ได้เป็น 2 ช่วง

- Near UV ( 380-200 nm )
- Extreme หรือ Vacuum UV ( 200-100 nm )

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตถึงผลกระทบที่มีต่อสุขภาพมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม ความยาวคลื่นของรังสียูวี จะแบ่งเป็นช่วงได้ดังนี้

UVA (380-315 nm) เรียกว่า คลื่นยาว หรือ Black light

UVB (315-280 nm) เรียกว่า คลื่นกลาง

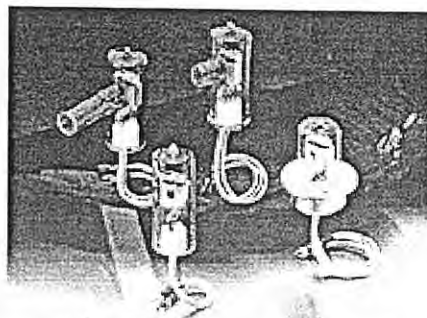
UVC (น้อยกว่า 280 nm) เรียกว่า คลื่นสั้น หรือ Germicidal

UV หรือ ultraviolet ที่เรียกเช่นนี้เพราะเป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่สั้นกว่าช่วงคลื่น Visible ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นสั้นที่สุดคือแสงสีม่วง ความยาวคลื่นของ UV ที่เรียกว่า black light นั้น ซึ่งตาของมนุษย์ไม่สามารถเห็นได้ แต่สัตว์บางชนิด เช่น นก สัตว์เลื้อยคลาน แมลง จะสามารถเห็นแสงช่วงนี้ได้ ผลไม้ ดอกไม้หลายชนิดจะเจริญเติบโตได้มากขึ้นจากการฉายแสง UV สำหรับพระอาทิตย์จะแผ่รังสี UV ออกมาในช่วง UVA, UVB, UVC แต่บรรยากาศของโลกชั้นโอโซนได้ดูดซับรังสีไว้ 99% ส่วนที่แผ่ออกมาสู่พื้นผิวโลกเป็น UVA

### 2.4.2 แหล่งกำเนิดแสงของรังสีอัลตราไวโอเลต

#### 1) Deuterium Lamps [15]

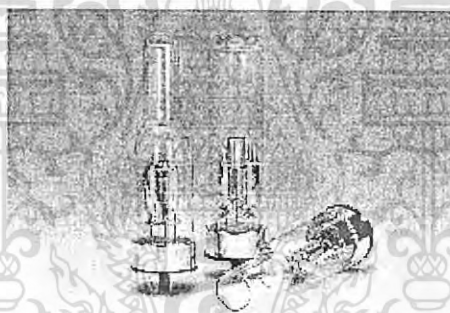
เป็นหลอดรังสีที่มีเสถียรภาพต่ำ และสามารถจำลองแบบได้ หลอดควิที่เรียมจะให้สเปกตรัมต่อเนื่องระหว่าง 180-370 nm ดังนั้น จะใช้ได้กับเครื่องมือทั่วไปได้หลากหลายและกว้างขวาง เช่น สเปกโตรโฟโตเมทรี และ โครมาโทกราฟี ชนิดของหลอดควิที่เรียมนั้นจะแตกต่างกันที่วัสดุ ตำแหน่งของหน้าต่าง รูปร่าง และ ขนาดของทางเข้าของช่อง วัสดุที่ทำขั้วแอโนด ปัญหาหลักของเครื่องมือชนิดนี้ คือ กำลังของความยาวคลื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับ อายุของหลอดทำให้การแผ่รังสีของสเปกตรัมลดประสิทธิภาพลงไป



รูปที่ 2.4 Deuterium Lamps [16]

## 2) Hallow Cathode Lamps

หลอดฮาโลแคโทด ใช้โลหะที่เป็นไอเป็นตัวปล่อยกระแสไฟฟ้า โดยพัฒนามาจากเทคนิคการวิเคราะห์ Atomic absorption ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ต้องการหลอดที่มีความจำเพาะของธาตุแต่ละชนิด เช่น Ag, Al, As หรือ จะมีธาตุหลายชนิดรวมกัน เช่น Na-K, Ca-Mg เป็นต้น

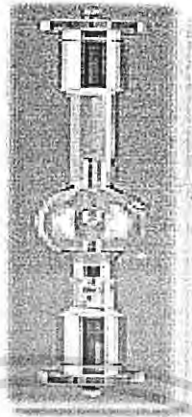


รูปที่ 2.5 Hallow Cathode Lamps [17]

## 3) Mercury Lamps

หลอดเมอคิวรี่จะให้แสงสว่างจากการเผาไหม้ของไอ Hg ในบรรยากาศที่ความดันสูง เป็นหลอดที่ให้ความสว่างสูง ให้สเปกตรัมหลายเส้น กำลังของรังสีแผ่ออกมาสูงในช่วง UV และ visible ต่อได้ทั้งกระแสดับ และ กระแสตรง มีอายุการใช้งานนาน ให้คุณภาพกับการมองเห็นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

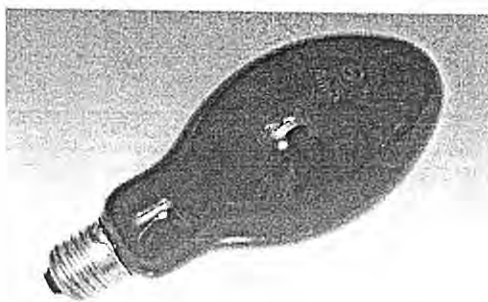


รูปที่ 2.6 Mercury Lamps [18]

Mercury lamps ซึ่งมีแหล่งกำเนิดของ UV ที่ให้ค่าความยาวคลื่นสูงพอๆกับ แสงช่วง visible หลอดไฟชนิดนี้รู้จักกันในชื่อ Black light Mercury ซึ่งกระเปาะหลอดภายนอกสร้างมาจาก Wood Glass เป็นแก้วที่บางแต่มีการ โด๊ป(dope) ด้วยนิกเกิลออกไซด์อย่างมาก ทำให้เกือบจะมีความทึบแสงอย่างสมบูรณ์ต่อสเปกตรัมของแสงในช่วง visible ในแก้วนั้นจะมี เหล็กออกไซด์ เป็นสิ่งรบกวนป้องกันการส่งผ่านของยูวีที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 nm ดังนั้นหลอดไฟจะไม่กระจายแสงในช่วงคลื่นสั้นของยูวี ที่มีเป็นอันตรายทำให้มีความปลอดภัยสูงต่อการสังเกต การมองเห็นอาจจะเกิดการพร่ามัว แต่จะไม่เป็นอันตราย รังสีUV ที่ออกมาเป็น Monochromatic ประมาณ 365.5 nm

หลอด Black light ใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างกว้างขวาง เอาไปใช้ในด้านเรวิทยา การตรวจสอบเอกสาร การบ่งบอกถึงวัสดุที่เขียนด้วยหมึกเรืองแสง การหารอยเปราะเปื้อนที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น เป็นต้น ซึ่งหลอดชนิดนี้นำไปใช้ในโครงการพิเศษที่ได้ทำการวิจัยเป็นแหล่งกำเนิดแสงยูวี เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา Photopolymerization

107734



รูปที่ 2.7 Black Light Lamps [19]

#### 2.4.3 การนำไปใช้งานของรังสีอัลตราไวโอเลต [14]

- หลอด Black light เป็นหลอดที่ให้แสงในช่วง UV และช่วง visible เล็กน้อย รังสี UV ที่แผ่ออกมาจะมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าของมนุษย์ นำไปใช้ในการทดสอบวัตถุโบราณ ชนบทปลอม การทดสอบที่ไม่ทำลายตัวอย่าง และใช้ในการสืบหาร่องรอยหลักฐาน เช่น เลือด ปัสสาวะ เป็นต้น
- หลอด Fluorescent จะผลิตรังสี UV จากการแผ่รังสีของก๊าซ mercury ที่ความดันต่ำ โดยรังสีจะอยู่ในช่วง UVC และมีแหล่งกำเนิดแสง UV ที่ให้สเปกตรัมต่อเนื่องอื่นๆอีก คือ xenon lamp , deuterium lamp และ mercury-xenon lamp
- การควบคุมสิ่งรบกวน โดยจะใช้รังสี UV ล้อแมลงเล็กๆ ให้เข้ามาและทำการช็อตไฟฟ้าให้ตาย
- สเปกโตรโฟโตเมทรี UV/VIS spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านเคมี ในการวิเคราะห์หาโครงสร้างทางเคมี
- วิเคราะห์ชั้นแร่ หลอด UV ใช้ในการวิเคราะห์แร่ เพชร หรือแร่ที่เรืองแสงได้
- การตรวจสอบความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ด้วย corona discharge
- การฆ่าเชื้อโรค
- ขบวนการจั่นรูปอาหาร โดยการใช้แสง UV ให้ความร้อนสูงในการฆ่าเชื้อโรค
- การ curing ของกาวและสารเคลือบ กาวและสารเคลือบจะรวมกันเป็น photoinitiator แล้วใช้แสง UV ทำการ polymerization กาวที่ได้จะแข็งและทำการ cure ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะรวดเร็ว ใช้เวลาเพียงไม่นานที่ โดยการใช้งานนำไปเคลือบผิว หรืออุดฟัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 วัสดุเซรามิกส์ชีวภาพ [20]

ในปัจจุบันได้นำวัสดุเซรามิกส์มาพัฒนาปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยการนำมาทำเป็นวัสดุคืบในการผลิตวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) และอวัยวะเทียม (Implants) เพื่อใช้ทดแทนอวัยวะในร่างกายมนุษย์ เช่น กระดูกโครงสร้าง กระดูกโคนขา วัสดุยึดติดฟันเทียม รากฟันเทียม กระดูกข้อต่อ เป็นต้น ข้อดีของเซรามิกส์ก็คือ เข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อร่างกาย แต่มีข้อเสียคือ เปราะ และสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงวัสดุเซรามิกส์มาทำเป็นวัสดุประกอบ (Composites) กับพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงของเซรามิกส์ การนำวัสดุเซรามิกส์ชีวภาพและพอลิเมอร์ผสมกันเป็นวัสดุประกอบเพื่อเพิ่มความสามารถในวัสดุประกอบที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม

### 2.5.1 วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม (Biomaterials and Implants)

วัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียม คือ วัสดุที่มนุษย์ผลิตขึ้นมาเพื่อทดแทนอวัยวะเดิมของร่างกาย ซึ่งสูญเสียไปอันเนื่องมาจากอุบัติเหตุ ความเจ็บป่วย หรือเนื่องมาจากการที่อวัยวะเดิมไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ โดยการนำวัสดุชีวภาพและอวัยวะเทียมเข้าไปในร่างกายเพื่อทดแทนอวัยวะนั้น ๆ แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่มีการผลิตให้ครอบคลุมกับทุกอวัยวะของร่างกาย วัสดุประเภทนี้สามารถผลิตได้มากมายตามความต้องการ และไม่มีปัญหาด้านคุณภาพของวัสดุ เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณและคุณภาพในขณะที่ผลิตได้ และมีการทดสอบความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย และการปลดปล่อยสารที่เป็นมลพิษต่อร่างกายก่อนการนำไปใช้งานจริง ถ้าพบว่าวัสดุนั้นไม่เหมาะสมก็สามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุอย่างอื่นแทนได้ ทำให้โอกาสเกิดอาการแทรกซ้อนลดลง แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุประเภทนี้มีอายุการใช้งานที่จำกัด ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ อีกทั้งไม่สามารถปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติให้เหมาะสมกับสภาวะร่างกายได้ดีเท่าอวัยวะจริงของร่างกายมนุษย์

วัสดุสังเคราะห์อื่น ๆ ที่นิยมผลิตอวัยวะเทียม เช่น โลหะปลอดสนิม (Stainless steel) โลหะผสมระหว่าง Ti-Al-V กับ Ni-Cr พอลิอะซิทัล (Polyacetal) ซีเมนต์เมทิลเมทาคริเลต (PMMA-Cement)  $Al_2O_3$  และ  $ZrO_2$ -TZP เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 วัสดุชีวภาพที่นิยมและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน [21]

โลหะ	เซรามิกส์	พอลิเมอร์
316L Stainless steel	Alumina	Ultra high molecule weight polyethylene
Co – Cr Alloys	Zirconia	Polyurethane
Titanium	Carbon	Polyurethane
Ti6A/4V	Hydroxyapatite	Polyurethane

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของกระดูกและวัสดุอื่นๆที่ใช้เป็นวัสดุชีวภาพ เพื่อใช้ทดแทนข้อต่อ [22]

วัสดุ	Young's modulus (GPa)
Alumina	365
Hydroxyapatite	85
Cortical bone	7-25
Cancellous bone	0.1 – 10
PMMA bone	770
Polyethylene	1

### กลไกการยึดติดเนื้อเยื่อและวัสดุชีวภาพ

สามารถแบ่งพิจารณาได้เป็น 4 ประเภท คือ [23]

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

เซรามิกส์ประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออยู่ในสภาวะร่างกายเป็นเวลานาน เนื้อเยื่อหรืออวัยวะบริเวณนั้นจะสร้างเนื้อเยื่อใหม่ขึ้นมาห่อหุ้มวัสดุ เมื่อเนื้อเยื่อใหม่มีความหนาแน่นมากขึ้นอาจจะทำให้เกิดการเลื่อนหลุดของวัสดุเซรามิกส์ชีวภาพได้

#### 2. เซรามิกส์และโลหะที่มีรูพรุน (Porous materials)

เซรามิกส์ประเภทนี้จะมีรูพรุนซึ่งช่วยลดปัญหาการเลื่อนหลุดได้ โดยเนื้อเยื่อใหม่ที่สร้างขึ้นจะเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนของวัสดุซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยึดระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อวัยวะใกล้เคียง ขนาดรูพรุนในวัสดุควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมครอน เพื่อให้เส้นเลือดฝอยเจริญเข้าไปหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อภายในรูพรุนได้ แต่ถ้ามีการเคลื่อนที่ตรงบริเวณรอยต่อบ่อย ๆ อาจทำให้เส้นเลือดฝอยขาด ทำให้เนื้อเยื่อที่อยู่ในรูพรุนตาย เกิดอาการติดเชื้อและอักเสบได้

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

วัสดุประเภทนี้จะค่อย ๆ เกิดการสลายตัวอย่างช้า ๆ และถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อที่ร่างกายสร้างขึ้นมา การเลือกวัสดุประเภทนี้มีข้อกำหนดที่สำคัญคือ วัสดุจะต้องสามารถถูกย่อยสลายด้วยระบบของร่างกายและอัตราการถูกดูดซับของวัสดุจะต้องสอดคล้องกับการสร้างเนื้อเยื่อขึ้นมาทดแทน โดยสารที่ปล่อยออกมาจะต้องไม่เป็นพิษต่อระบบร่างกาย และสามารถถูกกำจัดได้ด้วยระบบร่างกาย

### 4. เซรามิกส์ที่ว่องไวทางชีวภาพ (Bioactive materials)

ลักษณะที่สำคัญของวัสดุประเภทนี้คือ สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่พื้นผิวของวัสดุภายใต้สภาวะของร่างกายซึ่งทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อข้างเคียง จึงสามารถลดปัญหาเลื่อนหลุดที่บริเวณรอยต่อได้

#### การทดสอบวัสดุชีวภาพ [24]

โดยทั่วไปกระทำใน 2 ลักษณะคือ

#### 1. การทดสอบนอกร่างกาย มีวัตถุประสงค์สำคัญ 3 ประการดังนี้

- ตั้งเกตการทำงานและประเมินผลประสิทธิภาพของวัสดุชีวภาพ
- สามารถบอกสมรรถภาพของวัสดุชีวภาพภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ต่างกันได้
- ประเมินความน่าเชื่อถือ และความคงทนของวัสดุชีวภาพได้

เนื่องจากการนำวัสดุชีวภาพไปใช้งานจริงจะต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อ ของเหลว และอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย จึงควรมีการทดสอบสมบัติวัสดุชีวภาพในสภาวะแวดล้อมคล้ายกับในร่างกาย เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้นั้นมีความถูกต้องมากที่สุดหรือมีความผิดพลาดน้อยที่สุด เช่น การทดสอบโดยใช้ของเหลวที่มีองค์ประกอบคล้ายเลือดหรือพลาสมา

#### 2. การทดสอบภายในร่างกาย

วิธีนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าการทดลองภายนอกร่างกาย เพราะสภาวะที่ใช้ในการทดลองเป็นสภาวะจริงในร่างกายสิ่งมีชีวิต ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

### ก. การประเมินในสัตว์ทดลองที่มีสุขภาพดี

วิธีทดลองนี้จะทำโดยการผ่าตัดเพื่อใส่วัสดุทางชีวภาพเข้าไปในร่างกายของสัตว์ทดลองที่มีสุขภาพดี โดยต้องใส่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดได้แก่ วงจรชีวิตและอายุขัยที่ไม่เท่ากัน สรีระองค์ประกอบในร่างกายบางส่วนไม่เหมือนกัน

### ข. ประเมินในสัตว์ทดลองที่เป็นโรค

ผลที่ได้แตกต่างกับการทดลองกับสัตว์สุขภาพดี เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุทางชีวภาพกับอวัยวะที่เป็นโรคและไม่เป็นโรคต่างกัน การทดลองในสัตว์ที่มีสุขภาพดีไม่สามารถประเมินผลได้ จึงต้องทำการทดลองในสัตว์ที่เป็นโรค

### ค. การศึกษาจากกลุ่มผู้ป่วยในทางคลินิก

เป็นการทดลองในร่างกายมนุษย์เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของวัสดุทางชีวภาพและโรคแทรกซ้อนที่อาจเกิดจากการใช้วัสดุทางชีวภาพ

### ง. การใช้ทางคลินิกทั่วไป

วัสดุทางชีวภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้นต้องผ่านการทดสอบและรับรองโดยองค์กรที่ทำหน้าที่ควบคุมก่อนนำไปใช้งานกับผู้ป่วย

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Siriphannon P. และคณะ [25] ได้ทำการเตรียมแคลเซียมซิลิเกตโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, TEOS) และแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็นสารตกตะกอนพบว่าโซเดียมไอออนสามารถตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาได้ ดังนั้นจึงทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปนโซเดียมไอออนออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมคือ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.33 โมล / ลิตร และทำการล้างตะกอน 2 ครั้ง เพื่อให้โซเดียมไอออนที่เป็นสารเจือปนเหลืออยู่น้อยที่สุด สารที่สังเคราะห์ได้จะถูกแคลไซน์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อที่จะให้เกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตที่ได้เมื่อนำไปทดสอบในสภาวะจำลองของร่างกายโดยใช้สารละลายจำลองของร่างกาย (SBF) พบว่าจะเกิดชั้นไฮดรอกซีแอปพาไทต์บนพื้นผิวของแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการเข้ากันได้กับระบบชีวภาพของร่างกายได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yamamuro T. 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 นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เนื่องจาก BA cement มีความว่องไวทางชีวภาพจึงสามารถเกิดการเชื่อมติดกับกระดูกภายในร่างกายได้ภายในระยะเวลา 4-8 สัปดาห์ เมื่อทำการทดสอบกับโดยฉีดซีเมนต์ทั้งสองชนิดเพื่อเชื่อมติดระหว่างกระดูกสะโพกเทียบกับกระดูกขาของสุนัข พบว่าความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างกระดูกกับ BA cement จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งให้ผลที่ดีกว่า PMMA cement นอกจากนี้มีการใช้ BA cement สำหรับการเชื่อมต่อกระดูกสะโพกเทียมหรือรอยแตกเปราะในผู้สูงอายุ จากการศึกษาผลในผู้ป่วยเหล่านี้พบว่าอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดคือระยะเวลา 4 ปี ซึ่งในระหว่างนี้ไม่พบที่เกิดผลข้างเคียงใดๆ

Pascual B. และคณะ [26] ได้ทำการทดลองถึงผลของขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่มีผลต่อการคายความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่าขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มากขึ้น จะทำให้มีการคายความร้อนขณะที่ซีเมนต์แข็งตัวน้อยลง ส่วนทางด้านสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่มากขึ้น แรงเค้นดึง (Tensile stress) และค่ามอดุลัสเชิงกด (Compressive modulus) มีค่าลดลง แต่แรงเค้นกด (Compressive stress) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนมอดุลัสดึง (Tensile modulus) และค่าการยืด (% Elongation) เปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่ง DMT พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิขณะแข็งตัวของซีเมนต์สูงขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (setting time) และมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่ลดลง ส่วนทางด้านสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเติมตัวเร่งมากขึ้น แรงเค้นดึงและแรงเค้นกด มีค่าลดลง ส่วนมอดุลัสดึง ค่ามอดุลัสเชิงกด และค่าการยืดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

Pena J.M. และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาผลของเขม่าดำ(carbon black) ที่มีต่อเสถียรภาพทางแสงของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ โดยมี เบนโซฟีโนน (benzophenone) ทำหน้าที่เป็นโฟโตเซนซิไทเซอร์(photosensitizer) โดยทำการเปลี่ยนชนิดและความเข้มข้นของ carbon black ผลการศึกษาพบว่า carbon black สามารถแสดงพฤติกรรมเป็นควENCHER ได้ทำให้ทริปเปิลต สเตท(triplet state) ของ benzophenone มีอายุการใช้งานลดลงเนื่องจาก carbon black สามารถดูดกลืนพลังงานและเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ(antioxidant)ได้เมื่อเติมถึงระดับหนึ่ง นอกจากนี้เมื่อผสม Carbon black เข้ากับ benzophenone จะทำให้พอลิเมอร์มีเสถียรภาพทางแสงดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acosta Ricardo และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาผลของ photosensitizer ที่มีต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์และอัตราการเกิด photosensitization พบว่าเมื่อสังเคราะห์ให้อนุพันธ์ของ benzophenone มีหมู่  $(-CH_2-)$  มากขึ้น จะทำให้การเกิด photosensitization เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้าง benzophenone และหมู่  $(-CH_2-)$  เหล่านี้ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนแก่พอลิเมอร์ขณะขึ้นรูปด้วย

Lecamp L. และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ ไดเมทิลคริลेट โอลิโกเมอร์ โดยมี 2,2-ไดเมทิล-2-ไฮดรอกซี อะซิโตนฟีโนน ทำหน้าที่เป็น radical photoinitiator โดยศึกษาสถานะในการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มแสง ความเข้มข้นของ photoinitiator เพื่อสภาวะที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ใช้โฟโตแคลอรีมิเตอร์ในการศึกษาและติดตามสถานะการเกิดปฏิกิริยา โดยกำหนดให้ระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงถึงชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 15 เซนติเมตร ความเข้มของรังสี UV ที่ใช้ศึกษาคือ  $2.7 \text{ mW/cm}^2$  สำหรับความเข้มข้นของ photo initiator สูงสุดที่เหมาะสม คือ 1% w/w และอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ คือ ประมาณ 90 องศาเซลเซียส

Price B.T. และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาดังอิทธิพลของชนิดแหล่งกำเนิดแสง ชนิดเรซิน และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับชิ้นงานที่มีต่อค่าความแข็งด้านบนและล่างของชิ้นงาน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ให้กำลังต่างกันสามชนิด เรซินในงานด้านทันตกรรมห้าชนิด ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับชิ้นงาน 2 และ 9 มิลลิเมตร ความหนาชิ้นงานคงที่ที่ 1.6 มิลลิเมตร และระยะเวลาการฉายแสง 3 ถึง 60 วินาที แล้วทดสอบค่าความแข็งหลังการฉายแสง 15 นาที และหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง พบว่าแหล่งกำเนิดแสงที่ให้กำลังน้อยจะทำให้ค่าความแข็งด้านบนของชิ้นงานมีค่ามากกว่าด้านล่างสูง แสดงว่ามีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้เรซินด้านล่างเกิดพอลิเมอไรเซชัน ดังนั้นจึงเพิ่มระยะเวลาการฉายแสงเพื่อให้มีพลังงานเพียงพอในการเกิดพอลิเมอไรเซชัน และพบว่าแหล่งกำเนิดแสงที่ให้กำลังสูง ไม่ได้ให้พลังงานที่มากเพียงพอไปขึ้นอยู่กับสมบัติของเรซินที่ใช้

Bennett W. และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความลึกในการเกิดพอลิเมอไรเซชัน (depth of cure,  $d_{\text{cure}}$ ) ของวัสดุประกอบสามชนิดที่มีโครงสร้างคล้ายกัน โดยมีแหล่งกำเนิดแสงสามชนิด ได้แก่ two blue light-emitted-diode (LED) 1 และ 2 และ quartz tungsten halogen (QTH) ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและชิ้นงาน 0 4 และ 8 มิลลิเมตร ระยะเวลาฉายแสง 10 20 และ 40 วินาที จากการศึกษาพบว่า  $d_{\text{cure}}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการฉายแสงนานขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและชิ้นงานไม่มีผลกระทบหรือมีผลน้อยมากต่อ  $d_{\text{cure}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Apicella A. และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการฉายแสงและความหนาของคอมโพสิตด้านทันตกรรมที่มีต่อการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน มี halogen light เป็นแหล่งกำเนิดแสง ความเข้มแสง  $500 \text{ mW/cm}^2$  ระยะเวลาการฉายแสง 20 และ 60 วินาที ความหนาของชิ้นงาน 0.3 0.6 และ 1 มิลลิเมตร โดยระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและชิ้นงานคงที่ จากการศึกษาพบว่าการความหนาของชิ้นงาน ไม่มีผลต่อปริมาณเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแต่จะลดอัตราเร็วของปฏิกิริยาลง และพบว่าระยะเวลาการฉายแสงที่เหมาะสมคือ 60 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. เอทานอล 95% (Ethanol,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
2. เมทานอล (Methanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
3. โทลูอีน (Toluene,  $\text{C}_7\text{H}_8$ ) บริษัท LAB SCAN เกรดวิเคราะห์
4. เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate,  $\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}_4\text{Si}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
5. แคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calcium nitrate tetrahydrate,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
6. มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate monomer,  $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ )
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
8. แอนไฮไดรรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous sodium sulphate,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
9. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride,  $\text{NaCl}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
10. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
11. เบนโซฟีโนน (Benzophenone, BZP) บริษัท FLUKA เกรดวิเคราะห์
12. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) บริษัท LAB SCAN เกรดวิเคราะห์
13. เตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) บริษัท LAB SCAN เกรดวิเคราะห์

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดการคายรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF) บริษัท Bruker AG รุ่น SRS 3400
2. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance
3. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Nuclear magnetic resonance spectrometer, NMR) บริษัท Bruker AG รุ่น NMR 300 Ultra Shield ความถี่ 300MHz ใช้เตตระเมทิลซิลิโคน (TMS) เป็นสารมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องเจลเพอมีเอชัน โครมาโตกราฟี (Gel permeation chromatography, GPC) บริษัท Milipore รุ่น Water 150-CV

คอลัมน์ : PL Gel 10  $\mu$ m Mixed BZ 2 Columns  
 ขนาด 7.8X300 mm  
 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500-1,000,000  
 ใช้พอลิสไตรีน (PS) เป็นสารมาตรฐาน

สารละลาย : เตตระไฮโดรฟูแรน (THF)

อุณหภูมิคอลัมน์ : 30°C

อุณหภูมิ Injector : 30°C

อุณหภูมิ Solvent/pump : 30°C

อัตราการไหล : 1 ml/min

ปริมาณในการฉีด : 100  $\mu$ L

เวลาในการวิเคราะห์ : 22 นาที

Detector : Reflective index

5. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer, IR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น IR Spectrum GX

6. เครื่องอัดตัวอย่างสำหรับ IR บริษัท Shimadzu Corporation รุ่น SSP-10A

7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-5410

8. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254

9. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต บริษัท PHILIPS รุ่น Black light Blue 160 W

10. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isoterm

11. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000

12. อ่างควบคุมอุณหภูมิ บริษัท BEC Thai รุ่น WB22

13. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท Buchi รุ่น B-169

14. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 224

15. เครื่องบด Rock Lab

16. โกร่งบดสาร

17. ครุซีเมนต์ชนิดพอร์ทแลนด์ (Portland) และอลูมินา (Alumina)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. แม่แบบที่ทำจากซิลิโคน
19. ก่อ้งทึบแสง ขนาด 1 x 1 x 1.5 ฟุต
20. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) บริษัท Fisher Scientific รุ่น Fisher stirrer hotplate
21. ตะแกรงร่อน ขนาด 200 เมช
22. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) บริษัท Omega Engineering รุ่น HH506RA
23. ตะเกียงบุนเสน
24. ขาดังเหล็ก
25. ไทเองเกิ้ล

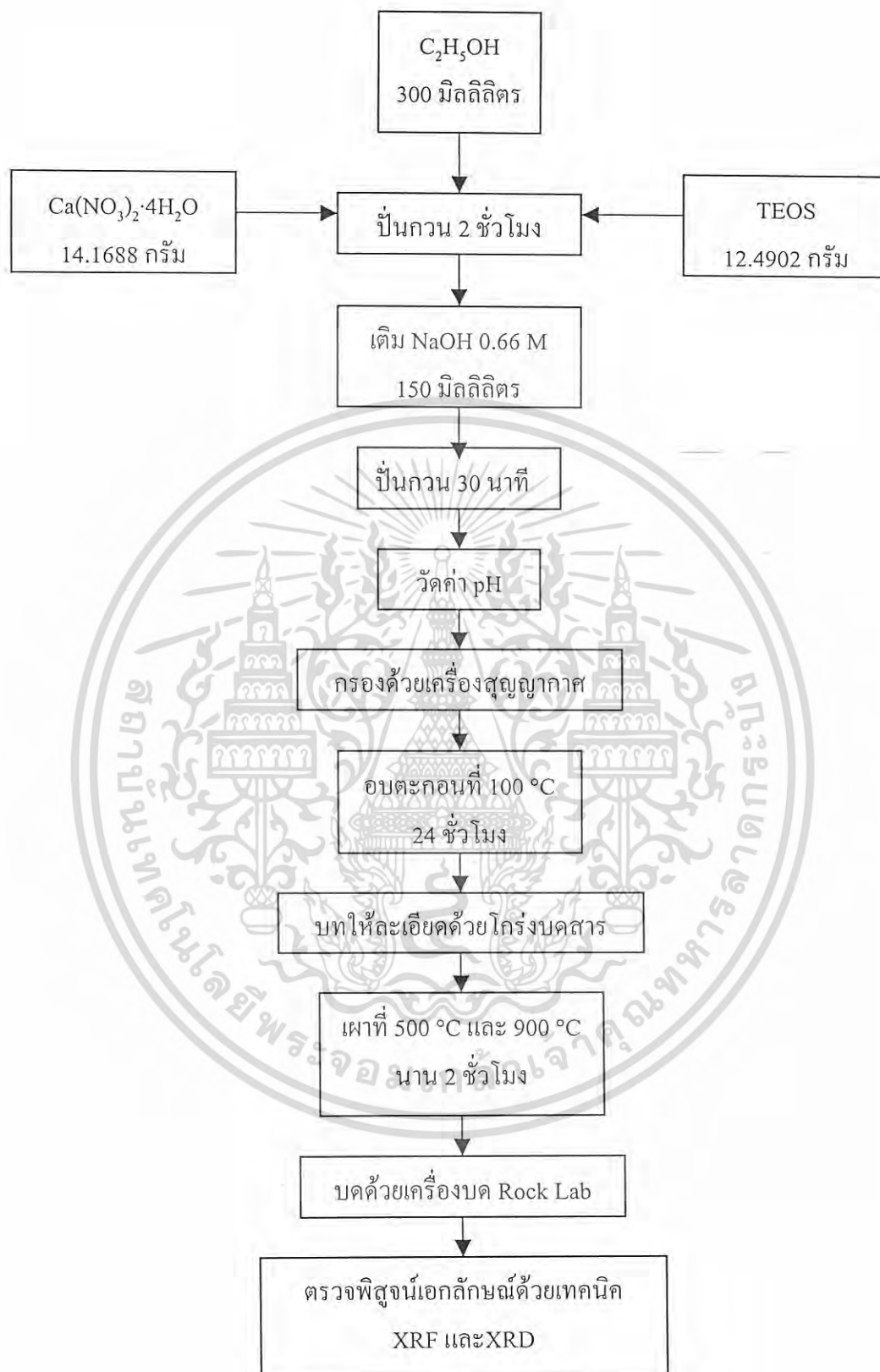


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate, CS) โดยวิธีการตกตะกอนร่วม

1. ชั่งเตรตระเอทิลออลโซซิลิเกต ปริมาณ 12.4902 กรัม และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 14.1688 กรัม ตวงเอทานอล ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ผสมลงในบีกเกอร์พลาสติก พร้อมทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.66 M โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 3.96 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 150 มิลลิลิตร
3. เมื่อปั่นกวนสารละลายในข้อ 1 ครบ 2 ชั่วโมง เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ ปั่นกวนต่ออีก 30 นาที วัดค่า pH ของสารละลาย บันทึกผล แล้วกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร
4. นำตะกอนแคลเซียมซิลิเกตที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก หาเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์
5. บดแคลเซียมซิลิเกตที่เตรียมได้ให้ละเอียดด้วยโม่บดสาร แล้วนำไปเผาที่ 500 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง บดด้วยเครื่องบด Rock Lab เพื่อให้ได้อนุภาคที่ละเอียดยิ่งขึ้น
6. ตรวจสอบคุณสมบัติเพื่อหาค่าประกอบทางเคมีของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการคายรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence spectrometry, XRF) และ หาวิฤภาคที่เป็นผลึกของสาร ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometry, XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนงานการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การสกัดด้วยขี้ผึ้งออกจากมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate monomer)

1. ตวงมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต 10 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในกรวยแยก เขย่าให้สารทั้งสองผสมกัน รอจนแยกชั้นแล้วไขชั้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง
2. ล้างมอนอเมอร์ที่อยู่ในกรวยแยกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ใช้ล้างไม่เปลี่ยนสีของกระดาษลิตมัสจากแดงเป็นน้ำเงิน ซึ่งแสดงว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกล้างออกหมดแล้ว
3. เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว เขย่าให้สารทั้งสองผสมกัน รอจนแยกชั้นแล้วไขชั้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึ่งอยู่ด้านล่างทิ้ง
4. นำมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดด้วยขี้ผึ้งแล้วมาเติมสารคลุกความชื้นแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) กรองแยกของแข็งออก แล้วนำมอนอเมอร์ที่สกัดด้วยขี้ผึ้งแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.5 การสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate) ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization)

1. ตวงมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดตัวขังแล้วปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เตรียมเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.01 กรัม และโทลูอีน 40 มิลลิลิตร ละลายเป็นเนื้อเดียวกันก่อนแล้วจึงเทลงในขวดก้นกลมที่มีมอนอเมอร์อยู่
3. ผ่านแก๊สไนโตรเจนลงในสารผสมเป็นเวลา 15 นาที แล้วรีบปิดด้วยจุกคอร์กที่ต่อกับลูกโป่งซึ่งบรรจุแก๊สไนโตรเจนไว้ภายในทันที และหุ้มทับด้วยพาราฟิล์มให้สนิท
4. นำขวดก้นกลมที่ปิดด้วยจุกคอร์กแล้วแช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนด นำขวดก้นกลมขึ้นมา แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ทำการตกตะกอนพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยหยดของเหลวจากขวดก้นกลมใส่ลงในบีกเกอร์เมทานอล ปริมาตร 600 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ พร้อมทั้งปั่นกวนอยู่ตลอดเวลา
6. กรองตะกอนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศล้างตะกอนด้วยเมทานอล แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บดด้วยโกร่งบดสารจนได้อนุภาคที่ละเอียด
7. ทำการคัดขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช
8. วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคเจลเพอเมชันโครมาโตกราฟี (Gel permeation chromatography, GPC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การเตรียมซีเมนต์ระหว่างแคลเซียมซิติเกตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ในการเตรียมซีเมนต์เพสต์ที่มีองค์ประกอบดังนี้

วิธภาคของเหลว

- มอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตที่สกัดด้วยขี้ผึ้งแล้ว (MMA)

วิธภาคของแข็ง

- พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)
- แคลเซียมซิติเกต (CS)
- เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) 2.5 และ 5% โดยน้ำหนัก เทียบกับวิธภาคของเหลว
- เบนโซฟีโนน (BZP) 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก เทียบกับวิธภาคของเหลว

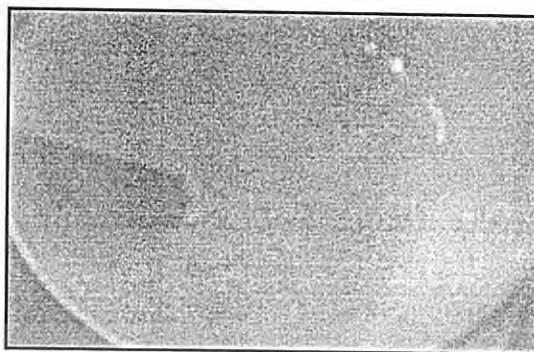
#### 3.6.1 การผสมซีเมนต์เพสต์

1. ชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.1
2. ละลายเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) ลงในมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต (MMA) ก่อน จากนั้นจึงละลายเบนโซฟีโนน (BZP) โดยสารทั้งหมดต้องละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ผสมแคลเซียมซิติเกตและพอลิเมทิลเมทาคริเลตให้เข้ากันมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ
4. ผสมสิ่งที่ได้จากข้อ 2 กับ ข้อ 3 ให้เข้ากันให้ทุกส่วน ในชามระเหย

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนองค์ประกอบของซีเมนต์เพสต์

องค์ประกอบ	สูตรที่ 1 (กรัม)	สูตรที่ 2 (กรัม)
MMA	0.7000	0.7000
PMMA	0.2850	0.2510
CS	0.7000	0.7000
BPO	0.0175	0.0350
BZP	0.0070	0.0140

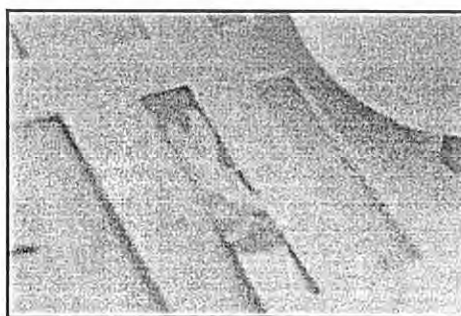
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงภาพการผสมซีเมนต์เพสต์

### 3.6.2 การขึ้นรูปและการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

1. นำตัวอย่างที่ผสมสูตรแล้ว ใส่ในแม่แบบซิลิโคน ขึ้นรูปตัวอย่างให้มีความหนา 3 ลักษณะ ได้แก่ 1 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร และแผ่นฟิล์ม
2. นำมาฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (PHILIPS, Black light Blue 160 W) โดยใช้กล่องทึบแสงใน สภาวะบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิห้อง
3. ปรับระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน และระยะเวลาในการฉายแสงตามตารางที่ 3.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ทดสอบการแห้งผิวทันทีหลังจากฉายแสงโดยใช้ปลายนิ้วสัมผัสเบาๆบนซีเมนต์เพสต์ แล้วรืบนำปลายนิ้วนั้นไปแตะลงบนกระจกใสที่สะอาด (ASTM D1650-91) ถ้าไม่ปรากฏรอยบนกระจกแสดงว่าเกิดการแห้งผิวแล้ว
4. นำชิ้นงานที่ผ่านการฉายแสงแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งแข็งตัว (dry-hard) ตรวจสอบการแข็งตัวโดยใช้นิ้วหัวแม่มือกดลงบนซีเมนต์เพสต์ ออกแรงให้มากที่สุด กดลงตรงๆ โดยปราศจากการบิดนิ้ว (ASTM D1650-91) เมื่อแข็งตัวสมบูรณ์จะต้องไม่ปรากฏรอยขึ้นบนซีเมนต์ ทดสอบทุกๆ 15 นาที บันทึกเวลาในการแข็งตัว



รูปที่ 3.4 แสดงภาพการขึ้นรูปซีเมนต์เพสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงภาพการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองสำหรับการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

ระยะเวลาในการฉายแสง	ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน	
	2 เซนติเมตร	4 เซนติเมตร
	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)
30 วินาที	1	1
	0.5	0.5
	ฟิล์ม	ฟิล์ม
60 วินาที	1	1
	0.5	0.5
	ฟิล์ม	ฟิล์ม

### 3.7 การวัดอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์

1. วัดอุณหภูมิใต้ซีเมนต์โดยติดสายวัดอุณหภูมิ ( $T_1$ ) กับแม่แบบซิลิโคนก่อน จากนั้นจึงบรรจุตัวอย่างที่ผสมสูตรแล้วใส่ลงในแม่แบบ แล้วนำสายวัดอุณหภูมิ ( $T_2$ ) วัดอุณหภูมิบริเวณนอกชิ้นงาน โดยติดอยู่บริเวณแม่แบบซิลิโคน เริ่มบันทึกอุณหภูมิก่อนการฉายแสง ทำการบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 5 วินาที วัดอุณหภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิที่ได้คงที่
2. ทำการทดลองอีกครั้ง โดยเปลี่ยนการวัดอุณหภูมิจากใต้ซีเมนต์เป็นวัดอุณหภูมิที่ผิวซีเมนต์( $T_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

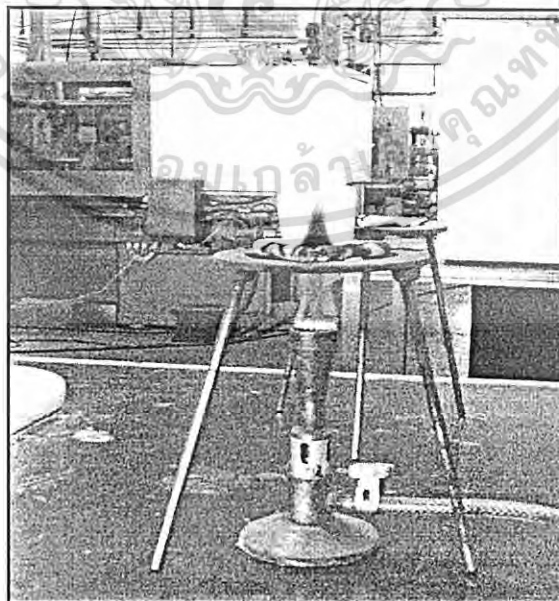
### 3.8 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์

#### 3.8.1 การหาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลือ

1. ทำการหาปริมาณมอนอเมอร์ที่คงเหลือด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  โดยใช้ไดคลอโรโรมีเทน แชนด์ว อย่างเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการกรองเพื่อกำจัดองค์ประกอบที่เป็น สารอนินทรีย์ออก เก็บส่วนที่เป็นของเหลวไว้ในชามระเหย และระเหยตัวทำละลายที่ อุณหภูมิห้อง
2. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$

#### 3.8.2 การวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์

1. นำครุชเบิลไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่ อุณหภูมิห้องในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชเบิล บันทึกน้ำหนักเป็นค่า  $W_1$
2. นำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปในข้อ 3.6.2 ใส่ลงในครุชเบิล ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นค่า  $W_2$  แล้วนำไปเผาด้วยตะเกียงเบนเสนจนหมดควัน
3. นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็น จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นค่า  $W_3$



รูปที่ 3.6 ภาพการเผาชิ้นงานซีเมนต์เพสต์เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบในซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron microscope, SEM)

1. ตัดตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูป ขนาด 5x5 มิลลิเมตร แล้วนำไปเคลือบด้วยทอง (Au)
2. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM

### 3.8.4 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

1. นำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปมาแช่ในสารละลายเตตระไฮโดรฟูราน เป็นเวลา 7 วัน
2. กรององค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ออก เก็บส่วนที่เป็นของเหลวไว้ในขามระเหย และระเหยตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง
3. ชั่งน้ำหนักส่วนที่ได้จากการระเหย 15 มิลลิกรัม ละลายในสารละลายเตตระไฮโดรฟูราน 5 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมซิลิเกต (CS) ที่สังเคราะห์ได้

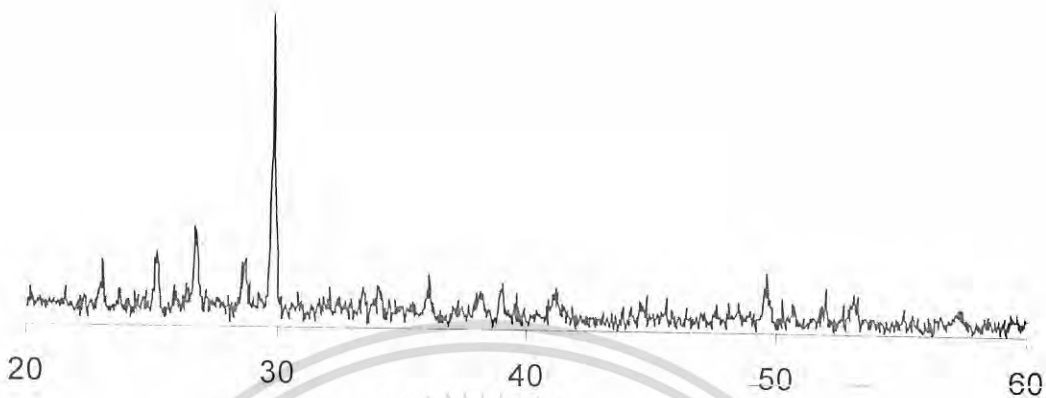
การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์แคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้จากวิธีตกตะกอนร่วม ด้วยเทคนิค XRF เพื่อหาค่าประกอบทางเคมี พบว่า แคลเซียมซิลิเกต (CS) ที่สังเคราะห์ได้มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมซิลิเกตต่อซิลิกา (Ca : Si) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี ของ CS ที่สังเคราะห์ได้

สารตัวอย่างที่	CaO%wt	SiO <sub>2</sub> %wt	อัตราส่วนโดยโมล Ca : Si
1	51.80	44.90	1.24
2	51.20	45.60	1.20
3	50.50	46.20	1.17
เฉลี่ย	51.17	45.57	1.20
ค่าทางทฤษฎี	48.28	51.72	1.00

จากผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ CS พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ Ca: Si มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.20 ซึ่งมากกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อย แต่เมื่อนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบพีกสำคัญที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 23.12, 25.29, 26.81, 28.88, 29.95, 36.24, 39.02, 41.25, 52.97, 53.16 และ 57.44 องศา (ภาคผนวก ก) ซึ่งเป็นพีกของ CS ที่มีวัฏภาคองค์ประกอบเป็น Wollastonite ชนิดเบต้า ( $\text{CaSiO}_3$ ) มีโครงสร้างผลึกแบบเป็นไตรคลินิก แสดงดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของรังสี CS ที่สังเคราะห์ได้ ภายหลังจากแคลไซน์ที่  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมทิลเมทาคริลेट (PMMA) ที่สังเคราะห์ได้

PMMA ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย เมื่อนำไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC (ภาคผนวก ข รูป ข-1) จากผลการวิเคราะห์ พบว่า PMMA มี  $M_n$   $M_w$  และ MWD เท่ากับ 35,730 กรัม/โมล 83,345 กรัม/โมล และ 2.34 ตามลำดับ

#### 4.3 ซีเมนต์ CS/PMMA

##### 4.3.1 การทดสอบเวลาในการแห้งผิว (set-to-touch time)

เมื่อนำซีเมนต์เพสต์สูตรที่ 1 ซึ่งมีองค์ประกอบ คือ CS = 0.7000 กรัม PMMA = 0.2850 กรัม MMA = 0.7000 กรัม BPO = 0.0175 กรัม และ BZP = 0.0070 กรัม และ สูตรที่ 2 ซึ่งมีองค์ประกอบ คือ CS = 0.7000 กรัม PMMA = 0.2510 กรัม MMA = 0.7000 กรัม BPO = 0.0350 กรัม และ BZP = 0.0140 กรัม มาผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต และทดสอบการแห้งผิว ตัวอย่างเวลาที่ใช้ในการแห้งผิวแสดงได้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาในการแห้งผิวของซีเมนต์เพสต์ สูตรที่ 1

(CS = 0.7000 g, PMMA = 0.2850 g, MMA = 0.7000 g, BPO = 0.0175 g, BZP = 0.0070 g)

ระยะเวลาในการฉายแสง (s)	ความหนาตัวอย่าง (mm)	ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน	
		2 cm	4 cm
		เวลาในการแห้งผิว (s)	เวลาในการแห้งผิว (s)
30	1	แห้งทันทีหลังฉายแสง	แห้งทันทีหลังฉายแสง
	0.5	แห้งทันทีหลังฉายแสง	แห้งทันทีหลังฉายแสง
	film	แห้งทันทีหลังฉายแสง	แห้งทันทีหลังฉายแสง
60	1	แห้งทันทีหลังฉายแสง	แห้งทันทีหลังฉายแสง
	0.5	แห้งทันทีหลังฉายแสง	แห้งทันทีหลังฉายแสง
	film	แห้งทันทีหลังฉายแสง	แห้งทันทีหลังฉายแสง

จากผลการทดลองพบว่า ทุกสูตร เมื่อฉายแสงที่ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน 4 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 วินาที พบว่า ซีเมนต์เพสต์เกิดการแห้งผิวเรียบร้อยแล้ว แสดงว่า เมื่อใช้ระยะห่างที่น้อยลง 2 เซนติเมตร หรือใช้ระยะเวลาในการฉายแสงที่นานขึ้น 60 วินาที ซีเมนต์เพสต์ควรจะเกิดการแห้งผิวภายในเวลา 30 วินาทีเช่นเดียวกัน และอาจมีความเป็นไปได้ว่าเวลาในการแห้งผิวมีค่าน้อยกว่า 30 วินาที ส่วนสูตรที่ 2 ให้ผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกัน

#### 4.3.2 การทดสอบเวลาในการแข็งตัว (dry-hard time)

เมื่อนำซีเมนต์เพสต์สูตรที่ 1 และ 2 มาผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต และทดสอบการแข็งตัว บันทึกค่าเวลาในการแข็งตัว ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 (ภาคผนวก ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ สูตรที่ 1

(CS = 0.7000 g, PMMA = 0.2850 g, MMA = 0.7000 g, BPO = 0.0175 g, BZP = 0.0070 g)

ระยะเวลา ในการฉาย แสง (s)	ความหนา ตัวอย่าง (mm)	ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน	
		2 cm	4 cm
		เวลาเฉลี่ย (min)	เวลาเฉลี่ย (min)
30	1	360	375
	0.5	184	188
	film	17	20
60	1	349	356
	0.5	173	176
	film	17	17

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ สูตรที่ 2

(CS = 0.7000 g, PMMA = 0.2510 g, MMA = 0.7000 g, BPO = 0.0350 g, BZP = 0.0140 g)

ระยะเวลา ในการฉาย แสง (s)	ความหนา ตัวอย่าง (mm)	ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน	
		2 cm	4 cm
		เวลาเฉลี่ย (min)	เวลาเฉลี่ย (min)
30	1	356	375
	0.5	184	191
	film	19	20
60	1	349	353
	0.5	173	176
	film	16	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลของระยะเวลาในการฉายแสงที่มีต่อการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์

สูตรเดียวกัน ระยะเวลาในการฉายแสงต่างกัน แต่ใช้ระยะเวลาในการฉายแสงต่างกัน จะได้ค่าเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ต่างกัน คือ เมื่อใช้ระยะเวลาในการฉายแสงมากกว่า ทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยกว่า เช่น การเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 4.3 ที่ระยะห่างคงที่ 2 เซนติเมตร ชี้นงานความหนา 1 มิลลิเมตร เมื่อใช้เวลาในการฉายแสง 30 วินาที จะใช้เวลาเฉลี่ยในการแข็งตัว 360 นาที แต่เมื่อใช้เวลาในการฉายแสง 60 วินาที จะใช้เวลาเฉลี่ยในการแข็งตัว 349 นาที

### ผลของระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์

สูตรเดียวกัน ระยะเวลาในการฉายแสงเท่ากัน แต่ใช้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคนต่างกัน จะได้ค่าเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ต่างกัน คือ เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคนน้อยกว่า ทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยกว่า เช่น การเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 4.3 ที่ระยะเวลาในการฉายแสงคงที่ 30 วินาที ชี้นงานความหนา 1 มิลลิเมตร เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน 4 เซนติเมตร จะใช้เวลาเฉลี่ยในการแข็งตัว 375 นาที แต่เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคน 2 เซนติเมตร จะใช้เวลาเฉลี่ยในการแข็งตัว 360 นาที

### ผลของความหนาที่มีต่อการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์

สูตรเดียวกัน ระยะเวลาในการฉายแสงเท่ากัน ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคนเท่ากัน แต่ความหนาของชี้นงานต่างกัน จะได้ค่าเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ต่างกัน คือ เมื่อความหนาของชี้นงานน้อย จะใช้เวลาในการแข็งตัวน้อย แต่เมื่อความหนาของชี้นงานมาก จะใช้เวลาในการแข็งตัวมาก เช่น การเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 4.3 ที่ระยะเวลาในการฉายแสงคงที่ 30 วินาที ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคนคงที่ 2 เซนติเมตร เมื่อความหนาของชี้นงาน 1 มิลลิเมตร จะใช้เวลาในการแข็งตัว 360 นาที แต่เมื่อความหนาของชี้นงาน 0.5 มิลลิเมตร จะใช้เวลาในการแข็งตัว 184 นาที

### ผลของปริมาณ BZP และ BPO ที่มีต่อการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์

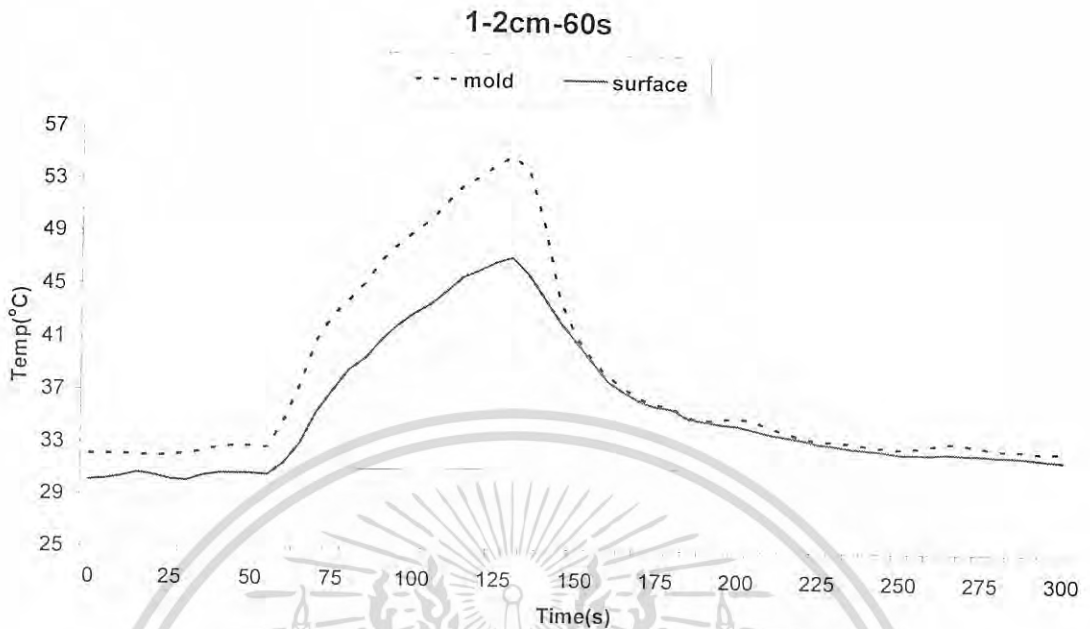
ระยะเวลาในการฉายแสงเท่ากัน ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแม่แบบซิลิโคนเท่ากัน แต่สูตรต่างกัน คือ สูตรที่ 1 ใช้ BZP 1% และ BPO 2.5% ของน้ำหนัก MMA ส่วนสูตรที่ 2 ใช้ BZP 2% และ BPO 5% ของน้ำหนัก MMA จะได้ค่าเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ไม่แตกต่างกัน เช่น การเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 4.3 กับ 4.4 ที่ระยะเวลาในการฉายแสงคงที่ 60 วินาที ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงคงที่ 2 เซนติเมตร ชิ้นงานความหนา 1 มิลลิเมตร จะใช้เวลาเฉลี่ยในการแข็งตัว 349 นาทีเท่ากัน

#### 4.3.3 ผลการทดสอบการคายความร้อนของซีเมนต์

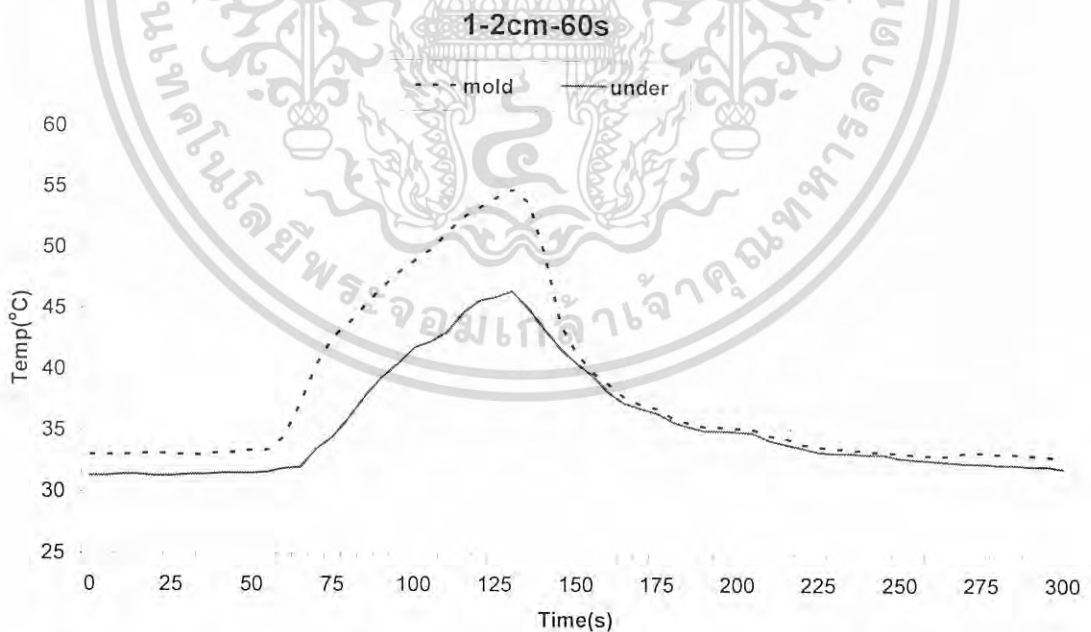
จากการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ได้ผลค่าอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.2 -4.5

เมื่อเริ่มฉายแสงอุณหภูมิของซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยอุณหภูมิในส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับชิ้นงานจะมีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนจากหลอด UV เพียงอย่างเดียว แต่อุณหภูมิในส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงาน จะสูงขึ้นเนื่องจากการคายความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA ซึ่งจะเกิดการคายความร้อนที่ละน้อยอย่างช้าๆ และความร้อนจากหลอด UV ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิจากจุดที่ไม่สัมผัสชิ้นงานกับจุดที่สัมผัสกับชิ้นงาน พบว่าจุดที่สัมผัสกับชิ้นงานมีอุณหภูมิต่ำกว่าเนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนของ MMA

เมื่อหยุดฉายแสงพบว่าอุณหภูมิในส่วนที่ไม่สัมผัสกับชิ้นงานจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิในส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงานจะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 ให้ผลในการทำงานเหมือนกัน แต่ในสูตรที่ 2 การคายความร้อนของซีเมนต์มีค่าสูงกว่า เนื่องจากปริมาณของ BZP และ BPO มากกว่าสูตรที่ 1 เป็นสองเท่า

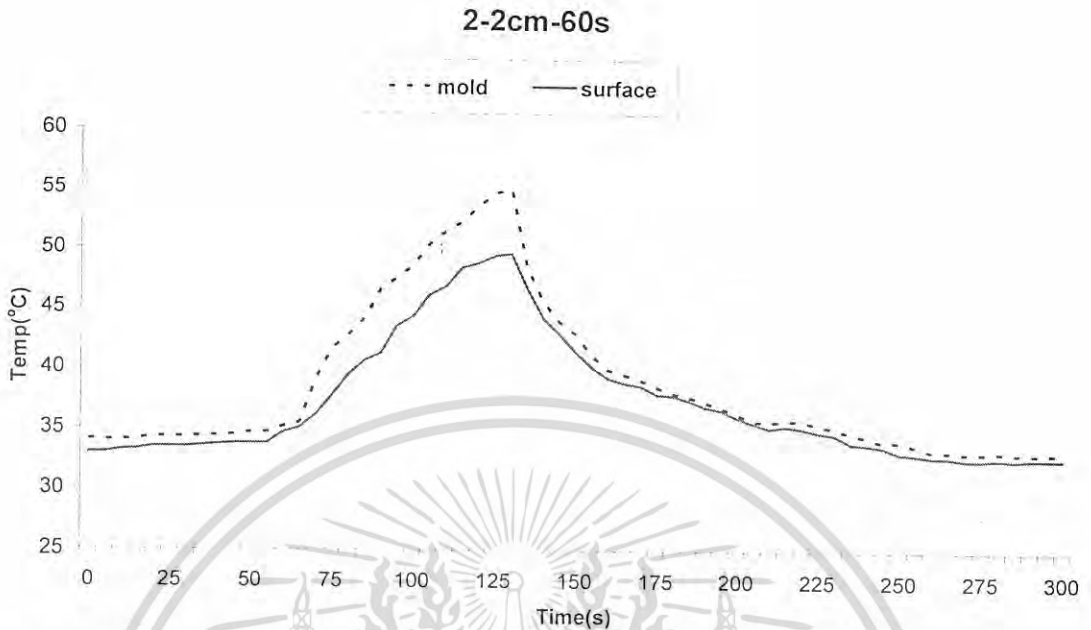


รูปที่ 4.2 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 1 โดย mold คืออุณหภูมิบริเวณนอก  
ชั้นงาน surface คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนของซีเมนต์

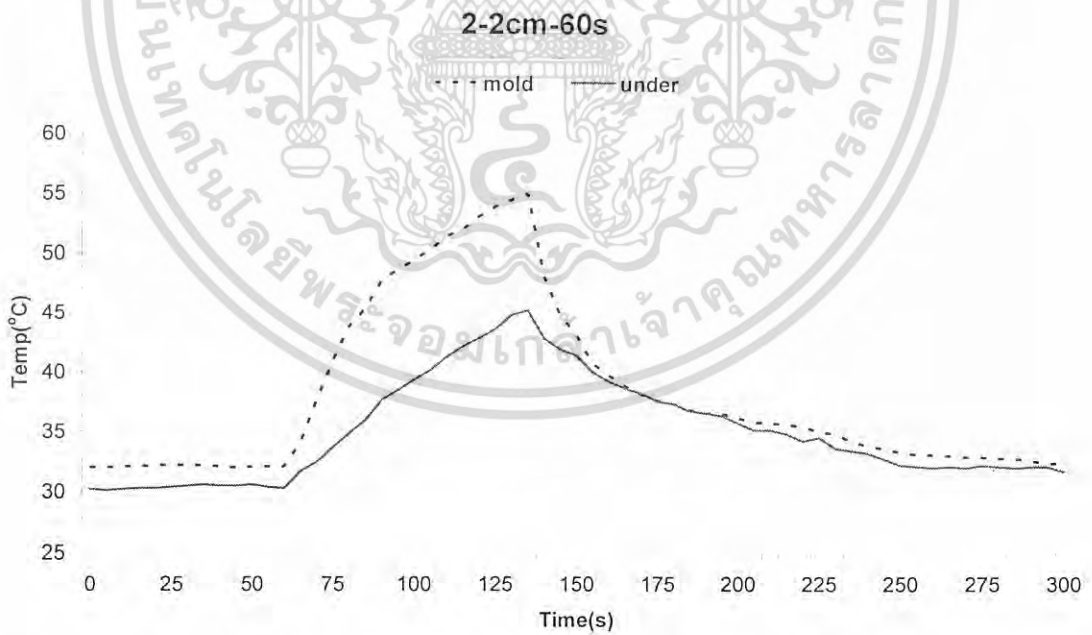


รูปที่ 4.3 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 2 โดย mold คืออุณหภูมิบริเวณนอก  
ชั้นงาน under คืออุณหภูมิใต้ซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 1 โดย mold คืออุณหภูมิบริเวณนอกชิ้นงาน surface คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนของซีเมนต์



รูปที่ 4.5 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์สูตรที่ 2 โดย mold คืออุณหภูมิบริเวณนอกชิ้นงาน under คืออุณหภูมิใต้ซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์

เมื่อนำตัวอย่างซีเมนต์ที่ขึ้นรูปได้จำนวน 12 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยสูตรที่ 1 ที่เวลาในการฉายแสง 30 วินาที ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 2 เซนติเมตร (1-30s-2cm) จำนวน 3 ตัวอย่าง ที่เวลาในการฉายแสง 30 วินาที ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 4 เซนติเมตร (1-30s-4cm) จำนวน 3 ตัวอย่าง ที่เวลาในการฉายแสง 60 วินาที ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 2 เซนติเมตร (1-60s-2cm) จำนวน 3 ตัวอย่าง และสูตรที่ 2 ที่เวลาในการฉายแสง 60 วินาที ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 2 เซนติเมตร (2-60s-2cm) จำนวน 3 ตัวอย่าง ไปเผาเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ PMMA และ CS ที่มีอยู่จริงในก้อนซีเมนต์ เปรียบเทียบกับปริมาณ PMMA และ CS ตอนเริ่มต้น โดยทำการบันทึกค่าน้ำหนัก ดังนี้

$W_1$  คือ น้ำหนักครุชชีเบล

$W_2$  คือ น้ำหนักครุชชีเบลรวมกับชิ้นงานตัวอย่าง

$W_3$  คือ น้ำหนักครุชชีเบลรวมกับชิ้นงานตัวอย่างที่เหลือหลังการเผาที่  $750^{\circ}\text{C}$

ค่าที่บันทึกได้จากการทดลองสามารถแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 บันทึกน้ำหนักที่ซึ่งได้จากการทดลอง

สูตร	ความหนา ตัวอย่าง (mm)	น้ำหนัก (g)		
		$W_1$	$W_2$	$W_3$
1-30s-2cm	1	35.1978	35.7093	35.4513
1-30s-2cm	0.5	33.8302	34.2056	34.0198
1-30s-2cm	film	30.4882	30.8398	30.6694
1-30s-4cm	1	31.2468	31.5443	31.3944
1-30s-4cm	0.5	34.4645	34.7208	34.5861
1-30s-4cm	film	33.7563	34.1717	33.9682
1-60s-2cm	1	32.3166	32.5479	32.4267
1-60s-2cm	0.5	34.3827	34.7893	34.5808
1-60s-2cm	film	29.4130	29.6435	29.5306
2-60s-2cm	1	23.3312	23.8019	23.5544
2-60s-2cm	0.5	29.6173	30.0851	29.8396
2-60s-2cm	film	31.9961	32.3140	32.1473

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 750°C เป็นสารอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย พอลิเมทิลเมทาคริเลต เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ เบนโซฟีโนน และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ ส่วนสารที่เหลือหลังการเผาเป็นสารอนินทรีย์ คือ แคลเซียมซัลไฟด์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง} = w_2 - w_1$$

$$\text{น้ำหนักของ PMMA ที่ได้จาก การเผา} = w_2 - w_3$$

$$\% \text{PMMA ที่ได้จาก การเผา} = (w_2 - w_3 / w_2 - w_1) \times 100$$

$$\text{น้ำหนักแคลเซียมซัลไฟด์ที่ได้จากการเผา} = (w_3 - w_1 / w_2 - w_1) \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ : สูตร 1-30s-2cm

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง} &= 35.7093 - 35.1978 \\ &= 0.5115 \text{ g} \\ \text{น้ำหนักของ PMMA ที่ได้จาก การเผา} &= 35.7093 - 35.4513 \\ &= 0.2580 \text{ g} \\ \% \text{PMMA ที่ได้จาก การเผา} &= (0.2580 / 0.5115) \times 100 \\ &= 50.44 \% \\ \text{น้ำหนักแคลเซียมซัลไฟด์ที่ได้จากการเผา} &= (0.2535 / 0.5115) \times 100 \\ &= 49.56 \% \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบในสูตรที่เหลือนั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีเดียวกันกับวิธีข้างต้นนี้ ซึ่งผลจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์

สูตร	ความหนา ตัวอย่าง (mm)	ปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์ (%wt)			
		PMMA (เริ่มต้น)*	PMMA (เผา)	CS (เริ่มต้น)	CS (เผา)
1-30s-2cm	1	58.47	50.44	41.53	49.56
1-30s-2cm	0.5	58.46	49.49	41.54	50.51
1-30s-2cm	film	58.46	48.46	41.54	51.54
1-30s-4cm	1	58.44	50.38	41.56	49.62
1-30s-4cm	0.5	58.45	52.55	41.55	47.55
1-30s-4cm	film	58.46	48.99	41.54	51.01
1-60s-2cm	1	58.45	52.39	41.55	47.61
1-60s-2cm	0.5	58.45	51.30	41.55	48.70
1-60s-2cm	film	58.46	48.98	41.54	51.02
2-60s-2cm	1	57.58	52.58	42.42	47.42
2-60s-2cm	0.5	57.60	52.47	42.40	47.53
2-60s-2cm	film	57.60	52.43	42.40	47.57

หมายเหตุ PMMA (เริ่มต้น)\* คือ น้ำหนัก PMMA รวมกับ MMA ตอนเริ่มต้น

จากตารางที่ 4.6 พบว่าปริมาณองค์ประกอบในก้อนซีเมนต์ที่คำนวณได้จากการเผาเมื่อเปรียบเทียบกับตอนเริ่มต้น มีค่าใกล้เคียงกัน ต่างกันประมาณ 6-10% ซึ่งอาจเกิดเนื่องจาก MMA ระเหยออกไปในระหว่างขั้นตอนการผสมขึ้นรูป และในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งกระบวนการทั้งหมดทำในระบบเปิด

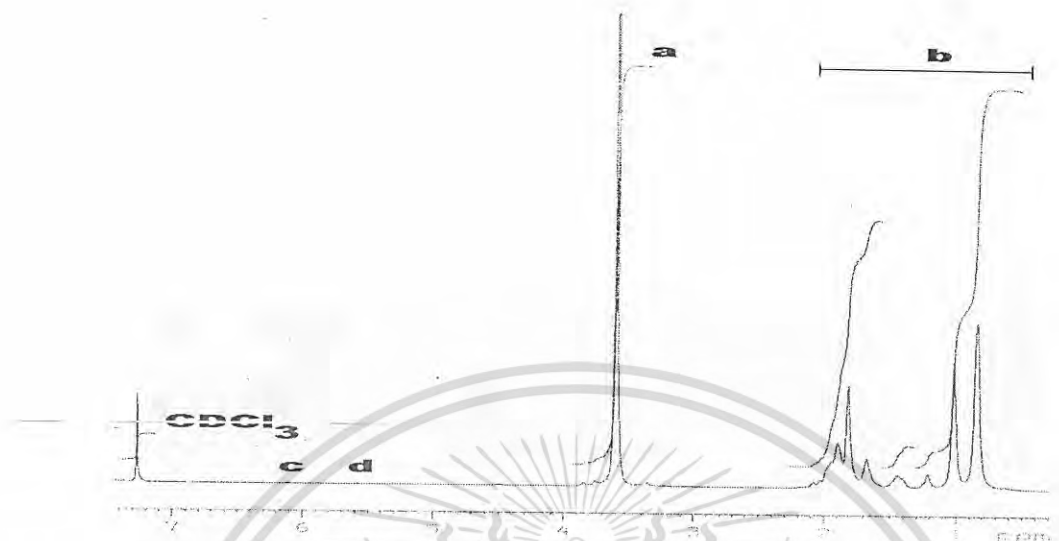
#### 4.3.5 ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค NMR

เมื่อนำซีเมนต์ที่ผสมได้มาตรวจวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  เพื่อวิเคราะห์ปริมาณมอนอเมอร์ที่เหลืออยู่ พบพิกัดดังนี้

$^1\text{H-NMR}$  ( $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$ 0.7-2.1 ( $-\text{CH}_2-$ ,  $-\text{CH}_3$ ) ppm  $\delta$ 3.65 (3H, br,  $-\text{OCH}_3$ ) ppm  $\delta$ 6.11 ( $\text{H}_a$ ) และ

$\delta$ 5.55 ( $\text{H}_b$ ) ( $\begin{array}{c} \text{H}_c \\ | \\ \text{C}=\text{C} \\ | \\ \text{H}_d \end{array}$ ) ppm (รูปที่ 4.6, ภาคผนวก ง-8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สเปกตรัม  $^1\text{H-NMR}$  ของ พอลิเมทิลเมทาครีเลตในสูตร 1-60s-2cm ที่ความหนา 0.5 mm

ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  พบสัญญาณที่สำคัญ 2 สัญญาณ คือ สัญญาณที่  $\delta 3.65$  ppm (สัญญาณ a) เป็นสัญญาณโปรตอนจากหมู่เมทิล ( $\alpha$ -Methyl) ที่ติดกับ ester-oxygen ของ PMMA ซึ่งประกอบด้วย PMMA 2 ส่วน ได้แก่ PMMA จากสารตั้งต้นในการเตรียมซีเมนต์ร่วมกับ PMMA ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA สัญญาณในช่วง  $\delta 0.7-2.1$  ppm (สัญญาณ b) เป็นสัญญาณที่เกิดจาก 2 ส่วนหลัก ได้แก่ สัญญาณโปรตอนจาก อัลฟา-เมทิล ( $\alpha$ -Methyl) ที่ติดกับคาร์บอนของสายโซ่หลักในโครงสร้าง PMMA และสัญญาณโปรตอนจากหมู่เมทิลีน (Methylene group) ในสายโซ่หลักของ PMMA ส่วนปริมาณเมอนอเมอร์คงเหลือสามารถพบสัญญาณสำคัญ 2 สัญญาณ คือ สัญญาณที่  $\delta 5.55$  ppm (สัญญาณ c) เป็นสัญญาณโปรตอนจาก อัลคีน-โปรตอนตำแหน่ง c ( $\text{H}_c$ ) สัญญาณที่  $\delta 6.11$  ppm (สัญญาณ d) เป็นสัญญาณโปรตอนจาก อัลคีน-โปรตอนตำแหน่ง d ( $\text{H}_d$ ) ซึ่งจากสเปกตรัมของ  $^1\text{H-NMR}$  พบสัญญาณ c และ d เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า MMA เกือบทั้งหมดเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

#### 4.3.6 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล PMMA ในซีเมนต์ PMMA/CS

##### ด้วยเทคนิค GPC

เมื่อนำซีเมนต์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในซีเมนต์ พบว่าค่า  $M_n$  อยู่ในช่วง 45,000-53,000 กรัม/โมล  $M_w$  อยู่ในช่วง 95,000-121,000 กรัม/โมล และ MWD อยู่ในช่วง 2.0-2.3 (ภาคผนวก ข)

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

##### การคำนวณ

ตัวอย่าง จากสูตรที่ 1 ตัวอย่างที่ 1-30s-2cm ความหนา 1 mm

องค์ประกอบของ MMA และ PMMA<sub>1</sub> ในสารตั้งต้นเท่ากับ 0.7000 และ 0.2850 กรัม ตามลำดับ ดังนั้น PMMA ทั้งหมดเกิดจาก PMMA<sub>1</sub> และ MMA ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (PMMA<sub>2</sub>) มีค่าเท่ากับ 0.985 กรัม โดยสามารถคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของ MMA ได้ดังนี้ กำหนดให้  $M_w$ -PMMA<sub>1</sub> คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA เริ่มต้น มีค่า 83,345 กรัม/โมล

$M_w$ -PMMA<sub>2</sub> คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA

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

$$103,600 = (83,345 \times \frac{0.285}{0.985}) + (X \times \frac{0.700}{0.985})$$

$$X = 111,800 \quad \text{กรัม/โมล}$$

ซึ่ง X คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่เกิดจาก MMA พอลิเมอไรเซชันไปเป็น PMMA

สำหรับการคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่ได้จากการพอลิเมอไรเซชันของ MMA ในสูตรที่เหลือนั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีเดียวกับกับวิธีข้างต้นนี้ ซึ่งผลจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในก้อนซีเมนต์

สูตร	ความหนา ตัวอย่าง(mm)	ผลจาก GPC			Mw <sup>a</sup> (จากการพอลิ เมอไรเซชัน)
		Mn	Mw	MWD	
1-30s-2cm	1	45,200	103,600	2.29	111,800
1-30s-2cm	0.5	46,700	97,500	2.09	103,300
1-30s-2cm	film	46,500	95,700	2.06	100,600
1-30s-4cm	1	45,800	99,000	2.16	105,300
1-30s-4cm	0.5	49,800	108,800	2.19	119,200
1-30s-4cm	film	47,600	97,300	2.05	103,000
1-60s-2cm	1	46,900	110,000	2.34	120,800
1-60s-2cm	0.5	47,300	104,700	2.21	113,400
1-60s-2cm	film	47,300	94,800	2.00	99,400
2-60s-2cm	1	52,700	121,600	2.31	135,300
2-60s-2cm	0.5	47,600	102,200	2.15	108,900
2-60s-2cm	film	48,300	100,200	2.07	106,200
PMMA <sup>b</sup>	-	35,700	83,345	2.33	-

หมายเหตุ Mw<sup>a</sup> คือ น้ำหนักโมเลกุลที่ประเมินมาจากค่า Mw ที่ได้จากการวัดจากเทคนิค GPC

เฉพาะในส่วนที่เกิดการพอลิเมอไรเซชันด้วยการฉายแสง

PMMA<sup>b</sup> คือ น้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคสารละลาย

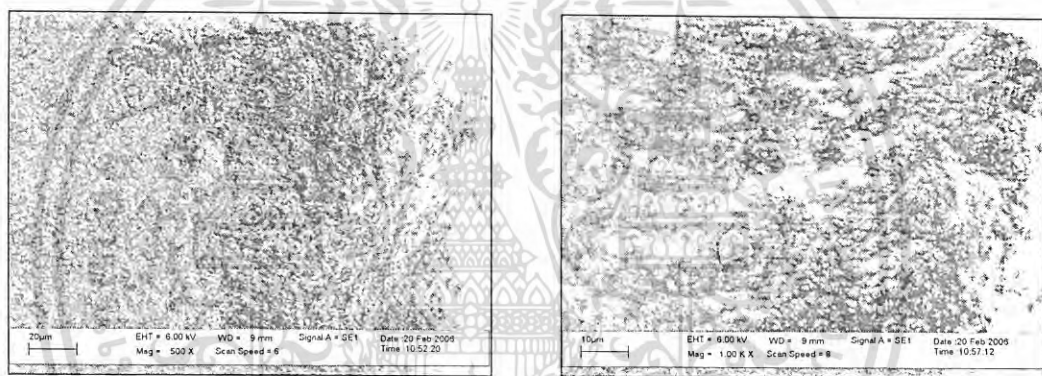
จากผลการคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในซีเมนต์ พบว่าน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้ ดังข้อ 4.2 แสดงให้เห็นว่า MMA เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันไปเป็น PMMA จริง นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ในก้อนซีเมนต์มีค่ามากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในก้อนซีเมนต์ดำเนินไป ระบบจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นจะทำให้การสิ้นสุดของปฏิกิริยาช้าลง โดยสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีปลายว่องไวจะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ไปเรื่อยๆก่อนที่จะเข้าสู่การสิ้นสุดปฏิกิริยา

ส่งผลให้ PMMA ในก้อนซีเมนต์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าน้ำหนักของ PMMA เริ่มต้นที่ได้จากการสังเคราะห์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

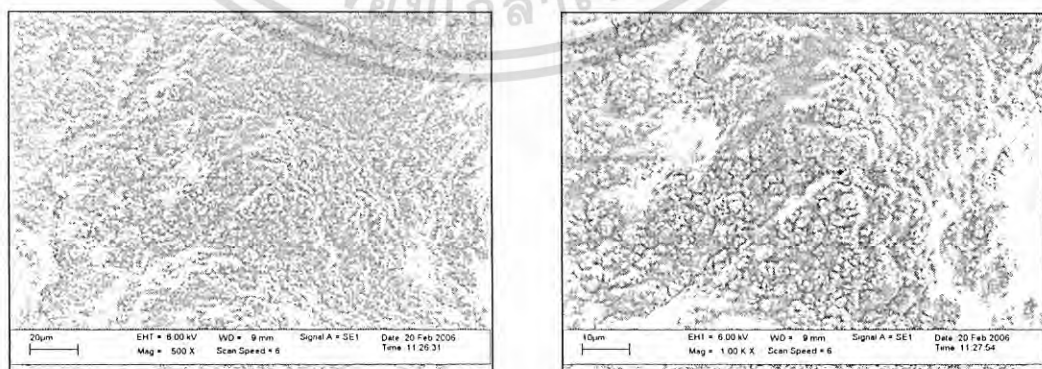
ตั้งเคราะห์ โดยระยะทางในการฉายแสง ระยะเวลาในการฉายแสง ความหนาของชิ้นงาน และ ปริมาณของ BPO และ BZP มีผลให้ความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA แตกต่างเพียง เล็กน้อยเท่านั้น

#### 4.3.7 โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์

ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นว่า PMMA ในสูตรผสมซีเมนต์ทั้งสูตรที่ 1 และ 2 มีปริมาณ แตกต่างกันเล็กน้อย ทำให้ความหนืดของสูตรผสมซีเมนต์ทั้งสองสูตรไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการ กระจายตัวของ CS ใน PMMA ของซีเมนต์ทั้งสองสูตรไม่แตกต่างกันโดยจะเห็นว่า CS กระจาย ตัวอย่างสม่ำเสมอใน PMMA เมทริกซ์ แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 (ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคภายในซีเมนต์สูตรที่ 1 (PMMA 0.2850 กรัม) ขยาย 500 และ 1000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคภายในซีเมนต์สูตรที่ 2 (PMMA 0.2510 กรัม) ขยาย 500 และ 1000 เท่า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ซีเมนต์แคลเซียมซิติลเกิดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (CS/PMMA) เตรียมได้จากการผสม ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) ตัวกระตุ้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาคิวแสงเบนโซฟีโนน (BZP) ลงในมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลต แล้วจึงผสมลงใน CS และ PMMA โดยมี การปรับเปลี่ยนปริมาณ BPO และ BZP เป็น 1% และ 2% โดยน้ำหนัก MMA จากนั้นฉายแสงอัลตราไวโอเลต เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ MMA ได้ซีเมนต์ที่เซตตัวเป็นของแข็ง ซึ่งมีอนุภาค CS กระจายตัวอยู่ใน PMMA เมทริกซ์
2. จากการศึกษาเวลาในการแห้งผิว (set-to-touch time) และเวลาในการแข็งตัว (dry-hard time) พบว่า ซีเมนต์ทุกสูตรเกิดการแห้งผิวภายในเวลา 30 วินาที ส่วนเวลาในการแข็งตัวของซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงาน ระยะเวลาในการฉายแสง และระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง ส่วนปริมาณของ BPO และ BZP ที่แตกต่างกันระหว่าง 2 สูตรนั้น ไม่ได้ให้ผลที่แตกต่างกันมากนัก
3. เมื่อศึกษาการคายความร้อนของซีเมนต์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน พบว่า การใช้เทคนิคการฉายแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อให้เกิดปฏิกิริยานี้ มีการคายความร้อนที่ต่ำหรือค่อยๆ คายความร้อนไปที่ละน้อย โดยเมื่อปริมาณ BZP และ BPO มากขึ้นของสูตรที่ 2 จะเกิดการคายความร้อนเพิ่มขึ้น
4. เมื่อนำ PMMA ในก้อนซีเมนต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC พบว่า มีค่า  $M_n$   $M_w$  และ MWD อยู่ในช่วง 45,000 - 53,000 กรัม/โมล 95,000 - 120,000 กรัม/โมล และ 2.0 - 2.3 ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดลองเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง เช่น ใช้แหล่งกำเนิดแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible light) เนื่องจากมีพลังงานต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อสายตามนุษย์ และอุปกรณ์หาซื้อง่าย ราคาถูก
2. เปลี่ยนตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นชนิดอื่น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน
3. เปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์เนื่องจาก MMA เป็นพิษต่อร่างกาย
4. ควรมีการทดสอบสมบัติการยึดติดของซีเมนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 2-689

Radiation = 1.540598

Quality : Deleted

Ca Si O <sub>3</sub> / Ca O · Si O <sub>2</sub> Wollastonite / Calcium Silicon Oxide		2 $\theta$	l	h	k	l
		23.022	40	2	0	0
		25.354	40	0	0	2
		26.997	80	-1	0	2
		28.967	40	1	0	2
		30.064	100	-2	2	0
		32.412	20	-1	-2	1
		33.153	30	1	1	2
		35.308	40	3	0	0
		36.496	40	0	2	2
		38.610	60	0	0	3
		39.673	50	-3	2	1
		41.584	70	2	2	1
		43.693	20	3	1	1
		45.068	40	-2	-2	2
		45.790	30	1	-3	2
		47.835	20	4	0	0
		50.079	70	-1	4	0
		50.978	20	-2	-3	1
		52.230	40	0	0	4
		53.547	80	-4	2	2
		57.559	70	1	1	4
		60.459	30	-5	2	1
		61.345	20	-3	4	2
		63.204	70	1	2	4
		64.179	60	-5	0	2
		65.703	20	0	-3	4
		67.307	20	0	3	4
		68.999	70	2	-3	4
		70.785	30	-3	-2	4
		75.374	50	-5	4	2
		77.549	20	0	4	4
		79.079	50	6	-3	1
		82.352	60	-1	0	6
		85.017	40	-2	1	6
<b>Lattice</b> : Anorthic (triclinic)	<b>Mol. weight</b> = 116.16					
<b>S.G.</b> : P-1 (2)	<b>Volume [CD]</b> = 389.98					
<b>a</b> = 7.88000	<b>Alpha</b> = 90.00	<b>Dx</b> = 2.968				
<b>b</b> = 7.27000	<b>Beta</b> = 95.27	<b>Dm</b> = 2.906				
<b>c</b> = 7.03000	<b>Gamma</b> = 103.42					
<b>a/b</b> = 1.08391	<b>Z</b> = 6					
<b>c/b</b> = 0.96699						
DELETED AND REJECTED BY : Delete: Berry parcel of August 6, 1957. COLOR : Colorless OPTICAL DATA : A=1.619, B=1.632, Q=1.634, Sign=, 2V=>40 deg. GENERAL COMMENTS : Transforms 1200 C to pseudowollastonite.						
*Z. Phys. Chem., volume 14, page 425, (1931) primary reference : Ehrenberg. *Archs. Sci. Geneve, unit cell data :						
<b>Radiation</b> : MoK $\alpha$	<b>Filter</b> : Not specified					
<b>Lambda</b> : 0.70900	<b>d-sp</b> : Not given					
<b>SS/FOM</b> : F30= 3(0.0270,412)						

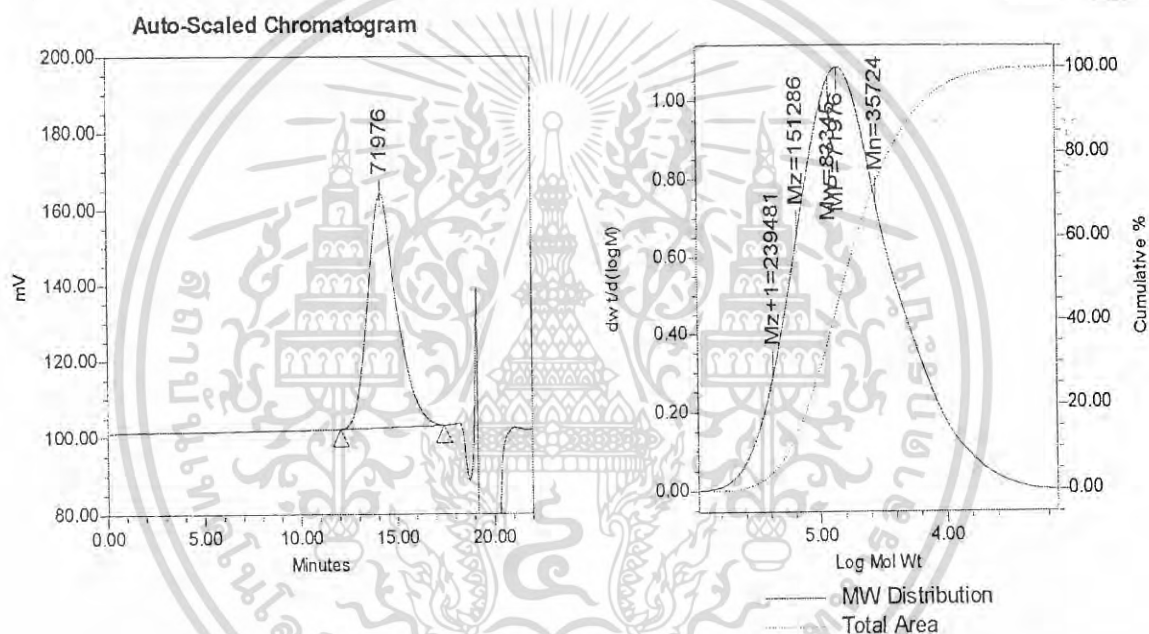
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName	PMMA	Sample Type	Broad Unknown
Vial	1	Date Acquired	2/22/06 10:53:56 AM
Injection	1	Acq Method Set	Y2006_MethR_THF_30C_3
Injection Volume	100.00 ul	Processing Method	Y2006_ProcR_THF_30C_3
Channel	SA71N	Date Processed	2/22/06 1:30:42 PM
Run Time	22.0 Minutes		



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	35724	83345	71976	151286	239481	2.333050

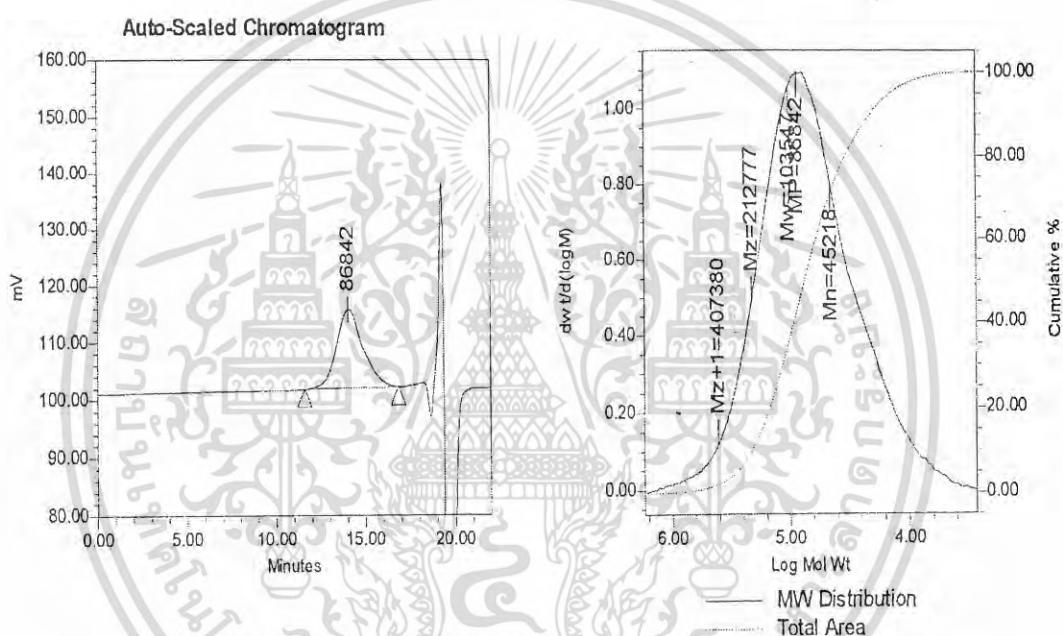
รูปที่ ข-1 โครมาโทแกรมของ PMMA ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName 1.1  
 Vial 2  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 11:19:39 AM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/22/06 1:33:09 PM



Peak Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	45218	103547	86842	212777	407380	2.289947

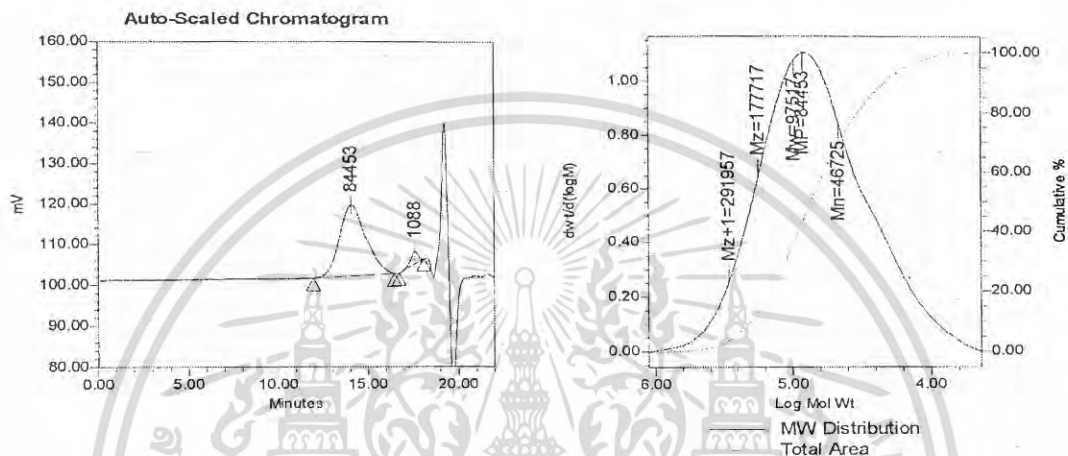
รูปที่ ข-2 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-30s-2cm ที่ความหนา 1 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

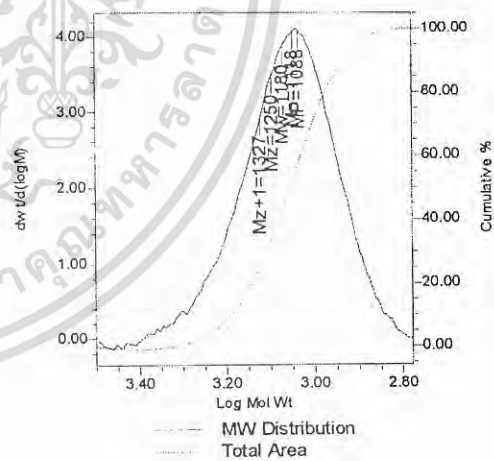
SampleName 1.2  
 Vial 1  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 3:09:49 PM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/23/06 7:51:20 AM



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity	% Area
1	46725	97517	84453	177717	291957	2.067041	95.43
2	1118	1180	1088	1250	1327	1.055630	4.57

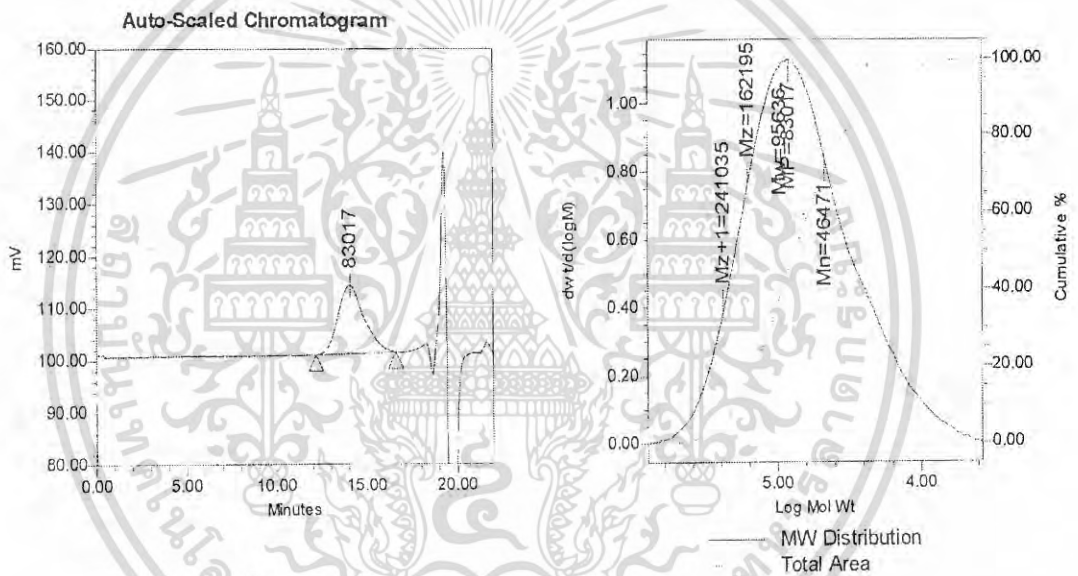


รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-30s-2cm ที่ความหนา 0.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName	1.3	Sample Type	Broad Unknown
Vial	2	Date Acquired	2/22/06 3:35:31 PM
Injection	1	Acq Method Set	Y2006_MethR_THF_30C_3
Injection Volume	100.00 ul	Processing Method	Y2006_ProcR_THF_30C_3
Channel	SATIN	Date Processed	2/23/06 7:51:35 AM
Run Time	22.0 Minutes		



**Peak Results**

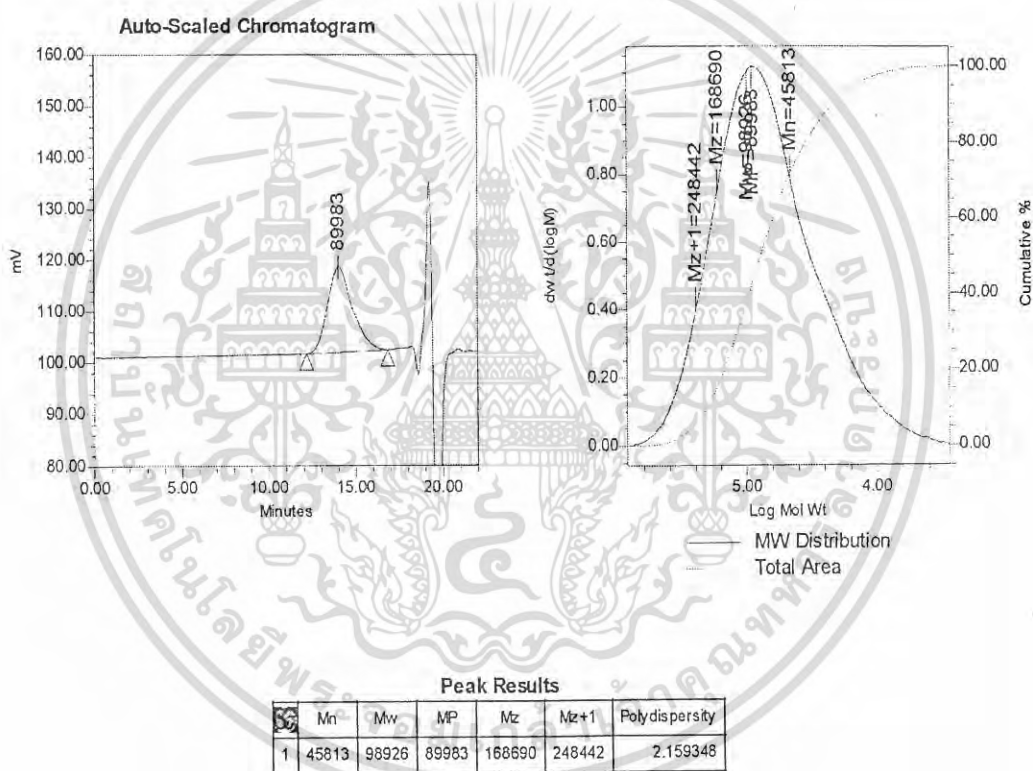
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	46471	95636	83017	162195	241035	2.057973
2						
3						

รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-30s-2cm ที่ความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName	1.4	Sample Type	Broad Unknown
Vial	3	Date Acquired	2/22/06 11:45:21 AM
Injection	1	Acq Method Set	Y2006_MethR_THF_30C_3
Injection Volume	100.00 ul	Processing Method	Y2006_ProcR_THF_30C_3
Channel	SATIN	Date Processed	2/22/06 1:33:28 PM
Run Time	22.0 Minutes		



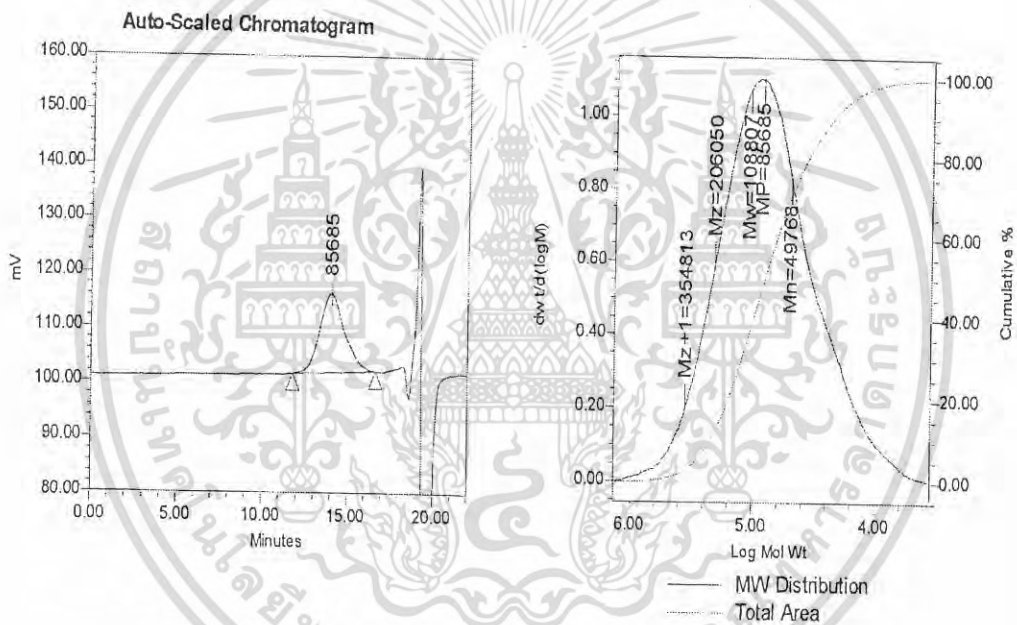
รูปที่ ข-5 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-30s-4cm ที่ความหนา 1 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName 1.5  
 Vial 1  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 12:26:04 PM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/22/06 1:34:21 PM



#### Peak Results

PK	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	49768	108807	85685	206050	354813	2.186281

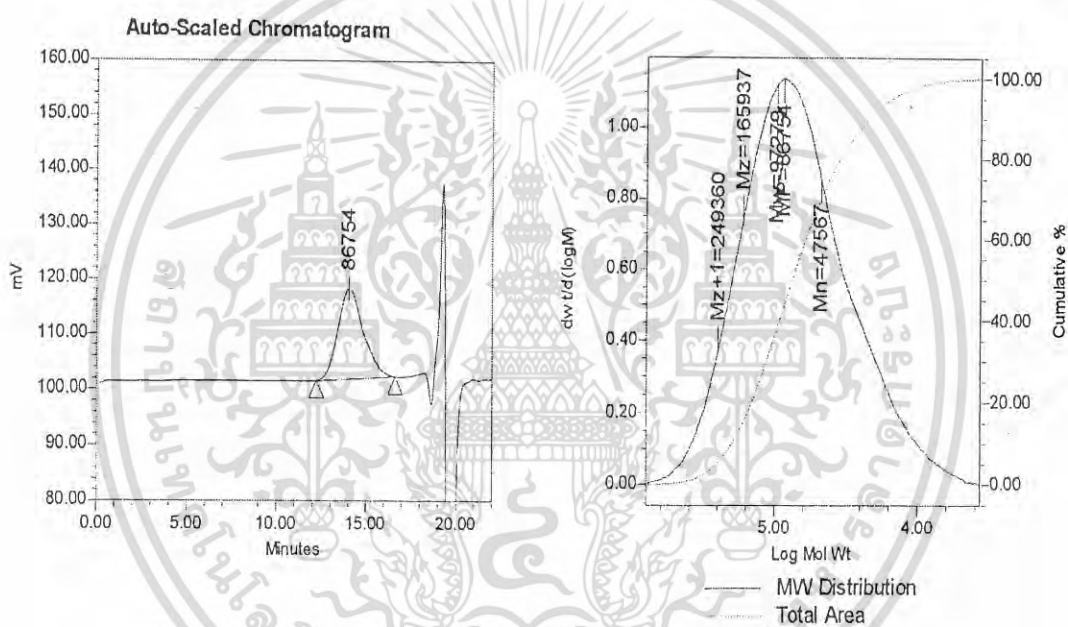
รูปที่ ข-6 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-30s-4cm ที่ความหนา 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName 1.6  
 Vial 2  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 12:51:47 PM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/22/06 1:35:59 PM



**Peak Results**

Peak	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	47567	97279	86754	165937	249360	2.045078

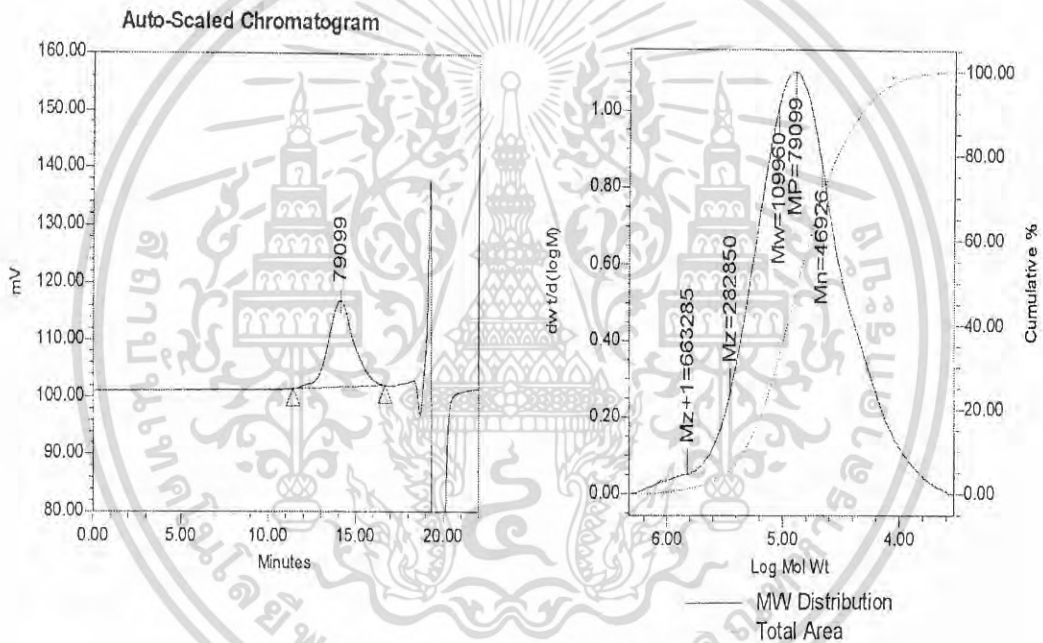
รูปที่ ข-7 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-30s-4cm ที่ความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName 1.7  
 Vial 3  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 1:17:29 PM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/23/06 7:48:26 AM



#### Peak Results

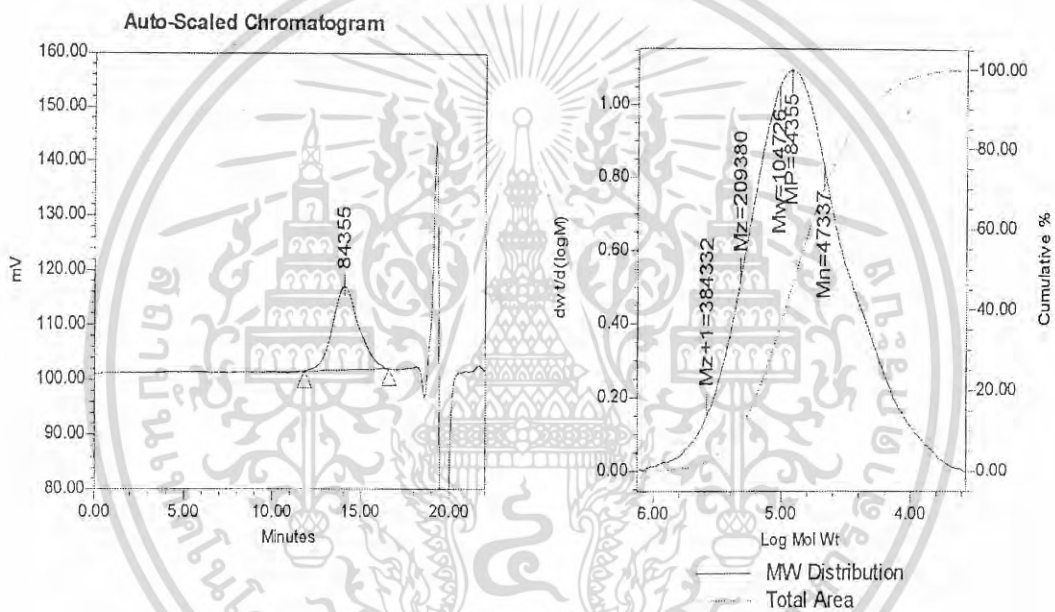
	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	46926	109960	79099	282850	663285	2.343280

รูปที่ ข-8 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-60s-2cm ที่ความหนา 1 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Sample Information

SampleName	1.8	Sample Type	Broad Unknown
Vial	3	Date Acquired	2/22/06 4:01:13 PM
Injection	1	Acq Method Set	Y2006_MethR_THF_30C_3
Injection Volume	100.00 ul	Processing Method	Y2006_ProcR_THF_30C_3
Channel	SATIN	Date Processed	2/23/06 7:51:53 AM
Run Time	22.0 Minutes		



**Peak Results**

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	47337	104726	84355	209380	384332	2.212358
2						
3						

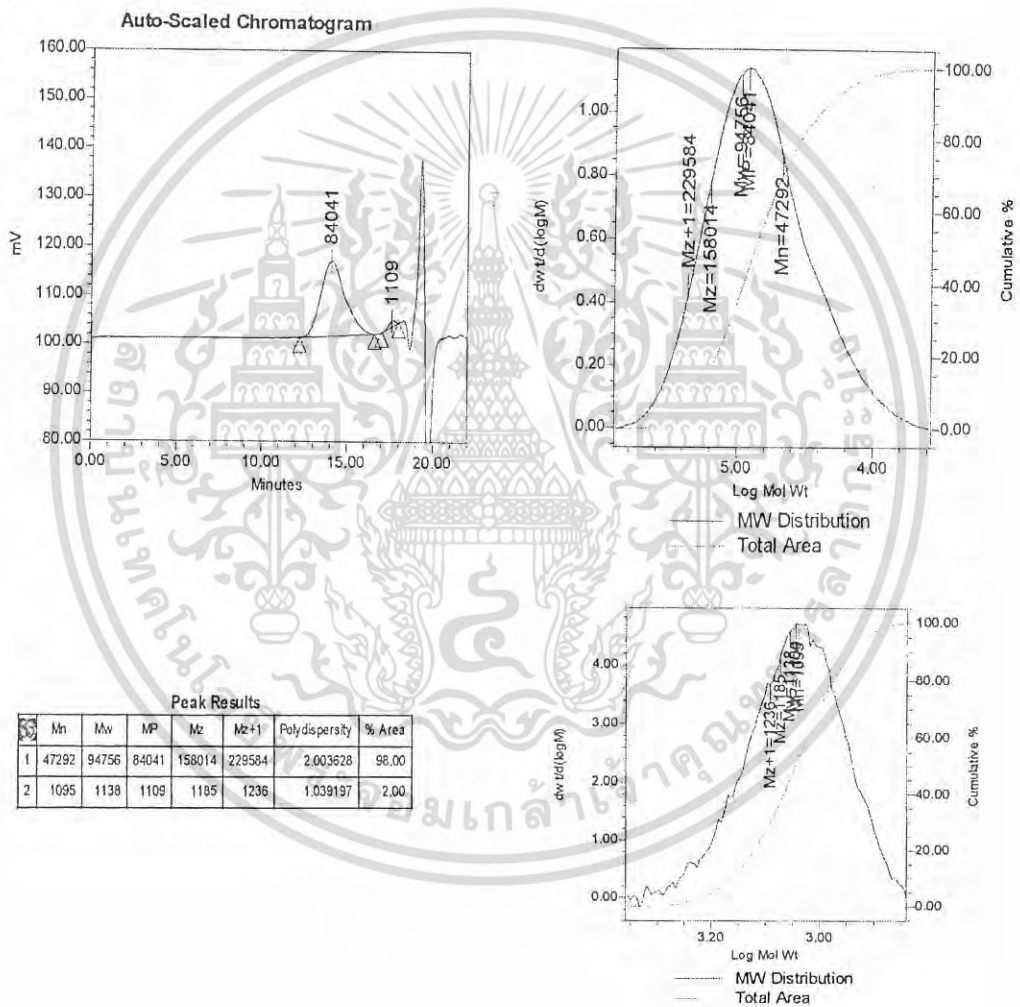
รูปที่ ข-9 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-60s-2cm ที่ความหนา 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName 1.9  
 Vial 4  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 4:26:57 PM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/23/06 7:52:20 AM



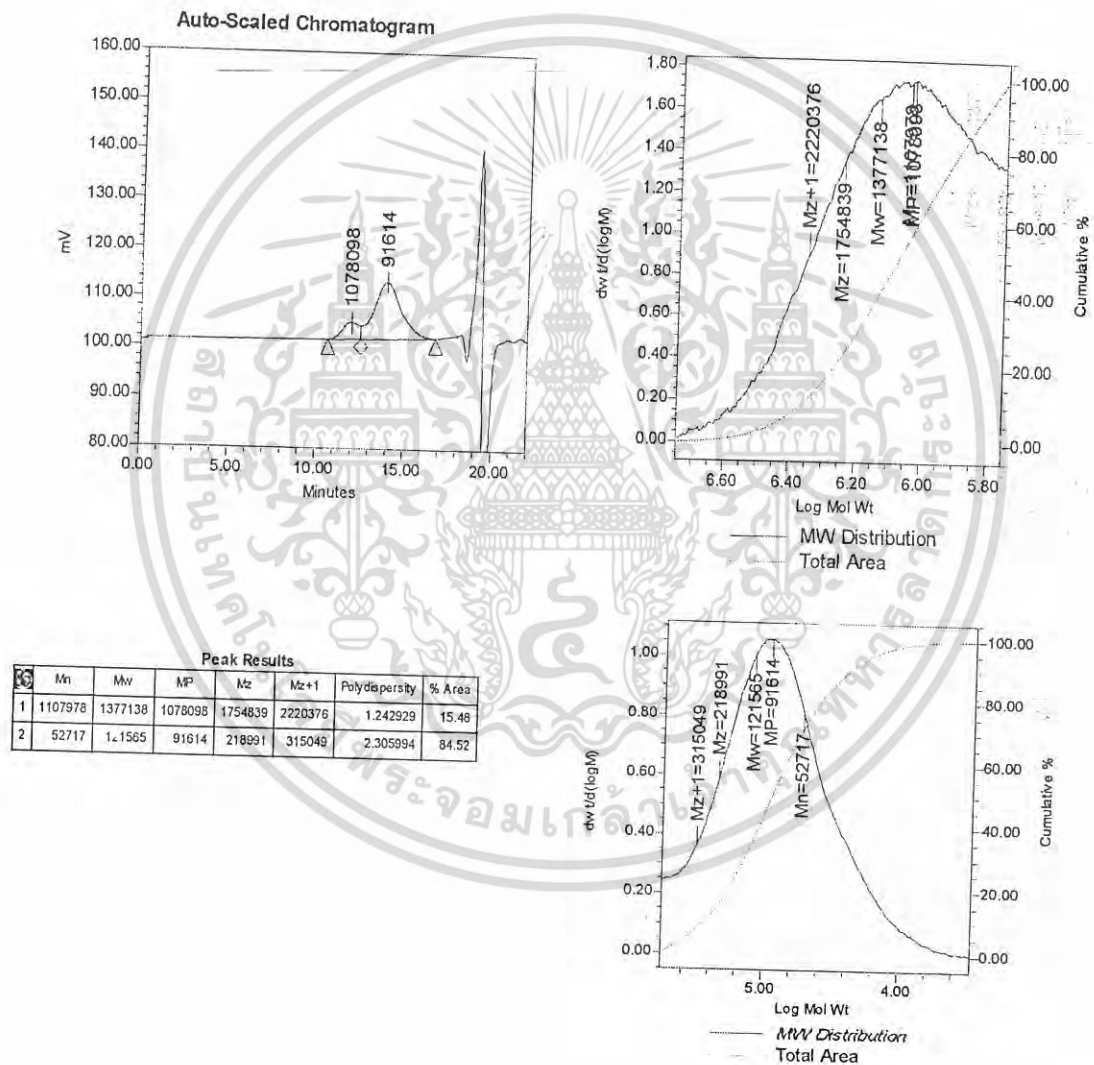
รูปที่ ข-10 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 1-60s-2cm ที่ความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName 2.7  
 Vial 4  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 1:43:12 PM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/23/06 7:49:11 AM

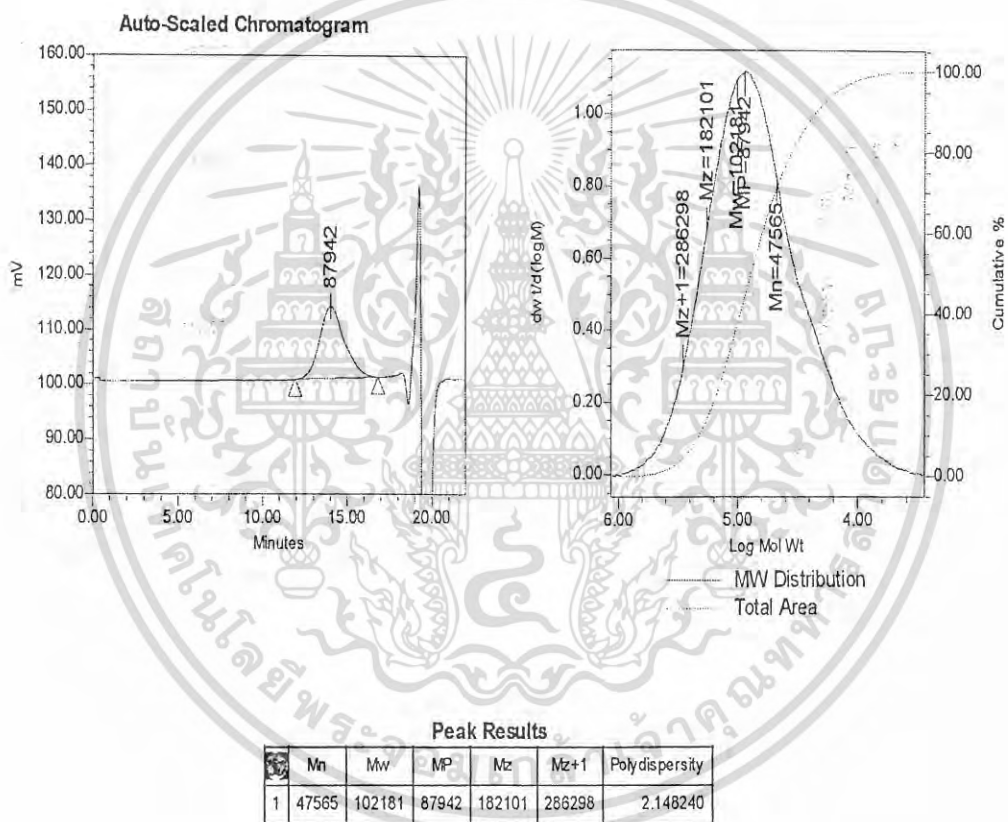


รูปที่ ข-11 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 2-60s-2cm ที่ความหนา 1 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName	2.8	Sample Type	Broad Unknown
Vial	5	Date Acquired	2/22/06 2:08:54 PM
Injection	1	Acq Method Set	Y2006_MethR_THF_30C_3
Injection Volume	100.00 ul	Processing Method	Y2006_ProcR_THF_30C_3
Channel	SATIN	Date Processed	2/23/06 7:49:24 AM
Run Time	22.0 Minutes		



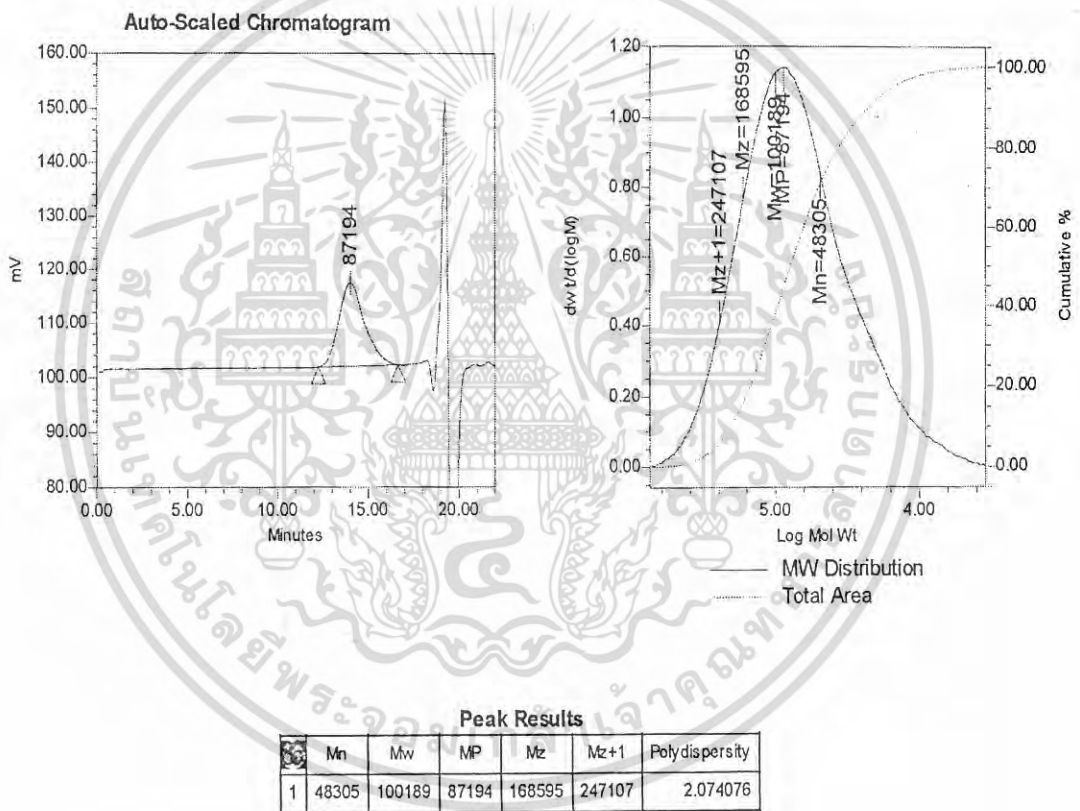
รูปที่ ข-12 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 2-60s-2cm ที่ความหนา 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Sample Information

SampleName 2.9  
 Vial 6  
 Injection 1  
 Injection Volume 100.00 ul  
 Channel SATIN  
 Run Time 22.0 Minutes

Sample Type Broad Unknown  
 Date Acquired 2/22/06 2:34:37 PM  
 Acq Method Set Y2006\_MethR\_THF\_30C\_3  
 Processing Method Y2006\_ProcR\_THF\_30C\_3  
 Date Processed 2/23/06 7:49:38 AM



รูปที่ ข-13 โครมาโทแกรมของซีเมนต์สูตร 2-60s-2cm ที่ความหนาฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
เวลาในการแข็งตัว (dry-hard time) ของซีเมนต์เพสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	ความหนา (mm)	ครั้งที่				เวลาเฉลี่ย (min)
		1	2	3	4	
1-30s-2cm	1	360	360	375	345	360.00
	0.5	165	180	195	195	183.75
	film	18	18	18	15	17.25
1-30s-4cm	1	375	375	390	360	375.00
	0.5	180	180	195	195	187.50
	film	21	18	18	21	19.50
1-60s-2cm	1	360	330	360	345	348.75
	0.5	150	180	180	180	172.50
	film	15	15	15	21	16.50
1-60s-4cm	1	345	360	360	360	356.25
	0.5	180	165	180	180	176.25
	film	15	15	18	21	17.25

ตารางที่ ค-1 เวลาในการแข็งตัว (dry-hard time) ของซีเมนต์เพสต์สูตรที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

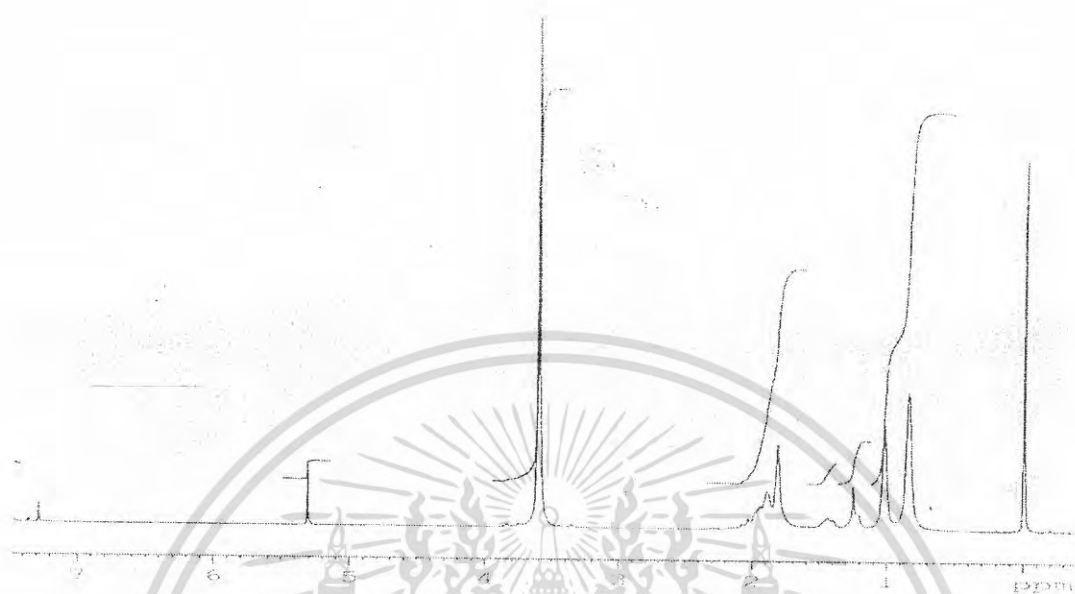
สูตร	ความหนา (mm)	ครั้งที่ (min)				เวลาเฉลี่ย (min)
		1	2	3	4	
2-30s-2cm	1	345	360	360	360	356.25
	0.5	180	180	180	195	183.75
	film	15	18	21	21	18.75
2-30s-4cm	1	360	375	375	390	375.00
	0.5	180	195	195	195	191.25
	film	15	21	21	21	19.50
2-60s-2cm	1	345	345	345	360	348.75
	0.5	165	165	180	180	172.5
	film	18	15	15	15	15.75
2-60s-4cm	1	345	345	345	375	352.25
	0.5	180	180	165	180	176.25
	film	15	18	15	18	16.50

ตารางที่ ค-2 เวลาในการแข็งตัว (dry-hard time) ของซีเมนต์เพสต์สูตรที่ 2

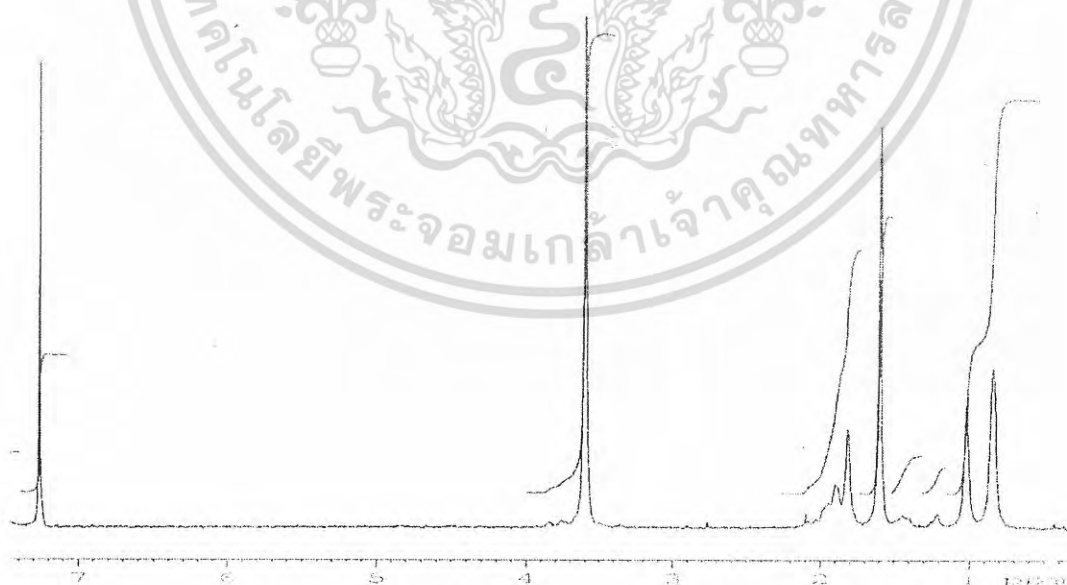
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

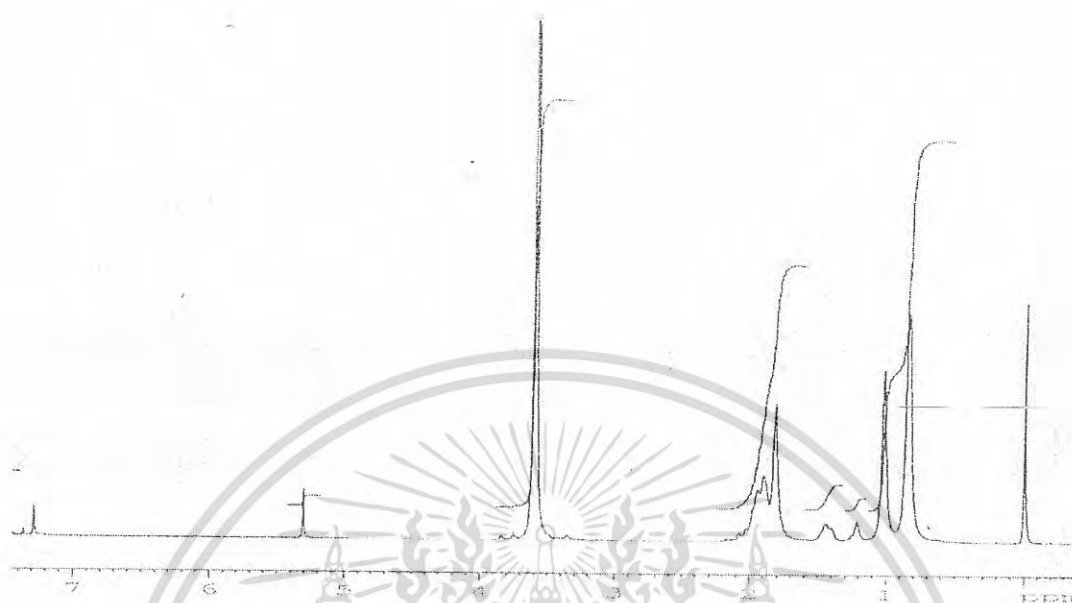


รูปที่ ง-1  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-30s-2cm ที่ความหนา 1 mm

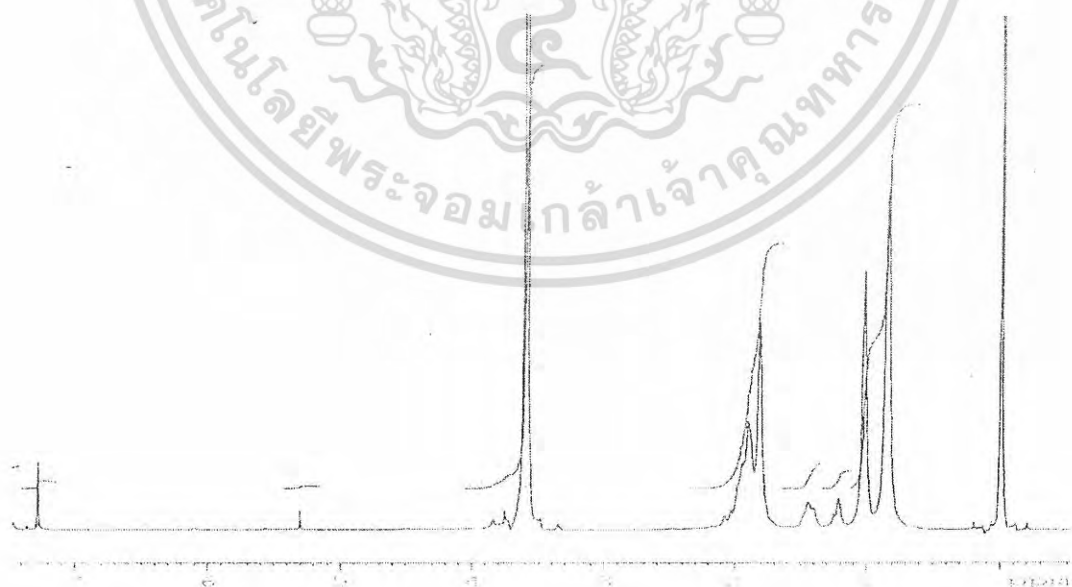


รูปที่ ง-2  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-30s-2cm ที่ความหนา 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

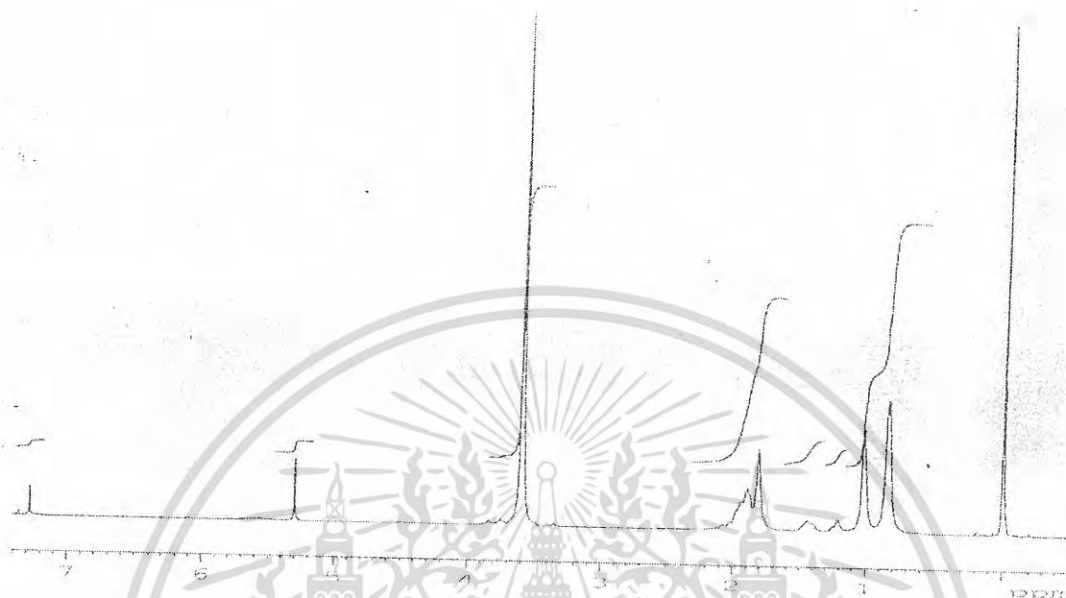


รูปที่ ง-3  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-30s-2cm ที่ความหนาฟิล์ม

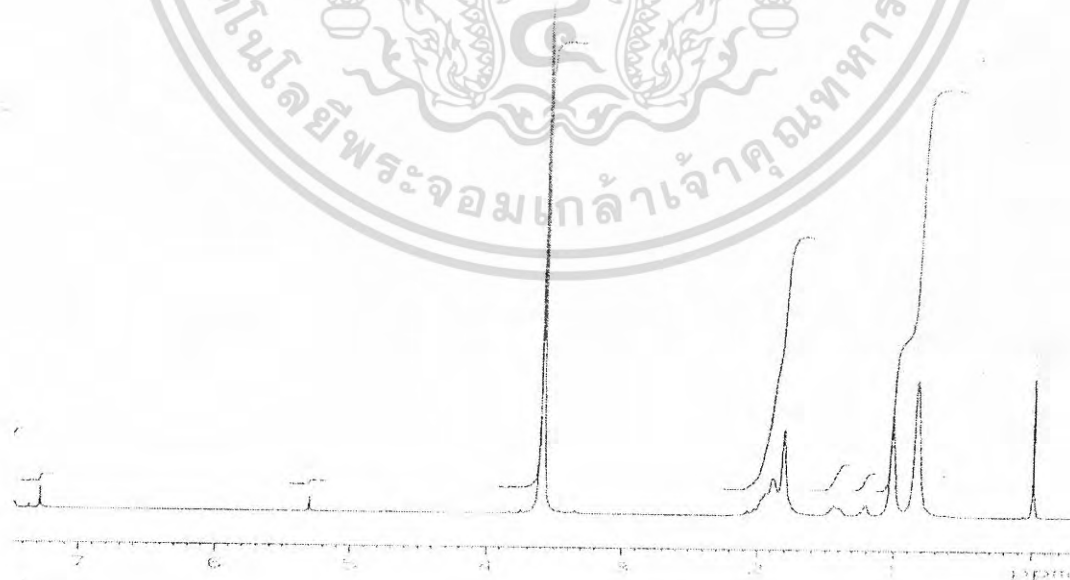


รูปที่ ง-4  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-30s-4cm ที่ความหนา 1 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

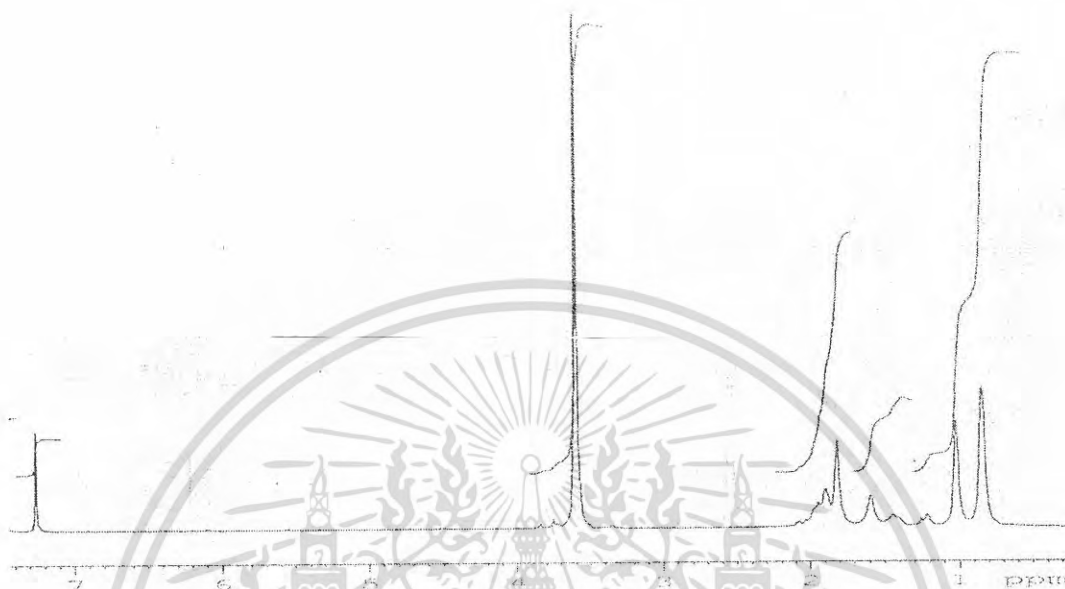


รูปที่ ง-5  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-30s-4cm ที่ความหนา 0.5 mm

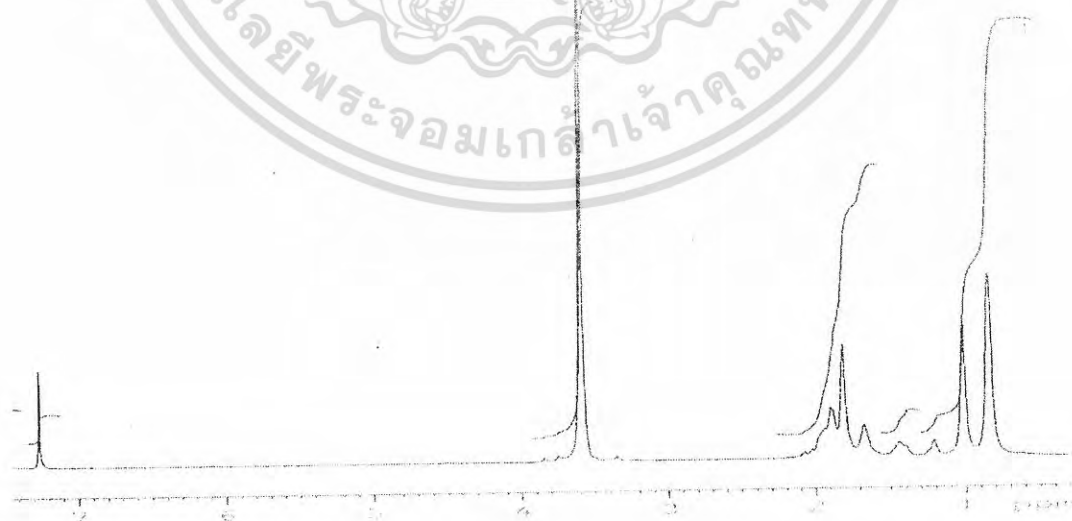


รูปที่ ง-6  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-30s-4cm ที่ความหนา ฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

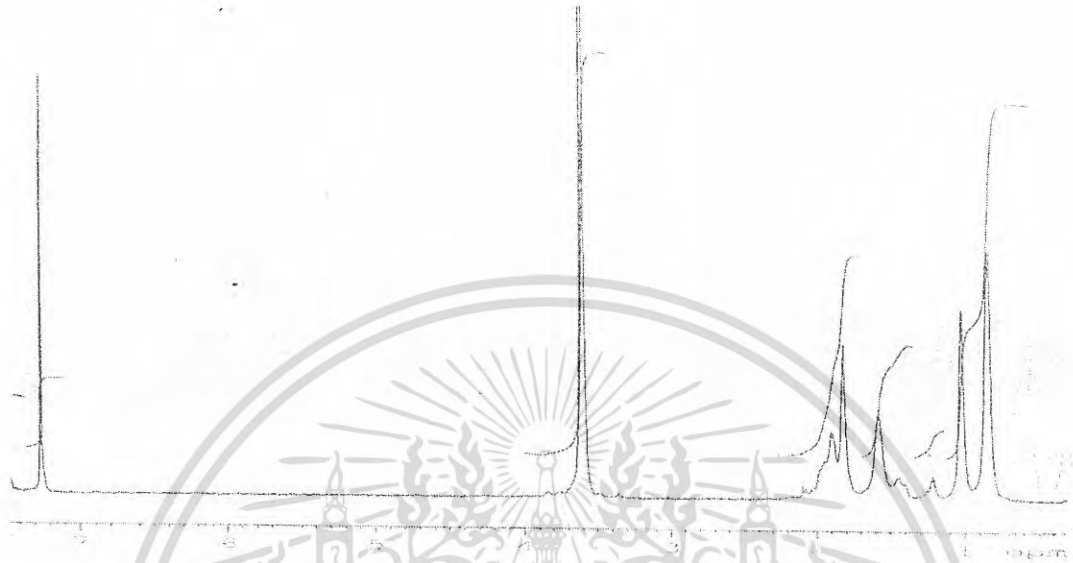


รูปที่ ง-7  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-60s-2cm ที่ความหนา 1 mm



รูปที่ ง-8  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-60s-2cm ที่ความหนา 0.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

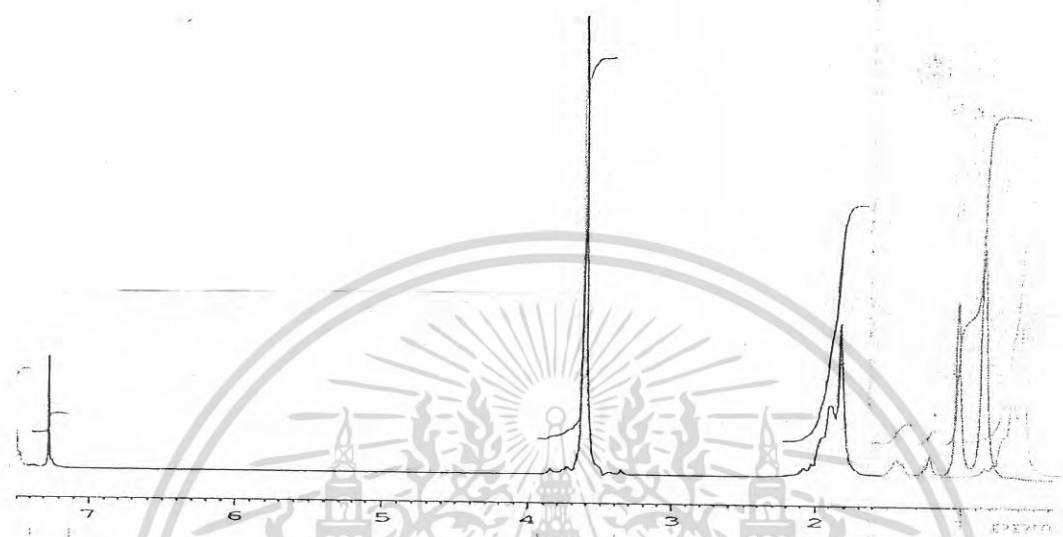


รูปที่ 9  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 1-60s-2cm ที่ความหนา ฟิล์ม

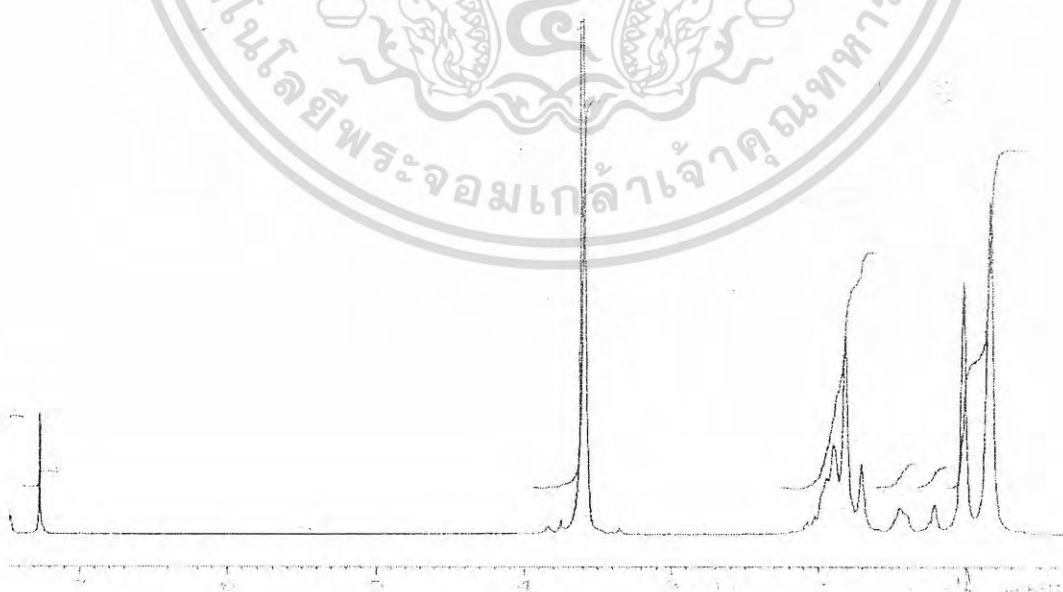


รูปที่ 10  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร 2-60s-2cm ที่ความหนา 1 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-11  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร2-60s-2cm ที่ความหนา 0.5 mm



รูปที่ ง-12  $^1\text{H-NMR}$  ของซีเมนต์สูตร2-60s-2cm ที่ความหนา ฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. T. Yamamuro, T. Nakamura, H. Iida, K. Kawanabe, Y. Matsuda, K. Ido, J. Tamura and Y. Senaha.1998. "Development of bioactive bone cement and its clinical applications." **Biomaterials**. 19: 1479-1482.
2. Xuanyong Liu, Chuanxian Ding and Paul K. Chu.2004. "Mechanism of apatite formation on wollastonite coating in simulated body fluids." **Biomaterial**. 25 : 1755-1761.
3. Amethyst Galleries, Inc. 1996. **THE MINERAL WOLLASTONITE**. [Online]. Available: <http://mineral.halleries.com/minerals/silicate/class.html>
4. S.P. Parker. 1993. **Encyclopedia of Chemistry**. Vol 3. USA. McGraw-Hill Inc.
5. B. Dietoich, P. Viout and J.M. Lehn. 1993. **In Macrocyclic Chemistry**. VCM. Weinheim.
6. M.B. Smith. 1993. **Organic Synthesis**. Germany. MCGraw-Hill.
7. R.Z. LeGeros. 1991. "Calcium Phosphate in Oral Biology and Medicine." **Monographs in Oral Science**. 15.
8. Goodfellow Cambridge Limited.2003, **Material Information Polymethymetharylate**. [Online]. Available:<http://www.goodfellow.com/csp/active/static/E/ME30.html>
9. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์.2540. เคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ. โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
10. Randell D.R.1991. **Radiation curing of polymer II**. Britain.
11. Sigmaaldrich.com.**Photoinitiator**. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/img/assets/3900/Photoinitiators.pdf>
12. Salamone J. 1996.**Polymeric Materials Encyclopedia** .Vol.7. CRC press
13. Fouassier J.P.2003. "Photopolymerization reactions under visible lights : principle, mechanisms and examples of applications. " **Progress in organic coating**. 47:16-36.
14. Absoluteastronomy.com.**Ultraviolet**. [Online]. Available: <http://www.absoluteastronomy.com/encyclopedia/u/ul/ultraviolet.html>
15. Msscintific.de.**Deuterium from Cathode on for HPLC Detector and UV-Vis Spectrometry**. [Online]. Available:<http://www.msscintific.de/deuteriumlamps.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. Hamamatsu.com.**Deuterium Lamps**. [Online]. Available: <http://sales.hamamatsu.com/en/products/electron-tube-division/light-sources/deuterium-lamps.php>
17. Hamamatsu.com.**Hollow Cathode Lamps**. [Online]. Available: <http://sales.hamamatsu.com/en/products/electron-tube-division/light-sources/hollow-cathode-lamps.php>
18. Msscscientific.de.**Mercury Lamps/HBO Mercury Short arc Lamps from Osram**. [Online]. Available: <http://www.msscscientific.de/mercury lamps.html>
19. Ampotech.co.uk.**HPW 125 Mercury Discharge Black Light Source**. [Online]. Available: <http://www.lampotech.co.uk/Spec%20Sheets/Philips%20HPW125.html>
20. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. 2002. ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite) วัสดุทดแทน- กระดูก. [Online]. Available: [http://www.mtec.or.th/th/news/cool\\_stuff/cool2.html](http://www.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool2.html)
21. Azom.com. 2003.**Biomaterials-An Overview**. [Online]. Available: <http://www.azom.com/detail.asp?ArticleID=108>
22. Azom.com. 2003.**Hydroxyapatite Composite Biomaterials-Evolution and Applications**. [Online]. Available: <http://www.azom.com/detail.asp?ArticleID=1718>
23. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุศาสตร์. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้านครินทร์เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
24. ชูศักดิ์ เวชเพศย์ และสมศรี ดาวฉาย. ม.ป.ป. 2525. วิชาอุปกรณ์ใช้ห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ เรื่องอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการทางการแพทย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหิดล
25. P. Silipannon, S. Hayshi, A. Yasumor and K. Okada. 1999. "Preparation and sintering of  $\text{CaSiO}_3$  from coprecipitated powder using NaOH as precipitant and its apatite formation in simulated body fluid solution". **Journal of Materials Research**. 14 : 529-540.
26. B. Pascual, B. Bazquez, M. Curruchaca, I. Coni, M. P. Cineara, S.J. Cil, J.A. Pannell, B. Lencenseld and J. San Roman. 1996. "New aspects of the effects of size and size distribution on the setting parameters and mechanical properties of acrylic bone cements". **Biomaterials**. 17 : 509-518.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27. Pena J.M. and Allen N.S. 2000. "Triplet quenching and antioxidant effect of several carbon black grades in the photodegradation of LDPE doped with benzophenone". **Polymer degradation and stability**. 70 : 437-454.
28. Acosta R. 1996. "The synthesis and evaluation of novel PS for controlled degradation of PE". **Polymer degradation and stability**. 32 : 11-17.
29. Lecamp L., Youssef B. and Bunel C. 1997. "Photoinitiated polymerization of a dimethacrylate oligomer : Influence of photoinitiator concentration, temperature and light intensity". **Polymer**. 25 : 6089-6096.
30. Price B.T., Felix C., Andreou P. 2004. "Effect of resin composite composition and irradiation distance on the performance of curing lights". **Biomaterial**. 25 : 4465-4477. .
31. Bennett W., Watts C. 2004. "Performance of two blue light-emitted-diode dental light curing units with distance and irradiation-time". **Dental Material**. 20 : 72-79.
32. Apicella A., Simeone M., Aversa R., Lanza A., Apicella D. 2005. "Light shielding effect of overlaying resin composite on the photopolymerization cure kinetics of a resin composite and a dentin adhesive". **Dental Materials**. 21 : 954-961.