

อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงและการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต
ที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี

**THE INFLUENCE OF PHOTO-INITIATOR AND PRE-CURING
PROCESS VIA ULTRAVIOLET-A IRRADIATION ON THE
PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES**

สุพัฒนตรา อ่างสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

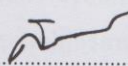
อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงและการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต
ที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี


สุพัฒนตรา อ่างสมบูรณ์

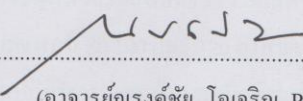
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

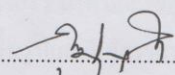
หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงและการกระตุ้นด้วยรังสี
อัลตราไวโอเลตที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี่
The Influence of Photo-initiator and Pre-curing Process via
Ultraviolet-A Irradiation on the Properties of Epoxy Composites
ชื่อ - นามสกุล ว่าที่ร้อยตรีหญิงสุพัฒตรา อ่างสมบูรณ์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์กุลวดี สังข์สนธิ, Ph.D.
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล, ปร.ค.)


..... กรรมการ
(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์กุลวดี สังข์สนธิ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงและการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี
ชื่อ-นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีหญิงสุพัฒนตรา อ่างสมบุญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กุลวดี สังข์สนธิ, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีมักใช้ความร้อนเพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการบ่มสุก ซึ่งมักพบการเสื่อมสภาพจากความร้อนและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานเกินไป ดังนั้น จึงมีการศึกษาทางเลือกใหม่ในการบ่มสุก โดยการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงลงในวัสดุอีพ็อกซีและใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อเป็นตัวกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาและลดระยะเวลาในการบ่มสุก

งานวิจัยนี้ได้ทำการเติมที่เติมสารละลายระหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดบิสเอซิลฟอสฟินออกไซด์และตัวทำให้แข็งชนิดไซโคลเฮกซิลเอไมด์ ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0 และ 5.0 ส่วนต่อร้อยละ โดยน้ำหนักเรซิน (phr.) แล้วกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ (UV-A) เป็นเวลา 0.0 2.0 และ 4.0 นาที และทำการบ่มสุกที่อุณหภูมิ 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ตามลำดับ เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณและอัตราการเกิดปฏิกิริยาบ่มสุกด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี

พบว่า การกระตุ้นด้วย UV-A เป็นเวลา 2 นาที และใช้อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 100°C ส่งผลให้วัสดุอีพ็อกซีมีความหนืดเหมาะสมที่จะนำไปขึ้นรูปและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด นอกจากนี้ ยังพบว่า ระยะเวลาการบ่มสุกที่เหมาะสม คือ 40 นาที จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเชื่อมขวางของสายโซ่โพลีเมอร์และปริมาณการเชื่อมขวางที่สูงขึ้น ในทุกๆสภาวะการบ่มสุก แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีที่ใช้สารละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงในปริมาณ 3 phr. และบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 40 นาที ให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกและการทนต่อแรงดึงสูงสุด จึงสามารถสรุปได้ว่า การกระตุ้นวัสดุอีพ็อกซีที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วยลดระยะเวลาและพลังงานในกระบวนการบ่มสุกของงานวัสดุคอมโพสิต

คำสำคัญ : วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี การบ่มสุกด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง

Thesis Title	The Influence of Photo-initiator and Pre-curing Process via Ultraviolet-A Irradiation on the Properties of Epoxy Composites
Name-Surname	Acting 2 Lt.Suphattra Angsomboon
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Miss Kullawadee Sungsanit, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

Thermal curing is usually used for epoxy composites manufacturing. The thermal degradation occurs when the exothermic reaction produces sufficient heat. As a result, this study investigated the pre-curing process by adding the photo-initiator into epoxy composites and using ultraviolet rays to accelerate the reaction and reducing the curing time.

The solution of a photo-initiator Bisacyl Phosphine Oxide (BaPO) and a hardener Cyclohexylamide were added at the rate of 0.0, 3.0 and 5.0 per percent in proportion to resin (phr) mixed with epoxy resin and then activated by ultraviolet-A (UV-A) for 0.0, 2.0, and 4.0 minutes, at the isothermal curing of 80, 100, and 120 °C, respectively. Differential scanning calorimetry was used to analyze the curing behavior in terms of the proportion and reaction.

The study found that irradiated epoxy composites activated by UV-A for 2 minutes at the curing temperature 100 °C obtained the proper viscosity and the highest reaction rate. Additionally, the most suitable curing time was 40 minutes. The results showed that the higher content of photo-initiator solution resulted in a higher rate of reaction and a number of crosslinks in every curing condition. However, mechanical characterization with 3.0 phr of photo-initiator solution and at the curing temperature 100 °C for 40 minutes showed the optimal tensile and impact strength. As a consequence, this research concludes that the application of photo-initiators accelerated by ultraviolet rays helps reduce the time and energy in the curing process of epoxy composite manufacturing.

Keywords: epoxy composite, ultraviolet curing, photo-initiator

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์ของ ดร.กฤติ สัจจันนิต อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรุณศิริ จักรบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีช และ ดร. ณรงค์ชัย โอเจริญ กรรมการสอบ และดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัชกุล ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้สนับสนุนเครื่องจักร เครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งเจ้าหน้าที่และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวก ให้ความรู้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือภายในภาควิชา

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทดสอบ รวมทั้งอาจารย์ เจ้าหน้าที่และบุคลากรที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวก ให้ความรู้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือภายในภาควิชา ขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณและมอบความดีนี้ทั้งหมดให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และครูบาอาจารย์ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้มีข้อบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุพัฒนตรา อ่างสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(17)
บทที่ 1 บทนำ.....	18
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	18
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	19
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	19
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 วัสดุผสม (Composite Material).....	22
2.2 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin).....	34
2.3 การบ่มด้วยรังสี.....	43
2.4 ความรู้เบื้องต้นของกระบวนการขึ้นรูปแบบสูญญากาศ.....	57
2.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	58
2.6 การทดสอบโครงสร้างทางเคมี.....	60
2.7 การทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์.....	67
2.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	68
2.9 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	72
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	74
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	96
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	96
3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงาน 99
3.4	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ..... 102
3.5	การทดสอบสมบัติทางความร้อน 105
3.6	การทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี..... 106
3.7	การทดสอบสมบัติเชิงกล 107
3.8	การทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (DMA) 111
3.9	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)..... 114
บทที่ 4	ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง 115
4.1	ผลการเตรียมแผ่นทดสอบวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบ สุญญากาศ (Vacuum Bag Process)..... 115
4.2	ศึกษาพฤติกรรมการบ่มสุก (Curing) ด้วยเทคนิค (Differential Scanning Calorimetry, DSC)..... 122
4.3	วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) 135
4.4	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning ElectronMicroscope, SEM) 140
4.5	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี 141
บทที่ 5	ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง 150
5.1	สรุปผลการวิจัย 150
5.2	ข้อเสนอแนะ 151
บรรณานุกรม 152
ภาคผนวก 157

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	158
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	176
ประวัติผู้เขียน	195

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติของเส้นใย แก้วชนิด S-Glass และ E-Glass	24
ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	64
ตารางที่ 2.3 แสดง Rockwell Hardness Scale	72
ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	94
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของระยะเวลาที่ใช้กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 0, 2 และ 4 นาที ของอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ผสมกับ BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr	122
ตารางที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อน (ΔH ; Exothermic).....	123
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าของพลังงานการคายความร้อน (mJ) และปริมาณการบ่มสุก จากการให้อุณหภูมิความร้อนคงที่ (Isothermal) ในการบ่มสุกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 80 100 และ 120 °C	129
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อน (ΔH) และปริมาณการเชื่อมขวาง (% crosslink)	133
ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งหมู่เอกลักษณ์ของอีพ็อกซีเรซิน	136
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ที่ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 นาที รวมทั้งเวลาที่ 2, 3 และ 24 ชั่วโมง.....	144
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการต้านทานต่อแรงกระแทก (J/m) ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ภายใต้สภาวะการบ่มสุกที่ 1 และ 2.....	145
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการต้านทานแรงดึง (MPa) ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr	147

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	เส้นใยแก้วแบบฝืน 25
รูปที่ 2.2	เส้นใยแก้วตาसान 25
รูปที่ 2.3	เส้นใยแก้วผ้าทอ 26
รูปที่ 2.4	เส้นใยแก้วเส้นด้าย..... 27
รูปที่ 2.5	ใยสานแบบเย็บติด 27
รูปที่ 2.6	ใยแก้วผิว..... 28
รูปที่ 2.7	ใยแก้วแบบทิสทางเดียว..... 28
รูปที่ 2.8	การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง 29
รูปที่ 2.9	การเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงานด้วยอนุภาค PSZ 30
รูปที่ 2.10	วัสดุผสมพอลิเมอร์ที่ใช้ในเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 32
รูปที่ 2.11	วัสดุผสมเซรามิกที่นำมาใช้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส..... 34
รูปที่ 2.12	โครงสร้างทั่วไปของอีพ็อกซีเรซิน 34
รูปที่ 2.13	โครงสร้างคุณสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน จากกระบวนการ Thermosetting..... 35
รูปที่ 2.14	แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Bis-phenol A กับ NaOH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาขั้นแรกในการสังเคราะห์อีพ็อกซี 36
รูปที่ 2.15	แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับอัลคอกไซด์ไอออน..... 37
รูปที่ 2.16	แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับอัลคอกไซด์ไอออนที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล 37
รูปที่ 2.17	แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Alkoxide anion กับไดเมอร์ 38
รูปที่ 2.18	แสดงปฏิกิริยาระหว่างประจุลบของอีพ็อกซีกับโมเลกุลของน้ำ..... 38
รูปที่ 2.19	แสดงปฏิกิริยาโดยรวมของการสังเคราะห์พรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซี 39
รูปที่ 2.20	ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของ Poly-functional amines 40
รูปที่ 2.21	แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสาร Poly-functional amine กับ พรีพอลิเมอร์... 41
รูปที่ 2.22	แสดง โครงสร้างแบบร่างแหของอีพ็อกซี..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.23	กลไกการบ่มเร่งปฏิกิริยารังสี.....	44
รูปที่ 2.24	สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปริมาณความถี่.....	45
รูปที่ 2.25	รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากดวงอาทิตย์.....	46
รูปที่ 2.26	แสดงการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	46
รูปที่ 2.27	หลอดไอปรอทความดันปานกลาง	47
รูปที่ 2.28	หลอดเมทัลฮาไลด์.....	48
รูปที่ 2.29	หลอด Excimer.....	48
รูปที่ 2.30	กลไกการบ่มสารด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยอาศัยการแตกตัวของอนุมูลอิสระ	49
รูปที่ 2.31	(a) โครงสร้างทางเคมี, (b) ลักษณะทางกายภาพของ (Bis Acyl Phosphine Oxide, BAPO).....	51
รูปที่ 2.32	การแตกตัวให้อนุภาคอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง	52
รูปที่ 2.33	โครงสร้างเคมีของ bisphenol A epoxy with acrylic acid.....	53
รูปที่ 2.34	เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแคตไอออนิกของหมู่ออกซิแรน	54
รูปที่ 2.35	เกิดโครงสร้างของเตตระไฮโดรฟิวเรนในสายโซ่ของยาง.....	55
รูปที่ 2.36	กระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag)	57
รูปที่ 2.37	หลักการการทำงานของเครื่อง DSC	59
รูปที่ 2.38	แสดงการทำงานของ Interferometer.....	61
รูปที่ 2.39	การแทรกสอดของลำแสงที่สะท้อนกลับในกรณีที่เป็นแสงความถี่เดียวและแสง polychromatic	62
รูปที่ 2.40	ตัวอย่างลักษณะกราฟที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR.....	66
รูปที่ 2.41	เครื่อง FTIR.....	67
รูปที่ 2.42	เครื่องการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (DMA).....	68
รูปที่ 2.43	เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด.....	70
รูปที่ 2.44	เครื่อง Scanning Electron Microscope.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.45	รูปตัวอย่างของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ที่ได้จากการใช้ Scanning Electron Microscope.....	74
รูปที่ 2.46	ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณ Photoinitiator ที่แตกต่างกัน.....	75
รูปที่ 2.47	ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ได้รับการบ่มด้วยแสงยูวีที่เวลาต่างๆ	76
รูปที่ 2.48	ค่าความแข็งของเรซินที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, บ่มโดยให้ความร้อน และบ่มโดยใช้รังสี UV ; (top surface ; ส่วนบนของชิ้นงานที่สัมผัสกับแสง UV โดยตรง) (bottom surface ; ส่วนล่างของชิ้นงานที่กล่าวถึงความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสี UV)	77
รูปที่ 2.49	สมบัติการทนแรงดึงของการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, บ่มโดยให้ความร้อน, และบ่มด้วยรังสี UV : (a) ค่าความแข็งแรง (strength) และ (b) โมดูลัส (modulus)	79
รูปที่ 2.50	เปรียบเทียบสมบัติด้าน Viscoelastic ของตัวอย่าง BADGE/TRIS/PTKMP ที่สัดส่วน 1/0.2/0.3 ตามลำดับ ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิด DMPA 1 mol% ตัวอย่างถูกนำมาบ่มด้วยแสง UV เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 85 °C ความเข้มของแสง 40 mW/cm ² และการบ่มโดยวางตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	80
รูปที่ 2.51	เปรียบเทียบอุณหภูมิของการพัฒนาในช่วงการสังเคราะห์ด้วยรังสี (Photopolymerization) ของ Epoxy-amine/thiol-ene formulations	81
รูปที่ 2.52	ความต้านแรงดึงและปริมาณการ crosslink ของการฉายแสงเพื่อผลิตฟิล์ม PVNR ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ (a) ผลกระทบของอัตราส่วนโดยมวลของ Photoinitiator ต่อ Coagent (R); (b) ผลของระยะเวลาในการผสม; (c) ผลกระทบของระยะห่างในการฉายแสง; (d) ผลกระทบของความลึกของน้ำยา; (e) ผลของระยะเวลาในการฉายแสง	85
รูปที่ 2.53	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อโมดูลัสสะสมของคอมโพสิตที่ความถี่ 0.1 เฮิรต์.....	88
รูปที่ 2.54	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อโมดูลัสสะสมของคอมโพสิตที่ความถี่ 1 เฮิรต์.....	88

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.55	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสะสมของคอมโพลีตที่ความถี่ 10 เฮิร์ต.....	89
รูปที่ 2.56	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสูญเสียของคอมโพลีตที่ความถี่ 0.1 เฮิร์ต.....	90
รูปที่ 2.57	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสูญเสียของคอมโพลีตที่ความถี่ 1 เฮิร์ต.....	90
รูปที่ 2.58	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสูญเสียของคอมโพลีตที่ความถี่ 10 เฮิร์ต.....	91
รูปที่ 2.59	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 0.1 เฮิร์ต.....	92
รูปที่ 2.60	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 1 เฮิร์ต.....	92
รูปที่ 2.61	ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 เฮิร์ต.....	93
รูปที่ 3.1	การเตรียมส่วนเชื่อมผสาน (Matrix) ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-initiator) ..	103
รูปที่ 3.2	การเตรียมแผ่นคอมโพลีตด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag Process)	104
รูปที่ 3.3	เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค (Differential Scanning Calorimeter, DSC)...	105
รูปที่ 3.4	เครื่องทดสอบหาลักษณะโครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)	106
รูปที่ 3.5	เครื่องทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 638	107
รูปที่ 3.6	ขนาดชิ้นงานทดสอบการต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D 638M.....	107
รูปที่ 3.7	เครื่องทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Chapy Impact Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 6110)	108
รูปที่ 3.8	ขนาดชิ้นงานทดสอบการต้านทานแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D 6110.....	109
รูปที่ 3.9	เครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test ตามมาตรฐาน ASTM D 785)	110
รูปที่ 3.10	เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer).....	111

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	114
รูปที่ 4.1	แผนผังการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 6 นาที ที่ระยะห่างจากหลอด UV-A 10 เซนติเมตร	116
รูปที่ 4.2	แผนผังการปรับเปลี่ยนเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 5.0 phr และเพิ่มเวลาการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 12 และ 20 นาที ที่ระยะห่างจากหลอด UV-A 10 เซนติเมตร.	117
รูปที่ 4.3	แผนผังแสดงการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A ของอีพ็อกซีผสมกับสารทำให้แข็ง และอีพ็อกซี ผสมกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ใช้ HDDA เป็นตัวทำละลาย.....	118
รูปที่ 4.4	ลักษณะของอีพ็อกซีผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่ใช้ HDDA เป็นตัวทำละลาย.....	119
รูปที่ 4.5	แสดงบริเวณรอยร้าวส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉลุสุญญากาศ.....	120
รูปที่ 4.6	ลักษณะพื้นผิวระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใย ในแต่ละอัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ที่กระตุ้นด้วย UV-A เป็นเวลา 2 นาที	121
รูปที่ 4.7	แสดงถึงเวลาการกระตุ้นที่ 4 นาที อีพ็อกซีผสมมีลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่เกิดจากการคายพลังงานความร้อน.....	124
รูปที่ 4.8	ปริมาณการบ่มสุกอีพ็อกซีเรซินที่เป็นฟังก์ชันเวลากับอุณหภูมิการบ่มสุกคงที่ที่ 60,80 และ 100 °C	125
รูปที่ 4.9	อีพ็อกซีผสมที่อัตราส่วน BAPO 0 phr ที่แสดง (a) พฤติกรรมการบ่มสุก และ (b) ปริมาณการบ่มสุก เมื่อให้ความร้อนคงที่ ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 80 100 และ 120 °C	126
รูปที่ 4.10	อีพ็อกซีผสมที่อัตราส่วน BAPO 3 phr ที่แสดง (a) พฤติกรรมการบ่มสุก และ (b) ปริมาณการบ่มสุก เมื่อให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 80 100 และ 120 °C.....	127
รูปที่ 4.11	อีพ็อกซีผสมที่อัตราส่วน BAPO 5 phr ที่แสดง (a) พฤติกรรมการบ่มสุก และ (b) ปริมาณการบ่มสุก เมื่อให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 80 100 และ 120 °C.....	128

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.12	แสดงค่าพลังงานการคายความร้อน (Exothermic) ลดลงเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น.....	131
รูปที่ 4.13	ค่าพลังงานการคายความร้อนที่อัตราส่วน BAPO (a) 0.0, (b) 3.0 และ (c) 5.0 phr ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที ที่อุณหภูมิการอบ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที ทั้ง 3 สภาวะ.....	132
รูปที่ 4.14	ปริมาณการเชื่อมขวางของวัสดุคอม โพลีดีอีฟ็อกซี่ที่อัตราส่วนผสมอัตราส่วน BAPO 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที ที่อุณหภูมิการอบ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที ทั้ง 3 สภาวะการบ่มสุกคือ บ่มสุกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที, อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และอบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	134
รูปที่ 4.15	ผลการทดสอบ โครงสร้างทางเคมีด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR).....	135
รูปที่ 4.16	ลักษณะการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซี่และเส้นใย ของวัสดุคอม โพลีดีอีฟ็อกซี่ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr.....	140
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของวัสดุคอม โพลีดีอีฟ็อกซี่ที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ; (a) อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที (b) อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	142
รูปที่ 4.18	ค่าความแข็งของวัสดุผสมที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ที่ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 นาที รวมทั้งเวลาที่ 2, 3 และ 24 ชั่วโมง.....	143
รูปที่ 4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานการต้านทานแรงกระทำของของวัสดุคอม โพลีดีอีฟ็อกซี่ที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0 และ 5.0 phr	146

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่ม ปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr	148
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานแรงดึง ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสาร ริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr.....	149

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	American Society of Testing and Materials
BaPO	Bis Acyl Phosphine Oxide
CMC	Ceramic Matrix Composite
DMA	Dynamic mechanical properties
g/cm ³	หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
kW	หน่วยกิโลวัตต์
MMC	Metal Matrix Composite
mm/min	หน่วยมิลลิเมตรต่อนาที
MPa	หน่วยเมกะปาสกาล
mJm ²	หน่วยมิลลิจูลต่อตารางเมตร
mol/cm ⁻³	หน่วยโมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
PMC	Polymer Matrix Composite
phr	อัตราส่วนต่อร้อย
Tg	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
°C	หน่วยองศาเซลเซียส
μg/dm ²	หน่วยไมโครกรัมต่อตารางเดซิเมตร
μm	หน่วยไมโครเมตร
%wt	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) มีการพัฒนาและนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตสามารถออกแบบให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานที่ต้องการ วัสดุคอมโพสิตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่ที่มีความนิยมนิยม เนื่องจากมีความแข็งแรง มีความคงทนต่อสภาพอากาศ ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี และที่สำคัญมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุทั่วไป ประหยัดและสะดวกต่อการขนส่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการพัฒนาวัสดุ-คอมโพสิตให้สามารถนำไปใช้กับงานทางอากาศยาน ทั้งในยานอวกาศ ในเครื่องบิน เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิตนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้มากมาย รวมไปถึงในส่วนของภาคอุตสาหกรรมด้วยเช่นกัน [1]

งานทางด้านภาคอุตสาหกรรมวัสดุคอมโพสิตนั้นใช้อีพ็อกซีเรซิน เป็นส่วนใหญ่ในกระบวนการผลิต เนื่องจากอีพ็อกซีมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความสามารถในการประสานและยึดติดได้ดี การเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี จากสมบัติข้างต้น จึงทำให้อีพ็อกซีเรซินเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการงานทางด้านภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกาว, อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมการพิมพ์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ในกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตนั้นจะใช้วิธีการบ่ม (Cure) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่จากการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง หรือการนำไปอบที่อุณหภูมิสูงระดับหนึ่ง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ทำให้ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานและผลิตภัณฑ์อาจได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อน (Thermal Degradation) ทั้งนี้ย่อมไม่เกิดผลดีต่อกระบวนการผลิตอย่างแน่นอน ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพหรือมีสมบัติทางการใช้งานที่ด้อยลง อีกทั้งยังจากการใช้เวลาในการผลิตที่สูงยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการผลิต

ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาเพื่อลดระยะเวลาในการผลิต โดยทำการศึกษาค่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-Violet) เพื่อเป็นตัวช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่เร็วขึ้น ทั้งนี้ต้องทำการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photoinitiator) เพื่อเป็นตัวกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยา อีกทั้งการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการผลิตยังมีประโยชน์อีกมากมาย เช่น ใช้เวลาในการบ่มน้อยลง, ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงการใช้ความร้อนที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่ง [2][3] ดังนั้นงานวิจัยนี้ ทำการศึกษา

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag) โดยใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นเมทริกซ์ (Matrix) และใช้เส้นใยแก้ว (Fiber Glass) เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) เพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณการเชื่อมขวาง อีกทั้งผลกระทบที่มีผลต่อสมบัติด้านต่างๆ จากการใช้ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาทางแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UV-A) ที่ระยะเวลา 0, 2 และ 4 นาที ของทุกอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี (Epoxy Resin) กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 ส่วนต่อร้อยส่วนในน้ำหนักเรซิน (phr)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้การบ่มสุกของทุกอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี (Epoxy Resin) กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr.

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณการเชื่อมขวาง (% Crosslink) ของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ที่สภาวะการบ่มสุก 3 สภาวะ คือ บ่มสุกที่อุณหภูมิห้อง 40 นาที, บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที, บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง

1.2.4 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีที่ผ่านการอบบ่มสุกที่ 2 สภาวะคือ บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที, บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง เช่น การศึกษาสมบัติทางความร้อน, สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ เป็นต้น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) รหัส ML 3564, สารทำให้แข็ง (Hardener) รหัส HY 3968, สารตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Bis Acyl Phosphine Oxid (BAPO) รหัส IRGCURE 819, หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UV-A) รหัส OSRMA 300 W, เส้นใยแก้วชนิด E-glass Fiber เกรด EMC 300-1040

1.3.2 ระยะเวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยรังสี UV-A ที่ระยะเวลา 0, 2 และ 4 นาที ของทุกอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี (Epoxy Resin) กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr

1.3.3 อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้การบ่มสุก ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A ที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส และ 0, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ ของทุกอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี (Epoxy Resin) กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr

1.3.4 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต โดยวิธีการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag)

1.3.5 ที่สภาวะการบ่มสุกของวัสดุผสมคอมโพสิตอีพ็อกซีที่ 3 สภาวะ 1. บ่มสุกที่อุณหภูมิห้อง 40 นาที, 2. บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที, 3. บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง

1.3.6 เตรียมตัวอย่างชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบ Vacuum Bag โดยเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที อุณหภูมิในการอบบ่มสุกวัสดุคอมโพสิต 100 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบ 40 นาที ที่ สภาวะการบ่มสุก 2 สภาวะ 1. บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที, 2. บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง

1.3.7 ทำการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีที่ได้จากการขึ้นรูปตามสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.3.7.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

- Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแบบร่างแห)

1.3.7.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

- เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D785
- ทดสอบการต้านทานต่อแรงกระแทก (Chapy Impact Test) ตามมาตรฐาน ASTM D6110

- ทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM D638M

1.3.7.3 การทดสอบโครงสร้างทางเคมี

- Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

1.3.7.4 ทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analysis , DMA) รุ่น DMA 8000 ยี่ห้อ Perkin Elmer (ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ)

1.3.7.5 ทดสอบลักษณะการเชื่อมประสานของชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี

- เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope,SEM) (ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเสริมแรง

1.4.2 เข้าใจเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางแบบร่างแห (Cross-Linking) ที่เกิดจากกระบวนการบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-Violet)

1.4.3 เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม (Cure) วัสดุคอมโพสิต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุผสม (Composite Material)

วัสดุผสม (Composite Material) หมายถึง วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จากการผสมกันจะมีสมบัติเริ่มต้นร่วมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้นหรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced phase) [4] โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรง ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติตามที่ต้องการ [5]

2.1.1 สารเสริมแรง (Reinforcement)

สารเสริมแรงในวัสดุผสมส่วนมากจะใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

1. วิสเกอร์ (Whisker) เป็นวัสดุที่เป็นผลึกเดี่ยวมีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก ยกตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมินา เป็นต้น

2. ลวดเล็ก (Fine wire) เป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์ส่วนมากแล้วจะหมายถึงโลหะอย่างเช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสเตน ยกตัวอย่างการใช้งานเช่น ลวดเหล็กกล้าที่ใช้เสริมแรงในยางรถยนต์ หรือลวดเสริมแรงในตัวเคสของจรวด (Rocket casing) เป็นต้น

3. เส้นใย (Fiber) เป็นเส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึก หรือเป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิก ยกตัวอย่างเช่น อะรามิด (Aramid) แก้วคาร์บอน โบรอนออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น [6]

เส้นใยยังแบ่งตามส่วนประกอบได้หลายประเภท โดยในส่วนของการศึกษานี้จะทำการศึกษาเส้นใยแก้ว (Fiber Glass) เนื่องจากมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรม มีราคาถูกและที่สำคัญมีความแข็งแรงเหมาะแก่การนำไปใช้ผลิตถังเก็บแก๊สหุงต้ม

2.1.1.1 เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว คือ เส้นใยของแก้วที่ปั่นให้เป็นเส้นละเอียดบางๆ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์หลายประเภท รวมทั้งพลาสติกเรซินที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น หลังคารถกระบะ อ่างอาบน้ำ เรือ ชิ้นส่วนเครื่องบินเล็ก ถังน้ำขนาดใหญ่ ชิ้นส่วนรถแข่ง เป็นต้นเพราะเส้นใยแก้วมีสมบัติความแข็งแรง ทนแรงดึงได้สูง ไม่เป็นสนิม และทนต่อการกัดกร่อนนอกจากนี้เส้นใยแก้วยังมีสมบัติด้านการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนในเตาตู้เย็น หรือวัสดุก่อสร้างอีกด้วย

เส้นใยแก้วแบ่งได้เป็นสองประเภทตามลักษณะของเส้นใย คือเส้นใยต่อเนื่องคล้ายกับเส้นด้าย ที่สามารถนำมาถักทอให้เป็นผืนผ้า (Fiberglass fabric) ผ้าที่ได้จะไม่ดูดซึมน้ำ ไม่หดตัว ป้องกันความร้อนได้ดี ส่วนมากจะนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรม เช่น ทำเป็นผ้าม่านกันสะเก็ดไฟ ส่วนเส้นใยแก้วอีกประเภทหนึ่งจะเป็นเส้นใยที่สั้นไม่ต่อเนื่อง มักนำมาใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อน และ ฉนวนกันเสียง ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นหนานุ่ม

ส่วนผสมหลักที่ใช้ผลิตเส้นใยแก้วคือ ทรายแก้ว (Silica sand) ใช้เป็นสารสร้างแก้ว โซดาแอส (Soda ash) และ หินปูน (Limestone) สารสองอย่างหลังจะช่วยลดจุดหลอมเหลวนอกจากส่วนผสมหลักทั้งสามแล้วอาจมีส่วนผสมอื่นๆที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของเส้นใยแก้ว เช่น บอแรกซ์ (Borax) หินฟันม้า (Feldspar) แคลไซน์อะลูมินา (Calcined Alumina) แมกนีไซต์ (Magnesite) เนฟฟีลีนไซยาไนต์ (Nepheline Syenite) และ ดินขาวเคโอลิน (Kaolin Clay) เส้นใยแก้วผลิตขึ้นจากสารเคมีและวัสดุหลายชนิด ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น ดวงตา ผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจ

เส้นใยแก้วมีขนาดและความยาวหลากหลายขนาด เส้นใยอาจยาวเหมือนเส้นด้าย ยาวมากไปจนถึงเส้นใยที่สั้นมากจนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ถูกหลอมเหลวภายในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงมากถึง 1370 องศาเซลเซียส ซึ่งหากมีการควบคุมคุณภาพส่วนผสมที่ดี ให้ความบริสุทธิ์ ก็ไม่จำเป็นต้องทำให้เป็นลูกแก้วเพื่อคัดเลือกลูกแก้วที่ดี มาหลอมเป็นน้ำแก้วใหม่อีกครั้ง หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการรีดเป็นเส้นใยยาว โดยเส้นใยถูกดึงออกจากหัวรีด และถูกม้วนเก็บด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วของเส้นใยแก้ว ที่ถูกอัดออกจากหัวรีด ซึ่งเท่ากับเป็นการยืดดึงในขณะที่เส้นใยยังอ่อนตัว ได้เส้นใยขนาด เล็กก่อนการแข็งตัว เส้นใยยาวนี้มักนิยมใช้ทำผ้าม่าน หากต้องการทำเป็นเส้นใยสั้น ก็จะถูกตัดด้วยแรงลมให้มีความยาวแตกต่างกันออกไป ซึ่งนิยมนำไปทำผลิตภัณฑ์เทปหรือผ้า ในงานอุตสาหกรรมเพื่อป้องกันเสียง อุณหภูมิและไฟ [4]

โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทใยแก้วออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

1. A glass (Alkali) ใช้สำหรับงานที่ต้องการทนสารเคมีเป็นค่า
2. C glass (Chemical) ใช้สำหรับงานที่ต้องการทนสารเคมี ที่เป็นกรดและกัดกร่อน
3. E glass (Electrical) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรง และเป็นฉนวนป้องกันไฟฟ้าได้ดี
4. S glass (High Strength) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรง สูง กว่าชนิด E

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติของเส้นใย แก้วชนิด S-Glass และ E-Glass [4]

ชนิดของ เส้นใยแก้ว	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Thermal Conductivity (W/m.K)
S-Glass	2500	89	4590	5.7	1.45
E-Glass	2620	81	3450	4.9	1.3

ใยแก้วแบ่งตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

1. ใยแก้วชนิดฝืนเส้นสั้น (Chopped strands mat)

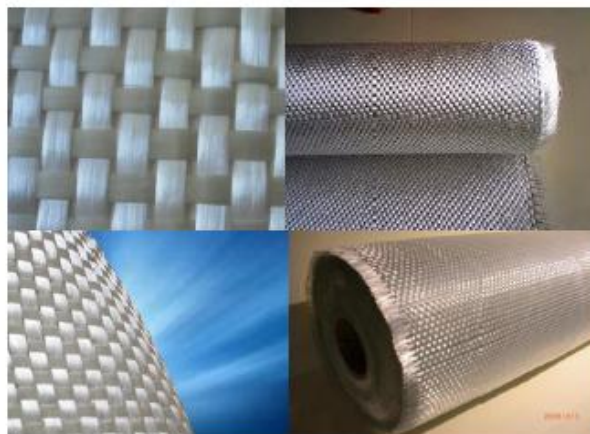
เป็นใยแก้วเส้นสั้นยาวประมาณ 1-2 นิ้ว โปรงลงบนพื้นแบบ กระจาย เกาะตัวโดยประสานกาว (Binder) มีสองแบบคือ แบบ Emulsion มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบแน่น เหมาะกับงานที่ต้องการ ความเรียบสม่ำเสมอ ไม่เคลื่อนตัว แบบ Powder มีลักษณะเป็นแผ่นเส้นใยทอแบบหลวม เหมาะกับงานที่ต้องเข้าซอกมีมุมและซอกมากขนาดเรียกตามน้ำหนักต่อ ตารางเมตร มีขนาด 100, 200, 300, 450, 600 และ 900 กรัม/ตารางเมตร ใช้กับงานเส้นใยทั่วไป [4]



รูปที่ 2.1 เส้นใยแก้วแบบผืน [7]

2. ใยแก้วตาสาน (Wove roving)

เป็นใยแก้วเส้นยาวทอเป็นผืน เป็นรูปตาสาน 90 องศา น้ำหนัก 400, 600, 800, 900, 1,000 และ 1,200 กรัม/ตารางเมตร ช่วยรับแรงเสริมกำลังให้สูงขึ้น ในทิศทางของเส้นใยแก้ว (2 ทิศทาง) [8]



รูปที่ 2.2 เส้นใยแก้วตาสาน [7]

3. โยแก้วผ้าทอ (Glass fabrics, glass cloth)

เป็นโยแก้วแบบที่ทอเป็นผืนผ้า เนื้อแน่นมีขนาด 30, 60, 90, 100, 160, 200 และ 400 กรัม/ตารางเมตร ช่วยรับแรงกำลังได้ดีสามารถทำชิ้นงานได้เบาและบาง [8]



รูปที่ 2.3 เส้นโยแก้วผ้าทอ [7]

4. โยแก้วเส้นด้าย (Roving)

เป็นโยแก้วเส้นยาวตลอดทั้งม้วน เรียกเบอร์ตามน้ำหนัก/ความยาว 1 กิโลเมตร. เช่น TEX1200 = เส้นโยแก้วความยาว 1 กิโลเมตร. น้ำหนัก 1200 กรัม มีทั้งขนาดเบอร์ 1200, 2400, 4800 เป็นต้น และโยแก้วเส้นสั้นแบ่งตามลักษณะการใช้งานดังนี้

- แบบพั่น Spray up Roving ใช้กับเครื่องพั่นโยแก้ว นิยม ใช้เบอร์ 2400
- แบบพั่น Filament Roving ใช้ในการพั่นท่อ ทาถังน้ำ กับ เครื่องพั่น นิยมใช้เบอร์ 600, 800, 1200 2200, 2400, 4800 จุดสังเกตเส้นโยมีการอัดทวน เส้นโยไม่แตกเป็นเส้นฝอย
- แบบดิ่ง Pultrusion Roving ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ ดิ่งยาว นิยมใช้เบอร์ 2400, 4800
- แบบ SMC (sheet molding compound) ใช้ทาแผ่น SMC นิยมใช้เบอร์ 2400
- แบบ PANEL (corrugated sheet) ใช้ทาหลังคาโปร่งแสง นิยมใช้เบอร์ 2400 มีสมบัติรับแรงดิ่งในแนวยาวได้ เป็นอย่างดี [9]



รูปที่ 2.4 เส้นใยแก้วเส้นด้าย [7]

5. ใยสานแบบเย็บติด (Stitch Mat)

เป็นใยแก้วแบบพันเย็บด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ตลอดทั้งผืน เวลานำไปใช้งานแล้วเส้นใยแก้วจะไม่เคลื่อนตัว ใช้สำหรับงานที่มีการรับแรงสูงแทนที่ใยแก้วตาसानหรือใยแก้วผืนธรรมดาได้ แต่ในเมืองไทยไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กัน



รูปที่ 2.5 ใยสานแบบเย็บติด [8]

6. โยแก้วผิว (Surfacing mat)

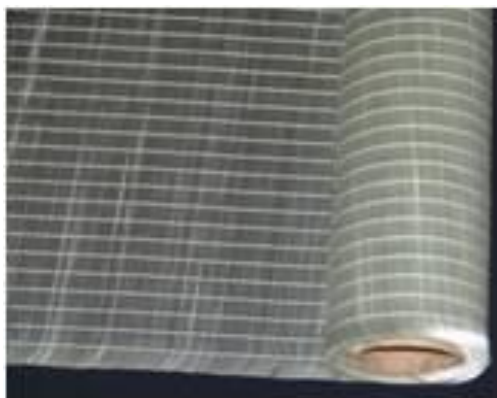
เป็นโยแก้วแบบพื้นบางเหมือนกระดาษทึบ มีขนาดน้ำหนัก 20 30 50 กรัม/ตารางเมตร ช่วยยึดเกาะผิวชั้นเจล ใต้อากาศให้แข็งแรงขึ้น และช่วยลดปริมาณฟองอากาศของชั้นเจลใต้อากาศกับโยแก้วได้ [8]



รูปที่ 2.6 โยแก้วผิว

7. โยแก้วแบบทิศทางเดียว (Unidirection Mat)

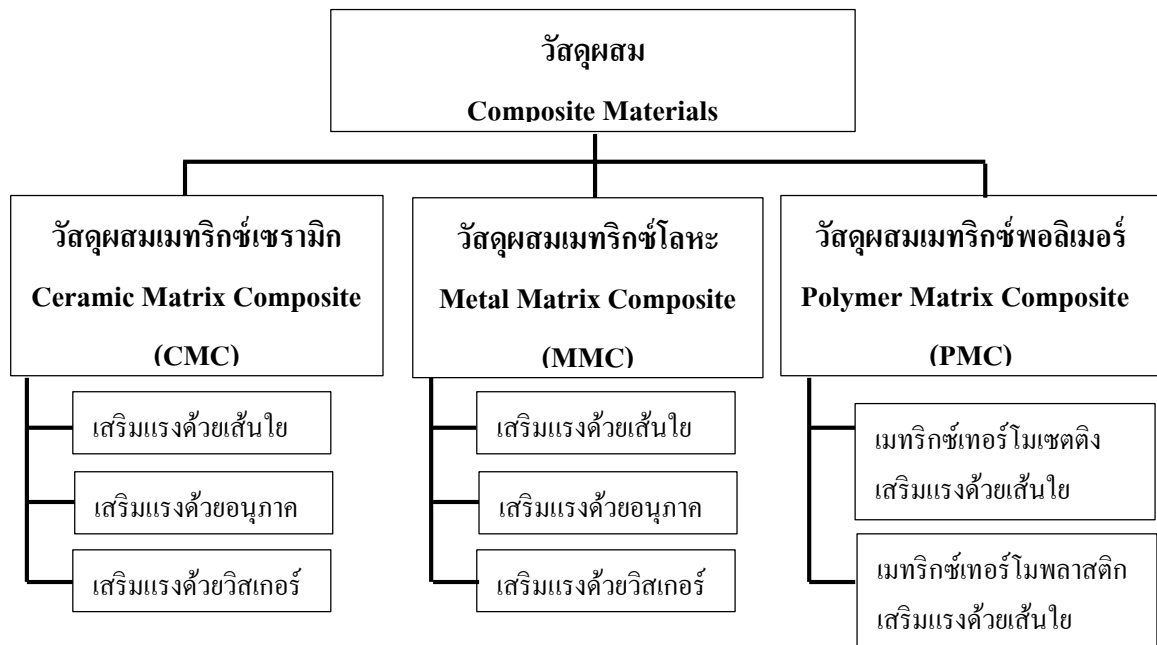
เป็นโยแก้วเส้นยาวเรียงเป็นแถวในแนวเดียวกันตลอดทั้งผืน เย็บติดกันด้วยเส้นด้าย Polyester เรียงตัวแบบแนวยาวหรือแนวตรง ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรงดึงสูงๆ ในแนวยาว



รูปที่ 2.7 โยแก้วแบบทิศทางเดียว [8]

2.1.2 เมทริกซ์ (Matrix)

วัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Matrix Composite, PMC) โลหะวัสดุคอมโพสิต (Metal Matrix Composite, MMC) และ เซรามิกวัสดุคอมโพสิต (Ceramic Matrix Composite, CMC) [5] โดยทั่วไปแล้วมักมีความเหนียวที่ดี ทำหน้าที่หลักคือยึดสารเสริมแรงไว้ด้วยกัน และเป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากกระทำไปยังสารเสริมแรง นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของสารเสริมแรง เนื่องจากการขัดถูหรือปฏิกิริยาเคมีแรงของพันธะที่ยึดติด (adhesive bonding force) ระหว่างสารเสริมแรงกับเมทริกซ์ควรมีค่าสูงพอ เพื่อป้องกันการที่สารเสริมแรงจะถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์ [6]

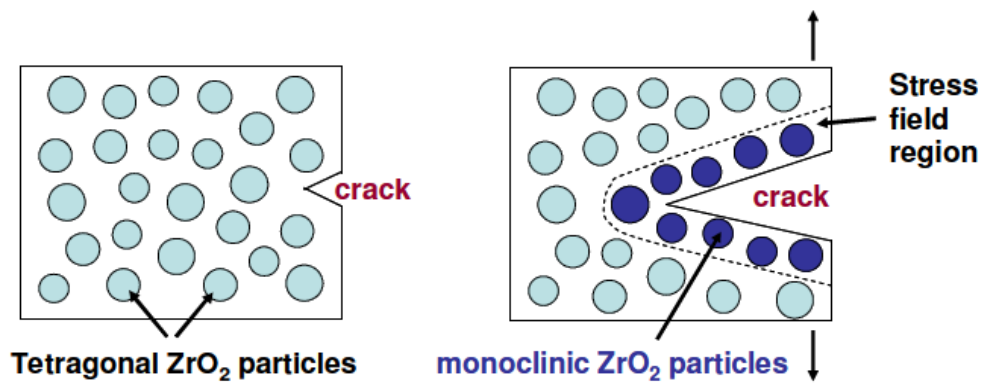


รูปที่ 2.8 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง

1 วัสดุผสมเมทริกซ์เซรามิก (Ceramic Matrix Composite, CMC)

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการ ใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก เซรามิกจึงถูก นำมาใช้ในงานที่ต้องการความทนต่ออุณหภูมิสูง และในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียของ เซรามิก คือ เปราะและแตกหักง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้ การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติ ให้วัสดุผสมมีความเหนียวและทนทานมากขึ้น ซึ่งสารเสริมแรง

จะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตก ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุผสมได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยสารเสริมแรง โดยเกิดจากสมบัติที่เรียกว่า ความเหนียวแบบเทียม (Pseudoductile) สำหรับเมทริกซ์เซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะและแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังรูปที่ 2.9 สารเสริมแรงที่ใช้ในการเสริมแรงอาจอยู่ในรูปอนุภาค เส้นใยหรือวิสเกอร์ ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ และคาร์บอน เป็นต้น และสำหรับเนื้อเมทริกซ์เซรามิก ได้แก่ ซีเมนต์ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น [5]



รูปที่ 2.9 การเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงานด้วยอนุภาค PSZ [12]

2. วัสดุผสมเมทริกซ์โลหะ (Metal Matrix Composite, MMC)

วัสดุผสมเมทริกซ์โลหะ มีโลหะผสมเป็นเนื้อหลัก ส่วนวัสดุที่ทำหน้าที่เสริมแรงนั้นสามารถเป็นได้ทั้งอนุภาคหรือ เส้นใยทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการขึ้นรูป และสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้สารเสริมแรงอนินทรีย์และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิก หรือสารเสริมแรงโลหะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง [5] ไม่ดีไปกว่าว่ามีราคาแพง ดังนั้น มักถูกนำไปใช้ในงานเฉพาะที่ต้องการ สมบัติเด่นทางด้านความแข็งแรง จำเพาะ ความต้านทานการสึกหรอ การนำความร้อน หรือความเสถียรของขนาด (Dimensional stability) เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน วัสดุผสมเมทริกซ์โลหะ เช่น ใช้อลูมิเนียม อัดลวยเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเพื่อทำยานยนต์ หรือใช้อลูมิเนียมอัดลวยขึ้น สูงเสริมแรงด้วยอนุภาคโบรอนเพื่อทำเป็นกระสวยอวกาศหรือยานอวกาศ เป็นต้น [6]

3. วัสดุผสมเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite, PMC)

สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถ แบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์

3.1 เมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix)

เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว มีสมบัติเหนียวและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม พฤติกรรมเชิงความร้อนนี้จะส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปของวัสดุผสม โดยวัสดุผสมจะใช้หลักการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว และขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อให้เกิดการคงรูป ซึ่งหลังจากที่วัสดุผสมคงรูปแล้วเมื่อได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก การจะเลือกใช้เมทริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

3.2 เมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix)

โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห (Cross-linked) และมีสมบัติแข็งเปราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุล สำหรับเมทริกซ์เทอร์โมเซตติงจะทำการขึ้นรูปวัสดุผสมโดยทำการผสมสารเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ ก่อนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงโครงสร้างแบบร่างแห ด้วยการให้ความร้อนหรือให้ความร้อนและความกดดัน นอกจากนี้อาจจะเกิดการเชื่อมขวางได้โดยปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิห้องและหลังจากที่ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง วัสดุผสมจะเกิดการคงรูปซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก [5] ข้อเสียเปรียบของเทอร์โมเซตติงคือไม่สามารถนำเศษพลาสติกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไปรีไซเคิลและนำไปใช้ใหม่ได้

โดยทั่วไปข้อได้เปรียบของเทอร์โมเซตติงพลาสติกสำหรับการใช้งานทางวิศวกรรมสามารถพิจารณาจากสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างดังต่อไปนี้

1. มีความเสถียรต่อความร้อนสูง
2. มีความแข็งแรงสูง โค้งงอได้ยาก
3. มีความเสถียรเชิงมิติสูง
4. มีความทนทานต่อการเกิดคืบและการเปลี่ยนรูปภายใต้การใช้งาน
5. มีน้ำหนักเบา
6. มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

สำหรับสมบัติทางกลของวัสดุนั้นยังมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ต่อการนำวัสดุไปใช้งาน เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้งานพลาสติก ในการทำผลิตภัณฑ์ใดก็ตามผลิตภัณฑ์เหล่านั้นย่อมที่จะต้องมีการรับแรงกระทำไม่มากนักน้อย ซึ่งการที่ผู้ออกแบบทราบถึงคุณสมบัติทางกลของพลาสติกที่จะนำมาใช้งานจะช่วยให้สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและสามารถเลือกนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมปลอดภัย สมบัติเชิงกลของเทอร์โมเซตพลาสติก ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของเทอร์โมเซตพลาสติกสูงกว่าวัสดุพลาสติกโดยทั่วไปเล็กน้อย โดยความหนาแน่นจะอยู่ในช่วง 1.34-2.3 g/cm³ ความทนทานแรงดึง (Tensile strength) ของเทอร์โมเซตส่วนมากจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะอยู่ในช่วงจาก 4,000-15,000 psi (28-103 MPa) แต่ถ้ามีปริมาณของใยแก้วเข้าไปผสม ความทนทานแรงดึงของ เทอร์โมเซตสามารถเพิ่มได้สูงถึง 30,000 psi (201 MPa) เทอร์โมเซตที่มีใยแก้วผสมยังให้ความทนทานต่อการกระแทก (impact strength) สูงอีกด้วย เทอร์โมเซตยังมีค่าความทนทานของไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) สูง โดยอยู่ในช่วง 140-650 V/mil แต่อย่างไรก็ตาม เทอร์โมเซตมีขีดจำกัดในการใช้อุณหภูมิเหมือนพลาสติกทั่วไปซึ่งอยู่ในช่วง 77-228 °C [10] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเมทริกซ์เทอร์โมเซตดึงโดยใช้เทอร์โมเซตพลาสติกอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) เป็นเนื้อเมทริกซ์

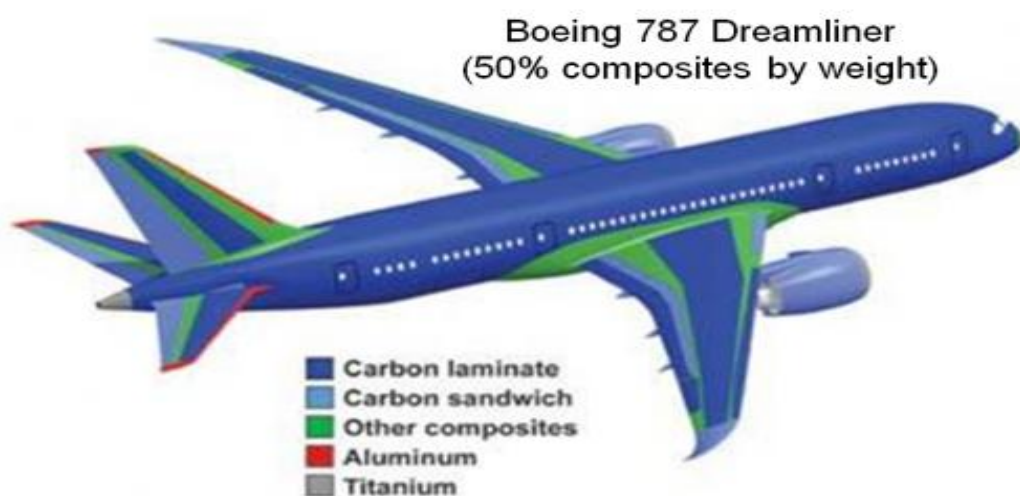
2.1.3 การประยุกต์ใช้วัสดุผสม

สมบัติของวัสดุผสมสามารถออกแบบได้จากองค์ประกอบของวัสดุ

- สัดส่วนระหว่างองค์ประกอบของวัสดุ
- ความเข้ากันได้ระหว่างองค์ประกอบของวัสดุ
- การเรียงตัวของสารเสริมแรง
- การกระจายตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์ เป็นต้น

การควบคุมปัจจัยเหล่านี้มีส่วนทำให้วัสดุมีสมบัติที่หลากหลาย นำไปใช้งานได้ทั้งงานทั่วไปจนกระทั่งเป็นวัสดุที่ใช้งานทางด้านเฉพาะที่ต้องการสมบัติที่พิเศษมากๆ เช่น ด้านอากาศยานและเครื่องยนต์ สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของวัสดุ จะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการขนส่งทางอากาศ เพราะถ้าน้ำหนักรวมของอากาศยานลดลง โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลจะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงในการขนส่งอย่างมาก และถ้าวัสดุที่ใช้มีความทนทานต่อการใช้งานจะมีประโยชน์ต่อการบำรุงรักษาในระยะยาว ในระยะเริ่มต้นวัสดุผสมถูกพัฒนามาเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับเครื่องบินทหาร, ดาวเทียม ต่อเนื่องมาจนถึงกระสวยอวกาศ และเครื่องบินพาณิชย์ในปัจจุบัน ทำให้สัดส่วนของวัสดุผสมต่อวัสดุอื่น ๆ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น

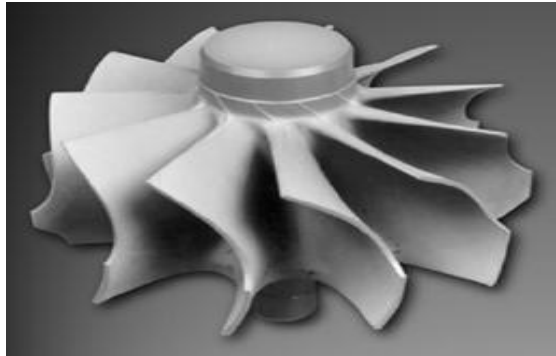
พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน ได้นำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักในโครงสร้างผิวของเครื่องบินทิ้งระเบิดรุ่นบี 2 (B2 Stealth bomber) ทำให้มีสมบัติพิเศษที่ยากแก่การถูกตรวจจับ [16] และใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 777 และ โบอิง 787 (รูปที่ 2.10) นอกจากนี้ พลาสติกเสริมแรงดังกล่าวนี้ยังนำมาใช้เป็นวัสดุทำตัวถังเครื่องบินพาณิชย์แอร์บัสเอ 380 ซึ่งเป็นเครื่องบินพาณิชย์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในปัจจุบัน



รูปที่ 2.10 วัสดุผสมพอลิเมอร์ที่ใช้ในเครื่องบินพาณิชย์โบอิง 787

การค้นคว้าวัสดุที่มีสมบัติทนต่อความร้อนสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดีเพื่อใช้ผลิตอวกาศยานกลายเป็นแรงผลักดันให้เกิดการพัฒนาวัสดุผสมโลหะขึ้น โดยเมทริกซ์อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ได้นำมาใช้แทนที่อะลูมิเนียมในการผลิตเครื่องบินรบเอฟ 16 ทำให้มีความทนทานต่อการใช้งานมากขึ้น [7, 8] ด้านเครื่องยนต์สำหรับอวกาศยานเช่น เครื่องยนต์กังหันแก๊ส จะผลิตจากวัสดุผสมโลหะซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถรักษาความแข็งแรงจำเพาะ ณ อุณหภูมิสูงได้

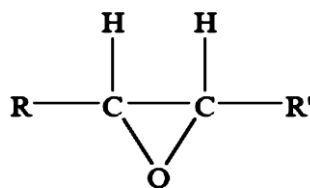
สำหรับเครื่องยนต์กังหันแก๊สบางรุ่น และท่อปล่อยแก๊สในเครื่องบินขนาดใหญ่อื่น ๆ อาจใช้วัสดุผสมเซรามิกเป็นวัสดุในการผลิต (รูปที่ 2.11) เช่น เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์เสริมแรงเมทริกซ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ [11, 12]



รูปที่ 2.11 วัสดุผสมเซรามิกที่นำมาใช้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

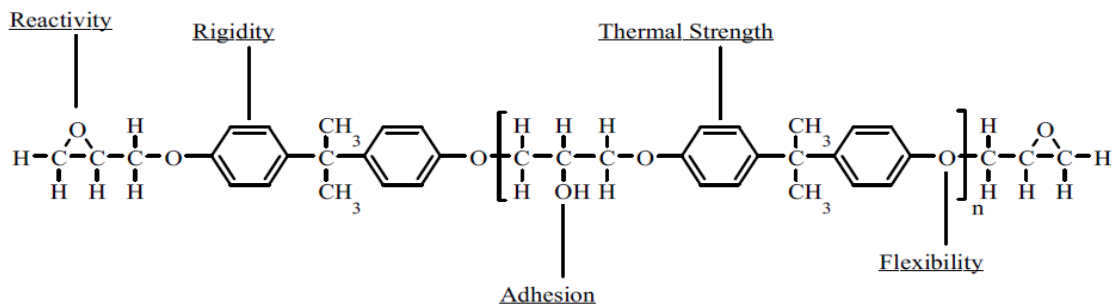
2.2 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)

อีพ็อกซีเรซิน เป็นส่วนประสานชนิดหนึ่งซึ่งเป็นพลาสติกเหลวมีลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไป ดังรูปที่ 2.12 กลุ่ม Epoxy ประกอบด้วย อะตอม 3 ชนิด ด้วยกันที่ประกอบขึ้นมาได้แก่ คาร์บอน 2 อะตอม และ ออกซิเจน 1 อะตอม



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทั่วไปของอีพ็อกซีเรซิน

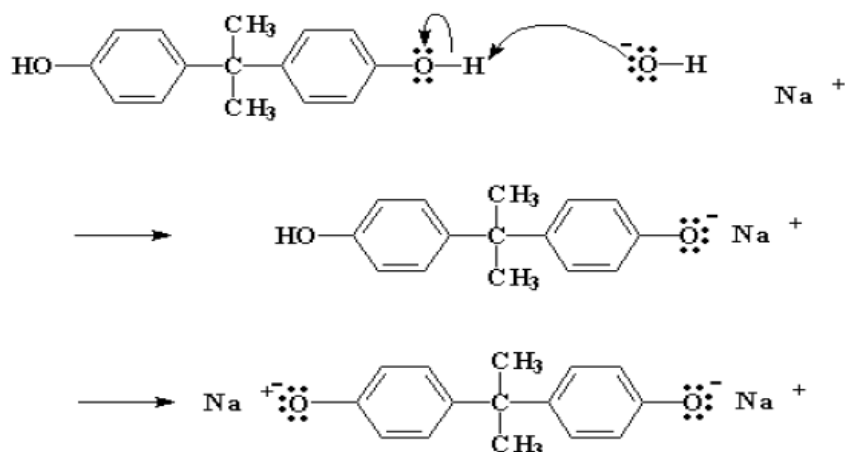
ในการสร้างวัสดุเทอร์โมเซตติงที่เป็นของแข็งอีพ็อกซีเรซินจะถูกบ่มด้วยการใช้สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Cross-link) ให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ กลุ่มอีพ็อกซีหรือไฮดรอกซิล (-OH) เป็นตำแหน่งที่จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง อีพ็อกซีเรซินที่ยังไม่ผ่านกระบวนการบ่มจะมีมวลโมเลกุลต่ำและมีสภาพเป็นของเหลวโดยมีการเคลื่อนที่โมเลกุลสูง (High molecular mobility) ซึ่งสมบัตินี้ทำให้อีพ็อกซีเรซินเป็นตัวช่วยทำให้พื้นผิวเปียกได้ดีและเร็ว สมบัติช่วยทำให้เปียก (Wetting action) นี้เป็นจุดเด่นที่สำคัญของอีพ็อกซีเรซินที่ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงและใช้ทำกาว (Adhesives) อีพ็อกซีเรซินสามารถทำให้ไหลได้จึงนำมาใช้สำหรับหล่อหุ้มอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆได้ เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์เป็นกลุ่มที่ว่องไวต่อการเกิดการเชื่อมขวาง กับพวกรสชาติที่จับม เช่น พวอะมีน จึงทำให้อีพอกซีแข็งดีมาก มีความแข็งแรงและทนทานต่อสารเคมี ประกอบกับการเกิดปฏิกิริยาแข็งตัวนี้ไม่มีผลพลอยได้เกิดขึ้น จึงทำให้อีพอกซีเรซินมีการหดตัวน้อยในระหว่างทำให้แข็งตัว [13] อีพ็อกซีเรซินชนิด Glycidated bisphenol A เป็นชนิดที่นิยมนำมาใช้งานกันมากที่สุดดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงคุณสมบัติของ Epoxy จากกระบวนการเกิดใน Thermosetting โดยการเลือกใช้อีพ็อกซีเรซินและสารบ่ม นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งานและลักษณะที่สัมผัสได้ (Viscosity, Pot life, Gel time) อุณหภูมิและเวลาในการบ่มคุณสมบัติที่ใช้ เช่น สมบัติทางกล, ทางเคมี, ทางความร้อนและการนำไฟฟ้าความเป็นพิษและข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมรวมถึงต้นทุนด้วย



รูปที่ 2.13 โครงสร้างคุณสมบัติของอีพ็อกซีเรซิน จากกระบวนการ Thermosetting [13]

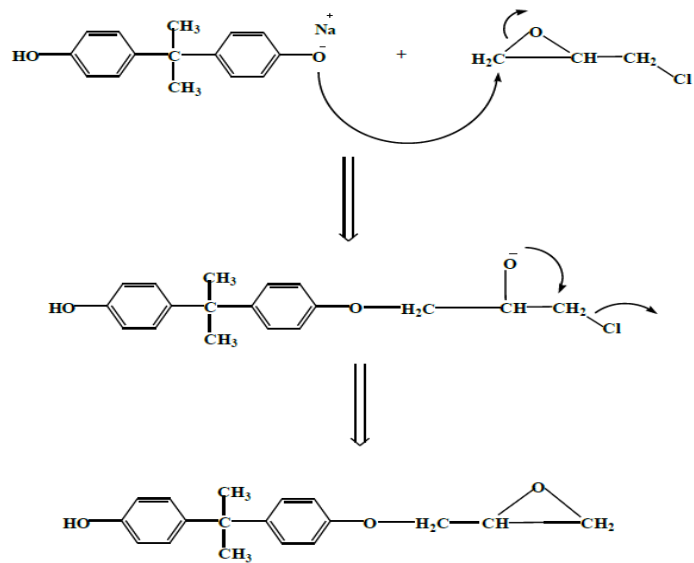
2.2.1 การสังเคราะห์อีพ็อกซีเรซิน [14]

โดยทฤษฎีแล้วอีพ็อกซีเรซินจะได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซี 2 หมู่ (Di-hydroxy compound) กับสารประกอบที่มีหมู่อีพอกไซด์ 2 หมู่ (Di-epoxide) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่าจะนิยมใช้สารประเภท Epichlorohydrin ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในลักษณะเดียวกันกับ Di-epoxide โดยในการทำปฏิกิริยาจะมีการใช้สารที่มีฤทธิ์เป็นเบสเติมลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่นการใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะแตกตัวให้หมู่ (OH⁻) มาทำปฏิกิริยากับสารประกอบ Di-hydroxy compound (เช่น Bis-phenol A) เกิดเป็นอัลคอกไซด์ไอออน (Alkoxide ion) ดังสมการเคมีที่แสดงในรูปที่ 2.14



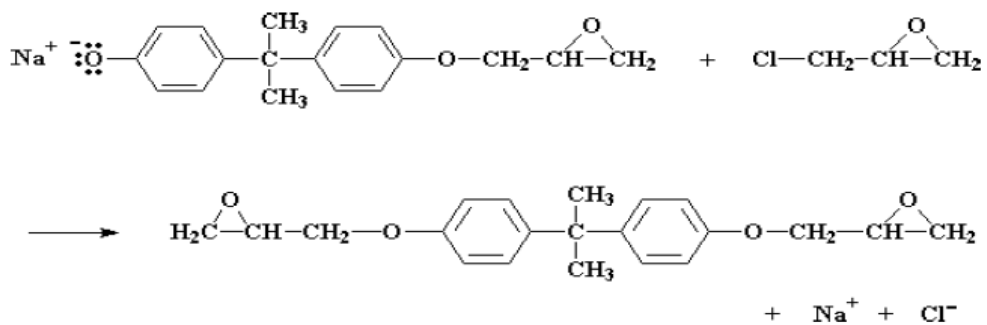
รูปที่ 2.14 แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Bis-phenol A กับ NaOH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาขั้นแรกในการสังเคราะห์อีพ็อกซี

จากนั้นอัลคอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับ Epichlorohydrin ตรงบริเวณตำแหน่งของอะตอม คาร์บอนที่มี ความเคะกะน้อยที่สุด ตามด้วยการปฏิกิริยาการปิดวงแหวนอีพ็อกซีอีกครั้งหนึ่งโดยมีการไล่อะตอมของคลอรีน ออกจากโมเลกุลในรูปของไอออนลบของคลอไรด์ (รูปที่ 2.15)



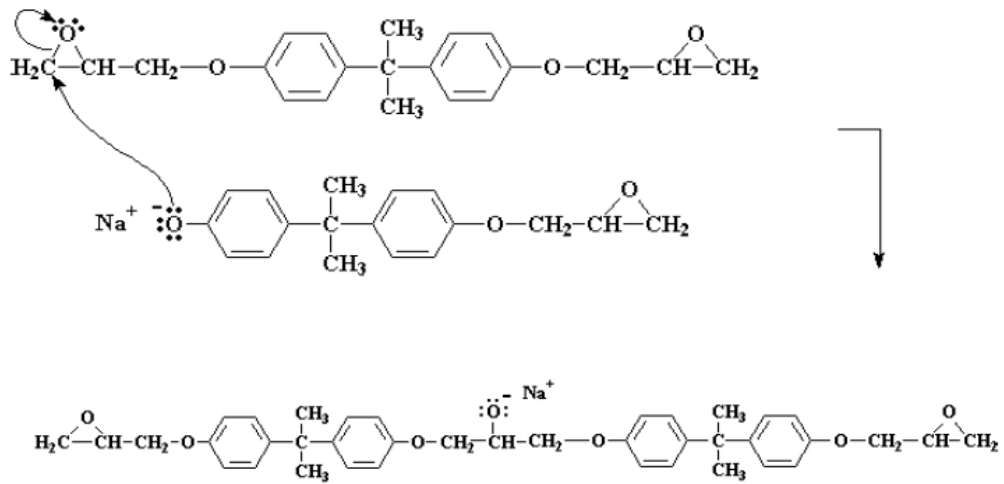
รูปที่ 2.15 แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับอัลคอกไซด์ไอออน

ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุลสามารถเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 2.16



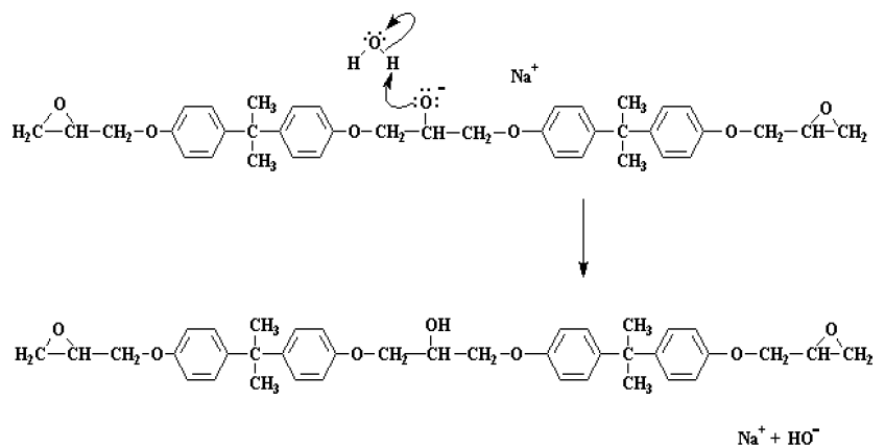
รูปที่ 2.16 แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับอัลคอกไซด์ไอออนที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล

ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีหมู่เอพ็อกไซด์อยู่ที่ปลายโมเลกุลซึ่งมีโครงสร้างคล้าย Epichlorohydrin ดังนั้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อกับอัลคอกไซด์ไอออน ดังรูปที่ 2.33 และเนื่องจากในการทำปฏิกิริยาจะมีน้ำปนอยู่ด้วย



รูปที่ 2.17 แสดงปฏิกิริยาระหว่าง Alkoxide anion กับ ไดเมอร์

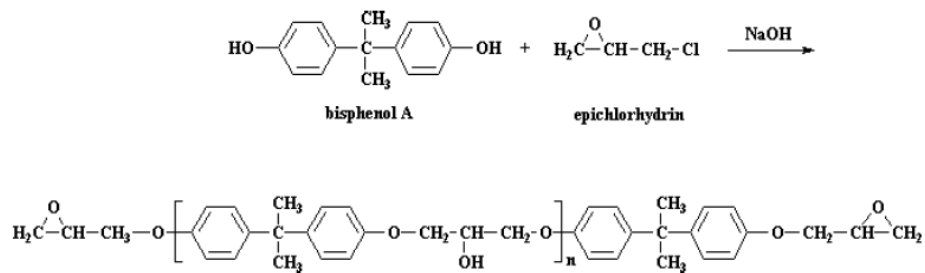
ประจุลบขึ้นในโมเลกุลฟีนอลิเมอร์ของอีพ็อกซีซึ่งเกิดปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลตรงกลางโมเลกุลปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพอกไซด์ที่ปลายโมเลกุลของสารข้างต้นกับหมู่ไฮดรอกซิลของสารประกอบ (Dihydroxy compound) ในลักษณะคล้ายกับ



รูปที่ 2.18 แสดงปฏิกิริยาระหว่างประจุลบของอีพอกไซด์กับโมเลกุลของน้ำ

การเกิดปฏิกิริยาควบแน่นทำให้ได้โมเลกุลที่ยาวขึ้นจนกระทั่งสารตัวใดตัวหนึ่งถูกใช้หมดไป ปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จึงยุติชั่วคราว ดังนั้นปฏิกิริยาโดยรวมของการสังเคราะห์พรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซีสามารถเขียนอย่างย่อได้ดังนี้

โดยเมื่อ n มีค่าประมาณ 20-30 พรีพอลิเมอร์ที่ได้จะเริ่มมีลักษณะเป็นของแข็ง [2]



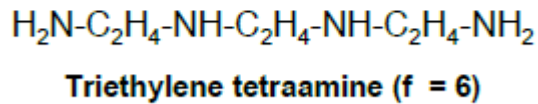
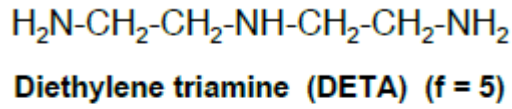
รูปที่ 2.19 แสดงปฏิกิริยาโดยรวมของการสังเคราะห์พรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซี

ประเด็นสำคัญของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้คือการควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยน้ำของสาร Epichlorohydrin หรือปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับ หมู่ไฮดรอกซีที่อยู่ตรงกลางสายโซ่ของพอลิเมอร์ และปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับสารปนเปื้อน ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีผลทำให้โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของพรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซีเปลี่ยนไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการควบคุมปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้จะทำโดยการใช้อุณหภูมิในช่วงประมาณ 50-95 องศาเซลเซียส

2.2.2 การทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (Cross-linking)

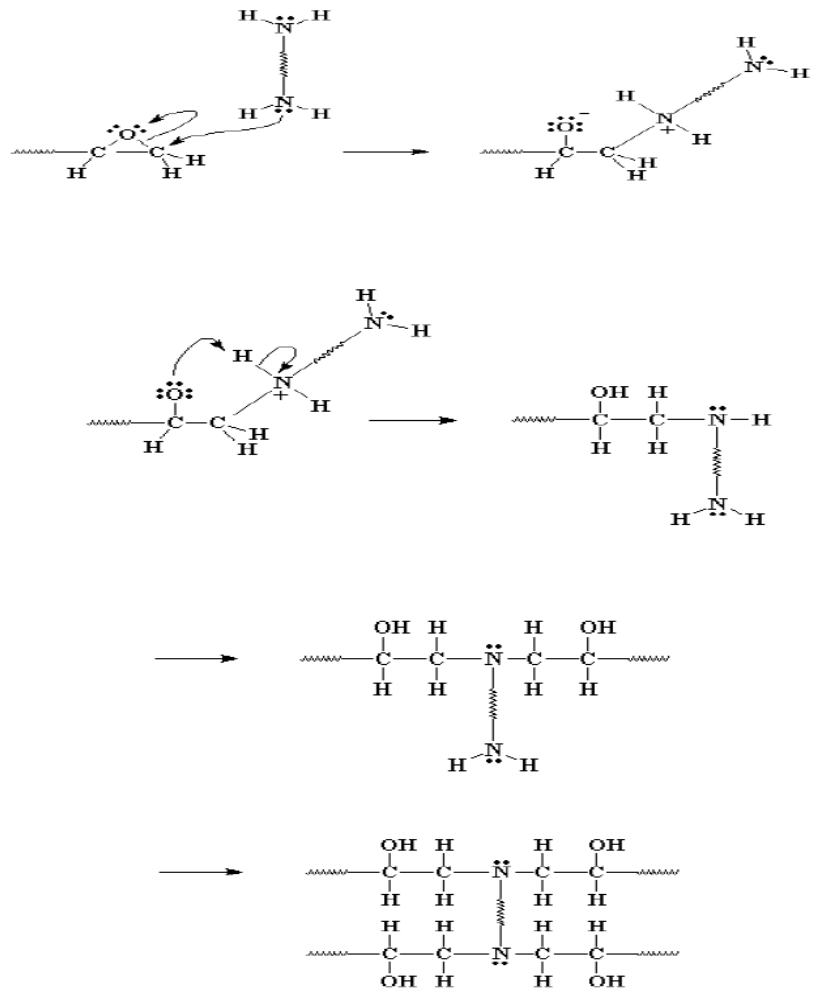
จากพรีพอลิเมอร์ที่ได้ ปฏิกิริยาขั้นต่อไปคือการขึ้นรูปและทำให้พรีพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลดังกล่าวนี้สามารถทำให้เกิดได้ทั้งที่ตำแหน่งหมู่อีพ็อกซีที่ปลายโมเลกุลและที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซีในบริเวณตรงกลางสายโซ่ของพรี-พอลิเมอร์

การทำปฏิกิริยาที่หมู่อีพ็อกซีจะใช้สารประกอบเอมีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (หรืออาจเรียกว่าสารที่ทำให้แข็งตัว [hardener]) ซึ่งสารเอมีนที่ใช้จะมีหลายประเภท เช่นสารประกอบเอมีนที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล (Poly-functional amines) ตัวอย่างเช่น Diethylene triamine และ Triethylene tetraamine ดังแสดงในรูปที่ 2.20



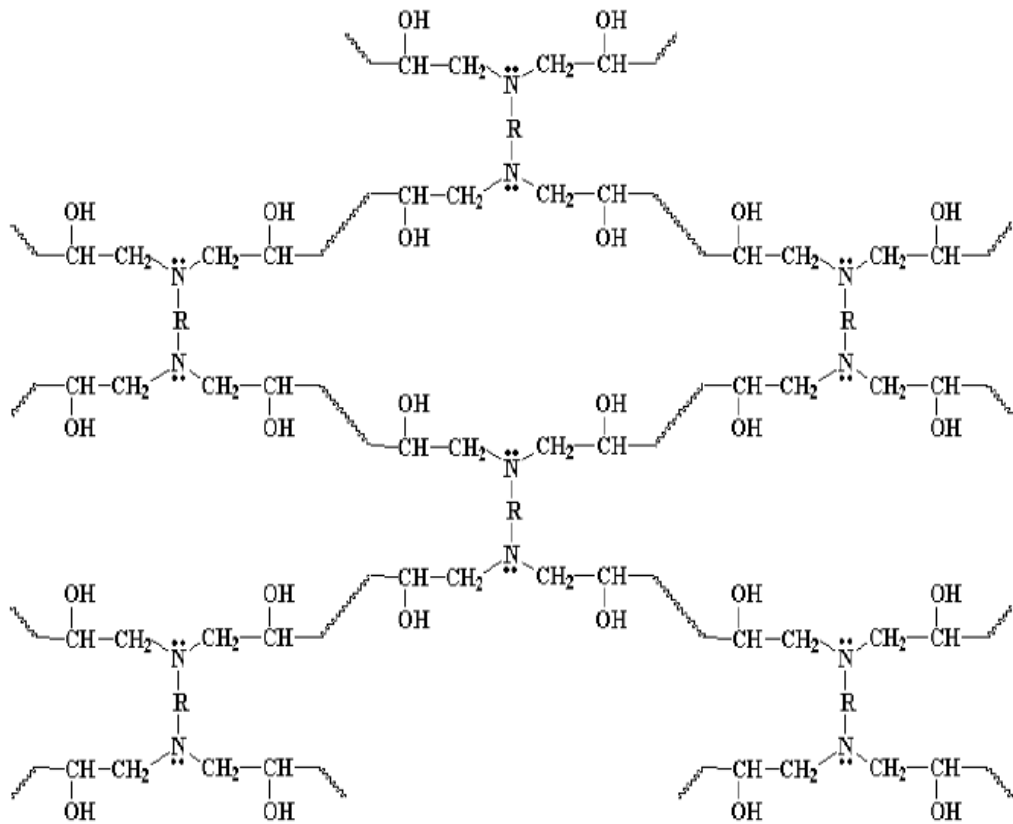
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของ Poly-functional amines

โดยที่สาร Poly-functional amine ที่ใช้อาจจะเป็นได้ทั้งสารประกอบเอมีนแบบปฐมภูมิ (Primary amine) และสารประกอบเอมีนแบบทุติยภูมิ (Secondary amine) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สารประกอบ เอมีนแบบปฐมภูมิจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า ตัวอย่างเช่น การใช้สารประกอบเอมีนประเภท DETA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าจะสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเกิดได้ช้าลงเพื่อที่จะได้มีเวลาในการทำงาน (Pot life) นานขึ้นอาจจะใช้สารประกอบเอมีนที่มีสัดส่วนของเอมีนแบบปฐมภูมิลดลง ซึ่งจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง สำหรับกลไกการทำปฏิกิริยาในกรณีที่ใช้สารประกอบเอมีนประเภท Poly-functional amine สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสาร Poly-functional amine กับ ฟรีพอลิเมอร์

มีข้อสังเกตว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 2.21 จะแสดงเฉพาะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับหมู่เอมีนที่ปลายโมเลกุลของสารประกอบเอมีน แต่ในความเป็นจริงแล้วกลไกการเกิดปฏิกิริยาอาจจะซับซ้อนมากกว่านี้ เนื่องจาก หมู่เอมีนที่อยู่ตรงกลางของโมเลกุลของสารประกอบเอมีนดังกล่าว อาจจะเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกัน ซึ่งในที่สุดแล้วจะได้โมเลกุลของอีพ็อกซีที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห โดยมีโครงสร้างอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดง โครงสร้างแบบร่างแหของอีพ็อกซี

นอกจากนั้น สารอีพ็อกซีเรซิน อาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโดยผ่านกลไกแบบเปิดวง (Ring Opening Polymerization) ที่หมู่อีพ็อกซี โดยใช้กรดลิวอิสหรือสารเอมีนแบบตติยภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.3 การใช้งานอีพ็อกซีเรซิน

อีพ็อกซีได้รับการนำมาใช้ในงานหลายประเภท เช่น วัสดุก่อสร้าง วัสดุผสม (Composites) สีทาอาคาร เคลือบพื้นอาคาร ชิ้นส่วนเครื่องมืออุตสาหกรรม ส่วนประกอบในสารกึ่งตัวนำและวงจรไอซี ส่วนประกอบในการผลิต Fiber-reinforced plastic ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีกับไฟเบอร์ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน หรือใช้เป็นกาวหรือสารยึดติด (Adhesives) คุณสมบัติที่ดีของ อีพ็อกซี คือ คุณสมบัติเชิงกลที่ดี ความสามารถในการประสานและยึดติด ความคงทนต่อสารเคมีและความร้อน การเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้อีพ็อกซีถูกนำไปใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

1. สีและสารเคลือบพื้นผิว สีอีพ็อกซีและสารเคลือบ พื้นผิวของอาคาร พื้นอาคารพื้นโรงงาน พื้นบ้านเครื่องซักผ้า เครื่องอบผ้า ท่อส่งน้ำมันและแก๊ส รถยนต์และเรือ เพื่อป้องกันการรั่วซึม ป้องกันความชื้น ฝุ่น สารเคมี การขูดขีดและการเสียดสี แต่ไม่ทนต่อรังสียูวี นอกจากนี้ยังใช้เคลือบกันสนิมกระป๋องและภาชนะบรรจุอาหารที่ทำจากโลหะ

2. ชิ้นส่วนเครื่องมือและวัสดุผสมในงานอุตสาหกรรมในงานอุตสาหกรรมอีพ็อกซีใช้เป็นทั้งแบบหล่อในการผลิตเครื่องมือต่างๆ ในงานอุตสาหกรรมแทนแบบหล่อที่เป็นโลหะหรือไม้ และยังใช้เป็นวัสดุผสมในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีความแข็งแรงและทนอุณหภูมิสูง เนื่องจากสามารถทำให้เป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นได้หรือแข็งเกร็งได้ ทำให้ใสไม่มีสี, มีสี หรือโปร่งแสงได้

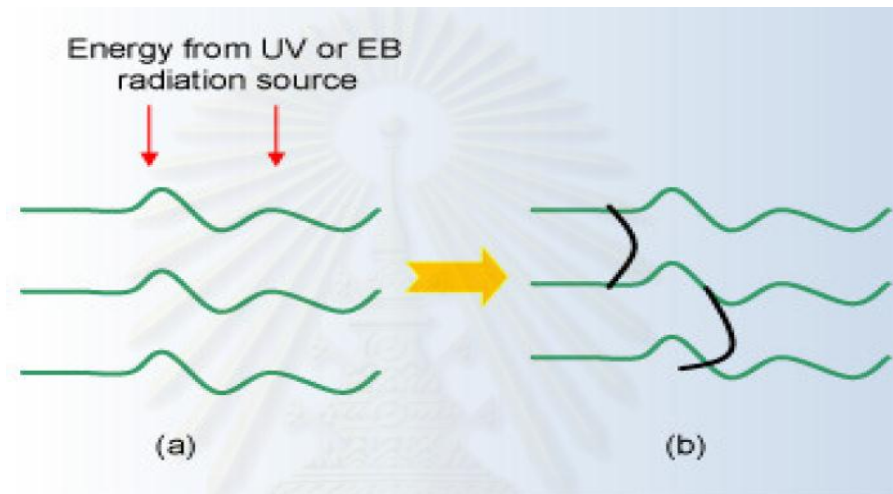
3. ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อีพ็อกซีเรซินถูกนำมาใช้ในการผลิตมอเตอร์ หม้อแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และฉนวนต่างๆ

4. กาวหรือสารยึดติด กาวอีพ็อกซีหรือที่เรียกว่า Two-Component Epoxy (Two Part Epoxy หรือ Two- Component Thermosetting Adhesives) จัดเป็นกาวหรือสารยึดติดที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับ โพลียูรีเทน อะคริลิก และซายา โนอะคริเลต ซึ่งใช้ในการผลิตเครื่องบิน ยานยนต์จักรยาน เรือไม้ติกอล์ฟ สกี สโนว์-บอร์ด และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการความแข็งแรงในการยึดติดสามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นกาวยึดติดผนังกรวยแตกกร้าว, รอยร้าวซึม, ยานนาว, ปูกระเบื้อง ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท ทั้งไม้ โลหะ (อะลูมิเนียม สังกะสี) คอนกรีต ไฟเบอร์กลาส สุขภัณฑ์ กระเบื้อง แก้ว หิน และพลาสติกบางชนิด และสามารถอยู่ตัวได้เร็วในเวลาเป็นนาทีหรือชั่วโมง อีพ็อกซีเป็นสารยึดติดที่ทนความร้อนและสารเคมีดีกว่าสารยึดติดตัวอื่นๆ [4]

2.3 การบ่มด้วยรังสี

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการบ่มด้วยรังสี

โดยทั่วไปการบ่มเร่งปฏิกิริยาด้วยรังสี นั้นส่วนใหญ่ใช้งานเกี่ยวกับการเคลือบผิวและหมึกพิมพ์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้แสงอิเล็กตรอน, รังสีอัลตราไวโอเลต, แสงขาว หรือรังสีอื่นๆ ในการพอลิเมอไรซ์สารที่เป็นของเหลวโดยมีองค์ประกอบที่ว่องไวต่อการฉายรังสีทำให้เกิดการเชื่อมขวางได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กลไกการบ่มเรซินปฏิกิริยาด้วยรังสี [15]

ต่อมาได้มีการปรับปรุงและประยุกต์ให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้กับกระบวนการผลิตที่มีความหลากหลายทางการใช้งานมากยิ่งขึ้น ทรายดีที่สามารถฉายรังสีไปยังกระบวนการผลิตได้ เช่น เทคนิคการขึ้นด้วยกระบวนการพัน (Filament winding), การขึ้นรูปด้วยมือ (Hard lay-up) และ การขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum infusion) เป็นต้น [16]

การบ่มด้วยเทคนิครังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นที่นิยมใช้มากประมาณ 90% และอีก 10% ที่เหลือเป็นการใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ส่วนการใช้แสงขาวนั้นพบน้อยมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ขอกกล่าวเฉพาะการบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต [15]

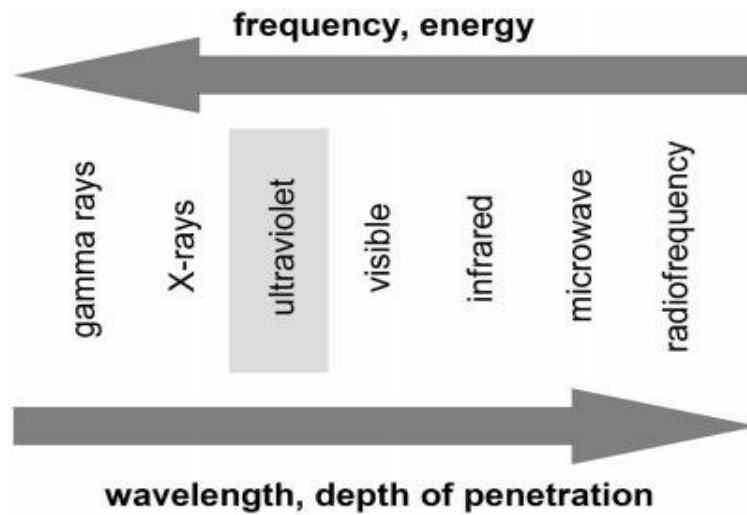
2.3.2 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation ; UV) [15]

รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 - 400 นาโนเมตร หรือช่วงต่อจากแสงสีม่วงอยู่ระหว่างรังสีเอ็กซ์ (X-rays) กับรังสีที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible light) ซึ่งสเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สเปกตรัมด้วยกัน ซึ่งได้แก่

1. UV-C มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 – 280 นาโนเมตร เป็นรังสีที่มีอันตรายต่อร่างกายได้อย่างรุนแรง เช่น ผิวแดงไหม้เกรียม หรือเยื่อบุตาอักเสบ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อ

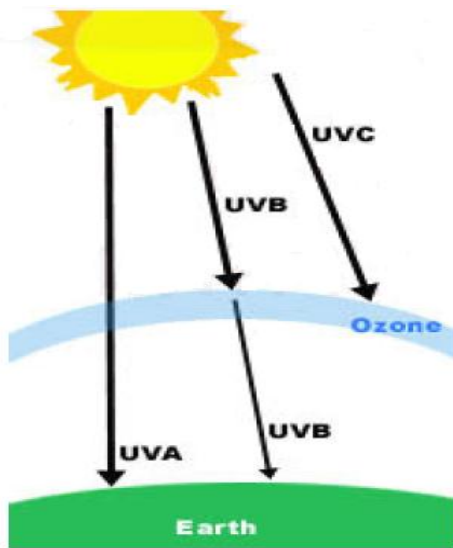
2. UV-B มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280 – 315 นาโนเมตร เป็นรังสีที่มีผลต่อร่างกายและสิ่งของได้ ก่อให้เกิดอาการไหม้ของผิวหนัง และมีการอักเสบของตาได้ แต่มีประโยชน์ในทางการแพทย์ เช่น รักษาโรคผิวหนังได้บางชนิด รวมถึงประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเคมี

3. UV-A มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 315 – 380 นาโนเมตร เป็นรังสีที่ไม่มีอันตรายมากนัก ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน โดยเฉพาะทางด้านเคมีและฟิสิกส์ โดยทั่วไปรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้น ความถี่จะสูง และรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวจะมีความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 2.24

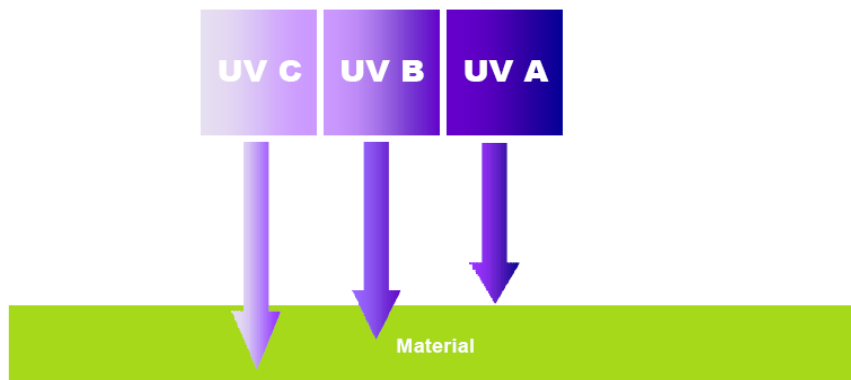


รูปที่ 2.24 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปริมาณความถี่.[16]

รังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถสร้างได้จากแหล่งพลังงานต่างๆ เช่น หลอดไฟ UV, หลอดแบล็คไลท์, หลอดชั้นแทน, หลอดฆ่าเชื้อ, หลอดคาร์บอนอาร์ค การเชื่อมโลหะและอุปกรณ์ในห้องทดลอง หรือในธรรมชาติ ดวงอาทิตย์คือแหล่งที่ผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งมีเพียง UV- B และ UV- A ที่สามารถผ่านโอโซนของโลกเข้ามาได้ ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากดวงอาทิตย์



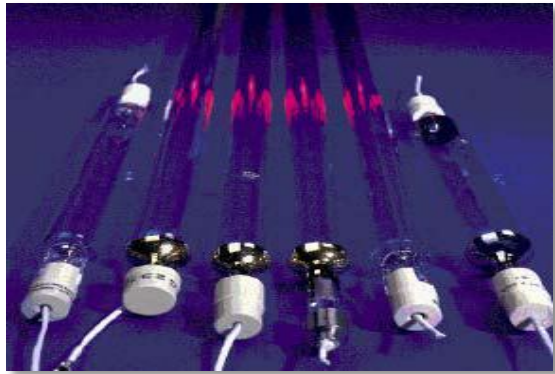
รูปที่ 2.26 แสดงการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

2.3.3 ชนิดของหลอดรังสี อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Lamps) [17]

แหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมาจากหลอดไฟที่ให้แสงในย่านความถี่รังสีอัลตราไวโอเล็ต ในปริมาณมากกว่าหลอดไฟปกติ ได้แก่ หลอดไอปรอทความดันปานกลาง หลอดซีนอนความดันสูง และหลอด Excimer ซึ่งเป็นหลอดพิเศษออกแบบให้ปล่อยเฉพาะความถี่คลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ต้องการเท่านั้น

1. หลอดไอปรอทความดันปานกลาง

- ขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1-2.5 kW
- ให้แสงในย่านความถี่อัลตราไวโอเล็ต ที่กว้าง
- เหมาะสำหรับใช้กับงานพิมพ์ทั่วไป



รูปที่ 2.27 หลอดไอปรอทความดันปานกลาง

2. หลอดเมทัลฮาไลด์

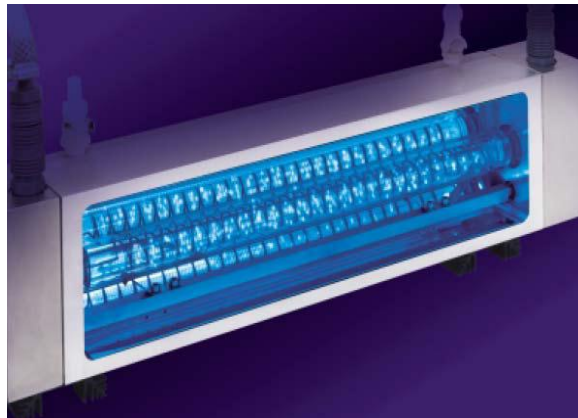
- ขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.4-8.0 kW
- ภายในหลอดมีการเพิ่มสาร Gallium และ Iron ทำให้ได้แสงในย่านความถี่อัลตราไวโอเล็ต ที่แคบลงสำหรับย่านความถี่ที่ใช้งาน
- เหมาะสำหรับใช้กับงานอบเคลือบฟิล์ม แผ่นเพลทและแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.28 หลอดเมทัลฮาไลด์

3. หลอด Excimer

- ขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.3-3.0 kW
- ให้แสงในย่านความถี่อัลตราไวโอเล็ต ที่แคบมากเฉพาะช่วงที่ใช้งาน
- เหมาะสำหรับใช้กับงานเคลือบผิวในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และงานพิมพ์



รูปที่ 2.29 หลอด Excimer

2.3.4 กลไกการบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต [15]

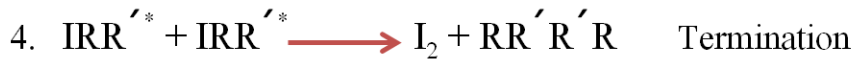
กลไกการบ่มด้วยรังสี UV ที่สำคัญมีอยู่ 2 กลไกด้วยกัน นั่นคือ

2.3.4.1 กลไกที่อาศัยการแตกตัวของอนุมูลอิสระ (Free Radical Mechanism)

กลไกที่อาศัยการแตกตัวของอนุมูลอิสระจะประกอบด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่ 4

ขั้นตอน ได้แก่

1. ขั้นตอนการเริ่มอนุมูลอิสระเริ่มปฏิกิริยา (Initiator Radical Formation)
2. ขั้นตอนการเริ่มปฏิกิริยา (Initiation)
3. ขั้นตอนการแพร่ของปฏิกิริยา (Propagation)
4. ขั้นตอนการสิ้นสุดปฏิกิริยา (Termination)



รูปที่ 2.30 กลไกการบ่มสารด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตโดยอาศัยการแตกตัวของอนุมูลอิสระ

สำหรับปฏิกิริยาในรูปที่ 2.30 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (I) และมอนอเมอร์ที่ว่องไวต่อการกระตุ้น (R, R') จะแตกตัวให้อนุมูลอิสระด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งจะกลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ในขั้นตอนการแพร่ของปฏิกิริยาทำให้พอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวต่อไป แต่ถ้าภายในระบบมีออกซิเจน โมเลกุลของออกซิเจนจะเข้าไปแย่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทำให้สารไม่แข็ง หรือได้สายโซ่พอลิเมอร์ที่สั้นส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล

2.3.4.2 กลไกที่อาศัยการแตกตัวของประจุบวก (Cationic Mechanism)

สำหรับกลไกที่อาศัยการแตกตัวของประจุบวก มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคล้ายคลึงกันกับกลไกที่อาศัยการแตกตัวของอนุมูลอิสระ เพียงแต่การอาศัยตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่แตกตัวให้ประจุบวกแทนการแตกตัวของอนุมูลอิสระ ข้อดีสำหรับกลไกนี้ก็คือไม่เกิดการหน่วงปฏิกิริยาโดยออกซิเจนเหมือนกลไกที่อาศัยการแตกตัวของอนุมูลอิสระ ทำให้เกิดการหดตัวต่ำและยึดติดที่ดี

2.3.5 องค์ประกอบที่สำคัญของการบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

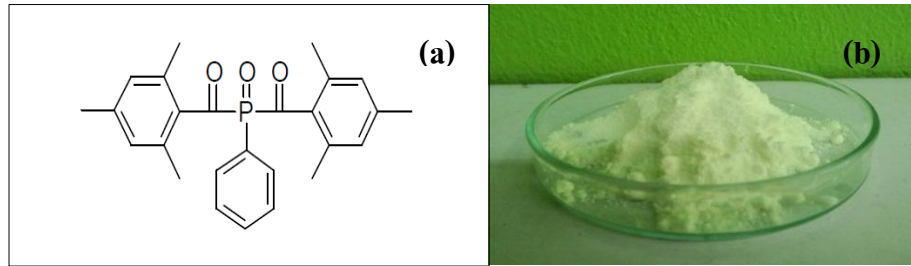
ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบนั้นเป็นตัวกำหนดสมบัติและลักษณะที่ได้จากการบ่มด้วยรังสี ซึ่งจะประกอบไปด้วย (ในที่นี้ขอกกล่าวเฉพาะตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงและ โอลิโกเมอร์)

1. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (Photoinitiator)
2. ตัวเจือจางที่ว่องไว (Reactive diluent)
3. สารเติมแต่ง (Additives)
4. โอลิโกเมอร์ (Oligomer)

2.3.5.1 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (Photoinitiator)

เป็นสารประกอบที่ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงได้ แล้วเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวให้อนุภาคที่มีความว่องไวทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มหรือเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านสมบัติการละลาย และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง ต้องอยู่ในความยาวคลื่นเดียวกันกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

เมื่อตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงถูกกระตุ้นด้วยแสงเกิดปฏิกิริยา เรียกกระบวนการนี้ว่า “โฟโตพอลิเมอไรเซชัน” หรือการบ่มเร่งด้วยรังสี ปกติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวเป็นของแข็ง และที่ละลายได้กลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงสายโซ่เป็นโครงร่างตาข่ายที่มีความแข็งแรง ยกตัวอย่างตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง เช่น Bis Acyl Phosphine Oxide (BAPO) ชื่อทางการค้า IRGACURE 819 จากบริษัท Ciba Specialty Chemicals การใช้งานทั่วไปเป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาทางแสงได้ มักใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัวโดยใช้แสง UV เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา

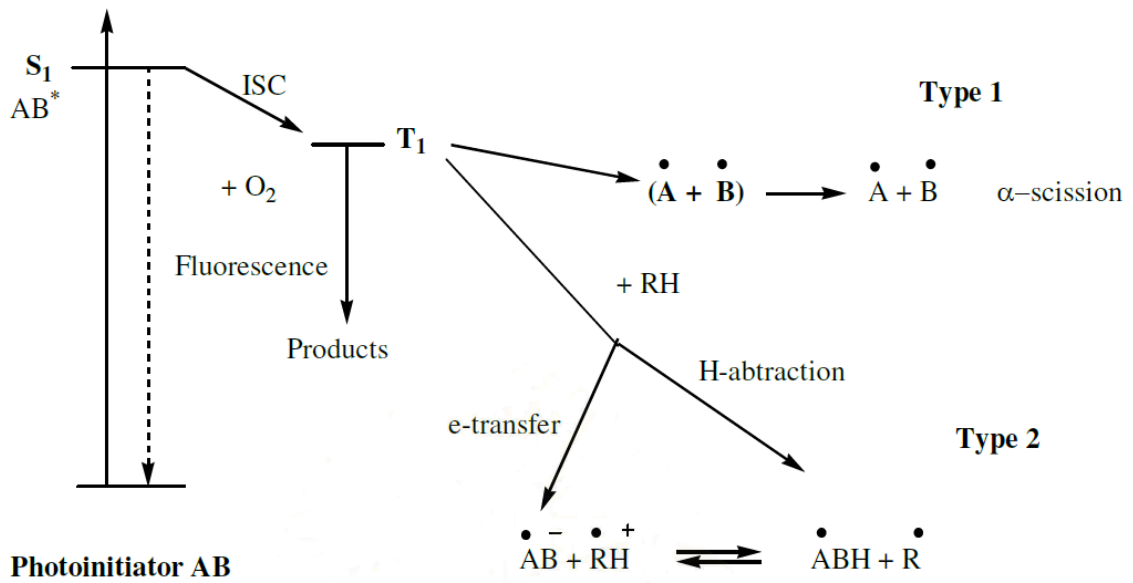


รูปที่ 2.31 (a) โครงสร้างทางเคมี, (b) ลักษณะทางกายภาพของ (Bis Acyl Phosphine Oxide, BAPO)

โดยทั่วไปจะแบ่งตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดอนุภาคอิสระ (Free Radical Photoinitiators)

แตกตัวให้อนุภาคอิสระ มักใช้กับ โอลิโกเมอร์ประเภท อะคริเลต เมทาคริเลต เมื่อโมเลกุลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดอนุภาคอิสระ (AB) ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต โมเลกุลจะถูกกระตุ้นไปยัง Singlet state (S_1) จากนั้นจะเกิด intersystem crossing (ISC) แล้วโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นนั้นจะตกมาอยู่ชั้น triplet state เพื่อให้เสถียรมากขึ้น ในระหว่างการเปลี่ยนชั้น สามารถเกิดการปล่อยฟลูออเรสเซน (Fluorescence) หรือเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน ทำให้เกิดการสูญเสียอนุภาคอิสระได้ จากนั้นตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่ชั้น triplet state นี้สามารถแตกตัวให้อนุภาคอิสระได้ 2 วิธี คือ –Norrish type I หรือ α – cleavage และ Norrish type II ดังแสดงในรูป 2.32 การแตกตัวให้อนุภาคอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงจะเป็นแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงและชนิดของโอลิโกเมอร์ที่ใช้



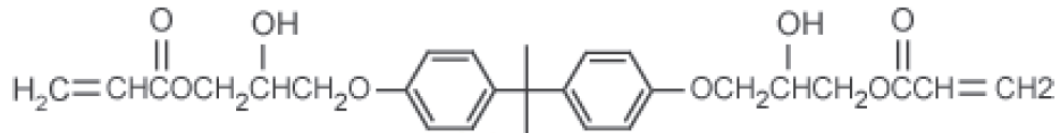
รูปที่ 2.32 การแตกตัวให้อนุภาคอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง

2. ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดประจุบวก (Cationic Photoinitiators) ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดนี้รับพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้วแตกตัวให้ Bronsted acid หรือ Lewis acid เพื่อเกิดปฏิกิริยาขั้นเริ่มต้น (Initiation) กับมอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ตั้งต้นแล้วเกิดคาร์โบแคทไอออนที่มีความว่องไวก่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เช่ขันต่อไปได้ มอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ตั้งต้นที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิดประจุบวกได้แก่ มอนอเมอร์ที่สามารถเปิดวงได้ เช่น อีพอกไซด์ ไซคลิกอีเทอร์ แลคโตน ไซคลิก-ซัลไฟด์ และสารประกอบไวนิล เป็นต้น การใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นใน กระบวนการขั้นริเริ่ม จะเป็นข้อดีสำหรับเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการเชื่อม โยงสายโซ่โดยใช้รังสี

2.3.5.2 โอลิโกเมอร์ (Oligomer)

มักเป็นพวกโอลิโกเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ (Multifunctional Oligomer) ที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ สายโซ่หลักของโอลิโกเมอร์สามารถมีโครงสร้างเคมีที่หลากหลายอาจเป็น พอลิเอสเทอร์ ยูรีเทน หรือ อีพ็อกซี ซึ่งโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันนี้เป็นตัวกำหนดสมบัติทางด้านสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ เช่นความแข็งทนต่อการขีดสี ทนต่อสารละลาย ความยืดหยุ่น เป็นต้น โอลิโกเมอร์ที่นิยมใช้บ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แก่

Epoxy Acrylate เป็น โอลิโกเมอร์ที่สำคัญที่นิยมใช้กันในการบ่มเร่งด้วยรังสี โดยทั่วไป โอลิโกเมอร์ที่เป็นตัววัตถุดิบจะไม่มีหมู่ฟังก์ชันอิสระอยู่ในโครงสร้าง แต่หมู่ฟังก์ชันของอีพ็อกซี จะเกิดขึ้นที่พันธะอิมตัวของโอลิโกเมอร์ ภายหลังจากการแข็งตัวเป็นพอลิเมอร์ ตัวอย่างของโอลิโกเมอร์ ชนิดนี้ ได้แก่ Bisphenol A epoxy with acrylic acid แสดงโครงสร้างได้ดังรูป 2.33



รูปที่ 2.33 โครงสร้างเคมีของ bisphenol A epoxy with acrylic acid

โอลิโกเมอร์กลุ่มนี้แบ่งได้อีกหลายประเภทได้แก่ Aromatic difunctional epoxy acrylate, Acrylated oil epoxy acrylate, Novolac epoxy acrylate, Aliphatic epoxy acrylate เป็นต้น

Aromatic difunctional epoxy acrylate เป็น โอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ให้ฟิล์มที่มีความหนาสูงและทนต่อการกะเทาะที่ผิว นิยมนำไปใช้ในงานเคลือบผิวกระดาษ, บอร์ด, ไม้, เฟอร์นิเจอร์, พื้น และเส้นใยแก้วนำแสง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความยืดหยุ่น ไม่ทนต่อแสงอาทิตย์เพราะจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเวลาผ่านไปนาน

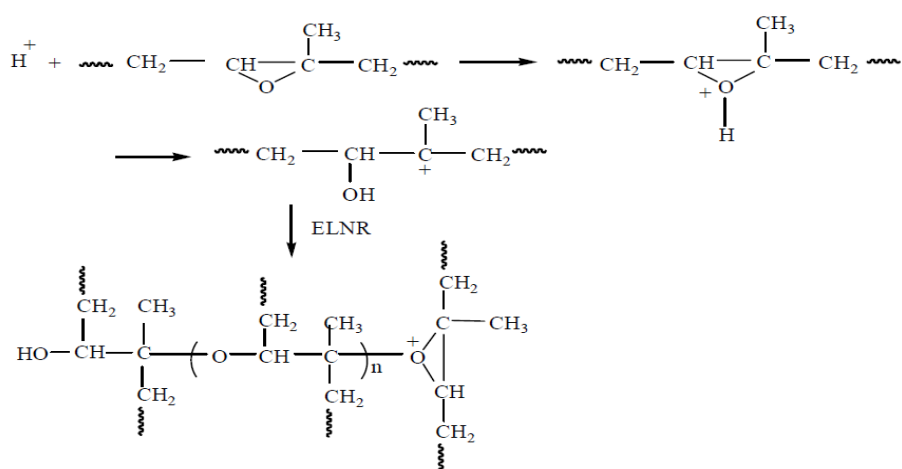
Acrylated oil epoxy acrylate เป็นเรซินที่มีความหนืดต่ำ ราคาถูก และมีสมบัติการทำให้เปียกที่ดี นิยมใช้งานเคลือบผิวที่เมดิคัล ช่วยในการลดต้นทุนการผลิต

Novolac epoxy acrylate เป็น โอลิโกเมอร์ชนิดพิเศษ ที่ถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เพราะมีสมบัติที่ทนต่อความร้อนและทนต่อสารเคมี เป็น โอลิโกเมอร์ที่มีความหนืดสูง

Aliphatic epoxy acrylate มีหลากหลายชนิด มีทั้งแบบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ 3 หมู่ หรือมากกว่านั้น ชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันเพียง 2 หมู่ จะให้ฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นที่ดี และมีความหนืดต่ำ ส่วนชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันเท่ากับ 3 หรือมากกว่า นั้นจะมีความหนืดในระดับปานกลาง ความยืดหยุ่นที่ได้ไม่ค่อยดี แต่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา Aliphatic epoxy acrylate มีราคาสูงกว่า Aromatic epoxy acrylate จึงนิยมใช้นานชนิดพิเศษ [15]

2.3.5.3 การบ่มเร่งด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตของยางอีพ็อกไซค์ (UV-curing of epoxidised rubber)

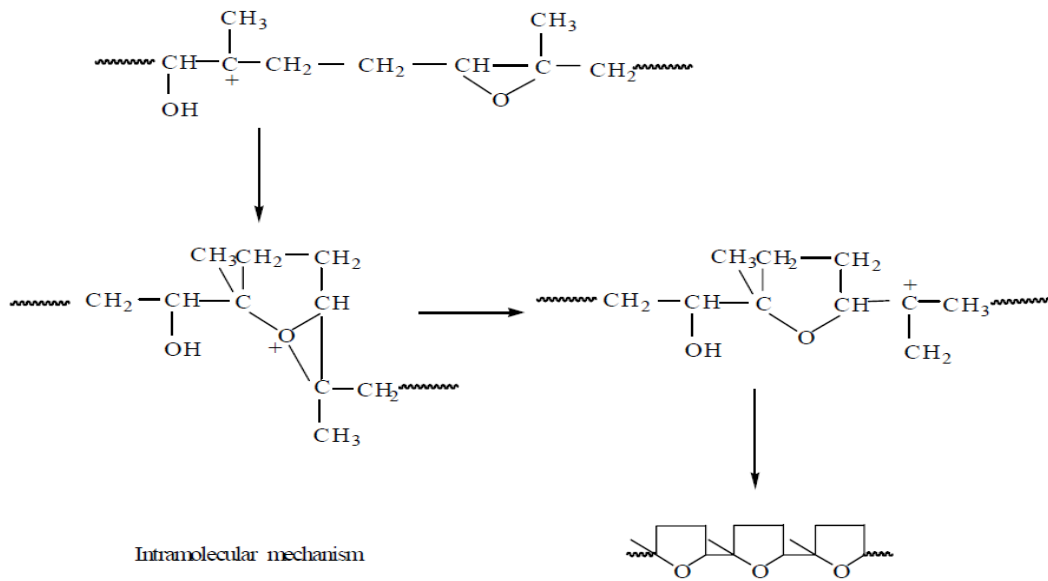
Photoinitiated cationic polymerization [18] ยางอีพ็อกไซค์จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่เมื่อผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งแสงจะเป็นตัวทำให้กรดมีแตกตัวเป็นประจุบวก ซึ่งจะเริ่มต้นปฏิกิริยาการเปิดวงอีพ็อกไซค์และจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแคตไอออนิกของหมู่ออกซิเรน และมีการเชื่อมโยงสายโซ่ของอีเทอร์ระหว่างสายโซ่ ดังรูป 2.50



รูปที่ 2.34 เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแคตไอออนิกของหมู่ออกซิเรน [23]

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR หมู่อีพ็อกไซด์จะปรากฏที่สัญญาณ 870 cm^{-1} และหมู่อีเทอร์จะปรากฏที่สัญญาณ 1080 cm^{-1} สำหรับยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์เมื่อผ่านการฉายแสงโดยมีการเข้าร่วมของเฮกซะฟลูออโรโรฟอสเฟต ไตรเอริลซัลโฟเนียม (Hexafluorophosphate - triarylsulfonium) 3% โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติที่ไม่สามารถละลายได้ และความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้นแต่ก็ยังคงความยืดหยุ่นที่ดี ซึ่งส่งผลให้สมบัติการทนต่อการกระแทก และทนต่อการขีดข่วนสูงขึ้น

นอกจากนี้ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพ็อกไซค์โดยผ่านกลไกภายในโมเลกุล ส่งผลต่อหมู่ข้างเคียงที่อยู่บนสายโซ่เช่นเดียวกัน เช่นปฏิกิริยาจะไม่มีผลทั้งความสามารถในการละลาย และความแข็งของตัวอย่างที่ผ่านการฉายแสง ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างของเตตระไฮโดรฟิวเรนนในสายโซ่ของยาง ดังรูป 2.35



รูปที่ 2.35 เกิดโครงสร้างของเตตระไฮโดรฟิวเรนในสายโซ่ของยาง

2.3.5.4 การเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันในยางอีพ็อกไซด์

(Polymerization multifunctional monomer in epoxidised rubber)

1. ไดไซโคลอีพอกไซด์ + ยางอีพอกไซด์ (Dicycloepoxide + epoxidise rubber)

กระบวนการเปิดวงอีพอกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อยางอีพอกไซด์ และไดไซโคลอีพอกไซด์มอนอเมอร์ ผ่านการฉายแสงซึ่งหมู่อีพอกไซด์ 2 ชนิดจะมีจลศาสตร์คล้ายๆ กัน แต่ยางอีพอกไซด์จะมี Conversion สูงกว่า (90% หลังจากการฉายแสง 3 วินาที) ไดไซโคลอีพอกไซด์ (76%) อาจเนื่องมาจากการพอลิเมอไรเซชันระหว่างโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ผ่านบ่มแรงจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ และจะแสดงดีกรีการบวมพองน้อยกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผ่านกระบวนการบ่มแรง ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการเกิดการเชื่อมโยงสายโซ่เป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้สารเคลือบมีความแข็งมากขึ้น และทนทานต่อการขีดข่วน

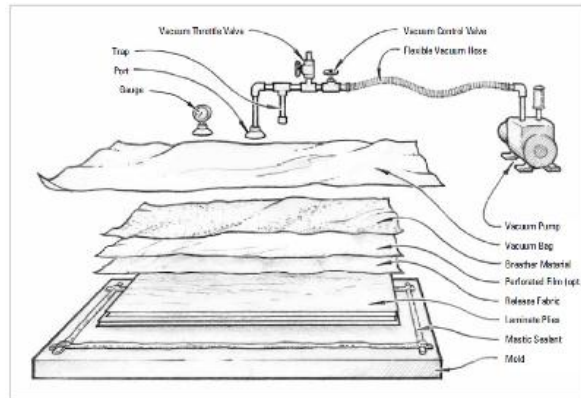
2. ไดอะคริเลท + ยางอีพ็อกซีไดซ์ (Diacrylate + epoxidised rubber)

การทำให้สายโซ่เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่าย สามารถกระทำให้เกิดอย่างเร็วขึ้น โดย การบ่มเร่งของยางอีพ็อกซีไดซ์ที่เติมพลาสติกไซเซอ์ด้วยไดอะคริเลทมอนอเมอร์ เช่น 1, 6-hexanediol diacrylate (HDDA) ซึ่งมีการเข้าร่วมทั้งอนุมูลอิสระ และแคตไอออนิกโฟโตอินิเชียเตอร์ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใต้การได้รับแสง ซึ่งกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเหล่านี้จะถูกพัฒนาอย่างกว้างขวาง เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแกร่งเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของ พอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างออกไป จะอาศัยปัจจัยหลัก 3 ข้อที่ควบคุมกระบวนการอยู่ คือ หมู่ฟังก์ชันในสายโซ่ของพอลิเมอร์ มอนอเมอร์ที่ใช้ ทำปฏิกิริยากับพลาสติกไซเซอ์ และ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง

2.3.6 ข้อดีของการใช้กระบวนการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

1. ผลผลิตที่เกิดจากการบ่มเร่งจะมีความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูง
2. กระบวนการบ่มเร่งไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะปริมาณของสารอินทรีย์ที่ระเหยจะมีปริมาณน้อยมาก
3. การบ่มเร่งสารสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเหมาะกับวัสดุที่ไม่ทนต่อความร้อน
อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการบ่มเร่งด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตเช่น
 1. ช่วงสเปกตรัมของการดูดกลืน มีความสำคัญที่ระยะความยาวคลื่นที่เหมาะสมต่อการดูดกลืนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง ไปยังช่วงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง
 2. ผลของความเข้มแสง ที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย
 3. ที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ซึ่งเกิดจากลักษณะของฟังก์ชันและความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงสูง เป็นต้น [18]

2.4 ความรู้เบื้องต้นของกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ [19]



รูปที่ 2.36 กระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag)

แวกคัม โมลด์ดิ้ง หรือ แวกคัมแบ็กกิ้ง (Vacuum Moulding or Vacuum Bagging Composites) คือระบบการผลิตชิ้นงานคอมโพสิตโดยใช้ระบบแวกคัมหรือการดูดอากาศช่วย ดึงอากาศออกจากชิ้นงานที่ทำการผลิตด้วยวิธีใช้มือทา โดยใช้แผ่นฟิล์มกันอากาศหรือแบ็กกิ้งฟิล์ม (Bagging Film) และแผ่นช่วยนำอากาศออกบริดเจอร์ (Breather Fabrics) และแผ่นลอกเรซินพิวพาย (peel ply) คลุมชิ้นงานทั้งหมด และปิดขอบฟิล์มลงบนขอบโมลด์ด้วยแผ่นกาวปิดขอบซิลิโคนที่เทป (Sealant Tape) และใช้เครื่องแวกคัมดูดอากาศออก เพื่อให้ชิ้นงานไม่มีอากาศเหลืออยู่ และมีเรซินน้อยที่สุด จนชิ้นงานแข็งตัว จึงทำให้ชิ้นงานมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากชิ้นงานไม่มีอากาศและมีปริมาณเรซินในชิ้นงานน้อย ทำให้สัดส่วนใยแก้วต่อเรซินสูงขึ้น เหมาะกับชิ้นงานขนาดเล็กและมีความหนาไม่มากนัก เช่น ชิ้นส่วนรถ อุปกรณ์ตกแต่งรถ อุปกรณ์กีฬา

2.4.1 เทคนิคการขึ้นรูป Vacuum Bag

1. ตัดขนาด Vacuum Bag ที่จะใช้ให้ใหญ่กว่าขนาดของชิ้นงาน
2. เมื่อพบส่วนสูงของโมลด์ ให้ทำจิบตามความสูงของส่วนนั้น ไว้เพื่อเวลาดูดอากาศออกจะได้มีเนื้อ Vacuum Bag เพียงพอที่จะแนบไปกลับผิวโมลด์ได้สนิท
3. การติด Vacuum Bag กับ Stic Ky Tacy ให้แค่ติดกันเรียบสนิทๆ ไม่มีรอยย่นของ Vacuum Bag ก็เพียงพอเพราะแรงดันจะช่วยกดให้ Vacuum Bag ติดกับ Stic Ky Tacy ได้อย่างแน่น
4. ระวังอย่าให้มีรอยย่นของ Vacuum Bag ตรงจุดที่เป็น Cap ทางเข้าเรซิน ซึ่งจะทำให้เกิดการรั่วซึม เมื่อต่อท่อให้เรซินเข้า

5. เมื่ออากาศถูกดูดออกหมด เราสามารถตัดขอบของ Vacuum Bag ที่เกินออกไปจากซีล การทำเช่นนี้จะช่วยให้เราสังเกตเห็นรอยรั่วได้ง่ายขึ้น วิธีการตรวจสอบรอยรั่วให้ดูจากเข็มของปั๊มว่าอยู่คงที่หรือไม่ประกอบกับการ ฟังเสียงรั่วของลม ตามขอบซีล

6. ท่ออากาศ ความยาวที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง ระหว่างจุดว่างถึงเรซิน กับ โมลด์สำคัญ ให้ตัดปลายสายยาวด้านที่จะเสียบเข้ากับ Cap ทางเข้าเรซิน เป็นแนวตรงธรรมดา ส่วนปลายอีกด้านของสายยางให้เรตัดเป็นแนวเฉียง เพื่อป้องกันไม่ให้สายติดกับถัง

7. บีบสายยาวซิลิโคนตรงกลางด้วยคีมปากเปิดก่อน ที่จะเอาปลายด้านเรียบเสียบเข้ากับ cap ทางเรซินเข้า คีมปากเปิดที่บีบสายยางไว้จะกันไม่ให้อากาศถูกดูด เข้ามาใน โมลด์ได้

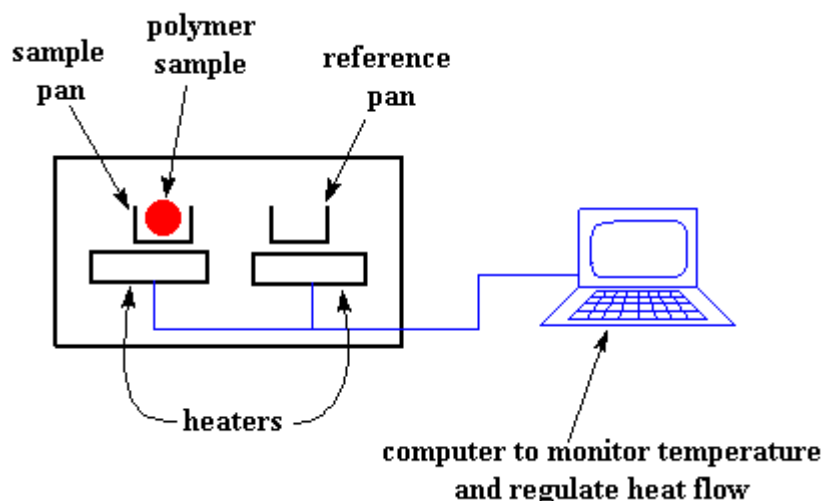
2.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน [20]

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค (Differential scanning calorimeter, DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยการวัดค่าพลังงานความร้อน (Thermal Transition) และอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง

การใช้ประโยชน์เครื่อง DSC (ที่อุณหภูมิทำงาน -170 องศาเซลเซียส ถึง -725 องศาเซลเซียส) จะใช้วิเคราะห์เกี่ยวกับพอลิเมอร์ได้หลายเรื่อง ดังนี้

- การหลอมละลาย (Melting Studies)
- ความเป็นผลึก (Crystallinity)
- อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition Studies)
- หาความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat Studies)
- การผสมเข้ากันได้ดี (Blend Analysis and Compatibility)
- ความคงต่อการถูกออกซิไดซ์ (Oxidative Stability Studies)
- การหาความบริสุทธิ์ (Purity Determination)
- การนำความร้อน (Thermal Conductivity Measurements)

หลักการทำงานของเครื่อง DSC



รูปที่ 2.37 หลักการทำงานของเครื่อง DSC [21]

หลักพื้นฐานของ DSC ก็คือ นำเอา 2 ถาด ถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) ถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (Reference Pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า ปล่อยให้วางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Furnace) ชนิดเดียวกัน ซึ่งวางอยู่ข้าง ๆ กัน เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อน จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที) แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือ เครื่อง DSC จะควบคุมให้อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสอง (อุปกรณ์ให้ความร้อนของถาดที่บรรจุสารตัวอย่างและของถาดอ้างอิง) เพิ่มอุณหภูมิถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง

สาเหตุที่ความร้อนของถาดทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากันก็คือ ถาดทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือ ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างพอลิเมอร์อยู่ข้างใน แต่ถาดอ้างอิงไม่มี สารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างจะมีสสารในปริมาณที่มากกว่าถาดอ้างอิงนั้นหมายความว่า อุปกรณ์ให้ความร้อนต้องให้ความร้อน ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้ถาดอ้างอิง เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้นอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ถาดที่บรรจุสารตัวอย่างจะต้องทำงานหนักกว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ถาดอ้างอิง คือมันต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจากอุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสองนี้ ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และเพื่อให้

เห็นภาพได้ง่าย เราจะสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

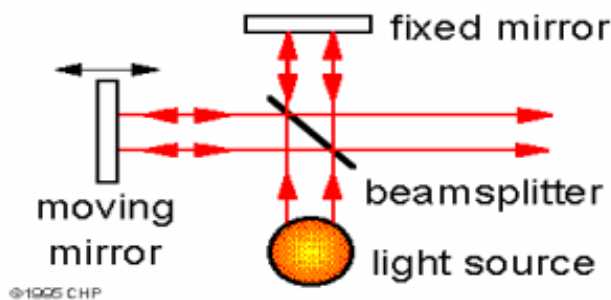
โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ (เช่น 10°C ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 25°C และสิ้นสุดการทดลองที่ 300°C หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 200°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลอง เช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere เช่น แก๊สไนโตรเจน) และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing Atmosphere เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ)

ความร้อนที่ให้สารตัวอย่าง (Heat Flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้สารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงานเราเรียกว่า เอนทัลปี มีการเปลี่ยนแปลงแบบการเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อน (Endothermic) และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงานเราเรียกว่า เอนทัลปี มีการเปลี่ยนแปลงแบบการเปลี่ยนแปลงประเภทคายความร้อน (Exothermic) เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว อุปกรณ์ให้ความร้อนต้องให้ความร้อน ถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง มากกว่าที่ให้ ถาดอ้างอิงเพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของ ถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง และ ถาดอ้างอิง ให้เท่ากันความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง ถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยังถาดอ้างอิง นั้น ขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบดูดความร้อนหรือแบบคายความร้อน

2.6 การทดสอบโครงสร้างทางเคมี

FTIR เป็นเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีที่ใช้ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) ในการทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านออกจากเซลล์บรรจุสารตัวอย่างออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ (แทนที่การใช้โมโนโครมาเตอร์ในกรณีของเครื่องมืออินฟราเรดแบบดิสเพอร์ซีฟหรือแบบลำแสงคู่) สำหรับในอุปกรณ์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์นั้น จะประกอบไปด้วยกระจกแบนราบ (planar mirrors) 2 แผ่นที่วางทำมุมตั้งฉากกัน โดยจะมี 1 แผ่นวางอยู่กับที่ (fixed mirror) ในขณะที่กระจกอีกแผ่นหนึ่งจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วคงที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของผิวกระจกดังกล่าว (หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเคลื่อนที่ขนานกับกระจกอีกแผ่นที่อยู่กับที่)

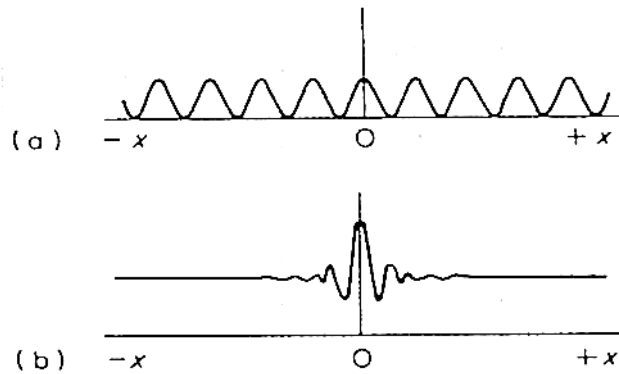
นอกจากนั้นยังมีตัวแยกลำแสง (beam splitter) ซึ่งวางทำมุม 45 องศา อยู่ระหว่างกระจกทั้ง 2 แสดงในรูปที่ซึ่ง beam splitter นี้จะทำหน้าที่แบ่งแยกลำแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงให้แยกออกเป็น 2 ส่วนกล่าวคือ 50 % ของลำแสงจะทะลุผ่าน beam splitter เข้าไปสู่ fixed mirror ในขณะที่อีก 50 % ของลำแสงที่เหลือจะหักเหไปสู่กระจกที่เคลื่อนที่



รูปที่ 2.38 แสดงการทำงานของ Interferometer

อนึ่งสำหรับอุปกรณ์ Beam splitter นี้จะประกอบไปด้วยฟิล์มของโลหะ (เช่น Fe_2O_3 , Ge) บางที่เคลือบอยู่บนผิวของวัสดุรองรับ เช่น quartz, KBr, CsI เป็นต้น นอกจากนี้หากสังเกตให้ดีจะพบว่าบริเวณด้านล่างของ beam splitter จะมีตัวชดเชย (compensator) ซึ่งเป็นแผ่นวัสดุที่มีความหนาเป็น 2 เท่าของแผ่น beam splitter และจะทำหน้าที่ปรับหรือชดเชยระยะความยาวเส้นทางของการเดินทางของแสง (optical path length) ทั้ง 2 แขนให้เท่ากัน ผลจากการแยกแสงและการสะท้อนของแสงในลักษณะดังกล่าวจะทำให้รูปแบบของคลื่น แสงที่จะเข้าสู่ดีเทคเตอร์ถูกรบกวนให้เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับระยะทางของกระจกที่เคลื่อนที่ moving mirror หรือระยะ x ด้วย หรือขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากกระจกเดินทางด้วยความเร็วคงที่ ในกรณีที่แสงที่เข้ามาสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นแสงที่มีความถี่เดียว (หรือมีความยาวคลื่นค่าเดียวซึ่งเรียกว่า mono-chromatic light) แสงที่ผ่านออกจากอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferogram) จะมีลักษณะดังรูปซึ่งประกอบไปด้วยจุดสูงสุดของคลื่น (maximum) ซึ่งเกิดจากการที่ลำแสงที่เดินทางสะท้อนกลับมาจากกระจกทั้ง 2 มีช่วงคลื่นตรงกัน (in phase) และจุดต่ำสุดของคลื่น (minimum) ซึ่งเกิดจากการที่แสงที่เดินทางกลับมาจากกระจกทั้ง 2 มีช่วงคลื่นที่ไม่ตรงกัน (out of phase) ซึ่งในกรณีนี้จะพบว่าที่ระยะทาง x ใดๆ ก็ตามแสงที่ได้จะมีความถี่คงที่ แต่ในกรณีที่แสงที่เดินทางเข้าสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นแสงที่มีหลายความถี่หรือหลายความยาว

คลื่น(polychromatic light หรือ broadband light source) แสงที่เกิดจากการรวมกันเพื่อจะออกไปสู่ตีเทคเตอร์(Interferogram) นั้นจะถูกแยกออกเป็นความถี่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับระยะทาง x แสดงดังรูป 2.39



รูปที่ 2.39 การแทรกสอดของลำแสงที่สะท้อนกลับในกรณีที่เป็นแสงความถี่เดียวและแสง polychromatic

ซึ่งสัญญาณของแสงที่รวมกันใหม่เพื่อจะเข้าสู่ตีเทคเตอร์ในลักษณะนี้มีลักษณะเป็น Time domain(หรือกราฟคลื่น sine wave ที่สัมพันธ์กับแกนระยะทางหรือเวลา เนื่องจากกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่)จะถูกถอดรหัสหรือแปลงไปเป็น Frequency domain หรือกราฟที่สัมพันธ์กับแกนความถี่ โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fourier transform ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการแปลงจะถูกนำไปเขียนเป็นสเปกตรัมอินฟราเรด (กราฟระหว่างปริมาณความเข้มของแสงกับความถี่หรือเลขคลื่น) ต่อไปประเด็นสุดท้ายที่ต้องกล่าวถึงเกี่ยวกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด คือข้อดีของเทคนิคดังกล่าวซึ่งได้แก่ความรวดเร็วในการวิเคราะห์ (เมื่อเทียบกับการใช้ grating ในการแยกแสงแบบเดิม) โดยจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน (วินาที) ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดแบบลำแสงคู่หรือแบบดิสเพอร์ซีฟ (dispersive IR) จะใช้เวลาหลายนาที

โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรด แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. Near Infrared ($12800-4000 \text{ cm}^{-1}$)
2. Middle Infrared ($4000-200 \text{ cm}^{-1}$)
3. Far Infrared ($200-10 \text{ cm}^{-1}$)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

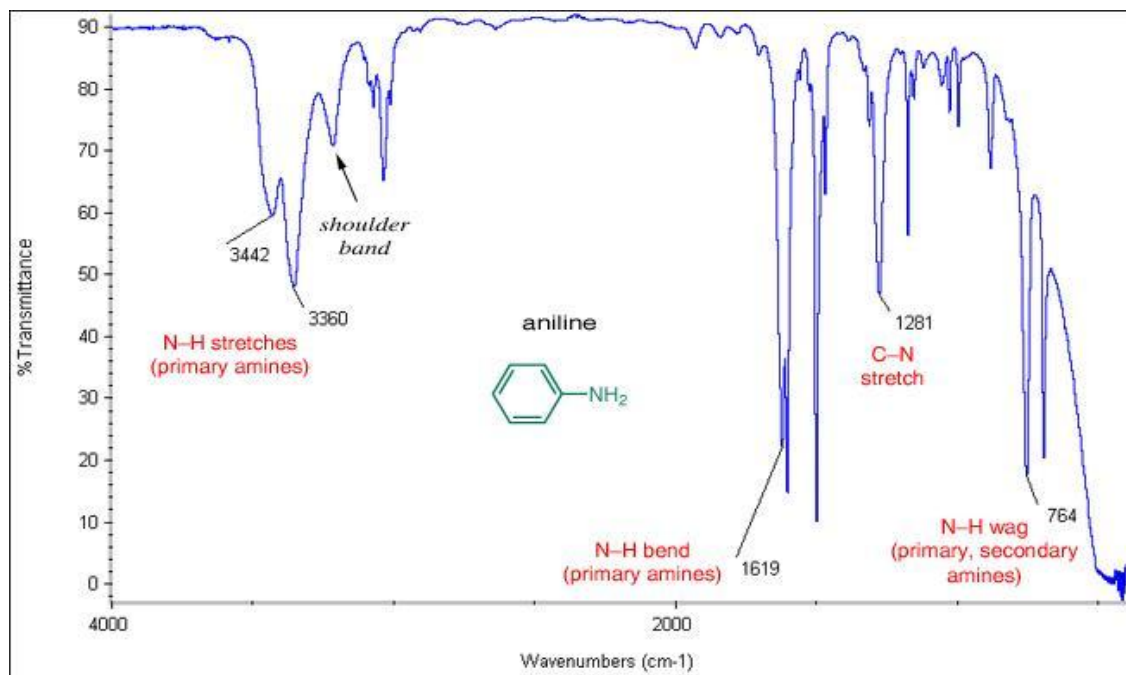
หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงความยาวคลื่น (cm ⁻¹)
Alkanes;	
C-H Stretching	~ 3,000-2840
CH ₂ -Methylene gr.	~ 1493-1429 และ 725
CH ₃ -Methyl gr.	~ 1379-1366
** Peak ที่ได้จะ sharp และสูงปานกลาง	
Alkenes;	
= C-H Stretching	~ 3,125-3030
= CH ₂ OP-Bending	~ 1000-650
-C= C- Stretching	~ 1667-1613
** Peak ที่ได้จะ sharp และสูงปานกลาง	
Alkynes;	
≡C-H Stretching	~ 3100-3000
C≡C-Stretching	~ 2620-2100
-C≡C- Stretching กรณีเป็น	~ 2140-2100
monosubstituted acetylene	
-C≡C- Stretching กรณีเป็น	~ 2260-2190
Aromatics;	
C-H Stretching	~ 3100-3000
C-H OP-Bending	~ 900-675
C=C Stretching ภายใน ring 2 พีก	~1600 และ 1475
* * จะมี overtone and combination band เล็กๆ	
	~2000-1650

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (ต่อ)

หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงความยาวคลื่น (cm ⁻¹)
Alcohols;	
O-H Stretching	~ 3650-3584
C-O Stretching	~ 1250-1000
* * ถ้ามี H-bonding peak ที่ได้จะ broad	
10 Alc. C-O	~1053
20 Alc. C-O	~1111
30 Alc. C-O	~1176
Carbonyl; C=O ของ	
Anhydride	~ 1818 และ 1750
Acid chloride	~ 1800
Ester	~ 1735
Aldehyde	~ 1725
Ketone	~ 1715
Amide	~ 1690
Carboxylic acid;	
O-H stretching very broad	~3300-2500
C-O Stretching	~ 1320-1210
O-H Bending -1	~ 1440-1395
Amide;	
N-H stretching	~ 3500-3100
C-O Stretching	~ 1670-1640
10 amide; peak ที่ได้จะเป็น doublet	
20 amide; จะมี peak เดียว	

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (ต่อ)

หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงความยาวคลื่น (cm ⁻¹)
Amine;	
N-H stretching	~ 3500-3300
1° amine; มี 2 peak ขนาดเล็ก	~3500 และ ~3400
2° amine; จะมี peak เดียวขนาดเล็ก	~ 3350-3310
3° amine; ไม่ดูดกลืน IR	
N-H Bending	~ 1650-1580
C-N Stretching	~ 1342-1020



รูปที่ 2.40 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR



รูปที่ 2.41 เครื่อง FTIR

2.7 การทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์

เครื่อง (Dynamic Mechanical Analysis, DMA) หรือการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ หมายถึง เทคนิคการทดสอบประเภทหนึ่งหรือเครื่องมือทดสอบที่ใช้วัดค่าสมบัติทางกายภาพของของแข็งและพอลิเมอร์ หลอมเหลวเพื่อให้ได้ค่ามอดูลัสและแอมป์ โดยสามารถกำหนดให้วัดค่าแรง, ความเค้น, ความเครียด, ความถี่ และอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังหมายถึงสมบัติทางรีโอโลยีของของแข็งและ Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) หรือการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์และความร้อน เมื่อใช้งานร่วมกับข้อมูลด้านการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ทฤษฎีเครื่องทดสอบ DMA นั้นจะให้แรงที่แกว่งไปมา (ความเค้น) แล้วทำการบันทึกการตอบสนองแบบที่แกว่งไปมาของตัวอย่างที่เกิดขึ้น โดยค่ามอดูลัสจะคำนวณจากการตอบสนองแบบยืดหยุ่น ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างตอบสนอง ประสานกัน (In phase) กับความเค้นแบบวงรอบที่ป้อนเข้า ส่วนค่าแอมป์จะคำนวณจากการตอบสนองแบบหนืด ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างตอบสนอง ไม่ประสาน (Out of phase) กับความเค้นแบบวงรอบที่ป้อนเข้าเครื่องมือตัวอย่างจะถูกจับยึดในตำแหน่งระหว่างอุปกรณ์จับยึดสองชุดหรือชิ้นส่วนที่ช่วยจำกัดขอบเขต จากนั้นแรงที่แกว่งไปมา (ไดนามิกส์) จะถูกให้แก่ตัวอย่างทดสอบโดยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบตัว (ไปและกลับ) หรือเชิงเส้น (ขึ้นและลง) โดยจำกัดค่าความถี่ (ความเร็วของการแกว่ง) และแรง (พลังงานที่ป้อนเข้ายังตัวอย่าง) ความเค้น (ระยะการเคลื่อนที่) ที่เกิดขึ้นจะถูกวัดค่าโดยอุปกรณ์ LVDT แต่สามารถใช้ทรานสดิวเซอร์วัดแรงได้เช่นกัน โดยทั่วไปจะสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสสะสม (Storage Modulus) และ Tan Delta (แอมป์) กับอุณหภูมิ

นอกจากนี้ยังใช้คำนวณค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว T_g (การเปลี่ยนผ่านคล้ายแก้ว หรือการหลอมเหลวของส่วนอสัณฐาน) และค่าการเปลี่ยนผ่านปีต้า (การลดลงของโมดูลัสที่อุณหภูมิ ต่ำ)



รูปที่ 2.42 เครื่องการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (DMA)

2.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล

2.8.1 เครื่องทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D638M

การทดสอบความทนต่อแรงดึงเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ โดยการทดสอบจะเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงของชิ้นงานในทิศทางตรงกันข้ามกันเพื่อสร้างแรงดึงในชิ้นงานจนชิ้นงานนั้นเกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติก และมีการแตกหักเกิดขึ้นในที่สุด การวัดความสามารถในการรับแรงของวัสดุด้วยการใช้แรงดึง และหาระยะที่ยืดออกไปก่อนที่วัสดุจะแตกหัก โมดูลัสความยืดหยุ่นจะมีความสัมพันธ์กับ ค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปโดยอธิบายได้จากความเค้นส่วนความเครียด

โดยทั่วไปแล้วชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงนี้จะอยู่ในรูปของชิ้นงานที่มีลักษณะเรียวยาว (อัตราส่วนระหว่างความยาวกับความกว้างมีค่ามาก) และปลายทั้งสองสามารถถูกจับยึดโดยเครื่องทดสอบสมบัติทางกลความทนต่อแรงดึง ชิ้นงานทดสอบแรงดึงนั้นจึงถูกกำหนดให้มีลักษณะรูปร่างที่มีพื้นที่หน้าตัดในบริเวณที่ต้องการวัดความเครียดอยู่ในบริเวณตรงกึ่งกลางชิ้นงาน และมีขนาดที่เล็กกว่าพื้นที่สำหรับการจับยึดในบริเวณปลาย หรือมีลักษณะคล้ายที่ยกน้ำหนัก (Dumbbell) โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมหรือวงกลมก็ได้ การออกแบบเช่นนี้เพื่อจะกำหนดได้ว่า ชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงที่สุด (เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดต่ำที่สุด) ไม่แตกหักในบริเวณที่จับยึด อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ การที่จะ

ทดสอบแล้วชิ้นงานเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางนั้นยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การเตรียมชิ้นงานทดสอบ การติดตั้งชิ้นงานทดสอบ และความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ เป็นต้น ประเภทของชิ้นงานทดสอบแรงดึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่

1) คัมเบลแบบเอวแคบ

ชิ้นงานประเภทนี้เป็นชิ้นงานทดสอบทั่วไปสำหรับพลาสติก เหมาะสำหรับใช้ทดสอบพลาสติกทั้งแข็งและอ่อน นอกจากใช้ในการทดสอบแรงดึงแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ทดสอบแรงดัดและทดสอบแรงกระแทกได้ โดยตัดปลายทั้งสองด้านสำหรับยึดจับทิ้ง

2) คัมเบลแบบเอวกว้าง

ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการทดสอบพลาสติกอ่อนนุ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่สามารถยืดตัวได้สูง ได้แก่ วัสดุพวยกต่างๆ หรือพลาสติกนิ่ม

3) คัมเบลแบบกระดูกสุนัข

ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับทดสอบพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตในกรณีที่ชิ้นงานแบบคัมเบลโค้งเข้าไม่เหมาะสม แต่ไม่เป็นที่นิยมสำหรับการทดสอบในปัจจุบัน

4) แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับทดสอบวัสดุเชิงประกอบ ในกรณีที่มีการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงมีผลทำให้การตัดชิ้นงานเป็นคัมเบลทำได้ลำบาก และผลการทดสอบไม่แน่นอน แต่การใช้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีปัญหาของการแตกหักบริเวณที่จับยึดได้ง่าย ดังนั้น เพื่อป้องกันปัญหาแผ่นประกบจึงมักติดตั้งเพื่อใช้ในการเสริมแรงบริเวณจับยึด เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในบริเวณนั้น นอกจากจากวัสดุเชิงประกอบแล้ว ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกใช้ในการทดสอบฟิล์มพลาสติกอีกด้วย

2.8.2 เครื่องทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Chapy Impact Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D6110

วิธีการทดสอบแบบนี้เป็นการใช้แรงกระแทกในการตัดชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็น คานยาวให้เกิดแตกหัก สองวิธีหลักที่นิยมใช้ทดสอบ ได้แก่ การทดสอบแบบไอซอด (Izod) และแบบ ชาร์ปปี (Charpy) ความแตกต่างของการทดสอบทั้งสองแบบ คือ ลักษณะการจับยึดของชิ้นงานและ ลักษณะการกระแทกของหัวทดสอบต่อชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ โดยในการทดสอบแบบไอซอดนั้น ชิ้นงานจะถูกจับยึดให้อยู่ในแนวตั้งในลักษณะของคานยื่น (Cantilever) ในขณะที่ การทดสอบแบบชาร์ปปี นั้น ชิ้นงานจะถูกวางบนแท่นรับในแนวนอนโดยไม่มีกรยึดจับแต่อย่างใด (Upported beam) การทดสอบแบบชาร์ปปี ชิ้นงานด้านที่ไม่มีรอยบากจะเป็นด้านที่ถูกกระแทก แต่ ในกรณีของไอซอดแล้ว ชิ้นงานจะมีรอยบากหรือไม่ก็ได้ แต่หากมีการบากโดยทั่วไป ชิ้นงานด้านที่มี รอยบากจะเป็นด้านที่ถูกกระแทกด้วยหัวทดสอบ ยกเว้นกรณีต้องการศึกษาความต้านทานต่อ แรงกระแทกในแบบที่ไม่มีรอยบากจึงจะใช้ด้านที่ไม่มีรอยบากเป็นด้านที่ถูกกระแทก เครื่องมือที่ใช้ ทดสอบจะเป็นแบบค้อนเหวี่ยงเป็นหลักดังแสดงในรูป 2.7



รูป 2.43 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด [6]

ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแบบนี้ ได้แก่ ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) หรือพลังงานในการกระแทก (Impact energy) ซึ่งมักจะรายงานในรูปพลังงานต่อ หนึ่งหน่วยพื้นที่หลังของรอยบาก หรือพลังงานต่อความหนาของชิ้นงานทดสอบ

$$\text{ความต้านทานต่อแรงกระแทก} = \frac{\text{พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก (จูลส์)}}{\text{ความหนาของชิ้นงาน (เมตร)}} \quad (2.1)$$

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบ

1. รอยบาก

โดยปกติแล้วในการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดและชาร์ปี มักจะมีการบากชิ้นงานเพื่อทำให้เกิดจุดอ่อนแอของชิ้นงาน เนื่องจากการใช้งานจริงผลิตภัณฑ์มักจะมีจุดที่มีความเค้นสูงอยู่ในชิ้นงานเสมอ ซึ่งมักจะเป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักเสียหาย แต่การจำลองรอยบากเป็นการจำลองสภาพให้คล้ายคลึงกับสภาพจริงในชีวิตประจำวัน ดังนั้นรอยบากจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการทดสอบ โดยรอยบากที่ตื้นจะมีความทนแรงกระแทกที่สูงกว่ารอยบากที่ลึก เพื่อให้การทดลองถูกต้องจึงต้องมีการควบคุมความลึกของรอยบากให้ตรงตามมาตรฐาน

2. ความหนาของชิ้นงาน

ความหนาที่แตกต่างกันของชิ้นงานทดสอบสามารถก่อให้เกิดความแตกต่างในระดับของความต้านทานต่อแรงกระแทกของพลาสติกได้ ชิ้นงานที่มีความบางหนามักจะทำให้ชิ้นงานมีความเปราะมากกว่าชิ้นงานที่มีความบาง ซึ่งชิ้นงานที่บางสามารถที่จะบิดตัวและดัดงอได้ในระหว่างการกระแทกได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนากว่า ทำให้โดยทั่วไปชิ้นงานที่มีความบางกว่ามักมีความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า ดังนั้นชิ้นงานที่ทดสอบจึงควรมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6.36 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานที่บางมักจะให้พลังงานกระแทกที่สูงกว่า

3. อุณหภูมิการทดสอบ

พลาสติกจะมีความทนแรงกระแทกลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง พลาสติกจะมีความเปราะมากขึ้นเนื่องจากความสามารถการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์มีค่าลดลง

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D 256 เป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุที่จะสามารถต้านทานการแตกหักภายใต้การรับน้ำหนักอย่างรวดเร็วหรือสามารถที่ต้านทานการแตกร้าภายใต้แรงเค้นที่ได้รับที่ความเร็วสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเหนียวของวัสดุ ซึ่งค่าความเหนียวของวัสดุจะหมายถึงความสามารถของพลาสติกที่จะดูดซับพลังงานที่ได้รับ โดยทดสอบด้วยการให้แรงกระแทกกับชิ้นงานที่มีรอยบาก (Notch) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายของความเสียหายจากการทดสอบ ซึ่งมักจะแสดงในรูปของค่าความทนแรงกระแทก (Impact strength)

2.8.3 เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D785

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test) หาค่าความแข็งที่ผิว ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว ตามมาตรฐาน ASTM D785 เครื่องทดสอบ Matsuzawa DXT Model DXT-1 Ser.No DX1405 ชิ้นงานที่นำมาทดสอบควรมีผิวเรียบทั้งทั้งพื้นผิว และวางแนบสนิทกับฐานรอง (Anvil) ชิ้นงานทดสอบต้องมีความหนา ไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร ถ้าชิ้นงานมีความหนาน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร สามารถหาวัสดุอื่น ๆ ที่มีความหนามากกว่าวัสดุทดสอบ หรือชิ้นงานทดสอบมารองด้านล่าง โดยที่วัสดุที่นำมารอง จะต้องผิวเรียบ

ตารางที่ 2.3 แสดง Rockwell Hardness Scale

Rockwell Hardness Scale (Red Dial Number)	Minor Load (Kg)	Major Load (Kg)	Indenter Deimeter (in)
R	10	60	0.1250+/-0.001
L	10	60	0.1250+/-0.001
M	10	100	0.1250+/-0.001
E	10	100	0.1250+/-0.001
K	10	150	0.1250+/-0.001

2.9 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เครื่องทดสอบการส่องดูโครงสร้างบนพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ส่องดูอนุภาคลักษณะของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ส่องวัตถุที่มีขนาดเล็กขยายให้เห็นลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของตัวอย่างให้ภาพลักษณะสามมิติ ศึกษาตัวอย่างที่มีขนาดตั้งแต่ 1 เซนติเมตร จนถึง 100 นาโนเมตร โครงสร้างพื้นฐานและองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการมองเห็นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาแบบสเตอริโอ ไอ กล้อง SEM มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นอิเล็กตรอน ที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในสภาพสุญญากาศ เพื่อให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสง สามารถบังคับให้คลื่นอิเล็กตรอนมีขนาดความยาวคลื่นที่สั้นมากๆ ได้เลนส์รวมแสงและเลนส์ใกล้วัตถุ เป็นระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า จะทำหน้าที่ในการบีบลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ให้

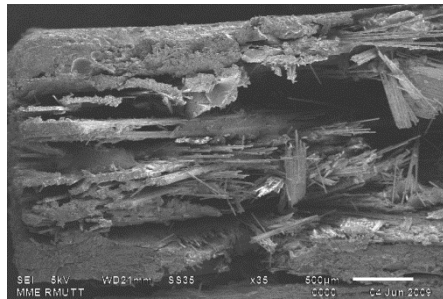
โฟกัสลงบนตัวอย่าง จากนั้นลำแสงรูปกรวยจะถูกบังคับด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชุดควบคุมการสแกนให้เคลื่อนไปบนผิวตัวอย่าง ในแนวแกนนอนและแกนตั้งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายระบบสแกนของโทรทัศน์ ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้น เมื่อลำแสงรูปกรวยเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างจะถูกรวบรวมโดยอุปกรณ์วัดสัญญาณ ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วผ่านท่อนำแสงไปยังเครื่องขยายแสง ถูกส่งต่อไปยังหลอดภาพปรากฏเป็นสัญญาณภาพขึ้นบนจอรับภาพ ลำแสงที่ส่องกราดเป็นเส้นบนจอรับภาพจะเคลื่อนไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่องกราดไปบนผิวตัวอย่างซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า

กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนจอรับภาพกับขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนพื้นผิวตัวอย่าง

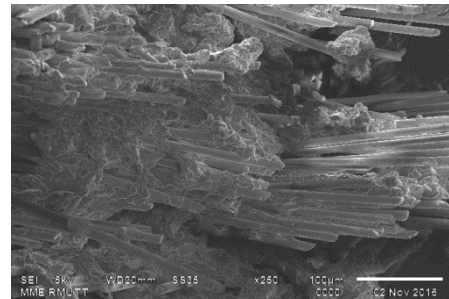


รูปที่ 2.44 เครื่อง Scanning Electron Microscope

กำลังขยาย 35 เท่า



กำลังขยาย 100 เท่า



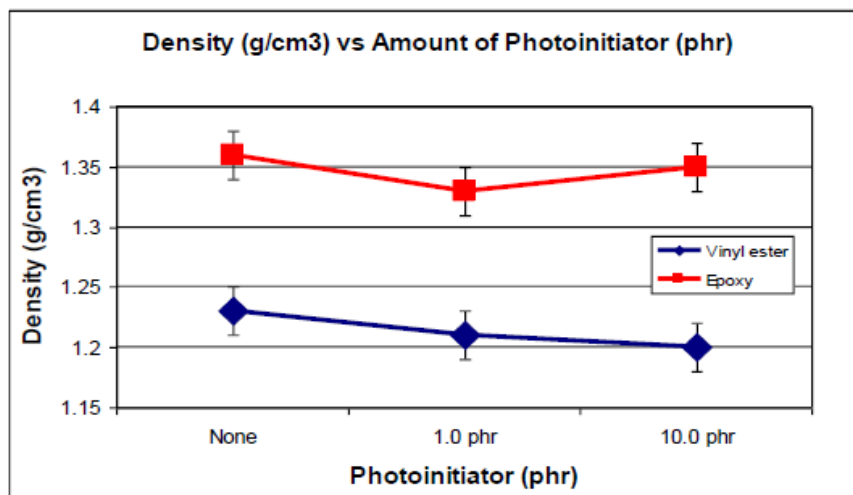
รูปที่ 2.45 รูปตัวอย่างของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ที่ได้จากการใช้ Scanning Electron Microscope

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

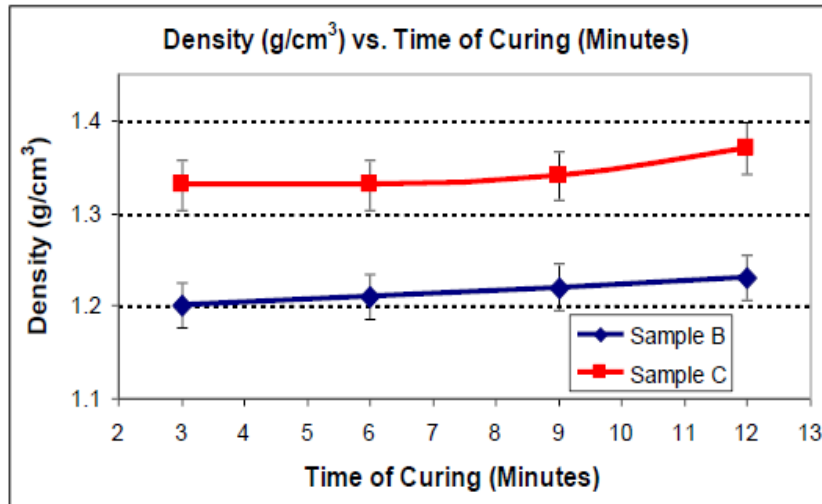
2.10.1 ปี ค.ศ. 2010 J. Ramli, A.S. Hadi และคณะ [22]

กระบวนการบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) นำมาใช้ในการบ่มของพอลิเมอร์ คอมโพสิต (Polymer Composites, PMC) สำหรับการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เสื้อเกาะกันกระสุน ซึ่งมีกาว 2 ประเภทหรือวัสดุหลักที่ถูกนำมาใช้คือ Epoxy และ Vinyl Ester ซึ่งถูกผสมด้วยตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (Photoinitiator) ที่ต่างชนิดกัน โดยใช้ Bisacyl Phosphine Oxide (BaPo) และ Alpha Hydroxyl Ketone Peroxide (AHK) ที่ 1.0 และ 10.0 (phr) จากสัดส่วนทั้งหมดของส่วนผสม โครงสร้างแบบ Sandwich ของ PMC ที่ทำด้วยกระบวนการที่ใช้มีอทาส่วนผสมที่ถูกเชื่อมบนชั้นเส้นใย ตัวอย่างถูกบ่มในช่วงระยะเวลาต่างๆที่ 3, 6, 9 และ 12 นาที เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของคอมโพสิตภายใต้การสัมผัสของรังสี UV แต่ละชั้นจะได้รับการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมในการรับน้ำหนัก การสังเกตทางสัณฐานวิทยาผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้รับการดำเนินการในการประเมินคุณภาพของการยึดเกาะระหว่างแต่ละชั้นไฟเบอร์และพฤติกรรมผสมของสารเคมี Vinyl Ester จะไม่แนะนำให้ใช้เป็นเนื้อหลักเนื่องจากต้องใช้เวลาถึง 2 วัน เพื่อให้บ่มตัวได้เต็มที่ซึ่งจะแตกต่างจาก Epoxy ซึ่งจะได้รับการบ่มอย่างรวดเร็วปรากฏออกมาภายใต้รังสี UV การทดสอบทางกายภาพแสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลกระทบของ Photoinitiator ที่ได้รับ 1.0 (phr) สำหรับ epoxy และ 10.0 (phr) สำหรับ Vinyl Ester นี้จะให้ประโยชน์กับผู้ผลิตเพราะเนื่องจากจะทำให้น้ำหนักลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุหลักบริสุทธิ์ ผลของเวลาการบ่มที่เหมาะสมจะแสดงผลที่เหมาะสมสำหรับความหนาแน่นที่ได้รับอยู่ที่ 12 นาที ของเวลาการบ่ม ผลของการ Photoinitiator

เพื่อทนต่อแรงดึงจะแสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่ 1.0 (phr) สำหรับ Epoxy และ Vinyl Ester ในขณะที่เวลาในการบ่มระหว่าง 6 ถึง 9 นาที จะถูกนำเสนอจากความเหมาะสมสำหรับการถูกรังสีของคอม โพลีตภายใต้รังสี UV ผลของ Photoinitiator ที่มีต่อความแข็งของ PMC ที่เหมาะสมพบว่าที่เปอร์เซ็นต์ของ Photoinitiator 1.0 (phr) สำหรับวัสดุหลักและสำหรับผลของเวลาในการบ่มภายใต้การสัมผัสรังสี UV ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 3 นาที



รูปที่ 2.46 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์คอม โพลีตที่ปริมาณ Photoinitiator ที่แตกต่างกัน [22]



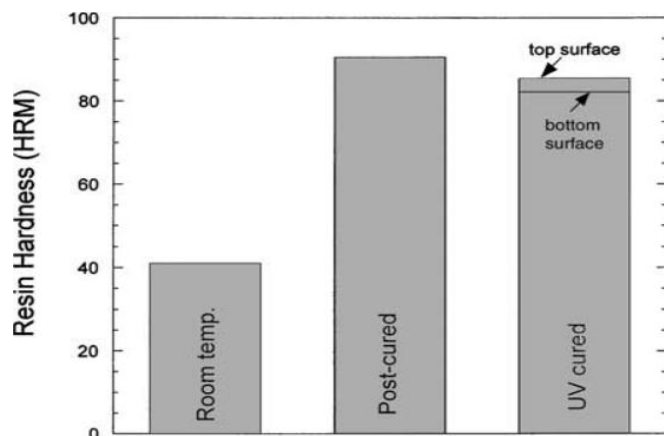
รูปที่ 2.47 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ได้รับการบ่มด้วยแสงยูวีที่เวลาต่างๆ [22]

จากรูปที่ 2.4.7 แสดงผลกระทบบของเวลาการบ่มภายใต้แสงยูวีที่ฉายกับวัสดุคอมโพสิตของ B คือ Woven roving + Vinyl ester + BAPO + AHK ; (BAPO + AHK = 1.0 phr) และ C คือ Woven roving + Epoxy + BAPO + AHK ;(BAPO + AHK = 1.0 phr) จากรูปตัวอย่าง B มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อ ระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น และ ตัวอย่าง C แสดงให้เห็นความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นี่เป็นการแสดงให้เห็นว่าการบ่มภายใต้แสง UV มีผลต่อความหนาแน่น อาจเกิดจากอะตอมของเรซินมีพลังงานมากพอที่จะทำให้การจัดเรียงภายในปฏิกิริยาดีขึ้น นอกจากนี้จะช่วยให้เรซินยึดเกาะกับเนื้อเส้นใยได้ดีขึ้น

2.10.2 ปี ค.ศ.2004 A. Cvetanovska, P. Compston [23]

เทคโนโลยีการบ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เป็นที่ยอมรับในงานอุตสาหกรรม การเคลือบและอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ โดยหมึกพิมพ์หรือเรซินที่มีตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (Photoinitiator) ซึ่งในกระบวนการบ่มจะเกิดกลไกการเชื่อมโยงของสายโซ่อย่างรวดเร็ว เมื่อหมึกพิมพ์หรือเรซินสัมผัสกับรังสี UV จึงได้นำข้อดีที่สำคัญของเทคโนโลยีนี้มาปรับใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น การใช้งานได้สะดวกยิ่ง, ลดต้นทุนลดระยะเวลาในการผลิต และลดการปล่อยสารระเหย (Volatile Organic Compounds ; VOCs) ความเร็วในการบ่มที่เพิ่มขึ้นด้วยเทคโนโลยีการบ่มด้วยรังสี UV นี้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย สำหรับกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้แสดงการศึกษาสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของคอมโพสิตที่มี

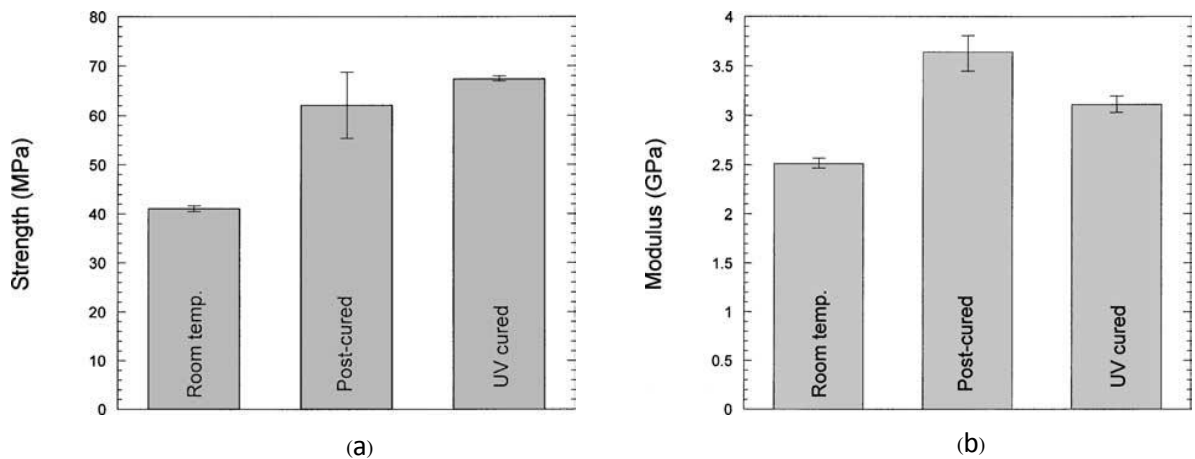
ไวนิลเอสเทอร์ (Vinylester) เป็นเมทริกซ์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วบ่มโดยใช้รังสี UV เปรียบเทียบกับสมบัติของตัวอย่างที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องและเปรียบเทียบกับการบ่มตัวอย่างด้วยการให้ความร้อน การประเมินคุณภาพของระดับการบ่มในแต่ละระบบที่ทำการทดสอบความแข็งเปรียบเทียบกับสมบัติการทนแรงดึง โดยทำการศึกษาเรซิน Vinyl ester (Dow Chemical) เติม Cobalt Naphthenate (CoNap) ร้อยละ 0.2 (pph) และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา Methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) ร้อยละ 1 (pph) สำหรับการบ่มด้วย UV ต้องทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิด Phosphine oxide based (Solcat S2, Soltek Pty. Ltd., Australia) ที่ร้อยละ 0.5 (pph) แบ่งการทดสอบเป็นสามระบบ คือ บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง, บ่มให้อุณหภูมิความร้อนที่ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มภายใต้หลอด UV-A 400 W (Mercury vapor lamp : MVL) เป็นเวลา 10 นาที ระดับของการบ่มถูกตรวจสอบด้วยการวัดค่าความแข็ง Rockwell hardness scale M ตามมาตรฐาน ASTM D785 ระบบการบ่มที่อุณหภูมิห้องถูกทดสอบ 2 วันหลังจากการหล่อขึ้นรูป ระบบที่บ่มด้วย UV จะถูกทดสอบความแข็งทั้งด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638M ค่าความแข็งสำหรับแต่ละระบบการบ่มของเรซินถูกนำเสนอในรูปแบบที่ 2.48



รูปที่ 2.48 ค่าความแข็งของเรซินที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, บ่มโดยให้ความร้อน และบ่มโดยใช้รังสี UV ; (top surface ; ส่วนบนของชิ้นงานที่สัมผัสกับแสง UV โดยตรง) (bottom surface ; ส่วนล่างของชิ้นงานที่กล่าวถึงความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสี UV) [5]

พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องมีค่าความแข็งต่ำ ซึ่งแสดงใหม่เห็นว่ามีความปริมาณการบ่มที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับบ่มของโดยให้ความร้อนที่มีค่าความแข็งสูงสุดซึ่งถือได้ว่ามีปริมาณการบ่มที่สูง ในขณะที่การบ่มโดยให้ความร้อนเป็นการเร่งการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับความควบคุมอุณหภูมิในการบ่มที่ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ระบบนี้มีแนวโน้มของปริมาณการบ่มที่สูงมาก ดังนั้นจึงสามารถนำผลนี้มาเป็นมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับบ่มด้วยรังสี UV ได้ ระบบที่บ่มด้วยรังสี UV ให้ค่าความแข็งที่สูงกว่ากลุ่มตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความแข็งต่ำกว่าการบ่มโดยให้ความร้อนอยู่เล็กน้อย ค่าความแข็งของพื้นผิวด้านล่างมีค่าความแข็งน้อยกว่าพื้นผิวด้านบนที่บ่มด้วยรังสี UV คือ 3.8% ส่วนใหญ่จะลดลงเนื่องจากความเข้มของแสงที่ผ่านความหนาของตัวอย่าง อย่างไรก็ตามความแข็งที่พื้นผิวด้านล่างยังคงใกล้เคียงกับค่าความแข็งของตัวอย่างที่บ่มด้วยการให้ความร้อน สามารถสรุปได้ว่าที่ความหนาของตัวอย่าง 6 mm มีปริมาณของการบ่มที่สูงหลังจากสัมผัสแสง UV เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 2.48

ส่วนผลของการต้านทานแรงดึงและโมดูลัสจะแสดงในรูปที่ 2.49 (a) , (b) ตามลำดับที่ระบบการบ่มที่อุณหภูมิห้องแสดงสมบัติการต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่าทั้งระบบการให้ความร้อนในการบ่ม และบ่มด้วยรังสี UV การต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสของเราซึ่งที่บ่มด้วยรังสี UV เปรียบเทียบได้ดีกับการบ่มด้วยการให้ความร้อน ซึ่งผลของความแข็งแรงที่แตกต่างกันโดยระบบการบ่มด้วยรังสี UV มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าระบบการบ่มด้วยความร้อน แต่มีค่าของโมดูลัสที่ต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของเนื้อสไตรีนที่มีผลมาจากความเร็วในการบ่ม ระบบการบ่มด้วยรังสี UV มักจะทำให้การเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของสไตรีนเพิ่มขึ้น ระบบที่บ่มด้วยการให้ความร้อน ซึ่งถูกบ่มมาแล้วในตอนแรก หลังจากนั้นนำมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะมีการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ระบบการบ่มด้วยรังสี UV อาจมีผลต่อขนาดของโมเลกุลการเชื่อมโยงสายโซ่ของสไตรีนที่เพิ่มขึ้น การเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ค่าโมดูลัสลดลง



รูปที่ 2.49 สมบัติการทนแรงดึงของการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, บ่มโดยให้ความร้อน, และบ่มด้วยรังสี UV : (a) ค่าความแข็งแรง (strength) และ (b) โมดูลัส (modulus) [23]

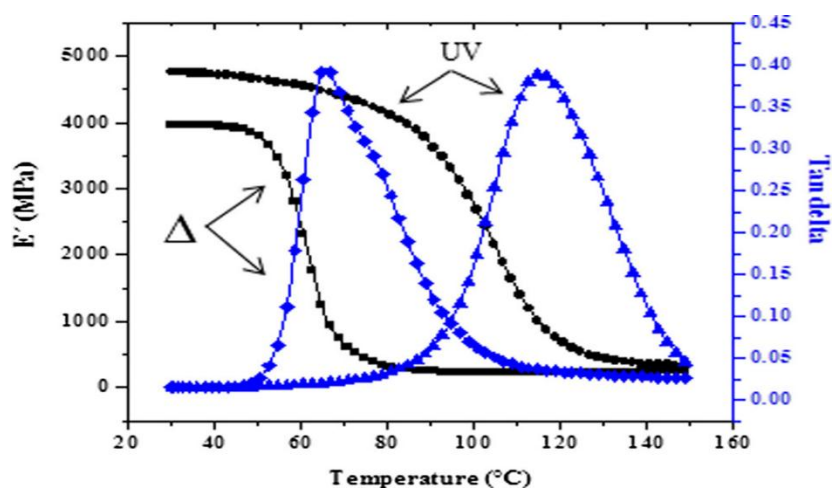
ในการวิจัยนี้พบว่า การทำให้ปริมาณการบ่มที่สูงขึ้นส่งผลมีสมบัติเชิงกลที่ดี เพียงในเวลาไม่กี่นาที่ที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับกระบวนการผลิตและลดระยะเวลาในการขึ้นรูป ซึ่งแตกต่างกับกรณีของการบ่มที่อุณหภูมิห้องที่มีการทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาหลายวันจนกระทั่งมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น ข้อเสียของการบ่มที่อุณหภูมิห้อง คือ ระยะเวลาการบ่มจนเป็นเจลและความไวในการเกิดเจล จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิห้องและความชื้นในช่วงระยะเวลาการผลิต โดยรวมแล้วสมบัติเชิงกลของระบบการบ่มด้วยรังสี UV, การริเริ่มปฏิกิริยาการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และเปรียบเทียบกับระบบการบ่มที่ให้ความร้อน มีความสำคัญอย่างมากกับการพิจารณาคุณสมบัติเหล่านี้เมื่อใช้รังสี UV ในการบ่มสำหรับการเพิ่มผลผลิตต่อไป

2.10.3 ปี ค.ศ. 2016 Ricardo Acosta Ortiz และคณะ [24]

ศึกษาวิธีการที่มีประสิทธิภาพเพื่อเตรียมการบ่มด้วยแสงของอีพ็อกซีคอมโพสิตเสริมแรงด้วยใยแก้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาในการบ่มสำหรับพัฒนาระบบการบ่มด้วยแสงของอีพ็อกซีคือ หมู่ฟังก์ชัน Tetramine ที่มีหกหมู่แอลดีนกลุ่มตติยภูมิ amine ทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันที่ให้ประจุลบของกลุ่มอีพ็อกซี ซึ่งสอดคล้องกับการผลิต Polyethers ในขณะที่เดียวกันพันธะคู่ของตัวเร่งปฏิกิริยาการบ่มทำปฏิกิริยากับมัดติฟังก์ชัน Thiol ที่เพิ่มขึ้นด้วยกลไกของเคมี Thiol-ene กลายเป็น Polythioethers ซึ่งส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาของระบบเพราะเกิดประจุลบที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับกลุ่มอีพ็อกซี นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นของ Polythioethers ที่ช่วยเพิ่มความเหนียวของ Polyether ในระบบ Epoxy-amine/thiol-ene ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ซึ่งงานทดสอบที่บ่มเต็มที่มีค่ามอดูลัสอยู่

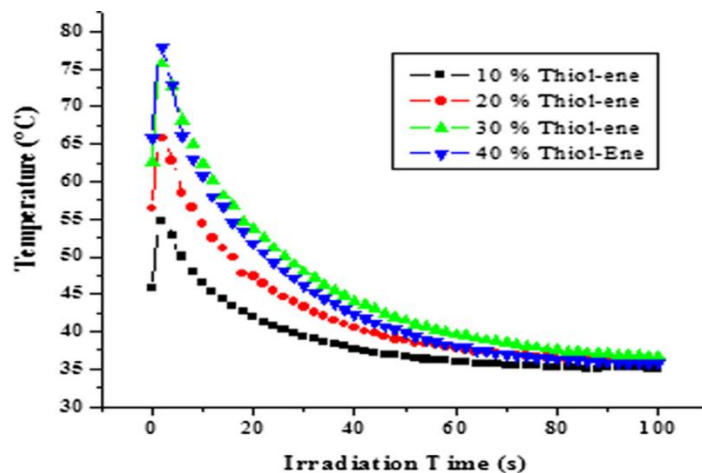
ที่ประมาณ 25,000-29,000 MPa ความร้อนที่ปล่อยออกมาเนื่องจากกระบวนการกระตุ้นโดยแสงก่อให้เกิดการบ่มที่สมบูรณ์ของวัสดุคอมโพสิต

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการในการตรวจสอบวิธีการบ่มทั้งใช้ความร้อนและการบ่มด้วยแสง กำหนด 20 mol % ของระบบ thiol-ene กับเส้นใยแก้ว 10 ชั้น โดยวิธีการบ่มที่แม่พิมพ์ถูกนำมาไว้ในห้องที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 85 °C ความเข้มของแสง 40 mW/cm² และการบ่มโดยวางแม่พิมพ์ในเตาอบที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลาสองชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่แข็งแล้วจากการบ่มทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์สมบัติทางกลโดยใช้ DMA ดังแสดงค่าในรูปที่ 2.50



รูปที่ 2.50 เปรียบเทียบสมบัติด้าน Viscoelastic ของตัวอย่าง BADGE/TRIS/PTKMP ที่สัดส่วน 1/0.2/0.3 ตามลำดับ ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงชนิด DMPA 1 mol% ตัวอย่างถูกนำมาบ่มด้วยแสง UV เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 85 °C ความเข้มของแสง 40 mW/cm² และการบ่มโดยวางตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [24]

พบว่าตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่บ่มด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต แสดงค่ามอดูลัสและค่า T_g ที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่มด้วยเตาอบ เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการศึกษานี้ได้ทดลองอีพ็อกซีที่ไม่มีสารเติมเส้นใยแก้ว ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.51 เป็นที่ทราบกันดีว่า กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยแสง (Photo-polymerizations) เป็นการคายความร้อนของปฏิกิริยาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นมีค่าความเข้มข้นของระบบ thiol-ene ที่เพิ่มขึ้นเพราะการปล่อยความร้อนออกมาในช่วงของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง



รูปที่ 2.51 เปรียบเทียบอุณหภูมิของการพัฒนาในช่วงการสังเคราะห์ด้วยรังสี (Photopolymerization) ของ Epoxy-amine/thiol-ene formulations [24]

2.10.4 ปี ค.ศ. 2008 P. Compston และคณะ [25]

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของการบ่มด้วยรังสี UV โดยใช้ Bisphenol A Epoxy Vinyl ester Resin เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งเป็นสูตรที่เกิดเป็นเจลที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เวลา 20-40 นาที เมื่อทำการผสม Cobalt Naphthenate (CoNap) 0.2 ส่วนต่อร้อยละ โดยน้ำหนัก (pph) และตัวเร่งปฏิกิริยา Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKP) 1 หรือ 1.25 (pph) ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิห้องในขณะนั้น โดยทำการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. จึงถอดออกจากแม่พิมพ์และทำการทดสอบบ่มสุกโดยการให้อุณหภูมิความร้อนในเตาอบ 90 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตามคำแนะนำของผู้ผลิตเพื่อสมบัติที่ดีของชิ้นงาน, สำหรับการบ่มสุกด้วยแสง UV เป็นสูตรที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงชนิด Phosphine Oxide-Based, Irgacure 819 (Ciba Specialty chemicals) ที่ปริมาณ 0.05 (pph) บ่มสุกภายใต้การสัมผัสแสง UV เป็นเวลา 10 นาที หลอด UV ชนิด Mercury Vapour Lamp ขนาด 400 วัตต์

ตัวอย่างถูกวางอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดแสงประมาณ 190 มิลลิเมตร ความเข้มของแสงยูวี, วัดด้วยเครื่องวัดแสงยูวี Q401, 0.7, 1.5, 2.7 และ 1.9 mW / cm² สำหรับความยาวคลื่น 300, 365, 400 และ 436 นาโนเมตรตามลำดับ เตรียมแผ่นทดสอบด้วยวิธีการ Laminate เพื่อทดสอบปริมาณการบ่มสุก (Degree of cure) ซึ่งใช้การทดสอบความแข็งที่พื้นผิวชิ้นงาน Rockwell Hardness Test จากตัวอย่างการบ่มสุกทั้ง 3 วิธีการที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้น มีการเตรียมความหนาของตัวอย่างการทดสอบที่ความหนาขนาด 6 มิลลิเมตรตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 785 โดยพบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยของการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องอยู่ที่ 52 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของการบ่มสุกโดยการให้อุณหภูมิความร้อนอยู่ที่ 90 ซึ่งมีค่าปริมาณการบ่มสุกเพิ่มขึ้น สำหรับการบ่มสุกด้วยแสง UV มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 89 และ 87 ทั้งบริเวณด้านหน้าที่สัมผัสกับแสง UV และด้านหลังชิ้นงานที่ไม่สัมผัสกับแสง UV ตามลำดับ

ผลของค่าความแข็งเหล่านี้บ่งชี้ว่าตัวอย่างการบ่มด้วยแสง UV มีความแข็งใกล้เคียงกับการบ่มด้วยความร้อน ตัวอย่างการบ่มด้วยแสง UV ที่มีความหนาของชิ้นงาน 7 มิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งลดลงถึง 84 จากการทดลองเมื่อพิจารณาแล้วว่ามีค่าความแข็งลดลงและปริมาณการบ่มสุกลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากความสามารถในการทะลุทะลวงและความเข้มของแสง UV ที่ต่ำลง แต่ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้แสง UV ในการบ่มสุกมีปริมาณการบ่มสุกที่สูงพอสมควรเมื่อชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น และค่าผลการทดสอบการทนแรงดึงและการต้านทานการโก่งงอ ถูกแสดงค่าในตารางที่ 1

Table 1
Tensile and flexural properties; strength (σ) and modulus (E) (± 1 SD in parentheses)

Composite cure method	Tensile		Flexural	
	σ , MPa	E, GPa	σ , MPa	E, GPa
Room temperature	191 (24)	11.5 (1.0)	438 (28)	13.8 (1.3)
Post-cured	190 (25)	12.2 (1.3)	504 (61)	16.4 (1.2)
UV-cured	230 (20)	12.6 (0.3)	542 (46)	17.6 (1.4)

ซึ่งวิธีการบ่มสุกไม่มีผลกระทบต่อแรงดึงและค่ามอดูลัส ของการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องและการบ่มสุกด้วยความร้อน โดยนอกจากนี้ยังมีความแตกต่างในการต้านทานการโก่งงอและค่ามอดูลัส สำหรับตัวอย่างที่ทำการบ่มสุกด้วยความร้อนและการบ่มสุกด้วยแสง UV อย่างไรก็ตามพบว่าการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องมีค่าการต้านทานของการโก่งงอลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการทดสอบการโก่งงอก่อให้เกิดแรงกดในตัวอย่างชิ้นงานแล้วเกิดแนวโน้มว่าปริมาณการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องมีค่าลดลง

โดยระบุได้จากผลการทดสอบค่าความแข็ง และอาจกล่าวได้ว่าเมื่อความแข็งลดลงความสามารถในการต้านทานการโค้งงออาจลดลง

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของการบ่มด้วยรังสี UV ระหว่าง เส้นใยแก้วกับไวนิลเอสเตอร์ (Vinylester) คอมโพสิต ถูกเปรียบเทียบกับ การบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องและการบ่มสุกโดยให้ความร้อน ซึ่งพบว่า การบ่มสุกคอมโพสิตโดยการสัมผัสรังสี UV ใช้เวลาเพียง 10 นาที ในขณะที่การบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องและการบ่มให้ความร้อนต้องใช้ระยะเวลาหลายชั่วโมงในกระบวนการผลิตสมบัติแรงดึงและการโค้งงอมีความสำคัญกับการทดสอบคอมโพสิต พบว่าความเค้นเฉือนภายในเพิ่มขึ้นเมื่อเรซินเกิดปฏิกิริยากับรังสี UV และการบ่มให้ความร้อน การกระจายประสิทธิภาพในการทำงานของคอมโพสิตที่บ่มด้วยรังสี UV ก็เทียบได้กับการบ่มโดยให้ความร้อน นอกจากนี้การบ่มด้วยรังสี UV ใช้เวลาน้อยกว่าสี่เท่าของการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นการใช้รังสี UV ในการบ่มคอมโพสิตส่งผลให้ประสิทธิภาพสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตและพัฒนาสิ่งแวดล้อมทางการผลิต

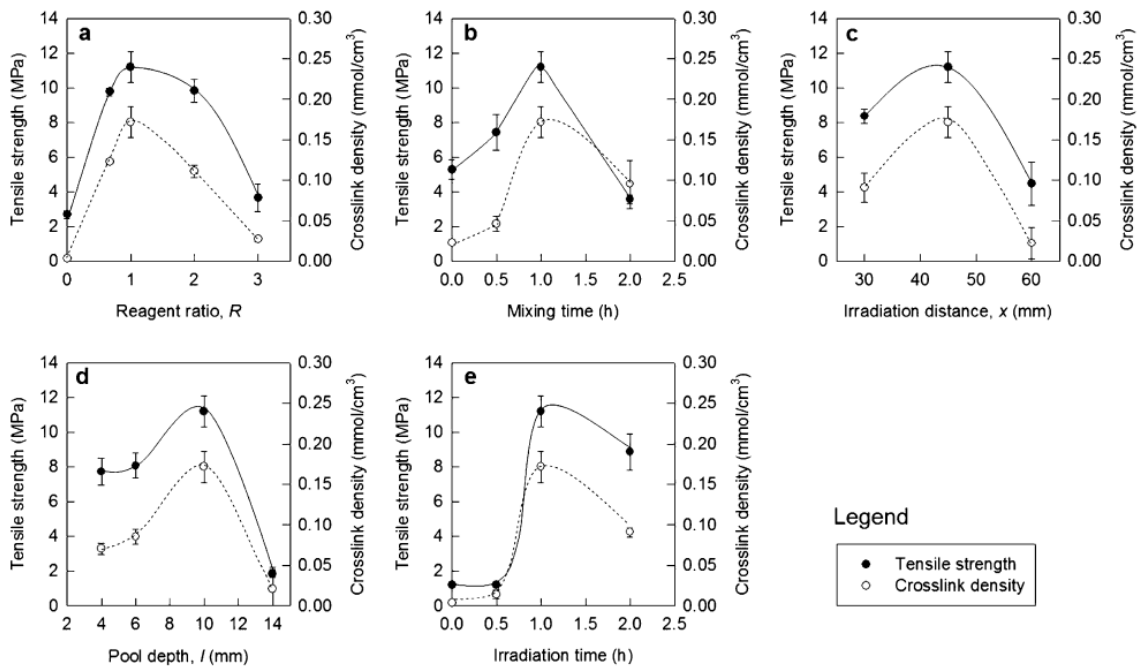
2.10.5 ปี ค.ศ. 2016 Nanthiya Hansupalak, Sirinapa Srisuk และคณะ [26]

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการ Per-vulcanizing น้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) โดยใช้ 2-Hydroxy-2-Methyl-1-Phenylpropanone เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง (Photo-initiator) และ 1,9-Bis (Acryloyloxy) nonane เป็น Coagent ผลของตัวแปรตามกระบวนการต่อไปนี้ได้ถูกทดสอบค่าการต้านทานแรงดึง และความหนาแน่นของการเชื่อมโยงแบบร่างแห (Cross-link density) ของฟิล์มบางที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ Per-vulcanized น้ำยางธรรมชาติ (PVNR) โดยทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้ ระยะเวลาในการฉายรังสี UV, ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสง, น้ำยางที่ได้รับการฉายแสงในเวลาที่เหมาะสมกับ Coagent และ Photoinitiator, ความลึกของน้ำยาง และอัตราส่วนของ Photoinitiator ที่ใช้กับ Coagent ฟิล์มบางที่ได้จากการผลิตภายใต้การควบคุมสถานะที่เหมาะสมสามารถต้านทานแรงดึงได้เกือบสี่เท่าของฟิล์มที่ไม่ผลิตโดยการฉายแสง UV

โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมการผสมน้ำยางธรรมชาติ 50% ของ 1,9 ND ถูกเตรียมจากการผสม 100 กรัม (g) ของ 1,9 ND กับน้ำที่ไม่มีไอออน 99 g และ สารเพิ่มความเสถียรของน้ำยาง (Potassium laurate) 1 g ผสมกันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ในที่มืด ของเหลวที่ทำการผสมนี้ถูกนำมาผสมเข้ากับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง Irgacure 1173 และน้ำยางธรรมชาติ โดยทำการผสมในเวลาต่างๆ ดังนี้ 0.5, 1.0, และ 2.0 ชั่วโมง สำหรับอัตราส่วนโดยมวลที่กำหนดไว้ ของ 1,9-ND และ Photoinitiator ในน้ำยางธรรมชาติที่ปริมาณรวมของสารทั้งสองอยู่ที่ 4 g เสมอ ต่อ 100 g ของยางใน

น้ำยางหรือ 4 phr (ส่วนต่อร้อยส่วนในน้ำยาง) การฉายรังสียูวี น้ำยางผสมที่เตรียมไว้ถูกเทลงในจานเลี้ยงเชื้อ (Each Petri dish) ที่ความลึก (l) ต่างๆ 4, 6, 10, และ 14 มิลลิเมตร จานเลี้ยงเชื้อถูกปกคลุมด้วยฟิล์มพลาสติกชนิด polyethylene ที่ดูดซับแสงน้อยกว่า 16% ของแสงยูวีที่ตกกระทบในช่วงความยาวคลื่น 250-350 นาโนเมตร ในขณะที่เดียวกันก็ทำการผสมน้ำยางในจานเลี้ยงเชื้ออย่างต่อเนื่องและรับการฉายแสงจากหลอด UV ทั้งหมดจากด้านบน ความเข้มแสงที่อยู่บนผิวของจานเลี้ยงเชื้อ 0.7-1.8 mW/cm² ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงอยู่ที่ 30, 45 และ 60 มิลลิเมตร การทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการในห้องมืดที่อุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองผลกระทบของการใช้ UV ในการเตรียมยางที่มีผลต่อความแข็งแรงของฟิล์มและปริมาณในการ Cross-link อัตราส่วนน้ำหนักร R ของ Photo-initiator ที่มีผลกระทบกับสมบัติของฟิล์ม แสดงในรูปที่ 2.52a การเพิ่มขึ้นในอัตราส่วน R จาก 0 ถึง 10 ที่เกิดการเพิ่มขึ้นทั้งในความต้านทานแรงดึงและปริมาณของการ crosslink ของฟิล์ม เมื่อค่า R เกิน 1 ค่าความต้านทานแรงดึงและปริมาณการ crosslink ลดลงอย่างมาก เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของฟิล์มซึ่งมีลักษณะของชั้นน้ำมันเกิดขึ้นบนพื้นผิวฟิล์มที่เกิดจากส่วนเกินของ Photo-initiator ในยางนั้น มากเกินไป การอธิบายผลของค่าการทนแรงดึงและปริมาณการ crosslink ที่ R>1 สามารถอธิบายผลเพิ่มเติมได้จากการเกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้ซึ่งเกิดขึ้นในน้ำยางระหว่างการฉายแสง UV ; (1) การรวมตัวของ free radicals ที่เกิดจากการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง ภายใต้ความเข้มแสงที่สูง (2) ปฏิกิริยาของขั้นตอนในการแพร่เนื่องจากปริมาณอนุภาคอิสระของโมโนเมอร์ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในโมเลกุล ซึ่งผลในรูปที่ 2.52a ที่ค่า R เท่ากับ 1 ถูกเลือกให้เป็นค่าที่ดีที่สุดและนำมาใช้ในงานทดลองต่อไป



รูปที่ 2.52 ความต้านแรงดึงและปริมาณการ crosslink ของการฉายแสงเพื่อผลิตฟิล์ม PVNR ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ (a) ผลกระทบของอัตราส่วนโดยมวลของ Photo-initiator ต่อ Coagent (R); (b) ผลของระยะเวลาในการผสม; (c) ผลกระทบของระยะห่างในการฉายแสง; (d) ผลกระทบของความลึกของน้ำยาง; (e) ผลของระยะเวลาในการฉายแสง

รูปที่ 2.52b แสดงผลกระทบของเวลาในการผสม ที่มีค่าการต้านทานแรงดึงและปริมาณการ Crosslink ของฟิล์ม PVNR ที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการผสมเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาในการผสม 1 ชั่วโมง ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอของการกระจายตัวของ Photo-initiator และ Coagent ในน้ำยาง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการผสมขึ้นอีกส่งผลกระทบต่อทั้งการต้านทานแรงดึงและปริมาณการ crosslink ที่ต่ำลง สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ในกรณีที่ไม่มีการฉายแสง UV ที่ทำการผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ไม่มีการเติมตัว Photo-initiator และ Coagent) ความหนืดของน้ำยางบริสุทธิ์ทั้งก่อนและหลังการผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง คือมีความหนืดอยู่ที่ประมาณ 60.0 mPa.s ส่วนในน้ำยางที่มีการเติม Photo-initiator และ Coagent มีความหนืดเพิ่มขึ้นจาก 60.0 mPa.s เป็น 77.5 mPa.s ที่เวลาการผสม 2 ชั่วโมง ดังนั้นความหนืดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญนี้เกิดจากการกีดขวางของสายโซ่โมเลกุลของ Photo-initiator และ Coagent สารทั้งสองนี้รู้จักกันดีว่าเป็น Hydrophobic liquids ในน้ำยางธรรมชาติซึ่งกระจายตัวเป็นอนุภาคอยู่ในน้ำยาง ผลการเพิ่มขึ้นของอนุภาคก่อให้เกิดความถี่ของ

การเกิดปฏิกิริยาร่วมกันของอนุภาค ในระหว่างการกวนและการ Hydrophobic ของอนุภาคน้ำยาง อนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะเวลาในการผสมเพิ่มขึ้น แสง UV เป็นแสงที่ไม่สามารถทะลุเจาะ วัสดุทึบแสงได้ การฉายแสงบนอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีการแข็งตัวหลังจากการผสมมากกว่า 1 ชั่วโมง (รูปที่ 2.52b) ทำให้ได้รับผลกระทบที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคและทำให้การคงรูปของยางลดลง นี่จึงเป็นการอธิบายถึงปริมาณการ Crosslink ที่ลดลงและเพราะเหตุนี้จึงทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงลดลง ในช่วงระยะเวลาการผสมที่ 2 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับ การผสมในระยะเวลาการผสมที่ 1 ชั่วโมง

ผลกระทบของระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดของแสง UV กับผิวของน้ำยางหรือ ระยะห่างของการฉายแสง ค่าการต้านทานแรงดึงและปริมาณการ Crosslink ของฟิล์ม PVNR ถูก แสดงในรูปที่ 2.52c การเพิ่มระยะห่างการฉายแสงจาก 30 ถึง 40 มิลลิเมตร ทำให้การต้านทานแรงดึง และปริมาณการ crosslink เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะห่างของการฉายแสงออกไปอีกถึง 60 มิลลิเมตร ทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงและปริมาณการ crosslink ของฟิล์มลดลงอย่างมาก สามารถอธิบายผลที่ ได้จากความแข็งแรงซึ่งเกิดผลกระทบจากค่าความเข้มของแสงที่ระยะห่างในการฉายแสงบนผิวน้ำยาง ก่อให้เกิดการเกาะกันเป็นก้อนในระหว่างการฉายแสง UV ที่ระยะห่างการฉายแสงต่ำลงความเข้มแสง ยิ่งเพิ่มความรุนแรงมากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของแสง UV ในการแตกตัวของ Photo-initiator ให้ เป็น Free radicals ที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในกระบวนการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ นี้จะนำไปสู่การ เพิ่มความต้านทานแรงดึงและการเพิ่มปริมาณการ Crosslink นอกจากนี้การระเหยของน้ำจากน้ำยางจะ เพิ่มขึ้นอย่างแน่นอน โดยเมื่อลดระยะห่างของหลอด UV กับพื้นผิวของน้ำยางนั้นมีแนวโน้มว่าจะทำ ให้น้ำยางแห้งเกิดเป็นฟิล์มบางๆอยู่บริเวณผิวของน้ำยาง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำยาง ในรูปที่ 2.52c การฉายแสงที่ระยะห่าง 45 มิลลิเมตร ถูกทดลองแล้วว่าเป็นระยะที่ดีที่สุดที่จะลดการ ระเหยของน้ำ และให้ความเข้มแสงเพียงพอที่จะทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงและปริมาณการ Crosslink ที่สูง

ในรูปที่ 2.52d ปริมาณการ Crosslink และความต้านทานการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม นี้เพิ่มขึ้นตามความลึกของน้ำยางจาก 4 ถึง 10 มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มความลึกของน้ำยางลงไปอีกค่า ปริมาณการ crosslink และการต้านทานแรงดึงลดลงอย่างมาก ในช่วงของความลึก 10 ถึง 14 มิลลิเมตร บ่งบอกถึงความสามารถในการทะลุของแสง UV ลดลง

ผลของระยะเวลาการฉายแสงกับสมบัติของฟิล์ม มีการแสดงในรูปที่ 2.52e เวลาการ ฉายแสงที่ 0.5 ชั่วโมง ไม่เพียงพอต่อปริมาณการ Crosslink ของสายโซ่อย่างเห็นได้ชัด ส่วนเวลาการ ฉายรังสีที่ 1 ชั่วโมง มีปริมาณการ Crosslink สูงสุดและความต้านทานการทนแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาการฉายแสงขึ้นไปอีก 2 ชั่วโมง ค่าปริมาณการ Crosslink และความต้านทานแรงดึงของ

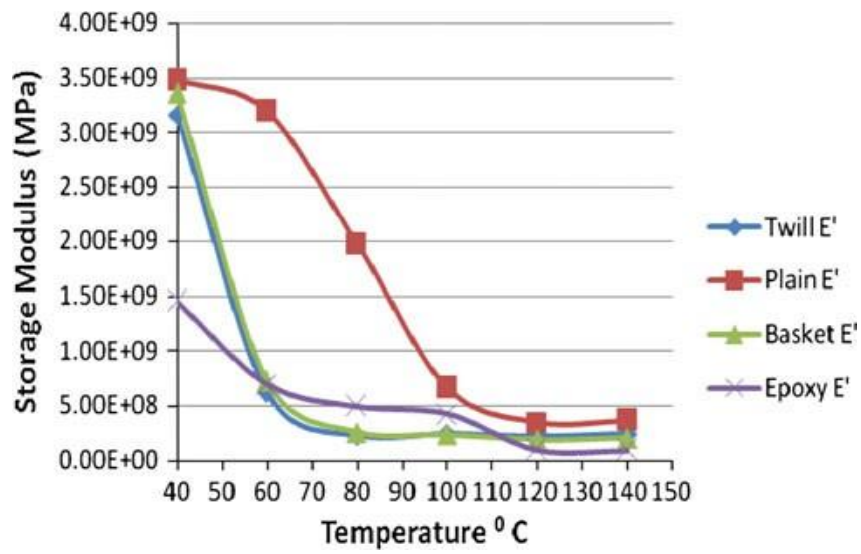
ฟิล์มลดลง ในการทดลองนี้ (รูปที่ 2.52e) พบว่าในช่วงระยะเวลาการฉายแสงที่ 2 ชั่วโมง น้ำยางจะจับตัวกันเป็นก้อนนอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าที่ระยะเวลาการฉายแสง UV เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้ยางเกิดการเชื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณการ Crosslink และค่าการต้านทานแรงดึง

ข้อมูลในรูปที่ 2.52 แสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณการ Crosslink และการต้านทานแรงดึงมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก ซึ่งค่าสูงสุดของปริมาณการ crosslink และการต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 0.17 mmol/cm^3 และ 11 MPa ตามลำดับ บนข้อมูลพื้นฐานในรูปที่ 2.52 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มปริมาณการ Crosslink และการต้านทานแรงดึงได้ดังนี้ โดยมีอัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงคือ 1 R, ระยะเวลาในการผสม 1 ชั่วโมง, ระยะห่างการฉายแสงอยู่ที่ 45 มิลลิเมตร, ความลึกของน้ำยางอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร และเวลาในการฉายแสง UV อยู่ที่ 1 ชั่วโมง

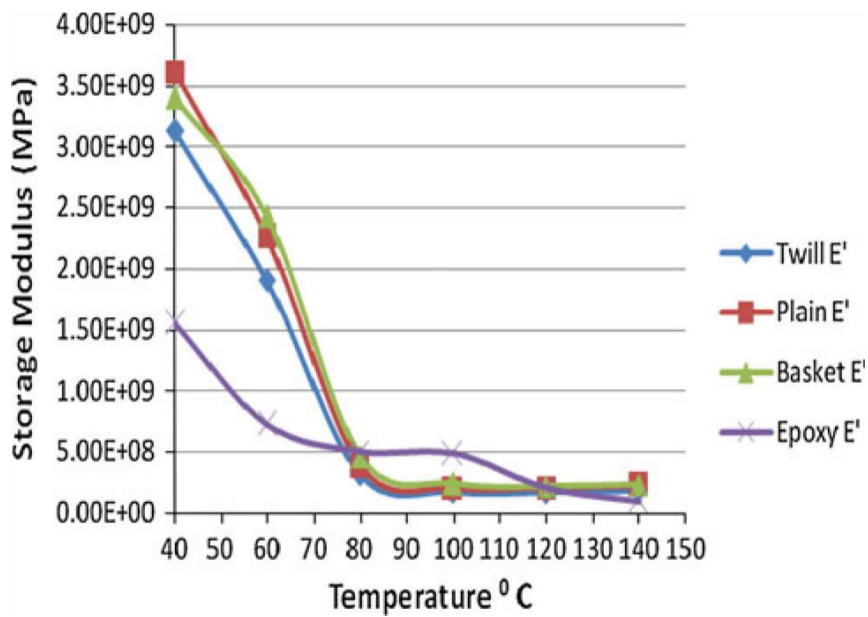
2.10.6 ปี ค.ศ. 2012 N. Venkateshwaran และคณะ [27]

งานวิจัยนี้ศึกษาวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกล้วย 3 ประเภท กับอีพ็อกซี ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบ Hand-layup ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบพลวัต (DMA) พบว่า

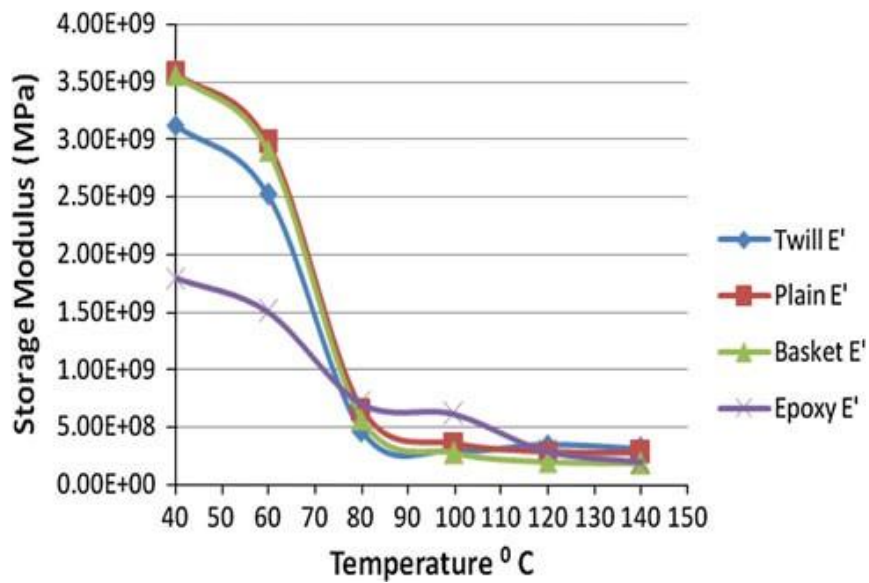
ผลจากความถี่ของมอดุลัสสะสม (E') มีความเกี่ยวข้องกับมอดุลัสของยังก์ (Young's Modulus) ของคอมโพสิตที่อยู่ภายใต้โหลดแรงดึง การรวมตัวกันของเส้นใยหรือฟิลเลอร์ มีบทบาทที่สำคัญในการเพิ่มความแข็งของคอมโพสิต รูปที่ 2.53, 2.54 และ 2.55 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่ออุณหภูมิค่ามอดุลัสสะสมของเส้นใยทอ ที่ความถี่ 0.1, 1 และ 10 เฮิร์ตซ์ จากตัวเลขดังกล่าวจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่ามอดุลัสสะสมของคอมโพสิตจะลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ รูปที่ 2.53, 2.54 และ 2.55 ยังแสดงให้เห็นว่าเส้นใยจะช่วยเพิ่มค่ามอดุลัสสะสมเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน เกือบ 130% ของการเพิ่มขึ้นของมอดุลัสสะสมเป็นผลมาจากการรวมตัวของเส้นใยจะเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับทุกแบบของการสาน การเพิ่มขึ้นนี้เป็นเพราะการยึดเกาะของเส้นใยกับเมทริกซ์ที่ดีขึ้น และระดับการถ่ายโอนความเค้นจะดีขึ้นที่ความถี่ที่สูงขึ้น (10 Hz) การลดลงในโมดูลัสสะสมจะน้อยกว่าที่ความถี่อื่น ๆ เพราะ ที่ความถี่ที่สูงขึ้น เวลาในการคลายความเค้นของโมเลกุลจะน้อยกว่าแต่ทำให้ความเข้มของความเค้นต่ำกว่า



รูปที่ 2.53 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสะสมของคอมโพสิตที่ความถี่ 0.1 เฮิรต

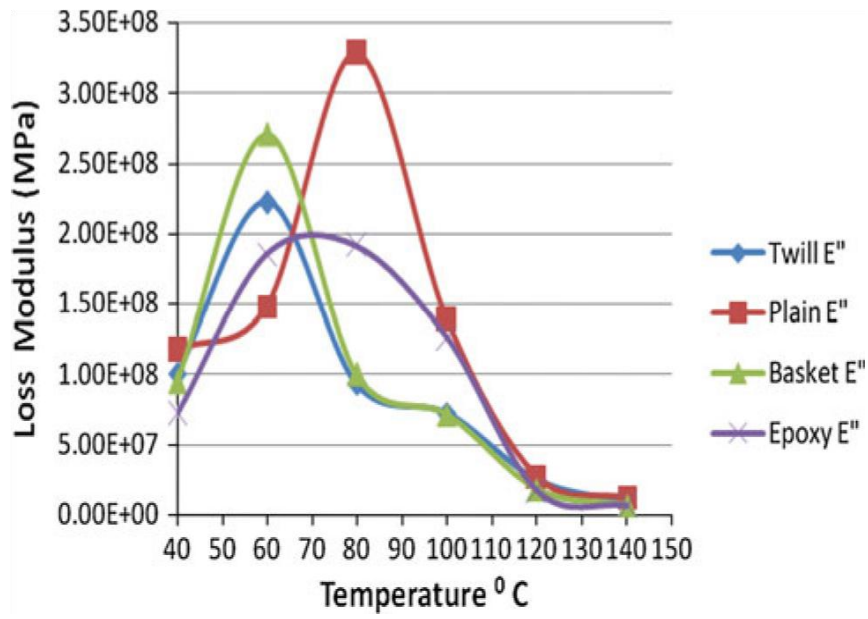


รูปที่ 2.54 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสะสมของคอมโพสิตที่ความถี่ 1 เฮิรต

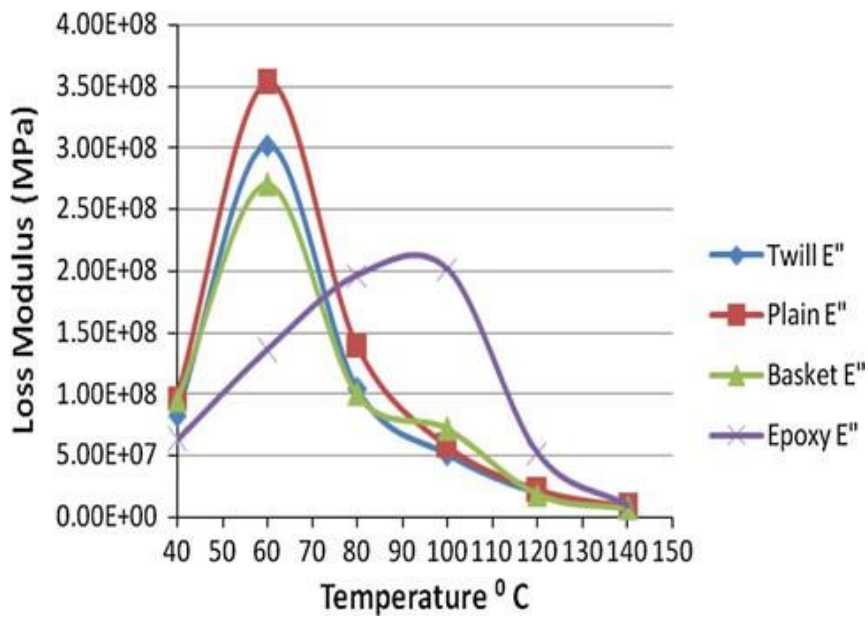


รูปที่ 2.55 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสะสมของคอม โพลีตที่ความถี่ 10 เฮิร์ต

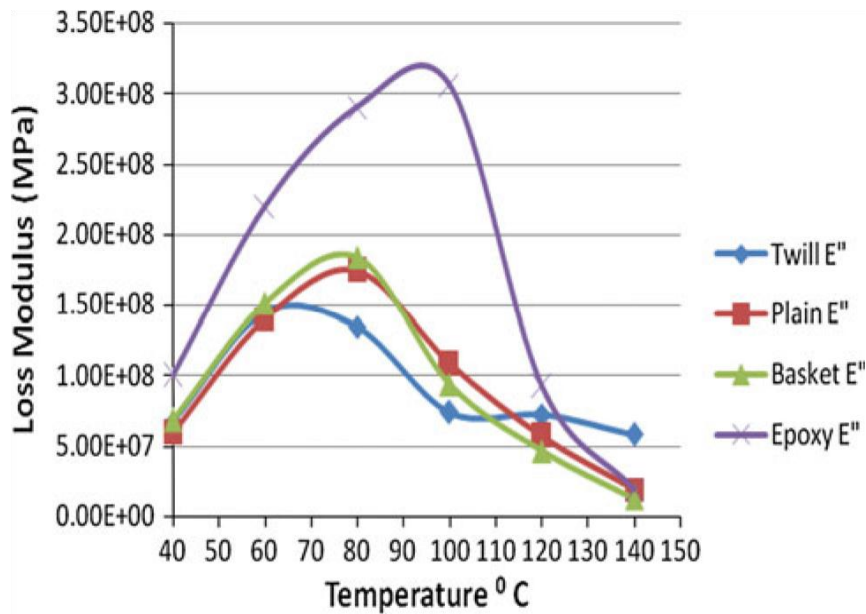
ผลจากความถี่ของมอดูลัสสูญเสีย (E'') มอดูลัสสูญเสียของวัสดุที่นำมาประกอบกับ ปริมาณของพลังงานที่สูญเสียไปนั้น รูปที่ 2.56, 2.57 และ 2.58 แสดงให้เห็นถึงผลของความถี่ใน โมดูลัสสูญเสียของคอม โพลีต จากรูปที่ 2.56, 2.57 และ 2.58 จะเห็นว่าจุดสูงสุดของเส้น โค้งการ สูญเสียโมดูลัสที่เกือบจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกัน เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนคล้ายแก้ว (T_g) ซึ่งไม่ได้รับ ผลกระทบจากรูปแบบการทอเส้นใย ถ้าเราเปรียบเทียบ T_g ของเรซินที่ความถี่ต่างๆ จะมีการ เปลี่ยนแปลงอย่างเพียงพอที่ความถี่ของการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ที่ความถี่ต่ำ (0.1 Hz) ค่า T_g ของเรซิน เกิดขึ้นประมาณ 80 องศาเซลเซียส ที่ความถี่เพิ่มขึ้น T_g ขยับถึง 95 องศาเซลเซียส นี่อาจจะเป็น เพราะการขยับของโมเลกุลที่ความถี่สูง



รูปที่ 2.56 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสูญเสียของคอมโพสิตที่ความถี่ 0.1 เฮิรต์

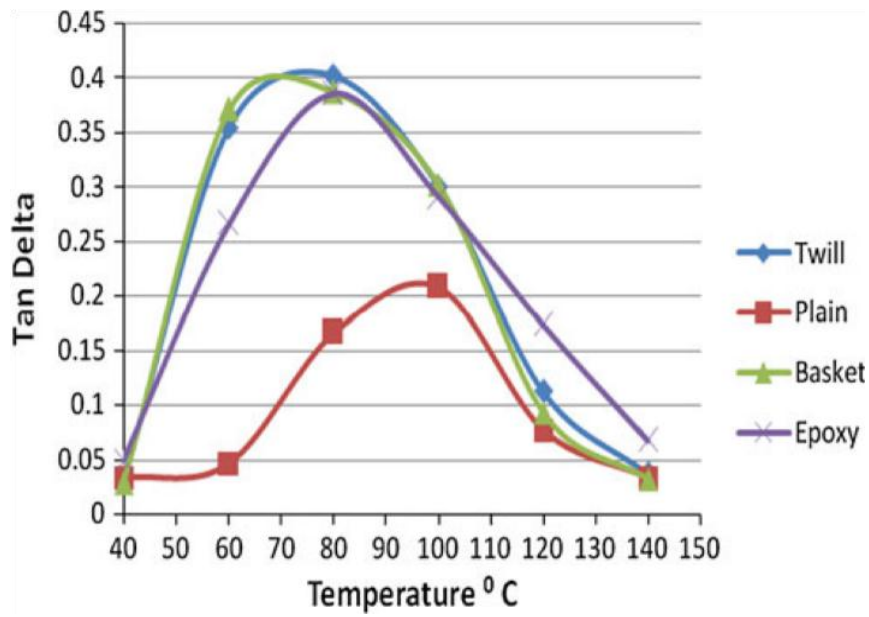


รูปที่ 2.57 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสูญเสียของคอมโพสิตที่ความถี่ 1 เฮิรต์

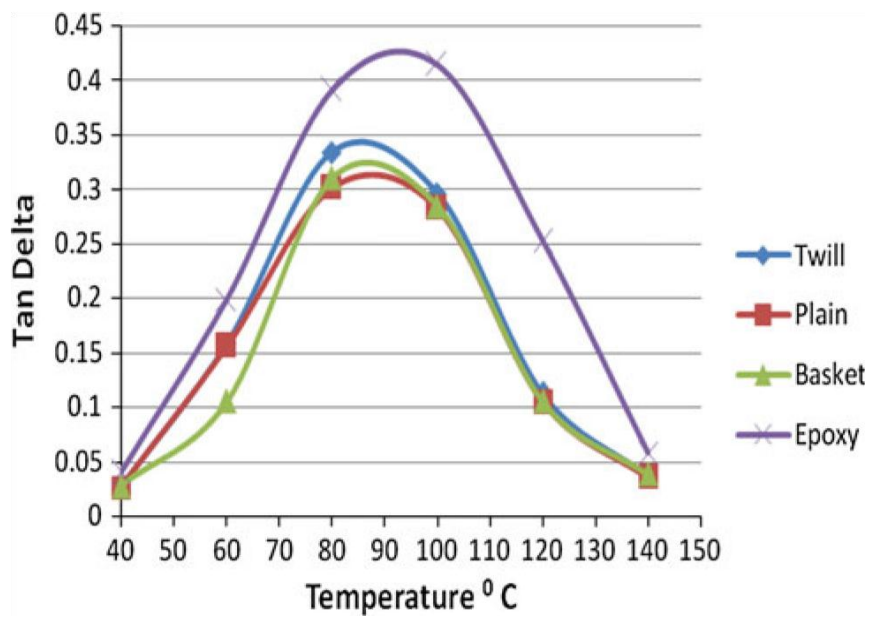


รูปที่ 2.58 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อมอดูลัสสูญเสียของคอมโพสิตที่ความถี่ 10 เฮิรต

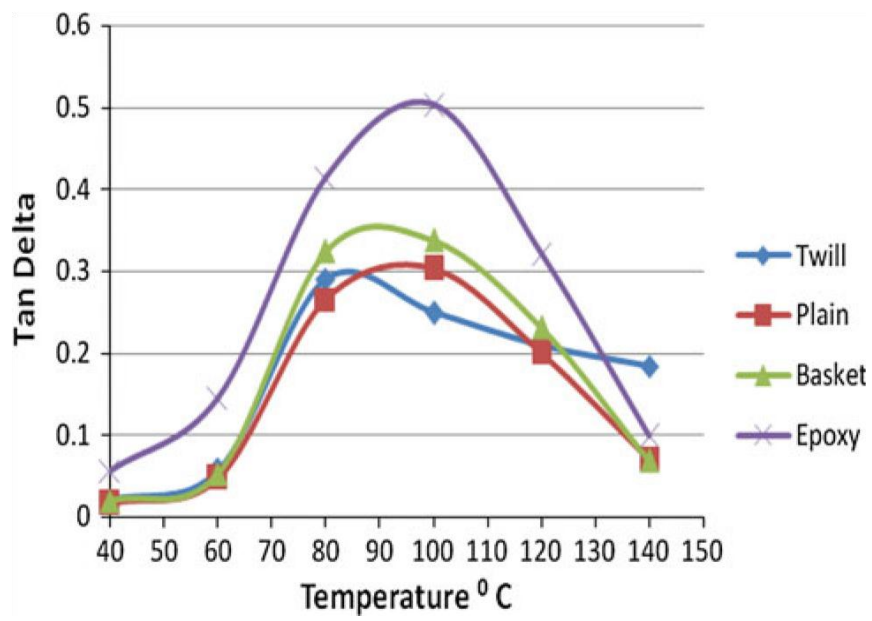
ผลจากความถี่ของสมบัติการหน่วง (Damping Property : $\tan \delta$) อัตราส่วนของมอดูลัสสูญเสีย (E'') ในมอดูลัสสะสม (E') จะวัดได้จากค่า $\tan \delta$ ผลของ Damping เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ความถี่ต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในรูป 2.59, 2.60 และ 2.61 ตัวเลขทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการรวมตัวของเส้นใยในเมทริกซ์จะช่วยลดคุณสมบัติ Damping ของเมทริกซ์ ที่ความถี่ทั้งหมด ค่า $\tan \delta$ สำหรับคอมโพสิตผสมเส้นใยทอหลายชนิดจะต่ำกว่าและกว้างกว่าซึ่งบ่งชี้ถึงการถ่ายโอนความเค้นจากเส้นใยไปยังเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างง่ายดายโดยเมทริกซ์ไม่เสียหาย [28] สมบัติ Damping ที่ต่ำกว่าแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตมีการดูดซับพลังงานเมื่อมีการโหลด อุณหภูมิเปลี่ยนคล้ายแก้วของเส้นใยทอแบบ twill และ basket พบว่าจะสูงกว่าแต่ความกว้างจะน้อยกว่าเส้นใยลายขัดแบบธรรมดา การเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสจะปรากฏในระหว่างการเชื่อมขวางซึ่งแรงจะถูกปรับให้มีค่า damping ของเรซินสูงขึ้น



รูปที่ 2.59 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อค่า Tan δ ที่ความถี่ 0.1 เฮิรต์



รูปที่ 2.60 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อค่า Tan δ ที่ความถี่ 1 เฮิรต์



รูปที่ 2.61 ผลจากรูปแบบการสานเส้นใยโดยอุณหภูมิมีผลต่อค่า Tan δ ที่ความถี่ 10 เฮิร์ต

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ref.	ชื่อผู้เขียน	ปี ค.ศ.	วัสดุอุปกรณ์	ผลการทดลอง
[22]	J. Ramli และ คณะ	2010	epoxy และ vinyl ester Photo-initiator ; Bisacyl Phosphine Oxide (BaPO) Alpha Hydroxyl Ketone Peroxide (AHK)	1. Epoxy บ่มสุกด้วย UV ได้เร็วกว่า Vinyl Ester 2. Photo-initiator 1 phr บ่มสุกด้วย UV 6 นาที ให้ค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุด 3. บ่มสุกด้วย UV ที่ 3 นาที การยึดเกาะระหว่างเรซินกับเส้นใยไม่ดี 4. บ่มสุกด้วย UV ที่ 12 นาที ตัวอย่างทดสอบเสื่อมสภาพจากความร้อน
[23]	A. Cvetanovska และคณะ	2004	vinyl ester, Cobalt, MEKP Photo-initiator ; Phosphine oxide	1. การบ่มด้วย UV ให้ค่าความแข็งใกล้เคียงกับการบ่มด้วยความร้อน 2. การบ่มด้วย UV ใช้เวลาเพียง 10 นาที แต่มีค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้อง
[24]	Ricardo Acosta Ortiz และคณะ	2016	Epoxy (DGEBA) Photo-initiator ; 2,2-Dimethoxyphenyl - Acetophenone (DMPA)	1. การบ่มด้วย UV ค่ามอดูลัสและ Tg มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่มด้วยเตาอบ 2. เพิ่มความเหนียวของชิ้นงานทดสอบ มีค่ามอดูลัสอยู่ที่ประมาณ 25,000-29,000 Mpa

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

Ref.	ชื่อผู้เขียน	ปี ค.ศ.	วัสดุอุปกรณ์	ผลการทดลอง
[25]	P. Compston และ คณะ	2008	vinyl ester, Cobalt, MEKP Photo-initiator ; Phosphine oxide	ศึกษาต่อจาก 2004 1. การบ่มด้วย UV มีการปลดปล่อยความเป็นต่ำ 2. ลดระยะเวลาในการผลิต
[26]	Nanthiya Hansupalakและคณะ	2016	High-ammonia NR latex Photo-initiator ; 2-hydroxy-2- methyl-1-phenylpropanone 1,9-bis-(acryloyloxy)	1. ความเข้มข้นของ Photo-initiator กับ Coagent 1 R 2. เวลาในการผสม 1 h. เวลากระตุ้นด้วย UV 1 h. 3. ระยะห่างระหว่างหลอดกับน้ำยาง 45 mm.
[27]	N. Venkateshwaran และคณะ	2012	Epoxy LY556 Hardener HY951 Banana fibers	1. เส้นใยมีผลให้ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น 2. ที่ความถี่สูงมอดูลัสสะสมจะน้อย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานในการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในการบ่มที่เวลา 0, 2 และ 4 นาที เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-initiator) ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr เริ่มจากการเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปและการทดสอบตัวอย่าง โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

3.1.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 วางแผนการดำเนินงาน

3.1.3 จัดหาวัตถุดิบและเครื่องมือในการทดลอง

3.1.4 เตรียมอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin), สารทำให้แข็ง (Hardener) และตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-initiator)

3.1.5 เตรียมวัสดุผสมระหว่างเตรียมอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin), สารทำให้แข็ง (Hardener) ที่อัตราส่วนต่อร้อยละ (phr) และตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-initiator) ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0, 5.0 phr โดยกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 0, 2 และ 4 นาที ตามลำดับ และขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag Process) บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที

3.1.6 ทดสอบสมบัติกายภาพ, สมบัติทางความร้อน, ทดสอบโครงสร้างทางเคมี และทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในการบ่มที่เวลา 0, 2 และ 4 นาที เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาที่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-initiator) ในปริมาณ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr

3.1.7 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.8 สรุปและจัดทำรูปเล่มรายงาน

3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุดิบและสารเคมี

1. Epoxy Resin เกรด ML 3564 บริษัท Golden Gat Chemical Co., Ktd
2. สารทำแข็ง (Hardener) Cyclohexylamine เกรด HY 3968 บริษัท Golden Gat Chemical Co., Ktd
3. เส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียว (Unidirection mat) ชนิด E-glass Fiber เกรด EMC 300-1040 บริษัท Wah Tech Ind. Co., Ltd
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-initiator) ชนิด Bis Acyl Phosphine (BAPO) เกรด IRGACURE 819
5. หลอด UV-A ชนิด mercury-vapor lamp ยี่ห้อ OSRMA 300 W บริษัท ccs successproducts Co., Ltd
6. แผ่นลอกแบบ (Peel Ply)
7. เทปกาวแวคคัม (Vacuum Tape)
8. แผ่นฟิล์มกันอากาศ (Bagging Film)
9. ปั๊มแวคคัม (Vacuum Pump) Single Cylinder รุ่น TC-63 vm4 บริษัท THAI TOP GLOBAL Co., Ltd
10. ถังดักเรซิน (Catch Pot)
11. ท่อปล่อยเรซิน (Spiral Tubes)
12. ตาข่ายนำเรซิน (Infusion Net)
13. แผ่นฟิล์มนำอากาศ (Release Film)
14. ข้อต่อตัวที (T Conect)
15. กระจกหนา 3 มิลลิเมตร

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

1. เครื่องขึ้นรูปสุญญากาศ (Vacuum Bag)
2. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 และ 3 ตำแหน่ง (Analytical Balance) บริษัท METTLER TOLEDO (ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ)
3. เครื่อง Cure UV-A
4. ตู้อบ (Oven) บริษัท KTT TECHNOLOGY OUTSOURCE BRAND BINDER (ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ)

3.2.3 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของแผ่นคอมโพสิต

3.2.3.1 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน

- เครื่อง (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

3.2.3.2 เครื่องทดสอบสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์

- เครื่อง (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)

3.2.3.3 เครื่องทดสอบโครงสร้างทางเคมี

- เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

3.2.3.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

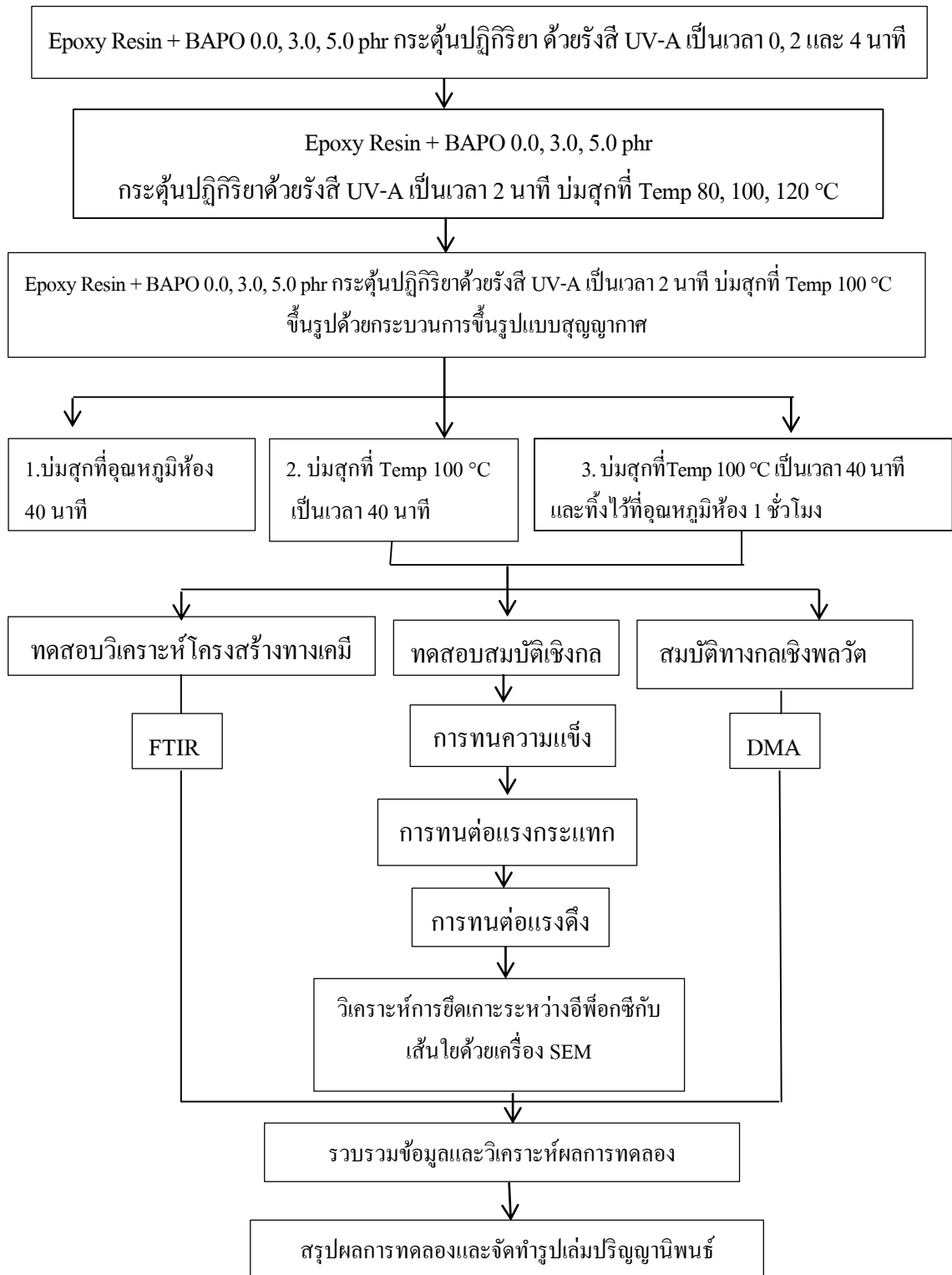
- เครื่องทดสอบโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.2.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

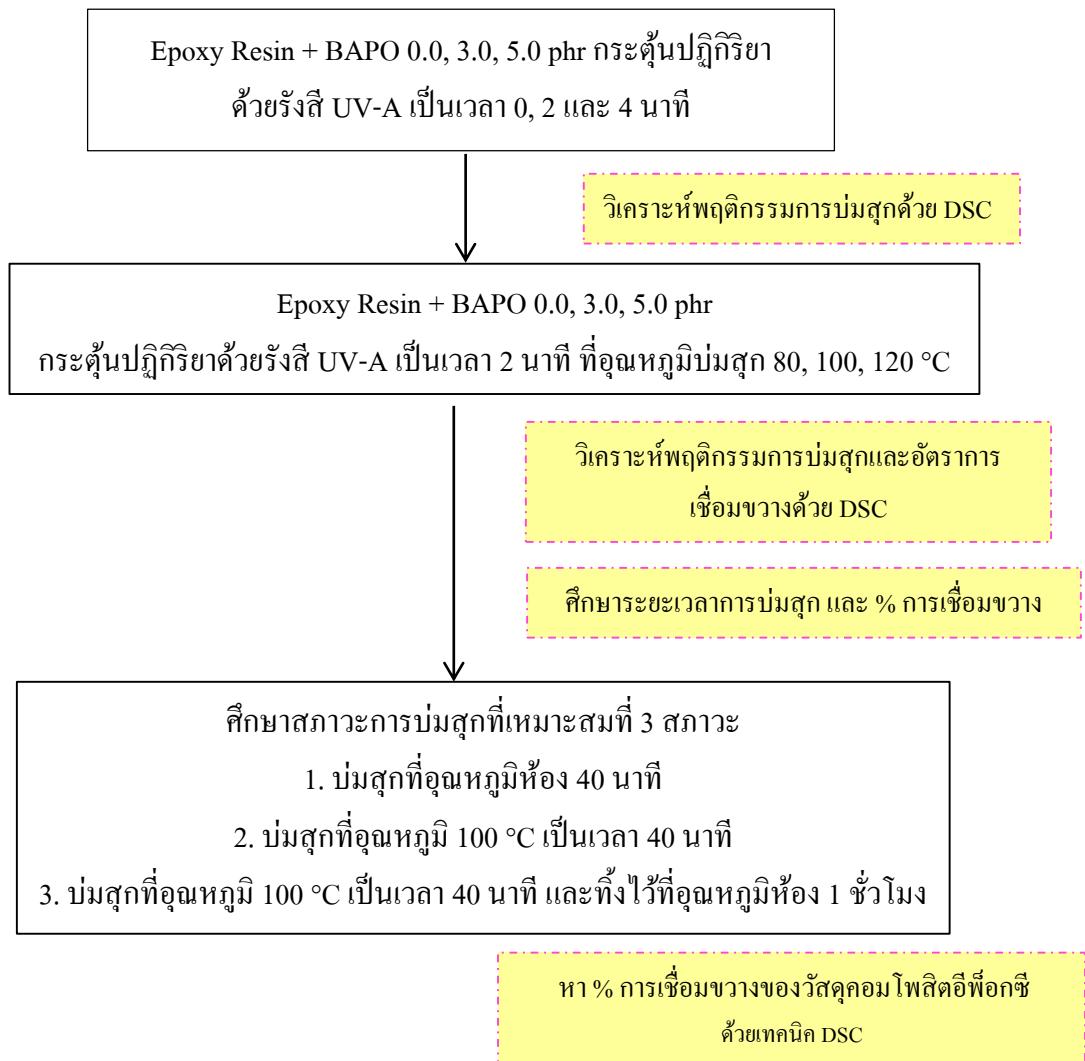
- เครื่องทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D638M
- เครื่องทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Chapy Impact Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D6110
- เครื่องทดสอบความแข็ง (Rockwell Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D785

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

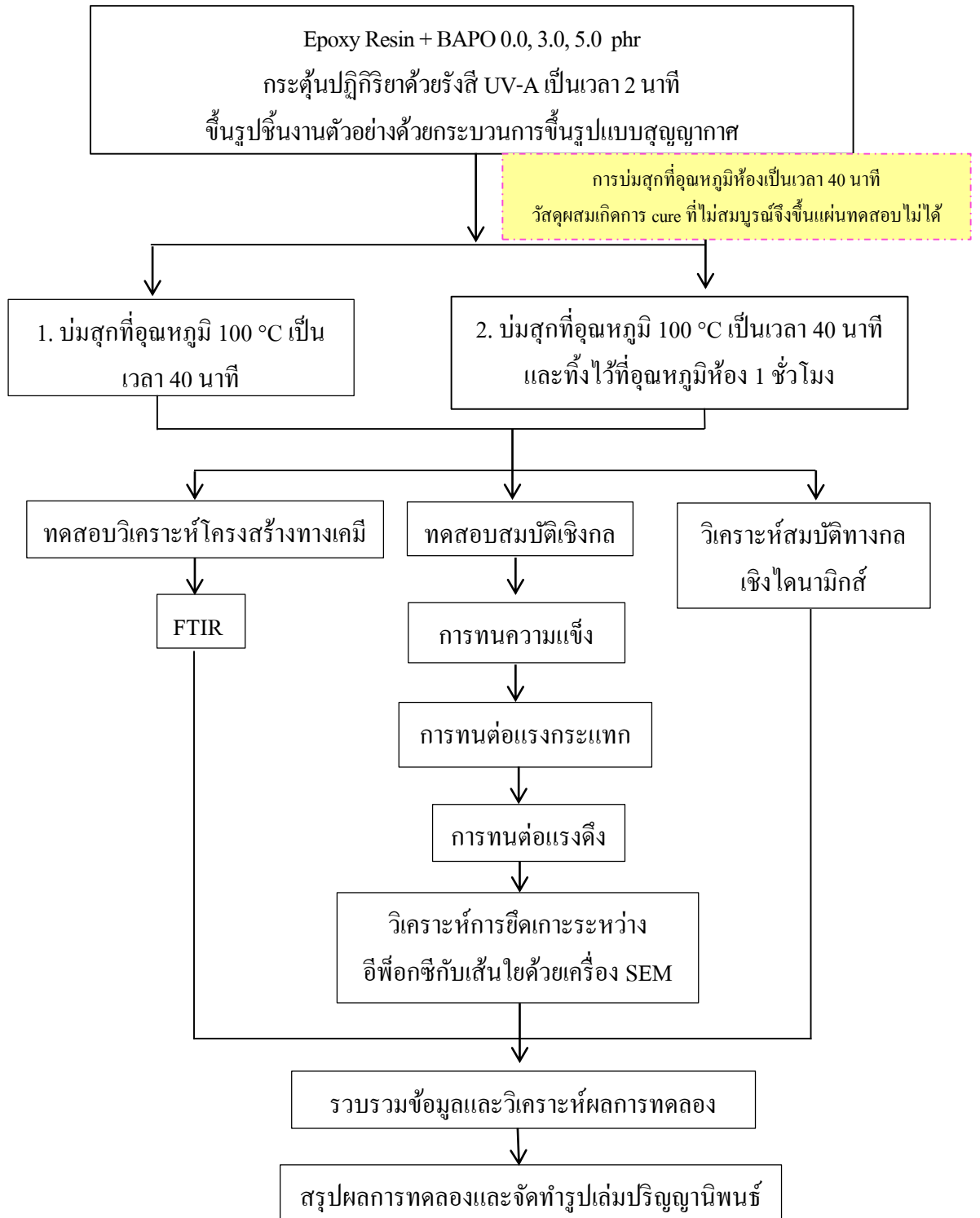
3.3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานโดยรวม



3.3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานการเตรียมส่วนเชื่อมประสาน (Matrix)



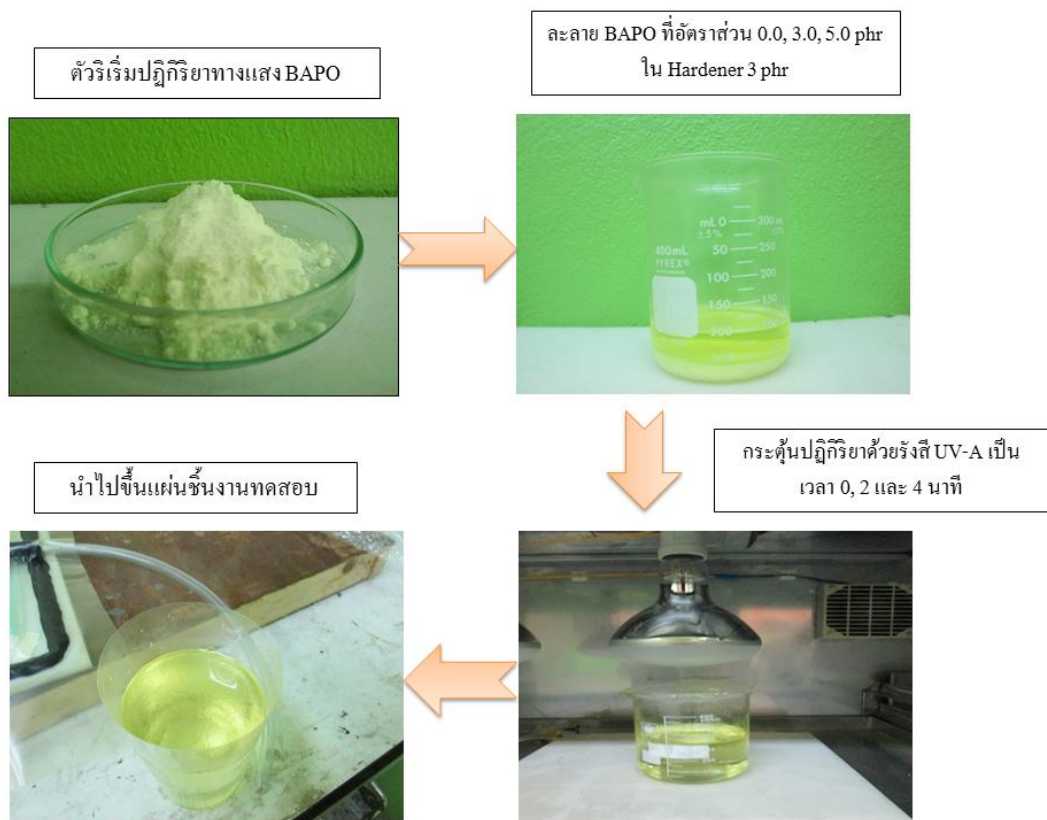
3.3.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมอีพ็อกซี (Epoxy Composite)



3.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.4.1 การเตรียมส่วนผสมผสาน (Matrix) ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photoinitiator)

1. นำตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ไปละลายในสารทำให้แข็ง (Hardener) ชนิด Cyclohexylamine ที่อัตราส่วน 3 phr จนกระทั่งละลายเข้ากันดี
2. นำ Hardener ที่ละลาย BAPO ตามอัตราส่วนข้างต้นดังกล่าว (ข้อที่ 1) มาผสมเข้ากับเรซินอีพ็อกซี (Epoxy resin) กำหนดเวลาในการผสมแต่ละอัตราส่วน 10 นาที จากนั้นนำไปกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ UV-A เป็นเวลา 0, 2 และ 4 นาที
3. เมื่อได้ส่วนผสมที่ทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A (ในข้อที่ 2) แล้วนำมาขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสูญญากาศ ปริมาณเรซินที่ใช้ต่อแผ่นเท่ากับ 288 กรัม ใช้สารทำให้แข็งปริมาณ 66 กรัม กำหนดระยะเวลาการขึ้นรูปแต่ละอัตราส่วนที่ 15 นาที
4. จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานทดสอบไปทำการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที

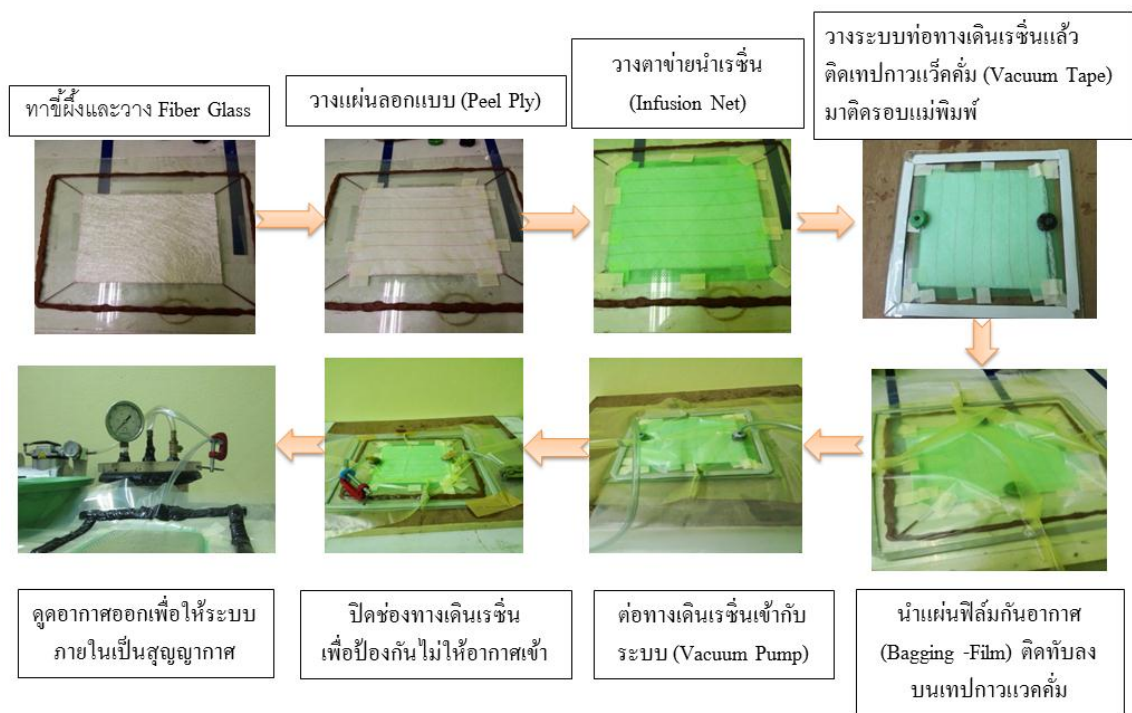


รูปที่ 3.1 การเตรียมส่วนผสมผสมสาน (Matrix) ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-initiator)

3.4.2 การเตรียมแผ่นคอมโพสิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag Process)

1. ทาขี้ผึ้งลงบนแม่พิมพ์ โดยทาบางๆ ประมาณ 5-8 ครั้ง แล้วทำการขัดด้วยผ้าให้สะอาดจนแม่พิมพ์ขึ้นเงา เพื่อให้ง่ายแก่การถอดแบบ
2. ตัดแผ่น Fiber Glass ขนาด 20×20 ซม. จำนวนแปดแผ่น น้ำหนักประมาณ 120 กรัม วางลงบนแม่พิมพ์ที่ทำการทาขี้ผึ้งถอดแบบไว้
3. นำแผ่นลอกแบบ (Peel Ply) ขนาด 20×20 ซม. วางลงบนแม่พิมพ์ที่เตรียมได้จากข้อที่ 2
4. ชั้นถัดมาวางตาข่ายนำเรซิน (Infusion Net) ขนาด 20×20 ซม. ซ้อนทับลงบนแผ่นลอกแบบที่เตรียมได้จากข้อที่ 3

5. จากนั้นวางระบบท่อทางเดินเรซินให้มีทั้งทางเข้าและทางออก
6. นำเทปกาวแว็คคัม (Vacuum Tape) มาติดรอบแม่พิมพ์ หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มกันอากาศ (Bagging Film) มาติดทับลงบนเทปกาวแว็คคัม ทำการรีดให้แนบติดกับแผ่นฟิล์มกันอากาศ
7. ต่อระบบท่อทางเดินเรซินเข้ากับระบบปั๊มแว็คคัม (Vacuum Pump) ทำการปิดช่องทางเดินเรซินเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปในแม่พิมพ์ได้
8. จากนั้นทำการเปิดปั๊มแว็คคัม (Vacuum Pump) เพื่อดูดอากาศออกซึ่งใช้แรงดันประมาณ 760 มิลลิเมตรปรอท แล้วสังเกตรอยรั่วที่ทำให้อากาศไหลเข้าแม่พิมพ์ เปิดปั๊มแว็คคัม (Vacuum Pump) ทิ้งไว้สักระยะหนึ่งแล้วทำการปิดปั๊ม



รูปที่ 3.2 การเตรียมแผ่นคอมโพสิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag Process)

3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

3.5.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค (Differential Scanning Calorimetry, DSC)



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นของเหลวของสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ทำการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม บรรจุลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (Pan) และใช้อุปกรณ์กดปิด Pan ให้แน่น แต่อย่าให้แน่นจนอากาศเข้าไม่ได้ แล้วนำมาทำการทดสอบ

2) วิธีการทดสอบ

- เปิดชุดทดสอบ DSC ซึ่งเป็นชุดทดสอบอันประกอบด้วย อุปกรณ์ให้ความร้อน (DSC4,000) ระบบควบคุม TAC7 (Controller) คอมพิวเตอร์ เครื่องพล็อตกราฟ เปิดแก๊สไนโตรเจน และการหล่อเย็น ตามลำดับ

- นำภาชนะ (Pan) บรรจุตัวอย่างทดสอบไปใส่ในเตา (Furnace) ของเครื่อง DSC ซึ่งมี 2 เตา โดยที่เตาหนึ่งสำหรับใส่ภาชนะเปล่าเป็นตัวอ้างอิง อีกเตาหนึ่งสำหรับใส่ภาชนะการทดสอบ

- ปิดฝาครอบเครื่อง DSC

- กำหนดค่าตัวแปร (Parameter) และเงื่อนไข (Condition) ที่ต้องการลงใน

โปรแกรมควบคุมการทำงาน

- เริ่มทำการทดสอบ เครื่องทดสอบจะให้ความร้อนตามอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนที่กำหนดไว้ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ โปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

- นำ Pan ตัวอย่างทดสอบออกจากเตาเครื่อง DSC แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบสารตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป

3.6 การทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

3.6.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันอินฟราเรดด้วย (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

การทดสอบโดยอาศัยการดูดซับความเข้มของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของหมู่ฟังก์ชันกรุปโดยจะแสดงผลระหว่างความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกันเทียบเวลา โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ และอ่านค่ามาเปรียบเทียบกับมาตรฐานมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

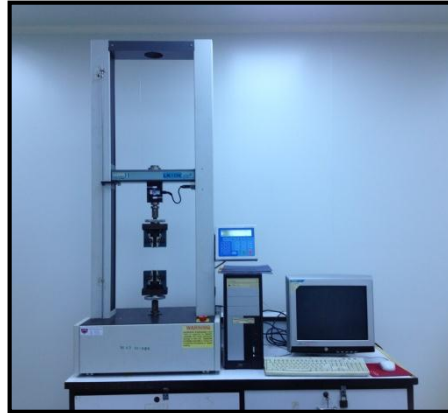
1. เปิดเครื่อง เซตเครื่องมืออุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ
2. นำตัวอย่างที่เตรียมแล้วมาวางในที่ใส่ตัวอย่างทดสอบของเครื่อง
3. เปิดชุดควบคุมและตั้งสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์
4. ทำการทดสอบ
5. นำข้อมูลไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบหาลักษณะโครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.7.1 การทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) (ASTM D 638M)



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 638M

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงสามารถเตรียมได้โดยกระบวนการกัดชิ้นงานทดสอบเป็นรูปครัมเบล (Dumbbell) Type III (ขนาดชิ้นงาน 20 x 150 x 3 มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.6 ขนาดชิ้นงานทดสอบการต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D 638M

2) วิธีการทดสอบ

- เลือกใช้โปรแกรมในการทดสอบ Qmat-testzone
- เลือก Open test method เลือก E.Modulus & Yield (MPa) [Xhead]

จากนั้นคลิก OK

-ขั้นตอนต่อมา setting ค่าตามตัวแปรต่างๆลงในโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 638M ดังนี้

Load Range 20000 N

Extension Range 500 mm

Test Speed 5 mm/min

Sample Length 100 mm

Auto Reverse ON

- กำหนดระยะ Gauge Length (115 มิลลิเมตร) ลงบนตัวอย่าง และกำหนดหมายเลขของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นให้ชัดเจน และวัดความหนา ความกว้างของชิ้นทดสอบ บันทึกค่าไว้

- จับยึดชิ้นงานทดสอบด้วยตัวจับ (Grips) แล้วเริ่มทดสอบ โปรแกรมจะบันทึกแรงดึงและระยะยืดสูงสุดเมื่อขาด

- บันทึกค่าการทดสอบ เช่น ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength at Yield) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด (% Elongation at Break)

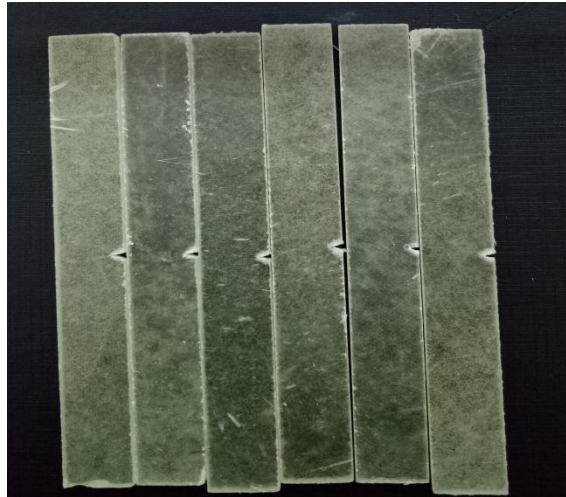
3.7.2 การทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Charpy Impact Strength) ASTM D 6110



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Charpy Impact Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 6110)

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก สามารถเตรียมได้โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป ตามมาตรฐาน ASTM D 6110 (ขนาดชิ้นงาน 13 x 126 ± 1 x 3 มิลลิเมตร) พร้อมทั้งบากชิ้นงานลึก 2.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นงานทดสอบการต้านทานแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D 6110

2) วิธีการทดสอบ

- หาค่าแรงเสียดทานของค้อนน้ำหนักที่ต้องการใช้ โดยการปล่อยค้อนน้ำหนักลงอย่างอิสระ โดยไม่มีชิ้นงาน อ่านค่าพลังงานที่ได้ เพื่อนำไปลบออกจากค่าพลังงานที่อ่านได้จากการทดลองเมื่อมีชิ้นงาน

- ยกค้อนขึ้นพักไว้บนที่ยึด แล้วจับยึดชิ้นงานทดสอบตรงตำแหน่งตัวจับชิ้นงาน โดยให้รอยบากตรงมุมแหลมอยู่กึ่งกลาง

- กดปุ่มที่อยู่ข้างเครื่องพร้อมๆกัน เพื่อให้ค้อนตีกระแทกชิ้นงาน

- อ่านค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก ไปคำนวณค่าของการทนต่อแรงกระแทก

การคำนวณหาค่าการทนแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM ดังสมการ 3.1

$$\text{ค่าทนแรงกระแทก (J/m)} = \frac{\text{พลังงานที่ใช้ (J)}}{\text{ความหนาเฉลี่ย (m)}} \quad (3.1)$$

3.7.3 การทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 785



รูปที่ 3.9 เครื่องการทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 785

การทดสอบค่าความแข็งที่ผิวด้วยเครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว ด้วยเครื่องทดสอบ Matsuzawa DXT Model DXT-1 Ser.No DX1405 ดังแสดงในรูปที่ 3.9

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- ชิ้นงานทดสอบสามารถเตรียมได้จากการขึ้นรูปแบบสูญญากาศ ชิ้นงานมีขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร ความหนา ไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 785

2) วิธีการทดสอบ

- ทำการ calibrate เครื่องทุกครั้งก่อนทดสอบ โดยเลือกใช้หัวเพชร ปรับโหลดไปที่ 150 Kg สเกล C (HRC) ค่าความแข็งอยู่ที่ 61.2 ± 0.8

- จากนั้นปรับเปลี่ยนขนาดหัวกด, น้ำหนัก โหลด, สเกล ตามมาตรฐานการทดสอบ อาทิเช่น ทำการทดสอบที่สเกล M ให้เลือกหัวกดขนาด 1/4" น้ำหนัก โหลด 100 Kg

- จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาวางบนแท่งรอง

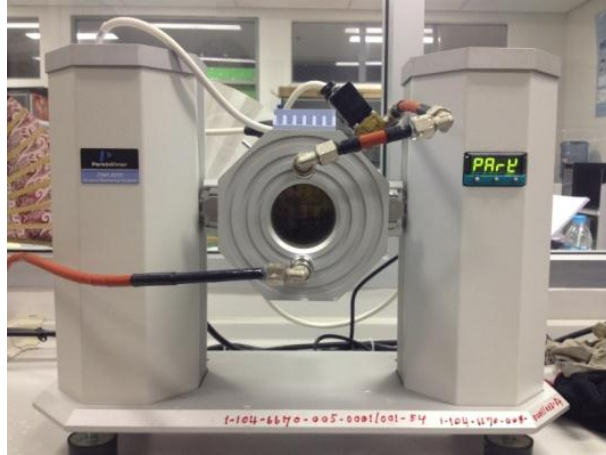
- หมุนก้านส่งน้ำหนัก โดยสังเกตจากไฟสีแดงจะขึ้นจากตำแหน่งต่ำสุดจนถึงตำแหน่ง Set แล้วจึงหยุดหมุน

- ตำแหน่ง Set จะเลื่อนไปตำแหน่ง Start แล้วเครื่องจะทำการอ่านค่าความแข็ง

- โดยขณะที่ไฟ Start เครื่องทดสอบก็จะวางน้ำหนัก

- รอจนไฟตำแหน่ง Start ดับ จึงอ่านค่าที่ได้บนหน้าปัด

3.8 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (DMA)



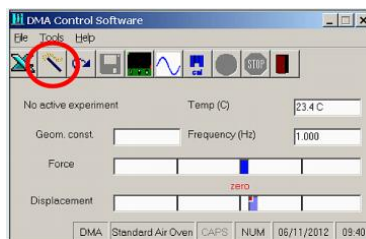
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer)

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

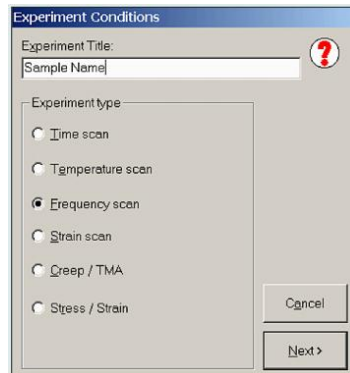
การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก Dynamic Mechanical Analysis (DMA) ยี่ห้อ Perkinelmer รุ่น DMA 8000 โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบมีความหนา 3 mm ความกว้าง 10 mm ความยาว 25 mm ทำการทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 30 – 150 องศาเซลเซียส โดยใช้โหมดการทดสอบแบบ Dual Cantilever Bending

2) วิธีการทดสอบ

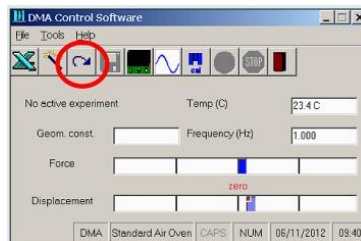
- เลือก โปรแกรม DMA Control Software คลิกเลือกตามรูป



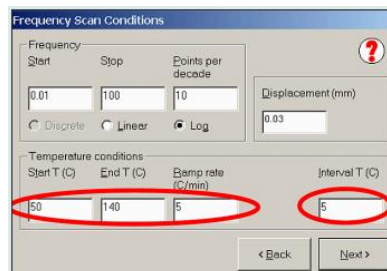
- ขึ้นหน้าต่าง Experiment Conditions ใส่ชื่อตัวอย่าง กด next



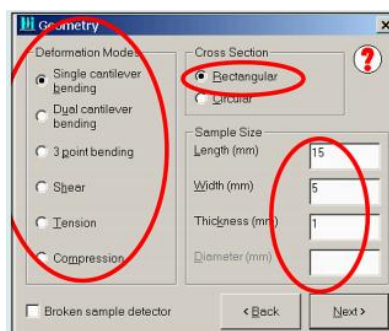
- จากนั้นกดคลิกตามรูป



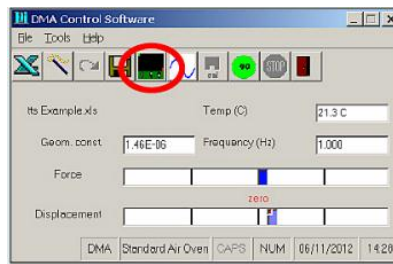
- จะขึ้นหน้าต่าง Frequency Scan Conditions ตั้งค่าในช่อง Temp conditions และกด Next



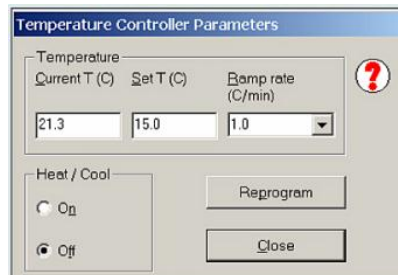
- จะขึ้นหน้าต่าง Geometry เลือกโหมดการทดสอบที่ช่อง Deformation Modes ใส่ขนาดชิ้นงานทดสอบในช่อง Sample Size กด next



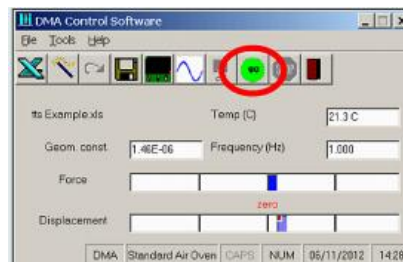
- จากนั้นคลิกตามรูป



- จะขึ้นหน้าต่าง Temperature Controller Parameter เอาไว้ดูอุณหภูมิ



- จากนั้นได้อุณหภูมิที่เราเซตค่าไว้ จากนั้นกด ปุ่ม Go



3.9 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

โดยทั่วไปจะใช้ลำอิเล็กตรอนสแกนไปบนผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างที่เคลือบด้วยทองคำ และทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอน (Scattered electrons) และเกิดเป็นสัญญาณรูปภาพที่สามารถเห็นลักษณะผิวหน้าและลักษณะของการผสมหรือการกระจายตัวของผสมได้

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- นำตัวอย่างทดสอบไปวางบนแผ่นรองตัวอย่างที่ทำจากกระดาษฟอยล์และทาเคลือบกาวคาร์บอนที่ผิวขอบของชิ้นงานจนถึงแผ่นรอง

- นำไปเคลือบทอง (Gold sputtering) แล้วเริ่มทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

2) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope, SEM

- เปิดเครื่องสำรองไฟ เปิดเครื่อง Cooling รอจนกว่าอุณหภูมิลดเหลือ 20 องศาเซลเซียส

- บิดกุญแจ เปิดเครื่อง SEM

- เปิดคอม และ เปิดโปรแกรม JEOL Scanning Electron Microscope

- จากนั้นรอ จนกว่าคำว่า Wait.. เปลี่ยนเป็น Ready

- จากนั้นกดที่ VENT รอจนกว่าไฟสีส้มจะหยุดกระพริบ

- ใส่ตัวอย่างเข้าไปในเครื่อง SEM
- จากนั้นกดที่ EVAC รอจนกว่าจะขึ้น Ready
- ปรับกระแสให้เป็น 15 kV กด HT ให้เป็น on
- จากนั้นปรับภาพให้ชัดเจน เลือกกำลังขยายตามต้องการ
- เลือกตำแหน่งที่ต้องการ กด Scan 3 และกด Freeze
- กด Save เพื่อบันทึกภาพ

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการศึกษาการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UV-A) เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา การบ่ม
สุก (Curing) ของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี โดยทำการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดบิสเอซิลฟอส
ฟีนออกไซด์ (Bis Acyl Phosphine; BAPO) เพื่อเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา หรือช่วยลด
ระยะเวลาในการบ่มสุกของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ได้ผลการทดลองดังนี้

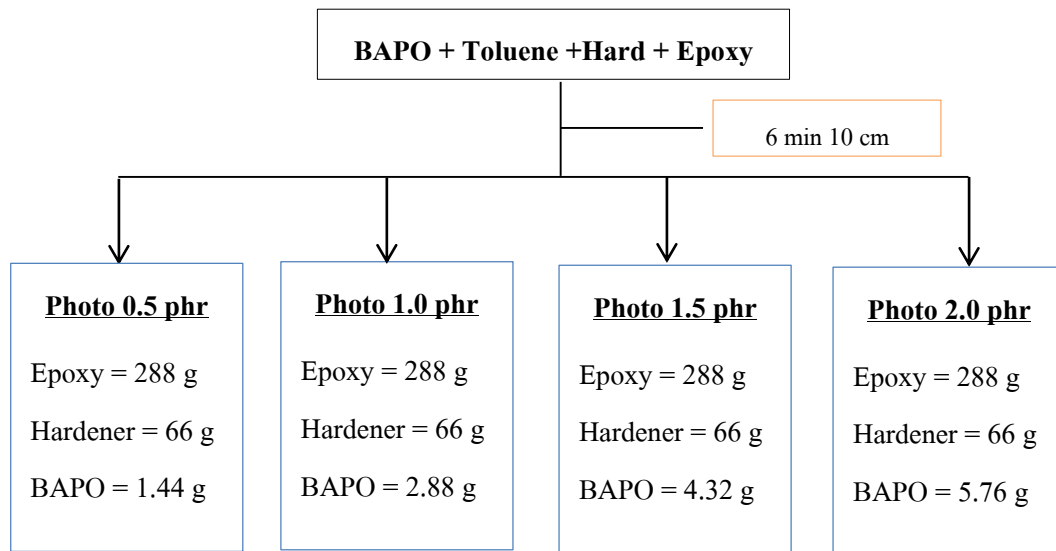
4.1 ผลการเตรียมแผ่นทดสอบวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบ

สุญญากาศ (Vacuum Bag Process)

จากการศึกษากระบวนการเตรียมแผ่นทดสอบวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี โดยทำการเติมตัวริเริ่ม
ปฏิกิริยาเชิงแสง

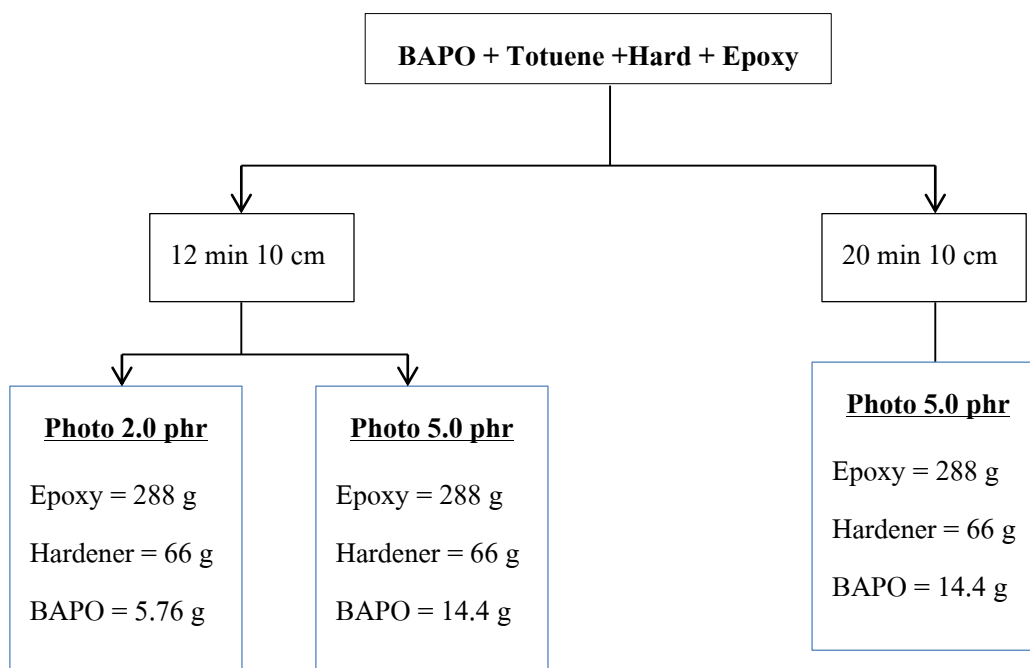
4.1.1 การวิเคราะห์หาตัวทำละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO

โดยใช้โทลูอีน (Toluene) เป็นตัวทำละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO โดยทำ
การละลาย BAPO 22 กรัม ละลายในโทลูอีน 100 กรัม พร้อมทั้งทดลองอัตราส่วนผสมระหว่าง
อีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr จากนั้นทำการกระตุ้น
ปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 6 นาที ที่ระยะห่างจากหลอด UV-A 10 เซนติเมตร ดังแผนผังในรูป
ที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 6 นาที ที่ระยะห่างจากหลอด UV-A 10 เซนติเมตร

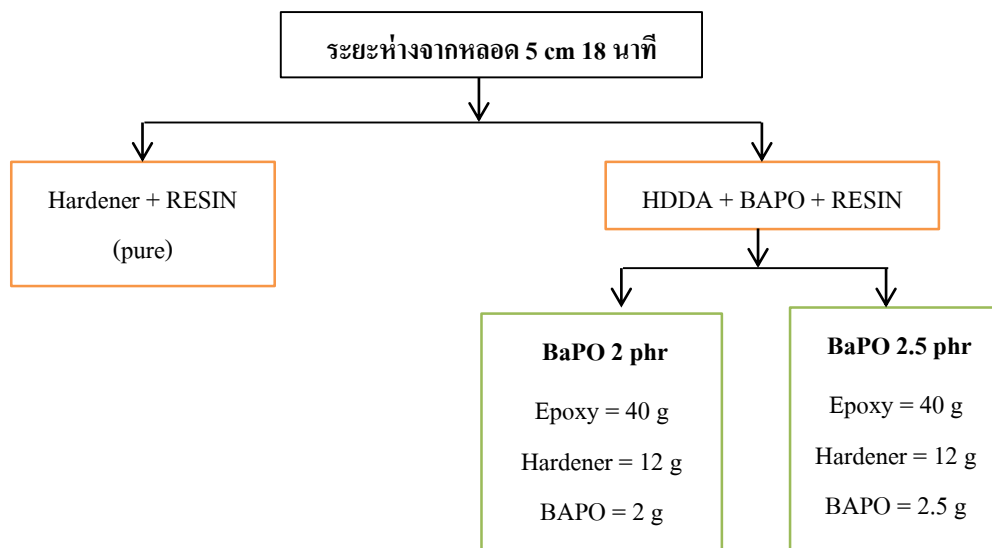
แต่เมื่อทำการศึกษาข้างต้นแล้วนั้นพบว่า ส่วนผสมดังกล่าวนี้ใช้เวลานานมากกว่าที่จะเกิดการแข็งตัว จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO อีกครั้ง โคนทำการเพิ่มอัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO เป็น 5 phr และเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสง UV-A เป็น 12 และ 20 นาที ดังแผนผังในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนผังการปรับเปลี่ยนเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 5.0 phr และเพิ่มเวลาการกระตุ้นปฏิกิริยาคด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 12 และ 20 นาที ที่ระยะห่าง จากหลอด UV-A 10 เซนติเมตร

จากการปรับเปลี่ยนหาอัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 5 phr ปรากฏว่ายังคงใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่นานประมาณ 2-3 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่า อีพ็อกซีที่ทำปฏิกิริยากับสารทำให้แข็งที่ไม่ได้เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งปกติจะมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 1 ชั่วโมงครึ่ง จึงได้ทำการหาตัวทำละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงแทนการใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลาย

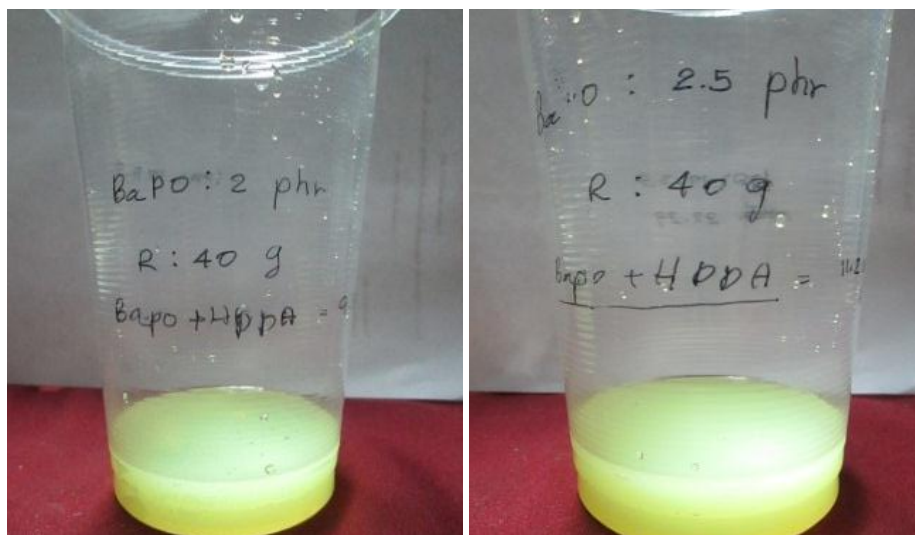
โดยตัวทำละลายที่นำมาใช้แทนโทลูอีนคือ Hexanedioldiacrylate (HDDA) ซึ่งใช้ HDDA 100 กรัม ละลายตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO 9 กรัม พร้อมทั้งทดลองอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 2 และ 2.5 phr ทำการกระตุ้นเปรียบเทียบกับอีพ็อกซี (Epoxy) กับสารทำให้แข็ง (Hardener) ที่ไม่ได้เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากนั้นทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 18 นาที ที่ระยะห่างจากหลอด UV-A 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A ของอีพ็อกซีผสมกับสารทำให้แข็ง และอีพ็อกซี ผสมกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ใช้ HDDA เป็นตัวทำละลาย

ทั้งนี้ที่ทำการเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นด้วยแสง UV-A ที่นานขึ้น และลดระยะห่างระหว่างอีพ็อกซีผสมกับหลอด UV-A ลง เนื่องจากจะสังเกตแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีผสม จากการทดลองพบว่า อีพ็อกซีกับสารทำให้แข็งมีการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วลักษณะคล้ายกับการเดือดคือมีฟองอากาศมาก อาจมาจากความร้อนที่ได้รับจากหลอด UV-A และการคายพลังงานความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา ในส่วนของอีพ็อกซีผสมกับ BAPO ที่ใช้ HDDA เป็นตัวทำละลายพบว่ามีลักษณะเป็นสีเหลืองและนิ่ม ดังแสดงใน รูปที่ 4.4 จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมีแล้วพบว่า

ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO สามารถละลายในสารทำให้แข็ง (Hardener) ได้จึงได้ทำการทดลองละลาย แล้วนำไปผสมกับอีพ็อกซี จากนั้นนำไปกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น กว่าอีพ็อกซีกับสารทำให้แข็งที่ไม่ได้เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา BAPO โดยต่อมาได้นำส่วนผสมนี้ไปเป็นเมทริกซ์ในการขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.4 ลักษณะของอีพ็อกซีผสมที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่ใช้ HDDA เป็นตัวทำละลาย

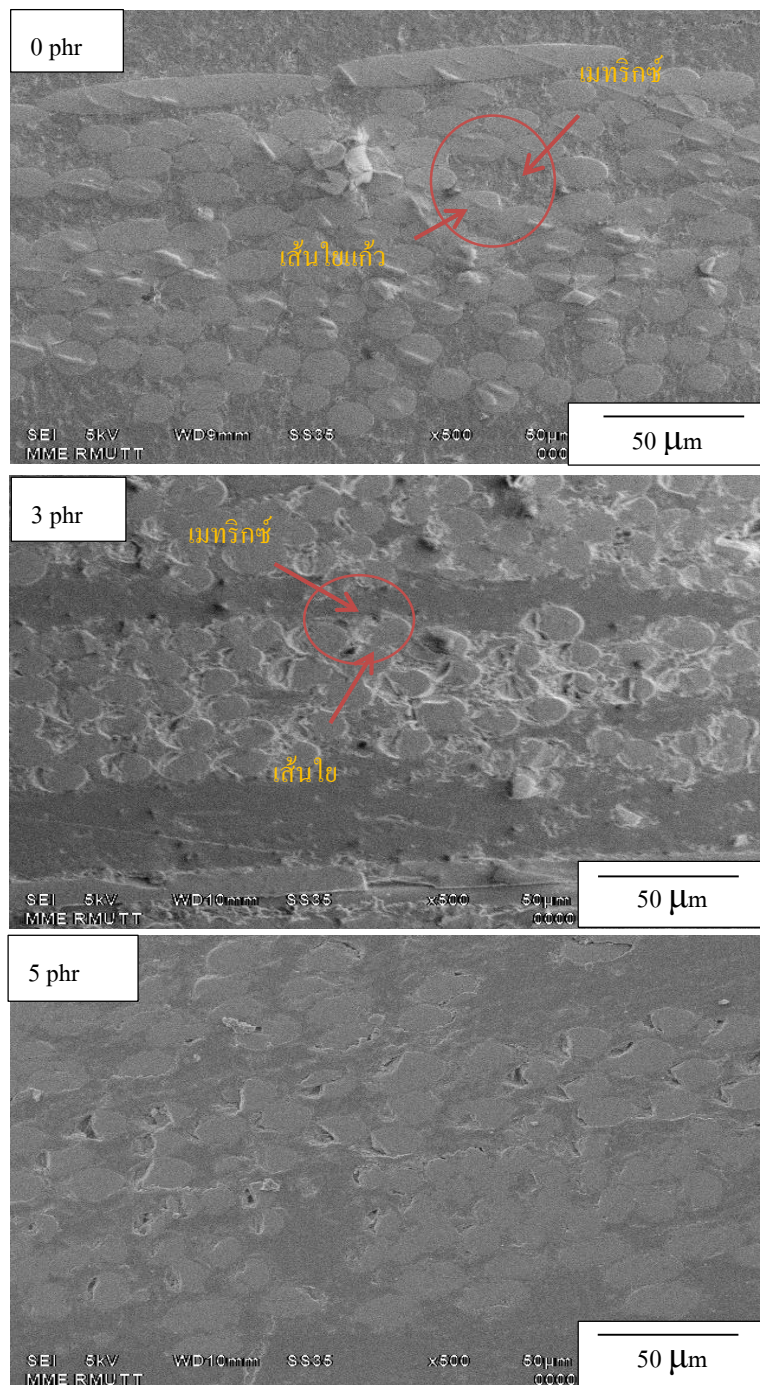
4.1.2 การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีแบบถุงสุญญากาศ (Vacuum Bag Process)

จากการเตรียมเมทริกซ์ที่ผสมระหว่างอีพ็อกซีกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ในหัวข้อที่ 4.1.1 ซึ่งกำหนดการใช้อัตราส่วน BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr จากนั้นนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการแบบสุญญากาศ โดยใช้เส้นใยแก้วเป็นสารเสริมแรง พบว่าภายในระบบการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ ส่วนใหญ่มักจะพบรอยร้าวบริเวณตามข้อต่อ, ตามรอยเทพกาว และถึงดักเรชั่นส่วนเกิน ดังรูปที่ 4.5 จากปัญหาที่พบจึงมีวิธีการแก้ไขโดยกดหรือรีดให้ถุงเรียบติดสนิทกับเทพกาว ในส่วนของรอยร้าวที่เกิดจากถึงดักเรชั่นส่วนเกิน จะใช้น้ำหล่อเพื่อช่วยอุดรอยร้าวซึมที่เกิดขึ้นระหว่างฝาถึงดักเรชั่นและแผ่นยางกั้นร้าว



รูปที่ 4.5 แสดงบริเวณรอยรั่วส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบถุงสุญญากาศ

เมื่อเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบได้แล้วนั้นเบื้องต้นได้นำตัวอย่างชิ้นงานไปขัดผิวเพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใย ในแต่ละอัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ที่กระตุ้นด้วย UV-A เป็นเวลา 2 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าปริมาณ BAPO ที่ 0 phr อีพ็อกซีและเส้นใยมีลักษณะการยึดเกาะระหว่างกันที่ดี เนื่องจากไม่มีช่องว่างระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใย และเมื่อสังเกตที่ปริมาณ BAPO ที่เพิ่มขึ้นคือ 3.0 และ 5.0 phr นั้นพบว่า มีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใย อาจเกิดจากการหดตัวของอีพ็อกซี และความหนืดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณของ BAPO เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแทรกซึมระหว่างชั้นของเส้นใยและการยึดเกาะที่ไม่ดี



รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใย ในแต่ละอัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ที่กระตุ้นด้วย UV-A เป็นเวลา 2 นาที

4.2 ศึกษาพฤติกรรมการบ่มสุก (Curing) ด้วยเทคนิค (Differential Scanning Calorimetry, DSC)

4.2.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของเวลาในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้วยอัลตราไวโอเลต ชนิดเอ (UV-A)

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของระยะเวลาที่ใช้กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 0, 2 และ 4 นาที ของอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ผสมกับ BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ตามลำดับ

อัตราส่วน BAPO	เวลาฉายแสง (นาที)	Onset (°C)	End (°C)	Peak (°C)	Delta H (J/g)
BAPO 0 phr	0	75	147	107	220
	2	71	155	110	215
	4	78	151	115	213
BAPO 3 phr	0	62	157	108	331
	2	70	152	109	214
	4	67	152	108	201
BAPO 5 phr	0	65	156	108	260
	2	72	157	111	253
	4	71	161	111	185

จากการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A ที่ระยะเวลา 0, 2 และ 4 นาที ของทุกอัตราส่วนการผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0, และ 5 phr ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงผลของการทดสอบสมบัติทางความร้อนในตารางที่ 4.1 (ทั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ผลตามลำดับอัตราส่วนผสมของ BAPO ในทุกช่วงระยะเวลาการกระตุ้น)

โดยพบว่า แต่ละอัตราส่วนผสมมีค่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อน (ΔH ; Exothermic) เพื่อสร้างการเชื่อมขวางของสายโซ่ นั้นมีค่าพลังงานการคายความร้อนลดลงตามระยะเวลาการกระตุ้นด้วย UV-A ที่เวลานานขึ้น เนื่องจากขณะที่ทำการกระตุ้นนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดพลังงานการคายความร้อนไปได้แล้วบ้างบางส่วน ดังนั้นค่า ΔH ที่ได้ทางการนำไปทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC นั้นก็คือ ค่าพลังงานที่เหลืออยู่ หรือส่วนที่ยังไม่

เกิดปฏิกิริยา ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.2 แต่เมื่อสังเกตค่าพลังงานการเปลี่ยนแปลงการคายความร้อนของอัตราส่วน BAPO ที่ 0 phr ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ไม่มีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ก็พบว่าค่า ΔH ลดลงตามระยะเวลาการกระตุ้นด้วย UV-A เช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างของอีพ็อกซีเอง ณ ตำแหน่งหมู่อีพ็อกไซด์ นั้นสามารถดูดซับรังสี UV-A ได้ทำให้เกิดการแตกตัวภายในปฏิกิริยา รวมถึงอาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางจากการได้รับความร้อนของหลอดรังสี UV-A

ตารางที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อน (ΔH ; Exothermic)

เวลาการกระตุ้น (นาท)	BAPO 0 phr	BAPO 3 phr	BAPO 5 phr
0	220 J/g,	331 J/g	260 J/g
2	215 J/g	214 J/g	253 J/g
4	213 J/g	201 J/g	185 J/g

ในขณะที่เดียวกันยังพบว่า การใช้เวลาการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วย UV-A ที่เวลานานขึ้น ส่งผลให้อีพ็อกซีผสมมีลักษณะความหนืดมากขึ้น ซึ่งมีผลมาจากการเชื่อมขวางของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้น และสังเกตจากการไหลของเนื้ออีพ็อกซีผสมขณะทำการขึ้นรูปตัวอย่างขึ้นงานทดสอบ โดยพบว่า เวลาการกระตุ้นที่ 2 นาท นั้นอีพ็อกซีผสมมีความหนืดไม่มากนัก ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูปตัวอย่างขึ้นงานทดสอบ ส่วนเวลาการกระตุ้นที่ 4 นาท อีพ็อกซีผสมมีลักษณะความหนืดที่สูงมากและไม่เกิดการไหลใดๆ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรังสี UV-A และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสี ทำให้โมเลกุลบางส่วนเกิดการเชื่อมขวางได้บ้างจนทำให้ความหนืดสูงมาก ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้กับกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศได้ [27]

ดังรูปที่ 4.7 ดังนั้น จึงเลือกเวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A ที่ 2 นาท ของทุกอัตราส่วนการผสมระหว่างอีพ็อกซี กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0, และ 5 phr ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แสดงถึงเวลาการกระตุ้นที่ 4 นาที อีพ็อกซีผสมมีลักษณะการเสื่อมสภาพ ทางความร้อน ที่เกิดจากการคายพลังงานความร้อน

4.2.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิการบ่มสุก และระยะเวลาการบ่มสุก ที่มีผลต่อปริมาณการบ่มสุก (Degree of cure) ของอีพ็อกซีเรซินผสม

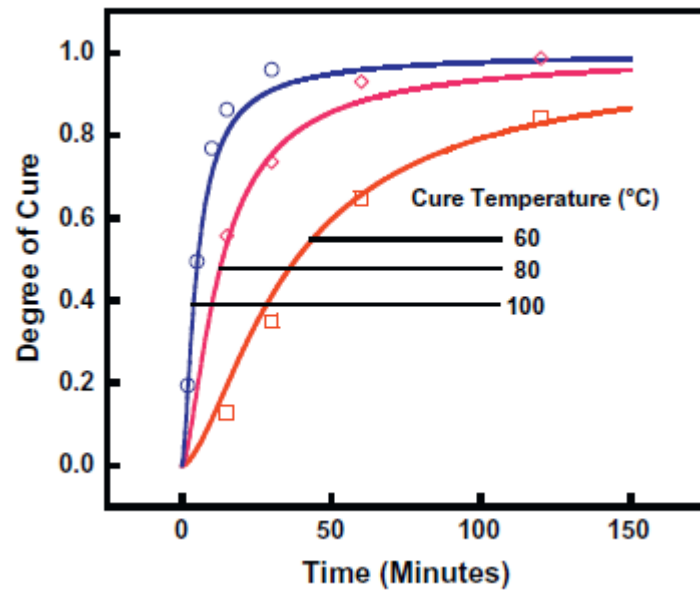
การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มสุก โดยการให้อุณหภูมิความร้อนคงที่ (Isothermal) ในการบ่มสุกที่แตกต่างกัน คือ 80 100 และ 120 °C กับวัสดุอีพ็อกซีที่ผ่านการกระตุ้นด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาในการบ่มสุกวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาเป็นปัจจัยส่วนหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ เมื่อใช้อุณหภูมิในการบ่มสุกเพิ่มขึ้น พบว่า ระยะเวลาที่ใช้เชื่อมขวางของอีพ็อกซีลดลง เพราะเมื่อวัสดุได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ โมเลกุลจำนวนมากเกิดการขยับตัวเร็วขึ้น จนทำให้โมเลกุลเหล่านั้นมีค่าพลังงานการกระตุ้น (Activation energy; E_a) มากกว่าค่าพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา ส่งผลให้โมเลกุลเกิดการสั่นและชนกันอย่างมีประสิทธิภาพทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ของอัตรา [28][29] โดยอุณหภูมิความร้อนของการบ่มสุก สามารถใช้อธิบายลักษณะเฉพาะและปริมาณการบ่มสุก (Degree of cure) ของอีพ็อกซีผสม [30] ได้จากสมการที่ 4.1 และแสดงผลตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.8

$$\alpha = H_{(t)}/H_R \quad (4.1)$$

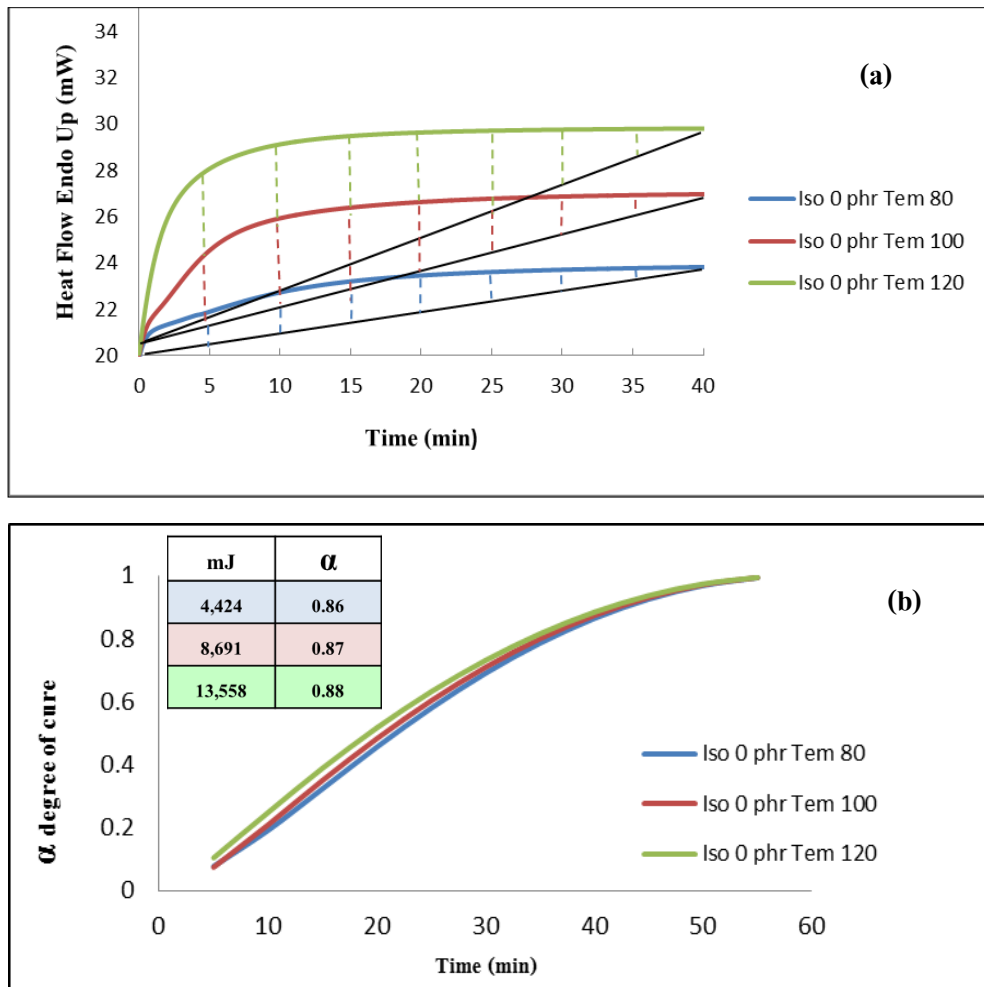
$H_{(t)}$ คือ ความร้อนของการบ่มสุก ขึ้นอยู่กับเวลา

H_R คือ ความร้อนทั้งหมดของการบ่มสุก (หรือ การเกิดปฏิกิริยาของ เอนทัลปี)

α คือ ปริมาณการบ่มสุก (Degree of cure) ช่วงจาก 0 ไม่เกิดปริมาณการบ่มสุก (uncured) ถึง 1 ปริมาณการบ่มสุกที่สมบูรณ์ (fully cured)

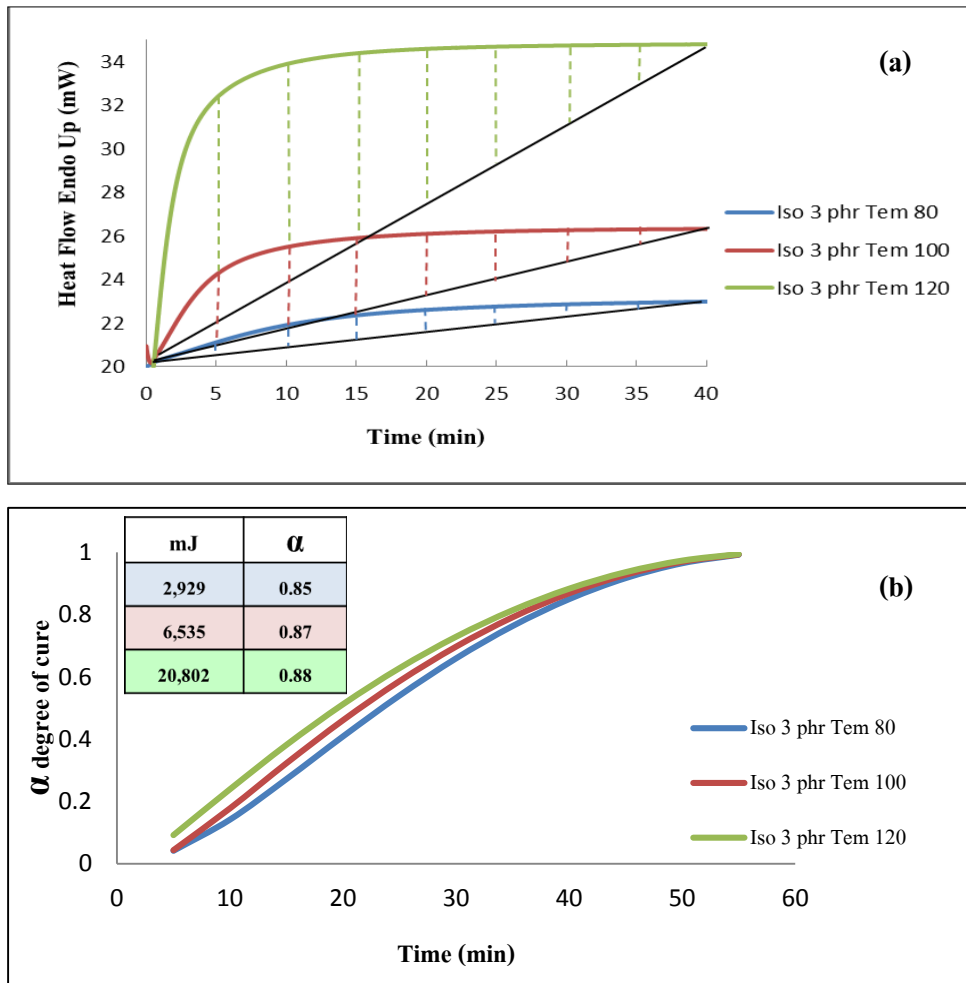


รูปที่ 4.8 ปริมาณการบ่มสุกอีพ็อกซีเรซินที่เป็นฟังก์ชันเวลากับอุณหภูมิการบ่มสุกคงที่ ที่ 60, 80 และ 100 °C [30]



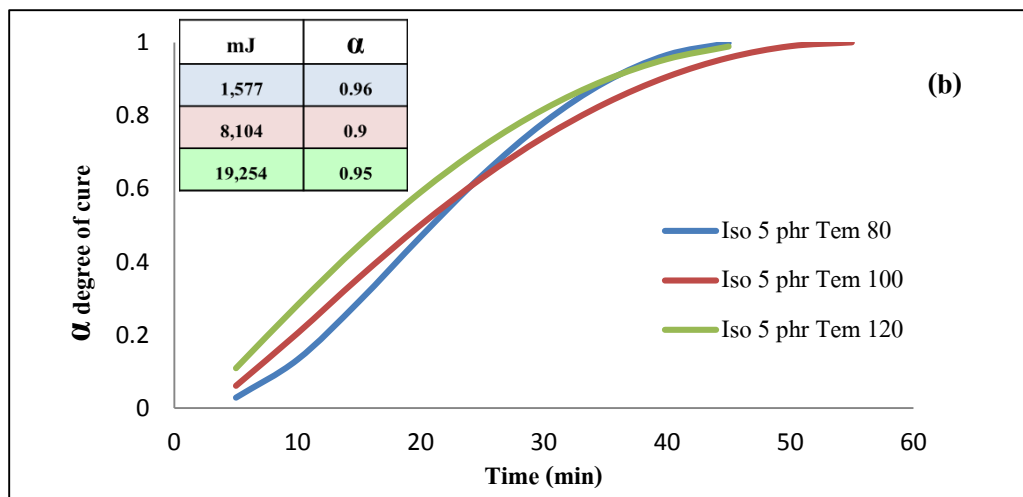
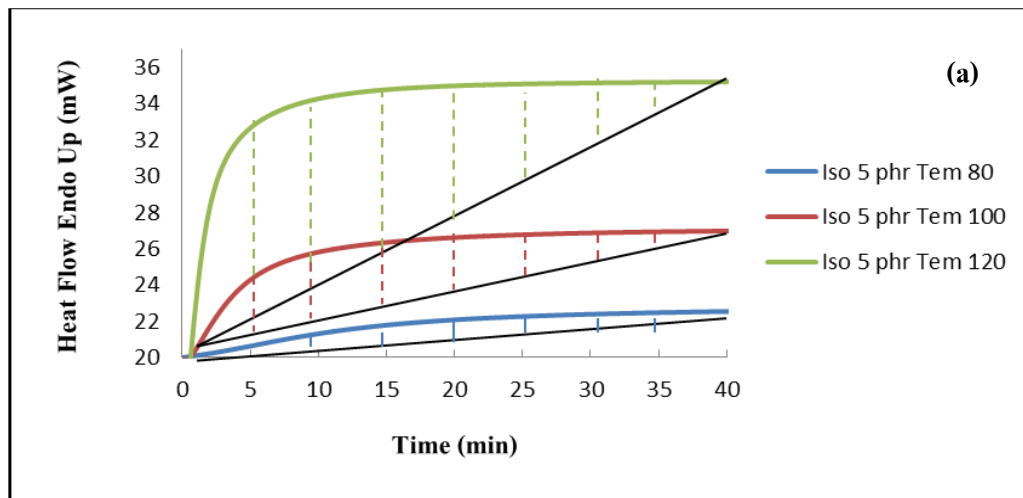
รูปที่ 4.9 อีพ็อกซีผสมที่อัตราส่วน BAPO 0 phr ที่แสดง (a) พฤติกรรมการบ่มสุก และ (b) ปริมาณการบ่มสุก เมื่อให้ความร้อนคงที่ ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 80 100 และ 120 °C

จากรูปที่ 4.9 (a) พบว่า ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 120 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 40 นาที มีระดับพลังงานการคายความร้อนที่ 13,558 มิลลิจูล และ (b) มีค่าปริมาณการบ่มสุกอยู่ที่ 0.88 จึงใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดำกว่า อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีระดับพลังงานการคายความร้อนอยู่ที่ 4,424 และ 8,691 มิลลิจูล มีค่าปริมาณการบ่มสุกอยู่ที่ 0.78 และ 0.86 ตามลำดับทำให้ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอุณหภูมิการบ่มสุกที่ 120 องศาเซลเซียส ของอีพ็อกซีที่อัตราส่วน BAPO 0 phr



รูปที่ 4.10 อีพ็อกซีผสมที่อัตราส่วน BAPO 3 phr ที่แสดง (a) พฤติกรรมการบ่มสุก และ (b) ปริมาณการบ่มสุก เมื่อให้ความร้อนคงที่ ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 80 100 และ 120 °C

จากรูปที่ 4.10 (a) พบว่าที่อุณหภูมิการบ่มสุก 120 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 40 นาที มีระดับพลังงานการคายความร้อนที่ 20,802 มิลลิจูล และ (b) มีค่าปริมาณการบ่มสุกอยู่ที่ 0.88 จึงใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาค่าต่ำกว่า อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีระดับพลังงานการคายความร้อนอยู่ที่ 2,929 และ 6,535 มิลลิจูล มีค่าปริมาณการบ่มสุกอยู่ที่ 0.85 และ 0.87 ตามลำดับ ทำให้ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอุณหภูมิการบ่มสุกที่ 120 องศาเซลเซียส ของอีพ็อกซีที่อัตราส่วน BAPO 3 phr



รูปที่ 4.11 อีพ็อกซีผสมที่อัตราส่วน BAPO 5 phr ที่แสดง (a) พฤติกรรมการบ่มสุก และ (b) ปริมาณการบ่มสุก เมื่อให้ความร้อนคงที่ ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 80 100 และ 120 °C

จากรูปที่ 4.11 (a) พบว่าที่อุณหภูมิการบ่มสุก 120 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 40 นาที มีระดับพลังงานการคายความร้อนที่ 19,254 มิลลิจูล และ (b) มีค่าปริมาณการบ่มสุกอยู่ที่ 0.95 จึงใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีระดับพลังงานการคายความร้อนอยู่ที่ 1,577 และ 8,104 มิลลิจูล มีค่าปริมาณการบ่มสุกอยู่ที่ 0.96 และ 0.90 ตามลำดับทำให้ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอุณหภูมิการบ่มสุกที่ 120 องศาเซลเซียส ของอีพ็อกซีที่อัตราส่วน BAPO 5 phr

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าของพลังงานการคายความร้อน (mJ) และปริมาณการบ่มสุก จากการให้อุณหภูมิ ความร้อนคงที่ (Isothermal) ในการบ่มสุกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 80 100 และ 120 °C

อัตราส่วน BAPO	Iso Temp °C	พลังงานการคายความร้อน (mJ)	ปริมาณการบ่มสุก
0 phr	80	4,424	0.86
	100	8,691	0.87
	120	13,558	0.88
3 phr	80	2,929	0.85
	100	6,535	0.87
	120	20,802	0.88
5 phr	80	1,577	0.96
	100	8,104	0.9
	120	19,254	0.95

จากผลการทดสอบอุณหภูมิการบ่มสุกโดยการให้อุณหภูมิความร้อนคงที่ (Isothermal) ในการบ่มสุกที่ต่างกัน คือ 80 100 และ 120 °C ของทุกอัตราส่วนผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที พบว่า ที่อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 120 °C ของแต่ละอัตราส่วนผสมที่ระยะเวลา 40 นาที มีค่าระดับพลังงานการคายความร้อนอยู่ที่ 13,558, 20,802 และ 19,254 mJ และยังมีค่าปริมาณการบ่มสุกอยู่ที่ 0.88, 0.88 และ 0.95 ดังนั้น จึงทำให้ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 80 และ 100 °C แต่เนื่องด้วยการให้อุณหภูมิการบ่มสุกที่สูงเกินไป ส่งผลถึงความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้ โดยมาจากอุณหภูมิภายนอกที่ได้รับเข้าไปรวมกับ อุณหภูมิภายในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินผสม ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ [31] ส่วนการให้อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 80 และ 100 °C ของแต่ละอัตราส่วนผสม ที่ 40 นาที จากการวิเคราะห์ผลข้างต้น ในตารางที่ 4.3 และจากรูปที่ 4.9, 4.10, และ 4.11 (b) พบว่ามีปริมาณการบ่มสุกที่ใกล้เคียงกัน แต่จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนในตารางที่ 4.1 พบว่า ที่อัตราส่วน BAPO ทั้ง 3 มีอุณหภูมิสูงสุด T_{cure} อยู่ในช่วงประมาณ 109-115 °C เป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางสูงสุด แต่ในงานวิจัยนี้เลือกให้อุณหภูมิในการบ่มสุกที่ 100 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุด T_{cure} อยู่เล็กน้อย

และเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพจากความร้อนของตัวอย่างทดสอบ และเลือกใช้ระยะเวลาในการบ่มสุกที่ 40 นาที เนื่องจากพิจารณาแล้วว่าการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างที่จะคงที่ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับแต่ละอัตราส่วนผสมของ BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr [32][33]

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการบ่มสุกด้วยเทคนิค DSC ของอีพ็อกซีเรซินผสมสามารถสรุปสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ได้ดังนี้ คือ ใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที อุณหภูมิในการบ่มสุกที่ 100 °C และใช้ระยะเวลาการบ่มสุกวัสดุคอมโพสิตที่ 40 นาที ของทุกอัตราส่วนเรซินผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซิน กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0, 5.0 phr

4.2.3 ศึกษาปริมาณการเชื่อมขวาง (% Crosslink) ของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี

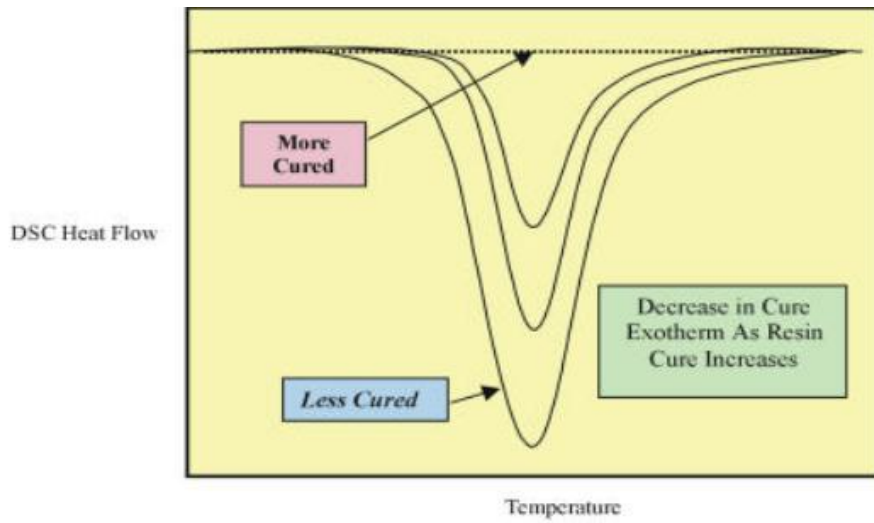
จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของเวลาในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A และ 4.2.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิการบ่มสุก และระยะเวลาการบ่มสุก ที่มีผลต่อปริมาณการบ่มสุก (Degree of cure) ของอีพ็อกซีเรซินผสม ทำให้ได้สถานะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี โดยใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที อุณหภูมิในการบ่มสุกที่ 100 °C และใช้ระยะเวลาการบ่มสุกวัสดุคอมโพสิตที่ 40 นาที ของทุกอัตราส่วนเรซินผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซิน กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่ 0.0, 3.0, 5.0 phr ตามลำดับ โดยศึกษาผลกระทบที่สถานะในการบ่มสุก 3 สถานะ ดังนี้ 1. บ่มสุกโดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที 2. ใช้ความร้อนในการอบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และ 3. ใช้ความร้อนในการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอีก 1 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณการเชื่อมขวางของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีได้ โดยการนำเรซิน (Resin) ที่ยังไม่ผ่านการบ่มสุก (Uncured) และเรซินหรือตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการบ่มสุก (Cured) ทั้ง 3 สถานะ ไปทดสอบด้วยเทคนิค DSC โดยนำค่า ΔH ที่ได้ทั้งของ Uncured และ Cured ไปคำนวณหา ปริมาณการเชื่อมขวาง (% Crosslink) จากสมการที่ 4.2 [34] และแสดงตัวอย่างค่า ΔH ที่ลดลงเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.12

$$\% \text{ Crosslink} = \frac{[\Delta H \text{ uncured} - \Delta H \text{ cured}]}{[\Delta H \text{ uncured}]} * 100 \quad (4.2)$$

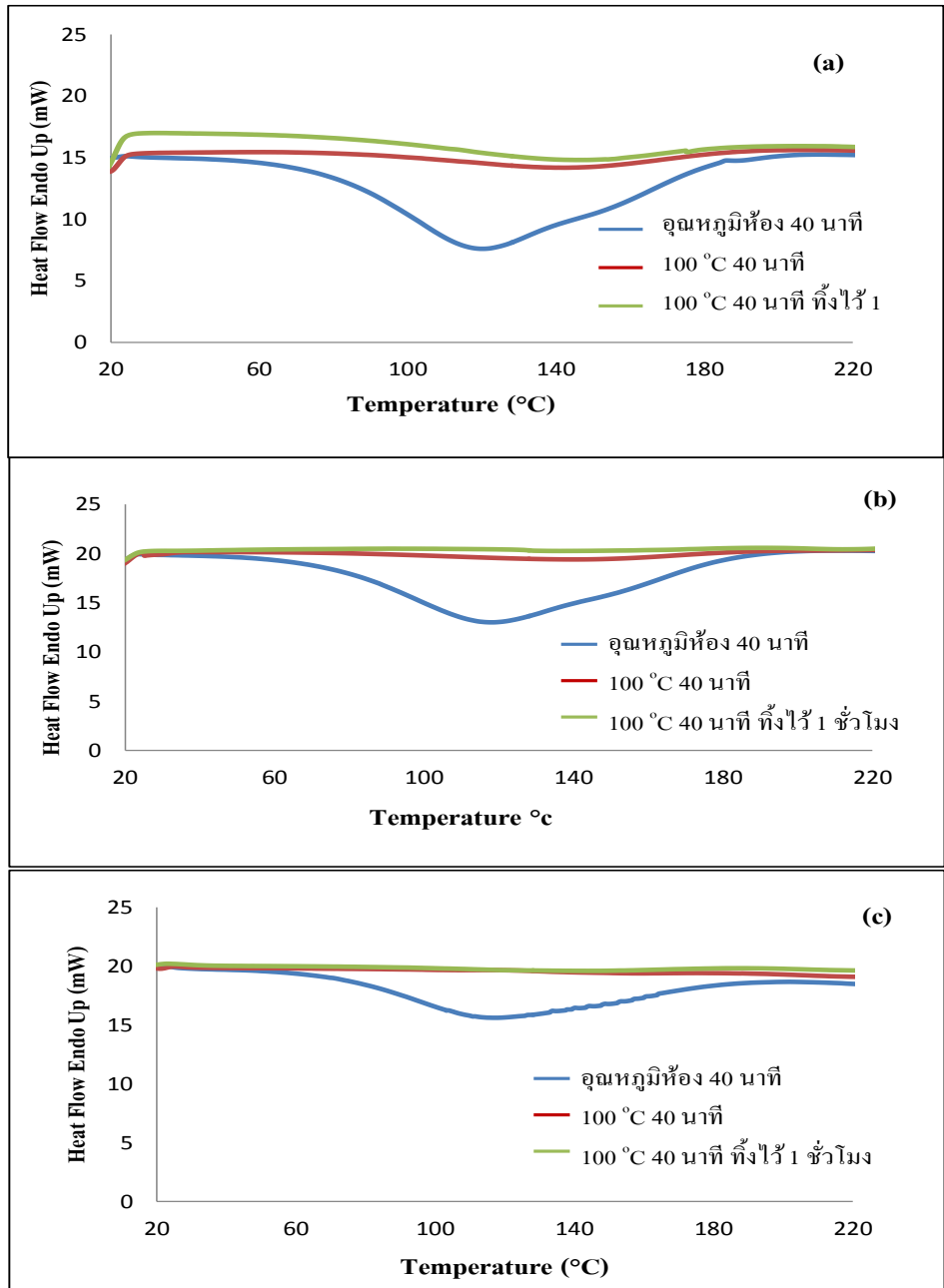
$\Delta H \text{ uncured}$ = พลังงานการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ที่ไม่ผ่านการบ่มสุก

$\Delta H \text{ cured}$ = พลังงานการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ที่ผ่านการบ่มสุก

% Crosslink = ปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่แบบร่างแห



รูปที่ 4.12 แสดงค่าพลังงานการคายความร้อน (Exothermic) ลดลงเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น[34]



รูปที่ 4.13 ค่าพลังงานการคายความร้อนที่อัตราส่วน BAPO (a) 0.0, (b) 3.0 และ (c) 5.0 phr กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A 2 นาที ก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที ของทั้ง 3 สภาวะ

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นการลดลงของการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่อัตราส่วนตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO (a) 0.0, (b) 3.0 และ (b) 5.0 phr กระตุ้นด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที ก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 °C จากรูปจะสังเกตได้ว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อน (ΔH) แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ของทั้ง 3 สถานะการบ่มสุก โดยพบว่า ที่สถานะการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที มีค่า ΔH มากที่สุด (มีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุด) ของในแต่ละอัตราส่วน BAPO และค่า ΔH จะลดลงตามอัตราส่วน BAPO ที่เพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อให้ความร้อนในสถานะการอบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และสถานะอบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นได้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง จากรูปจะสังเกตได้ว่า ค่า ΔH มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ BAPO เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการลดลงของ ΔH มีความสัมพันธ์กับปริมาณการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้นย่อมใช้พลังงานในการเชื่อมขวางของสายโซ่ลดลง [34] ดังค่า ΔH และค่าปริมาณการเชื่อมขวาง ที่แสดงในตาราง 4.4 และรูปที่ 4.14 ที่แสดงถึงการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงเพิ่มขึ้น

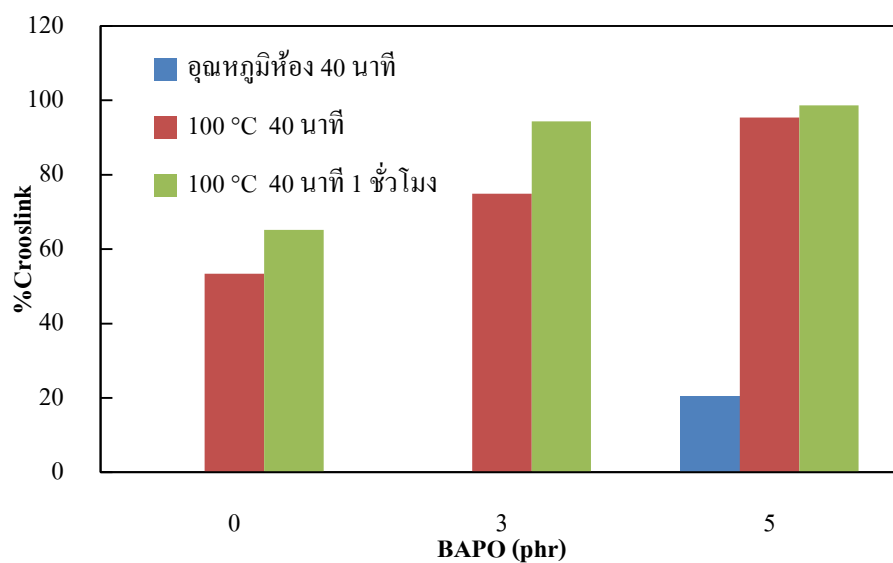
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อน (ΔH) และปริมาณการเชื่อมขวาง (% crosslink)

สถานะการบ่มสุก	BaPO 0 phr		BaPO 3 phr		BaPO 5 phr	
	ΔH (J/g)	% crosslink	ΔH (J/g)	% crosslink	ΔH (J/g)	% crosslink
1	424.96	0	393.77	0	232.01	20.46
2	69.98	53.35	44.14	74.87	13.79	95.37
3	52.3	65.14	9.85	94.39	3.89	98.66

หมายเหตุ สถานะการบ่มสุกที่ 1 คือ สถานะการบ่มสุกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที

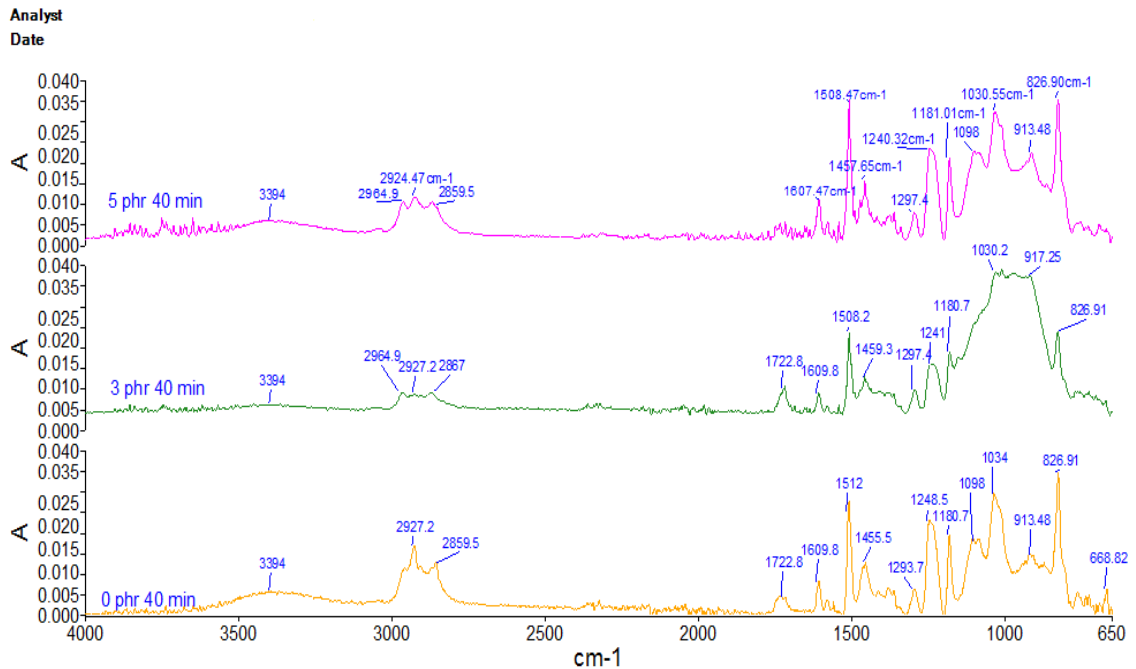
2 คือ อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที

3 คือ อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 ปริมาณการเชื่อมขวางของวัสดุคอม โพลีเอทีฟ็อกซีที่อัตราส่วนผสมอัตราส่วน BAPO 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที ที่อุณหภูมิการอบ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที ทั้ง 3 สถานะการบ่มสุกคือ บ่มสุกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที, อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และอบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.3 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

จากรูปที่ 4.15 ผลการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุผสมคอมโพสิต ที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr พบว่า มีหมู่ N-H ขึ้นที่ตำแหน่ง $3,300\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ O-H อยู่ที่ ประมาณ $3,500\text{ cm}^{-1}$ ของเส้นกราฟ BAPO ที่ 0 phr แต่เมื่อทำการเติม BAPO ที่ 3 phr พบว่า หมู่ O-H และ N-H ของอีพ็อกซีเรซินและสารทำให้แข็งลดลง เหมือนกับหมู่เอกลักษณ์ของอีพ็อกซีเรซิน ที่ตำแหน่ง 826 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-O-C ของ oxirane group (ดังแสดงในตารางที่ 4.5) แสดงว่าหมู่ของอีพ็อกซีได้เกิดการเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมี นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเติม BAPO ที่ 5 phr ตำแหน่งหมู่ O-H, N-H และพีคที่ 850 ถึง $1,100\text{ cm}^{-1}$ มีค่าเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนผสมอีพ็อกซีเรซินกับ BAPO

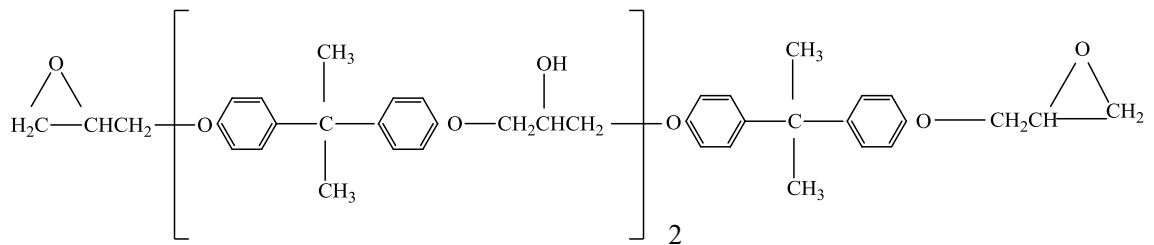
ที่ 3 phr แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน BAPO ที่ 5 phr เป็นการเติม BAPO ในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้มี BAPO เหลือค้างอยู่ในชิ้นงานหรือภายในระบบของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งแสดงผลจากหมู่ O-H และ N-H และหมู่เอกลักษณ์ของอีพ็อกซีเรซินเพิ่มขึ้น

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การเติม BAPO ที่อัตราส่วน 3 phr เป็นปริมาณที่พอดีทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ส่วนการเติม BAPO ที่อัตราส่วน 5 phr เป็นปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระของตัวเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยแสง โดยที่อนุมูลอิสระตัวแรกจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าและทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาได้ ส่วนอนุมูลอิสระตัวหลังจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาค้ำกว่าและชอบที่จับกับอนุมูลอิสระตัวอื่นจึงทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวยุติปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ได้ [35]

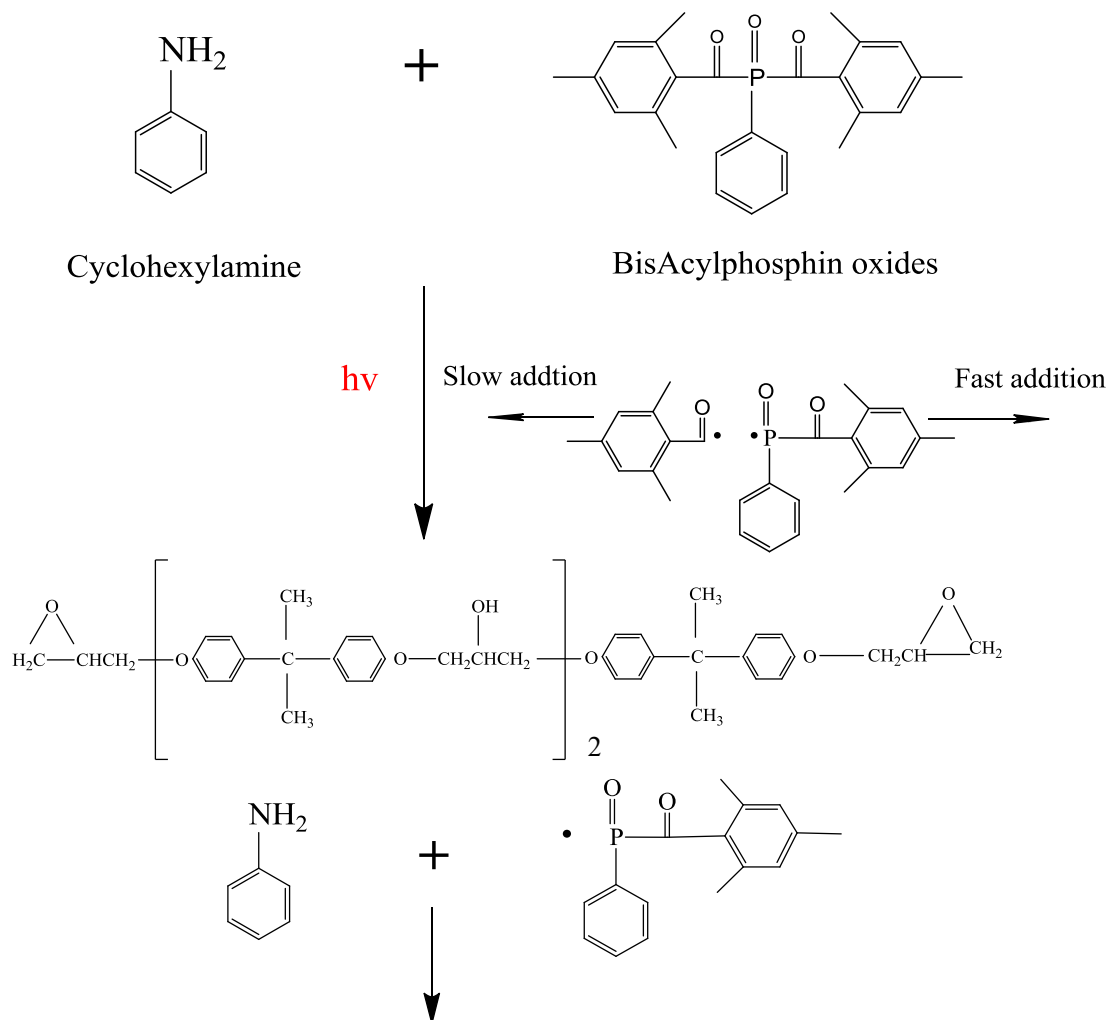
ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งหมู่เอกลักษณ์ของอีพ็อกซีเรซิน [30]

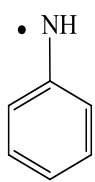
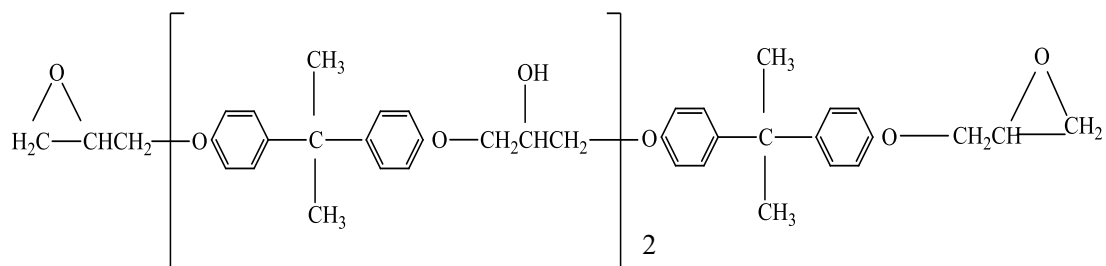
Resin	Band (cm ⁻¹)	Assignment
	3,500	O-H stretching
	3,057	Stretching of C-H of the oxirane ring
	2,965- 2,873	Stretching C-H of CH ₂ and CH aromatic and aliphatic
	1,608	Stretching C=C of aromatic rings
DGEBA	1,509	Stretching C-C of aromatic
	1,036	Stretching C-O-C of ethers
	915	Stretching C-O of oxirane group
	831	Stretching C-O-C of oxirane group
	772	Rocking CH ₂

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR สามารถวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสายโซ่ ได้ดังนี้ [36]

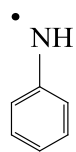
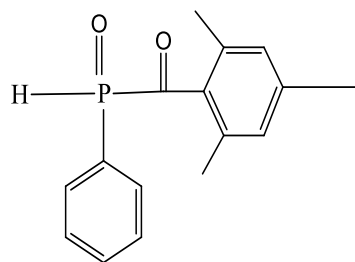


Epoxy Resin (Bisphenol A)

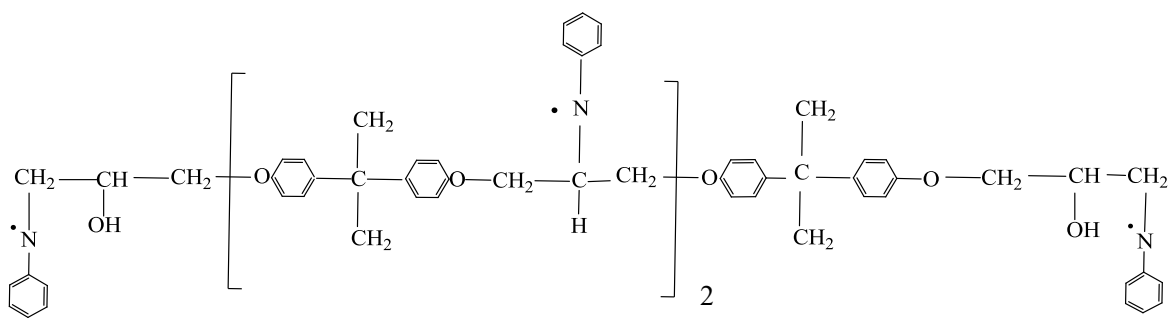
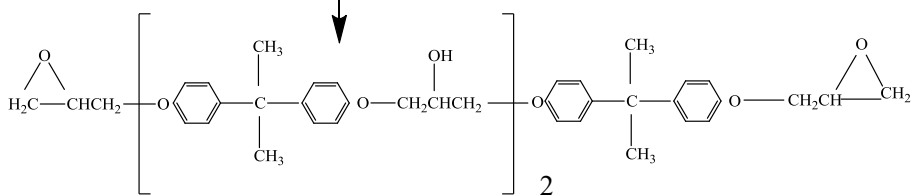


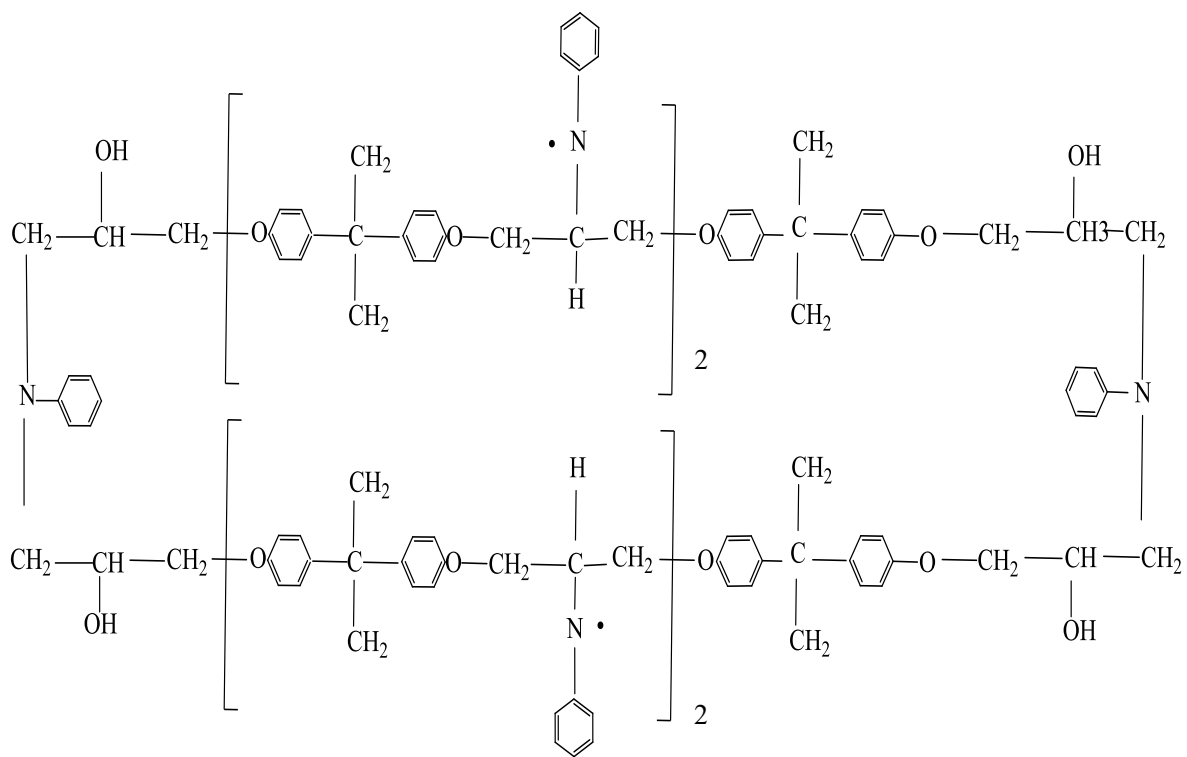


+

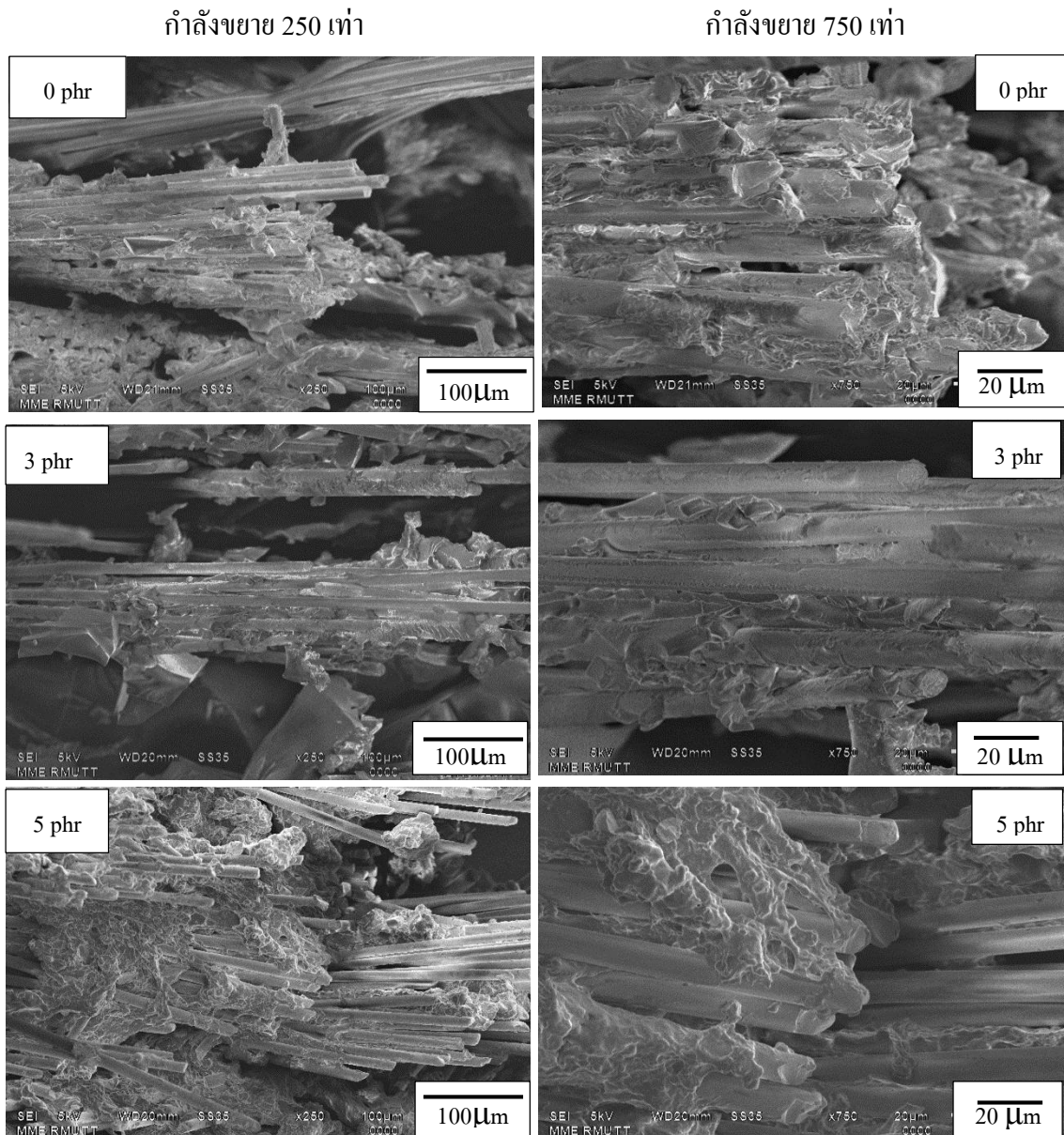


+





4.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



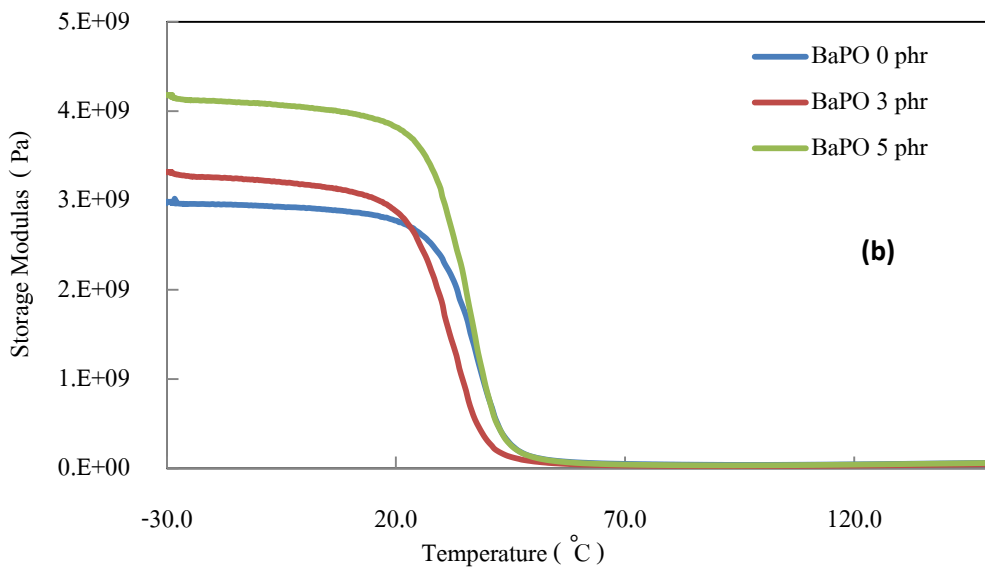
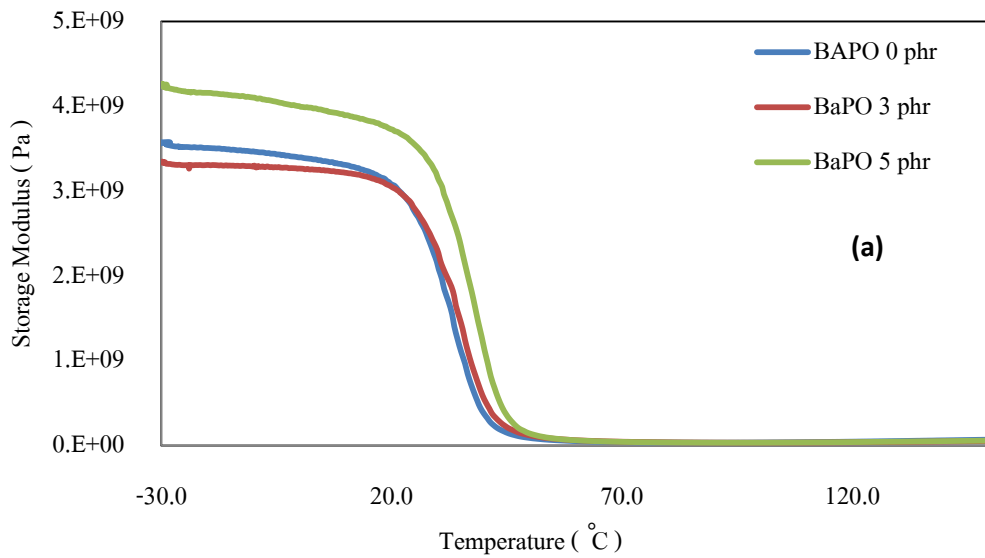
รูปที่ 4.16 ลักษณะการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีและเส้นใย ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ที่ตรวจสอบจากชิ้นงานทดสอบการต้านทานแรงกระแทก

จากการศึกษาลักษณะการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีและเส้นใย ของวัสดุคอม โพลิตที่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ดังรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อวัสดุคอม โพลิตที่เติมอัตราส่วนของ BAPO ที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ลักษณะการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใยแก้วน้อยลง อาจเกิดจากการเติม BAPO ลงไปทำให้มีการแตกตัวของสายโซ่ที่รวดเร็วและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง ทำให้ในแต่ละอัตราส่วนผสมของ BAPO ที่เพิ่มขึ้น มีปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่ที่สูงขึ้น ทำให้อีพ็อกซีผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้น การที่อีพ็อกซีผสมมีความหนืดมากขึ้นทำให้เกิดการไหลได้ยากทำให้การแทรกซึมในเส้นใยไม่ทั่วถึงไม่สม่ำเสมอ สังเกตได้จากอัตราส่วน BAPO ที่ 0 phr ที่มีปริมาณการเชื่อมขวางต่ำ ทำให้มีความหนืดน้อย การแทรกซึมการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใยดี กว่าที่อัตราส่วน BAPO ที่ 3 และ 5 phr ที่มีความหนืดมากกว่าทำให้มีความสามารถในการแทรกซึมเข้าไประหว่างชั้นเส้นใยแก้ว อีกทั้งเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางทำให้เกิดการหดตัวของอีพ็อกซีจึงเกิดเป็นช่องว่างระหว่างอีพ็อกซีกับเส้นใยแก้วเพิ่มสูงขึ้นอีก

4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพลิตอีพ็อกซี

4.5.1 วิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis, DMA)

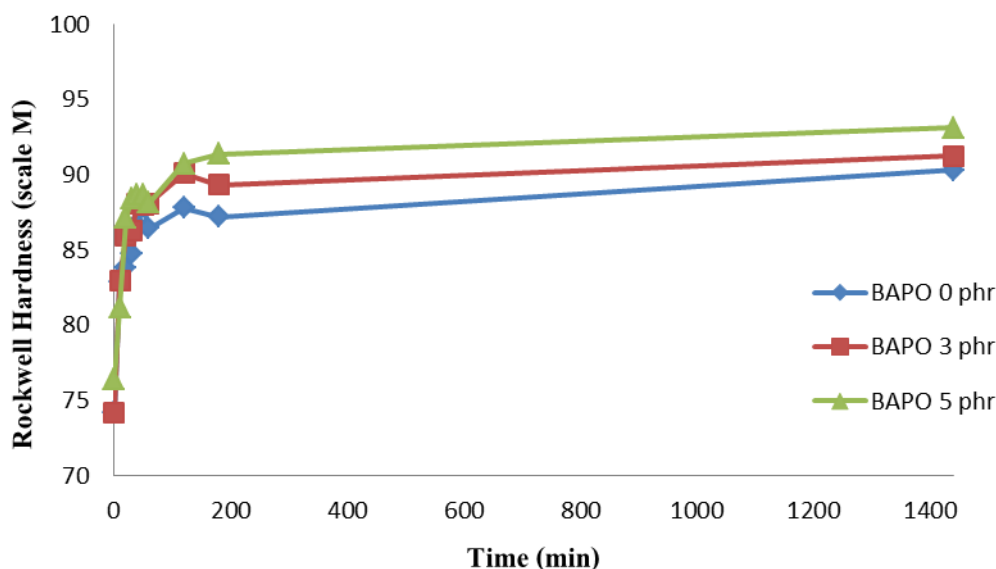
การทดสอบ สมบัติทางกลเชิงพลวัต ของวัสดุคอม โพลิต มีขนาดชิ้นงานทดสอบคือ กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ทดสอบด้วย Mode: single freq/strain Frequency: 1 Hz Strain: 0.020 mm ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ -30 ถึง 150 องศาเซลเซียส rate 5 c/min จากรูปที่ 4.14 ค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ของวัสดุคอมโพลิตอีพ็อกซีที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) จากรูปที่ 4.17 (a) และ (b) พบว่า ที่พบว่า ที่อัตราส่วน BAPO ที่ 5 phr มีค่าโมดูลัสสะสมมากที่สุด และที่อัตราส่วน 0 กับ 3 phr มีค่าลดลงตามลำดับ ค่าของโมดูลัสสะสมบ่งบอกถึงความยืดหยุ่น (flexible) ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งการที่วัสดุมีค่าโมดูลัสสะสมอยู่มากใน แสดงว่ามีความยืดหยุ่นต่ำ กว่าวัสดุที่มีค่าโมดูลัสสะสมน้อย กล่าวคือที่ 5 phr สามารถเสียรูปได้ยากกว่าอัตราส่วน BAPO ที่ 0 และ 3 phr ซึ่งเป็นเพราะชิ้นงานวัสดุคอมโพลิตสามารถสะสมพลังงานไว้ได้มากกว่า ชิ้นงานที่ปริมาณ BAPO ที่ 3 และ 0 phr ตามลำดับ (5 phr > 3phr > 0 phr)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าโมดูลัสสะสมต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ของวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ; (a) อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที (b) อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.5.2 การทดสอบค่าความแข็ง (Rockwell Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D785

การทดสอบความแข็งของผิวชิ้นงานของวัสดุผสมอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยแก้ว โดยเตรียมการผสมเมทริกซ์หรืออีพ็อกซีเรซิน จากการเติมสารตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วน 0.0, 3.0, 5.0 phr ทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UV-A) เป็นเวลา 2 นาที ก่อนนำส่วนผสมเมทริกซ์นี้มาทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag) ซึ่งภายในเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว จากนั้นนำมาบ่มด้วยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบอีกครั้งภายในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที และนำชิ้นงานนั้นมาทดสอบค่าความแข็ง โดยวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทุกๆ 10 นาที เมื่อวัดค่าจนถึงนาทีที่ 60 แล้วจึงแบ่งช่วงเวลากการวัดค่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งเวลาไว้อีก 24 ชั่วโมง จึงทำการวัดค่าความแข็ง ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.18 โดยที่เวลา 0 นาที ทดสอบความแข็งของสภาวะอบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที แล้วที่เวลา 60 นาที คือ การวัดค่าความแข็งสภาวะอบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอีก 1 ชั่วโมง และแสดงค่าความแข็งในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของวัสดุผสมที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ที่ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 นาที รวมทั้งเวลาที่ 2, 3 และ 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.18 สามารถแบ่งการอธิบายค่าความแข็งได้เป็น 2 ช่วง ดังต่อไปนี้ ช่วงที่ 1 คือช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ 0 ถึง 20 นาที ช่วงที่ 2 คือช่วงเวลาตั้งแต่ 20 นาที ถึง 24 ชั่วโมง (วัดค่าจนถึงนาทีที่ 60 แล้วแบ่งช่วงเวลาการวัดค่าออกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งเวลาไว้อีก 24 ชั่วโมง จึงทำการวัดค่าความแข็งอีกครั้ง)

ซึ่งพบว่าค่าความแข็งในช่วงที่ 1 นั้น มีค่าต่ำกว่าในช่วงที่ 2 เกิดจากเป็นช่วงแรกที่มีปริมาณการบ่มสุก (Degree of cure) น้อยกว่าในช่วงที่ 2 แล้วยังสังเกตได้ว่าค่าความแข็งนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงนาทีที่ 20 เพราะมีปริมาณการเชื่อมขวาง (% crosslink) ที่เพิ่มขึ้น

แต่เมื่อเกิน 20 นาที ซึ่งเป็นค่าความแข็งในช่วงที่ 2 นั้น พบว่าค่าความแข็งยังคงเพิ่มขึ้น แต่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และมีค่าความแข็งค่อนข้างที่จะคงที่หรือใกล้เคียงกัน อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อระยะเวลามากขึ้นการเชื่อมขวาง (% crosslink) โกลีที่จะสมบูรณ์ [37][38]

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วน ผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ที่ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 นาที รวมทั้งเวลาที่ 2, 3 และ 24 ชั่วโมง

นาที	BAPO 0 phr	BAPO 3 phr	BAPO 5 phr
0	74±3	74±3	76±4
10	83±3	83±4	81±2
20	84±2	86±1	87±2
30	85±2	86±2	89±3
40	87±2	88±2	89±3
50	88±2	88±2	89±2
60	86±2	88±2	88±2
120	88±3	90±2	91±2
180	87±2	90±3	91±2
1,440	90±3	91±3	93±3

จากการวิเคราะห์ผลค่าความแข็งในรูปที่ 4.18 ซึ่งแบ่งการอธิบายผลออกเป็น 2 ช่วงตามระยะเวลาในการทดสอบ สามารถแสดงค่าความแข็งของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ที่ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 นาที รวมทั้งเวลาที่ 2, 3 และ 24 ชั่วโมง ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.6

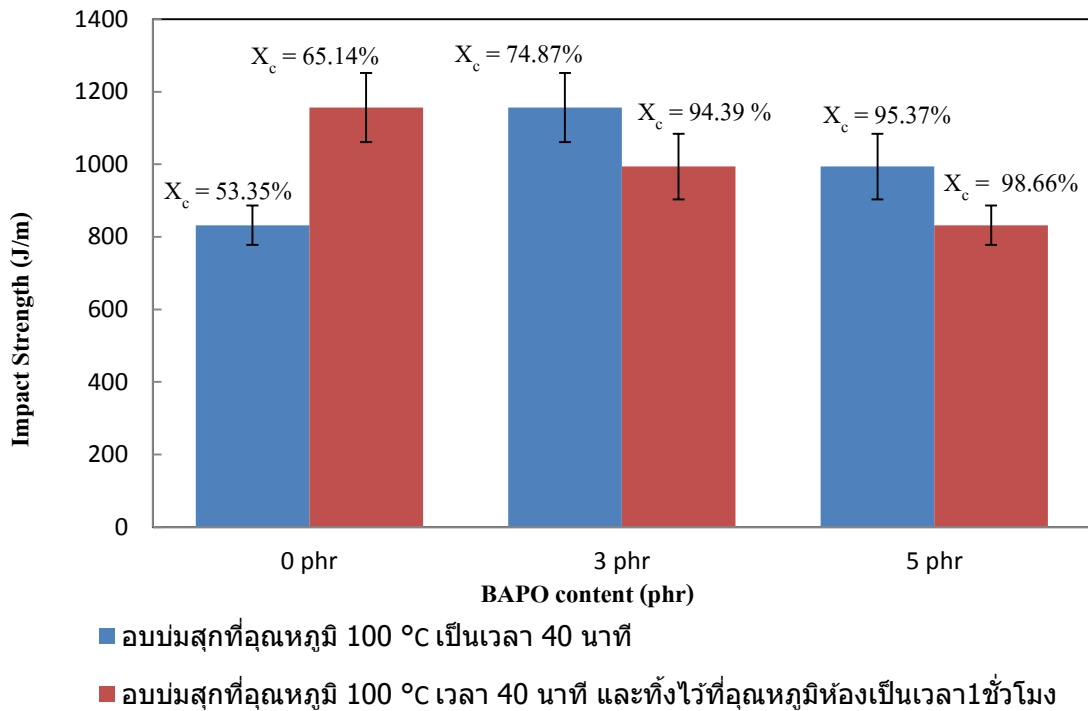
จากตารางที่ 4.6 พบว่า ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอัตราส่วนการผสม BAPO ที่เพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วน BAPO ที่ 0.0, 3.0 และ 5.0 phr ดังจะเห็นได้จากค่าความแข็งในช่วงที่ 1 ที่เวลาที่ 20 นาที มีค่าความแข็งอยู่ที่ 83.78, 85.9 และ 87.11 และเมื่อสังเกตค่าความแข็งในช่วงที่ 2 นั้นพบว่า ค่าความแข็งของอัตราส่วน BAPO ที่ 0.0 phr มีค่าอยู่ที่ 86.41 โดยมีค่าน้อยกว่าที่อัตราส่วนของ BAPO 3.0 และ 5 phr ที่มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 88.1 และ 88.15 ซึ่งมีค่าความแข็งที่ค่อนข้างจะเท่ากัน อาจเป็นเพราะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกันภายในช่วงเวลาที่ 60 นาที และพบว่าเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าความแข็งอยู่ที่ประมาณ 90.3, 91.24 และ 93.11 ตามอัตราส่วน BAPO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่มากขึ้นย่อมทำให้เกิดการเชื่อมขวางในตัวอย่างชิ้นงานทดสอบของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสง BAPO ที่ถูกกระตุ้นด้วยรังสี UV-A จะเกิดการแตกตัวเป็น free radical มากขึ้น จึงเพิ่มความสามารถความว่องไวของการเข้าปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่ และส่งผลให้มีปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่ที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [39]

4.5.3 การวิเคราะห์ผลการต้านทานต่อแรงกระแทก (Charpy Impact Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 6110

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการต้านทานต่อแรงกระแทก (J/m) ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr ภายใต้สภาวะการบ่มสุกที่ 1 และ 2

อัตราส่วน BAPO	ค่าการต้านทานต่อแรงกระแทก (J/m)	
	สภาวะการบ่มสุกที่ 1	สภาวะการบ่มสุกที่ 2
0 phr	996 ±54	1156 ±95
3 phr	1139 ±68	993 ±90
5 phr	1082.±91	832 ±54

หมายเหตุ : สถานะการบ่มสุกที่ 1 คือ อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที
 สถานะการบ่มสุกที่ 2 คือ อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานการต้านทานแรงกระแทกของของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0 และ 5.0 phr

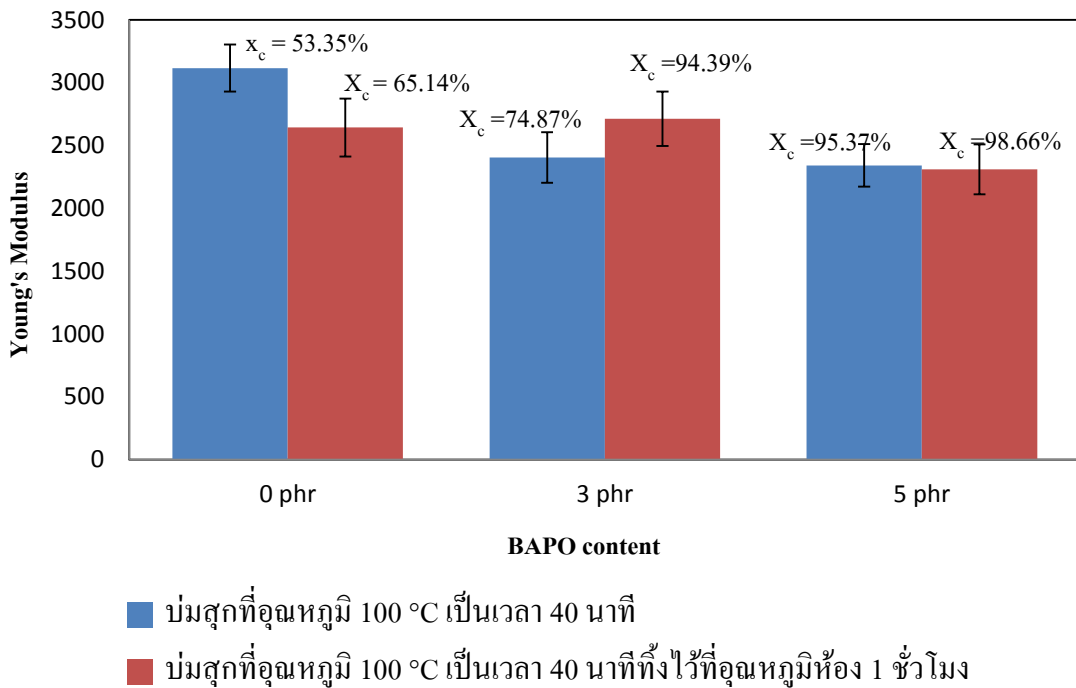
จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.19 พบว่า ค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณการเชื่อมขวาง (% crosslink; X_c) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ในหัวข้อที่ 4.1.3 โดยแบ่งออกเป็น 2 สถานะการทดสอบ คือ 1. อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที พบว่า อัตราส่วนที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO (0.0 phr) มีค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกเป็น 996.28 J/g มี $X_c = 53.35%$ และเมื่อเติม BAPO เพิ่มขึ้นที่ (3.0 phr) พบว่าค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1,139.5 J/m มี $X_c = 74.87%$ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่สามารถทนต่อการรับแรงกระแทกได้ เนื่องจากยังคงมียังคงมีบางสายโซ่ยังไม่เกิดการเชื่อมขวาง จึงสามารถเกิดการสั่นและขยับตัวของสายโซ่เมื่อได้รับแรงกระแทก จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่าอัตราส่วนที่

(0.0 phr) ทำให้ค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแต่เหนียว จึงสามารถรับแรงได้ดี แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน BAPO เพิ่มขึ้นอีกเป็น (5 phr) ก็พบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลง เป็น 1082 J/m มี $X_c = 95.37\%$ จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การทนต่อแรงกระแทกมีค่าลดลง ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะ

ในส่วนของสภาวะการบ่มสุกที่ 2 อบบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตที่ไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO (0 phr) มีค่าเป็น 1156.5 J/m มี $X_c = 65.14\%$ และเมื่อเติมปริมาณ BAPO เพิ่มขึ้นที่ (3.0 และ 5.0 phr) พบว่า ค่าการต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลง อยู่ที่ 993.7 J/m และ 832.14 J/m ตามปริมาณการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น คือ $X_c = 94.39\%$ และ $X_c = 98\%$ อาจเนื่องมาจากปริมาณการเชื่อมขวางที่มากขึ้นภายในสายโซ่ส่งผลให้เกิดการหดตัวของอีพ็อกซีมากขึ้นจึงทำให้ภายในชิ้นงานมีความเค้นตกค้างเกิดขึ้นสูง มีผลให้ค่าการต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะการยึดเกาะระหว่างอีพ็อกซีและเส้นใยแก้วด้วย SEM ในหัวข้อที่ 4.4

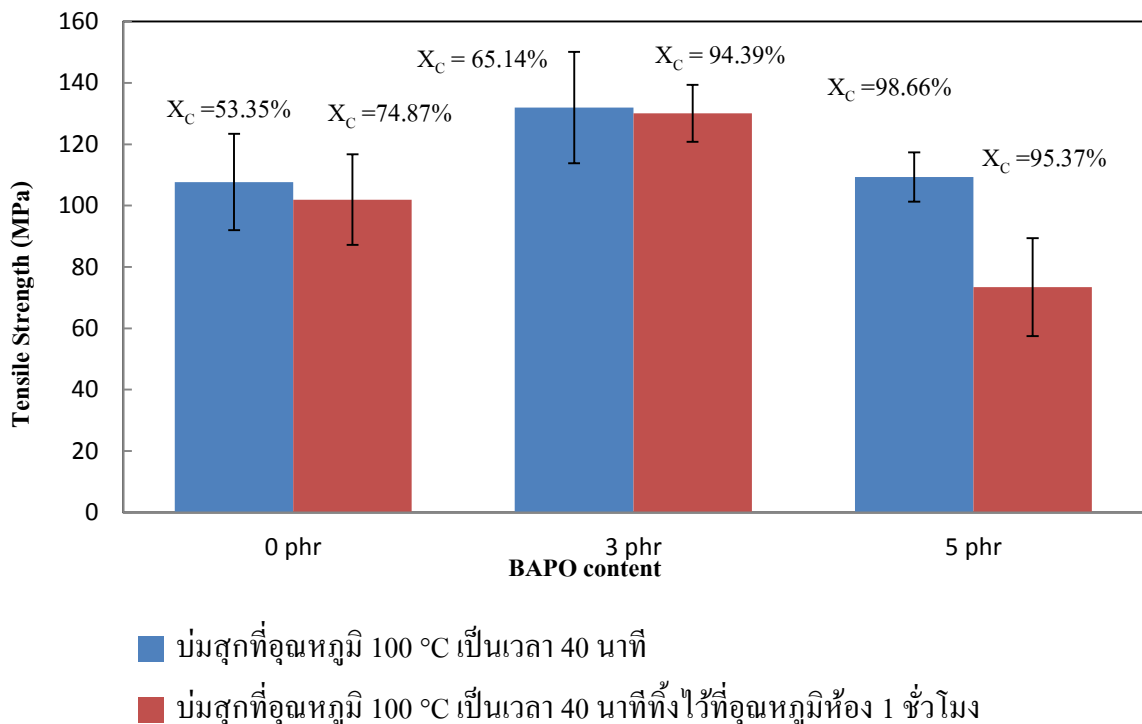
4.3.4 การวิเคราะห์ผลการต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM D638M ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการต้านทานแรงดึง (MPa) ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr

สภาวะการบ่มสุก	อัตราส่วน BAPO	ค่ายังมอดูลัส (MPa)	การต้านทานแรง ดึง (MPa)
บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที	0 phr	3116±187	107.7±15.7
	3 phr	2406±201	132.0±18.1
	5 phr	2342±169	109.3±8.0
บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง	0 phr	2644±230	101.96±14.7
	3 phr	2714±217	130.1±9.3
	5 phr	2310±198	73.47±15.9



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของวัสดุคอมโพสิตที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของวัสดุคอมโพสิต มีค่าลดลงเมื่อเติม BAPO ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่า Young's Modulus ของอัตราส่วน BAPO 0.0, 3.0 และ 5.0 phr อยู่ที่ 3,116, 2,406 และ 2,342 MPa ตามลำดับ อาจเป็นเพราะที่ BAPO 0 phr เกิดการเชื่อมขวางภายในสายโซ่โมเลกุลเป็นสายโซ่สั้นๆ มาเชื่อมขวางกัน อาจทำให้ได้บริเวณที่มีปริมาณเชื่อมขวางหนาแน่นหลายจุด ทำให้สายโซ่เกิดการขยับตัวได้ยาก ซึ่งมีผลต่อการต้านทานแรงดึงที่ได้รับในช่วงแรก และส่งผลให้มีค่า Young's Modulus สูงกว่าเมื่อเทียบกับการเติมสาร BAPO ที่มากขึ้น เนื่องจากเมื่อกระตุ้นด้วยรังสี UV-A มีโอกาสที่จะทำให้ฮีพ็อกซีมีโมเลกุลใหญ่เกิดเป็นสายโซ่ยาวๆมาจับกัน ทำให้สายโซ่เกิดการขยับตัวได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า Young's Modulus ที่ต่ำลง แม้ว่าปริมาณการเชื่อมขวาง (% crosslink; X_c) จะมีค่าสูงก็ตาม ซึ่งเกี่ยวเนื่องมาจากปริมาณการเชื่อมขวางสูงฮีพ็อกซีเกิดการหดตัวมากทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานแรงดึง ของวัสดุคอมโพสิตที่เดิมสารริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง (BAPO) ที่อัตราส่วนผสม 0.0, 3.0, 5.0 phr

จากรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่เดิมตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง พบว่าที่อัตราส่วน BAPO ที่ 3 phr ของทั้งสองสถานะการทดสอบ มีค่าการต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 132 และ 130 MPa ซึ่งมีปริมาณการเชื่อมขวางอยู่ที่ 74.87% และ 94.39% แล้วเมื่อมีการเติมอัตราส่วน BAPO ที่ 5 phr พบว่า มีค่าการต้านทานแรงดึงอยู่ที่ 109 และ 73 MPa ซึ่งมีค่าลดลงตามปริมาณการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น คือ 95.37% และ 98.66% จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกัน แต่ความแข็งแรงไม่เท่ากันเพราะที่อัตราส่วน BAPO ที่ 5 phr ที่กระตุ้นด้วยรังสี UV-A มีความหนืดสูง ไหลตัวได้ยากการแทรกซึมในเส้นใยไม่ทั่วถึงไม่สม่ำเสมอเหมือนที่อัตราส่วน BAPO 3 phr การที่มีปริมาณการเชื่อมขวางที่สูงมาก ทำให้เกิดการหดตัวของอีพ็อกซีเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดค่าความเค้นตกค้าง (residual stress) และ ช่องว่าง (void) ภายในวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกับอีพ็อกซี ดังนั้น จึงทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาลัยเกษตรกรรมระหว่างอีพ็อกซีและเส้นใยด้วย SEM ในหัวข้อที่ 4.4 [41][42]

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UV-A) ระหว่างอีพ็อกซีผสมกับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสง สามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานการคายความร้อนเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาในการบ่มสุกที่ 2 นาที เพราะสามารถนำไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้ในขั้นต่อไป

5.1.2 การศึกษาอุณหภูมิคงที่ที่ 80, 100, 120 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้การบ่มสุกของอีพ็อกซีผสม กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงที่ สรุปได้ว่า

- เมื่อระยะเวลาในการบ่มนานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาณการบ่มสุกเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนตัวริเริ่มปฏิกิริยาทางแสงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 40 นาที มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางสูงสุด จึงนำมาใช้ในการอบบ่มสุกเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

5.1.3 การศึกษาปริมาณการเชื่อมขวาง (% Crosslink) ของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ที่สภาวะบ่มสุกที่อุณหภูมิห้อง 40 นาที, บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที, บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง สรุปได้ว่า

- แต่ละสภาวะการบ่มสุกมีปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงที่สูงขึ้น

5.1.4 จากการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีที่ผ่านการอบบ่มสุกที่ 2 สภาวะสามารถสรุปได้ดังนี้

- การใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลและปริมาณการเชื่อมขวางที่สูงขึ้น ในทุกๆสภาวะการบ่มสุก แต่อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีที่ใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชิงแสงในปริมาณ 3 phr. และบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที ให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกและการทนต่อแรงดึงสูงสุด และยังพบว่า ยิ่งปริมาณการเชื่อมขวางในปริมาณที่สูงมากยังส่งผลให้เกิดการหดตัวของอีพ็อกซีสูงซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี โดยจะเห็นว่า การกระตุ้นวัสดุอีพ็อกซีที่เติมสารริเริ่ม

ปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถช่วยลดระยะเวลาและพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการบ่มสุกของการผลิตงานวัสดุคอมโพสิตที่พ็อกซี่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์หาปริมาณการเชื่อมขวาง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาควรควบคุมระยะเวลาในการทดสอบ เนื่องจากปัจจัยทางด้านเวลาที่มีผลต่อปริมาณการเชื่อมขวาง และอัตราการเกิดปฏิกิริยา

5.2.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ ต้องระวังอย่าให้เกิดรอยร้าวหรืออากาศเข้าไปในชิ้นงานขณะที่ทำการขึ้นรูป

5.2.3 ควรใช้น้ำแข็งแห้งในการคงปฏิกิริยาของชิ้นงานทดสอบ เพื่อไม่ให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไป

5.2.4 เนื่องจากลักษณะและอุปกรณ์ในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบสุญญากาศ มีผลทำให้ค่าพลังงาน หรือค่าความเข้มแสงจากหลอด UV ลดลง ดังนั้นควรเลือกพิจารณาชนิดหลอด หรือเปลี่ยนการวางตำแหน่งของหลอด UV อาจติดตั้งทั้งทางด้านล่างและด้านบนของชิ้นงาน

บรรณานุกรม

- [1] “Epoxy รู้จักกันดีแล้ววียัง,” (online), Available:
http://www.kru-aor.com/Chem_Tips/epoxy.html, (5 พฤศจิกายน 2557)
- [2] “ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของอีพ็อกซีเรซิน”, (online), Available:
kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/1885/12/246510_ch1.pdf, (24 มกราคม 2559)
- [3] เอกสารเผยแพร่. ชุดการจัดแสดงที่ 14. “การอบโดยใช้รังสีอุลตราไวโอเล็ต (*Ultra Violet Curing*).” (online), Available:[http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial\(PDF\)/Bay%2014%20ra%20Violet%20Curing.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay%2014%20ra%20Violet%20Curing.pdf), (20 ตุลาคม 2557)
- [4] กฤตพร พลมุข, นริศสา ไกรกิติ และ ชัยวัฒน์ คุรุกิจวานิชย์. 2555. “*Analysis and Design of Electricity Transmission Pole Composed of Glass-fiber Reinforced Composite*”, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [5] หฤทศักดิ์ กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิตติสกุล, “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ,” *วิศวกรรมสาร มก*, 2552, ปีที่ 22, ฉบับที่ 70, หน้า 18-32, Available:
<http://anchan.lib.ku.ac.th/kukr/handle/003/19709>, (25 ตุลาคม 2557).
- [6] สุภาสินี ลิ้มปานานภาพ, “*นิยามของวัสดุคอมโพสิต*”, (online), Available:
<http://www.physics.kku.ac.th/315205/sites/default/files/chapter10.pdf>, (25 สิงหาคม 2557).
- [7] “fiberglass,” (online), Available:
http://www.muikwang.com/images/column_1337915534/fiberglass.pdf, (15 กันยายน 2557)
- [8] “ความรู้พื้นฐานเรื่องใยแก้ว,” (online), Available:
<http://www.muikwang.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539148669>, (1 พฤศจิกายน 2557)
- [9] รศ.แม่้น อมรสิทธิ์ และคณะ, ปี พ.ศ. 2545 หนังสือวัสดุวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล
ถนนสุขุมวิทสารพญาไท กรุงเทพฯ 10400

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Ian W. Boyd, J.Y. Zhang. 1997. "New large area ultraviolet lamp sources and their applications." *Electronic and Electrical Engineering*, University College London.
- [11] Physics learning center, "1. แสงและการมองเห็น." (online), Available:
<http://ikaen2520.wordpress.com/1-ฟิสิกส์ม-4/บทหน้า/> (30 ตุลาคม 2557)
- [12] นายวิฑูรย์ อนันตศิริจินดา, 2555, "ผลของอิพอกซีเรซินและน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อัลลอยเสริมแรงซิลิกาอนุภาคนาโน," ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2555
- [13] "บทที่ 9 การสังเคราะห์เทอร์โมเซต" (online), Available:
<http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter%209.pdf>, (4 พฤศจิกายน 2557)
- [14] พิชญนันท์ ภูเพียงใจ, 2549, "การเตรียมเรซินที่บ่มได้ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากน้ำมันเมล็ดปาล์ม," วิทยานิพนธ์สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [15] T. Jung, M. Koehler, and D. Wostratzky, "Curing of Composite Components by Ultraviolet Radiation: A Review," *SAMPE J.*, 34, 40 (1998)
- [16] "แสงอัลตราไวโอเล็ต" (online), Available:
http://www.cooldepa.com/modules/main/attachments-downloader.php?attach_id=8201, (20 ตุลาคม 2557).
- [17] "บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัย ขางธรรมชาติ" (online), Available:
<http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/6168/9/Chapter2.pdf>, (20 ตุลาคม 2557).
- [18] บริษัท นีโอเทค คอมโพสิต จำกัด, "Vaccum bagging." (online), Available:
http://www.neo.co.th/product_c09.php, (2 พฤศจิกายน 2557)
- [19] "Differential scanning calorimeter" (online), Available: <http://pslc.ws/macrog/dsc.htm>. (6 กุมภาพันธ์ 2557).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] ธัญญรัตน์ ธรรมรัตน์, สุธรรม ทัพพนรินทร์. 2547. “การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของของผสมระหว่างโพลีโพนฟิไลนกับยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์,” ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [21] J. Ramli, A.S. Hadi, A.R. Jeefferie & M.M Mahat, “A Preliminary Study on the Effects of Photoinitiator and UV Curing Exposure Time to the Mechanical and Physical Properties of the Epoxy and Vinyl Ester Fiber Glass Laminated Composites,” *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS* Vol:10, No:06
- [22] A. Cvetanovska, P. Compaston, “Degree of cure and tensile properties of vinylester resin cured with ultraviolet light,” *Journal of Materials Science*, Vol.39, pp. 1791 – 1793, (2004)
- [23] Ricky Hardis, Julie L.P.Jessop, Frank E.Peters , Michael R.Kessler, “Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA, Composites”: Part A 49, pp. 100–108, (2013)
- [24] P. Compston , J. Schiemer, A. Cvetanovska, “Mechanical properties and styrene emission levels of a UV-cured glass-fibre/vinylester composite,” *Composite Structures* Vol.86, pp. 22-26, (2008)
- [25] Nanthiya Hansupalak, Sirinapa Srisuk, “Sulfur-Free Pre Vulcanization of Natural Rubber Latex by Ultraviolet Irradiation,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, pp. 3974-3981, (2016)
- [26] N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, R. H. Arwin Raj, “Mechanical and Dynamic Mechanical Analysis of Woven Banana/Epoxy Composite,” *J Polymer Environ* 20: pp. 565–572, (2012)
- [27] J. Ramli, A.S. Hadi, A.R. Jeefferie & M.M Mahat, “A Preliminary Study on the Effects of Photoinitiator and UV Curing Exposure Time to the Mechanical and Physical Properties of the Epoxy and Vinyl Ester Fiber Glass Laminated Composites,” *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS* Vol:10, No:06

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] ณัฐพร ศรีลอย, ฉันททิพ คำนวนทิตย, จันทรฉาย ทองปิ่น, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, “ผลของสารเติมแต่งซิลิกา การปรับปรุงผิว และวิธีการเชื่อมโยงสายโซ่ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวกับสารเติมแต่งซิลิกา,” *การจัดประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 11*
- [29] ผศ.ดร. ศัชรินทร์ ศิริวงศ์, “จลนพลศาสตร์เคมี,” (online), Available: <http://chemsci.kku.ac.th/choosak/gen%20chem/Kinetics.pdf> (4 มีนาคม 2559)
- [30] Ricky Hardis , Julie L.P.Jessop , Frank E.Peters , Michael R.Kessler , “Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA,” *Composites: Part A* 49, pp. 100–108, (2013)
- [31] “ปฏิกริยาการเชื่อมโยงของอีพ็อกซีเรซิน,” (online), Available: kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/1885/12/246510_ch1.pdf, (24 มกราคม 2559)
- [32] Juan Carlos Cabanelas and Juan Baselga, “Applications of FTIR on Epoxy Resins –Identification, Monitoring the Curing Process,” *Phase Separation and Water Uptake*
- [33] Sichina.W.J., National Marketing Manager, “Characterization of Epoxy Resins Using DSC,” *PETech-19 Thermal Analysis*.
- [34] Vincent Besse, Mathieu A. Derbanne, “Photopolymerization study and adhesive properties of self-etch adhesives containing bis(acyl)phosphine oxide initiator,” *Dental Materials* · January 2016, No.9
- [35] ผศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอนุโมลอิสระ, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [36] “epoxy shrinkage cure Epoxy/glass fiber sem” (online), Available: https://www.researchgate.net/figure/259996513_fig5_Fig-5-SEM-micrograph-reveals-total-loss-of-adhesion-at-the-fi-brepolymer-interface-and, (15 พฤศจิกายน 2559)

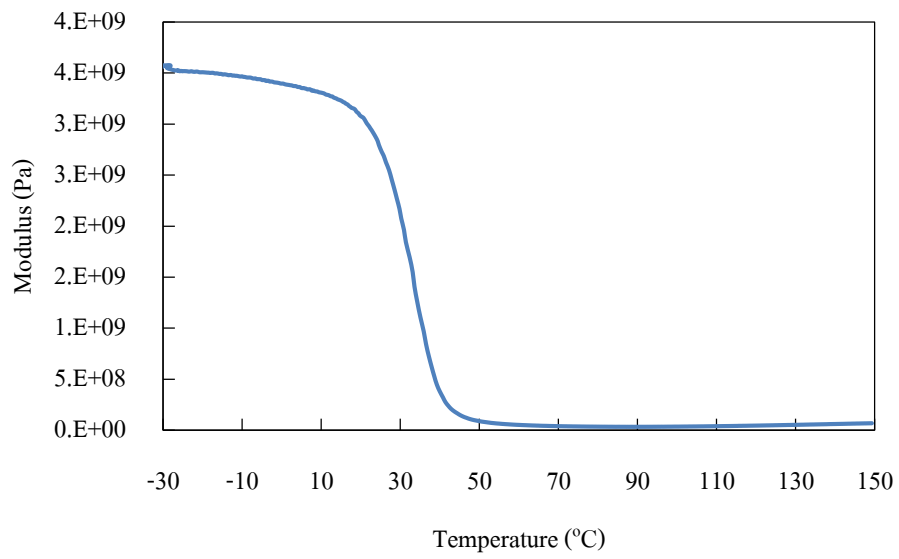
บรรณานุกรม (ต่อ)

- [37] A. Cvetanovska, P. Compaston, “Degree of cure and tensile properties of vinylester resin cured with ultraviolet light,” *Journal of Materials Science*, Vol.39, pp. 1791 – 1793, (2004)
- [38] P. Compston, J. Schiemer, A. Cvetanovska, “Mechanical properties and styrene emission levels of a UV-cured glass-fibre/vinylester composite,” *Composite Structures* Vol.86, pp. 22-26, (2008)
- [39] T. Jung, M. Koehler, and D. Wostratzky, “Curing of Composite Components by Ultraviolet Radiation: A Review,” *SAMPE J.*, 34, 40 (1998)
- [40] “การหดตัวของเทอร์โมเซต” (online), Available:<http://ciks.cbt.nist.gov/bentz/nistir5756/node11.html>, (15 พฤศจิกายน 2559)
- [41] Lole Khoun and Pascal Hubert, “Characterizing the cure shrinkage of an epoxy resin in situ,” *Society of Plastics Engineers (SPE)*, 2010

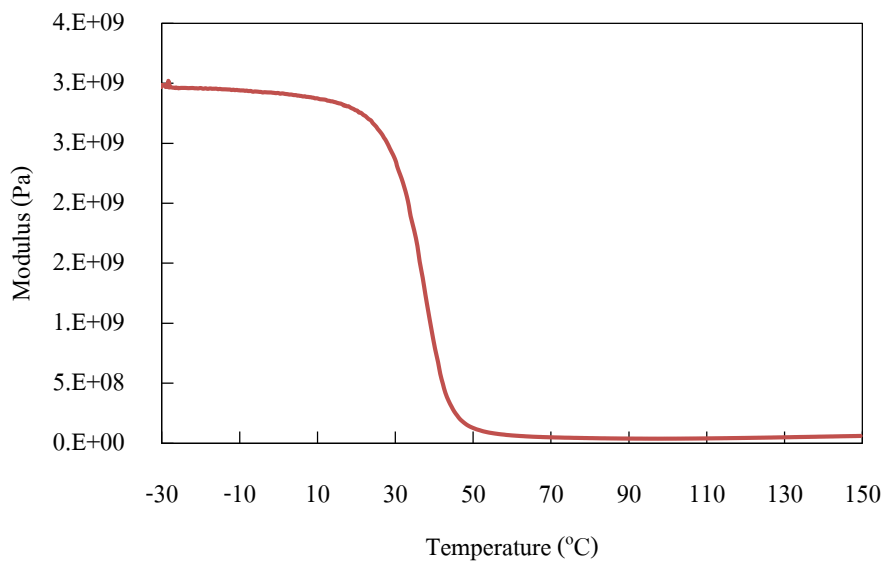
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

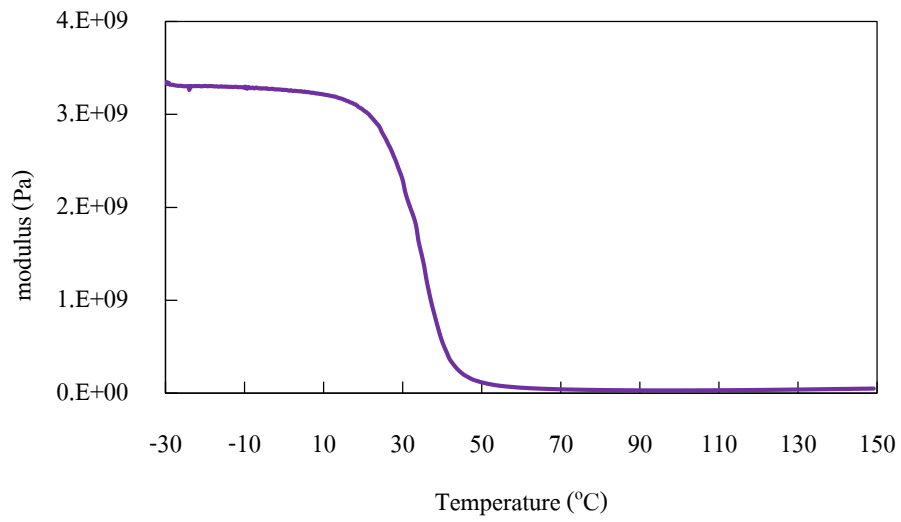
ผลการทดลอง



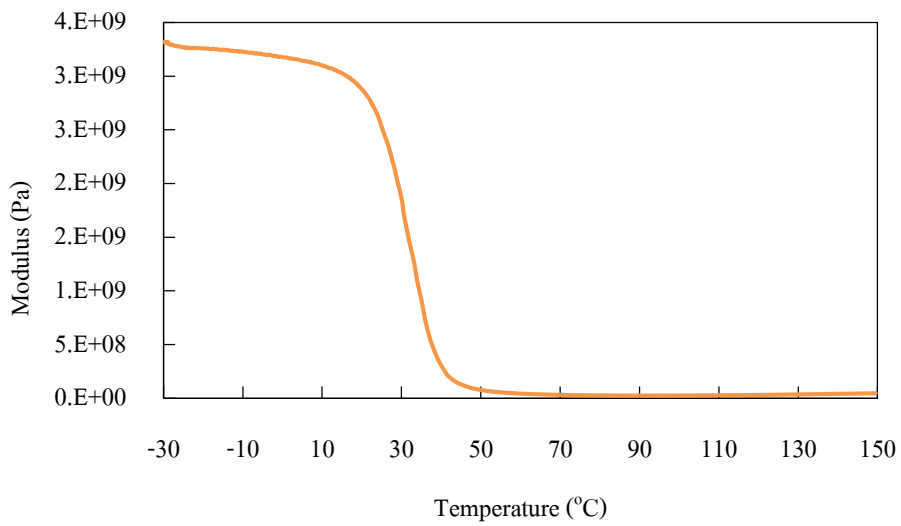
รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัส-อุณหภูมิของ BaPO 0 phr_40 min



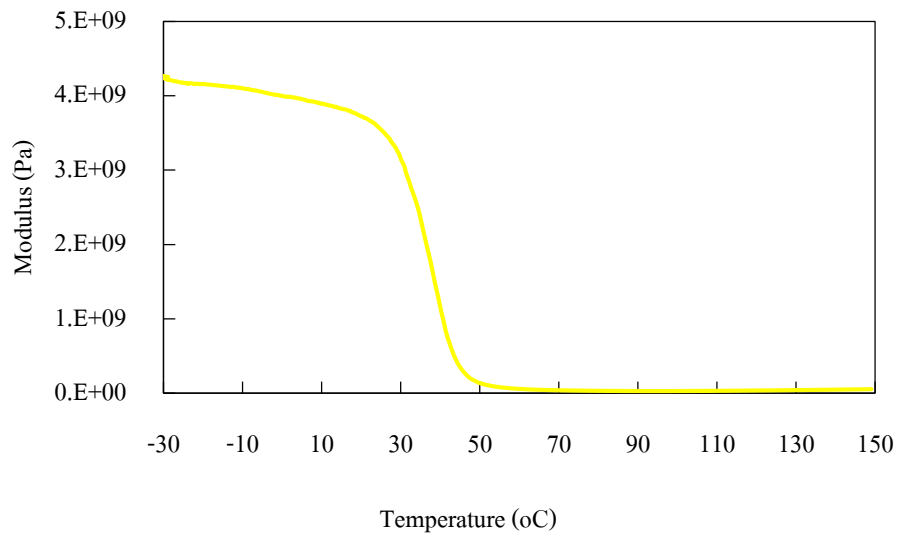
รูปที่ ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัส-อุณหภูมิของ BaPO 0 phr_40 min(1 hr)



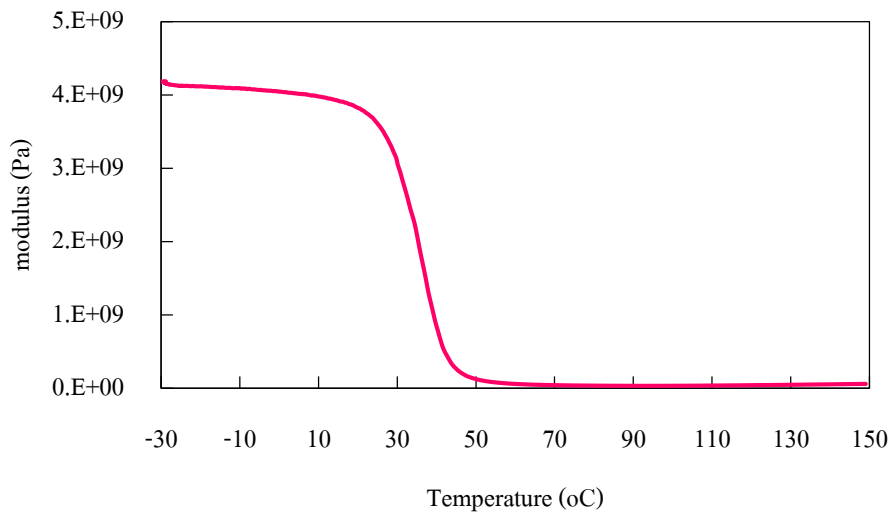
รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส-อุณหภูมิของ BaPO 3 phr_40 min



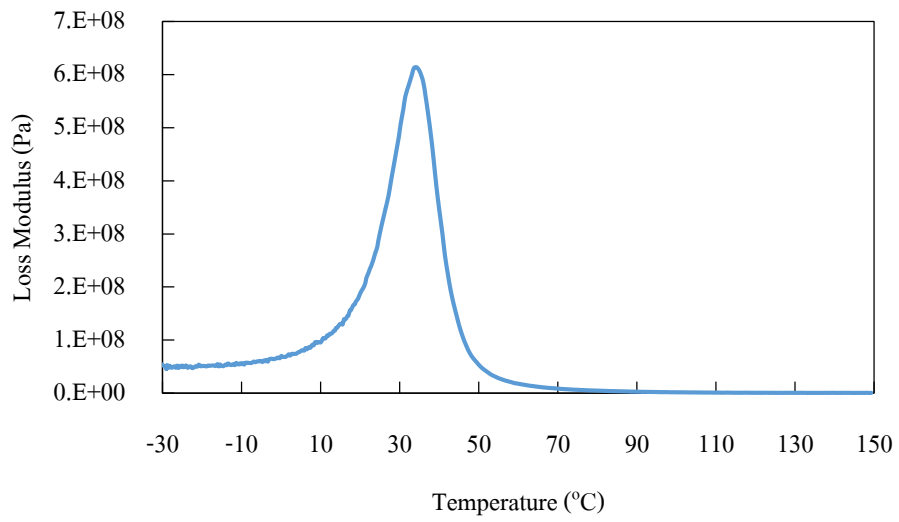
รูปที่ ข.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส-อุณหภูมิของ BaPO 3 phr_40 min(1 hr)



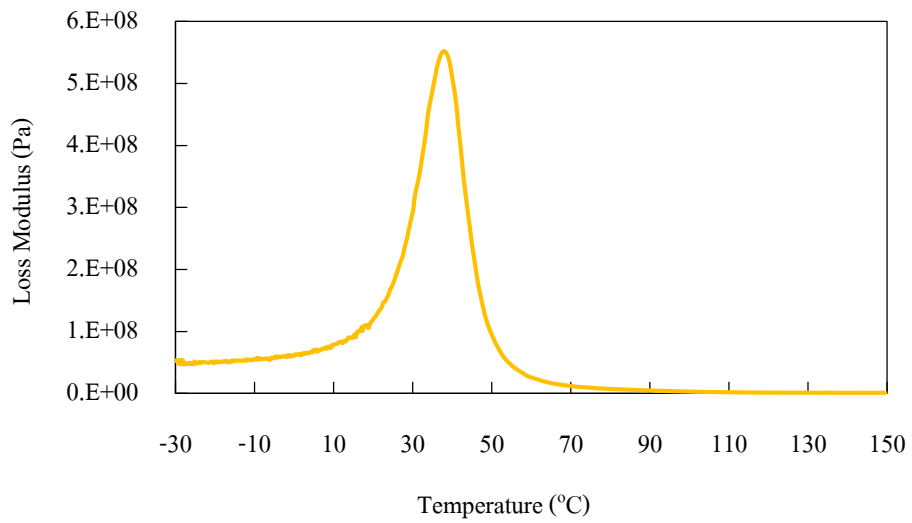
รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส-อุณหภูมิของ BaPO 5 phr_40 min



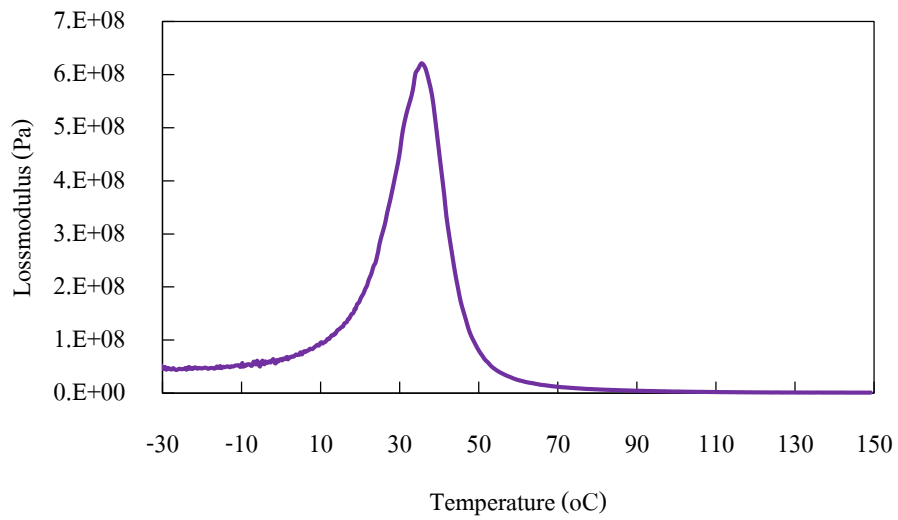
รูปที่ ข.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัส-อุณหภูมิของ BaPO 5 phr_40 min(1hr)



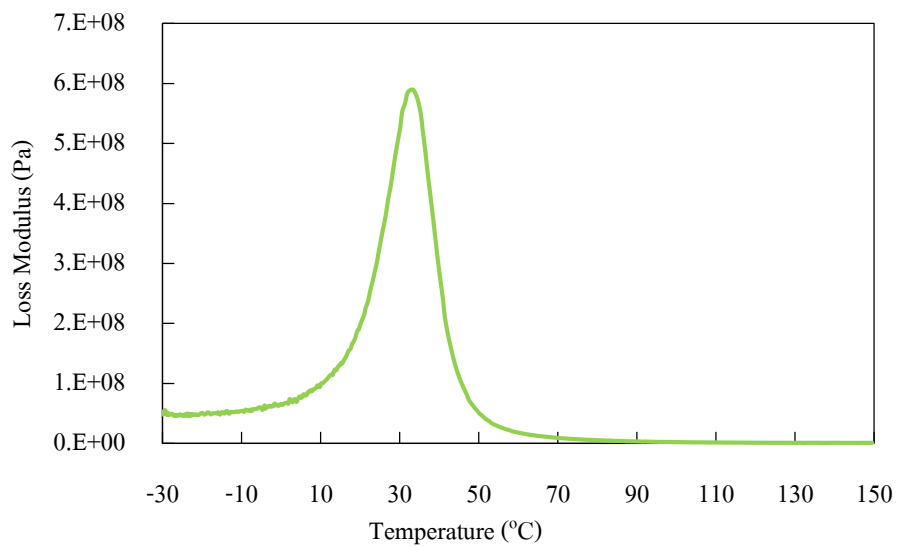
รูปที่ ข.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย-อุณหภูมิของ BaPO 0 phr_40 min



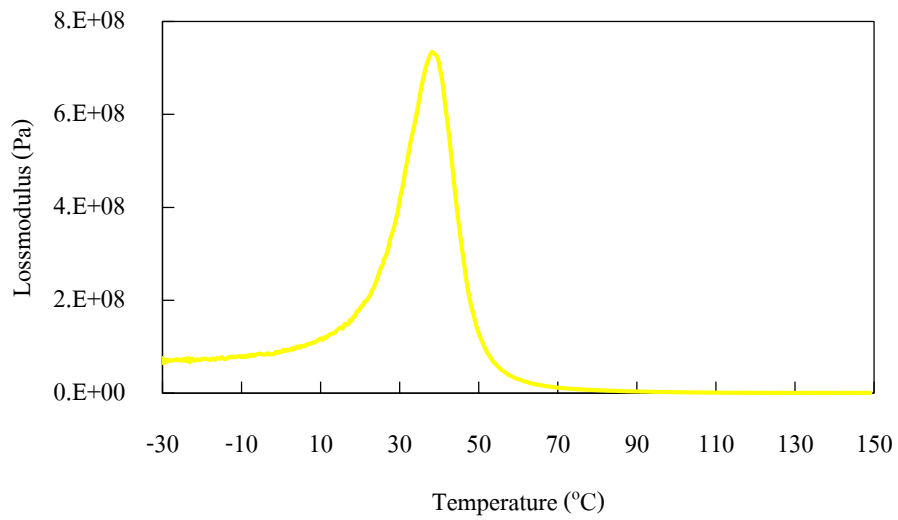
รูปที่ ข.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย-อุณหภูมิของ BaPO 0 phr_40 min(1 hr)



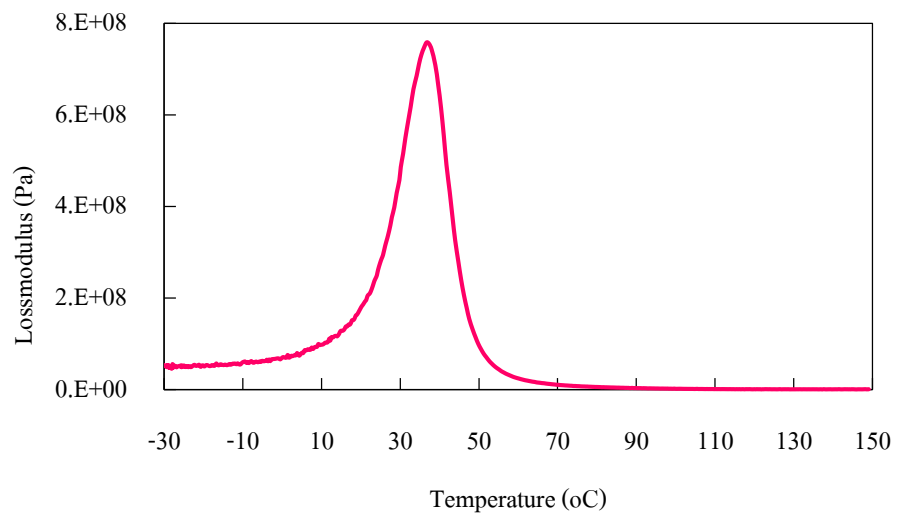
รูปที่ ข.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย-อุณหภูมิของ BaPO 3 phr_40 min



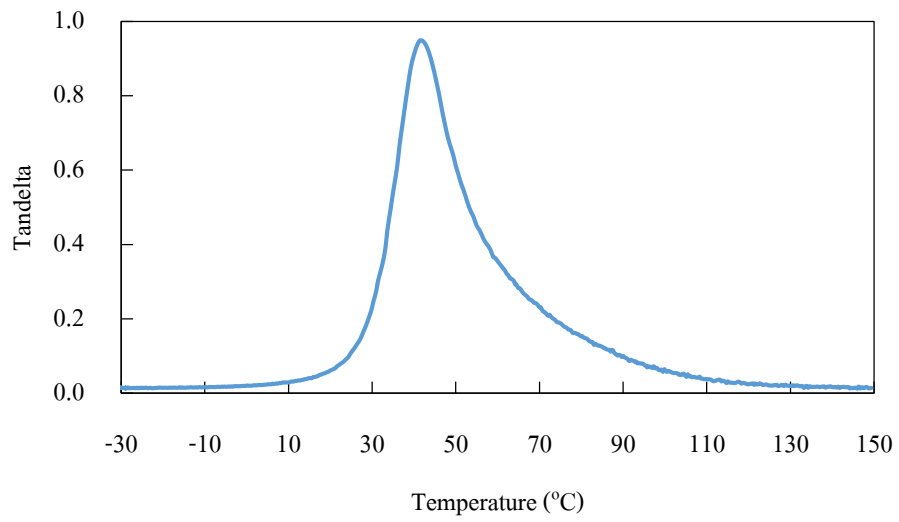
รูปที่ ข.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย-อุณหภูมิของ BaPO 3 phr_40 min(1 hr)



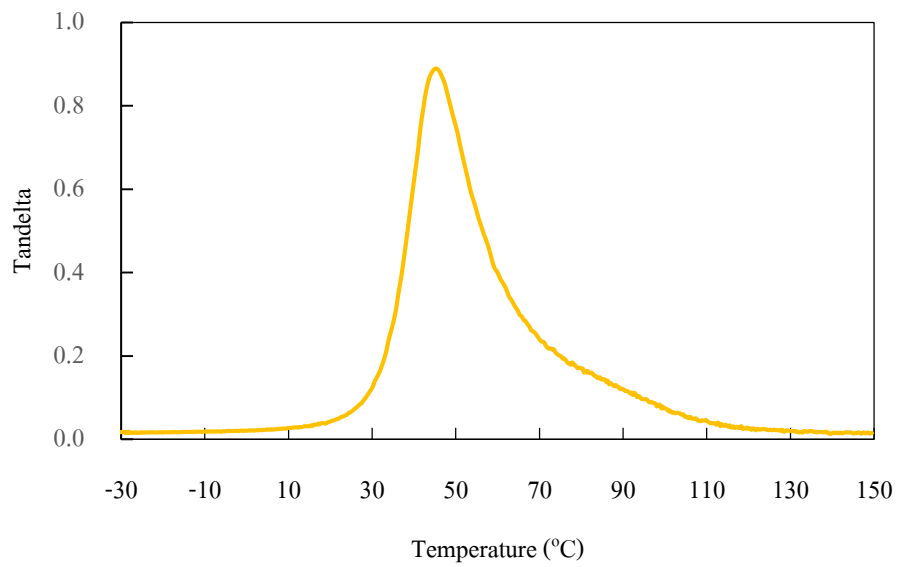
รูปที่ ข.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย-อุณหภูมิของ BaPO 5 phr_40 min



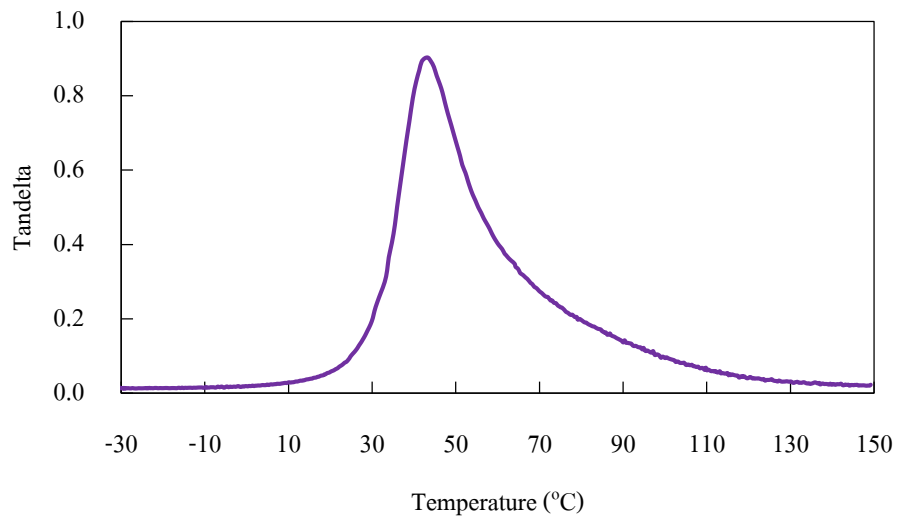
รูปที่ ข.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสีย-อุณหภูมิของ BaPO 5 phr_40 min(1 hr)



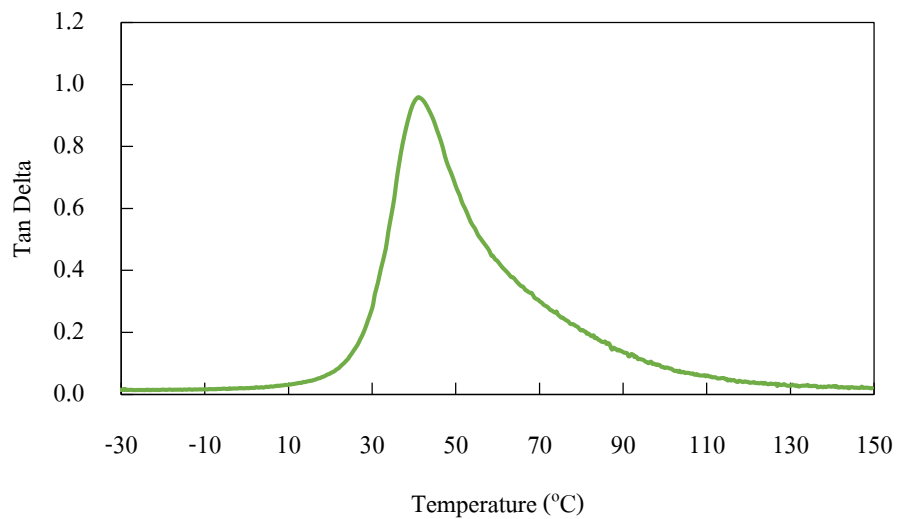
รูปที่ ข.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้า-อุณหภูมิของ BaPO 0 phr_40 min



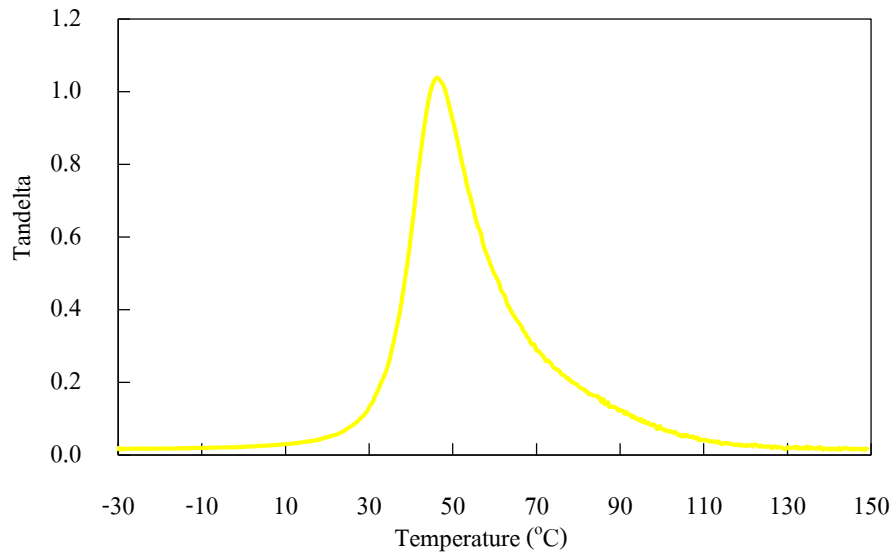
รูปที่ ข.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้า-อุณหภูมิของ BaPO 0 phr_40 min(1 hr)



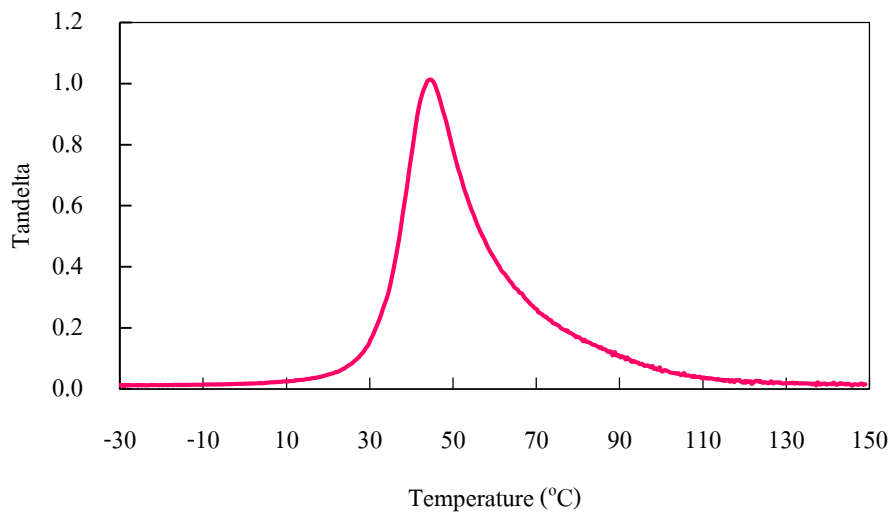
รูปที่ ข.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้า-อุณหภูมิของ BaPO 3 phr_40 min



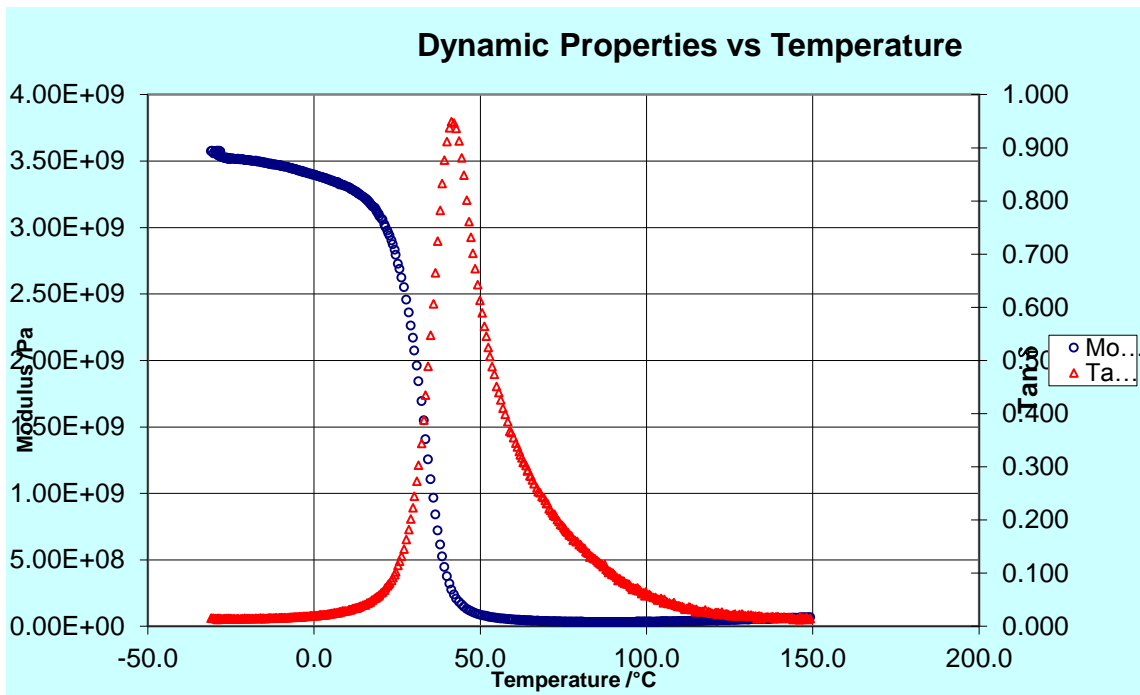
รูปที่ ข.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้า-อุณหภูมิของ BaPO 3 phr_40 min(1 hr)



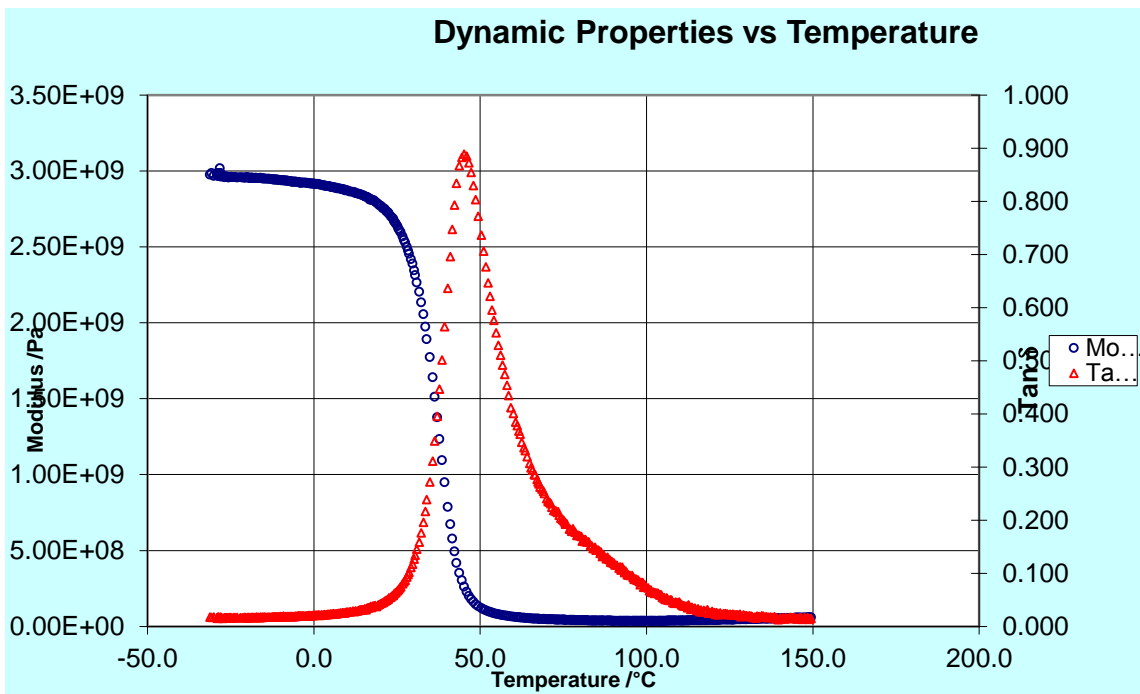
รูปที่ ข.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้า-อุณหภูมิของ BaPO 5 phr_40 min



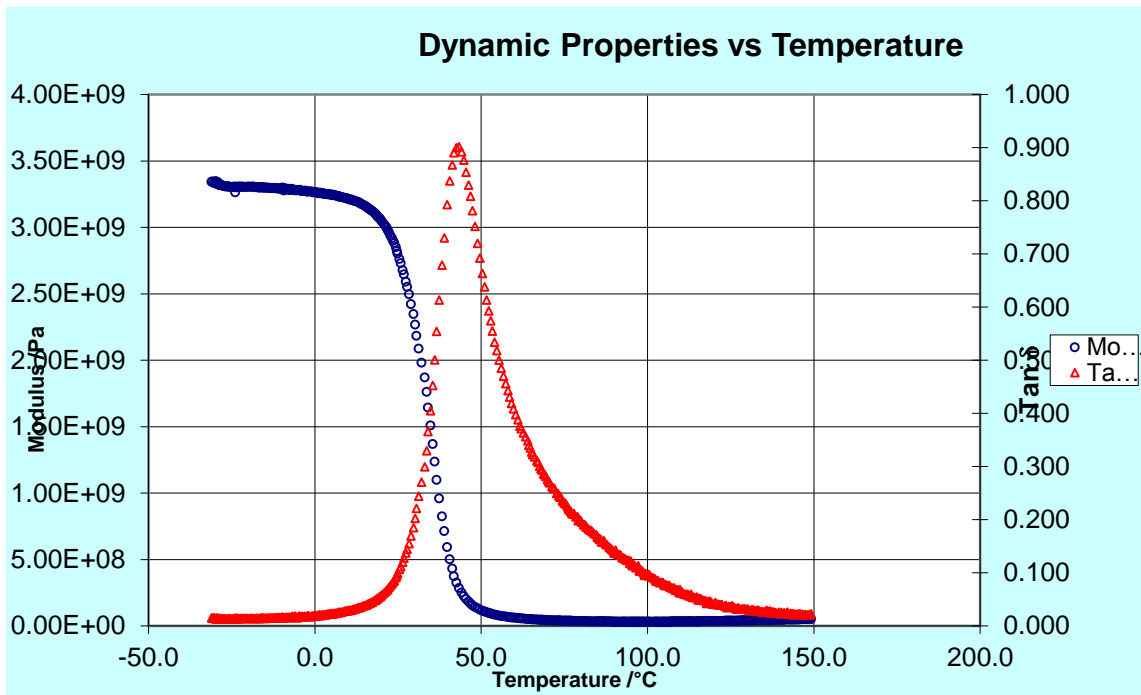
รูปที่ ข.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้า-อุณหภูมิของ BaPO 5 phr_40 min(1 hr)



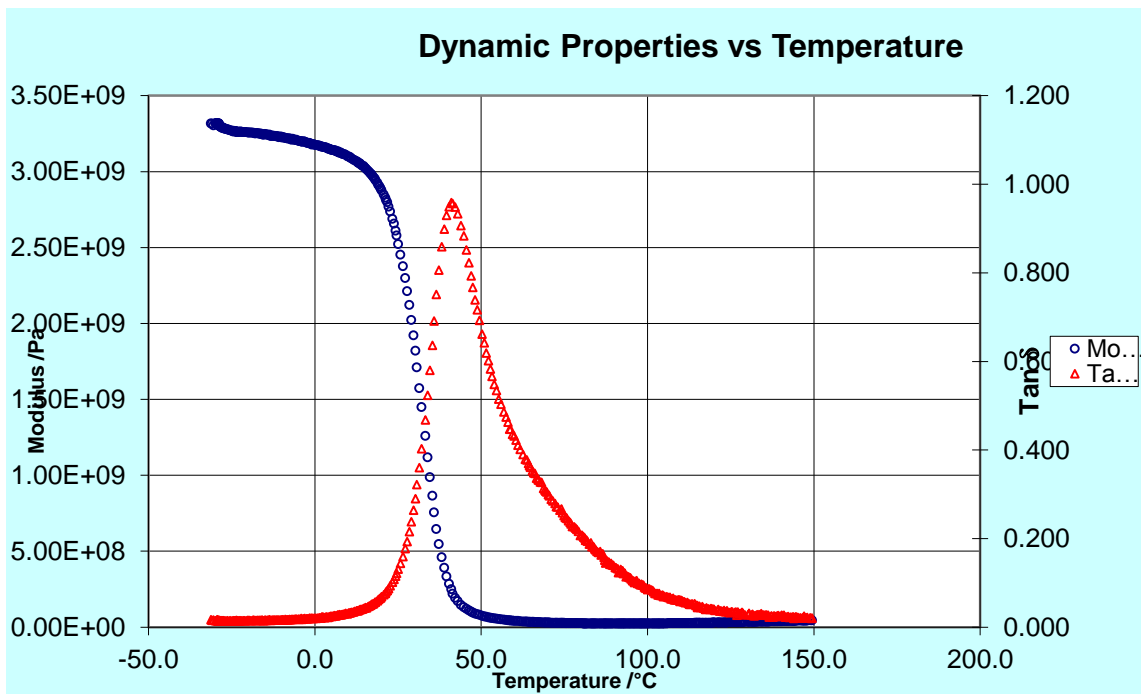
รูปที่ ข.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้าและมอดุลัส-อุณหภูมิของ BAPO 0 phr_40 min



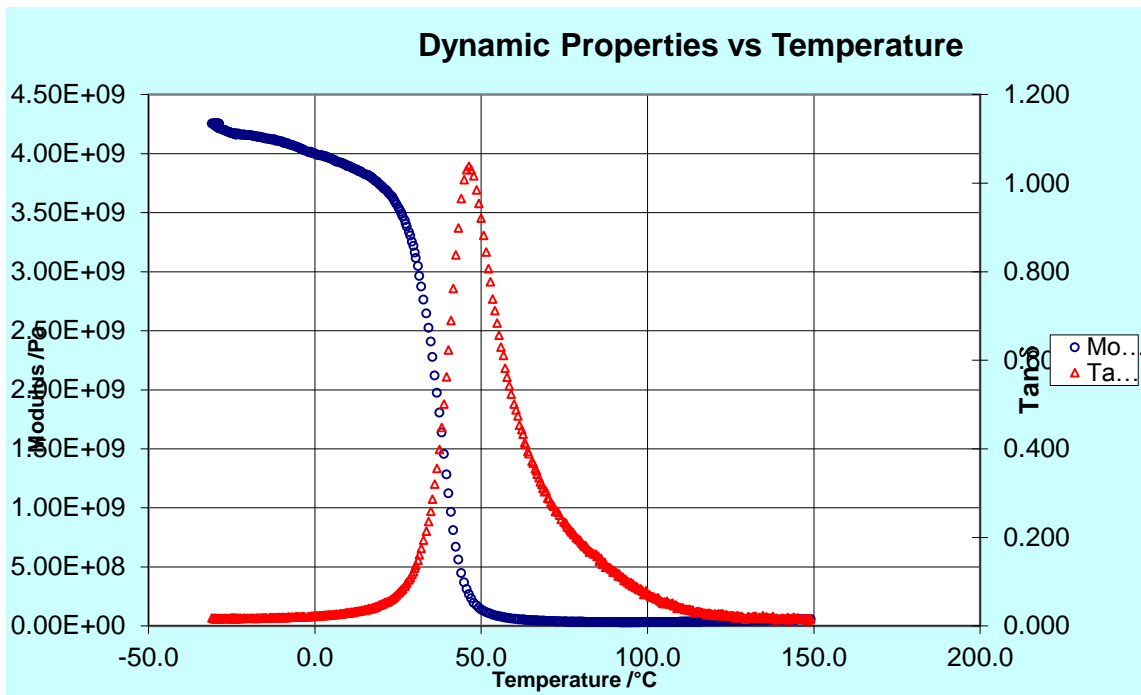
รูปที่ ข.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้าและมอดุลัส-อุณหภูมิของ BAPO 0 phr_40 min (1h)



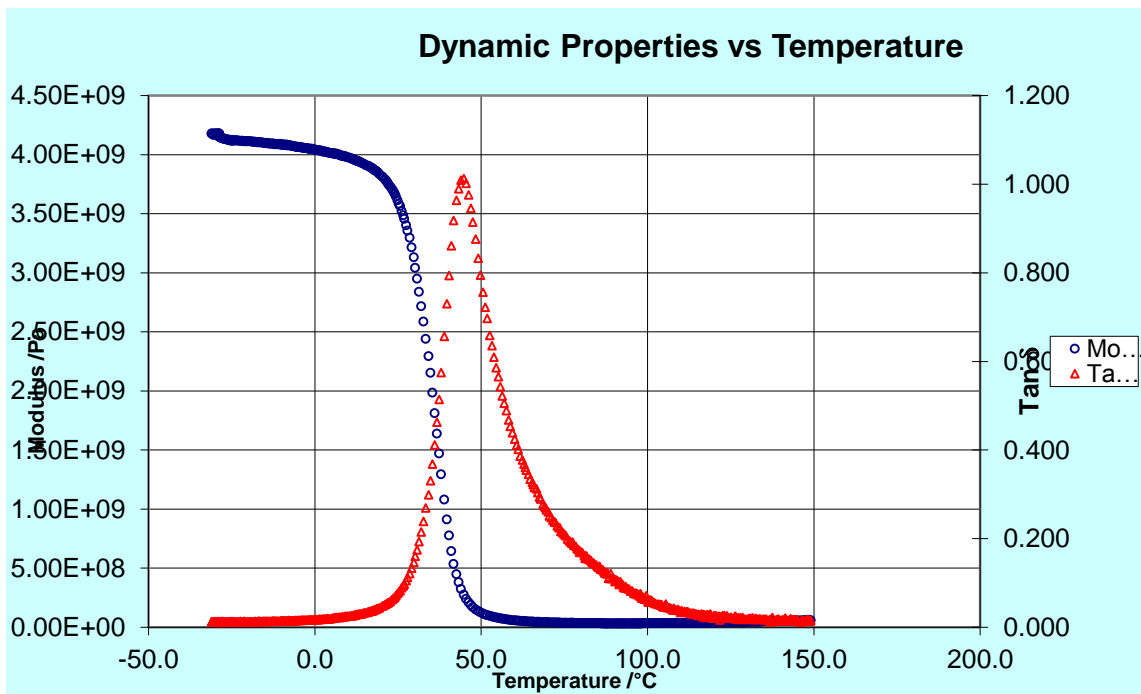
รูปที่ ข.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้าและมอดุลัส-อุณหภูมิของ BAPO 3 phr_40 min



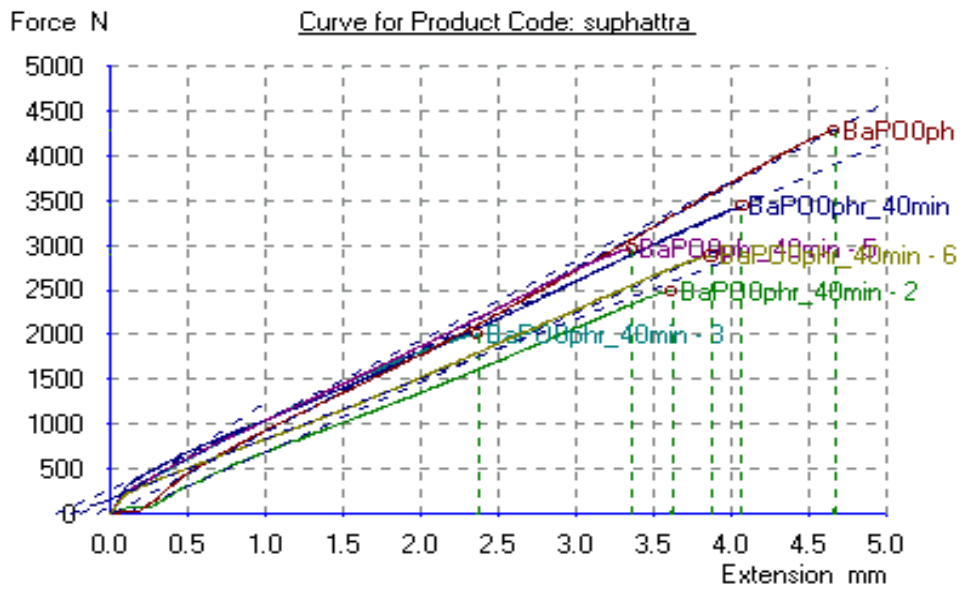
รูปที่ ข.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้าและมอดุลัส-อุณหภูมิของ BAPO 3 phr_40 min(1h)



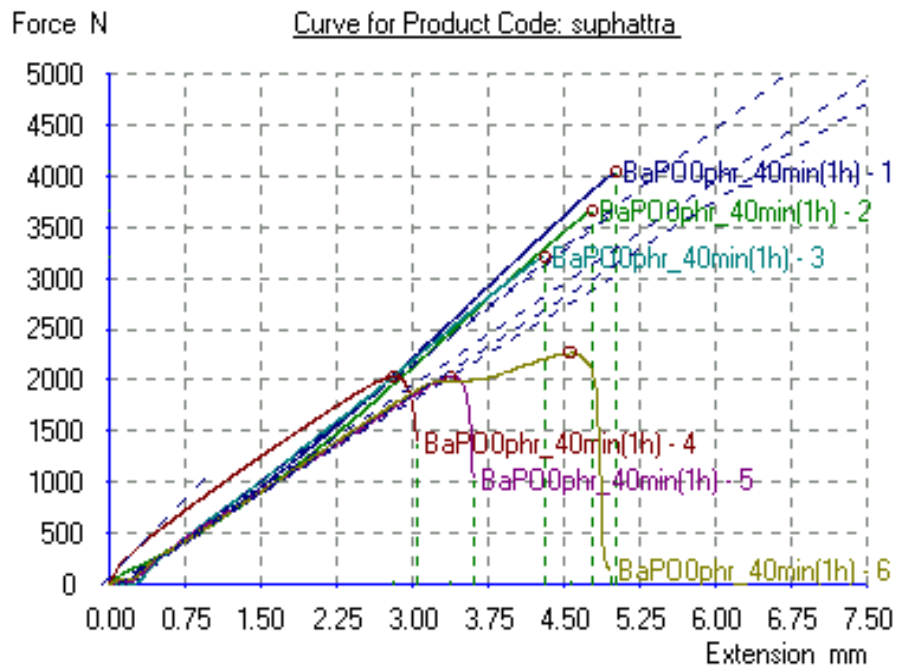
รูปที่ ข.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้าและมอดุลัส-อุณหภูมิของ BAPO 5 phr_40 min



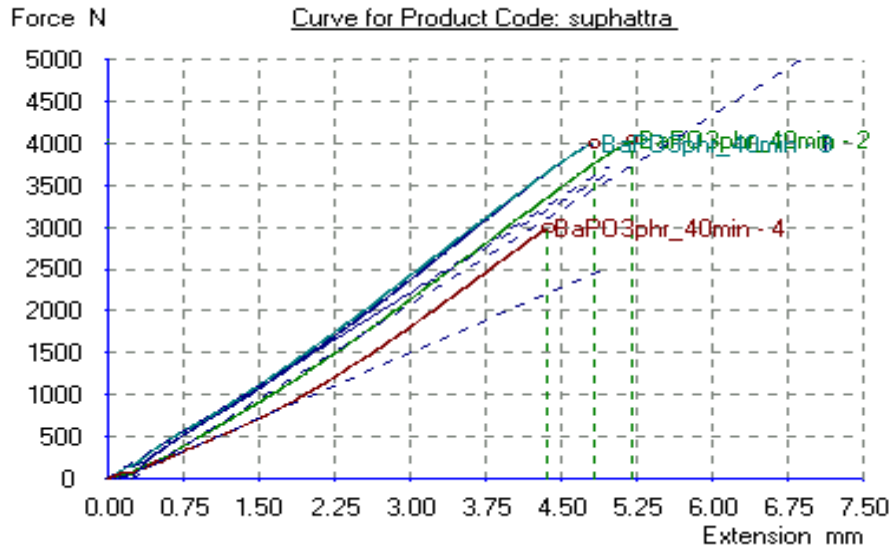
รูปที่ ข.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแทนเดลต้าและมอดุลัส-อุณหภูมิของ BAPO 5 phr_40 min(1h)



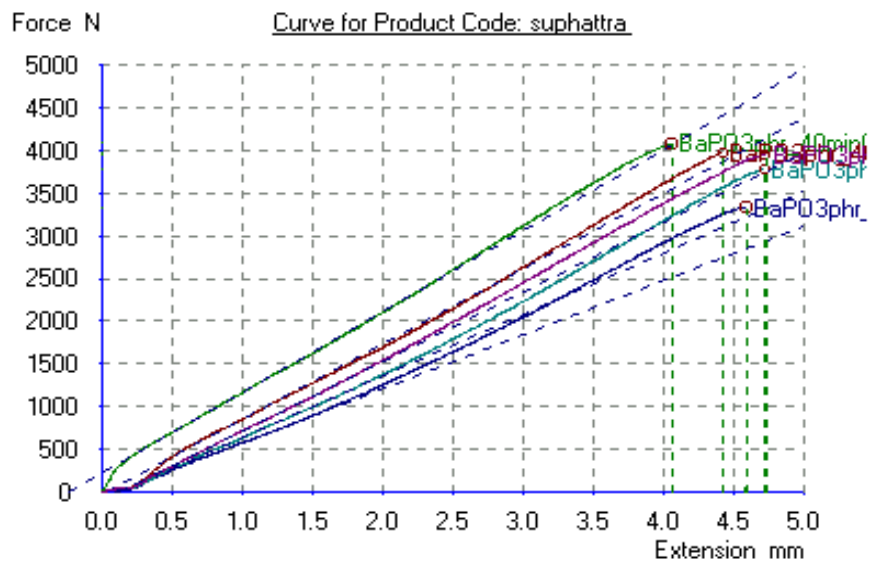
รูปที่ ข.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดตัวของ BAPO 0 phr_40 min



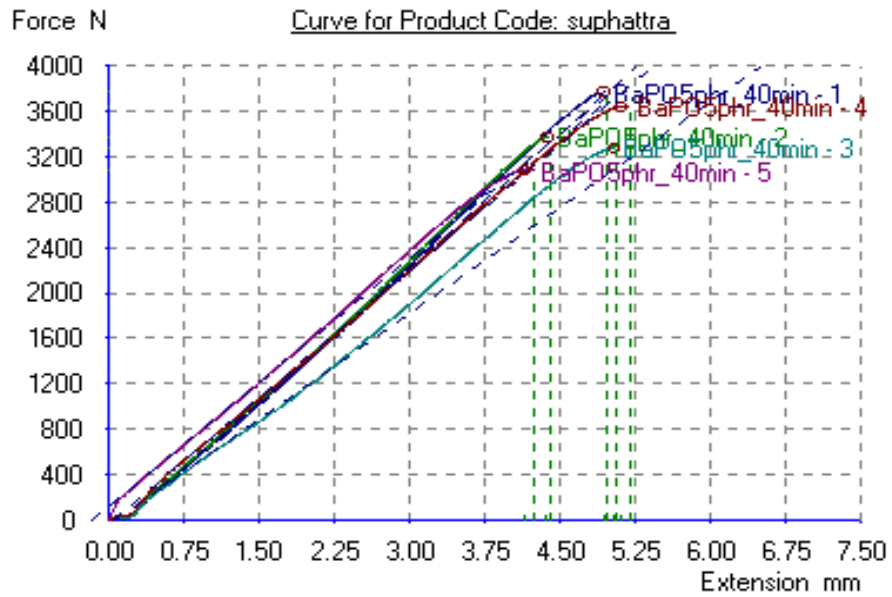
รูปที่ ข.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดตัวของ BAPO 0 phr_40 min(1h)



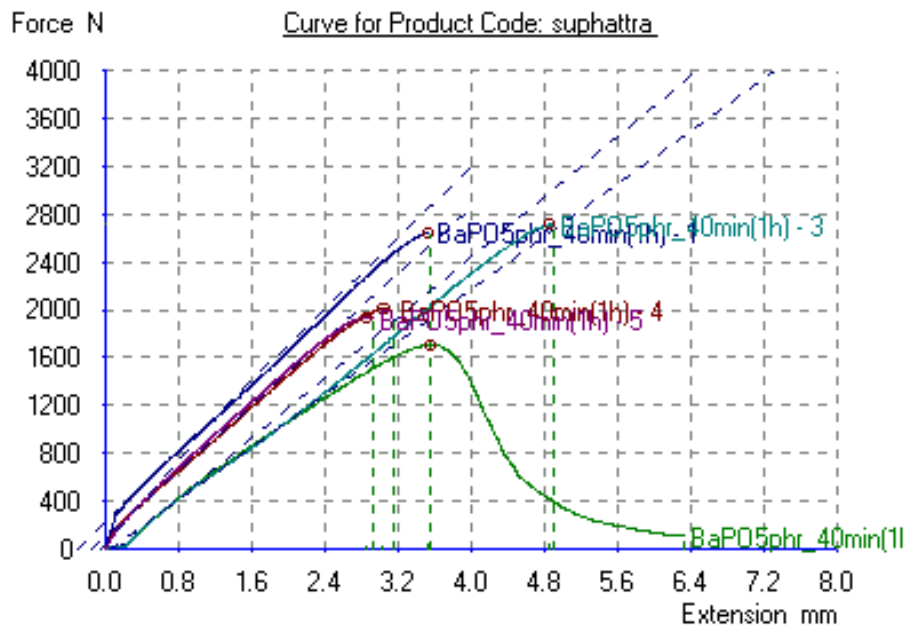
รูปที่ ข.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดตัวของ BAPO 3 phr_40 min



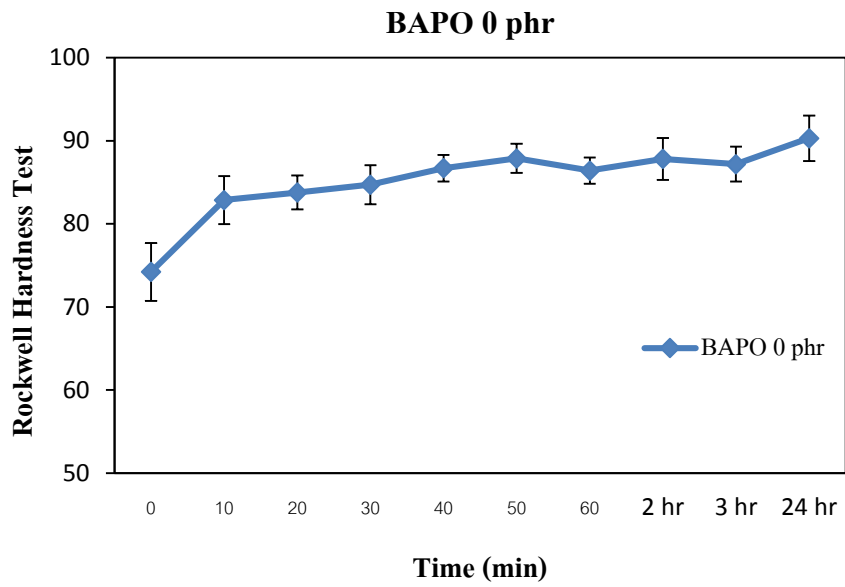
รูปที่ ข.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดตัวของ BAPO 3 phr_40 min(1h)



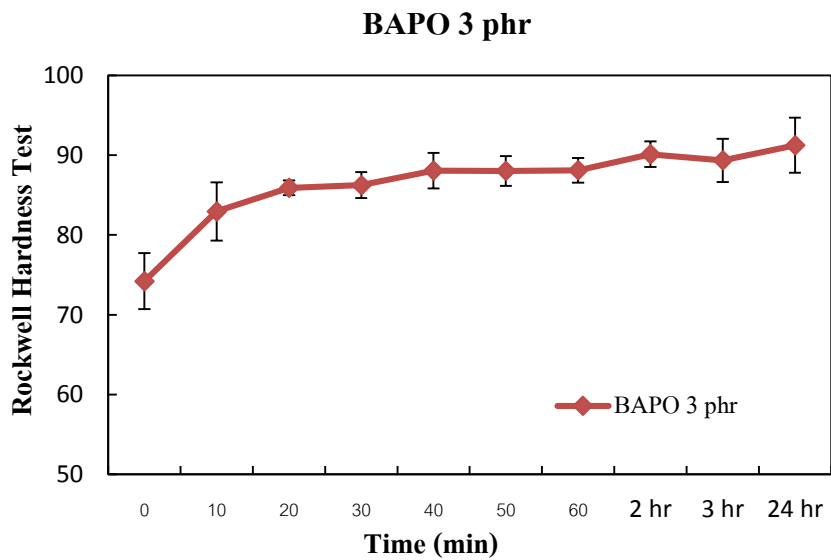
รูปที่ ข.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดตัวของ BAPO 5 phr_40 min



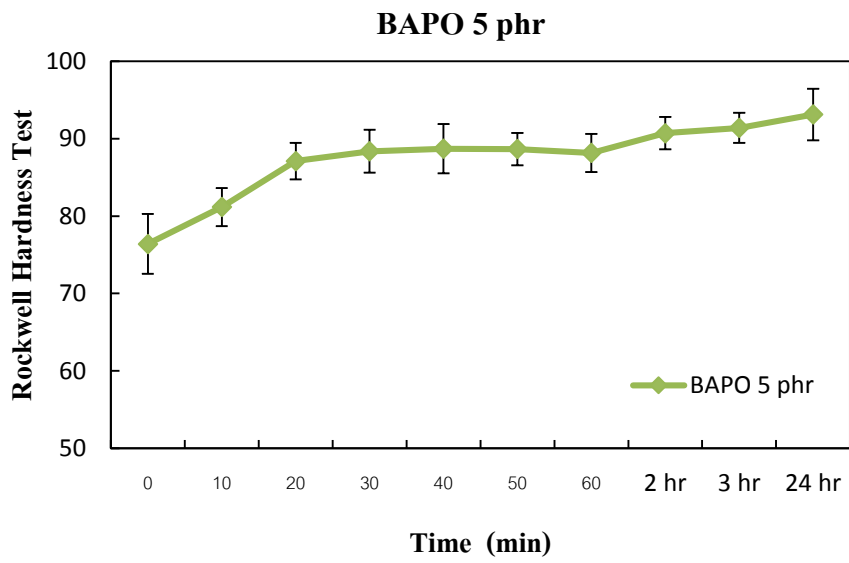
รูปที่ ข.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดตัวของ BAPO 5 phr_40 min(1h)



รูปที่ ข.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาของอัตราส่วน BAPO 0 phr



รูปที่ ข.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาของอัตราส่วน BAPO 3 phr



รูปที่ ข.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาของอัตราส่วน BAPO 5 phr

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

นวัตกรรมอุตสาหกรรมไทยก้าวไกลสู่ประชาคมโลก

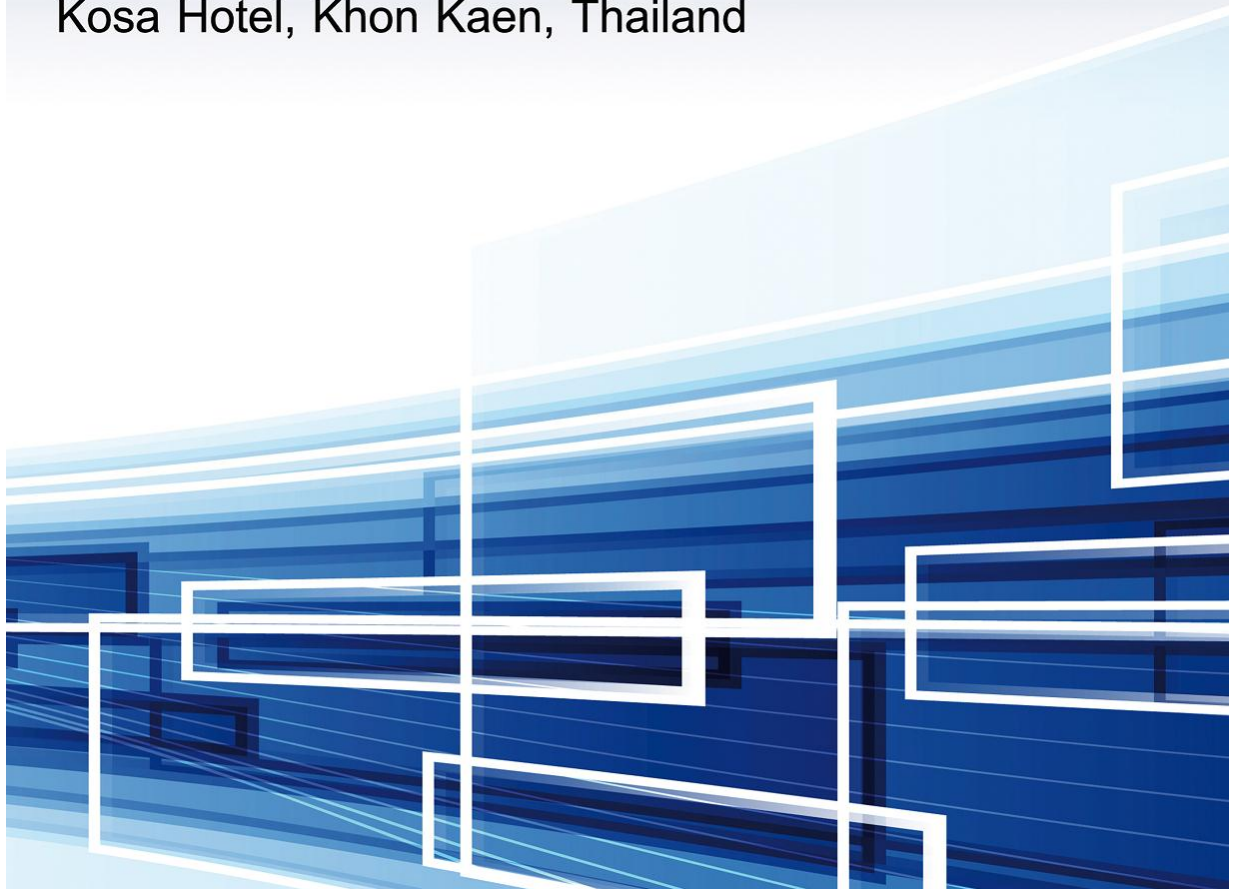
PROCEEDINGS IE Network 2016 Conference



Local Industrial Innovations
for Global Community

July 7-8, 2016

Kosa Hotel, Khon Kaen, Thailand



สาขาวิชาในการประชุม

- Operations Research
- Production and Operation Management
- Work Study, Plant Layout, Ergonomic, Safety Management
- Quality Engineering
- Energy Management
- Green and Sustainability in Industrial Engineering
- Materials and Manufacturing Engineering
- Supply Chain and Logistics
- Innovation Management, Industrial Technology Transfer
- Engineering Management
- Maintenance and Reliability Engineering
- Others Related to Industrial Engineering and Innovation

ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ศรีสุภานนท์
รองศาสตราจารย์ ดร.อำพล การณสุนทวงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา วสุศรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี เปรมานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี เปรมานนท์
อาจารย์ สุทธิพงษ์ โสภา

รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ ชูติมา
รองศาสตราจารย์ สันติรัฐ นันสะอาจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา วัฒนากา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล มณฑาทิพย์กุล
อาจารย์ ดร.ปรัชญา เพ็ญสุระ
อาจารย์ แบงค์ งามอรุณโชติ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.ก้องกิติ พุสสวัสดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย กานตานันทะ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ สุพิทักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรธิภา องค์กรรักษ์
อาจารย์ ดร.วรวิมล หวังวีชรกุล
อาจารย์ ดร.ไอลดา ตริรัตน์ตระกูล
อาจารย์ ดร.ศักดิ์ดา คำจันทร์
อาจารย์ ดร.พีชรา ศรีพระบุญ
อาจารย์ ดร.วรรณภา เนื่องมีจลา
อาจารย์ ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฬา พิษิตลำเค็ญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน
อาจารย์ ดร.พัชรี โตแก้ว ทองรัตน์
อาจารย์ ดร.เชษฐา ชำนาญหล่อ
อาจารย์ ดร.วิโรชา คำจันทร์
อาจารย์ ดร.ชาตินักรบ แสงสว่าง
อาจารย์ สุวิวัฒน์ สืบสานกุล
อาจารย์ ปริญญา พัฒนवलันต์พร

มหาวิทยาลัยมหิดล

รองศาสตราจารย์ ดร.ชะอรลิน สุขศรีวงศ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย นาทะพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บันลือ เอมะรุจิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณชัย ศิริเวธรรณกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ราชบุรีศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ปฐมศิริ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วเรศรา วีระวัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงยศ สุภิกิตย์
อาจารย์ ดร.จิรพรรณ เลี้ยงโรคาพาธ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรธกร เก่งพล
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บันเทิงจิตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยชัย เมื่อกสามัญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์

รองศาสตราจารย์ รัตนา อัครภูมิสุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนารี สุขเสกสรร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิพิถนนท์ พูลสวัสดิ์
อาจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม

มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์ ดร.เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จันทร์ชา นาควชิระตระกูล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อีร์วัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ
อาจารย์ ดร.ฤทธิชัย จันทรส

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนาถ กฤตวรกาญจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ เสรีรัตน์

ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.บุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ธรรมนิวิฐ์

รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์เกียรติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวัสดิ์ ภาวระราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยรัตน์ ตันติไพบูลย์วุฒิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอฬาร กิตติธรรพ์ชัย
อาจารย์ ดร.พิศิษฐ์ จารุมนโรจน์

รองศาสตราจารย์ ดร.ปวีณา เขาวลิตวงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังคณาลิน เสนงันทรธัมมิไชย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประจวบ กล่อมจิตร
อาจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์
อาจารย์ ดร.คณศ พันธุ์สวัสดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์
อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล
รองศาสตราจารย์ ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
อาจารย์ สุริยา จิรสถิตสิน

รองศาสตราจารย์ วนิดา รัตนมณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สงวน ตั้งโพธิธรรม
อาจารย์ ภาคภูมิ ธีรสันติกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ ศรีสุรภานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล มณฑาทิพย์กุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปภัศร ชัยวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัญญา วสุศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อ่ำพล การณสุนทวงษ์
อาจารย์ ดร.วิศิษฐ์ศรี วิยะรัตน์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

รองศาสตราจารย์ ดร. กวิน สนธิเพิ่มพูน
อาจารย์ ดร.ขวัญนิตี คำเมือง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศรีสัจจา วิทยศักดิ์
อาจารย์ วิสาข์ เจ้าสกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์

อาจารย์ ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงศ์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์
อาจารย์ ดร.พิษณุ มั่นสปีติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ลินี สุขกรมใส มอเยอร์
อาจารย์ ศิลปชัย วัฒนเสย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ วรรณศรี
อาจารย์ ดร.อธิวัฒน์ บุญมี

อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ เกื้ออนแก้วสิงห์

ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ

ว่าที่ร้อยตรีจอมภพ ละออง

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อาจารย์ ดร.โรจน์ หอมชาติ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อัญชลี สุพิทักษ์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อาจารย์อรอุมา กอสนาน

มหาวิทยาลัยสยาม

อาจารย์ ชานิดา พิทยานนท์

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย รัตนวงษ์

อาจารย์ ดร.ธรรณินทร์ สัจจวิริยทรัพย์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

อาจารย์ ดร.ทศพร แจ่มใส

อาจารย์ปิยะฉัตร โตอ่อน

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

อาจารย์อำนาจ อมฤก

มหาวิทยาลัยทักษิณ

อาจารย์ ดร.กฤษฎา พัชรสิทธิ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวตล กัญญาคำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

อาจารย์ ดร.ธีรินทร์ คงพันธุ์

อาจารย์ สกิตเทพ สังข์ทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง

อาจารย์ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อาจารย์ พงษ์ศักดิ์ เกิดลาภี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สถาพร จันทร์วี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรกรรินทร์ ฉัตรทอง

บริษัท เอ็มโฟกัส จำกัด

ดร.ปรีชา พันธมสินชัย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร. ศุภชัย ปทุมนากุล

รองศาสตราจารย์ ดร.สมจิตร อาจอินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร. ดนัยพงศ์ เขษมรัฐโชติศักดิ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ขาญณรงค์ สายแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนา ราษฎร์ภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขอังคณา แกล่งกันขันธ์

อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ หอมดี

อาจารย์ ดร. อภิชาติ บุญมา

อาจารย์ ดร.ปนิทัศน์ สุริยธนาภาส

อาจารย์ ดร.ศิริวดี อรัญนารณ

อาจารย์ โกวิท พลหาญ

รองศาสตราจารย์ ดร. พรเทพ ขอบจายเกียรติ

รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา เศรษฐนันท์

รองศาสตราจารย์ ดร. ศีขรินทร์ สุขโต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน พิธีพัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาพจน์ เจริญอภิบาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รักษิณ อัครรุ่งเรืองกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมกฤษ ปิติฤกษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิวัฒน์ เหล่านภากุล

อาจารย์ ดร.ธรรณรัตน์ นิยะโมสถ

อาจารย์ ดร.อาทิตย์ อภิโชติธนกุล

อาจารย์ ทวี นาครัชตะอมร

กำหนดการประชุม

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2559 (IE Network Conference 2016)

ระหว่างวันที่ 6-8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 ณ โรงแรมโฆษะ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

วันพุธที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

15.00 น.	18.00 น.	ลงทะเบียน
15.30 น.	17.00 น.	ประชุมสามัญหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
18.00 น.	20.00 น.	งานเลี้ยงต้อนรับ (Welcome Party)
10:45 น.	11:00 น.	รับประทานอาหารว่าง

วันพฤหัสบดีที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

08.00 น.	09.00 น.	ลงทะเบียน
09.00 น.	09.45 น.	พิธีเปิดการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2559 - กล่าวต้อนรับ และรายงานการจัดประชุมวิชาการฯ โดย ผศ.ดร.ปณิธาน ทรัพย์พัฒนา หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม - กล่าวเปิดการประชุมวิชาการฯ โดย ศ.ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัชร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
09.45 น.	10.45 น.	การบรรยายพิเศษ โดย คุณวันดี เต๋โหลสิฐพงษ์ ประธานเจ้าหน้าที่บริหาร บริษัท เบทาโกร จำกัด (มหาชน)
10.45 น.	11.00 น.	รับประทานอาหารว่าง
11.00 น.	12.00 น.	การบรรยายพิเศษ โดย คุณโชคชัย สุขสิงห์ ผู้ช่วยกรรมการผู้อำนวยการใหญ่ บริษัท ไทยเบฟเวอเรจ จำกัด (มหาชน)
12.00 น.	13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน

Parallel Session 1									
Room	ห้องกรีนA	ห้องกรีนB	มงกุฎหยก	มงกุฎทับทิม	มงกุฎแก้ว	มงกุฎเงิน	มงกุฎทอง	มงกุฎนาก	
Topic	Materials and Manufacturing Engineering	Materials and Manufacturing Engineering	Operations Research	Quality Engineering	Work Study, Plant Layout, Ergonomic, Safety Management	Supply Chain and Logistics	Engineering Management	Engineering Management + Other Related	
13:00 น.	13:15 น.	15	165	14	18	6	9	8	4
13:15 น.	13:30 น.	16	173	53	43	57	11	25	157
13:30 น.	13:45 น.	22	178	83	45	72	63	70	168
13:45 น.	14:00 น.	24	182	85	48	75	97	95	210
14:00 น.	14:15 น.	26	192	87	105	234	130	101	235
14:15 น.	14:30 น.	28	207	127	107	324	246	245	372
14:30 น.	14:45 น.	96	212	206	155	430	302	407	64
14:45 น.	15:00 น.	374	298	422	348	439	404	425	412
15:00 น.	15:15 น.	รับประทานอาหารว่าง							

กำหนดการประชุม

วันพฤหัสบดีที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 (ต่อ)

Parallel Session 2									
Room	ห้องกรีนA	ห้องกรีนB	มงกุฎหยก	มงกุฎทับทิม	มงกุฎแก้ว	มงกุฎเงิน	มงกุฎทอง	มงกุฎนาก	
Topic	Materials and Manufacturing Engineering	Materials and Manufacturing Engineering	Operations Research	Maintenance and Reliability Engineering	Work Study, Plant Layout, Ergonomic, Safety Management	Production and Operation Management	Engineering Management	Others Related to Industrial Engineering and Innovation	
15:15 น. - 15:30 น.	31	78	133	118	12	121	103	49	
15:30 น. - 15:45 น.	36	223	134	120	77	143	106	98	
15:45 น. - 16:00 น.	41	276	321	136	89	329	111	129	
16:00 น. - 16:15 น.	66	277	327	138	93	333	249	153	
16:15 น. - 16:30 น.	68	370	342	198	94	336	263	142	
16:30 น. - 16:45 น.	69	395	437	203	175	367	280	145	
16:45 น. - 17:00 น.	426	401	445	418	308	421	301	423	
18:30 น. - 22:00 น.	งานเลี้ยงรับรองผู้เข้าร่วมประชุม IE Network 2016 และพิธีมอบงานประชุมวิชาการ IE Network								

วันศุกร์ที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

Parallel Session 3									
Room	ห้องกรีนA	ห้องกรีนB	มงกุฎหยก	มงกุฎทับทิม	มงกุฎแก้ว	มงกุฎเงิน	มงกุฎทอง	มงกุฎนาก	
Topic	Materials and Manufacturing Engineering	Energy Management, Innovation Management	Work Study, Plant Layout, Ergonomic, Safety Management	Work Study, Plant Layout, Ergonomic, Safety Management	Production and Operation Management	Production and Operation Management	Supply Chain and Logistics	Engineering Management	
8:30 น. - 8:45 น.	27	91	13	147	21	151	253	196	
8:45 น. - 9:00 น.	123	115	34	174	30	152	275	205	
9:00 น. - 9:15 น.	126	236	50	396	37	160	284	350	
9:15 น. - 9:30 น.	137	261	139	176	42	170	326	393	
9:30 น. - 9:45 น.	162	273	140	180	44	171	330	397	
9:45 น. - 10:00 น.	259	247	146	187	62	229	340	416	
10:00 น. - 10:15 น.	270	349	222	268	65	411	383	452	
10:15 น. - 10:30 น.	รับประทานอาหารว่าง								

กำหนดการประชุม

วันศุกร์ที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 (ต่อ)

Parallel Session 4									
Room	ห้องกรีนA	ห้องกรีนB	มงกุฎหยก	มงกุฎทับทิม	มงกุฎแก้ว	มงกุฎเงิน	มงกุฎทอง	มงกุฎนาก	
Topic	Materials and Manufacturing Engineering	Materials and Manufacturing Engineering	Operations Research	Quality Engineering	Work Study, Plant Layout, Ergonomic, Safety Management	Production and Operation Management	Supply Chain and Logistics	Maintenance and Reliability Engineering	
10:30 น. - 10:45 น.	71	135	102	219	23	154	116	169	
10:45 น. - 11:00 น.	406	239	108	279	40	163	128	185	
11:00 น. - 11:15 น.	267	300	110	59	167	380	352	286	
11:15 น. - 11:30 น.	269	304	368	124	337	384	390	398	
11:30 น. - 11:45 น.	319	371	429	148	358	385	432	399	
11:45 น. - 12:00 น.	323	377	449	419	440	149	435	415	
12:00 น. - 13:00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน								

Parallel Session 5									
Room	ห้องกรีนA	ห้องกรีนB	มงกุฎหยก	มงกุฎทับทิม	มงกุฎแก้ว	มงกุฎเงิน	มงกุฎทอง	มงกุฎนาก	
Topic	Materials and Manufacturing Engineering	Materials and Manufacturing Engineering	Green and Sustainability in Industrial Engineering	Quality Engineering	Work Study, Plant Layout, Ergonomic, Safety Management	Production and Operation Management	Production and Operation Management	Others Related to Industrial Engineering and Innovation	
13:00 น. - 13:15 น.	150	201	99	197	35	47	202	82	
13:15 น. - 13:30 น.	189	215	172	200	114	67	231	213	
13:30 น. - 13:45 น.	208	271	224	211	119	74	227	241	
13:45 น. - 14:00 น.	278	272	232	225	287	79	255	320	
14:00 น. - 14:15 น.	221	378	295	251	291	80	303	347	
14:15 น. - 14:30 น.	226	391	331	252	297	100	307	351	
14:30 น. - 14:45 น.	299	394	345	313	413	382	362	402	
14:45 น. - 15:00 น.	242	84	436	335	417	433	428	414	
15:00 น. - 15:15 น.	รับประทานอาหารว่าง								

Parallel Session 6									
Room	ห้องกรีนA	ห้องกรีนB	มงกุฎหยก	มงกุฎทับทิม	มงกุฎแก้ว	มงกุฎเงิน	มงกุฎทอง	มงกุฎนาก	
Topic	Materials and Manufacturing Engineering	Materials and Manufacturing Engineering	Supply Chain and Logistics	Quality Engineering	Others Related to Industrial Engineering and Innovation	Production and Operation Management	Production and Operation Management		
15:15 น. - 15:30 น.	237	408	60	81	86	191	76		
15:30 น. - 15:45 น.	256	409	61	392	132	193	288		
15:45 น. - 16:00 น.	257	431	434	446	216	194	290		
16:00 น. - 16:15 น.	281	450	441	447	233	322	373		
16:15 น. - 16:30 น.	355	451	453		318	365			

Topic:	Materials and Manufacturing Engineering (ต่อ)	หน้า
ID_135	การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงดรอปีตในงานลากขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมมาตรโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	1174
ID_137	การลดของเสียฟองอากาศในกระบวนการหล่อเหล็กเหนียวในแบบหล่อทราย	1180
ID_150	การลดของเสียหดตัวในกระบวนการหล่อเหล็กเหนียวในแบบหล่อทราย	1185
ID_162	การศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอไมด์ 6 ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยการเติมสารควบคู่ 3-Aminopropyltriethoxy Silane	1190
ID_165	การสร้างโครงสร้างไมโครเอสยู-เอชด้วยหน้ากากเงินโดยการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอน	1195
ID_173	พฤติกรรมการสึกหรอของสตีล 12 เชื่อมพอกบนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิคเกรด 304 โดยกระบวนการเชื่อมแบบเชื่อมอาร์กลดเชื่อมใส่ฟลักซ์	1200
ID_178	การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแพ็คคาร์เบอร์โรซิงโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาจากผงหินปูน สำหรับการชุบแข็งมีดตัดอ้อย	1205
ID_182	การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อ Effective case depth ด้วยการออกแบบการทดลองของการชุบแข็งผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการแพ็คคาร์เบอร์โรซิง	1211
ID_189	พฤติกรรมการสึกหรอแบบจุดขีดของลวดเชื่อมพอกผิวแข็งสตีล 12 ในกระบวนการเชื่อม GMAW	1217
ID_192	Creation new generation of bimodal structure metallic materials by Powder Metallurgy Route	1223
ID_201	โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมพูนขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผง โดยใช้เกลือเป็นวัสดุแทนที่รูพูน	1227
ID_207	การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและลดของเสียกระบวนการผลิตท่อคอนกรีต เสริมเหล็กแบบปากลิ้นราง โดยใช้หลักการการควบคุมคุณภาพ	1233
ID_208	ผลของตัวแปรในกระบวนการเชื่อม SMAW ต่อความต้านทานการสึกกร่อนของลวดเชื่อม ENICrMo-5	1238
ID_212	ผลกระทบของปัจจัยในการประเมินวัดความสะอาดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยวิธีการทดสอบ เค-โมลด์	1244
ID_215	อิทธิพลของทองแดงต่อวิวัฒนาการโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมระหว่างการบด	1251
ID_221	อิทธิพลของแก๊สผสมที่ส่งผลต่อการหลอมลิกของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสปกคลุม	1257
ID_223	การพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 2024 โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง	1263
ID_226	ผลกระทบด้านการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากเฟสเดลต้าเฟอไรท์ ในบริเวณแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก	1271
ID_237	การลดของเสียในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	1277
ID_239	การลดตำหนิในกระบวนการเคลือบวาร์นิชยูวีบนบรรจุภัณฑ์กระดาษ	1282
ID_242	การศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนในอะลูมิเนียมเหลวของโรเตอร์ที่เคลือบด้วยสารประกอบอะลูมิเนียมแบบสเลอรี	1289
ID_256	การเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนจากแร่โอลิเมนไนท์ธรรมชาติของไทยเพื่อเป็นแผ่นดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1295
ID_257	การเตรียมแผ่นดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วัสดุรีไซเคิล HDPE และวัสดุไมโครจากแร่ไทย	1300
ID_259	กระบวนการเชื่อมก๊าซทั้งสแตนอาร์คแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด	1306
ID_267	ผลกระทบของการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อพฤติกรรมการบ่มสุกของอีพ็อกซีคอมโพสิต	1313
ID_269	The Influence of Flow Forming Parameters on the Quality of AISI4130 Steel	1319
ID_270	อิทธิพลของผงออกไซด์ต่อการซึมลิกของแนวเชื่อมและสมบัติทางกลของ AISI 2205 และ SS400 ด้วยการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม	1325



ผลกระทบของการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตต่อพฤติกรรมการบ่มสุก
ของอีพ็อกซีคอมโพสิต
The effect of Ultraviolet-A Activation on Curing Behavior
of Epoxy Composite

สุพัตรา อ่างสมบุญ¹ วรณศิริ จักรบุตร¹ และ กุลวดี สังข์สนธิ^{1,*}
¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: kullawadee.s@en.rmutt.ac.th*

Suphattra Angsomboon¹ Waroonsiri Jakarbutr¹ and Kullawadee Sungsanit^{1,*}
¹Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
E-mail: kullawadee.s@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีส่วนใหญ่มักใช้ความร้อนเพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการบ่มสุก ซึ่งมักพบข้อบกพร่องหลายอย่างที่ผลิตภัณฑ์อันเกิดมาจากความร้อนและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานเกินไป ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการบ่มสุกของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี โดยทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดบิสเอซิลฟอสฟีนออกไซด์ ที่อัตราส่วนผสม 3.0 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนักเรซิน โดยเรซินได้ผ่านการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ เป็นเวลา 0 2 และ 4 นาที ตามลำดับ โดยอุณหภูมิในการบ่มสุก คือ 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณและอัตราการเกิดปฏิกิริยาบ่มสุกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมีทรี จากการศึกษาพบว่า การกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ เป็นเวลา 2 นาที ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพียง 3.0 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนักเรซิน และที่อุณหภูมิการบ่มสุก 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการบ่มสุก 40 นาทีที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 6,535 มิลลิจูล และมีการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพียงพอที่จะนำมาปรับใช้จริงในภาคอุตสาหกรรม โดยจะเห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ กับวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีสามารถช่วยลดระยะเวลาในการบ่มสุก และยังเป็นทางเลือกพลังงานความร้อนที่ใช้อีกด้วย

คำหลัก วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี, ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง, รังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ

Abstract

Most of epoxy composites were cured by heating processing that probably found many defects from overheat and take long period reaction. Finally this investigation propose to study the curing behavior of epoxy composites by addition of photoinitiator catalyse type (Bisacyl Phosphine Oxide, BaPO) in content of 3.0 part per hundred of resin (phr). The resin has been irradiated by ultraviolet radiation type A at 0, 2 and 4 minutes respectively. Then Differential scanning calorimetry (DSC) was used for characterization isothermal curing at 80 100 and 120°C was carry out.. The study found that stimulate reaction with type-A-ultraviolet radiation for 2 minutes, the photoinitiator catalysis (BaPO) quantity just 3.0 phr and curing temperature at 100 (°C). At the curing time 40 minutes the reaction rate is approximately 6535 mJ and generate crosslink about 75%. That it enough to be adapted for used in the industry because photoinitiator can be activate by UV-A for epoxy composite material to reduce the curing time cycle time and reduces the thermal energy.

Keywords: Epoxy composite, photoinitiator catalysis, type-A-ultraviolet radiation



1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี (Epoxy Composite) มีการพัฒนาและนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีสามารถออกแบบให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานที่ต้องการ วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีจึงเป็นวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่ที่มีความนิยมเนื่องจากมีความแข็งแรง มีความคงทนต่อสภาพอากาศ ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี และที่สำคัญมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุทั่วไป จากคุณสมบัติข้างต้นวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในงานทางด้านภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกาว, อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมการพิมพ์ โดยส่วนใหญ่ในกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีนั้นจะใช้วิธีการบ่ม (Cure) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่จากการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง หรือการนำไปอบที่อุณหภูมิสูงอยู่ในช่วง 80-150 องศาเซลเซียส ประมาณ 2-4 ชั่วโมง [1] (ซึ่งวิธีการเหล่านี้ทำให้ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานและผลิตภัณฑ์อาจได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อน (Thermal Degradation) ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้อุณหภูมิหรือมีสมบัติทางด้านการใช้งานที่ด้อยลง ซึ่งรวมไปถึงใช้เวลานานในกระบวนการผลิต [2] จากปัญหาที่พบข้างต้นนี้ จึงได้ทำการศึกษาวิธีการที่ลดระยะเวลาในการผลิตซึ่งพบว่าการกระตุ้นปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นเร็วขึ้นนั้น ทำได้โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงลงในเรซิน และใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในระยะเวลาอันสั้น [3][4]

ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการบ่มสุก (Curing) ของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี โดยทำการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photoinitiator) ที่กระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ เพื่อช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการผลิต

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

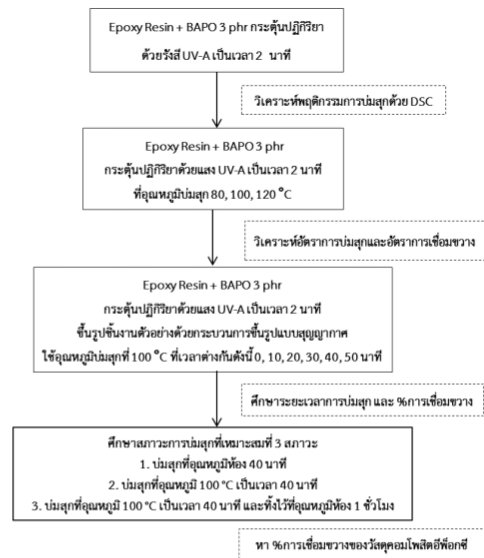
อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) รหัส ML 3564 และสารทำให้แข็ง (Hardener) รหัส HY 3968 จากบริษัท Golden Gate Chemical Co., Ltd ทำการเติมด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Bis Acyl Phosphine (BAPO) รหัส IRGCURE 819 จากบริษัท Ciba Specialty Chemicals ซึ่งทำการกระตุ้นด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ (UV-A) รหัส OSRMA 300 W จากบริษัท ccs successproducts Co., Ltd และทำการเสริมแรงด้วยเส้น

ใยแก้วชนิด E-glass Fiber เกรด EMC 300-1040 บริษัท Wah Tech Ind. Co., Ltd

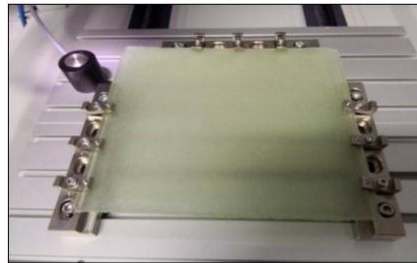
2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การผสมอีพ็อกซีเรซินกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ทำได้โดยการนำเอาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง BAPO ที่อัตราส่วนผสม 3.0 ส่วนต่อร้อยละส่วนโดยน้ำหนักเรซิน มาละลายเข้ากับ Hardener ก่อน แล้วจึงนำมาผสมเข้ากับอีพ็อกซีเรซินก่อนนำไปกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ (UV-A) เป็นเวลา 0 2 และ 4 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำมาขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างทดสอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Vacuum Bag) ซึ่งใช้แรงดันประมาณ 760 มิลลิเมตรปรอท ในการดูดอีพ็อกซีเรซินเข้าไปในระบบสุญญากาศ ที่มีใยแก้วเป็นตัวดูดซับเนื้อเรซินไว้ [5] จากนั้นนำไปอบให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิในการบ่มสุกที่แตกต่างกัน คือ 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถหาเวลาที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาและวิเคราะห์หาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการบ่มสุกได้จากเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ชิ้นงานแผ่นตัวอย่างที่ได้จะมีขนาดความกว้าง 200 mm ยาว 200 mm หนา 3 mm ดังรูปที่ 2

2.2.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน



รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบสูญญากาศ

2.3 ทดสอบสมบัติทางความร้อน

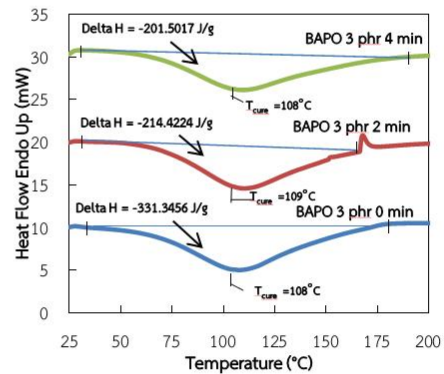
ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนเพื่อหาปริมาณพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลและหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการนำไปปรับใช้กับวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Perkinelmer รุ่น DSC 400 โดยเตรียมตัวอย่างทดสอบประมาณ 5-8 mg จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียม (Pan) แล้วนำไปอัดปิดฝา ตั้งค่าอุณหภูมิการทดสอบที่ 25-300 °C อัตราเพิ่มของอุณหภูมิ 10°C/min พลังงานที่วัดออกมาจะเป็น mW [6]

3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์เวลาในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา

จากการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาในการกระตุ้นปฏิกิริยาของวัสดุอีพ็อกซีด้วยรังสี UV-A ที่เวลา 0 2 และ 4 นาที โดยใช้อัตราส่วนผสม BAPO ที่ 3.0 phr พบว่า เมื่อใช้เวลาในการกระตุ้นอีพ็อกซีด้วยรังสี UV-A นานขึ้นส่งผลให้อีพ็อกซีมีลักษณะเหนียวมากขึ้นโดยสังเกตจากการไหลออกจากภาชนะบรรจุ โดยเวลาการกระตุ้นที่ 2 นาทีนั้น อีพ็อกซีมีความเหนียวไม่มากนัก ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการแบบสูญญากาศได้ ส่วนที่เวลาการกระตุ้นที่ 4 นาที อีพ็อกซีมีลักษณะความหนืดสูงมากและไม่เกิดการไหลใดๆ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรังสี UV-A และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีทำให้โมเลกุลบางส่วนเกิดการเชื่อมขวางได้บ้าง จนทำให้ความหนืดสูงมากซึ่งไม่สามารถนำมาใช้กับกระบวนการขึ้นรูปแบบสูญญากาศได้ [7] และเมื่อนำไปศึกษาพฤติกรรมการบ่มสุก โดยให้ความร้อนตั้งแต่ 25 ถึง 300 องศาเซลเซียส พบว่า ในทุกช่วงเวลากการกระตุ้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อน (Exothermic) จากการเกิดการบ่มสุกเพื่อสร้างการเชื่อมขวางของสายโซ่ และมีค่าพลังงานการคายความร้อนลดลงตามระยะเวลาการกระตุ้นด้วย UV-A ที่นานขึ้น คือ 331 J/g,

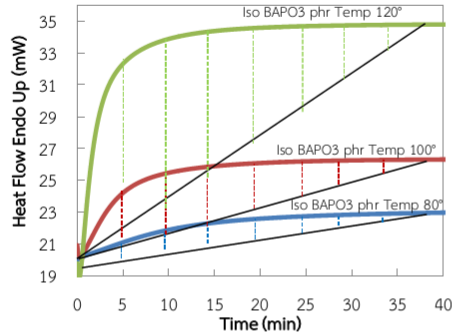
214 J/g, 201 J/g ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุอีพ็อกซี ดังรูปที่ 3



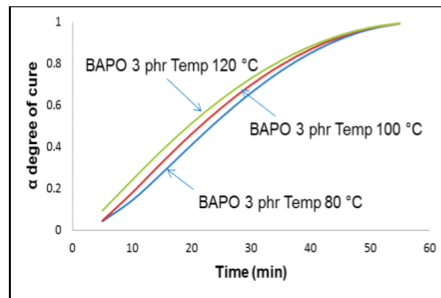
รูปที่ 3 เทอร์โมแกรมของวัสดุอีพ็อกซีที่มีปริมาณ BAPO 3 phr และระยะเวลากระตุ้นด้วย UV-A ที่ 0 2 และ 4 นาที

3.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิการบ่มสุกและอัตราการเชื่อมขวางของสายโซ่

การทดสอบหาอุณหภูมิการบ่มสุกโดยการให้อุณหภูมิความร้อนคงที่ (Isothermal) กับวัสดุอีพ็อกซีที่ผ่านการกระตุ้นรังสี UV-A เป็นเวลา 2 นาที จากรูปที่ 4 แสดงการให้อุณหภูมิความร้อนคงที่ ในการบ่มสุกที่แตกต่างกัน คือ 80 100 และ 120 °C เมื่อให้อุณหภูมิในการบ่มสุกเพิ่มขึ้น พบว่าระยะเวลาที่ใช้เชื่อมขวางของอีพ็อกซีลดลง ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยส่วนหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โมเลกุลจำนวนมากเกิดการขยายตัวเร็วขึ้นจนทำให้โมเลกุลเหล่านั้นมีค่าพลังงานการกระตุ้น (Activation energy; Ea) มากกว่าค่าพลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา ส่งผลให้โมเลกุลเกิดการสั่นและชนกันอย่างมีประสิทธิภาพทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยอธิบายได้จากทฤษฎีของอาร์เรเนียส (Arrhenius) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ของอัตรา [8][9]



รูปที่ 4 พฤติกรรมการบ่มสุกเมื่อให้ความร้อนคงที่ ที่อุณหภูมิ 80 100 และ 120 °C ของวัสดุอีพ็อกซีที่มีปริมาณ BAPO 3 phr



รูปที่ 5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราส่วน BAPO 3 phr ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 80 100 และ 120 °C

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 120 °C ที่ระยะเวลา 40 นาที มีระดับพลังงานการคายความร้อนที่ 20,802 mJ และ ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่า อุณหภูมิการบ่มสุกที่ 80 และ 100 °C แต่เนื่องด้วยใช้การใช้อุณหภูมิการบ่มสุกที่สูงเกินไป ส่งผลถึงความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้ โดยมาจากอุณหภูมิภายนอกที่ได้รับเข้าไปรวมกับอุณหภูมิภายในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซี ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ ส่วนการใช้อุณหภูมิการบ่มสุก 80 °C และ 100 °C ที่เวลา 40 นาที จากรูปที่ 4 พบว่าระดับการคายพลังงานความร้อนอยู่ที่ 2,929 mJ และ 6,535 mJ ซึ่งต่ำกว่าที่ 120 °C มากดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการใช้อุณหภูมิบ่มสุกที่ 80 °C และ 100 °C มีค่าใกล้เคียงกันมาก และเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 5 พบว่าการใช้อุณหภูมิบ่มสุก 80 °C และ 100 °C มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน แต่จากการวิเคราะห์เทอร์โมแกรมในรูปที่ 3 พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C เป็นช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิใน

การบ่มสุกที่ 100 °C เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา [10][11]

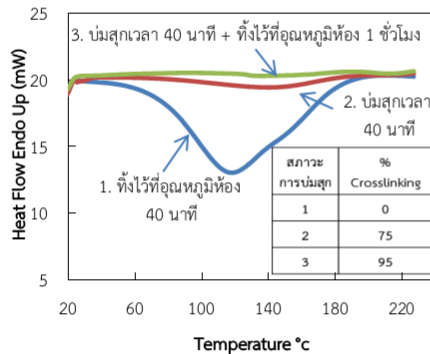
จากการวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการบ่มสุกด้วยเทคนิค DSC ของวัสดุอีพ็อกซีแล้ว สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างดังนี้ คือ ปริมาณ BAPO 3 phr ระยะเวลาการกระตุ้นด้วยรังสี UV-A ที่ 2 นาที และอุณหภูมิในการบ่มสุกที่ 100 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนต่อไปจะทำการศึกษาระยะเวลาการบ่มสุกและปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล (% Crosslinking) ของตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบสูญญากาศ

3.3 การศึกษาระยะเวลาการบ่มสุกของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี

จากการศึกษาระยะเวลาการอบบ่มสุกและปริมาณการเชื่อมขวาง (% Crosslinking) ของตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบสูญญากาศ จากการวิเคราะห์อุณหภูมิการบ่มสุกและอัตราการเชื่อมขวางของสายโซ่ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 พบว่าระยะเวลาการบ่มสุก มีค่าปริมาณการเชื่อมขวางของตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มสุกที่เพิ่มขึ้น แต่ด้วยรูปแบบการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบสูญญากาศนั้น วัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีจะเกิดปฏิกิริยาภายใต้แรงดันบรรยากาศ ซึ่งแรงกดอากาศนั้นมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาช้า [9] จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการเลือกระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มสุกที่ 40 นาที ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่ำ แล้วพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มสุก 50 นาที ที่ระยะเวลาการบ่มสุกนานขึ้น มีค่าพลังงานการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้มีค่าความร้อนสะสมอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของสายโซ่ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกเวลาการบ่มสุกที่ 40 นาที และได้ทำการศึกษาที่สภาวะการบ่มสุกที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปแบบสูญญากาศ โดยศึกษาที่ 3 สภาวะ ดังนี้ บ่มสุกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 40 นาที, บ่มที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที และบ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 40 นาที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที เพื่อนำชิ้นงานมาศึกษาปริมาณการเชื่อมขวาง



3.4 การศึกษาปริมาณการเชื่อมขวางของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี



รูปที่ 6 ค่าพลังงานการคายความร้อนที่อัตราส่วน BAPO 3 phr เวลากระตุ้นปฏิกิริยา 2 นาที บ่มสุกที่อุณหภูมิ 100 °C

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นการลดลงของการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง BAPO 3 phr กระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอเป็นเวลา 2 นาที อุณหภูมิการอบพบว่าที่ 100 °C จากรูปจะสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงการคายพลังงานความร้อนแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือการเกิดการเชื่อมขวางจะเกิดอย่างสมบูรณ์เมื่อตัวอย่างผ่านการบ่มสุกที่ 100 °C เป็นเวลา 40 นาที การเชื่อมขวางเท่ากับ 75 % และเมื่อนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีการเชื่อมขวางเท่ากับ 95 % ซึ่งมีปริมาณการเชื่อมขวางต่างกันประมาณ 20 % เนื่องจากการเชื่อมโยงของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้นย่อมใช้พลังงานในการเชื่อมโยงสายโซ่ลดลง [12]

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของการกระตุ้นวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซี ที่มีสาร BAPO 3 phr กระตุ้นด้วยรังสี UV-A พบว่าระยะเวลาการกระตุ้นด้วยรังสี UV-A ที่เหมาะสมคือ 2 นาที และปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิการบ่มสุก 100 °C ระยะเวลาการบ่มสุกในตู้อบ 40 นาที และทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาในอุณหภูมิห้องอีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ และเพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและการกระตุ้นด้วยรังสี UV-A กับวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีสามารถช่วยลดระยะเวลาในการบ่มสุกและยังเป็นการลดพลังงานความร้อนที่ใช้อีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วภาคอุตสาหกรรมอบที่อุณหภูมิสูงอยู่ในช่วง 80-150

องศาเซลเซียส ประมาณ 2-4 ชั่วโมง ทำให้ใช้ระยะเวลาในการผลิตนาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท พี.เจ. คอมโพสิต จำกัด และ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1]Curing Agents for Epoxy Resin, ข้อมูลจาก www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech32.pdf (วันที่สืบค้นข้อมูล 18 มกราคม 2559)
- [2] ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของอีพ็อกซีเรซิน, ข้อมูลจาก kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/1885/12/246510_ch1.pdf (วันที่สืบค้นข้อมูล 24 มกราคม 2559)
- [3] เอกสารเผยแพร่. ชุดการจัดแสดงที่ 14. “การอบโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet Curing).” [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial\(PDF\)/Bay%2014%20Ultra%20Violet%20Curing.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay%2014%20Ultra%20Violet%20Curing.pdf) (วันที่สืบค้นข้อมูล 20 ตุลาคม 2557)
- [4] Hongyang Cai, Peng Li, Gang Sui, Yunhua Yu, Gang Li, Xiaoping Yang, Seungkon Ryu, Curing kinetics study of epoxy resin/flexible amine toughness systems by dynamic and isothermal DSC, *Thermochimica Acta* 473 (2008) 101–105
- [5] บริษัท นีโอเทค คอมโพสิต จำกัด, “Vaccum bagging.” http://www.neo.co.th/product_c09.php (วันที่สืบค้นข้อมูล 2 พฤศจิกายน 2557)
- [6] Jonathan Shaw. Ph.D. Cytec Coating Resins February 26, 2013, Advantages of UV Curing in Composite Manufacturing
- [7] Ramli.J, Hadi A.S., Jeefferie A.R. & Mahat M.M, A Preliminary Study on the Effects of Photoinitiator and UV Curing Exposure Time to the Mechanical and Physical Properties of the Epoxy and Vinyl Ester Fiber Glass Laminated Composites, *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol:10 No:06*
- [8] ณัฐพร ศรีลอย, ฉันททิพ คำนวนทิพย์, จันทรฉายทองปิ่น, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, ผลของสารเติมแต่งซิลิกา การปรับปรุงผิว และวิธีการ



เชื่อมโยงสายโซ่ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ
โพลีเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวกับสารเติมแต่งซิลิกา,
การจัดประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับ
บัณฑิตศึกษาครั้งที่ 11

- [9] ผศ.ดร.ศุภรินทร์ ศิริวงศ์, จณนพลศาสตร์เคมี, ข้อมูลจาก
<http://chemsci.kku.ac.th/choosak/gen%20chem/Kinetics.pdf> (วันที่สืบค้นข้อมูล 4 มีนาคม 2559)
- [10] Mr. K.Vijaya Kumar, Dr. Mir Safiulla, Dr. A.N Khaleel Ahmed, Analysis Of Vacuum Failures During Curing Of Cfrp Composites., INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 2, ISSUE 5, MAY 2013
- [11] Ricky Hardis, Julie L.P.Jessop, Frank E.Peters , Michael R.Kessler, Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA, Composites: Part A 49 (2013) 100–108
- [12]Sichina.W.J., National Marketing Manager, Characterization of Epoxy Resins Using DSC, PETech-19 Thermal Analysis.



**Organized and Sponsored
by**



Engineering and Service



Minitab



aswell
SOLUTIONS



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ถนนมิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002
Website : ienetwork2016.kku.ac.th
โทร : 085-0258979, 043-347227
E-mail : ienetwork2016@gmail.com



การประชุมวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2559

IE Network Conference 2016

ขอแสดงความยินดีกับผู้ที่เข้าร่วมงาน

คุณสมภพ อ่างสมบูรณ์ วรสิทธิ์ ภัทรบุตร และ กุศลวิทย์ ธีรย์อินทร์

โดยทางคณะกรรมการและคณะจัดงานวิศวกรรมศาสตร์

“ขอแสดงความยินดีกับผู้เข้าร่วมงานทุกท่านที่มาร่วมงานในครั้งนี้”

ระหว่างวันที่ 7 - 8 กรกฎาคม 2559 ณ โรงแรมโฆษะขอนแก่น

(ผู้ประสานงานงานวิชาการ)

ประธานคณะกรรมการจัดงาน ประจำปี 2559

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ว่าที่ ร.ต.หญิงสุพัฒตรา อ่างสมบูรณ์
วัน เดือน ปีเกิด	10 มกราคม 2534
ที่อยู่	72 ซอย ไผ่ศรีจิต 32 แขวงสามวาตะวันออก เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลาสติก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	รับทุนจากบริษัท PJ Composite Co.,Ltd. เพื่อศึกษาวิจัยและพัฒนา กระบวนการผลิต
เบอร์โทรศัพท์	088-9903691
อีเมล	Suphattra_f@hotmail.com