

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไหม้ในวัสดุพรีเพรกและลามิเนตจากอิพ็อกซี



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Investigating Factors Affecting Gel Time in Epoxy Prepreg and Laminates



MR. Thanat Kerdkraikaew
MR. Panot Sodsri
Miss Suwalee Ruksasiri

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลใต้วงในวัสดุพรีเพรกและลามิเนตจากอีพอกซี
โดย นายธนต์ เกิดไกรแก้ว
นายปณต สอดสี
นางสาวสุวลี รักษาศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิสร์

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร



(ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิสร์)

ประธานกรรมการ



(รศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

กรรมการ

TEERAPORN

(รศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไหม้ในวัสดุพีเรกและลามิเนตจากอีพ็อกซี		
โดย	นายธนัตถ์	เกิดไกรแก้ว	รหัสนักศึกษา 63010432
	นายปณต	สอดสี	รหัสนักศึกษา 63010557
	นางสาวสุวลี	รักษาศิริ	รหัสนักศึกษา 63011024
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์		
สังกัด	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการทดลองผสมวาร์นิชและการทดสอบเจลไหม้ และส่วนของการวัดมุมสัมผัสระหว่างวาร์นิชและผ้าไฟเบอร์กลาส โดยส่วนของการทดลองผสมวาร์นิชและการทดสอบเจลไหม้เป็นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไหม้ของวาร์นิช ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองคืออีพ็อกซี รวมถึงสารเร่งการแข็งตัว สารเติมแต่ง และสารเพิ่มเนื้อ หลังจากนั้นจะทดสอบเจลไหม้ของวาร์นิชด้วยเครื่องทดสอบเจลไหม้แบบฮอตเพลต ที่อุณหภูมิ 171 °C โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 16 ครั้งตามการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์มินิแทบ และทำการทดลองเพิ่ม 6 ครั้ง เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไหม้ของวาร์นิชมากที่สุด คือ ปริมาณของสารเร่งการแข็งตัว แต่เนื่องจากการปรับสัดส่วนของสารเร่งการแข็งตัวไม่เหมาะสมในการปรับปรุงกระบวนการผลิตพีเรกและลามิเนต ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อเจลไหม้รองลงมา คือ สารเพิ่มเนื้อ สารเติมแต่ง และสัดส่วนของเรซิน

ในส่วนของการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างวาร์นิชและผ้าไฟเบอร์กลาส เป็นการศึกษาถึงผลของเจลไหม้ต่อสมบัติทางพื้นผิวของผ้าไฟเบอร์กลาส โดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส โดยการทดลองเลือกใช้วาร์นิชจาก 2 การทดลองที่มีเจลไหม้ต่างกันมากที่สุด ได้แก่ วาร์นิชที่มีเจลไหม้ 318.5 วินาที และวาร์นิชที่มีเจลไหม้ 58.0 วินาที ผลการทดสอบพบว่า วาร์นิชที่มีเจลไหม้มากกว่ามีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 41.1 องศา และวาร์นิชที่มีเจลไหม้น้อยกว่ามีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 50.5 องศา ดังนั้นวาร์นิชที่มีเจลไหม้มากจะสามารถซึมเข้าสู่ผ้าไฟเบอร์กลาสได้ดีกว่าวาร์นิชที่มีเจลไหม้น้อย หรือกล่าวได้ว่าวาร์นิชที่มีเจลไหม้มากจะมีสมบัติทางพื้นผิวกับผ้าไฟเบอร์กลาสที่ดีกว่าวาร์นิชที่มีเจลไหม้น้อย

Report title	Investigating Factors Affecting Gel Time in Epoxy Prepreg and Laminates	
By	Mr. Thanat	Kerdkraikaew
	Mr. Panot	Sodsri
	Miss Suwalee	Ruksasiri
Advisor	Asst. Prof. Dr. Apinan	Namkanisorn
Report for	Department of Chemical Engineering, School of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

Abstract

This research is divided into two sections: the varnish mixing experiment followed by its gel time measurement and the wettability test of the epoxy resin and fiberglass. The first part aims to investigate the factors affecting the gel time of epoxy varnish, including curing agent, ratio of resin A and B, additives, and fillers. The gel time of the varnish is subsequently evaluated using a hot plate gel time tester set at a temperature of 171°C. Sixteen experiments are conducted according to a designed protocol using MiniTab software, with an additional six experiments carried out to validate the data. The test results indicate that the primary factor influencing the gel time of varnish is the quantity of curing agent. However, in the actual production of prepreg, the amount of curing agent is normally fixed and rarely varied. The attention is therefore given to factors with a lesser impact on gel time, namely fillers, additives, and the ratio of resin A and B. In the second part of this work, the wettability between epoxy resin and fiberglass is studied by measuring the contact angles between epoxy resin and fiberglass using a contact angle goniometer. We attempted to find the relationship between contact angle and gel time. This involves selecting varnishes from two experiments showcasing the most contrasting gel times: 318.5 seconds and 58.0 seconds, respectively. The tests reveal that the varnish with the longer gel time exhibits a contact angle of 41.1 degrees, whereas the varnish with the shortest gel time presents a contact angle of 50.5 degrees. Consequently, varnishes with longer gel times display lower contact angles (41.1 degrees), indicating better absorption into the fiberglass compared to varnishes with shorter gel times. In essence, varnishes with longer gel times demonstrate superior wettability on fiberglass in contrast to varnishes with shorter gel times.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อภินันท์ นัมมณีสรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยช่วยเหลือ ดูแล ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ตลอดจนให้การสนับสนุนทุกด้าน

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยลามีเนต แมนูแฟคเจอร์ส จำกัด เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คณะผู้จัดทำได้ทำโครงการร่วมกับทางบริษัท ทำให้ได้รับความรู้และประสบการณ์ทางด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตพีเพรคและลามีเนตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบพระคุณ คุณพลพัทธ์ ชื่นกลิ่น ผู้จัดการแผนกพัฒนาผลิตภัณฑ์ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนภายในแผนกพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท ไทยลามีเนต แมนูแฟคเจอร์ส จำกัด ที่คอยให้คำปรึกษา คอยชี้แนะแนวทางในการดำเนินโครงการและช่วยเหลือสนับสนุนทุกด้าน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนการศึกษา อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำสั่งสอนและกัลยาณมิตรที่มีความปรารถนาดีต่อกันเสมอมา

ธนัตถ์ เกิดไกรแก้ว
ปณต สอดสี
สุวลี รักษาศิริ

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composites).....	5
2.2 เทอร์โมเซตเรซิน (Thermoset Resin).....	6
2.2.1 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin).....	6
2.3 ตัวเสริมแรง (Reinforcement).....	6
2.4 วัสดุพรีเพรก (Prepreg).....	7
2.5 วัสดุลามิเนต (Laminate).....	7
2.6 เจลไทม์ (Gel Time).....	11
2.7 สารเร่งการแข็งตัว (Curing agent or hardener).....	13
2.8 สารเพิ่มเนื้อและสารเติมแต่ง (Filler and Additive).....	14
2.9 คุณสมบัติทางพื้นผิวและมุมสัมผัส (Wettability and Contact angle).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	23
3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.1.1 อุปกรณ์.....	23
3.1.2 สารเคมี.....	23
3.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อทดสอบเจลไทม์ของวาร์นิช.....	24
3.2.1 การผสมวาร์นิช (Varnish).....	25
3.2.2 การทดสอบเจลไทม์.....	25
3.2.3 การประเมินผล.....	25
3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability).....	26
3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability).....	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	27
4.1 ผลการทดลองเพื่อทดสอบเจลไทม์ของวาร์นิช.....	27
4.2 ผลการทดลองเพิ่มเติม.....	29
4.3 ผลการทดลองการวัดค่ามุมสัมผัสเพื่อเปรียบเทียบผ้าไฟเบอร์กลาส.....	30
4.4 ผลการทดลองการวัดค่ามุมสัมผัสของการทดลองที่มีเจลไทม์ต่างกัน.....	30
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	31
4.6 วิเคราะห์ผลค่ามุมสัมผัสเปรียบเทียบระหว่างวาร์นิชที่มีเจลไทม์มากและน้อย.....	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	36
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
เอกสารอ้างอิง.....	38
ภาคผนวก.....	39

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงเจลไทม์ของระบบ DGEBA/TETA ที่อัตราส่วน 13 phr ที่อุณหภูมิในช่วง 30-80 °C.....	13
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงเจลไทม์ของระบบ DGEBA/TETA ที่อัตราส่วน 20 phr ที่อุณหภูมิในช่วง 30-80 °C.....	13
ตารางที่ 2.3 ระบบอีพ็อกซีเรซินที่มีองค์ประกอบของสารเพิ่มเนื้อและสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน.....	15
ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) ระบบอีพ็อกซีเรซินที่มีองค์ประกอบของสารเพิ่มเนื้อและสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน.....	15
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางพื้นผิว (Surface properties) ของเส้นใยคาร์บอน (CFs) แต่ละชนิด.....	19
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสูตรการผสมวาร์นิช.....	25
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิช.....	27
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในหน่วยกรัม.....	28
ตารางที่ 4.3 แสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิชของการทดลองเพิ่มเติม.....	29
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในหน่วยกรัมของการทดลองเพิ่มเติม.....	29
ตารางที่ 4.5 ค่ามุมสัมผัสของการทดลองที่ใช้ผ้าไฟเบอร์กลาสต่างกัน.....	30
ตารางที่ 4.6 ค่ามุมสัมผัสของการทดลองที่มีเจลไทม์ต่างกัน.....	30
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิชที่มีปริมาณของสารเร่งการแข็งตัวอยู่ที่ 0.1 %.....	32
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิชที่มีปริมาณของสารเร่งการแข็งตัวอยู่ที่ 0.5 %.....	33
ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบผลของเจลไทม์เมื่อทำการปรับสัดส่วนของสารเติมแต่ง (Additive).....	34
ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบผลของเจลไทม์เมื่อทำการปรับสัดส่วนของสารเพิ่มเนื้อ (Fillers).....	35

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
รูปที่ 2.1 ประเภทของพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	5
รูปที่ 2.2 วัสดุพรีเพอร์ก.....	7
รูปที่ 2.3 วัสดุคอปเปอร์แคลดลามีเนต.....	8
รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตคอปเปอร์แคลดลามีเนต.....	9
รูปที่ 2.5 Temperature profile ที่ส่งผลต่อความหนืดและระดับการป่มของระบบเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน.....	10
รูปที่ 2.6 สมบัติเชิงกลของลามีเนตจากการศึกษา Mariam.....	12
รูปที่ 2.7 สารเร่งการแข็งตัวของเรซิน.....	14
รูปที่ 2.8 ความร้อนที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินแต่ละระบบที่ Nonisothermal curing.....	16
รูปที่ 2.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นของระบบ A และระบบ D ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	17
รูปที่ 2.10 ลักษณะของของเหลวบนพื้นผิวของแข็งที่มุมสัมผัสตั้งแต่ 0 – 180 องศา.....	18
รูปที่ 2.11 ค่าแรงดึงผิวของระบบอีพ็อกซี (DGEBA และ DGEBA/DDS) ที่ช่วงอุณหภูมิ 20 – 140 °C.....	19
รูปที่ 2.12 อัตราการเพิ่มความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 20 – 180 °C โดยมี Ramping rates ที่ 2, 5, 7 และ 10 °C/min ตามลำดับ ทดสอบโดยเทคนิค DSC.....	20
รูปที่ 2.13 ค่ามุมสัมผัสระหว่างระบบอีพ็อกซี (DGEBA) และเส้นใยคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิในช่วง 30 – 70 °C.....	20
รูปที่ 2.14 ค่ามุมสัมผัสระหว่างระบบอีพ็อกซีที่เติมสารเร่งการแข็งตัว (DGEBA/DDS) และเส้นใยคาร์บอนชนิด T700 และ Work of Adhesion (W_A) ซึ่งเป็นงานที่ใช้ในการแยกของเหลวออกจากของแข็งที่อุณหภูมิในช่วง 50 – 110 °C.....	21
รูปที่ 2.15 ค่ามุมสัมผัสและค่า W_A ของระบบที่อุณหภูมิ 110 °C ที่เวลาตั้งแต่ 2 – 100 นาที.....	22
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองเพื่อทดสอบเจลโหม้ของวาร์นิช.....	24
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนเพื่อทดสอบสมบัติทางพื้นผิว (Wettability).....	26
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลโหม้ของวาร์นิช.....	31

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไหม้ของวาร์นิชเมื่อควบคุมปริมาณของสารเร่งการแข็งตัว อยู่ที่ 0.1% ของเรซิน.....	32
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไหม้ของวาร์นิชเมื่อควบคุมปริมาณของสารเร่งการแข็งตัว อยู่ที่ 0.5% ของเรซิน.....	34
รูปที่ ก.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ผสมวาร์นิช.....	40
รูปที่ ก.2 แสดงเครื่องมือวัดค่าเจลไหม้ของวาร์นิช.....	41
รูปที่ ข.1 แสดงเครื่องมือวัดค่ามุมสัมผัส.....	42
รูปที่ ข.2 แสดงซอฟต์แวร์สำหรับวัดค่ามุมสัมผัส.....	43
รูปที่ ข.3 แสดงตัวอย่างผลที่ได้จากการวัดค่ามุมสัมผัส.....	44

คำอธิบายสัญลักษณ์

- E_a = พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาการแข็งตัวของเรซิน (กิโลจูลต่อโมล)
 SE = พลังงานพื้นผิวของของเส้นใยคาร์บอน (มิลลิจูลต่อตารางเมตร)
 W_A = พลังงานที่ใช้แยกของเหลวออกจากของแข็ง (มิลลิจูลต่อตารางเมตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้มีการนำอีพ็อกซี (Epoxy) มาใช้ในการผลิตวัสดุพรีเพรก (Prepreg) และลามิเนต (Laminate) ซึ่งเป็นวัสดุที่นำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น โดยที่วัสดุพรีเพรกและลามิเนตมีคุณสมบัติที่ดีหลายด้าน เช่น มีความแข็งแรง เนื่องจากพรีเพรกเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยเสริมแรง ซึ่งเส้นใยเสริมแรงจะทำหน้าที่รับแรง กระแทกและกระจายแรงกระแทก ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ ในอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุอีพ็อกซีพรีเพรกใช้ผลิตแผงวงจรไฟฟ้า (Print Circuit Board, PCB) เนื่องจากมีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีน้ำหนักเบา สามารถทนความร้อนและความชื้นสูงได้ดี แต่ข้อจำกัดของของวัสดุพรีเพรกและ ลามิเนต คือไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานได้หลังจากขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว เนื่องจากอีพ็อกซีเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermoset) ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เป็นโครงสร้างแบบ ร้างแหแล้วจะไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกครั้ง

โดยปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการขึ้นรูปอีพ็อกซีและเส้นใยเสริมแรงเป็นวัสดุพรีเพรก คือ เจลไทม์ (Gel time) ของอีพ็อกซีเรซินหรือมักเรียกในโรงงานว่า วาร์นิช (Varnish) เจลไทม์ หมายถึง ช่วงเวลาสำคัญในระหว่าง ที่อีพ็อกซีเรซินเปลี่ยนจากของเหลวเป็นสถานะกึ่งของแข็งหรือคล้ายเจลเมื่ออยู่ภายใต้ความร้อนและความดัน ซึ่ง ส่งผลต่อกระบวนการบ่มในท้ายที่สุด ระยะเวลาของเจลไทม์ส่งผลกระทบต่อคุณภาพ ประสิทธิภาพ และ สมบัติของวัสดุคอมโพสิตขั้นสุดท้าย เนื่องจากเจลไทม์เป็นตัวแปรที่นำไปใช้วิเคราะห์หาเวลาในการบ่ม (Curing time) ของอีพ็อกซี ซึ่งในกระบวนการผลิตจะต้องมีการควบคุมเจลไทม์ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้สมบัติของ ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ รวมถึงเจลไทม์เป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาหากเกิดความผิดปกติใน กระบวนการผลิต เช่น ในการขึ้นรูปลามิเนตในระหว่างการบีบอัดชิ้นงานด้วยความดันและอุณหภูมิสูง หากชิ้นงาน มีเรซินไหลออกจากแผ่นลามิเนตมากเกินไป (Overflow) อาจเป็นผลมาจากการที่ค่าเจลไทม์ของระบบนานเกินไป ทำให้เรซินนั้นยังคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ในขณะที่ถูกอัดด้วยความดัน เกิดการไหลล้นออกจากแม่พิมพ์ หรือใน

กรณีอื่นที่เกิดความบกพร่องบนพื้นผิวของลามิเนต โดยมีลักษณะเป็นฝ้าขาวที่มุมของลามิเนต (Whitening) อาจเป็นผลมาจากการที่ค่าเจลไทม์ของระบบสั้นเกินไป ทำให้เรซินซึมเข้าเส้นใยแก้วได้ไม่ดี (Poor Wettability)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์มีหลายประการ ได้แก่ ประเภทเรซิน ส่วนผสมของเรซิน ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารทำให้แข็งตัว อุณหภูมิ สัดส่วนปริมาตรของเรซินต่อไฟเบอร์ สารเติมแต่งและสารตัวเติม การผสมและการกระจายตัว เป็นต้น การทำความเข้าใจและการควบคุมปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญในการได้ค่าเจลไทม์ที่ต้องการในพีเรพริกอิพอกซีเสริมใยแก้ว ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์คอมโพสิตขั้นสุดท้าย

การศึกษาเจลไทม์ในอิพอกซีเรซิน โดยเฉพาะในระบบที่ประกอบด้วยอิพอกซีพีเรพริกเสริมใยแก้ว สามารถเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับความสามารถในการเปียกของอิพอกซีเรซินบนเส้นใยแก้ว (Wettability) ความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างเจลไทม์และพฤติกรรมการเปียกของอิพอกซีเรซินบนเส้นใยแก้วเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต และการควบคุมคุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิต

โครงการนี้มีเป้าหมายเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ในอิพอกซีเรซิน เช่น สัดส่วนของเรซินสองชนิด สารทำให้แข็งตัว สารเติมแต่ง เป็นต้น เมื่อเข้าใจปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเจลไทม์แล้ว จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของเจลไทม์ต่อความสามารถในการเปียกของอิพอกซีเรซินบนเส้นใยแก้ว รวมถึงอิทธิพลต่อความหนืดและสถานะการแข็งตัวของเรซินเมื่อสัมผัสกับเส้นใย

การเชื่อมโยงความเข้าใจปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ในอิพอกซีเรซินกับความสามารถในการเปียกของอิพอกซีเรซินบนเส้นใยแก้วจะเกิดประโยชน์ต่อการผลิตพีเรพริกและลามิเนตในหลายด้าน รวมถึง การควบคุมคุณภาพ การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต และประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิต

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเจลไทม์ของวาร์นิช
2. เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเจลไทม์ของวาร์นิช ได้แก่ สัดส่วนของเรซิน A และ B สารทำให้แข็งตัว สารเติมแต่ง สารเพิ่มเนื้อ
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเจลไทม์ของวาร์นิชและความสามารถในการเปียก (Wettability) ของวาร์นิชบนเส้นใยแก้วในกระบวนการผลิตพรีเพรก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาตำรา งานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตพรีเพรก
2. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเจลไทม์ของวาร์นิช
3. ออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบบของปัจจัยต่างๆ ต่อเจลไทม์และใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติเพื่อหานัยสำคัญของปัจจัยเหล่านี้
4. ออกแบบการทดสอบเพื่อเชื่อมโยงระหว่างเจลไทม์และความสามารถในการเปียก (Wettability) ในการเกิดพรีเพรก

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ความเข้าใจถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อเจลไทม์ของอิพอกซีเรซิน และความสามารถในการเปียกของอิพอกซีวานิชบนเส้นใยแก้วจะเกิดประโยชน์ต่อการผลิตพรีเพรกและลามิเนตในหลายด้าน

1. การควบคุมคุณภาพ ความเข้าใจในปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเจลไทม์ถือเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาระดับความต่อเนื่องและคุณภาพของกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต การเปลี่ยนแปลงของเจลไทม์สามารถนำไปสู่ปัญหาความบกพร่องของพรีเพรก ความไม่สม่ำเสมอของสมบัติต่างๆ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและจะความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย
2. การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต การตรวจสอบปัจจัยเหล่านี้ช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตได้ ด้วยการควบคุมเจลไทม์ บริษัทผู้ผลิตสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต ลดการใช้พลังงาน และลดวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งนำไปสู่การประหยัดต้นทุนได้ในที่สุด
3. ประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิต เจลไทม์ของอิพอกซีเรซินในพรีเพรกส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล ความต้านทานความร้อน ความเป็นฉนวนไฟฟ้า และคุณลักษณะที่สำคัญอื่นๆ ของวัสดุขั้นสุดท้าย การศึกษาอย่างละเอียดในด้านนี้สามารถช่วยพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่ออกแบบเฉพาะสำหรับการใช้งานเฉพาะด้านได้

บทที่ 2

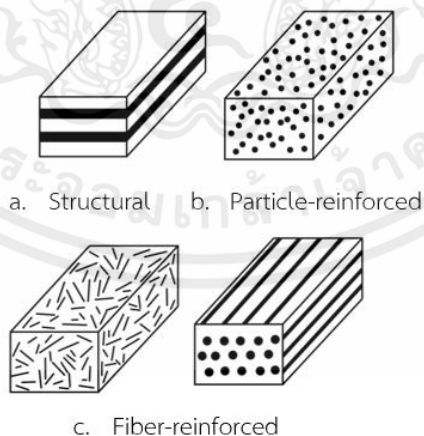
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composites)

วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ชนิดที่มีสมบัติต่างกัน ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติดีขึ้น โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเมทริกซ์ ซึ่งเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ สามารถแบ่งออกเป็น เทอร์โมเซต เมทริกซ์ และเทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์ และส่วนเสริมแรง ซึ่งเป็นได้ทั้งแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็ก ๆ สำหรับความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีตัวเสริมแรงเป็นเส้นใยจะถูกกำหนดด้วยสมบัติของเส้นใย สัดส่วนของเส้นใยต่อพอลิเมอร์ ความยาวและการกระจายตัวของเส้นใย โดยที่พันธะระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ต้องแข็งแรงมากพอที่จะไม่ถูกทำลายโดยแรงภายนอกได้ง่าย

พอลิเมอร์คอมโพสิตแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. คอมโพสิตที่ใช้อนุภาคเป็นตัวเสริมแรง (Particle-reinforced)
2. คอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเป็นตัวเสริมแรง (Fiber-reinforced)
3. คอมโพสิตแบบโครงสร้าง (Structural)



รูปที่ 2.1 ประเภทของพอลิเมอร์คอมโพสิต

2.2 เทอร์โมเซตเรซิน (Thermoset Resin)[1]

พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymeric matrix) ที่มีมวลโมเลกุลและความหนืดต่ำ (ประมาณ 2,000 cP) ทำให้อ่อนนุ่มสามารถเกิดโครงสร้างสามมิติแบบร่างแหในขณะที่ทำการบ่ม ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ ระหว่างที่ทำการบ่มอยู่นั้น ปฏิกริยาจะถูกเร่ง และปริมาตรภายในโมเลกุลจะลดลง ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลง ส่งผลให้ความหนืดมากขึ้น หลังจากเรซินแข็งตัวจะไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ เทอร์โมเซตเมทริกซ์มีหลายประเภท ได้แก่ พอลิเอสเทอร์, อีพ็อกซี, บิสมาลีไอน์, ไซยาเนตเอสเทอร์, พอลิไอน์ และ ฟีนอลิก

2.2.1 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)[1]

เทอร์โมเซตเมทริกซ์ที่นิยมใช้ในการทำวัสดุคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพสูง (High-performance composites) และสารยึดติด การใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นสารยึดติดทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดี ทั้งในด้านของความแข็งแรง การยึดติด และมีอัตราการลดลงของปริมาตรต่ำ อีพ็อกซีเมทริกซ์ที่นิยมใช้เชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย อีพ็อกซีเรซินหลัก 1 ตัว, อีพ็อกซีเรซินรอง 1-3 ตัว และสารเร่งการแข็งตัว (Hardener or curing agent) 1-2 ตัว สำหรับการเติมอีพ็อกซีเรซินรองนั้นมีจุดประสงค์เพื่อควบคุมความหนืดของกระบวนการ เพิ่มความเหนียวให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต และลดการดูดความชื้น เนื่องจากความชื้นทำให้ความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง โครงสร้างสามมิติแบบร่างแหของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีอีพ็อกซีเรซินเป็นเมทริกซ์ เกิดได้จากการเปิดวงอีพ็อกซีเรซินหรือหมู่อีพ็อกไซด์ของเรซิน จากนั้นสารเร่งการแข็งตัวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเรซินตรงตำแหน่งที่เกิดการเปิดวงแหวนของหมู่ฟังก์ชันออก ทำให้ได้โครงสร้างแบบร่างแห สมบัติของอีพ็อกซีที่ทำการบ่มแล้วจะขึ้นอยู่กับสารเร่งการแข็งตัวที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

2.3 ตัวเสริมแรง (Reinforcement)

เป็นวัสดุที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิต โดยที่ตัวเสริมแรงมีหลายรูปแบบ เช่น รูปแบบอนุภาค รูปแบบเส้นใย เป็นต้น ซึ่งรูปแบบเส้นใยเป็นรูปแบบที่นิยมใช้กับอีพ็อกซีเรซิน เมื่อวัสดุคอมโพสิตได้รับแรงกระทำ ตัวเสริมแรงจะมีหน้าที่รับแรงกระทำและกระจายแรงกระทำออกไปตามเส้นใย

2.4 วัสดุพรีเพรก (Prepreg)

เป็นวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์เป็นอีพ็อกซีเรซินและใช้ตัวเสริมแรงแบบเส้นใยแก้ว (Fiberglass) ในการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิต โดยวัสดุพรีเพรกเกิดจากการนำอีพ็อกซีเรซินในรูปของน้ำยาวารนิชมาเคลือบตัวเสริมแรงแบบเส้นใยแก้ว และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 – 200 °C เพื่อทำการบ่มให้น้ำยาวารนิชแข็งตัว



รูปที่ 2.2 วัสดุพรีเพรก

2.5 วัสดุลามิเนต (Laminate)

การนำเอาคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมาเรียงซ้อนกันและยึดให้ติดกัน ซึ่งลำดับในการเรียงซ้อนแบ่งเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

1. Unidirectional คือ การจัดเรียงแบบทิศทางของเส้นใยในแต่ละชั้นไปในทางเดียวกัน
2. Cross-ply คือ การจัดเรียงแบบทิศทางตรงของเส้นใยในแต่ละชั้นสลับกัน 90 องศา
3. Angle-ply คือ การจัดเรียงแบบทิศทางของเส้นใยในแนวทแยง และในแต่ละชั้นสลับกัน
4. Multidirectional คือ การจัดเรียงแบบใช้รูปแบบการจัดเรียงทั้งสามแบบรวมกัน สลับกันในแต่ละชั้น

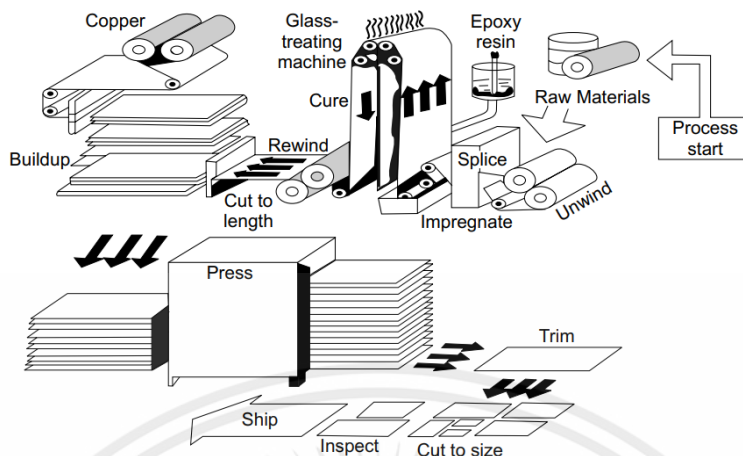
การนำพรีเพรกมาประกอบเป็นคอปเปอร์คลัดลามิเนต (Copper Clad Laminate, CCL) ใช้วิธีการอัดด้วยแรงดันโดยมีแผ่นทองแดงประกบอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของพรีเพรกที่ซ้อนทับกัน และให้ความร้อนระหว่างการอัดด้วยแรงดันที่อุณหภูมิ 170 – 200 °C และใช้ระยะเวลาในการบีบอัด 2 ชั่วโมง 30 นาที ถึง 3 ชั่วโมง



รูปที่ 2.3 วัสดุคอปเปอร์แคลดลามิเนต

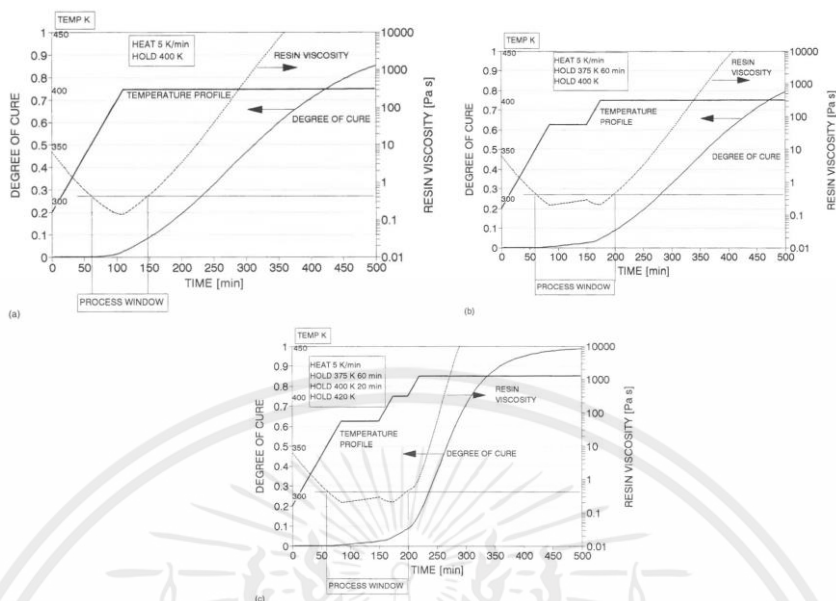
กระบวนการผลิตคอปเปอร์แคลดลามิเนต[2] วัสดุตั้งต้น 3 อย่างหลัก ๆ ได้แก่ เส้นใยแก้ว เรซิน และแผ่นทองแดง ซึ่งนำวัสดุตั้งต้นดังกล่าวมาที่ลามิเนเตอร์ (Laminator) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นลามิเนตที่เกิดการบ่มอย่างสมบูรณ์ โดยในกระบวนการผลิตประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. Treating คือ กระบวนการที่นำเส้นใยแก้วไปเคลือบด้วยเรซินเหลวหรือที่เรียกว่า วาร์นิช โดยขั้นตอนการผลิตเริ่มจาก นำเส้นใยแก้วไปชุบวาร์นิช (Immersion) และนำไปหนีบด้วยลูกกลิ้ง (Metering roller) จากนั้นลำเลียงผ่านเตาอบเพื่อทำการบ่มกึ่งสมบูรณ์ (Semi-cured) ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นพรีเพรก หรือ บี สเตจ (B stage)
2. Lay-up คือ กระบวนการที่นำพรีเพรกและแผ่นทองแดงมาเรียงซ้อนทับกันในเครื่องอัด เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการอัดด้วยแรงดัน โดยเริ่มจากนำแผ่นทองแดงวางชั้นล่าง หลังจากนั้นนำพรีเพรกมาซ้อนทับแผ่นทองแดงชั้นล่าง ซึ่งจำนวนชั้นของพรีเพรกที่นำมาเรียงซ้อนทับขึ้นกับความหนาของลามิเนตที่ต้องการ และสุดท้ายวางแผ่นทองแดงบนพรีเพรกที่ซ้อนทับกัน
3. Pressing คือ กระบวนการอัดด้วยแรงดัน พร้อมกับให้ความร้อนแผ่นทองแดงและพรีเพรกที่เรียงซ้อนกัน ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นลามิเนตที่ทำการบ่มอย่างสมบูรณ์ (Fully cured laminate)



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตคอปเปอร์เคลดลามิเนต

การบ่มด้วยความร้อน[3] (Thermal Cure) เป็นการให้ความร้อนแก่เรซินจนถึงอุณหภูมิที่เรซินสามารถเกิดการบ่มได้ และคงอยู่ที่อุณหภูมินั้นในช่วงระยะเวลาที่กำหนด จากขั้นตอนนี้ทำให้เรซินสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งที่มีเสถียรภาพทางความร้อนได้ ตัวแปรที่สำคัญ (Critical parameter) ของเรซินที่ถูกบ่มแล้วคือ ค่า T_g (Glass temperature transition) ของเรซินนั้น ซึ่งอาจมีค่าสูงขึ้นได้หากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้บ่มนั้น ส่งผลให้การบ่มเกิดได้เร็วขึ้นด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปมักจะมียุ้งของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจ แต่สำหรับระบบของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ในเชิงพาณิชย์นั้น ได้มีการคิดค้นและพัฒนากรรมวิธีในการบ่มขึ้นหลากหลายรูปแบบ ซึ่งการที่มีกระบวนการบ่มหลากหลายรูปแบบและหลากหลายเงื่อนไข อาจทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้ายต่างกันอย่างมีนัยสำคัญได้



รูปที่ 2.5 Temperature profile ที่ส่งผลต่อความหนืดและระดับการบ่มของระบบเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน (a.) ระบบที่เพิ่มอุณหภูมิและคงไว้ที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งครั้ง (b.) ระบบที่เพิ่มอุณหภูมิและคงไว้ที่อุณหภูมิคงที่สองครั้ง (c.) ระบบที่เพิ่มอุณหภูมิและคงไว้ที่อุณหภูมิคงที่สามครั้ง

จากรูปที่ 2.5 (a.) ปฏิกริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 400 K มีระยะเวลาของ Process window อยู่ที่ช่วง 60 – 150 นาที และดีกรีในการบ่มเท่ากับ 0.75

จากรูปที่ 2.5 (b.) ปฏิกริยาถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะทำปฏิกริยาที่อุณหภูมิ 375 K และคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 400 K และดำเนินปฏิกริยาต่อไป มีระยะเวลาของ Process window อยู่ที่ช่วง 60 – 200 นาที และดีกรีในการบ่มเท่ากับ 0.75

จากรูปที่ 2.5 (c.) ปฏิกริยาถูกแบ่งออกเป็น 3 ชั้น โดยชั้นแรกจะทำปฏิกริยาที่อุณหภูมิ 375 K และคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 400 K และคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นระยะเวลา 20 นาที สุดท้ายจึงเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 420 K และดำเนินปฏิกริยาต่อไป มีระยะเวลาของ Process window อยู่ในช่วง 60 – 200 นาที และดีกรีในการบ่มเท่ากับ 0.85

การเพิ่มระยะเวลาของ Process window จะเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับกระบวนการผลิต ช่วยลดข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีระยะเวลาในการแก้ไขและควบคุมกระบวนการนานขึ้น รวมถึงสามารถปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

2.6 เจลไทม์ (Gel Time)

ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของเรซิน หรือระยะเวลาที่ทำให้เรซินสามารถสร้างพันธะกับสารเร่งการแข็งตัวแล้วเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติแบบร่างแหได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเจลไทม์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการผลิตวัสดุพรีเพรกและลามิเนต เจลไทม์สามารถใช้ในการคำนวณหาเวลาที่ต้องการใช้ในการบ่มเรซิน และใช้เป็นตัวกำหนดสมบัติของวัสดุพรีเพรกและลามิเนตต่อไป ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ ได้แก่ สารเร่งการแข็งตัว สารเพิ่มเนื้อ สารเติมแต่ง ชนิดของอีพ็อกซีเรซิน เป็นต้น

สำหรับการกำหนดสมบัติของวัสดุพรีเพรกและลามิเนตโดยอาศัยการควบคุมเจลไทม์ของระบบนั้น เนื่องจากเจลไทม์ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ทำให้ในการศึกษาและการทดลองที่นำมาอ้างอิงจะเน้นไปที่การศึกษาผลของการปรับสัดส่วนองค์ประกอบของวารินิวาส์ส่งผลต่อสมบัติของพรีเพรกและลามิเนตอย่างไร

จากการศึกษาของ Mariam[4] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสารเร่งการแข็งตัวที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซิน โดย Mariam ทำการปรับอัตราส่วนของสารเร่งการแข็งตัวให้มีค่าต่ำกว่ากว่า เทียบเท่า และสูงกว่าปริมาณสารสัมพันธ์ การทดลองใช้ DGEBA เป็นอีพ็อกซีเรซินหลัก และมีสารเร่งการแข็งตัวเป็น TETA และ DDM แบ่งออกเป็น 2 ระบบ จากนั้นจึงทำการขึ้นรูปลามิเนตของแต่ละระบบเพื่อทดสอบหาสมบัติเชิงกล

ระบบ DGEBA/DDM ปรับอัตราส่วนเป็น 24 phr (ต่ำกว่า), 27 phr (เทียบเท่า), 30 phr (สูงกว่า) และ 34 phr (สูงกว่า)

ระบบ DGEBA/TETA ปรับอัตราส่วนเป็น 10 phr (ต่ำกว่า), 13 phr (เทียบเท่า), 15 phr (สูงกว่า) และ 20 phr (สูงกว่า)

เมื่อทำการทดลองแล้วได้ข้อสรุปว่า สมบัติเชิงกลของระบบที่ใช้ DDM นั้น ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ TETA เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิดมีเอมีนชนิดปฐมภูมิ (Primary amine) แต่ DDM เป็นอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amine) ที่มีเอมีนชนิดปฐมภูมิเป็นตัวทำปฏิกิริยา ซึ่งเอมีนชนิดปฐมภูมิจึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไวกว่าเอมีนชนิดทุติยภูมิ และมีวงเบนซีนจึงให้ความเสถียรทางโครงสร้างที่ดีกว่าการใช้ TETA ที่เป็นอะลิฟาติกเอมีน (Aliphatic amine) ซึ่งมีเอมีนชนิดทุติยภูมิ (Secondary amine) เป็นตัวทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ การที่ DDM มีหมู่ฟังก์ชันที่น้อยกว่า (เอมีนปฐมภูมิ 2 หมู่) ทำให้เมื่อสร้างพันธะแล้วโครงสร้างที่ได้จะเหนียว (Tough) กว่าระบบที่ใช้ TETA (เอมีนปฐมภูมิ 2 หมู่และเอมีนทุติยภูมิ 2 หมู่)

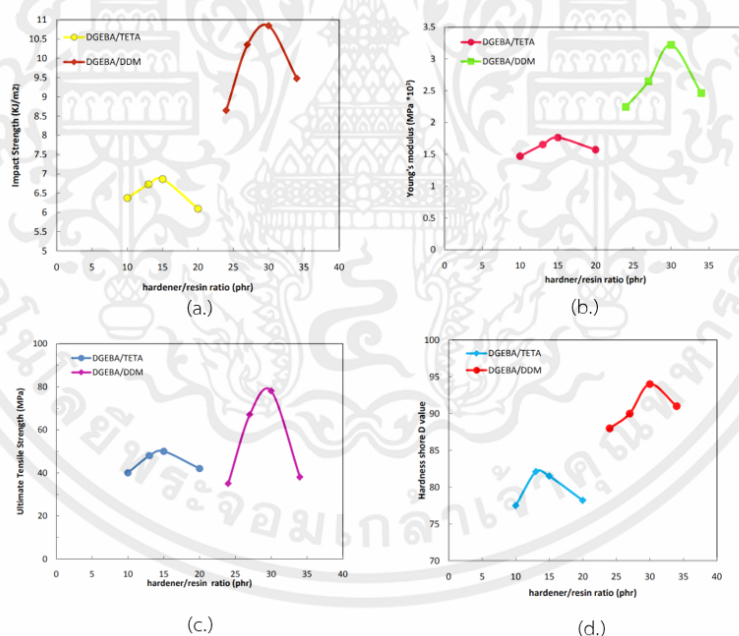
พิจารณาระบบ DGEBA/TETA ที่แต่ละสัดส่วนดังนี้

1. 10 phr (Epoxy rich formulation) มีสมบัติเชิงกลต่ำที่สุด เนื่องจากมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์มาก ซึ่งหมู่อีพอกไซด์นั้นมีมวลโมเลกุลต่ำ เมื่อเกิดพันธะ ความยาวพันธะจะสั้น ส่งผลให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมาก แต่เปราะมากเช่นเดียวกัน เป็นผลมาจากการที่มีความยาวพันธะสั้น ทำให้พันธะอยู่ใกล้กัน ความหนาแน่นของพันธะในโครงสร้างมีมากขึ้น จึงส่งผลให้มีทั้งความแข็งและเปราะ

2. 13 phr (Stoichiometry) แสดงค่าของสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าสูตรเทียบเท่า stoichiometry มีความแข็งแรงมากกว่าสูตร epoxy rich แสดงให้เห็นว่าสูตรเทียบเท่า stoichiometry มีความยืดหยุ่นมากกว่า

3. 15 phr (Amino rich formulation) แสดงค่าสมบัติเชิงกลสูงที่สุดในทุกสูตร แสดงให้เห็นว่าหมู่อะมิโนไฮโดรเจนที่มากขึ้นไปเปิดวงแหวนอีพอกไซด์โดยปฏิกิริยาการเติมหมู่อะมิโน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมากขึ้น

4. 20 phr (Amino rich formulation) แสดงค่าสมบัติเชิงกลต่ำกว่าสูตร 15 phr เนื่องจากมีโมเลกุลของสารเร่งการแข็งตัวที่ไม่เกิดปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความเปราะมากขึ้น



รูปที่ 2.6 สมบัติเชิงกลของลามิเนตจากการศึกษาของ Mariam (a.), ค่าการกระแทก (b.), ค่ายังมอดูลัส (c.), ค่าความเค้นสูงสุด (d.), ค่าความแข็ง

จากการทดลองจะทำการวัดเจลไทม์ของระบบที่ใช้ TETA ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 80 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เท่ากัน ระบบที่ใช้สารเร่งการแข็งตัวมากกว่า จะมีค่าเจลไทม์ที่สั้นลง เนื่องจากที่สัดส่วน 20 phr มีปริมาณหมู่เอมีนที่มากกว่า ซึ่งหมู่เอมีนแสดงถึงความเป็นกรด จึงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงเจลไทม์ของระบบ DGEBA/TETA ที่อัตราส่วน 13 phr ที่อุณหภูมิในช่วง 30-80 °C

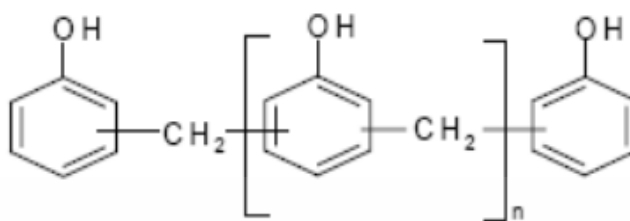
อุณหภูมิ (°C)	30	45	60	80
เจลไทม์ (วินาที)	7,560	2,380	840	360
พลังงานก่อกัมมันต์ (kJ/mol)	63.64			
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (kJ/mol)	0.95			

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงเจลไทม์ของระบบ DGEBA/TETA ที่อัตราส่วน 20 phr ที่อุณหภูมิในช่วง 30-80 °C

อุณหภูมิ (°C)	30	45	60	80
เจลไทม์ (วินาที)	6,600	1,360	330	150
พลังงานก่อกัมมันต์ (kJ/mol)	67.19			
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (kJ/mol)	0.41			

2.7 สารเร่งการแข็งตัว (Curing agent or hardener)

สารเร่งการแข็งตัว เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการบ่มโดยตรง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการบ่ม อัตราการเกิดปฏิกิริยา เจลไทม์ ดิกรีของการบ่ม ความหนืด วัฏจักรการบ่ม และสมบัติสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบ่มแล้ว จากการศึกษาของ Mariam[4] ได้แบ่งสารเร่งการแข็งตัวออกเป็น 3 ชนิด ฟีนอลิก จัดเป็นสารเร่งการแข็งตัวประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเป็นกรด และสามารถให้โปรตอนกับสารอื่นได้ (Active hydrogen compounds) รวมถึงสารประกอบประเภท เอมีน เอไมด์ ไฮดรอกซิล กรดหรือกรดแอนไฮไดรด์



รูปที่ 2.7 สารเร่งการแข็งตัวของเรซินฟีนอลิก

ซึ่งจากการศึกษาของ Mariam จะได้ค่าเจลโคม์ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณสารเร่งการแข็งตัวต่อเจลโคม์ของระบบ

2.8 สารเพิ่มเนื้อและสารเติมแต่ง (Filler and Additive)

สารเพิ่มเนื้อ คือสารที่มีลักษณะเป็นผง ใช้ในงานขึ้นรูปเส้นใยแก้วโดยผสมลงไปในเรซิน เพื่อเพิ่มเนื้อและปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ

สารเติมแต่ง คือสารที่เติมลงไปในเรซินเพื่อปรับเปลี่ยนให้ได้สมบัติของเรซินตามที่ต้องการ โดยปกติสารเติมแต่งจะเข้าไปกระจายตัวอยู่ในเนื้อของเรซินเชิงกายภาพและไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างใดๆ ของเรซิน

จากการศึกษาของ Margit Harsch et al.[5] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารเพิ่มเนื้อและสารเติมแต่งต่อพฤติกรรมการบ่มของอีพ็อกซีเรซินที่มีแอนไฮไดรด์เป็นสารเร่งการแข็งตัว โดยใช้ซิลิกาที่ความเข้มข้นมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารเพิ่มเนื้อ และสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ทำการผสมสารดังตารางที่ 2.3 ใช้วิธี Ozawa และ Kissinger เพื่อศึกษาพลศาสตร์ของสาร แสดงดังตารางที่ 2.4 และใช้วิธี Isothermal DSC ในการอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นต่อเวลาและอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.9

ตารางที่ 2.3 ระบบอีพ็อกซีเรซินที่มีองค์ประกอบของสารเพิ่มเนื้อและสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน

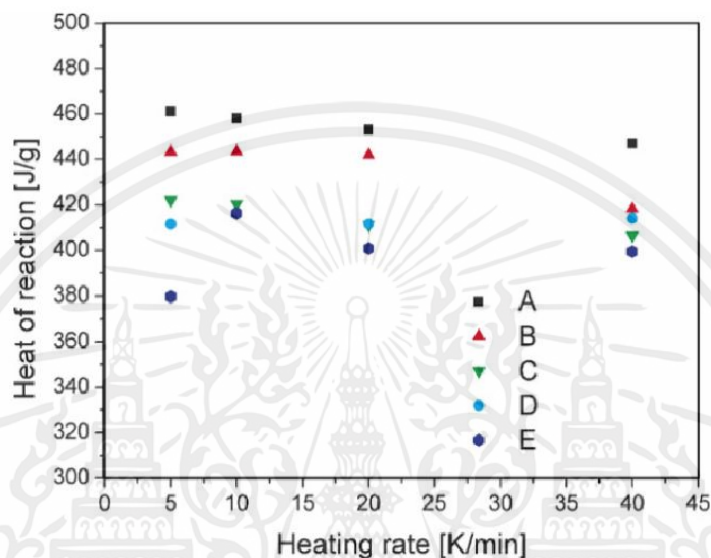
Formulation	Comp. A	Comp. B	Aggregate
A	Resin	Hardener	
B	Resin	Hardener	Liquid additives
C	Resin	Hardener	Liquid and solid additives
D	Resin	Hardener	Liquid and solid additives, modifier, fillers (surface modified)
E	Resin	Hardener	Liquid and solid additives, modifier, fillers (without surface treatment)

ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) ระบบอีพ็อกซีเรซินที่มีองค์ประกอบของสารเพิ่มเนื้อและสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน

Formulation	E_a (Ozawa) / kJ/mol	E_a (Kissinger) / kJ/mol
A	56.7 ± 1.9	52.3 ± 1.8
B	63.3 ± 1.2	59.2 ± 1.3
C	67.2 ± 0.9	63.4 ± 1.0
D	59.2 ± 1.5	55.1 ± 1.5
E	66.9 ± 2.8	61.9 ± 2.8

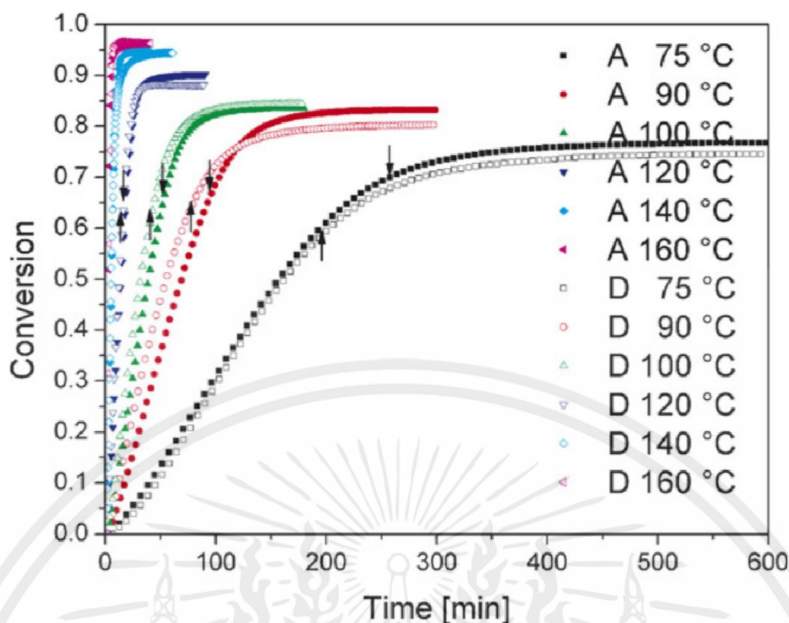
จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงานก่อกัมมันต์ของระบบเมื่อใส่สารเติมแต่ง และมีค่าลดลงเมื่อใส่สารเพิ่มเนื้อ สามารถดูได้จากค่า E_a ของระบบ D ซึ่งมีสารเพิ่มเนื้อที่ได้รับการปรับแต่งผิวที่น้อยกว่าระบบอื่น ๆ โดยที่ระบบ E ที่มีการใส่สารเพิ่มเนื้อที่ไม่ได้รับการปรับแต่งผิว สามารถสรุปได้ว่าสารเพิ่มเนื้อที่ได้รับการปรับแต่งผิวจะเร่งการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาพลศาสตร์ของอีพ็อกซีเรซินระบบ A และระบบ D โดยวิธี Dynamic DSC (Nonisothermal curing) สารเติมแต่งมีอิทธิพลต่อระบบอีพ็อกซีเรซิน โดยสามารถเพิ่มพลังงานก่อกัมมันต์ของระบบ ทำให้การเกิดพันธะระหว่างสารเกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (Heat of reaction) ลดลง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความร้อนที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีเรซินแต่ละระบบที่ Nonisothermal curing

เมื่อหาค่าเจลไทม์ของระบบ A และ D สำหรับ Isothermal curing ได้ผลดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นของระบบ A และระบบ D ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (75, 90, 100, 120, 140 และ 160 °C) และมีเจลไทม์ดังลูกศรแสดง



รูปที่ 2.9 อัตราการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นของระบบ A และระบบ D ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงค่าเจลไทม์ที่ลดลง และอัตราการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นของระบบ A และระบบ D ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ โดยที่ระบบ A คือระบบที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและสารเพิ่มเนื้อ และระบบ D คือระบบที่ใส่สารเติมแต่งและสารเพิ่มเนื้อที่ได้รับการปรับแต่งผิวแล้ว

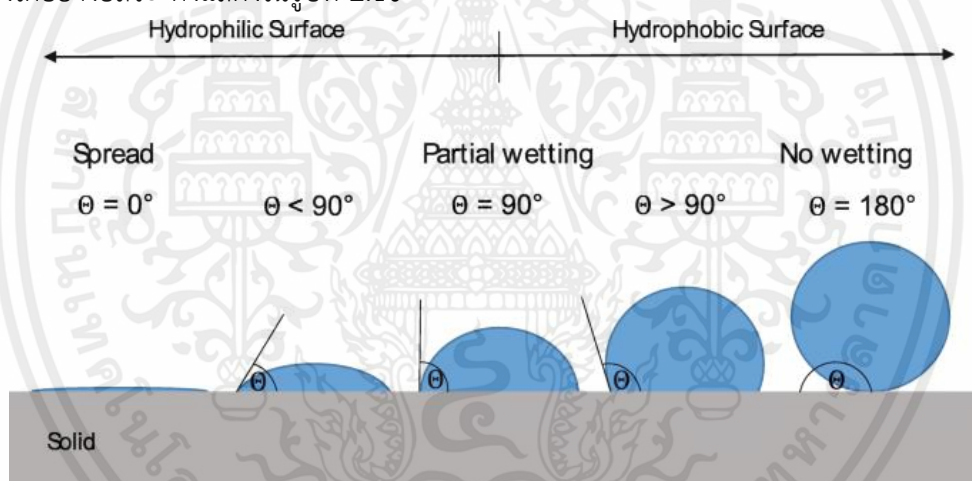
Margit Harsch et al.[5] สรุปผลการศึกษานี้ว่า การใส่สารเติมแต่งจะเพิ่มพลังงานก่อกัมมันต์ของระบบ และลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาลง ในขณะที่การใส่สารเพิ่มเนื้อนั้นจะทำให้เจลไทม์ของระบบลดลง

2.9 คุณสมบัติทางพื้นผิวและมุมสัมผัส (Wettability and Contact angle)

คุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) คือ ลักษณะของของเหลวที่ยึดเกาะอยู่บนผิวของของแข็ง ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงสองแรง ได้แก่ แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกัน ทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเป็นหยด เพื่อลดพื้นที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง และแรงยึดติด (Adhesive force) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งหมายถึงแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลวและของแข็ง ทำให้โมเลกุลของของเหลวแผ่ตัวออกจากกัน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสและกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง เมื่อพิจารณาแล้วแรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ของเหลวจะกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง หากแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ของเหลวจะไม่เกาะกับผิวของของแข็งแต่เกาะกลุ่มหรือหดตัวเป็นหยดอยู่บนผิวของของแข็ง ซึ่งปัจจัยที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) คือมุมสัมผัส (Contact angle) โดยที่ค่ามุมสัมผัสน้อย แสดงว่าของเหลวนั้นกระจายแนบบนผิวของของแข็งได้ดี

มุมสัมผัส (Contact angle) คือ มุมระหว่างหยดของของเหลวเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่พื้นผิวทั้งสองเกาะกัน มุมสัมผัสสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ของของเหลวได้ โดยแบ่งเกณฑ์ดังนี้

1. มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา แสดงถึงแรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของเหลวบาง ๆ ครอบคลุมพื้นผิวของของแข็ง
2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 – 90 องศา ของเหลวจะกระจายไปบนผิว แต่ยังมีของเหลวบางส่วนที่เกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง
3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 180 องศา กรณีนี้จะเกิดการกระจายและแนบกับผิวของแข็งได้ยาก ของเหลวจะรวมตัวกันเป็นหยดค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็กๆ ที่ฐานของหยดที่ยังคงแตะกับผิวของของแข็ง
4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศา กรณีนี้ของเหลวจะไม่เกิดการกระจายและไม่แนบกับผิวของของแข็ง สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อแรงเชื่อมแน่นมีค่ามากกว่าแรงยึดติดมาก ๆ ของเหลวจะรวมตัวกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งมีพื้นที่ที่เล็กมาก อยู่บริเวณฐานของทรงกลม ทำให้ของเหลวสามารถเคลื่อนที่ไปมาบนผิวของของแข็งได้อย่างอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



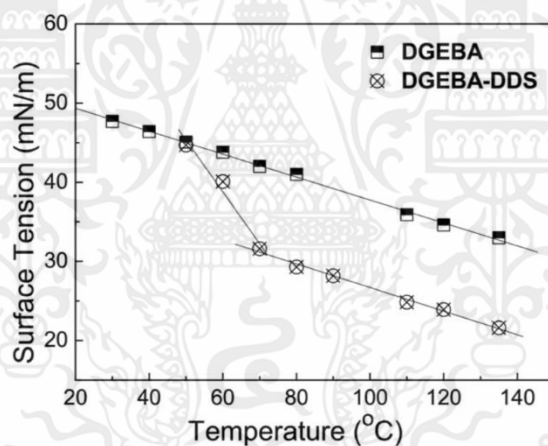
รูปที่ 2.10 ลักษณะของของเหลวบนพื้นผิวของแข็งที่มุมสัมผัสตั้งแต่ 0 – 180 องศา

จากการศึกษาของ Min Li, et al.[6] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ระหว่างเส้นใยคาร์บอน 3 ชนิด (CF; carbon fiber) ได้แก่ T300, T300 ที่ลดขนาดลง และ T700 และระบบอีพ็อกซี (DGEBA/DDS) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ สารเร่งการแข็งตัว และกระบวนการอบเรซิน

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางพื้นผิว (Surface properties) ของเส้นใยคาร์บอน (CFs) แต่ละชนิด

ชนิดของเส้นใย	พลังงานพื้นผิว (SE, mJ/m ²)	Dispersive component (mJ/m ²)	Polar component (mJ/m ²)	คุณสมบัติการมีขี้	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)
T300	40.30	31.17	9.13	0.23	7.1 ± 0.1
Desized T300	45.15	39.71	5.55	0.12	6.9 ± 0.2
T700	49.29	32.71	16.58	0.34	7.1 ± 0.3

พลังงานที่พื้นผิวของเส้นใยคาร์บอน (CF SEs), คุณสมบัติการมีขี้ และการกระจายตัวของของเหลว แสดงดังตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ คุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ระหว่างเรซินที่อบแล้วและเส้นใยคาร์บอนยังถูกวิเคราะห์จากความหนืดของเรซิน ดัชนีของการอบ และปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบอีพ็อกซี และเมื่อวัดค่าแรงตึงผิวของอีพ็อกซีภายใต้อุณหภูมิในช่วง 20 – 140 °C ได้ผลดังรูปที่ 2.11

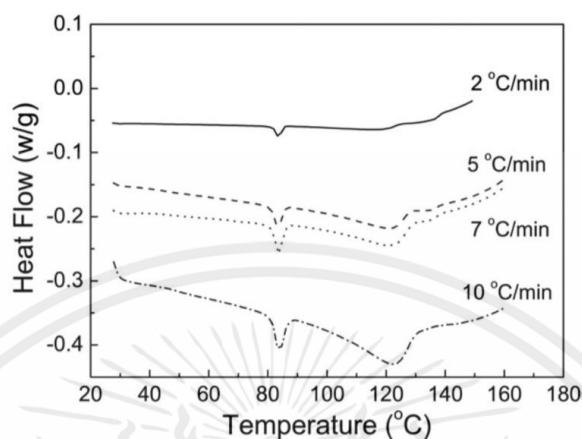


รูปที่ 2.11 ค่าแรงตึงผิวของระบบอีพ็อกซี (DGEBA และ DGEBA/DDS) ที่ช่วงอุณหภูมิ 20 – 140 °C

จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงตึงผิวของระบบอีพ็อกซีที่ไม่เติมสารเร่งการแข็งตัวจะลดลงเป็นเส้นตรง ในขณะที่แรงตึงผิวของระบบอีพ็อกซีที่มีการเติมสารเร่งการแข็งตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 50 – 70 °C และจะลดลงต่อเนื่องเป็นเส้นตรง

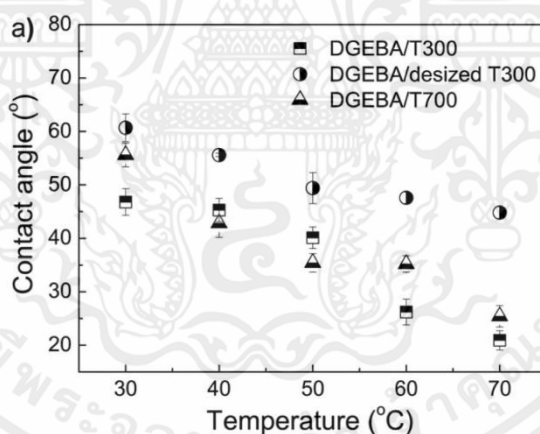
การทดลองใช้เทคนิค DSC ในการทดสอบและระบุได้ว่าสาร DDS สามารถละลายใน DGEBA ที่อุณหภูมิ 83 °C ซึ่งมีการสันนิษฐานเพิ่มเติมว่าอาจเริ่มละลายตั้งแต่อุณหภูมิ 70 °C อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ของระบบ DGEBA/DDS ในระหว่างการวัดค่าแรงตึงผิว (SFT) มีค่าค่อนข้างเร็ว ทำให้สามารถยับยั้งการ

เกิดปฏิกิริยาเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ของสารตั้งต้น รวมถึงสถานะการละลายของ DDS ใน DGEBA ส่งผลต่อพฤติกรรมของคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ของเรซินเหลวบนเส้นใยคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อัตราการเพิ่มความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 20 – 180 °C โดยมี Ramping rates ที่ 2, 5, 7 และ 10 °C/min ตามลำดับ ทดสอบโดยเทคนิค DSC

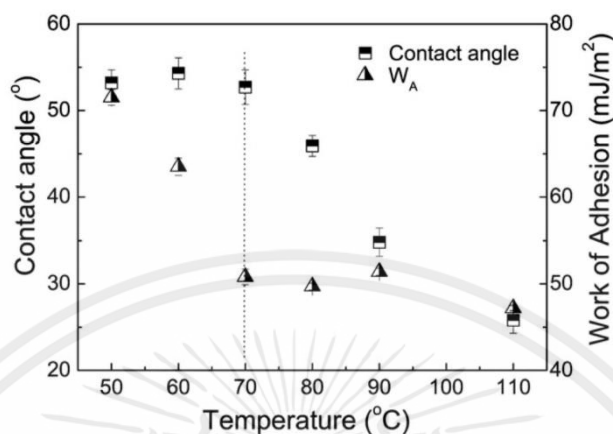
เมื่อวัดค่ามุมสัมผัส (CA) เทียบกับอุณหภูมิในช่วง 30 – 70 °C ได้ผลดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ค่ามุมสัมผัสระหว่างระบบอีพ็อกซี (DGEBA) และเส้นใยคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิในช่วง 30 – 70 °C

จากรูปที่ 2.13 ค่ามุมสัมผัสของระบบอีพ็อกซีและเส้นใยคาร์บอนชนิดต่าง ๆ จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานพื้นผิว และคุณสมบัติการมีขั้วของเส้นใยคาร์บอนแต่ละชนิดแล้วพบว่า ขนาดของผิวสัมผัสของเส้นใยคาร์บอนนั้นมีผลต่อคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ของระบบอีพ็อกซีและเส้นใยคาร์บอนมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ

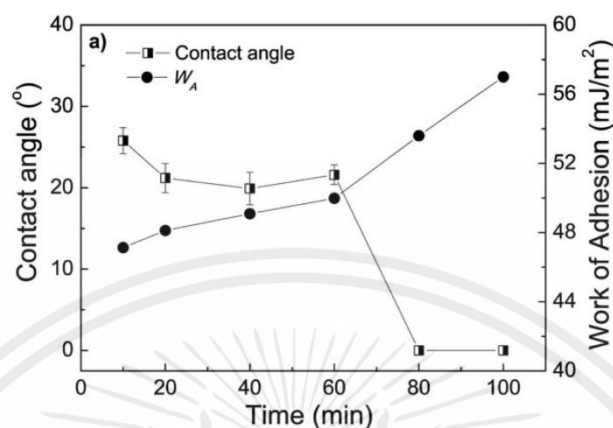
เมื่อวัดค่ามุมสัมผัสกับระบบอีพ็อกซีที่มีการเติมสารเร่งการแข็งตัว (DGEBA/DDS) กับเส้นใยคาร์บอนชนิด T700 ได้ผลดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ค่ามุมสัมผัสระหว่างระบบอีพ็อกซีที่เติมสารเร่งการแข็งตัว (DGEBA/DDS) และเส้นใยคาร์บอนชนิด T700 และ Work of Adhesion (W_A) ซึ่งเป็นงานที่ใช้ในการแยกของเหลวออกจากของแข็งที่อุณหภูมิในช่วง 50 – 110 °C

จากรูปที่ 2.14 ค่ามุมสัมผัสที่อุณหภูมิ 50 – 70 °C นั้นมีค่าค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ค่า W_A ลดลงอย่างมาก ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการลดลงของแรงตึงผิวดังรูปที่ 2.11 ณ อุณหภูมิในช่วงเดียวกัน สามารถอนุมานได้ว่า พฤติกรรมของคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ของระบบ DGEBA/DDS และเส้นใยคาร์บอน T700 สัมพันธ์กับ พฤติกรรมการละลายของ DDS ใน DGEBA เมื่อเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของระบบ DGEBA/T700 และ DGEBA-DDS/T700 ที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่ามุมสัมผัสของระบบ DGEBA-DDS/T700 มีมุมกว้างกว่าระบบ DGEBA/T700 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ที่ต่ำกว่าระบบที่ไม่มีการเติมสารเร่งการแข็งตัว จากรูปที่ 2.11 – 2.14 สามารถบอกได้ว่าคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ของระบบ DGEBA-DDS/T700 จะเกิดได้ดีที่ อุณหภูมิตั้งแต่ 70 °C แสดงว่าสภาวะการละลายของ DDS ใน DGEBA ส่งผลต่อคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ในขณะที่ระบบ DGEBA/CFs มีเพียงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability)

เมื่อนำเรซินที่ถูกอบที่อุณหภูมิ 110 °C ไปวัดหาค่ามุมสัมผัสและค่า W_A ที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 0 – 80 นาที ได้ผลดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ค่ามุมสัมผัสและค่า W_A ของระบบที่อุณหภูมิ 110 °C ที่เวลาตั้งแต่ 2 – 100 นาที

จากรูปที่ 2.15 ค่ามุมสัมผัส ของระบบ DGEBA-DDS/T700 ลดลงของ ในขณะที่ค่า W_A มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และค่ามุมสัมผัสจะเท่ากับ 0 ที่เวลา 80 นาที

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ค่ามุมสัมผัส (CA) จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ และค่า W_A ของระบบยังเพิ่มขึ้นเมื่อกระบวนการอบดำเนินต่อ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์

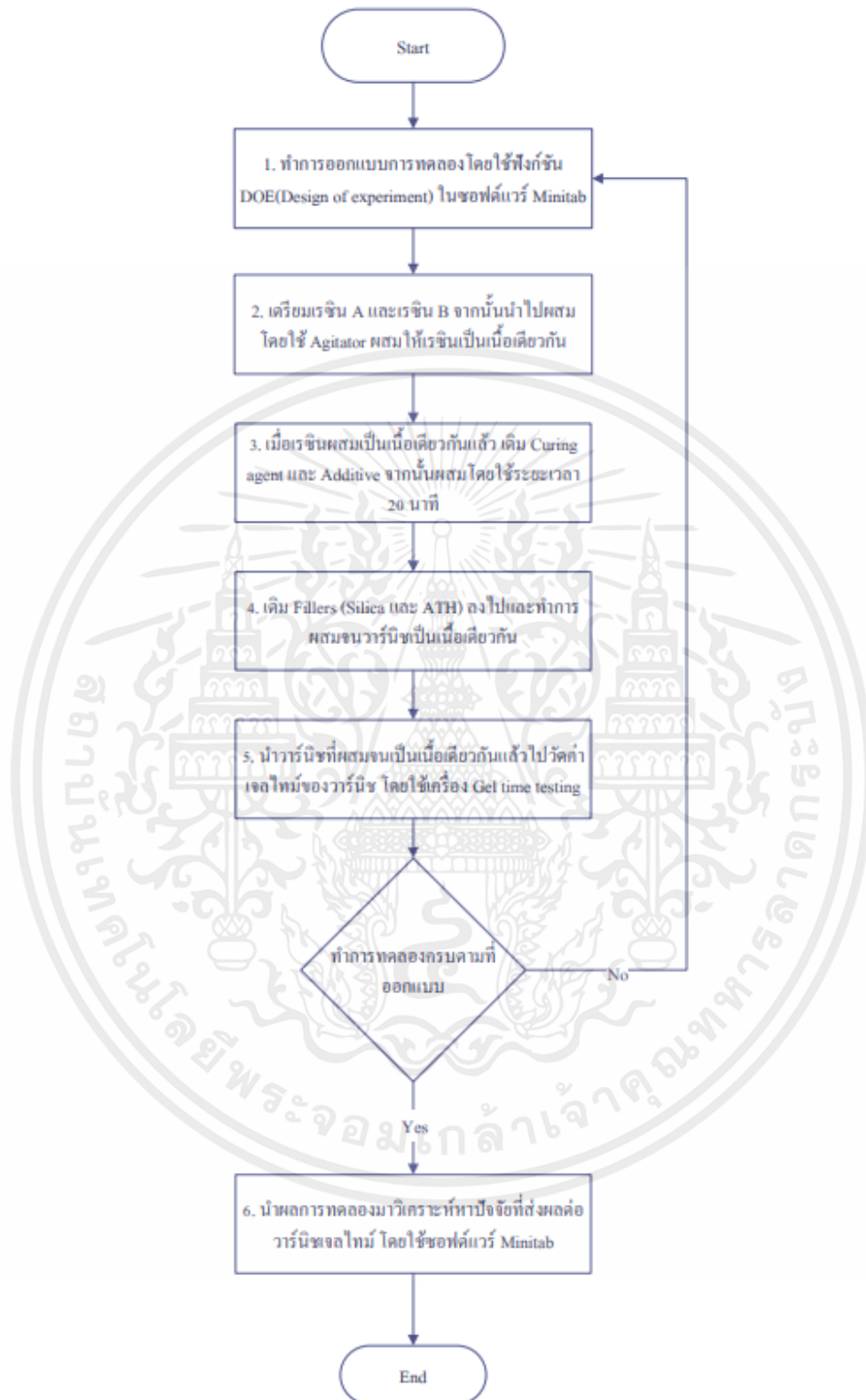
1. ปีกเกอร์ปริมาตร 250 1,000 และ 2,000 มิลลิลิตร
2. เครื่องชั่งสาร
3. เครื่องปั่นกวนแบบใบพัด
4. แท่งแก้วคนสาร
5. ดรอปเปอร์
6. เครื่องวัดมุมสัมผัส
7. เข็มหยดเรซิน
8. ผ้าไฟเบอร์กลาส
9. เครื่องทดสอบเจลไทม์แบบ Hot plate

3.1.2 สารเคมี

1. เรซิน A
2. เรซิน B
3. สารเร่งการแข็งตัวประเภทฟีนอลิก (Curing agent or hardener)
4. สารเติมแต่ง (Additive)
5. สารเพิ่มเนื้อ (Silica และ ATH)
6. เมทิลเอทิลคีโตน (MEK)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทดลองการเพื่อทดสอบเจลไทม์ของวาร์นิช



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองเพื่อทดสอบเจลไทม์ของวาร์นิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การผสมวาร์นิช (Varnish)

- 1) ชั่งเรซินชนิด A และชนิด B ตามสัดส่วนที่ทางโรงงานกำหนด แสดงดังตารางที่ 4.1
- 2) ปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันในบีกเกอร์ โดยใช้เครื่องปั่นกวนแบบใบพัด เป็นระยะเวลา 30 นาที
- 3) ชั่ง Curing agent และ Additive ตามสัดส่วนดังตารางที่ 4.1
- 4) เทผสมในบีกเกอร์ และปั่นกวนต่อเป็นระยะเวลา 20 นาที
- 5) ชั่ง Filler ได้แก่ Silica และ ATH ตามสัดส่วนดังตารางที่ 4.1
- 6) เทผสมในบีกเกอร์ และปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นระยะเวลา 30 นาที

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสูตรการผสมวาร์นิช

Raw material	Formulation
Resin A	60-70 phr
Resin B	30-40 phr
Curing agent	0.1-0.5 % ของ Resin
Additive	1-2 % ของ Filler
Filler-Silica	รวมทั้ง 2 ชนิดไม่เกิน 35-40 phr
Filler-ATH	

3.2.2 การทดสอบเจลไทม์

- 1) นำวาร์นิชก่อนเติม Filler ไปทดสอบ Gel time ด้วยเครื่อง Gel time tester เป็นจำนวน 3 ครั้ง
- 2) นำวาร์นิชหลังเติม Filler ไปทดสอบ Gel time ด้วยเครื่อง Gel time tester เป็นจำนวน 3 ครั้ง

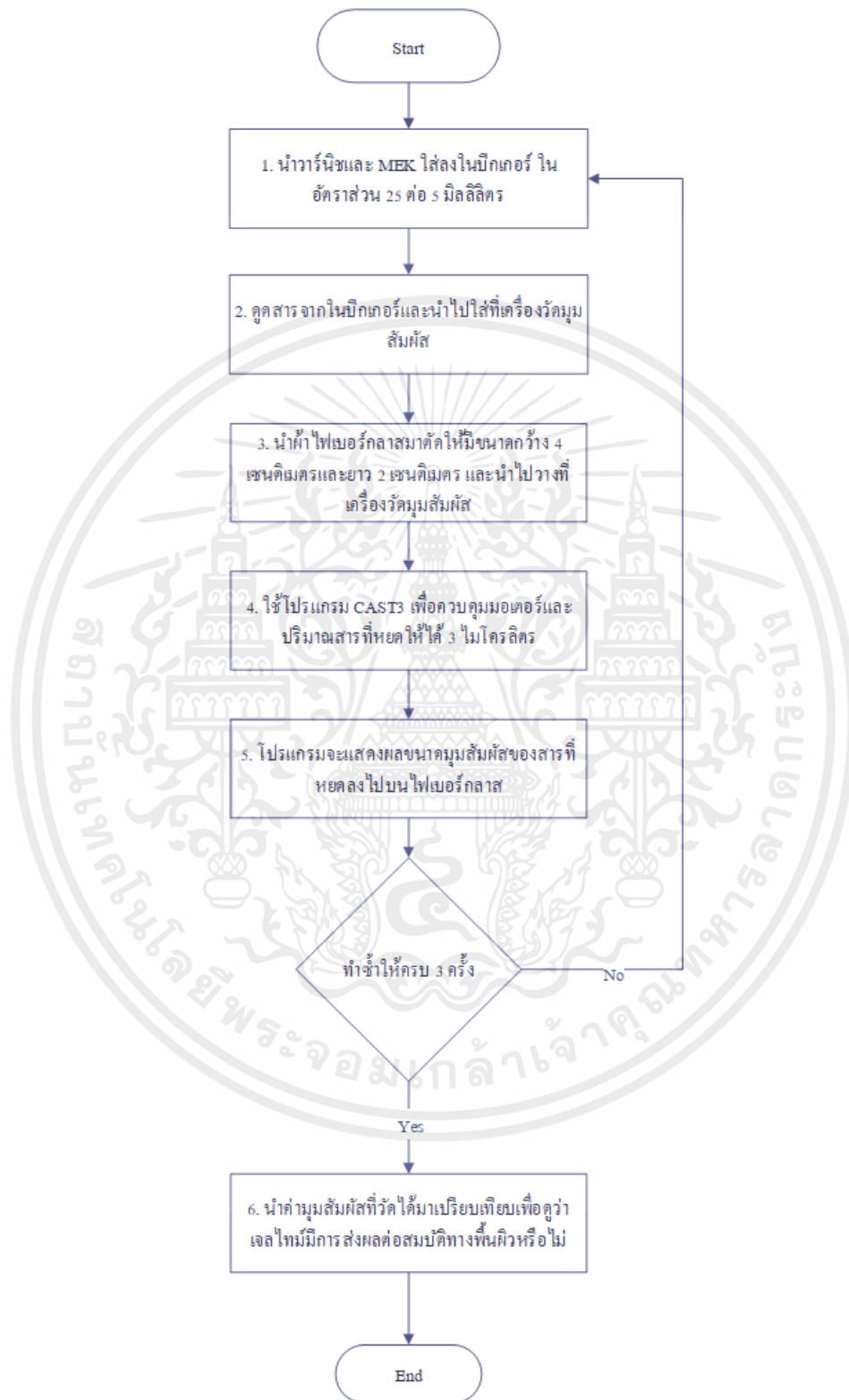
3.2.3 การประเมินผล

นำผล Gel time ที่ได้จากทุก ๆ การทดลอง มาวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ของวาร์นิช ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Minitab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability)

3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางพื้นผิว (Wettability)



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนเพื่อทดสอบสมบัติทางพื้นผิว (Wettability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองเพื่อทดสอบเจลไทม์ของวาร์นิช

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิช

ครั้งที่	Resin A (phr)	Resin B (phr)	Curing agent (% of resin)	Additive (% of fillers)	Fillers (phr)	Gel time (sec)
1	70	30	0.1	1	40	288.4
2	70	30	0.5	1	40	58.4
3	60	40	0.1	1	40	306.6
4	60	40	0.5	1	40	62.9
5	70	30	0.1	2	36	284.1
6	70	30	0.5	2	35	69.9
7	60	40	0.1	2	36	318.5
8	60	40	0.5	2	35	71.7
9	70	30	0.1	1	38	275.4
10	60	40	0.1	1	38	313.7
11	70	30	0.5	1	38	67.1
12	60	40	0.5	1	38	71.6
13	70	30	0.1	2	37	302.9
14	60	40	0.1	2	37	298.4
15	70	30	0.5	2	39	58.0
16	60	40	0.5	2	39	61.1

จากตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนการทดลองและสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิชในแต่ละการทดลอง ซึ่งได้มาจากการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชัน DOE(Design of experimental) ในซอฟต์แวร์ Minitab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในหน่วยกรัม

ครั้งที่	Resin A (g)	Resin B (g)	Curing agent (g)	Additive (g)	Fillers (g)	Gel time (sec)
1	249.11	106.76	0.3559	1.4235	142.35	288.4
2	248.40	106.46	1.7743	1.4194	141.94	58.4
3	213.52	142.35	0.3559	1.4235	142.35	306.6
4	212.92	141.94	1.7743	1.4194	141.94	62.9
5	255.81	109.63	0.3654	2.6312	131.56	284.1
6	256.98	110.13	1.8355	2.5697	128.49	69.9
7	219.27	146.18	0.3654	2.6312	131.56	318.5
8	220.26	146.84	1.8355	2.5697	128.49	71.7
9	252.74	108.32	0.3611	1.3720	137.20	275.4
10	216.64	144.43	0.3611	1.3720	137.20	313.7
11	252.02	108.01	1.8001	1.3681	136.81	67.1
12	216.01	144.01	1.8001	1.3681	136.81	71.6
13	253.92	108.82	0.3627	2.6842	134.21	302.9
14	217.64	145.09	0.3627	2.6842	134.21	298.4
15	249.50	106.93	1.7821	2.7801	139.01	58.0
16	213.88	142.57	1.7821	2.7801	139.01	61.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองเพิ่มเติม

จากการทดลองทั้ง 16 การทดลอง ทางผู้จัดทำได้ทำการทดลองเพิ่มอีก 6 การทดลอง รวมเป็น 22 การทดลอง โดย 6 การทดลองนี้แบ่งเป็น การทำซ้ำ 4 การทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของการทดลอง และการทดลองโดยการเปลี่ยนปริมาณสารเติมแต่ง 2 การทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิชของการทดลองเพิ่มเติม

ครั้งที่	Resin A (phr)	Resin B (phr)	Curing agent (% of resin)	Additive (% of fillers)	Fillers (phr)	Gel time (sec)
1	70	30	0.1	1	40	258.9
2	70	30	0.1	1	35	260.0
3	60	40	0.1	1	40	292.1
4	60	40	0.1	1	35	299.5
5	60	40	0.1	2	38	293.9
6	70	30	0.5	2	38	62.3

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในหน่วยกรัมของการทดลองเพิ่มเติม

ครั้งที่	Resin A (g)	Resin B (g)	Curing agent (g)	Additive (g)	Fillers (g)	Gel time (g)
1	249.11	106.76	0.3558	1.4235	142.35	258.9
2	258.40	110.74	0.3691	1.2920	129.20	260.0
3	213.52	142.35	0.3558	1.4235	142.35	292.1
4	221.48	147.66	0.3691	1.2920	129.20	299.5
5	216.04	144.03	0.3601	2.7366	136.83	293.9
6	251.33	107.71	1.7952	2.7287	136.46	62.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองการวัดค่ามอดุลัสเพื่อเทียบเปรียบผ้าไฟเบอร์กลาส

ตารางที่ 4.5 ค่ามอดุลัสของการทดลองที่ใช้ผ้าไฟเบอร์กลาสต่างกัน

ผ้าไฟเบอร์กลาส	ค่ามอดุลัสเฉลี่ย(องศา)	
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2
GF(I708)	80.9	81.8
FT(A904)	91.4	92.6
FT(A804)	74.8	70.4
TB(411A)	86.9	89.8

การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของผ้าไฟเบอร์กลาสแต่ละชนิดโดยใช้วาร์นิชจากการทดลองที่ 5 โดยใช้สัดส่วนเรซิน A และ B 70 phr ต่อ 30 phr สารเร่งการแข็งตัว 0.1% ของเรซิน สารเติมแต่ง 2% ของสารเพิ่มเนื้อ และสารเพิ่มเนื้อ 36 phr โดยกำหนดอัตราส่วนวาร์นิชต่อตัวทำละลายเป็น 25 ต่อ 5 มิลลิลิตร ซึ่งทำการทดลอง 2 ครั้ง เพื่อความแม่นยำของผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทดสอบวาร์นิชชนิดเดียวกันกับผ้าไฟเบอร์กลาสชนิดต่างกันจะทำให้ได้ค่ามอดุลัสที่แตกต่างกัน และจากการศึกษาของ Min Li, et al. ที่กล่าวว่าค่ามอดุลัสสามารถเชื่อมโยงถึงคุณสมบัติทางพื้นผิวได้ ดังนั้น จากผลที่ได้จึงมีความเป็นไปได้ในการใช้ค่ามอดุลัสในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติทางพื้นผิว และใช้ในการเลือกจับคู่ระหว่างเรซินและผ้าไฟเบอร์กลาสเพื่อให้ได้พีเรพอกที่มีเจลไทม์ตามความต้องการ

4.4 ผลการทดลองการวัดค่ามอดุลัสของการทดลองที่มีเจลไทม์ต่างกัน

ตารางที่ 4.6 ค่ามอดุลัสของการทดลองที่มีเจลไทม์ต่างกัน

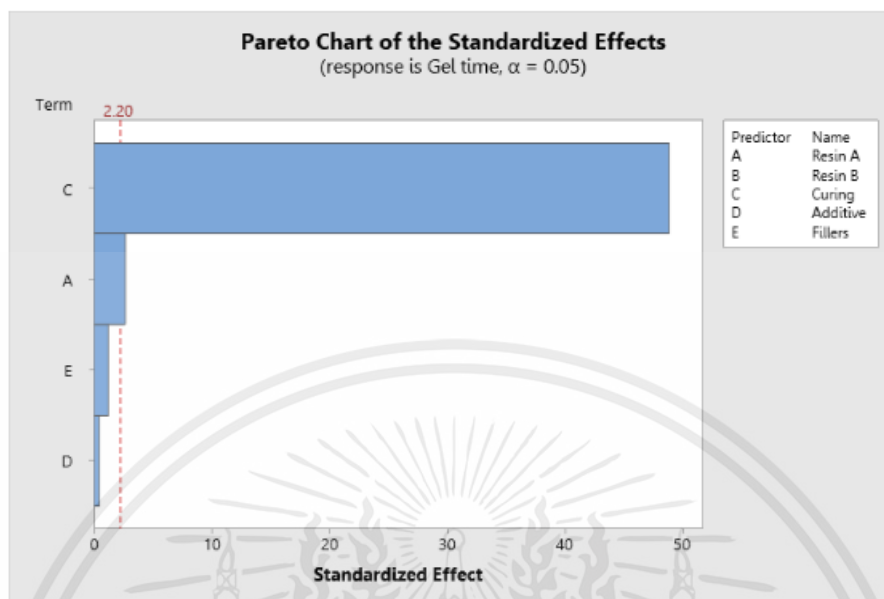
การทดลอง	เจลไทม์ (วินาที)	ค่ามอดุลัสเฉลี่ย (องศา)
การทดลองที่ 7	318.5	41.1
การทดลองที่ 15	58.0	50.5

การทดลองการวัดค่ามอดุลัสของการทดลองที่มีเจลไทม์ต่างกัน โดยในการทดลองที่ 7 ใช้สัดส่วนเรซิน A และ B 60 phr ต่อ 40 phr สารเร่งการแข็งตัว 0.1% ของเรซิน สารเติมแต่ง 1% ของสารเพิ่มเนื้อ และสารเพิ่มเนื้อ 36 phr และการทดลองที่ 15 ใช้สัดส่วนเรซิน A และ B 70 phr ต่อ 30 phr สารเร่งการแข็งตัว 0.5% ของเรซิน สารเติมแต่ง 2% ของสารเพิ่มเนื้อ และสารเพิ่มเนื้อ 39 phr

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 นำค่าเจลไทม์มาวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์มินิแทบ ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ของวาร์นิช

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์มากที่สุด คือ สารเร่งการแข็งตัว ซึ่งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับอีพ็อกซีเรซิน จากการทดลอง การใส่สารเร่งการแข็งตัวในปริมาณมากจะทำให้เจลไทม์มีค่าน้อย ในทางตรงกันข้าม หากใส่ในปริมาณน้อยจะทำให้เจลไทม์มีค่ามาก ซึ่งเป็นไปตามการศึกษาของ Mariam ที่ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณสารเร่งการแข็งตัวต่อเจลไทม์ของระบบ

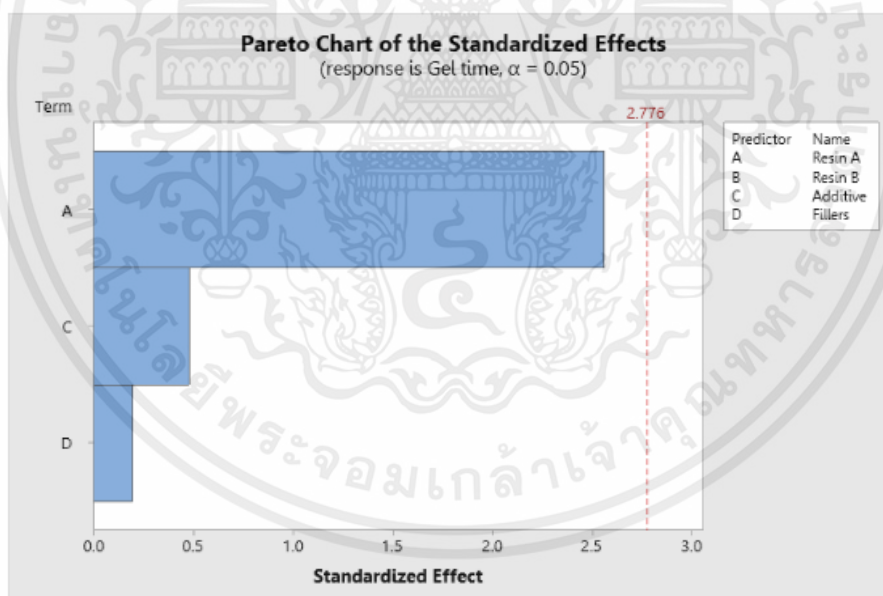
อย่างไรก็ตาม ในการปรับปรุงกระบวนการการผลิตพรีเฟรกและลามิเนต ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมเจลไทม์ของระบบ ไม่สามารถใช้ปริมาณของสารเร่งการแข็งตัวเพียงอย่างเดียว ทำให้จำเป็นต้องวิเคราะห์ผลโดยควบคุมปริมาณของสารเร่งการแข็งตัว โดยแสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิชที่มีปริมาณของสารเร่งการแข็งตัวอยู่ที่ 0.1 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Resin A (phr)	Resin B (phr)	Curing agent (% of resin)	Additive (% of fillers)	Fillers (phr)	Gel time (sec)
70	30	0.1	1	40	288.4
60	40	0.1	1	40	306.6
70	30	0.1	2	36	284.1
60	40	0.1	2	36	318.5
70	30	0.1	1	38	275.4
60	40	0.1	1	38	313.7
70	30	0.1	2	37	302.9
60	40	0.1	2	37	298.4

จากตารางที่ 4.6 นำค่าเจลไทม์มาวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์มินิแทบ ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ของวารินิซเมื่อควบคุมปริมาณของสารเร่งการแข็งตัวอยู่ที่ 0.1% ของเรซิน

จากรูปที่ 4.2 ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยควบคุมปริมาณสารเติมแต่งที่ 0.1% ของอีพ็อกซีเรซิน แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์มากที่สุด คือ สัดส่วนของอีพ็อกซีเรซิน รองลงมา คือ สารเติมแต่ง และปัจจัยที่

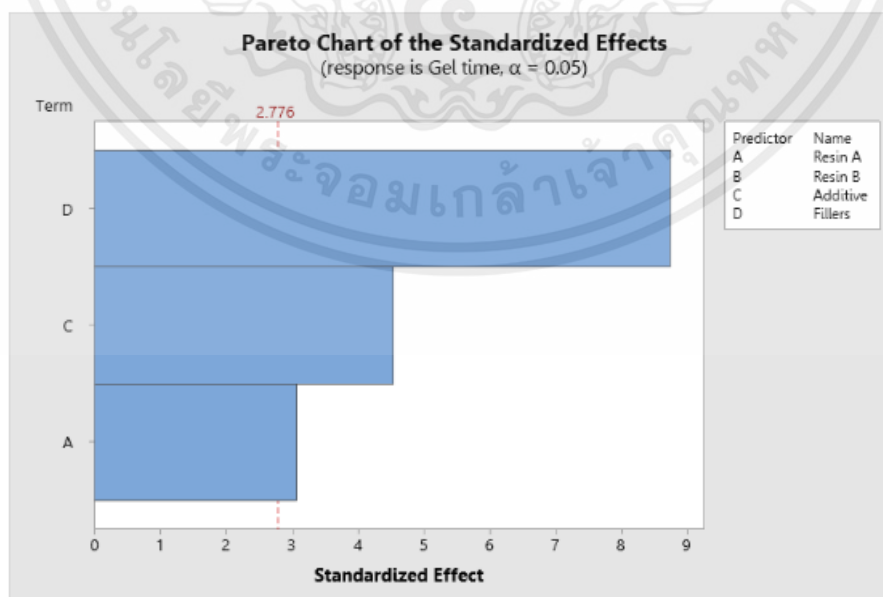
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลน้อยที่สุด คือ สารเพิ่มเนื้อ แต่จากกราฟ จะเห็นว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเจลไหม้ เนื่องจาก กราฟแท่งมีค่าน้อยกว่า line label ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงถึงความมีนัยสำคัญของปัจจัยเหล่านั้น

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมวาร์นิชที่มีปริมาณของสารเร่งการแข็งตัวอยู่ที่ 0.5 %

Resin A (phr)	Resin B (phr)	Curing agent (% of resin)	Additive (% of fillers)	Fillers (phr)	Gel time (sec)
70	30	0.5	1	40	58.4
60	40	0.5	1	40	62.9
70	30	0.5	2	35	69.9
60	40	0.5	2	35	71.7
70	30	0.5	1	38	67.1
60	40	0.5	1	38	71.6
70	30	0.5	2	39	58.0
60	40	0.5	2	39	61.1

จากตารางที่ 4.7 นำค่าเจลไหม้มาวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์มินิแทบ ได้ผลดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ของวารินิซเมื่อควบคุมปริมาณของสารเร่งการแข็งตัวอยู่ที่ 0.5% ของเรซิน

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยควบคุมปริมาณสารเติมแต่งที่ 0.5% ของอีพ็อกซีเรซิน แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์มากที่สุด คือ สารเพิ่มเนื้อ รองลงมา คือ สารเติมแต่ง และปัจจัยที่ส่งผลน้อยที่สุด คือ สัดส่วนของอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งกราฟแท่งของปัจจัยเหล่านี้มีค่ามากกว่า line label ดังนั้น ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเจลไทม์

ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบผลของเจลไทม์เมื่อทำการปรับสัดส่วนของสารเติมแต่ง (Additive)

Resin A (phr)	Resin B (phr)	Curing agent (% of resin)	Additive (% of fillers)	Fillers (phr)	Gel time (sec)
60	40	0.1	1	38	313.7
60	40	0.1	2	38	293.9
70	30	0.5	1	38	67.1
70	30	0.5	2	38	62.3

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณสารเติมแต่ง โดยที่ควบคุมปริมาณสารอื่นๆ ให้คงที่ จะทำให้เจลไทม์มีค่าน้อยลง ซึ่งขัดแย้งกับการศึกษาของ Margit Harsch et al. ที่ศึกษาถึงอิทธิพลของสารเติมแต่งและสารเพิ่มเนื้อต่อค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของระบบอีพ็อกซีเรซิน โดยจากการศึกษา การใส่สารเติมแต่งจะทำให้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของระบบมีค่ามากขึ้น ซึ่งควรจะทำให้เจลไทม์มีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบผลของเจลไทม์เมื่อทำการปรับสัดส่วนของสารเพิ่มเนื้อ (Fillers)

Resin A (phr)	Resin B (phr)	Curing agent (% of resin)	Additive (% of fillers)	Fillers (phr)	Gel time (sec)
------------------	------------------	------------------------------	----------------------------	------------------	-------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

70	30	0.1	1	40	258.9
70	30	0.1	1	35	260.0
60	40	0.1	1	40	292.1
60	40	0.1	1	35	299.5

จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณสารเพิ่มเนื้อ โดยที่ควบคุมปริมาณสารอื่นๆ ให้คงที่ จะทำให้เจลโม่มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับการศึกษาของ Margit Harsch et al. โดยจากการศึกษา การใส่สารเพิ่มเนื้อจะทำให้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของระบบมีค่าน้อยลง ซึ่งจะทำให้เจลโม่มีค่าน้อยลงตามไปด้วย

4.6 วิเคราะห์ผลค่ามุมสัมผัสเปรียบเทียบระหว่างวาร์นิชที่มีเจลโม่มากและน้อย

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า มุมสัมผัสของอีพ็อกซีเรซินที่มีค่าเจลโม่มากกว่าจะมีค่าน้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากเรซินที่มีเจลโม่มากกว่าจะใช้เวลาในการแข็งตัวนานกว่า ทำให้เรซินสามารถซึมเข้าไปในเนื้อผ้าไฟเบอร์กลาสได้มากกว่า ส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า ซึ่งค่ามุมสัมผัสสามารถบอกได้ถึงสมบัติทางพื้นผิว (Wettability) ระหว่างเรซินและไฟเบอร์กลาสได้ โดยที่ค่ามุมสัมผัสน้อยหมายถึงมีสมบัติทางพื้นผิวที่ดี ดังนั้นเรซินที่มีเจลโม่มากจะมีสมบัติทางพื้นผิวที่ดีกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในส่วนของการผสมวาร์นิชและการทดสอบเจลไทม์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 22 การทดลอง แบ่งเป็น การทดลองที่ได้รับการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์มินิแทบ 16 การทดลอง และการทดลองเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้อง 6 การทดลองพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์ของวาร์นิชมากที่สุด คือ สารเร่งการแข็งตัว ซึ่งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับอีพอกซีเรซิน อย่างไรก็ตาม สารเร่งการแข็งตัวมีอิทธิพลต่อเจลไทม์ที่มากเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสมในการปรับเปลี่ยนสัดส่วนเพื่อปรับปรุงกระบวนการการผลิตพีเรกและลามิเนต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ผลโดยที่ควบคุมสัดส่วนของสารเร่งการแข็งตัวให้คงที่ พบว่า เมื่อควบคุมสัดส่วนของสารเร่งการแข็งตัวไว้ที่ 0.1% ของเรซิน ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์มากที่สุด คือ สัดส่วนของเรซิน รองลงมาคือ ปริมาณของสารเติมแต่ง และ ปริมาณของสารเพิ่มเนื้อ และเมื่อควบคุมสัดส่วนของสารเร่งการแข็งตัวไว้ที่ 0.5% ของเรซิน ปัจจัยที่ส่งผลต่อเจลไทม์มากที่สุด คือ ปริมาณของสารเพิ่มเนื้อ รองลงมาคือ ปริมาณของสารเติมแต่ง และ สัดส่วนของเรซิน โดยที่การเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่งและสารเพิ่มเนื้อจะทำให้เจลไทม์ของระบบมีค่าน้อยลง

จากการทดลองในส่วนของการทดสอบสมบัติทางพื้นผิวโดยการวัดมุมสัมผัสระหว่างวาร์นิชและผ้าไฟเบอร์กลาส โดยใช้วาร์นิชที่มีเจลไทม์มากเปรียบเทียบกับวาร์นิชที่มีเจลไทม์น้อยพบว่า วาร์นิชที่มีเจลไทม์มากซึ่งมีค่าอยู่ที่ 318.5 วินาที มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 41.1 องศา และวาร์นิชที่มีเจลไทม์น้อยซึ่งมีค่าอยู่ที่ 58.0 วินาที มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 50.5 องศา ซึ่งค่ามุมสัมผัสนี้สามารถบอกได้ถึงสมบัติทางพื้นผิวระหว่างวาร์นิชและผ้าไฟเบอร์กลาส ดังนั้น วาร์นิชที่มีเจลไทม์มากกว่าจะมีสมบัติทางพื้นผิวระหว่างผ้าไฟเบอร์กลาสที่ดีกว่าวาร์นิชที่มีเจลไทม์น้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าวาร์นิชที่มีเจลไทม์มากกว่ามีความสามารถในการซึมเข้าไปในผ้าไฟเบอร์กลาสได้ดีกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดลองเพื่อทดสอบเจลไทม์ของแต่ละการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนของค่าเจลไทม์ที่วัดได้เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ทำโดยมนุษย์ จึงควรมีการใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำมากกว่าเพื่อทำให้ได้ผลการทดลองที่ไม่คลาดเคลื่อน

5.2.2 ในขั้นตอนการทดสอบค่าเจลไทม์ ควรมีการกำหนดปริมาณวาร์นิชที่หยดลงไปในเครื่องทดสอบเจลไทม์เพื่อให้ทุกการทดลองไม่มีการคลาดเคลื่อนของปริมาณวาร์นิชที่ใช้วัดค่าเจลไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ในขั้นตอนการทดสอบค่ามุมสัมผัส ควรมีการป้องกันลม เนื่องจากหากมีลมพัดผ่านเครื่องวัดค่ามุมสัมผัส อาจทำให้วาร์นิชที่หยดลงไปไม่สัมผัสกับผ้าไฟเบอร์กลาสในมุม 90 องศา ตามคู่มือการใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- (1) Campbell, F. C. Thermoset Resins: The Glue That Holds the Strings Together. In *Manufacturing Processes for Advanced Composites*; Elsevier, 2004; pp 63–101. <https://doi.org/10.1016/B978-185617415-2/50004-6>.
- (2) R.S. Khandpur. *PRINTED CIRCUIT BOARDS Design, Fabrication, Assembly and Testing*; 2006.
- (3) Mallick, P. K. *Composites Engineering Handbook*; 1997.
- (4) MARIAM EMAD AZIZ. *A STUDY ON THE EFFECT OF HARDENER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY RESIN*; 2010.
- (5) Harsch, M.; Karger-Kocsis, J.; Holst, M. Influence of Fillers and Additives on the Cure Kinetics of an Epoxy/Anhydride Resin. *Eur Polym J* **2007**, 43 (4), 1168–1178. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.01.025>.
- (6) Li, M.; Yuan, C.; Wang, S. K.; Gu, Y. Z.; Potter, K.; Zhang, Z. G. Evolution of the Wettability between Carbon Fiber and Epoxy as a Function of Temperature and Resin Curing. *J Appl Polym Sci* **2013**, 128 (6), 4095–4101. <https://doi.org/10.1002/app.38634>.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แสดงชุดเครื่องมือสำหรับการผสมวาร์นิชและทดสอบเจลไทม์



รูปที่ ก.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ผสมวาร์นิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 แสดงเครื่องมือวัดค่าเจลไทม์ของวารินทร์

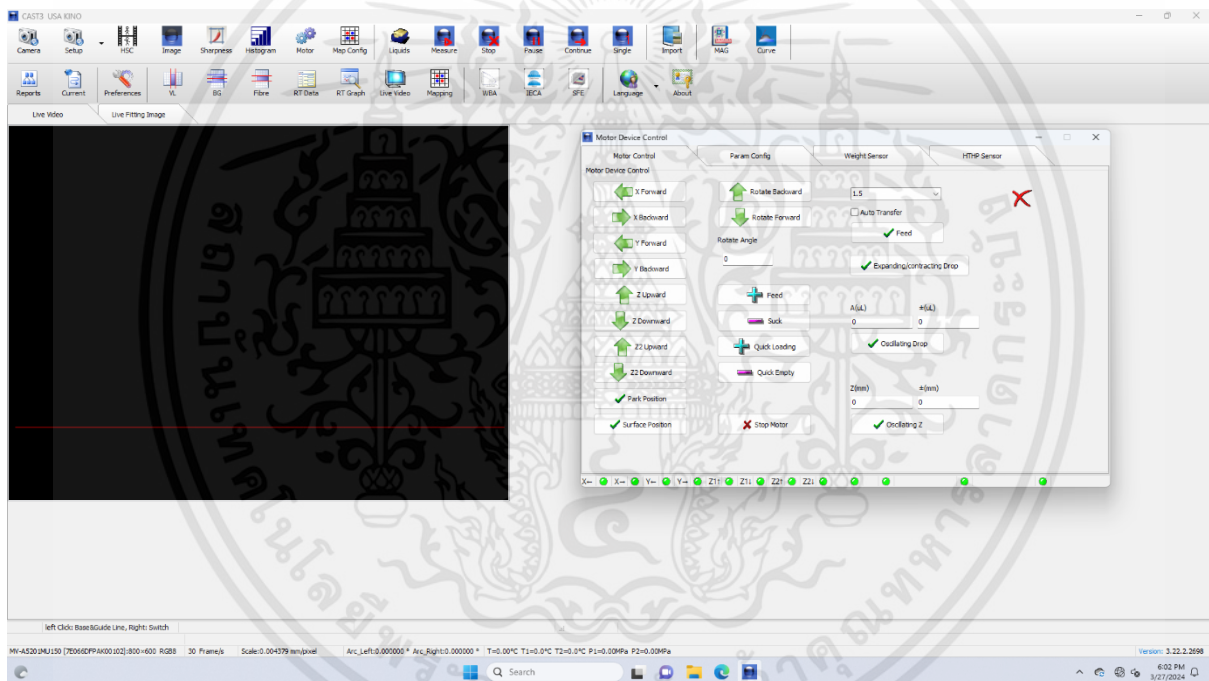
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
แสดงชุดเครื่องมือและซอฟต์แวร์สำหรับวัดค่ามุมสัมผัส



รูปที่ ข.1 แสดงเครื่องมือวัดค่ามุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แสดงซอฟต์แวร์สำหรับวัดค่ามัมส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CA_L=48.781° CA_R=51.901° CA_AV=50.341°



รูปที่ ข.3 แสดงตัวอย่างผลที่ได้จากการวัดค่ามุมสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้