

การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุก่อสร้าง
ที่ผลิตจากไม้ปืซ และไม้ปืซคอมโพสิท โดยวิธีแฮนด์เล็พ



นายปณณวิช สถาปิยะคุณ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุก่อสร้าง
ที่ผลิตจากไม้ปืช และไม้ปืชคอมโพสิท โดยวิธีแฮนด์เล็ฟ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

ประธานกรรมการ

ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

อ. ดร.ชนากร ภูเงินขำ

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปริญญานิพนธ์ : การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุ
ก่อสร้างที่ผลิตจากไม้บีช และไม้บีชคอมโพสิต โดยวิธีแฮนด์เลอ์พ (COMPARATIVE
STUDY OF PHYSICAL AND MACHANICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTION
MATERIAL MADE OF BEECH WOOD AND BEECH WOOD COMPOSITE BY
HAND LAY UP METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต
ลายไม้บีชวิธีแฮนด์เลอ์พ ด้วยเครื่องมือทดสอบตามมาตรฐาน BS. 373 ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัย
นี้มีทั้งสิ้น 3 ชนิด ได้แก่ เรซิน เรซินผสมทังคัม และเรซินผสมทังคัมและรัดด้วยเส้นใยแก้ว
ตัวอย่างทั้งสามชนิดแสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดที่คล้ายกัน แต่มีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกัน
เรซินเกิดการวิบัติแบบเสียรูปถาวรโดยปราศจากการพังทลายของตัวอย่างทดสอบ ขณะที่
ตัวอย่างเรซินผสมทังคัม และตัวอย่างเรซินผสมทังคัมและรัดด้วยเส้นใยแก้วเกิดการวิบัติพังทลาย
แม้ว่าจะมีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกัน กำลังอัดที่จุดวิบัติของตัวอย่างทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน
และมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของไม้บีชธรรมชาติ ผลการทดสอบแรงคัตของตัวอย่างทั้งสามชนิดแสดง
ให้เห็นว่าตัวอย่างเรซินมีความเค้นเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามการเพิ่มขึ้นของความเครียดจนถึงความเค้น
คราก ต่อจากนั้น ความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของความเครียด จนถึงความเค้น
สูงสุด การพันตัวอย่างเรซินผสมทังคัมด้วยใยแก้วช่วยเพิ่มสติเฟเนและความเค้นคัตสูงสุดให้กับ
ตัวอย่างอย่างเห็นได้ชัด ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคัตและการแอ่นตัวแสดงความสัมพันธ์สองช่วง
โดยที่ความชันในช่วงแรกมีค่าสูงกว่าความชันในช่วงหลัง จุดเปลี่ยนความชันคือจุดที่ตัวอย่างเริ่ม
เกิดรอยแตก ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างเรซินผสมทังคัมและพันรอบด้วยใยแก้วเป็นแบบ
แตกที่จุดกึ่งกลาง ซึ่งเป็นจุดเกิดโมเมนต์สูงที่สุด ความเค้นคัตมีค่าเพิ่มขึ้นและการแอ่นตัวมีค่า
ลดลงตามจำนวนรอบการพันตัวอย่างเรซินผสมทังคัม งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าไม้เนื้อแข็ง
คอมโพสิตลายไม้บีชมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลใกล้เคียงกับไม้บีชธรรมชาติ แต่มีต้นทุน
การผลิตที่ต่ำกว่า การประยุกต์ใช้ไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตลายไม้บีชในงานวิศวกรรมจึงมีคุณค่าทาง
เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PUNNAWIT SATAPIYAKUN: OMPARATIVE STUDY OF PHYSICAL AND MACHANICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTION MATERIAL MADE OF BEECH WOOD AND BEECH WOOD COMPOSITE BY HAND LAY UP METHOD. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This research aims to compare physical and mechanical properties of beech-patterned hardwood, made by hand lay-up method with natural beech using test machines that coincided to the BS. 373 standard. There are 3 samples that were studied: resin, resin and talcum blend, and fiberglass-wrapped resin and talcum blend. The three samples exhibit similar compression behavior, but different failure behavior. Resin sample exhibits permanent deformation at failure without any collapse of the sample, while resin and talcum blend samples and fiberglass-wrapped resin and talcum blend samples exhibit bulking failure. Even with different failure modes, the failure strength of the three samples was similar, and was higher than that of the natural beech. The result of bending tests on the three samples shows that the bending stress of resin sample increases linearly with an increase of strain and then slightly increases with an increase of strain until the maximum strain is attained. Wrapping resin and talcum blend with fiber glass apparently increases stiffness and maximum bending stress of the samples. Relationship between bending stress and deflection exhibits two slopes, with steeper for in the first slope than the second one. The transition of the change of slope is found to be the point at which the samples begin to crack. The crack of fiberglass-wrapped resin and talcum blend occurs at the center of the test samples, which is the point that sustained the maximum moment. The failure bending stress increases while the deflection decreases with the increase of fiberglass layer. This research shows that the beech-patterned composite hard wood has similar physical and mechanical properties to the natural beech, but with lower cost of production. The application of the beech-patterned composite hardwood in engineering works will benefit for both economical and environmental perspectives.

School of Civil Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย งานวิจัยนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากปราศจากการช่วยเหลือจากบุคคล และหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การกล่าวขอบขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้ครบทุกท่านเป็นไปได้ยาก ผู้วิจัยต้องขอขมา ณ ที่นี้ด้วย หากมิได้กล่าวนามของท่าน

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ให้ความช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้าวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจตราแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล อาจารย์ ดร.ชนากร ภูเงินจำ คุณวิษณุกร สมิงทอง เจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการทดสอบปฏิบัติงาน นายธานี วิริยะรัตนพร ผู้อำนวยการสำนักวิจัยการจัดการและผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ บางเขน นาย วรวิทย์ จตุรพานิชย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตลอดจนพนักงานด้านเอกสารที่เอื้ออำนวย การจัดเตรียมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงการตรวจทานรูปเล่มของวิทยานิพนธ์ให้แล้วเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับเครื่องมือการทดสอบ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และผู้ที่ให้การสนับสนุนท่านอื่นๆ ที่ข้าพเจ้าไม่สามารถกล่าวได้ครบ ที่คอยให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

ปณณวิช สถาปิยะคุณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไม้บีช (European-Beech).....	3
2.2 ไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้.....	3
2.3 หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่า.....	3
2.4 วัสดุคืบสำหรับพลาสติกคอมโพสิต.....	5
2.4.1 เทอร์โมเซตติ้งเรซิน สำหรับงานผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสโพลีเอสเตอร์ชนิดไม้อัดตัว.....	6
2.4.2 สารเติมแต่งที่สำคัญสำหรับการเตรียมคอมโพสิต.....	11
2.4.2.1 สารคะตะลิสต์.....	11
2.4.2.2 สารช่วยเร่งปฏิกิริยาหรือช่วยเร่งการบ่ม.....	15
2.4.2.3 สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา.....	15
2.4.2.4 สารเชื่อมต่อ.....	16
2.4.2.5 สารเติมเต็มและผงสี.....	17
2.4.2.6 สารปรับแต่งความหนืด.....	19
2.4.2.7 สารช่วยการกระจายอนุภาค.....	20

2.4.2.8	สารช่วยลดการหดตัว.....	20
2.4.2.9	สารช่วยลอกจากแม่แบบ.....	21
2.4.2.10	สารเคลือบชั้นรังสีอุลตราไวโอเลต.....	21
2.4.2.11	สารเติมแต่งอื่นๆ.....	22
2.4.3	เส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุคอมโพสิต.....	22
2.4.3.1	เส้นใยแร่.....	23
2.4.3.2	เส้นใยธรรมชาติ.....	24
2.4.3.3	เส้นใยอะรามิดหรือเส้นใยอะโรมาติกพอลิเอมีด.....	25
2.4.3.4	เส้นใยเพชร.....	29
2.4.3.5	เส้นใยพอลิเอทิลีน.....	29
2.4.3.6	เนื่องด้วย ความเฉื่อยทางเคมีเส้นใยชนิดนี้ จึงไม่ค่อยยึดเกาะกับแมทริกซ์.....	29
2.5	เทคโนโลยีกระบวนการผลิตคอมโพสิต โดยวิธี Hand Lay Up.....	32
2.5.1	กระบวนการผลิตแบบแม่แบบเปิด.....	32
2.6	การปฏิบัติการทดลอง (Testing Practices) ทาค่าคุณสมบัติทางกลของไม้ปืชคอมโพสิต.....	35
2.6.1	การทดลอง.....	35
2.6.1.1	การทดลองการรับแรงดัด.....	36
2.6.1.2	การทดลองการรับแรงอัด.....	40
3	วิธีดำเนินการศึกษา.....	44
3.1	การศึกษาวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง.....	44
3.1.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง.....	44
3.1.2	เครื่องมือ,อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง.....	47
3.1.3	ขั้นตอนการผลิตชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง.....	48
3.2	การทดลองการรับแรงอัด(Compression Test).....	52
3.2.1	วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	52
3.2.2	เครื่องมือทดลอง.....	52
3.2.3	ชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง.....	52
3.2.4	วิธีการทดลอง.....	52
3.2.5	การคำนวณ.....	53
3.2.6	ผลการทดลอง.....	53

3.3	การทดลองการรับแรงดัด(Bending Test)	53
3.3.1	วัตถุประสงค์ของการทดลอง	53
3.3.2	เครื่องมือทดลอง	53
3.3.3	ชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง	53
3.3.4	วิธีการทดลอง	54
3.3.5	การคำนวณ	54
3.3.6	ผลการทดลอง	55
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	56
4.1	สมบัติของวัสดุทดสอบ	57
4.1.1	คุณสมบัติของPolyester resin	57
4.1.2	คุณสมบัติของ ทัลคัม	57
4.1.3	สมบัติของเส้นใยแก้วขนาด 200 กรัม	57
4.2	ผลการทดสอบแรงอัด (Compression Test)	58
4.3	ผลการทดสอบ แรงดัด (Bending Test)	61
4.4	ตารางสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล และราคาวัสดุของไม้ปืช และไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต ทรายไม้ปืช	62
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	64
5.1	สรุปข้อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพทางกลและราคาวัสดุ	64
5.2	ปัญหาและอุปสรรค	64
5.3	ข้อเสนอแนะ	65
	เอกสารอ้างอิง	66
	ภาคผนวก ก. คู่มือผู้ใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติก	67
	ภาคผนวก ข. สัญลักษณ์อักษรย่อของพลาสติกต่าง ๆ	71
	ภาคผนวก ค. การนำเสนอ Power Point	78
	ประวัติผู้เขียน	79

สารบัญตาราง

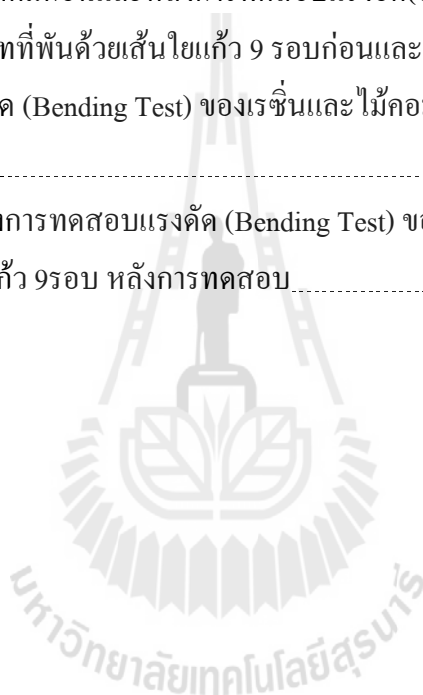
ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของไม้ตามคุณสมบัติทางกล.....	4
2.2 มาตรฐานอาบนํ้ายา กิโกรัม / ลบ.ชม.....	4
2.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปของโพลีเอสเตอร์และคอมโพสิตของโพลีเอสเตอร์กับใยแก้ว.....	9
2.4 สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั่วไปแบ่งชนิดตามอุณหภูมิที่ใช้งาน.....	14
2.5 อิทธิพลของอัตราส่วนผสมของกะตะลิสต์กับสารช่วยเร่งปฏิกิริยาต่ออายุการใช้งาน และเวลาที่ลอกชิ้นงานจากแบบได้.....	15
2.6 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเส้นใยเอสเบสตอส.....	24
2.7 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางชนิด.....	24
2.8 สมบัติเชิงกลของเส้นใยเคฟลาร์ชนิดต่างๆ.....	28
2.9 องค์ประกอบและสมบัติเชิงกลของเส้นใยแก้วชนิดต่างๆ.....	31
4.1 สมบัติของเส้นใยแก้วขนาด 200กรัม.....	57
4.2 ตารางเปรียบเทียบสมบัติทางกล และราคาวัสดุของไม้บีช และ ไม้เนื้อแข็ง คอมโพสิตหลายไม้บีช.....	63



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองกลไกการทำงานของสารปรับแต่งความหนืดเพื่อเพิ่มสมบัติโซโทรอปีก	19
2.2 ปฏิกิริยาการเตรียม poly (para - phenyleneterephthalamide)	26
2.3 การจัดเรียงตัวแบบพอลิเมอร์ผลึกเหลวของเคฟลาร์	26
2.4 การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเส้นใยเคฟลาร์	27
2.5 การจัดตัวในลักษณะ planar sheet ของเส้นใยเคฟลาร์	27
2.6 โครงสร้าง 3 มิติของเส้นใยเคฟลาร์	27
2.7 กระบวนการผลิตเส้นใยแก้ว	30
2.8 แม่แบบเปิดมีผิวสัมผัสชิ้นงานเพียงด้านเดียว	33
2.9 การทำแบบใช้มือ (Hand Lay Up)	33
2.10 ขั้นตอนการผลิตแบบมือทา (Hand Lay-Up)	34
2.11 เครื่องทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของไม้หรือวัสดุอื่นๆ	35
2.12 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบแรงคัดเข้ากับเครื่องทดลอง	36
2.13 การแตกหักของชิ้นไม้ทดลองการรับแรงคัด	37
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการเสียรูปของชิ้นไม้ทดลอง	38
2.15 การทดลองหาค่าการรับแรงอัด	40
2.16 แสดงให้เห็นถึงการแตกหักของชิ้นไม้ทดลองในลักษณะต่างๆ	41
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก และการเสียรูปของชิ้นไม้ทดลอง	42
3.1 ใยแก้วตาสาน (Woven Roving) # 200	44
3.2 ใยแก้วเส้นสั้น (Chopped Stand)	44
3.3 แป้งทัลคัม (Talcum Power)	45
3.4 แม่สีแบบผง (Color Powder)	45
3.5 โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Rasin)	46
3.6 ตัวทำแข็ง หรือฮาร์ทเดนเนอร์ MEKPO: M-60	46
3.7 อะซิโตน หรือน้ำยาล้าง (Acetone)	47
3.8 ชุดทดสอบ AutoUTM500T	55
3.9 ชุดทดสอบ UTM100T	55
3.10 การทดสอบแรงอัด(Compression Test)	55

3.11 การทดสอบแรงดัด(Bending Test).....	55
3.12 เครื่อง แสดงผลการทดสอบแรงอัด.....	55
3.13 เครื่อง Load Meter ทดสอบแรงดัด.....	55
4.1 ชิ้นงานไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตลายไม้บีชกับไม้บีชธรรมชาติ.....	56
4.2 ผลการทดสอบแรงอัด (Compression Test) ของตัวอย่างเรซิน และตัวอย่างไม้เนื้อแข็ง คอมโพสิตลายไม้บีชที่รัดและไม่รัดด้วยเส้นใยแก้ว.....	58
4.3 ตัวอย่างเรซินก่อนและหลังการทดสอบแรงอัด (Compression Test).....	59
4.4 ตัวอย่างเรซินผสมที่ลัดก่อนและหลังการทดสอบแรงอัด(Compression Test).....	60
4.5 ไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตที่พันด้วยเส้นใยแก้ว 9 รอบก่อนและหลังทดสอบแรงอัด.....	60
4.6 ผลการทดสอบแรงดัด (Bending Test) ของเรซินและไม้คอมโพสิตที่พันรัดด้วย เส้นใยแก้ว 9 รอบ.....	61
4.7 ลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบแรงดัด (Bending Test) ของไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต ที่พันรัดด้วยเส้นใยแก้ว 9รอบ หลังการทดสอบ.....	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อาคารพักอาศัยในประเทศไทยที่มีความสูงไม่เกิน 4 ชั้น จำนวนไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของทั้งหมดใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างและตกแต่ง ด้วยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ที่ก้าวหน้า โครงสร้างไม้และไม้ประกอบมีความแข็งแรงและความสวยงาม และเป็นที่ยอมรับและยอมรับ แต่อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ในปัจจุบันประสบกับปัญหาดังนี้ ไม้ที่มีคุณภาพเหมาะสมแก่การทำวัสดุ ก่อสร้างเริ่มมีปริมาณลดลงและไม่เพียงพอต่อความต้องการ แม้จะมีการปลูกทดแทน การตัดไม้เพื่อ ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นการทำลายป่าและเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะเรือนกระจก นอกจากนี้ กระบวนการแปรรูปไม้มีความยุ่งยากและซับซ้อน เช่น การอบแห้ง, การอบน้ำยารักษาเนื้อไม้ การ เลื่อย ไส ตัด เจาะ และขัดผิวไม้ และการทำสี ส่งผลให้ไม้มีต้นทุนในการแปรรูปที่สูง

นอกจากจุดเด่นด้านการอนุรักษ์ธรรมชาติแล้ว วัสดุคอมโพสิต (composite materials) ยังมี จุดเด่นที่เหนือกว่าวัสดุไม้ธรรมชาติอยู่หลายประการ เช่น มีค่าความแข็งแรง (stiffness) ความแข็งแรง (strength) และความคงทนต่อการกัดกร่อนทางเคมี (corrosion resistance) และสภาพดินฟ้าอากาศ (Environmental resistance) สูง และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Density) ต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าวัสดุ คอมโพสิตมีน้ำหนักเบาแต่แข็งแรงกว่าไม้ธรรมชาติ นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตสามารถขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและสามารถออกแบบให้เกิดประโยชน์ทางด้านความงามและการใช้สอย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อกำหนดคุณสมบัติทางกลของไม้ตามมาตรฐาน อุตสาหกรรมไทย และทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุโพลีเมอร์เม็ดทริกและเปรียบเทียบกับ ข้อกำหนดของมาตรฐานอุตสาหกรรม และท้ายสุด จะศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุน ผลงานวิจัยนี้ จะนำเสนอความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตเม็ดทริกเพื่อทดแทนไม้ในงาน ตกแต่งอาคาร อันจะนำมาซึ่งการลดปริมาณการใช้ไม้ธรรมชาติ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในทาง สถาปัตยกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล (แรงอัดและแรงดึง) ของไม้เนื้อแข็ง คอมโพสิตโพลีเมอร์เม็ดทริกไม้บีช ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมป่าไม้ และมาตรฐาน BS. 373

1.2.2 ศึกษาต้นทุนการผลิตไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตโพลีเมอร์เม็ดทริกไม้บีช และ เปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตไม้บีชธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 การทดลองหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้เนื้อแข็งคอม โพลีท
- 1.3.2 โพลีเมอร์แม่ทริกกลายไม้บิชตามมาตรฐานของกรมป่าไม้ดังนี้
 - 1.3.2.1 ทดสอบกำลังอัดกับตัวอย่างไม้เนื้อแข็งคอม โพลีทคอม โพลีทขนาด 20x20x60 มม.
 - 1.3.2.2 ทดสอบกำลังคัดกับตัวอย่างไม้เนื้อแข็งคอม โพลีทขนาด 20x20x300 มม.
- 1.3.3 เปรียบเทียบกำลังอัดและกำลังคัดของตัวอย่างไม้เนื้อแข็งคอม โพลีทกับมาตรฐานไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อนของกรมป่าไม้
- 1.3.4 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่างไม้บิชกับไม้เนื้อแข็งคอม โพลีท โพลีเมอร์แม่ทริก กลายไม้บิช

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงกำลังอัดและกำลังคัดของวัสดุไม้เนื้อแข็งคอม โพลีท โพลีเมอร์แม่ทริก กลายไม้บิช ที่สัดส่วนผสมต่างๆ
- 1.4.2 ได้แนวทางการผลิตวัสดุทดแทนไม้เนื้อแข็งคอม โพลีท โพลีเมอร์แม่ทริกกลายไม้บิช ซึ่งสามารถนำไปสู่การผลิตในระดับ SME หรืออุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาการผลิต วัสดุก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยให้เหมาะสมต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไม้บีช (European Beech)

ไม้บีช (European Beech) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Fagus Sylavatica* และมีถิ่นกำเนิดจากประเทศแถบยุโรป ลำต้นสูง 100-130 ฟุต (30-40) เมตร ขนาดของลำต้น 3-5 ฟุต (1-1.5 ม.) น้ำหนัก 710 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติความแข็งแรงในการตัด 15,970 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2.2 ไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้

การกำหนดว่าไม้ชนิดใดเป็นไม้เนื้อแข็งต้องคำนึงถึงความแข็งแรงในการรับน้ำหนักและความทนทาน เช่น ไม้เต็งรัง ประดู่ แดง มะค่าโมง ตะเคียนทอง เคี่ยม หลุมพอ บุนนาค และกันเกรา เป็นต้นไม้มีความแข็งแรงสูงกว่า 1,000 กก./ซม² ขึ้นไปทั้งสิ้น และเมื่อนำส่วนแก่นของไม้เหล่านี้ไปทดลองปักดิน ปรากฏว่า มีความทนทานตามธรรมชาติโดยเฉลี่ยสูงกว่า 10 ปีทั้งสิ้น ยกเว้นไม้ตะเคียนทองที่มีความทนทานตามธรรมชาติโดยเฉลี่ย 7.7 ปี กองวิจัยผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ ได้เสนอหลักเกณฑ์การกำหนดไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็งต่อกรมป่าไม้ และได้รับความเห็นชอบตามหนังสือกรมป่าไม้ที่ กส. 07/02/6679 ลงวันที่ 3 พฤษภาคม 2517 เรื่อง ข้อกำหนดเกี่ยวกับไม้ที่ใช้ในการก่อสร้าง เพื่อให้หน่วยงานราชการในสังกัดกรมป่าไม้ยึดถือปฏิบัติ

2.3 หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้

คุณสมบัติไม้ด้านกลสมบัติ (mechanical properties) นั้นเกี่ยวข้องกับแรง (stress) ที่มากระทำต่อไม้มี 4 ลักษณะด้วยกัน คือ แรงอัด (compressive stress) เป็นแรงที่ทำให้ไม้มีขนาดเล็กกว่าเดิม แรงดึง (tensile stress) เป็นแรงที่ทำให้ไม้มีขนาดใหญ่หรือปริมาตรใหญ่กว่าเดิม แรงเฉือน (shear stress) เป็นแรงที่ทำให้ไม้แยกออกเป็นสองส่วน และแรงดัด (bending stress) เป็นแรงที่ทำให้ไม้โค้งงอจนหัก ความสามารถที่ไม้ต้านทานแรงที่มากระทำเรียกว่า ความแข็งแรงหรือกำลัง (strength) เช่น ความสามารถในการต้านทานแรงอัด เรียกว่ากำลังอัด แรงที่นับว่าสำคัญและเกิดขึ้นเสมอในสิ่งก่อสร้าง คือแรงอัดขนานเส้นและแรงดัด ร่องลงมาก็คือแรงเฉือน และแรงดัด ซึ่งทำให้ไม้หักและเสียรูปโดยสิ้นเชิง แรงดัดสูงสุดที่ทำให้ไม้หัก เรียกว่า แรงประลัยหรือสัมประสิทธิ์ในการหัก (modulus of rupture) ความต้านทานของไม้ต่อแรงประลัยนี้ เรียกว่า ความแข็งแรงของไม้ในการดัดหรือกำลังดัด ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐาน ในการแบ่งไม้ออกเป็นประเภทไม้เนื้ออ่อนหรือไม้เนื้อแข็ง

โดยใช้กำลังตัดของไม้ตะเคียนทอง (*Hopea odorata* Roxb.) ที่แห้งเป็นค่ามาตรฐาน เนื่องจากเป็นไม้ที่ได้รับความนิยมและยอมรับกันอย่างกว้างขวางมานานว่าเป็นไม้เนื้อแข็งที่มีคุณภาพดีทั้งด้านความแข็งแรงและความคงทน การแบ่งไม้เนื้อแข็งหรือไม้เนื้ออ่อนตามรายละเอียดในหนังสือ กรมป่าไม้ที่ กส. 07/02/6679(ลงวันที่ 3 พฤษภาคม 2517) เรื่องข้อกำหนดเกี่ยวกับไม้ที่ใช้ในการก่อสร้าง มีสาระสำคัญพอสรุปได้ดังนี้

“ให้แบ่งไม้ออกเป็น 3 ประเภท โดยถือเอาค่าความแข็งแรงในการตัดของไม้แห้ง (ความชื้นประมาณ ร้อยละ 12)” และความทนทานตามธรรมชาติเป็นเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของไม้ตามคุณสมบัติทางกล

	ความแข็งแรง ในการตัด (กก./ซม ²)	ความทนทาน ตามธรรมชาติ (ปี)
ไม้เนื้อแข็ง	สูงกว่า 1,000	สูงกว่า 6
ไม้เนื้อแข็งปานกลาง	600-1,000	2-6
ไม้เนื้ออ่อน	ต่ำกว่า 600	ต่ำกว่า 2

คุณสมบัติสำหรับไม้ที่มีความทนทานตามธรรมชาติต่ำ หากได้อาบน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้เสียก่อนให้มีปริมาณน้ำยาตามตารางที่ 2.2 ก็ให้เลื่อนขึ้นไปตามค่าความแข็งแรงได้

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานอาบน้ำยา กิโลกรัม / ลบ.ซม.

มาตรฐานอาบน้ำยา กิโลกรัม / ลบ.ซม.			
	ยาประเภทน้ำมัน	ยาประเภทเกลือ ละลายน้ำมัน	ยาประเภทเกลือ ละลายน้ำ
ใช้ในร่ม	-	-	5.6
ใช้กลางแจ้ง	96.0	4.8	8.0
ใช้ที่แฉะชื้น	128.0	6.4	12.0
ใช้ใต้น้ำจืด	192.0	10.0	16.0
ใช้ใต้น้ำทะเล	320	-	24.0

ความแข็งแรงในการตัดของไม้แห้งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวอย่างไม้ขนาดเล็กวิธีการทดลองและการคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้กล่าวไว้โดยละเอียดในหนังสือ "กลสมบัติของไม้ไทย" เลขที่ ร.144 กรมป่าไม้กระทรวงเกษตร 2516 ตัวอย่างทดสอบความคงทนเป็นแก่น

ล้วน ไม่มีกระพี้ ลักษณะดี และไม่มีตำหนิ ตัวอย่างทดสอบมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 ซม. และมีความยาว 50 ซม. ฟังก์ชันแข็งดี มีความชื้นประมาณไม่เกินร้อยละ 20 ตัวอย่างทดสอบถูกฟังก์ชันลงในดินประมาณ 25 ซม. กระจายไปทั่วในแปลงทดลองกลางแจ้ง ตากแดดตากฝน ซึ่งตั้งอยู่ตามภาคต่างๆ ของประเทศ แล้วทำการตรวจสอบสภาพของไม้ทดลองเพื่อเก็บสถิติทุกรอบ 6 เดือน จนไม้ที่ทำการทดลองฟังก์ชันหาย และไม่สามารถใช้ทดลองต่อไปได้อีกถือว่าเป็นสิ้นสุดการทดลอง

2.4 วัตถุประสงค์สำหรับพลาสติกคอมโพสิต

วัสดุทางวิศวกรรมต้องมีความสามารถในการรับแรงหรือน้ำหนักได้มากและเสียรูปต่ำ โลหะจึงเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายมาอย่างยาวนาน (โดยเฉพาะวัสดุจำพวกเหล็กกล้า) จนกระทั่งได้มีการค้นพบ พลาสติก (ซึ่งผลิตจากสารปิโตรเคมี) และไฟเบอร์กลาสหรือเส้นใยแก้วโดย Slayter และ Thomas ในราวปี ค.ศ. 1930 กิตติ อนุชาพันธ์, (2548) วัสดุทางวิศวกรรมใหม่ที่เกิดจากการผสมวัสดุทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน โดยมีสารอินทรีย์ได้แก่ เส้นใยหรืออนุภาคเสริมต่างๆ เกิดเป็นวัสดุผสมที่เรียกว่า “พลาสติกคอมโพสิต (plastic composites)” ใยแก้วสามารถเสริมแรงพลาสติกจำพวกโพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester) ได้อย่างยอดเยี่ยม และเพิ่มความแข็งแรงได้ใกล้เคียงกับเหล็กกล้า ผลงานดังกล่าวได้รับการจดสิทธิบัตรโดย Ellis และ Foster ในราว ปีค.ศ. 1930 กิตติ อนุชาพันธ์, (2548) และได้นำไปใช้เป็นส่วนประกอบเครื่องบินในเวลาต่อมา นอกจากนี้ พลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้วยังมีการนำไปใช้ในงานที่ต้องรับแรงสูงอีกมาก เช่น วัสดุโครงสร้างส่วนประกอบของรถยนต์ เรือ เพอร์นิเจอร์ อุปกรณ์ กีฬา ฯลฯ และต่อมาได้ก่อให้เกิดแนวคิดที่นำเส้นใยชนิดอื่นๆ มาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดการเสริมแรงได้ดียิ่งขึ้น เส้นใยอื่นๆ เหล่านี้เป็นได้ทั้งเส้นใยอนินทรีย์ และเส้นใยอินทรีย์ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะลูมิเนียมซิลิเกต เส้นใยอะรามิด (Aramids) หรือเคฟลาร์ (Kevlar) เส้นใยไนลอน (Nylon) เป็นต้น วัสดุพลาสติกคอมโพสิตได้รับการสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีจุดเด่นที่สำคัญคือมีน้ำหนักเบา (ประมาณร้อยละ 20 ของเหล็ก) เพราะมีพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีความหนาแน่นต่ำ คุณสมบัติอื่นๆ ของคอมโพสิต ได้แก่ มีความแข็งแรงสูง มีคามอดูลัสจำเพาะสูง สามารถควบคุมคุณสมบัติและการผลิตทำให้สามารถออกแบบหรือเลือกใช้ให้ตรงตามความต้องการได้ มีอายุการใช้งานยาวนาน ใช้พลังงานน้อยกว่าในการผลิต ทนทานสภาวะอากาศได้ดี และสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายประเภท

โดยทั่วไป วัสดุคอมโพสิต ประกอบด้วยวัตถุดิบ 3 ส่วน คือ เมทริกซ์ สารเสริมแรง และสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มเติมสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการ องค์ประกอบสองส่วนแรกมีความสำคัญที่จะทำให้ได้วัสดุที่เบาและแข็งแรง พลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน

เช่นกัน คือ เมทริกซ์ ได้แก่ พอลิเมอร์ต่างๆ ซึ่งมีหลายประเภท เช่น เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) ยาง (rubbers) และที่สำคัญที่สุดคือ เทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastics) องค์ประกอบต่อไปคือเส้นใยแก้วรวมถึงเส้นใยอื่นๆ ที่มีความแข็งแรงแบบเดียวกัน (ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป) และองค์ประกอบสุดท้ายคือ สารเติมแต่ง (additives) เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ต้องการโดยครบถ้วน

สารเติมแต่งที่สำคัญคือสารเร่งปฏิกิริยาหรือสารคะตะลิสต์ (catalyst) สารต้านการออกซิเดชัน (antioxidants) สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (antiblocking agents) และสารเชื่อมต่อน (coupling agents) เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานคอมโพสิตมักเป็นจำพวกเทอร์โมเซตติง เทอร์โมเซตติงต้องเตรียมจากมอนอเมอร์ (monomers) ที่มักเรียกว่าเรซิน (resin) ซึ่งเป็นสารเคมีที่อยู่ในสถานะของเหลวและมีความหนืดไม่สูง ให้ความรู้สึกว่ามีไม่แข็งแรง จนเมื่อทำปฏิกิริยากันแล้ว จะเกิดการเชื่อมต่อนของโมเลกุลเรซินเกิดเป็นพอลิเมอร์ และทำปฏิกิริยากันเป็น โครงตาข่ายสามมิติของโมเลกุล (crosslinking) ที่เรียกว่าการบ่ม (curing) จึงมีการเปลี่ยนจากสถานะของเหลวไปเป็นของแข็ง และจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมาก แต่เมื่อผสมสารเติมแต่งชนิดสารเติมเต็ม (filler) และทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ก็จะได้วัสดุแข็ง “คอมโพสิต” ที่ให้ความแข็งแรงสูง ตัวอย่าง เทอร์โมเซตติงคอมโพสิตที่แพร่หลายมากในช่วงต้นของการค้นพบพอลิเมอร์ได้แก่เบเกิลไลท์ (Bakelite) ซึ่งเป็นสารจำพวกฟีนอลเรซินที่ผสมกับเยื่อไม้ (wood flour-filled phenolic resins) เป็นต้น พอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมพลาสติกก็สามารถนำมาทำวัสดุคอมโพสิตได้ แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากไม่สามารถให้ความแข็งแรงได้สูงเทียบเท่าเทอร์โมเซตติง ทั้งนี้เพราะโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมเซตติงมีความแข็งแรงสูงกว่าเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากมีโครงสร้างตาข่ายเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยพันธะเคมีในสามมิติ อย่างไรก็ตาม เทอร์โมเซตติงมักจะเปราะ การเติมใยแก้วลงไปจะช่วยเพิ่มความเหนียวทนมากขึ้น การเลือกชนิดของเทอร์โมเซตติงเรซิน ในการเตรียมคอมโพสิตไม่ได้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของคอมโพสิต เพราะการปรับความแข็งแรงจะขึ้นกับชนิดของเส้นใยมากกว่า และราคาก็อาจไม่ต่างกันมาก ดังนั้น การเลือกเรซิน จึงยึดให้เหมาะสมต่อการใช้งานและให้ง่ายต่อกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิใช้งาน และมีปริมาณการดูดความชื้นที่ยอมรับได้ เป็นต้น

2.4.1 เทอร์โมเซตติงเรซิน สำหรับงานผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสโพลีเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester)

โพลีเอสเตอร์ (polyester) เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์ (diol) และกรดอินทรีย์ (diacid) ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (functional group) หรือหมู่เคมีที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอย่างน้อยสองกลุ่มในโมเลกุล โพลีเอสเตอร์มักเรียกชื่อ ตามสารตั้งต้น โดยเฉพาะเมื่อสารตั้งต้นเป็นกรดไขมันว่า

“อัลคิเดิล (Alkyds)” ปฏิบัติการสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์ เป็นแบบขั้น (stepwise polymerization) ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของแอลกอฮอล์และกรด เกิดเป็นพันธะเอสเตอร์ (ester linkage) และเกิดการรวมตัวกันไปเรื่อยๆ เป็นลำดับ จนได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ พอลิเมอร์ชนิดนี้ได้รับการพัฒนาขึ้น โดย Carlton Ellis โดยการใส่สารแอนไฮไดรด์ ชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated anhydride) เช่น มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride (COCH)₂O) ทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) ได้เป็นพอลิเอทิลีนมาเลอิก (polyethylene maleate) ซึ่งในเบื้องต้นเกิดเป็นพอลิเมอร์ปฐม (prepolymer หมายถึง พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลแบบเส้นที่ไม่ยาวนักและไม่สามารถให้ความแข็งแรงได้) จึงต้องเติมสารไวนิลอะซิเตด (vinyl acetate) หรือสไตรีน (styrene) ซึ่งมีผลทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์ปฐมเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงตาข่ายสามมิติ (crosslinked polymer) โดยมีพอลิสไตรีน (polystyrene) เชื่อมติดโมเลกุลของโพลีเอสเตอร์จึงให้ความแข็งแรงได้สูง เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมสร้างโครงตาข่ายนี้เป็นขั้นตอนสำคัญที่จะเพิ่มคุณสมบัติให้เรซินมีความแข็งแรง ทนทานต่อสารเคมี และอุณหภูมิสูงๆ ขั้นตอนนี้ก็คือการบ่มนั่นเอง โดยทั่วไปจะมีการเติมสารช่วยเร่งปฏิกิริยา (accelerators) จำพวกสารเอมีนประเภท tertiary aliphatic amines เช่น ไดเมทิลอะนิลีน (dimethylaniline) เพื่อเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่ใช้ในการก่อปฏิกิริยาของสไตรีนจากสารพวกเปอร์ออกไซด์ (peroxides) เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) หรือเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide, MEKPO) โดยในกลไกปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ สารเร่งแห้ง (driers) เช่น โคบอลต์แนฟทีเนต (cobalt naphthenate) ก็อาจผสมลงไปพร้อมกับสารเปอร์ออกไซด์ได้ โพลีเอสเตอร์สามารถปรับให้มีความยืดหยุ่นดีหรือแข็งมากๆ ก็ได้ด้วยการปรับชนิดของ dihydric alcohol หรือปรับสัดส่วนของกรดไม่อิ่มตัว เช่น กรดฟูมาริก (fumaric acid) ต่อกรดอิ่มตัว เช่น ถ้าต้องการให้แข็งมากๆ ก็ใช้สัดส่วนกรดไม่อิ่มตัวต่อกรดอิ่มตัวเป็น 1 : 1 และถ้าต้องการให้ยืดหยุ่นมาก ก็ต้องลดสัดส่วนของกรดไม่อิ่มตัวลงให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ อิทธิพลของขนาดโมเลกุลของแอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ ปริมาณความไม่อิ่มตัว ชนิดและปริมาณของมอนอเมอร์และอุณหภูมิการบ่ม ล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล เช่น แอลกอฮอล์ ที่มีขนาดยาวขึ้นจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น (เช่นเดียวกับการเติมกรดอิ่มตัวมากๆ) การเติมกลุ่มเคมีพวกอะโรมาติกส์ (aromatics) ซึ่งหมายถึงกลุ่มเคมีที่มีวงเบนซีน (benzene ring) ประกอบอยู่ในแอลกอฮอล์ หรือกรดก็จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) และความแข็ง ซึ่งหมายถึงความแข็งแรงที่ผิว (hardness) และความแข็งด้านการดัดหรือบิดงอ (stiffness หรือ rigidity) โพลีเอสเตอร์สามารถแบ่งตามองค์ประกอบ เคมีได้เป็น

- **ออร์โธเรซิน (ortho resins)** เตรียมจากพทาสิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) กับ

maleic anhydride หรือ fumaric acid ได้เป็นออร์โธพาทาลิก (orthophthalics) ซึ่งเป็น โพลีเอสเทอร์เรซินแรกเริ่มที่ยังคงนิยมใช้กันมากหลายๆ ด้าน แม้ว่าจะมีข้อจำกัดด้าน เสถียรภาพต่อความร้อน สารเคมี และการใช้งานระหว่าง กระบวนการผลิต แต่มีราคา ถูก

- **ไอโซเรซิน (iso resins)** เตรียมจากกรดไอโซพาทาลิก (isophthalic acid) กับ maleic anhydride หรือ fumaric acid ได้เป็นไอโซพาทาลิก (isophthalics) ที่มีคุณสมบัติดีกว่า orthophthalics ในด้านการทนความร้อนและสารเคมี และด้านคุณสมบัติทางกล เพราะ มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบเส้น (linear molecules) และมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า
- **บิสฟีนอลเอฟumarates (Bisphenol A(BPA) fumarates)** เตรียมจาก โพรอ็อกซีเลต (propoxyiated) หรือเออ็อกซีเลต (ethoxylated) ของ BPA กับ fumaric acid ซึ่งวงเบนซีนใน BPA ช่วยให้นอนอนุหภูมิได้สูงขึ้น แข็งและเปราะขึ้น รวมทั้งทนสารเคมีได้ดีขึ้น โดยเฉพาะในภาวะด่างแก่ (strong basic solutions) จึงมักนำไปใช้ในงานที่ต้องการ ความทนทานมากขึ้น (high performance applications)
- **คลอเรนดิก (Chlorendics)** เตรียมจากคลอเรนดิกแอนไฮไดรด์ (chlorendic anhydride) หรือกรดคลอเรนดิก (chlorendic acid) กับ maleic anhydride หรือ fumaric acid เรซินพวกนี้ทนทานต่อสารเคมีได้ดีเยี่ยม เหมาะกับการใช้งานกับภาวะที่มีกรดแก่ (strong acid) โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงและหน่วงการลุกไหม้ (fire retardancy) เพราะมีหมู่คลอรีนอยู่ด้วย
- **ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl ester)** เป็นชื่อสามัญสำหรับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyesters) ซึ่งเตรียมจากกรดไม่อิ่มตัว เช่น กรดเมทาคริลิก (methacrylic acid) หรือ กรดอะคริลิก (acrylic acid) กับบิสฟีนอลไดอ็อกไซด์ (bisphenol diepoxide) เช่น ปฏิกิริยาระหว่าง 2 โมล ของกรดเมทาคริลิกกับ 1 โมล ของไดอ็อกไซด์ของบิสฟีนอลเอ หรือเตรียมจากบิสฟีนอลเอกรดฟumaric (bisphenol A fumaric acid) กับโพลีเอสเทอร์ของไอโซพาทาลิก (isophthalic polyester) พอลิเมอร์ที่ได้จะมีตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัว (มีพันธะคู่) อยู่ที่ปลายโมเลกุลเท่านั้น ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับมอนอเมอร์ที่ไม่อิ่มตัวเช่น สไตรีน รูปลักษณะภายนอก คุณสมบัติต่างๆ และการบ่ม จะทำได้เช่นเดียวกับโพลีเอสเทอร์สามัญอื่นๆ ดังนั้น vinyl ester จึงนำไปใช้ได้เช่นเดียวกับโพลีเอสเทอร์อื่นๆ และมักใช้ทำคอมโพสิตสำหรับงานโครงสร้าง แม้ว่าจะมีราคาค่อนข้างแพงกว่า แต่ก็ให้คุณสมบัติทนเคมี ความร้อนและคุณสมบัติทางกล (เช่น ความแข็งแรงดึง tensile strength) และความแข็งแรงดัด (flexural strength) รวมทั้งยืด (elongation)

ได้มากอีกด้วย ที่ดีเยี่ยมกว่านั้นคือไวนิลเอสเตอร์ทนทานต่อความล้า (fatigue) ที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าโพลีเอสเตอร์ชนิดไอโซพทาติก เช่น การใช้งานที่อุณหภูมิ 105°C ที่ระดับความเค้น (stress) 60 - 70 MPa เมื่อผ่านไป 200,000 รอบการใช้งาน ค่ามอดูลัสแรงดัด (flexural modulus) ของไวนิลเอสเตอร์ลดลงร้อยละ 5 ในขณะที่ ไอโซพทาติก ลดไปร้อยละ 12

โพลีเอสเตอร์เรซินมักใช้มากกับเส้นใยแก้วสับอีกาส (Chopped E-glass fiber) เส้นใยเสริมแรง (reinforcing fibers) ชนิดอื่นๆ ที่ใช้ได้แก่ เส้นใยแก้วเอสกลาส (S-glass fiber) เส้นใยอะรามิด (aramid fiber) และคาร์บอนไฟเบอร์ (carbon fiber) กำลังดึงของโพลีเอสเตอร์ชนิดออร์โทพทาติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจะเพิ่มขึ้นมาก แต่จะไม่เห็นความแตกต่างของการเสริมแรงจากเส้นใยชนิดต่างๆ เลยเมื่อเปลี่ยนมาเป็นไวนิลเอสเตอร์ ปริมาณเส้นใยเสริมแรงอาจใส่ได้มากถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของโพลีเอสเตอร์และคอมโพสิตจากโพลีเอสเตอร์โดยทั่วไป ซึ่งจะเห็นได้ชัดถึงผลการเสริมแรงจากใยแก้ว แต่ใยแก้วไม่ได้ช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของโพลีเอสเตอร์และมักจะทำให้งานแยกลงโดยเฉพาะในภาวะที่มีกรดแก่หรือด่างแก่ เช่น กรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric) หรือกรดกัดแก้วที่สามารถละลายแก้วได้ในภาวะเช่นนี้ควรเลือกใช้คาร์บอนไฟเบอร์มากกว่า

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปของโพลีเอสเตอร์และคอมโพสิตของโพลีเอสเตอร์กับใยแก้ว

คุณสมบัติ	ไม่มีสารเติมเต็ม	Chopped roving-filled	SMC ²	เสริมแรงด้วยใยแก้ว
อุณหภูมิการอ่อนตัว (Heat-deflection temperature) ที่ 1.82 MPa, °C	79	180	180	200
ความคงทนความร้อนสูงสุดเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง °C	120	160	160	160
สัมประสิทธิ์การขยายตัว cm/cm/°C x 10 ⁻⁵	5	2.5	2.5	2.5
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) MPa	40	60	70	70
เปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation)	5	2	1	1
ความแข็งแรงดัด (Flexural strength) MPa	80	100	100	85
ความแข็งแรงกด (Compressive strength) MPa	60	150	150	170
ความแข็งแรงด้านการกระแทก (Notched Izod impact strength) J/m	20	200	250	200
ความแข็งแรง (Hardness) Rockwell	M70	M50	M50	M50
ความถ่วงจำเพาะ	1.2	1.6	2.2	2

คอมโพสิทชนิดนี้ มักจะเกิดการหดตัวมากระหว่างการเกิดโครงตาข่ายหรือการบ่ม และไม่สามารถทนทานภาวะอากาศได้ดีเท่าอีพ็อกซี จึงไม่นิยมใช้เป็นคอมโพสิทขั้นสูง (advanced composites) พวกไวนิลเอสเตอร์สามารถใช้ได้ดีกับเส้นใยเคฟลาร์ ซึ่งจะทำให้ความคงทนต่อความชื้น ได้ดีกว่าอีพ็อกซีเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงส่งผลให้คอมโพสิทจากโพลีเอสเตอร์มีสมบัติทางกล เช่น กำลังดึงและกำลังดัดดีขึ้นมาก และอิทธิพลของการจัดเรียงเส้นใยในทิศใดทิศหนึ่ง (orientation) ก็มีผลทำให้กำลังดึงและกำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากในทิศเดียวกับการเรียงตัวของเส้นใย แต่มีค่าต่ำใกล้เคียงกับกำลังของโพลีเอสเตอร์เรซินในทิศขวางการเรียงตัวของเส้นใย (transverse direction) คุณสมบัติที่ต่างไปตามทิศทางของการทดสอบหรือทิศของการเรียงตัวของสารนี้เรียกว่า anisotropic ซึ่งสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ด้วยกระบวนการผลิตแบบ pultrusion หรือ filament-winding กำลังจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่โพลีเอสเตอร์พวกบิสฟีนอลเอพูมาเรตและคลอเรนดิกจะยังคงมีกำลังดัดสูงแม้อุณหภูมิใช้งานจะสูงถึง 120 °C การเติมสารเติมเต็มจะช่วยลดค่าใช้จ่ายแต่ก็ไม่มีผลในการช่วยเสริมแรง

โพลีเอสเตอร์มักถูกใช้ในงานที่ทนการกัดกร่อนและทนไฟฟ้า ฉนวนอุณหภูมิสูง ซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงถึง 300°C โพลีเอสเตอร์จะเกิดการเสื่อมสภาพด้วยการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ได้ผลิตภัณฑ์พวก benzaldehyde, acetaldehyde และ benzene หรือถ้าเป็นไวนิลพอลิเมอร์ก็จะเกิดการแตกตัวของพอลิเมอร์ได้เป็นมอนอเมอร์หลุดออกมา สำหรับโพลีเอสเตอร์ทั้ง 5 ชนิด ชนิดออร์โทพทาเลตจะทนอุณหภูมิได้ต่ำสุด ส่วนบิสฟีนอลเอพูมาเรต จะทนต่ออุณหภูมิได้ดีที่สุดแม้ที่ 220 °C ก็ยังมีกำลังดัดสูง ไวนิลโทลูอีน (vinyl toluene) จะช่วยเพิ่มสมบัติทนความร้อนได้ดีกว่า สไตรีน เพราะสามารถเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) 3 ที่มีพันธะแข็งแรงกับ fumarate คุณสมบัติทางไฟฟ้าก็เป็นอีกสมบัติหนึ่งที่สำคัญต่อการใช้งานของโพลีเอสเตอร์ เพราะได้นำไปใช้เป็นฉนวนมอเตอร์ หรือ ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง กล่องสวิตช์ หม้อฉนวน ส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า ประกอบแผงวงจรไฟฟ้า เป็นต้น การใช้งานทางไฟฟ้ามักเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงด้วย คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่ dielectric strength และ dissipation factor ผลกระทบของความร้อนและ isophthalic/ vinyl toluene จะมีค่า dielectric strength สูงคงที่ เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิ 200-220 °C เป็นเวลาร่วม 10 อาทิตย์ ในขณะที่ คอมโพสิทจาก isophthalic/ strength จะให้ค่า dielectric strength ลดลงอย่างรวดเร็ว และที่ 240 °C คอมโพสิทจาก BPA –fumarate/vinyl toluene ซึ่งจะให้ค่าลดลงหลังอาทิตย์ที่ 3 โพลีเอสเตอร์ชนิด isophthalic มีค่า dissipation factor ต่ำที่คงไว้ได้จนถึงอุณหภูมิต่ำกว่า 180 °C สมบัติการหน่วงการลุกลามสามารถปรับปรุงได้ โดยการเติมสารประกอบที่มีธาตุฮาโลเจนเข้าไปในโมเลกุล (โบรมีนจะดีกว่าคลอรีน) ซึ่งอาจทำได้โดยการเตรียมโพลีเอสเตอร์ด้วย halogenated dihydric alcohol เช่น dibromoneopentyl glycol หรือ tetrabromo bisphenol A, chlorendic anhydride,

tetrabromophthalic anhydride หรือโดยการเติมธาตุฮาโลเจนเข้าไปในสารตั้งต้นของพอลิเอสเทอร์ เช่น การเติมโบรมีนใน tetrahydrophthalic anhydride หรืออาจผสมด้วยสารเติมแต่งที่ทนไฟได้เช่น aluminum trihydrate (ATH) ออกไซด์ของพลวง (antimony oxides) หรือเหล็กออกไซด์ จะช่วยให้ทนไฟได้ดีมากขึ้นเมื่อผสมกับพอลิเอสเทอร์ที่มีธาตุฮาโลเจน เหล็กออกไซด์ นอกจากนี้ ATH ยังช่วยลดควันด้วย แต่ ATH ไม่สามารถยับยั้งการลามของไฟ

พอลิเอสเทอร์มีข้อดีคือสามารถปรับสูตรให้ทนทานต่อแสงอุลตราไวโอเล็ต (ultraviolet, UV) ได้ ทำให้ใช้งานภายนอกที่ต้องรับแสงแดดเป็นเวลานานเกินกว่า 30 ปี แม้ว่าจะมีสีเปลี่ยนไปบ้างหรือความแข็งแรงลดลงไปบ้างก็ตาม การได้รับแสง UV จะทำให้พอลิเอสเทอร์ที่ใสเสื่อมสภาพ โดยเกิดเป็นสีเหลืองที่เข้มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อผิวหนังสีกร่อนหรือเกิดรอยขุ่นที่ผิวหนัง (เป็นรอยดำหนิที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลเนื่องจากความเค้น (stress crazing) ซึ่งเมื่อตรวจดูอย่างละเอียดพบว่า จะเป็นช่องว่างและเส้นสายพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่) การหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพอาจทำได้โดยการเลือกส่วนผสมสารตั้งต้นของพอลิเอสเทอร์ที่เหมาะสม สไตรีนและไวนิลมอนอเมอร์อื่นๆ ที่มีวงเบนซีนจะเกิดออกซิเดชันได้ง่าย จึงมักถูกแทนด้วยมอนอเมอร์พวกเมทาคริเลต (methacrylate) ที่ใช้กันมาก คือเมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate, MMA) ร่วมกับสไตรีน เพราะ MMA เกิดปฏิกิริยายากกับ fumarate พอลิเอสเทอร์ที่ได้ก็จะมี ความคงทน ทนทานต่อแสง UV มีสีสวยสดและทนต่อการสีกร่อนของเส้นใยได้ดีเยี่ยม ดีกว่าใช้ MMA หรือสไตรีนเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง อีกทั้งค่าดัชนีหักเหของแสงของ MMA น้อยกว่าสไตรีน เมื่อผสมกันแล้วจะมีค่าดัชนีหักเหของแสงใกล้เคียงกับของใยแก้ว จึงทำให้สามารถเตรียมเป็นคอมโพสิตแบบโปร่งใสเพื่อใช้เป็นแผ่นผนังใส สำหรับ greenhouse หรือเพดาน skylight เป็นต้น การลดอิทธิพลของแสง UV อาจทำได้โดยการเติมสารดูดกลืนแสง UV เช่น benzophenones เป็นต้น

2.4.2 สารเติมแต่งที่สำคัญสำหรับการเตรียมคอมโพสิต

2.4.2.1 สารคะตะลิสต์

หรือสารเร่งปฏิกิริยา (catalysts) หรือสารบ่ม หรือสารทำให้แข็ง (hardeners) อาจแบ่งเป็นสองชนิดคือชนิดที่ทำหน้าที่เป็นคะตะลิสต์ (catalytic curing agents) และชนิดที่ทำหน้าที่เข้าทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ เช่น จำพวกเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์ (organic peroxide) มักใช้เร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์หรือโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) สำหรับสารคะตะลิสต์ ที่ใช้กับ อีพ็อกซีเรซิน ได้แก่ พวก Lewis bases เช่น พอลิเอมีน (polyamines) พอลิเอไมด์ (polyamides) กลีซิดิลเอมีน (glycidyl amines) พวก Lewis acids เช่น บอโรนไตรเฮไลด์ (boron trihalides) เป็นต้น สารเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวให้อนุมูลอิสระเพื่อเข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งที่มีพันธะคู่หรือพันธะที่ไม่อิ่มตัวในมอนอเมอร์ที่ใช้เพื่อเจือจางเนื้อพอลิเอสเทอร์ เมื่อเข้าทำปฏิกิริยาแล้วก็จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ต่อไป สำหรับพอลิเอสเทอร์เรซินมีสารคะตะ

ลิสต์ 3 ชนิดที่ใช้กันมากที่สุด คือ เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (methyl ethyl ketone peroxide, MEKPO) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) และคิวโมนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (cumone hydroperoxide) MEKPO ใช้เป็นประจำสำหรับชิ้นงานโพลีเอสเตอร์ที่ขึ้นรูปแบบทาด้วยมือ (hand lay-up fabrication) (ที่สัดส่วน 1 ปอนด์ MEKPO ต่อ 100 ปอนด์ของโพลีเอสเตอร์เรซิน) โดยทั่วไป MEKPO จะอยู่ในสภาพสารละลายเข้มข้นร้อยละ 60 ที่เจือจางด้วยไดเมทิล ฟทาเลต (dimethyl phthalate) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกะตะลิสต์ ซึ่งเป็นการเหมาะสมที่จะซื้อสารละลายเจือจางของ MEKPO ที่บรรจุในขวดพอลิเอทิลีนแบบบีบใช้ปิดผนึกไว้อย่างดี (ขวดบรรจุ 10-15 ml) เพื่อป้องกันการปนเปื้อน และเก็บให้ห่างแหล่งให้ความร้อน เช่น ท่อไอน้ำ เครื่องฉายรังสี เพลวไฟ และประกายไฟ รวมทั้งให้ห่างกรดเข้มข้น สารช่วยเร่งปฏิกิริยาและสารที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ควรเก็บในตู้เย็นหรือที่มีอุณหภูมิประมาณ 75 °F แต่ไม่เกิน 90 °F จึงจะมีเสถียรภาพดี หากอุณหภูมิสูงขึ้นอายุครึ่งชีวิต (half life) ของสารก็จะลดน้อยลง เช่นที่ 180 °F มีอายุครึ่งชีวิต 118 ชั่วโมง และเปลี่ยนเป็น 4 ชั่วโมง หรือ น้อยกว่า 15 นาที ที่อุณหภูมิ 239 หรือ 560 °F ตามลำดับ เปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์เป็นที่นิยมเนื่องจากหาซื้อง่ายและราคาถูก และการใช้เปอร์ออกไซด์ก็ช่วยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา (เวลาของการก่อเจล และการทำให้สุก) ได้ง่ายขึ้น MEKPO เป็นสารระเหยได้ ห้ามผสมโดยตรงกับสารช่วยเร่งปฏิกิริยา (accelerators) คือ โคบอลต์แนฟทีเนต (cobalt naphthenate) เพราะจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงจนลุกเป็นไฟได้

อีพ็อกซีเรซิน สารกะตะลิสต์ที่สำคัญ ได้แก่ Lewis acids and bases พอลิเอไมด์ (polyamides) พอลิเอมีน (polyamines) สารบ่มชนิดเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรง ได้แก่ พอร์มัลดีไฮด์เรซิน ฟีนอลโนโวแลกเรซิน (phenol novolac resins) ไอโซไซยานเนต (isocyanates) กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids) โพลีเอสเตอร์ (polymercaptans) และ เอมีนชนิด primary and secondary

พอลิเอมีนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี เช่น diethylenetriamine (DETA), isophorone diamine (IPD), poly (oxypropylene triamine) 4, และ 4' diamino-diphenylmethane (MDA) เป็นต้น สัดส่วนการใช้ประมาณหนึ่งต่อสิบส่วนของเรซิน เอมีนมักก่อการระคายเคืองเมื่อสัมผัส แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) แล้วก็จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีอันตรายน้อยลง ลดการดูดความชื้น ผ่านกระบวนการได้ง่าย ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารบ่มในเนื้อเรซิน พอลิเอมีนมักเกิดปฏิกิริยาบ่มที่อุณหภูมิสูง และอาจต้องการสารช่วยเร่งปฏิกิริยา (accelerator) เช่น DETA แต่ IPD สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ไม่ทำให้สีเปลี่ยนไป มีความหนืดต่ำและทนสารเคมีดี ทำให้มีราคาสูงกว่าเอมีนชนิดอื่นๆ ส่วน MDA มีวงเบนซีนในโมเลกุลจึงให้ความคงทนต่ออุณหภูมิและสารเคมีได้ดีกว่า แต่มักละลายในอีพ็อกซีได้น้อยเพราะเป็นของแข็ง พอลิเอไมด์หรืออะมิโดเอมีน (amidoamines) มีการใช้มากที่สุด ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของกรดไขมันกับพอลิเอมีน มีราคาถูก มีผลกระทบต่อสีน้อย ใช้งานง่าย ผสมได้ทุกสัดส่วนให้ความแข็งแรงดี

และเกิดปฏิกิริยาบ่มที่อุณหภูมิไม่สูง มักใช้งานกับแผ่นลามิเนต (laminates) สำหรับแอนไอครายด์ในท้องตลาดมีหลายชนิดและมักจะเป็นชนิดที่มีโครงสร้างเคมีแบบวง เช่น phthalic anhydride, nadic methyl anhydride และ chlorendic anhydride โดยทั่วไปจะต้องใช้อุณหภูมิสูงในการบ่ม แต่สามารถใช้ร่วมกับ tertiary amines เช่น benzyldimethylamine, dimethylaminomethylphenol เป็นต้น ที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเร่งปฏิกิริยาบ่ม เร็วขึ้น โดยใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อยร้อยละ 0.5 – 2.5 โดยน้ำหนักของเรซิน

นอกจากนี้ปฏิกิริยาการสังเคราะห์หรือการบ่มของโพลีเอสเตอร์ อาจทำได้โดยการฉายรังสีอาบแสงอุลตราไวโอเลตและการให้ความร้อน การอาบแสงอุลตราไวโอเลตจะทำได้โดยต้องมีสารเคมีที่ไวต่อแสงที่เรียกว่า photosensitizers เช่น เบนโซอินอีเทอร์ (benzoin ether) และสารลดการออกซิเดชัน (reducing agents) เช่น ไดเอทานอลามีน (diethanolamine) หรือเบนซิลไดเมทิลเอมีน (benzyldimethylamine) ทำหน้าที่เป็นสารคะตะลิสต์ ระบบนี้นิยมใช้กับโพลีเอสเตอร์ เรซิน สารบ่มหรือคะตะลิสต์มีหลายชนิดขึ้นกับชนิดของเรซิน การนำไปใช้งาน (สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน ไฟฟ้า และความทนต่อสารเคมี) และการขึ้นรูป (ความหนืด อายุ เวลาเกิดเจล) อุณหภูมิและเวลาของการทำให้สุก โดยทั่วไปปัจจัยต่อการเลือกสารคะตะลิสต์ที่เหมาะสม คือ

- อุณหภูมิที่ต้องการทำปฏิกิริยาภายในระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้งาน
- ชนิดของมอนอเมอร์หรือส่วนผสมของมอนอเมอร์ที่ใช้
- อายุการใช้งาน (pot life) ตามที่ต้องการ
- เวลาการก่อเจลและการทำให้สุกตามที่ต้องการ
- อิทธิพลของแสงอาทิตย์และสภาวะอากาศต่อการใช้งานของผลิตภัณฑ์
- คุณสมบัติเฉพาะที่ต้องการที่อาจได้รับผลกระทบจากชนิดของสารเร่งปฏิกิริยา

สารเร่งปฏิกิริยาอาจมีประสิทธิภาพต่างกันขึ้นกับชนิดและอายุของสาร จึงควรทดสอบประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยากับมอนอเมอร์จำนวนน้อยๆ ก่อนใช้งานจริง อีกประการหนึ่งการเลือกสภาวะการบ่มที่เหมาะสม ก็จะช่วยบรรเทาผลกระทบจากการหดตัวของชิ้นงานหลังการทำให้สุกได้ ซึ่งการหดตัวเกิดจากการลดปริมาตรชิ้นงานในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมสร้างโครงตาข่าย 3 มิติ เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง การหดตัวของเรซินจะทำให้เกิดความเค้นคงค้าง (residual stress) ในใยแก้วเพราะใยแก้วไม่หดตัวในระหว่างปฏิกิริยา ใยแก้วจึงมีความเค้นแบบกด (compressive stress) เกิดขึ้น ในขณะที่ ในเรซินจะเกิดความเค้นแบบดึง (tensile stress) ส่วนที่บริเวณผิวสัมผัสของเรซินกับใยแก้วจะเกิดความเค้นเฉือน (shear stress) ขึ้น ความร้อนจากปฏิกิริยาบ่ม ก็ก่อให้เกิดการหดตัวเนื่องจากความร้อน (thermal shrinkage) เพราะเมื่อทำให้เย็นลงการหดตัวของเรซินจะไม่เท่ากับใยแก้ว (ปกติเรซินจะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมากกว่าใยแก้ว) ก็จะทำให้เกิดความเค้นคงค้างขึ้นอีก ดังนั้น การเร่งปฏิกิริยา บ่มเร็วเกินไป

หรือมีการคายความร้อนออกมามากเกินไป จึงเป็นการทำลายชิ้นงานทางอ้อม สภาวะสำหรับกระบวนการทำให้สุกจึงมีความสำคัญและต้องเลือกให้เหมาะสม ตัวแปรในกระบวนการบ่ม ได้แก่ อุณหภูมิการบ่ม (มักเป็นอุณหภูมิห้อง หรือเพียงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นสัก 10 °F อายุการใช้งานก็จะลดลงอย่างมาก และทำให้เวลาของการสุกเปลี่ยนไป) ความชื้น ชนิดของเรซิน ความหนาของชิ้นงาน อายุของเรซิน (โดยเฉพาะอายุการเกิดเจลหลังจากการผสมสารช่วยเร่งปฏิกิริยาแล้ว) ระบบสารช่วยเร่งปฏิกิริยา ผลกระทบจากสารยับยั้งปฏิกิริยา และสารอื่นๆ ที่เติมลงไป เช่น ผงสี (pigments) เม็ดสี (colorants) สารเติมเต็ม สารทำให้สุกอาจแบ่งตามอุณหภูมิการใช้งานดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั่วไปแบ่งชนิดตามอุณหภูมิที่ใช้งาน

ระบบสารทำให้สุกที่อุณหภูมิห้อง	ระบบสารทำให้สุกที่อุณหภูมิสูง
สารเร่งปฏิกิริยา : เปอร์ออกไซด์ - MEKPO (Methyl ethyl ketone hydroperoxide) - APP (Acetyl acetone hydroperoxide) - CHP (cumene hydroperoxide) - H ₂ O ₂ (hydrogen peroxide) สารช่วยเร่งปฏิกิริยา Promoters : Metal salts - CoOCT (Cobalt octoage) - CoNAP (Cobalt naphthalene) Accelerators : Aniline - DMA (dimethyl aniline) - DEA (diethyl anilime)	สารเร่งปฏิกิริยา : เปอร์ออกไซด์ ● อุณหภูมิใช้งาน 82-93 °C - Lauryl peroxide (Alperox) ● อุณหภูมิใช้งาน 110-127 °C - Bis (4-t-butylcyclohexyl) peroxydicarbonate (Percadox16) - Benzoyl peroxide (Lucidol98) - 2, 5-Dimethyl hexane-2 (USP-245) - 5-Diper, 2-Ethyl hexane (Lupersol256) - Azobisisobutyronitrile (Vazo) ● อุณหภูมิใช้งาน 127 – 149 °C - Tertiary butyl perbenzoate (Esperox10, TBPB, Trigonox C) - 2, 5-Dimethyl-2, 5-Di (t-butyl peroxy) hexane (Lupersol101) - Dicumyl peroxide (Dicup40C) - 2, 5-Dimethyl -2, 5-di (t-butyleroxy) hexane-3 (Lupersol130) อุณหภูมิใช้งาน 149 – 160 °C-1, 1-Bis (t-butyleroxy) 3,3,5- trimethycyclohexane (Lupersol231)

2.4.2.2 สารช่วยเร่งปฏิกิริยาหรือช่วยเร่งการบ่ม (accelerators หรือ promoters)

ได้แก่ โคบอลต์แนฟทีเนต (cobalt naphthalene มักใช้คู่กับอะคริลิก MEKPO) ไดเอทิลอะนิลีน (diethyl aniline) และไดเมทิลอะนิลีน (dimethyl aniline) เป็นต้น จะช่วยเพิ่มความว่องไวของปฏิกิริยาหรือช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น และทำให้เวลาในการก่อเจลสั้นลงหรือทำให้เกิดเจลได้ที่อุณหภูมิต่ำลงหรือไม่ต้องใช้ความร้อนเพิ่มเติม เช่น ที่อุณหภูมิห้อง มักผสมโคบอลต์ (Cobalt) หรือตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา มาพร้อมกับโพลีเอสเตอร์เรซินเลย ด้วยความเข้มข้นเพียงร้อยละ 0.3-1 (โดยน้ำหนัก) การเลือกสารช่วยเร่งปฏิกิริยาต้องเลือกให้เหมาะสมกับอะคริลิกจึงจะเสริมการทำงานให้มีประสิทธิภาพดี เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถนำไปใช้ได้โดยสะดวกเมื่อต้องการขึ้นรูป คือ เพียงผสมอะคริลิกเพิ่มลงไปเท่านั้นก็สามารถทำให้สุกได้โดยสมบูรณ์ นอกจากนี้ควรทราบข้อมูลการใช้งานของสารช่วยเร่งปฏิกิริยาด้วย เพราะอาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานสั้นลงได้ และทำให้มีเวลาไม่เพียงพอที่จะใช้ในการผสมเรซินหรือทำให้เส้นใยเปียกอย่างทั่วถึงก่อนการบ่มอย่างไรก็ตาม การปรับอัตราส่วนผสมของอะคริลิกกับสารช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมจะช่วยทำให้การบ่ม เกิดขึ้นได้ตามต้องการ ทั้งนี้การปรับอัตราส่วนผสมนั้นขึ้นกับความหนาทั้งหมดของชิ้นงาน (ชิ้นงานบางระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ดีกว่าชิ้นงานที่หนา ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานหนามีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นด้วย) ระยะเวลาการเกิดเจลตามที่ต้องการ และอุณหภูมิการบ่มที่ต้องการ ตารางที่ 2.5 แสดงผลกระทบจากความหนาของชิ้นงาน และอัตราส่วนอะคริลิกกับสารช่วยเร่งปฏิกิริยาต่อการใช้งาน

ตารางที่ 2.5 อิทธิพลของอัตราส่วนผสมของอะคริลิกกับสารช่วยเร่งปฏิกิริยาต่ออายุการใช้งาน และเวลาที่ลอกชิ้นงานจากแบบได้

ความหนาของชิ้นงาน (lamine thickness)	%MEKPO*	%Cobalt naphthenate	อายุในการใช้งาน (นาที)	เวลาพร้อมให้ลอกจากแบบ (นาที)
ไม่เกิน 1/8 นิ้ว	2.0	1.0	15-20	40-50
	1.0	1.0	20-30	60-80
1/8 -1/2 นิ้ว	1.0	20-30	60-80	
	1.0	0.75	50-70	90-110
มากกว่า 1/2 นิ้ว	1.0	0.5	70-110	หลายชั่วโมง

* มีปริมาณที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา 60% และ 6% ใน MEKPO และ cobalt naphthenate ตามลำดับ

2.4.2.3 สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา (inhibitors)

ที่นิยมมาก ได้แก่ เทอร์เทียรีบิวทิลแคทาคอล (tertiary butyl catechol) และไฮโดรควิโนน (hydroquinone) สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยามักผสมมากับเรซิน (โดยเฉพาะโพลีเอสเตอร์เรซิน)

เพื่อให้เรซินมีเสถียรภาพดีขณะเก็บ (ไม่เกิดเจลหรือทำให้เกิดซ้าง) สารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระจากสารคะตะลิสต์ หรือทำปฏิกิริยากับตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของสายโซ่โมเลกุลที่กำลังเจริญนั้น เพื่อ ยับยั้งการสังเคราะห์พอลิเมอร์ สารยับยั้งปฏิกิริยาบางตัวจะมีประสิทธิภาพดีสำหรับ โพลีเอสเตอร์เรซินทั้งในระหว่างการเก็บและสถานะการสังเคราะห์ สารยับยั้งปฏิกิริยาที่ใช้กับโพลีเอสเตอร์เพื่อประโยชน์ดังนี้

- ป้องกันการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ไม่ให้เกิดขึ้นอย่างเต็มที่เร็วเกินไปในระหว่างการผลิตด้วยปฏิกิริยา esterification
- เพิ่มเสถียรภาพในการเก็บรักษาภายหลังการผลิต
- ป้องกันการเกิดเจลก่อนเวลาอันสมควรในผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ หรือในขั้นตอนการนำไปใช้งาน เช่น การกวนผสม หรือการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ๆ
- เพื่อรักษาเสถียรภาพของมอนอเมอร์

ความจำเป็นในการใช้สารยับยั้งปฏิกิริยาควรสอบถามจากผู้ผลิตเรซินเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานและเมื่อมีการใช้สารยับยั้งปฏิกิริยาก็ควรมีการปรับปริมาณคะตะลิสต์ด้วย เพื่อให้ปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้ปกติ

2.4.2.4 สารเชื่อมต่อ (coupling agents)

ทำหน้าที่ปรับสภาพพื้นผิวสัมผัส เดิมเดิมระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ และช่วยให้เกิดแรงหรือพันธะเคมียึดเหนี่ยวระหว่างกัน จึงทำให้สามารถใส่สารเติมเต็มหรือเส้นใยลงไปได้ปริมาณมาก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลของคอมโพสิตให้ดีขึ้นตามต้องการ สารเคมีตัวแรกที่ใช้ในงานคอมโพสิตของโพลีเมอร์กับใยแก้วคือ สารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียมแบบเวอร์เนอร์ Werner-type chrome complex หรือ เมทาอะโคราโตโครมิกคลอไรด์ (methacrylate chrome chloride) หรือ โวลัน (volan) ซึ่งต่อมาถูกแทนที่ด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะอินทรีย์ ได้แก่ ออร์กาโนซิลเลน (organosilanes) ออร์กาโนทิตาเนต (organotitanates) ออร์กาโนเซอร์โคเนต (organozirconates) และสารอื่นๆ เช่น สเตียเรต (stearate) คลอรีเนตพาราฟิน (chlorinated paraffins) กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic) พอลิเมอร์ของเซลลูโลส (polymerizable celluloses) และสารทำให้เปียกต่าง ๆ (wetting agents) ซึ่งจะขจัดผิวเส้นใยและสารเติมเต็มให้เปียก ทำให้เส้นใยหรืออนุภาคเหล่านี้สามารถกระจายตัวในเนื้อเรซินได้อย่างสม่ำเสมอทั่วถึง เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น สารทำให้เปียกประเภทไม่ชอบน้ำ (hydrophobic wetting agents) ได้แก่ อากาศ สารปนเปื้อนต่างๆ และความชื้นที่อยู่บนพื้นผิวอนุภาคที่ชอบน้ำ (hydrophilic filler surface)

โดยทั่วไปโครงสร้างเคมีของสารเชื่อมต่อซิลเลน (silane coupling agents) คือ $(RO)_3SiR'X$ โดยที่ X หมายถึง หมู่อินทรีย์เคมีที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น เอมีน เมทาคริเลต อีพ็อกซี และอื่น ๆ

หมู่เคมีที่ว่องไวต่อปฏิกิริยานี้ติดกับอะตอมซิลิกอนโดยพันธะของไฮโดรคาร์บอน R' ส่วนหมู่เคมี RO ได้แก่ หมู่อัลคอกซี (alkoxy) หรือหมู่อะซิโทกซี (acetoxy) ซึ่งเมื่อมีความชื้นจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolyzed) เปลี่ยนเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (silanol, $\text{Si}(\text{OH})_3$) ยึดเกาะที่ผิวเส้นใยหรืออนุภาคแทนสารช่วยยึดเกาะพวกออร์กาโนทิตานเนตหรือออร์กาโนเซอร์โคเนต สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตรอนอิสระที่อยู่บนพื้นผิวเส้นใยหรืออนุภาคที่บริเวณผิวสัมผัสแล้วก่อเป็นชั้นเคลือบขนาดโมเลกุลเดี่ยว (monomolecular) ซึ่งเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ทั้งนี้ทิตานเนตอาจไม่ใช่สารเชื่อมต่อที่แท้จริง เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นนั้นเป็นพันธะไม่ทนน้ำ อย่างไรก็ตาม โลหะอินทรีย์ก็ถือเป็นสารเพิ่มความว่องไวให้กับพื้นผิว ซึ่งจะช่วยให้ผ่านกระบวนการผลิตได้ดีและมีแรงยึดเกาะที่ดีกับผิวอนุภาค ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างเกี่ยวพันแทรกอยู่ภายใน (interpenetrating network) ออร์กาโนซิลเลนที่ผสมกับสารเติมเต็มยังช่วยเพิ่ม กำลังยึดได้อย่างมาก สารเชื่อมต่อเหล่านี้ช่วยลดความหนืดระหว่างเรซินและสารเติมเต็ม ส่งผลให้สามารถเติมเส้นใยหรือสารเติมเต็มได้ปริมาณมาก เช่น ร้อยละ 90 ของเหล็กออกไซด์ในไนลอน 66 (Nylon 66) โดยที่มีความหนืดเท่ากับไนลอน 66 และโดยทั่วไป การเติมสารช่วยยึดเกาะทิตานเนตในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะช่วยลดพลังงานการผลิตและเพิ่มอัตราการผลิต แต่พบว่าการเติม neoalkoxytitanate หรือ zirconate ในพอลิไวนิลคลอไรด์กลับทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นมาก ออร์กาโนซิลเลนไม่เหมาะจะใช้งานกับคาร์บอนไฟเบอร์และเส้นใยอะรามิด แต่ใช้ได้ดีมาก ๆ กับใยแก้วในพอลิเมอร์คอมโพสิต สารช่วยยึดเกาะออร์กาโนซิลเลนนี้มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมพลาสติกและยางถึงร้อยละ 40 และ 30 ของกำลังการผลิตทั้งหมดตามลำดับ ซิลเลนไม่เหมาะที่จะใช้กับพอลิโอเลฟินส์ สารช่วยเกาะชนิดอื่นที่เหมาะสมกับพอลิโอเลฟินส์ ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ของเซอร์โคเนียม (zirconium organic compounds) และซิลานอสัลโฟนิลเอไซด์ (silanosulfonyl azide)

การปรับปรุงสมบัติยึดเกาะที่ผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งถือเป็นสารกึ่งเสริมแรง (semireinforcing filler) อาจทำได้โดยใช้สารเชื่อมต่อ เช่น ไซของมาลีเอตพโรพิลีน (maleated propylene waxes) ที่มักใช้เมื่อต้องผสมกับพอลิพโรพิลีน (polypropylene) หรือพอลิเอทีลีน (polypropylene) หรือเอทีลีน-เอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (ethylene-ethyl acrylate copolymer) หรืออะคริลเมทิลเซลลูโลสเอสเตอร์ ชนิดพร้อมสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ (polymerizable acrylmethyl cellulose ester) ใช้เป็นสารเชื่อมต่อของสารเติมเต็มสำหรับงานขึ้นรูปแบบ bulk และ sheet molding compounds

2.4.2.5 สารเติมเต็มและผงสี (fillers and pigments)

การใส่สารเติมเต็มหรือผงสีลงในเรซินมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการหดตัว ลดการเกิดรอยแตกเส้น (crazing) ลดต้นทุนวัสดุ เพิ่มสีและความใส หรือทำให้ทึบแสง (opacity) และปรับปรุงการ

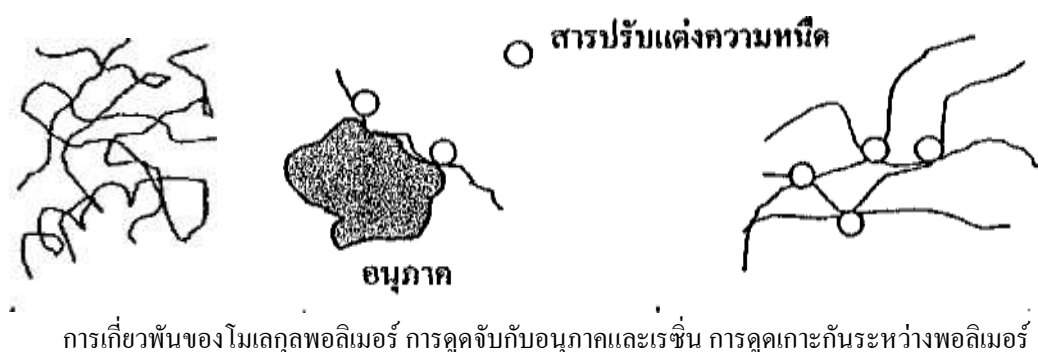
จัดแต่งผิวหน้า (surface finish) แต่หากใส่สารเติมเต็มมากเกินไป ความสามารถในการไหล (fluidity) ของเรซินจะลดลง และอาจไม่เหมาะต่อการใช้งาน การใช้สารเติมเต็มยังทำให้ตรวจหาตำหนิภายในของชิ้นงานได้ยากขึ้น สารเติมเต็มที่ใช้มาก ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ช่วยเพิ่มความขาวและปรับผิวงานให้เรียบสวย) อลูมิเนียมซิลิเกต (aluminium silicate) ช่วยเพิ่มความทนทานต่อสารเคมีที่บดแสง มีสมบัติเป็นฉนวนได้ดีขึ้นและปรับผิวหน้าให้สวยงาม) ดินชนิดต่าง ๆ (diatomaceous earth) และดินเหนียวชนิดต่างๆ (clays) วัสดุที่เนื้อไม่อัดแน่น เช่น ผงซิลิกาชนิดแขวนลอย (colloidal silicas) ดินเหนียวเบนโทไนต์ (bentonite) ผงแป้ง (talc ที่ใช้กันมากคือแป้งทัลคัมและแคลเซียมคาร์บอเนต) แผ่นผงไมกา (mica platelets) หรือผงใยหินหรือใยแก้ว ชนิดเส้นสั้น ก็สามารถใช้กับพอลิเอสเทอร์เรซินได้เพื่อให้เกิดคุณสมบัติการไหลแบบที่เรียกว่าทิไซโทรอปิก (thixotropic) อนุภาคสารเติมเต็มมักมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อน้ำหนักสูง เมื่ออยู่ในวัสดุจะรวมตัวกันเชื่อมโยงต่อเนื่องเป็นแผง ทำให้เกิดความแข็งหรือเกิดเป็นเจลอยู่เสมอเมื่อวางตั้งทิ้งไว้ และเมื่อระบบถูกรบกวนโดยการกวนหรือโดยแรงเค้น โพลีเอสเทอร์ก็จะกลับคืนมาไหลได้ดีพอที่จะทาบนผิวชิ้นงานได้ วัสดุที่มีสมบัติไซโทรอปิกบางครั้งเรียกว่า *antisaging agents* วัสดุที่มีสมบัติไซโทรอปิกนี้จึงมีประโยชน์มากในงานทาพื้นผิวในแนวตั้งที่ไม่ต้องการให้เกิดปัญหาการไหลย้อย ไหลหยดได้ ปริมาณสารเติมเต็มที่ใช้อาจไม่สูงมาก เช่น ผงซิลิกาชนิดแขวนลอยใช้เพียงร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนักก็จะทำให้หนืดมาก ผู้ผลิตส่วนมากก็มักจะผสมเรซินที่มีสมบัติไซโทรอปิกให้เลือกไว้ด้วย ผงซิลิกาชนิดแขวนลอยที่มีสมบัติไซโทรอปิกในท้องตลาด ได้แก่ Cab-o-Sil และ Santocel

ส่วนผงสีที่ใช้ในงานคอมโพสิต สามารถใช้ได้ทั้งผงสีประเภทอนินทรีย์ และอินทรีย์ รวมทั้งผงถ่านดำ (carbon black) ผงสีอนินทรีย์ได้เริ่มใช้มาก่อนที่จะพัฒนาผงสีอินทรีย์ให้มีเสถียรภาพดีพอที่จะนำมาผสมในพลาสติกได้ ผงสีอนินทรีย์ ได้แก่ สีแดงออกไซด์ต่างๆ ของเหล็ก (ocher, umbers และ siennas) สีขาวทาทาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) หรือสังกะสีออกไซด์ (zinc oxide) ซึ่งจะช่วยให้พลาสติกมีความคงทนต่อสภาวะอากาศด้วย สีดำของผงถ่าน สีแคดเมียม (ลดการใช้ลงเพราะมีความเป็นพิษ) สีโครเมียมออกไซด์ สีโคบอลต์บลู (cobalt blue) เป็นต้น สำหรับอินทรีย์ ได้แก่ พวกสีย้อมผ้าต่างๆ (dyes) และพาทาโลไซยานิน (phthalocyanines) สีย้อมผ้าอินทรีย์เป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างซับซ้อนและ ประกอบด้วยโครงสร้างเคมีที่เรียกว่าโครโมฟอร์ (chromophore) เช่น พันธะคู่หรือวงเบนซีน (benzene) ที่ถูกกระตุ้นได้ง่ายด้วยแสงและและเปล่งสีออกมาหรือมีหมู่เคมีที่ให้สีอย่างน้อย 1 หมู่ สีย้อมอินทรีย์ที่นิยมกันใช้มาก ได้แก่ สีย้อมจำพวกเอโซ (azo มีหมู่เคมีที่ให้สี คือ N=N เช่น สีเหลือง acid yellow 36) สีย้อมแอนทราควิโนน (anthraquinone เช่น สีแดง solvent red 111) สีย้อมแซนทีน (xanthene เช่น สีม่วง basic violet 10)

และสีซ็อมเอเซอร์ (azure เช่น สี indulene) สีซ็อมอินทรีรี่จะละลายได้ดีในพอลิเมอร์ แต่สีอินทรีรี่มักเป็นผงสีที่ไม่ละลายและเป็นอนุภาคขนาดเล็ก 0.01 – 1.0 ไมครอน สีอินทรีรี่ที่สำคัญ ได้แก่ กลุ่มผงสีแดง คือ สีโมนาโซ (monazo pigments) สีไดอะโซ (diazo pigments ให้สีเหลือง benzidine yellow ก็ได้) สีเอนทราควิโนน สีเพอร์ริลีน (perylene) และสีไทโออินดิโก (thioindigo) กลุ่มผงสีน้ำเงินและเขียวคือสีพาทาโลไซยานิน กลุ่มสีม่วง คือ สีควินาคริโดน (quinacridone เช่น สีม่วงเบอร์ 19) และสีไดอะซาซีน (diaxazines เช่น carbazole dioxazine violet) เป็นต้น การปรับแต่งสีให้ดูโดดเด่นขึ้นด้วยการเติมผงสีประกายมุก (pearlescent pigments) หรือสีเรืองแสง (fluorescent pigments) หรือประกายแวววาวอาจทำได้โดยการเติมผง อลูมิเนียมหรือบรอนซ์ ซึ่งปัจจุบันมีผงสีมีมากกว่า 200 ชนิด ให้เลือกใช้ โดย สีอินทรีรี่ได้รับความนิยมมากกว่าสีอินทรีรี่

2.4.2.6 สารปรับแต่งความหนืด (rheology modifier)

มักเป็นพอลิเมอร์ การปรับแต่งสมบัติโซทรอปิก นอกจากทำได้โดยการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคสารเติมเต็ม (association with resin and filler) เช่น ที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ยังมีกลไกอื่นๆ ที่ช่วยให้เกิดสมบัตินี้ ได้แก่ การเกี่ยวพันกันของโมเลกุล (entanglement เพราะมีโมเลกุลใหญ่ยาว) และการยึดเกาะกันระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ (intermolecular polymer association) ดังแสดงในรูป 2.1 ตัวอย่างสารปรับแต่งความหนืดที่มีในท้องตลาด เช่น SolplusTX5 และ SolplusAX5 (มักใช้คู่กันที่ปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1 ของน้ำหนักสารเติมเต็ม) ซึ่งพอลิเมอร์ในสารทั้งสองจะเกาะกลุ่มกันเกิดเป็นโครงข่ายที่สภาวะการเหนียวต่ำและมีเสถียรภาพสูง เพื่อดำเนินการหยุดยั้งหรือการแข็งตัวของเรซิน แต่เมื่อมีการกวนหรืออยู่ในภาวะเหนียวสูงก็จะทำให้โครงข่ายแตกสลายทันที ทำให้ความหนืดลดลงและทำงานได้ง่ายขึ้น สารปรับแต่งความหนืดมักถูกผสมหลังการปรับให้อนุภาคกระจายตัวสม่ำเสมอแล้ว และไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติหลังการบ่ม



รูปที่ 2.1 แบบจำลองกลไกการทำงานของสารปรับแต่งความหนืดเพื่อเพิ่มสมบัติ
ทีโซทรอปิก กิตติ อนุชาพันธ์, (2548)

2.4.2.7 สารช่วยการกระจายอนุภาค (hyperdispersant)

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นพอลิเมอร์และส่วนที่สามารถดูดเกาะบนอนุภาคได้ จึงมักใช้ควบคู่กับสารเติมเต็มและผงสี เพื่อช่วยให้อนุภาคเหล่านี้กระจายได้ทั่วถึงสม่ำเสมอในเนื้อเรซิน โดยมักจะผสมเข้ากับเรซินก่อนการผสมสารเติมเต็มหรือผงสีเข้าด้วยกัน สารช่วยการกระจาย ช่วยลดความหนืด (ช่วยลดปริมาณสไตรีนที่ใช้ไปด้วย) ทำให้สามารถเติมสารเติมเต็มและผงสีได้มากขึ้น ช่วยเสริมความแข็งแรงโดยทำให้เส้นใยเปื่อยมากขึ้นและลดฟอง ช่วยให้คุณภาพการผลิตคงที่สม่ำเสมอ ช่วยให้อนุภาคของสารเติมเต็มและผงสีเปียกได้ดี ทำให้กระจายตัวได้รวดเร็วกว่า ลดการแยกสี และทำให้การผสมเข้ากันสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวมากกว่าปริมาณการใช้สารช่วยการกระจายที่เหมาะสม คือประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของสารเติมเต็มปริมาณสารช่วยการกระจายที่ควรใช้กับผงสีอาจคำนวณได้ง่ายๆ ตามคำแนะนำของผู้ขาย เช่น ร้อยละของ สารช่วยการกระจาย (เทียบกับน้ำหนักผงสี) = พื้นที่ผิวของผงสี (m^2/g)/5 ตัวอย่างสารช่วยการกระจายในท้องตลาด เช่น SolplusD510 (มีหมู่เอมีน ไปด้วยจับบนผิวอนุภาค เหมาะกับการบ่ม ด้วยโคบอลต์แนพทาไลน์ที่อุณหภูมิห้อง และใช้ในงานเคลือบเจล (gel coat) ใช้ได้ดีกับอีพ็อกซีเรซิน) Solplus D520, D530 จะใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นกับการบ่มด้วยเปอร์ออกไซด์ โดยมีหมู่กรดใช้ในการจับอยู่หนึ่งหมู่หรือหลายหมู่

2.4.2.8 สารช่วยลดการหดตัว (low profile หรือ low shrink additives, LPA)

โพลีเอสเตอร์เรซินมีปัญหาเรื่องการหดตัวหลังการบ่มมาก ซึ่งทำให้ผิวชิ้นงานเป็นลูกคลื่นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทาสีทับ การหดตัวนี้อาจจะแสดงผลทั้งการเป็นลูกคลื่นและรอยแตกภายในหรือฟองอากาศ การหดตัวอาจทำให้บรรเทาได้ด้วยการเปลี่ยนจากระบบวัฏภาค (phase) เดียวไปเป็นระบบสองวัฏภาคระบบสองวัฏภาค จะทำให้เกิดการขยายตัวไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (ซึ่งปกติจะหดตัวถึงร้อยละ 7) แต่เนื่องจากระบบนี้มีการเติมสารช่วยลดการหดตัว จึงไม่ก่อให้เกิดการหดตัวจนกระทั่งปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์เสร็จสมบูรณ์ และปริมาตรสุดท้ายอาจจะเพิ่มขึ้น (ประมาณร้อยละ 3) แต่ผลกระทบนี้ไม่ปรากฏในงานขึ้นรูปแบบทาด้วยมือ เพราะไม่มีการคายความร้อนอย่างรวดเร็วและไม่มีการขยายตัว เนื่องจากความร้อน สาร LPA ตัวแรกก็คือ ผลพอลิเอทีลีน ต่อมาก็เปลี่ยนเป็นผงพอลิเมทิลอะคริเลต (polymethyl acrylate) ซึ่งจดลิขสิทธิ์โดย YJ Huang ,CM Liang ในปี 1968 และเริ่มใช้เป็นมาตรฐานตั้งแต่นั้นมา สาร LPA ตัวอื่นๆ ก็ได้แก่ พอลิสไตรีน เซลลูโลสอะซีเตตบิวไทเรต พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิไวนิลอะซีเตต พอลิยูรีเทน พอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone) และที่เป็นชื่อทางการค้า ได้แก่ Nevlon (Union Carbide) การเติมสาร LPA มักทำให้คุณสมบัติทางกลลดลง แต่มักเพิ่มคุณสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น

2.4.2.9 สารช่วยลอกจากแม่แบบ (mold releasing agents)

การดึงลอกชิ้นงานออกจากแม่แบบสามารถทำให้ง่ายขึ้นด้วยการใช้สารหล่อลื่นภายนอก เช่น ไข (waxes) หรือซิลิโคน (silicones) ทาบนผิวแม่แบบ ซึ่งสารหล่อลื่นที่มีวิธีการใช้แบบนี้ เรียกว่าสารหล่อลื่นภายนอก (external lubricants) สารหล่อลื่นบางชนิด เช่น สังกะสีสเตียเรต (zinc stearate) หรือไขพาราฟินสามารถผสมไปกับเรซินและเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูป สารหล่อลื่นเหล่านี้จะแพร่ไปอยู่ที่ผิวของชิ้นงานทำหน้าที่หล่อลื่นไม่ให้ติดกับผิวแม่แบบ ซึ่งจะช่วยให้ลอกออกได้ง่าย สารหล่อลื่นที่มีวิธีการใช้แบบนี้จึงเรียกว่าสารหล่อลื่นภายใน (internal lubricants)

2.4.2.10 สารดูดซับรังสีอุลตราไวโอเล็ต (UV absorbers หรือ UV stabilizers)

ใช้ผสมในเรซิน ที่ใช้งานกลางแจ้งและต้องโดนรังสีอุลตราไวโอเล็ต (ช่วงคลื่น 290-400 nm) จากแสงอาทิตย์หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent lighting) ซึ่งจะทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์ขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดการเสื่อมสภาพที่ให้สารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิล (C=O) อยู่ด้วย ทั้งนี้พบว่า คลื่นแสงขนาด 340 nm (คิดเป็นพลังงานพันธะ 84 kcal/mol) ก็เพียงพอที่จะทำให้พันธะเดี่ยวของ คาร์บอน – คาร์บอนแตกออก หรือพลังงานเพียง 63 kcal/mol สำหรับการทำลายพันธะคาร์บอน – คาร์บอนในเอทิลเบนซีน (ethylbenzene) และสารต้านการออกซิเดชัน (antioxidants) ก็ไม่เพียงพอที่จะยับยั้งการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้น สารดูดซับรังสีอุลตราไวโอเล็ตตัวแรกก็คือฟีนิลซาลิไซเลต (phenyl salicylate หรือ salol, $C_6H_4OHCOOC_6H_5$) ซึ่งนำไปใช้ในครีมกันแดด แต่ตัวที่สำคัญก็คือ 2 ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนน (2hydroxybenzophenone, HBP) ซึ่งดูดกลืนคลื่นที่ 260 nm โดย HBP หรืออนุพันธ์ของ HBP ซึ่งเป็นหมู่คีเลต (chelates) ด้วยพันธะไฮโดรเจนจะดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเล็ตแล้วเปลี่ยนโครงสร้างเป็นควินอยด์ (quinoid structure) ซึ่งเมื่อลดความร้อนก็จะกลับคืนรูปเดิม อนุพันธ์ 4 alkoxy HBP จะเลื่อนการดูดกลืนแสงไปที่ 285 nm จึงเพิ่มความสามารถการดูดกลืนคลื่นในช่วง 290-400 nm ได้มาก โดยจะมีความสามารถในการดูดกลืนมากขึ้นเมื่อพลังงานพันธะไฮโดรเจนสูงขึ้น และจะลดลงเมื่ออยู่ในตัวกลางที่มีขั้ว สารดูดกลืนคลื่น UV อื่นๆ ได้แก่ ไฮดรอกซีฟีนิลเบนโซไฮดรอะโซล (hydroxyphenylbenzotriazoles) ทำงานที่ 400 nm อนุพันธ์ของกรดซินนามิก (cinnamic acid, $C_6H_5-CH=CHCOOH$) ไม่ดูดกลืนคลื่นแสงช่วง visible จึงใส่แต่สามารถดูดกลืนแสง UV ช่วง 310-320 nm จึงใช้เป็น UV stabilizer สารประกอบเชิงซ้อนของนิกเกิล (nickel chelates) ใช้เป็น quencher เพราะทำงานพร้อมกับโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้วคายพลังงานออกมาเป็นคลื่นอินฟราเรด (infrared) นอกจากนี้ ได้แก่ ไดอัลคิลไดไธโอคาร์บาเมต (dialkyl dithiocarbamates) โดยทำหน้าที่เป็นตัวสลายเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide decomposer) สารที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ก็คือ hindered amine stabilizers (HALS) เช่น bis (2,2,6,6 tetramethyl 47 piperidyl) sebacate ซึ่งจะไม่ดูดกลืนคลื่นที่สูงกว่า 250 nm จึงไม่อาจเรียกว่าเป็น UV stabilizer แต่เชื่อว่าการทำงานของ

HALS จะเริ่มจากการเปลี่ยนรูปไปเป็นอนุมูลอิสระไนโตรออกซิด (nitroxylradicals, >N-O) ซึ่งจะไปจับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการออกซิเดชัน ทั้ง HALS และ UV stabilizers ทำงานได้ดีด้วยความเข้มข้นน้อยๆ ประมาณร้อยละ 0.5 สังกะสีออกไซด์และทาทาเนียมออกไซด์หรือสารผสมของสังกะสีออกไซด์กับ dialkylthiocarbamate ก็เป็น UV stabilizer ที่มีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับผงถ่านดำ (เมื่อต้องการให้ชิ้นงานเป็นสีดำ)

2.4.2.11 สารเติมแต่งอื่นๆ

อาจมีสารเติมแต่งอื่นๆ ที่มีความสำคัญในการใช้งานเฉพาะทางที่ได้ผสมลงในเรซินแล้ว โดยผู้ผลิตเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีและไม่ต้องปรับปรุงสัดส่วนผสมต่างๆ ให้ยุ่งยาก สารเติมแต่งอื่นๆ ที่สำคัญ ได้แก่ สารหน่วงการลามไฟ (flame retardants) หรือหน่วงการลุกไหม้ (fire retardants) เช่น ออกไซด์ของพลวง (antimony trioxide ใช้ประมาณร้อยละ 3-5 เหมาะกับ chlorinated หรือ brominated polyester หรือ vinyl ester) สังกะสีบอเรต (zinc borate) อลูมินาไตรไฮเดรต (alumina trihydrate, ATH) หรือไขที่มีคลอรีน (chlorinated waxes) การเลือกใช้งานของสารพวกนี้ต้องคำนึงสภาวะอากาศของการใช้งาน เพราะหากเป็นสารที่มีฮาโลเจน (halogens) อยู่ด้วยก็มีแนวโน้มที่จะมีสีเปลี่ยนไปตามระยะเวลาที่ใช้งาน สารป้องกันการเกาะติดกัน (antiblocking agents) บางครั้งก็เรียก antislip agents เพราะว่าพอลิเมอร์ส่วนมากจะเป็นตัวนำที่ไม่ดีจึงมักเกาะติดกัน จึงต้องทำให้ความเหนียวติดลดลงหรือทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงด้วยการเติมสารจำพวก เอไมด์ของกรดไขมัน (fatty acid amides) เช่น อีรูคาไมด์ (erucamide) โอลีเอไมด์ (oleamide) ไขต่างๆ ซึ่งจะแพร่ไปอยู่ที่ผิวเพื่อลดการเหนียวติด นอกจากนี้ เกลือโลหะของกรดไขมัน และเอสเทอร์ของกรดไขมันสามารถแพร่ไปอยู่ที่ผิวและช่วยกระจายประจุไฟฟ้าได้ดี และลดการเกาะติด (บางครั้งเรียกว่า antistats) ในทางกลับกันผงถ่าน (carbon) และกราไฟท์ (graphite) นิยมผสมในเรซินเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าแต่หากต้องการลดการลื่นบนพื้นผิวที่เดินผ่านก็อาจผสมเศษผงหินหรือผงทราย (sand and grits) ได้ อลูมินา (alumina) นิยมเติมเพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนและปรับปรุงความต้านทานต่อการสึกกร่อนให้ดีขึ้น สารต้านการออกซิเดชัน (antioxidants) ได้แก่ พวก secondary aromatic amines และ hindered phenols ที่มีผสม dialkyl thiopropionates กับ phosphates เอาไว้ด้วยสารต้าน โอโซน (antiozonants) เช่น อนุพันธ์ของphenylenediamine (PDA), methylheptyl,metylbutyl เป็นต้น

2.4.3 เส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุคอมโพสิต (Reinforcing Fibers)

ในการเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบนั้น องค์ประกอบที่ถือว่าสำคัญที่สุดประการหนึ่งก็คือเส้นใยเส้นใยที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิดหรือเคฟลาร์ อย่างไรก็ตาม ยังมีเส้นใยอีกหลายชนิดที่มีสมบัติเด่นไม่แพ้กัน เช่น เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยแร่ และเส้นใยสังเคราะห์ต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

- เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers)
- เส้นใยแร่ (Mineral Fibers)
- เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fibers)
 - เส้นใยสังเคราะห์อินทรีย์ (Synthetic Organic Fibers) ได้แก่
 - เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber)
 - เส้นใยเพท (PET Fiber)
 - เส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene Fiber)
 - เส้นใยสังเคราะห์อนินทรีย์ (Synthetic Inorganic Fibers) ได้แก่
 - เส้นใยแก้ว (Glass Fiber)
 - เส้นใยคาร์บอนและกราไฟต์ (Carbon and Graphite Fiber)
 - เส้นใยอะลูมินา (Alumina Fiber)
 - เส้นใยโบรอน (Boron Fiber)
 - เส้นใยซิลิกอน (Silicon Based Fiber)

ถึงแม้ว่าเส้นใยที่ใช้เสริมแรงจะมีหลากหลายแต่สิ่งๆที่เหมือนกันก็คือปัจจัยทั้ง 4 ประการ ที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลดังนี้

1. สมบัติเชิงกลของเส้นใย
2. ผิวนสัมผัสระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์
3. ปริมาณของเส้นใย
4. การจัดเรียงตัวของเส้นใย

ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบมากน้อยเพียงไรก็ขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของเส้นใยแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

2.4.3.1 เส้นใยแร่ (Mineral Fiber)

เส้นใยแร่ที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง คือ เส้นใยแอสเบสตอส (Asbestos) ซึ่งครั้งหนึ่งเคยได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง (ตารางที่ 2.6) และมีราคาถูก แต่เนื่องจากปัญหาที่เกิดจากการหายใจเอาเส้นใยซึ่งมีขนาดเล็กเข้าไปในร่างกาย ก่อให้เกิดอันตรายต่อปอด ทำให้ความนิยมในการใช้งานลดลงไปตั้งแต่ปี 1915 เส้นใยแร่ที่รู้จักกันคืออีกชนิดหนึ่ง คือ Wollastonite หรือ Calcium metasilicate ซึ่งมีค่า aspect ratio ประมาณ 3:1

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเส้นใยแอสเบสตอส

Property	Chrysotile	Crocidolite
Young's modulus (GPa)	160	190
Tensile strength (MPa)	3100	3500
Density (Mg/m ³)	2.56	3.43
Specific modulus [(GPa)/(Mg/m ³)]	62.5	55.4
Specific strength [(MPa)/(Mg/m ³)]	1211	1020
Maximum service temperature	600	400

2.4.3.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber)

เส้นใยธรรมชาติที่รู้จักกันดี ได้แก่ ฝ้าย ปอ ป่าน และ ไหม เป็นต้น การนำเอาเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดมาเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบนั้น ปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวผลักดันก็คือราคาต้นทุนที่ต่ำ และทำให้ได้ชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา ข้อดีอื่นๆ ของการใช้เส้นใยธรรมชาติก็คือ แหล่งวัตถุดิบสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (renewable resource) ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่มีค่า aspect ratio ต่ำ จึงทำให้ไม่เหมาะสมกับการนำไปปรับปรุงสมบัติเชิงกล ทั้งในด้านความแข็งแรงและความเหนียว แต่ก็มีเส้นใยธรรมชาติบางชนิดที่สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติทางกลของของวัสดุเชิงประกอบได้ เช่น ปอ มีค่ามอดูลัสสูงกว่าเส้นใยแก้ว (ดูตาราง 2.7) ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความแข็งตึง (stiffness) และความทนแรงกระแทกที่สูง

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางชนิด

	Density (Mg/m ³)	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Wood	1.5	40	40	20
Jute	1.3	72	14	14
Hemp		71	22	7
Sisal	0.7	74	-	26
	Young' modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	specific modulus [(GPa)/(Mg/m ³)]	specific Strength [(MPa)/(Mg/m ³)]

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

	Density (Mg/m ³)	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Wood		500		333
Jute	55.5	442	43	340
Hemp		460		
Sisal	17	530	24	757

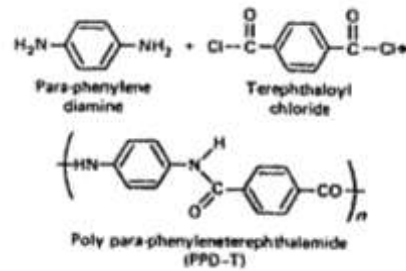
นอกจากสมบัติเชิงกลแล้ว ข้อจำกัดในการใช้งานของเส้นใยธรรมชาติก็คืออุณหภูมิเส้นใยธรรมชาติทนความร้อนได้ต่ำ และจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 170 - 200 °C ความแข็งแรงของเส้นใยจะเริ่มลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 124 °C นอกจากนี้ ยังมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพเมื่อสัมผัสกับแสงแดดและจุลินทรีย์ดูดซึมน้ำและน้ำมันสูง ทำให้ขาดเสถียรภาพทางขนาด (dimensional stability) และทำให้วัสดุที่เตรียมได้มีสีดำนขึ้น (เนื่องจากสีของเส้นใย) อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันก็ได้มีการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ทดแทนเส้นใยแก้วกันมากขึ้น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น กันชน คอนโซลรถยนต์ ประตู หน้าต่าง หลังคา สะพาน เรือขนาดเล็ก เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น คือ ราคาที่ต่ำ และน้ำหนักที่เบาของเส้นใยธรรมชาตินั่นเอง

2.4.3.3 เส้นใยอะรามิดหรือเส้นใยอะโรมาติกพอลิเอมีด (Aramid or Aromatic Polyamide Fiber)

เส้นใยอะรามิดในทางการค้ามีหลายชนิด เช่น เส้นใยเคฟลาร์ของบริษัทดูปองต์ (Du Pong) เส้นใยทวารลอน (Twarlon) ของบริษัท Akzo และเส้นใยเทค โนรา (Technora) ของบริษัทเทจิน (Teijin) ซึ่งในบรรดาเส้นใยเหล่านี้ เส้นใยเคฟลาร์จะเป็นเส้นใยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่รู้จักมากที่สุด

เส้นใยเคฟลาร์เริ่มเปิดตัวครั้งแรกในปี 1972 โดยถูกใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในยางล้อรถยนต์ จากโครงสร้างของโมเลกุลซึ่งมีลักษณะคล้ายแท่ง (rodlike) ทำให้เคฟลาร์มีความแข็งแรงสูงและถูกจัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ผลึกเหลว (Liquid Crystalline Polymer)

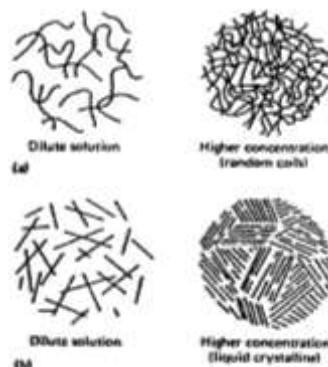
องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเคฟลาร์ คือ poly (para-phenylenetere phthalamide) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาคอนเดนเซชันระหว่าง para-phenylene diamine และ terephthaloyl chloride (ดังรูปที่ 2.2)



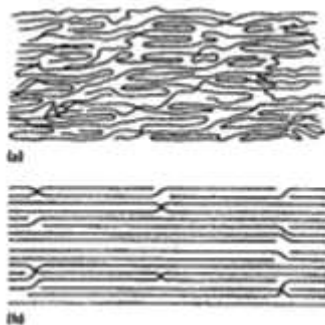
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเตรียม poly (para-phenyleneterephthalamide) กิตติ อนุชาพัฒน์, (2548)

จากโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุล จะเห็นได้ว่าเป็นโครงสร้างวงแหวนบนซึ้น หรือ ส่วนที่เป็นอะโรมาติกนั้น จะเป็นส่วนที่ทำให้เส้นใยมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ในขณะที่ โครงสร้างแบบพารานั่นทำให้โมเลกุลมีความแข็ง และทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงและมีค่ามอดูลัส สูงจัดเป็นพอลิเมอร์ผลึกเหลวชนิดหนึ่ง เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งและมีลักษณะคล้าย แท่ง (rodlike) และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นสารละลายสามารถจัดตัวกันเป็นระเบียบ มีสายโซ่ โมเลกุลที่ขนานกัน (ดังรูปที่ 2.3) ซึ่งต่างจากพอลิเมอร์โดยทั่วไปซึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็น สารละลายจะมีความยืดหยุ่นสายโซ่โมเลกุลสามารถโค้งงอและ พันกัน ไปมาเกิดเป็น โครงสร้างที่ เรียกว่า random coil polymer

รูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็น ระเบียบหลังจากที่สารละลายพอลิเมอร์ผลึกเหลวเคฟลาร์ได้ถูกดึงเป็นเส้นใย จากรูปจะเห็นได้ว่า เส้นใยเคฟลาร์จะมีการจัดตัวเป็นระเบียบมาก โดยที่สายโซ่โมเลกุลจะเรียงตัวขนานไปกับแนวของ เส้นใย (fiber axis) ซึ่งเป็น โครงสร้างที่เรียกว่า anisotropic ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงและมีค่า มอดูลัสในแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าในแนวตั้งฉาก (axial direction)

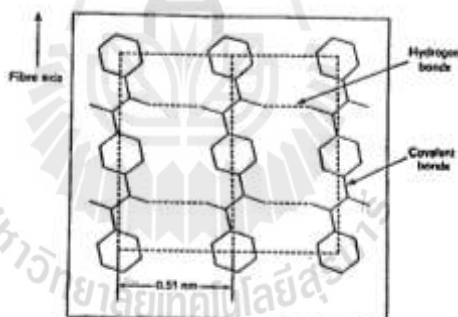


รูปที่ 2.3 การจัดเรียงตัวแบบพอลิเมอร์ผลึกเหลวของเคฟลาร์ กิตติ อนุชาพัฒน์, (2548)

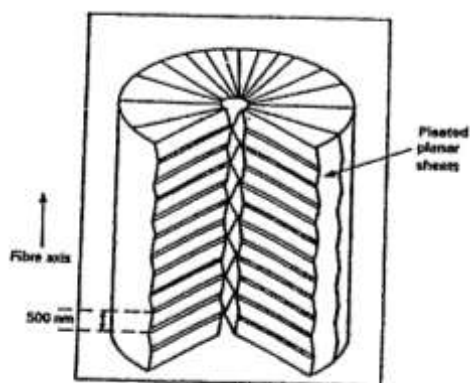


รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเส้นใยเคฟลาร์ กิตติ อนุชาผัด,(2548)

เมื่อพิจารณาในแง่ของพันธะทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.5 โมเลกุลของเคฟลาร์จะ จัดตัวในลักษณะที่เรียกว่า planar sheet โดยมีพันธะโควาเลนต์เป็นพันธะภายในโครงสร้างโมเลกุลซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงอยู่ในแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใย ในขณะที่พันธะ ระหว่างสายโซ่โมเลกุลนั้นจะเป็นพันธะที่ไม่ค่อยแข็งแรง คือ พันธะไฮโดรเจน และ planar sheet เหล่านี้จะมีการพับซ้อนกันไปมาจนเกิดเป็น โครงสร้าง 3 มิติของเส้นใยเคฟลาร์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การจัดตัวในลักษณะ planar sheet ของเส้นใยเคฟลาร์ กิตติ อนุชาผัด, (2548)



รูปที่ 2.6 โครงสร้าง 3 มิติของเส้นใยเคฟลาร์ กิตติ อนุชาผัด,(2548)

เส้นใยเคฟลาร์โดยทั่วไปที่รู้จักกันดีมีอยู่ 3 ชนิด คือ Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 149 ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ซึ่งมีสมบัติที่ต่างกัน Kevlar 29 เป็นเส้นใยที่มีความหนาแน่นและความทนแรงดึง (tensile strength) เท่ากับ Kevlar 49 แต่จะมีความสามารถในการยืดดึง (% elongation) สูงกว่าทำให้ Kevlar 29 จัดเป็นเส้นใยที่มีความเหนียวสูง (high toughness) นิยมใช้งานซึ่งต้องการความเหนียว ทนทานการฉีกขาดเสียหาย เช่น เสื้อเกราะกันกระสุน เชือก เเคเบิล เป็นต้น ในขณะที่ Kevlar 49 เป็นเส้นใยที่มีความนิ่มในการใช้งานมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ Kevlar อีกสองชนิด เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีความสามารถในการยืดดึงสูงกว่า Kevlar 149 และมีเส้นใยที่มีมอดุลัสสูง (high modulus) นิยมใช้ในงานโครงสร้างในยานพาหนะไม่ว่าจะเป็นรถยนต์ เรือหรือยานอวกาศ สำหรับ Kevlar 149 นั้นเป็นเส้นใยที่มีค่ามอดุลัสที่สูงสุด (ultra-high modulus) ในบรรดาเส้นใย Kevlar ด้วยกัน

ตารางที่ 2.8 สมบัติเชิงกลของเส้นใยเคฟลาร์ชนิดต่างๆ

Material	Density Filament diameter Tensile			Tensile strength(a)		Tensile	Available		
	g/cm ³	μm	μin	GPa	10 ⁵ psi	elongation	yare count		
				GPa	10 ⁵ psi	%	No.filaments		
Kevlar 29 (high toughness)	1.44	12	470	83	12	3.6	0.525	4.0	134-10,000
Kevlar 49 (high modulus)	1.44	12	470	131	19	2.8(b)	0.400(b)	2.8	134-5000
Kevlar 149 (ultra-high modulus)	1.47	12	470	186	27	3.4	0.500	2.00	134-1000

(a) ASTM D 2343, impregnated strand (Ref 12). (b) ASTM D 885, unimpregnated strand (Ref 13). Source : Ref 14-17

สำหรับสมบัติอื่นๆ โดยทั่วไปของเส้นใยอะรามิดนั้นพบว่าเป็นเส้นใยที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สลายตัวที่อุณหภูมิ 425 °C ด้านทานการติดไฟ (flame resistant) มีอุณหภูมิกลาสทรานสิชั่นประมาณ 360 – 375 °C มีเสถียรภาพทางขนาดที่ดีมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (coefficient of thermal expansion : CTE) ในทิศทางตามยาวขนานไปกับเส้นใยเป็นลบเล็กน้อย (-2x10-6/K) และในทิศทางตรงข้ามหรือตั้งฉากกับเส้นใย (transverse) เป็นบวก (60 x 10-6/K) มีการนำความร้อนและไฟฟ้าที่ต่ำจัดเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulator) สามารถเชื่อมสภาพด้วยรังสียูวี กรดและด่างแก่ แต่ด้านทานตัวทำละลายหลายชนิด

กล่าวโดยสรุปก็คือ เส้นใย อะรามิดมีจุดเด่นที่มีความเหนียวสูง เมื่อเทียบกับเส้นใยอื่น ๆ มีความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกสูง น้ำหนักเบา ด้านทานการล้าดีเยี่ยม และมีราคาที่

ปานกลาง อย่างไรก็ตามการใช้งานของเส้นใยอะรามิดก็มีข้อจำกัด เนื่องจากมีความทนแรงกดที่ต่ำ (low compressive strength) ด้านทานแสงยูวีไม่ดี (poor uv resistance) ดูดซึมความชื้นสูง และมีการยึดเกาะกับเรซินแมทริกซ์ไม่ค่อยดี

2.4.3.4 เส้นใยเพท (PET fiber)

เส้นใยเพทหรือเส้นใย poly (ethylene terephthalate) จัดเป็นเส้นใยอินทรีย์อีกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้งานในวงการคอมโพสิต โดยทั่วไปนิยมใช้ร่วมกับเส้นใยแก้ว เพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกให้กับแมทริกซ์ที่มีความเปราะ จุดเด่นของเส้นใยเพทไม่ได้อยู่ที่สมบัติเชิงกล แต่เป็นราคาที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยชนิดอื่นๆ เส้นใยเพทนิยมใช้ร่วมกับแมทริกซ์ประเภทเทอร์โมเซต มีอุณหภูมิในการใช้งานถึงประมาณ 204 °C และเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 246 °C และก่อให้เกิดความเสียหายกับแม่แบบ (mold) น้อยมากเมื่อเทียบกับเส้นใยแก้วที่ทำให้แม่แบบเกิดการสึกหรอ

2.4.3.5 เส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene fiber)

เส้นใยพอลิเอทิลีนเป็นเส้นใยที่ถือว่ามีสมรรถภาพสูง (high performance fiber) มีความเบาที่สุด เป็นเส้นใยที่จัดว่าแข็งแรงที่สุดชนิดหนึ่งในบรรดาเส้นใยสมรรถภาพสูง และมีกระบวนการผลิตที่ต่างจากการผลิตพลาสติกพอลิเอทิลีน เส้นใยพอลิเอทิลีนในทางการค้าที่รู้จักกันทั่วไปคือ spectra ของบริษัท Allied Signal และ Dyneema บริษัท Dutch State Mines (DSM)

เนื่องด้วยความหนาแน่นที่ต่ำที่สุด เส้นใยชนิดนี้เบามากที่สุดจนถึงขนาดลอยน้ำได้สมบัติจำเพาะ (specific properties) ของเส้นใยพอลิเอทิลีนดีกว่าเส้นใย Kevlar ทั้งในด้านความแข็งแรง (strength) ความแข็งตึง (stiffness) ความทนแรงกระแทก และความทนทานต่อการขัดถู (abrasion) และการล้า (fatigue) ในด้านสมบัติทางกายภาพ เส้นใยชนิดนี้จะไม่ดูดซึมน้ำและเฉื่อยต่อสารเคมี อย่างไรก็ตาม จะมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ต่ำ (135 °C) ทำให้ต้องใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (<100 °C)

2.4.3.6 เนื่องด้วย ความเฉื่อยทางเคมีเส้นใยชนิดนี้ จึงไม่ค่อยยึดเกาะกับแมทริกซ์

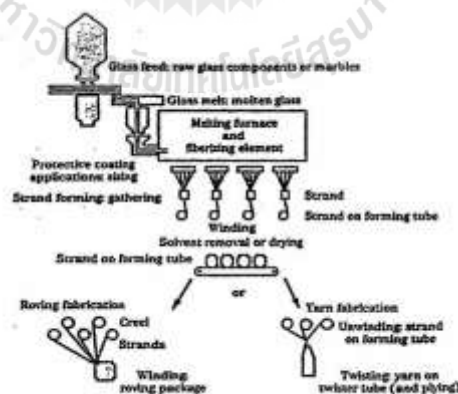
ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ จึงต้องทำการปรับสภาพผิวของเส้นใยก่อน และเนื่องด้วยความทนแรงกระแทกและความต้านทานการขัดถูหรือการตัดที่ดีเยี่ยม วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยเส้นใยชนิดนี้จึงยากต่อการกลึง ไซ ตัด เจาะ จากข้อจำกัดเหล่านี้รวมทั้งข้อจำกัดเรื่องอุณหภูมิเส้นใยพอลิเอทิลีน จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมในแวดวงคอมโพสิตเท่าไรนัก โดยทั่วไปเส้นใยชนิดนี้นิยมประยุกต์ใช้กับงานที่เน้นเรื่องน้ำหนักเบา และสามารถลอยน้ำได้ เช่น เชือกตกปลา สายป่านาวา เชือกของเรือใบ หรือใช้เป็นไหมหรือเอ็น (ligament) เย็บแผล (suture) **เส้นใยแก้ว (Glass Fiber)**

เส้นใยแก้ว เป็นเส้นใยที่มีราคาต่ำที่สุด และใช้งานกันมากที่สุดคนในบรรดาเส้นใยต่างๆ ที่ใช้งานในแวดวงคอมโพสิต การนำเส้นใยแก้วไปเสริมแรงในแมทริกซ์ชนิดอินทรีย์หรือพอลิเมอร์

ชนิดต่างๆ นั้น ถือว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบชนิดแรกที่มีน้ำหนักเบาและทันสมัย เพื่อใช้แทนที่ชิ้นส่วนโลหะที่มีน้ำหนักมากกว่า ซึ่งจะรู้จักกันในชื่อว่า GRP (glass – reinforced plastics) หรือ GFRP (glassfiber - reinforced plastics) หรือ FRP (fiberglass - reinforced plastics)

เส้นใยแก้วเป็นวัสดุที่มีสมบัติผสมระหว่างแก้วและเส้นใย กล่าวคือ มีความแข็งใสด้านทานสารเคมี มีความเฉื่อยเหมือนแก้ว และมีความแข็งแรง ยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปได้เหมือนเส้นใย เส้นใยแก้วมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ประกอบด้วยโครงสร้างตาข่ายของซิลิกา (silica network) สามารถเตรียมได้จากการหลอมองค์ประกอบต่างๆ ของแก้วผ่านรูเล็กๆ (orifice) แล้วดึงยึดเป็นเส้นใยโดยการทำให้เย็นตัวลงทันที เพื่อป้องกันการเกิดผลึก (รูปที่ 2.7) ดังนั้น โครงสร้างของเส้นใยแก้วจึงไม่เป็นระเบียบ แต่มีสมบัติต่างๆ เท่ากันในทุกทิศทาง (isotropic properties) เส้นใยที่เตรียมได้โดยทั่วไปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-20 μm มีความยาววิกฤต (critical length) 50-100 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเป็นความยาวที่เหมาะสมในการนำเส้นใยแก้วมาเสริมแรง ซึ่งความยาวโดยทั่วไปของเส้นใยแก้วนั้นจะต่างกันเล็กน้อยตามแต่การผลิต กล่าวคือ chopped glass fiber จะมีความยาว 3.2- 25 mm ในขณะที่ milled glass fiber จะมีความยาวประมาณ 1.6-0.8 mm

เส้นใยแก้วมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิกา ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ เส้นใยแก้วที่รู้จักกันดี คือ E-glass (electrical grade) และ S-glass (strength grade) นอกจากนี้ยังมี C-glass (chemical grade), AR – glass (alkaline resistant grade) ซึ่งมีองค์ประกอบและสมบัติแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตเส้นใยแก้ว กิตติ อนุชาพัฒน์,(2548)

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบและสมบัติเชิงกลของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ กิตติ อนุชาผัด, (2548)

	E-glass (%)	S-glass (%)	AR-glass (%)
SiO ₂	54	65	64
TiO ₂	-	-	3
ZiO ₂	-	-	13
Al ₂ O ₃	14	25	1
B ₂ O ₃	9	-	-
MgO	5	10	-
CaO	18	-	5
Na ₂ O	-	-	14
Modulus (GPa)	70	80	75
Strength (MPa)	2200	2600	1700
Density (Mg/m ³)	2.54	2.49	2.70

ตารางที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่า E-glass จัดอยู่ในแก้วประเภท calcium – aluminoborosilicate ในขณะที่ S-glass นั้นจัดเป็น magnesium aluminosilicate ส่วน AR-glass จัดเป็น soda-lime-borosilicate เส้นใยแก้วชนิด E-glass เป็นชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในการนำมาเสริมแรงในพลาสติก เป็นเส้นใยที่มีราคาต่ำใ้ใช้งานทางด้านไฟฟ้า ซึ่งมีสมบัติต้านทานน้ำและความร้อนได้ดี ทนทานต่อค่างปานกลาง สมบัติเชิงกลทั้งในด้านกำลังดึง (tensile strength) และกำลังอัด (Compressive strength) ตลอดจนความแข็งตึง (stiffness) ที่ดี และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี แต่ทนต่อกรดต่ำ เส้นใยแก้วชนิด E-glass มีราคาถูกกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่น แต่มีความทนแรงกระแทกต่ำ บางครั้งนิยมวัสดุเชิงประกอบจึงนำเส้นใย E-glass มาใช้ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยอะรามิด เพื่อเพิ่มความทนแรงกระแทก และลดต้นทุนของเส้นใยคาร์บอนหรืออะรามิดเพียงอย่างเดียว เส้นใย S-glass มีประสิทธิภาพสูงกว่าเส้นใย E-glass ถึงร้อยละ 30 แต่มีราคาแพงกว่าถึง 7 เท่า นิยมใ้ใช้งานทางด้าน การทหารและยานอวกาศ ที่ต้องการเส้นใยที่มีความทนแรงดึง และทนความร้อนสูง ซึ่งในบรรดา เส้นใยแก้วแต่ละชนิด S-glass จัดเป็นเส้นใยแก้วที่มีค่าความทนแรงดึงและมอดูลัสสูงที่สุดและยังคงรักษาสมบัติที่ดีเหล่านี้ไว้ได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ อย่างไม่รู้ก็ตาม เนื่องจากราคาที่นับว่าแพงนั้นการใช้งานของ S-glass ส่วนใหญ่จึงอยู่ในแวดวงการทหารหรือยานอวกาศ (aircraft/aerospace industry) เท่านั้น

เส้นใย AR-glass นิยมนำไปทำภาชนะบรรจุหรือบานขอบหน้าต่าง ซึ่งต้องการสมบัติทั้งใน

ด้านความแข็งแรงและทนทานต่อสารเคมี คล้ายกับ ECR – glass ซึ่งมีความทนทานต่อสารเคมีและสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ในขณะที่ C-glass จะเป็นเส้นใยแก้วที่ทนทานต่อสารเคมีดีที่สุด จึงถูกนำมาใช้ในผิวหน้าของแผ่น (laminates) เป็นส่วนประกอบของถังหรือท่อบรรจุน้ำและสารเคมี

เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยคาร์บอน และอะรามิดซึ่งเป็นเส้นใยที่นิยมใช้กันมากเช่นกัน พบว่าเส้นใยแก้วจะมีความทนแรงดึงและมอดูลัสต่ำกว่า แต่มีความสามารถในการยืดตัวออกสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีความหนาแน่นที่มากกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากราคาที่ต่ำ และความหลากหลายของเส้นใยแก้วจึงได้รับความนิยมใช้ในการเสริมแรงพลาสติกมากที่สุด โดยประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของเส้นใยแก้วถูกนำไปทำผลิตภัณฑ์ทางด้านฉนวน (insulation product) นอกจากนี้ก็มีการใช้งานในทางโครงสร้าง ทางเรือ ทางการกีฬา เป็นต้น

2.5 เทคโนโลยีกระบวนการผลิตคอมโพสิตโดยวิธี Hand lay up

หัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการผลิตชิ้นงานไฟเบอร์กลาส โดยกระบวนการผลิตในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีพื้นฐานจาก 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การผสมเรซินและตัวทำปฏิกิริยา (Mixing Resin and Activators)
2. การถ่ายเทเรซินไปที่แม่แบบ (Dispensing Resin into Mould)
3. การจัดวางใยเสริมแรง (Positioning Reinforcement with Resin)
4. การดูดซับเรซินกับใยแก้วเสริมแรง (Impergnating Reinforcement with Resin)
5. การแข็งตัว (Curing)

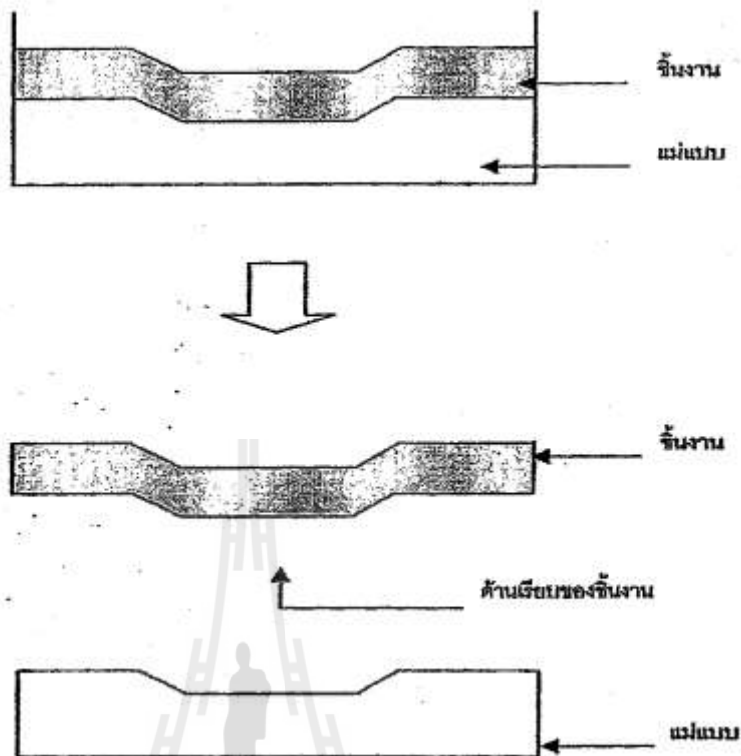
กระบวนการผลิตชิ้นงานไฟเบอร์กลาสทั้งหมดจะประกอบด้วยขั้นตอนข้างต้น โดยแต่ละกระบวนการจะมีรายละเอียดที่มุ่งเน้นในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกัน และให้นำหนักความสำคัญของแต่ละขั้นตอนมาอย่างน้อยแตกต่างกัน รวมไปถึงการจัดเรียงขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น ต้องเรียงตามลำดับข้างต้น แต่สามารถเรียงลำดับสลับกันได้ตามความเหมาะสมของแต่ละกระบวนการ

การจำแนกลักษณะของกระบวนการผลิต สามารถจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ โดยพิจารณาแม่แบบที่ใช้ในกระบวนการผลิตดังนี้

- 2.5.1 กระบวนการผลิตแบบแม่แบบเปิด (Open Mould Processer)
- 2.5.2 กระบวนการผลิตแบบแม่แบบปิด (Close Mould Processer)

2.5.1 กระบวนการผลิตแบบแม่แบบเปิด (Open Mould Processer)

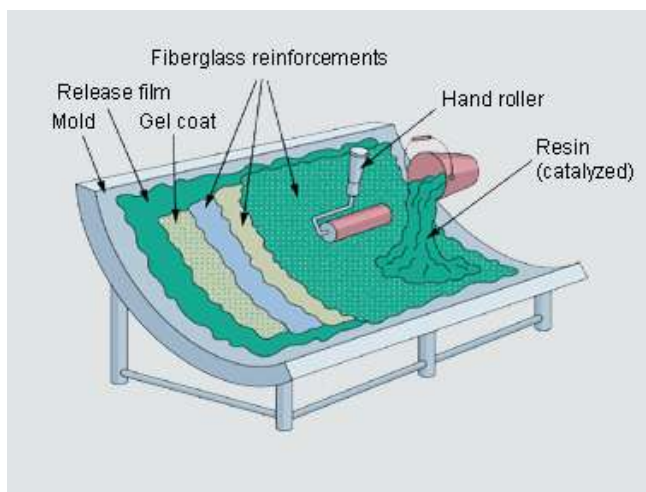
คือ กระบวนการผลิตที่แม่แบบสัมผัสชิ้นงานเพียงด้านเดียว และเมื่อถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ จะได้ชิ้นงานที่มีหน้าเรียบเพียงด้านเดียวคือ ด้านสัมผัสกับผิวแม่แบบ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แม่แบบเปิดมีผิวสัมผัสชิ้นงานเพียงด้านเดียว กิตติ อนุชาศักดิ์, (2548)

กระบวนการผลิตระบบแม่แบบเปิดมีหลายวิธี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

แบบใช้มือทา (Hand Lay-Up Method, HLU) พื้นฐานของกระบวนการแบบใช้มือทา คือการใช้มือทำงานโดยตรง จากการจับลูกกอล์ฟหรือแปรงทาเรซินลงบนใยแก้ว พร้อมรีดไล่ฟองอากาศทำงานให้เรซินและใยแก้วซึมซับเข้ากันจนทั่วบนแม่แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

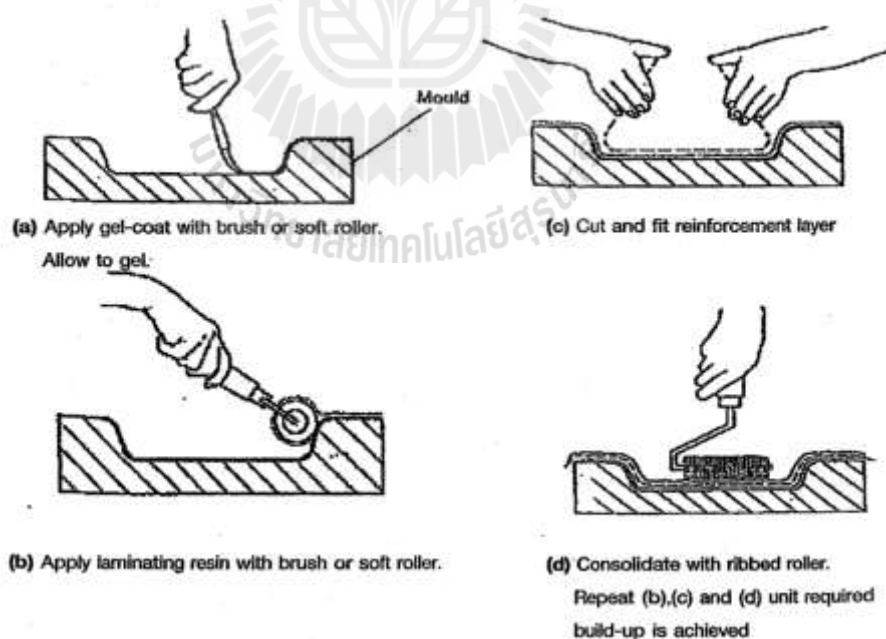


รูปที่ 2.9 การทำแบบใช้มือ (Hand Lay Up) กิตติ อนุชาศักดิ์, (2548)

กระบวนการผลิตแบบนี้ นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุด เพราะความง่ายและสะดวกในการทำงาน ลงทุนค่าแม่แบบต่ำ และอุปกรณ์เครื่องมือหาได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ กระบวนการผลิตแบบนี้จึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มทำ และสามารถใช้ได้ทั้งในกิจกรรมขนาดเล็กและใหญ่

ขั้นตอนการผลิต (ดูรูปที่ 2.10 ประกอบ)

1. ทำความสะอาดแม่แบบพร้อมทาน้ำยาถอดแบบ (Release Agent)
2. ทาเจลโค้ตด้วยแปรง (Brush) หรือลูกกลิ้ง (Hand Roller) ลงบนแม่แบบแล้วทิ้งให้แห้ง
3. ใช้แปรงหรือลูกกลิ้งจุ่มน้ำยาเรซินที่ผสมตัวทำปฏิกิริยาแล้ว (Activated Resin) ทาลงบนเจลโค้ตให้ทั่ว
4. จัดวางใยแก้วทับลงบนเรซินที่ทาเสร็จแล้ว
5. ใช้แปรงหรือลูกกลิ้งกดทับใยแก้วซึมน้ำยาเรซินและรีดให้ทั่วชิ้นงาน
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3-5 จนชิ้นงานมีความหนาตามความต้องการแล้วจึงปล่อยให้แห้งให้แข็งตัว
7. เมื่อชิ้นงานแข็งได้ที่แล้ว ถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ โดยใช้ค้อนยางเคาะเบาๆ หรือใช้ลมอัด
8. ตัด เจียร ขอบชิ้นงานส่วนเกินและขัดชิ้นงานให้เรียบ จึงนำไปประกอบชิ้นงานต่อไป



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการผลิตแบบมือทา (Hand Lay-Up) กิตติ อนุชาพัค, (2548)

2.6 การปฏิบัติการทดลอง (Testing Practices) หาค่าสมบัติทางกลของไม้แปรรูปคอมโพสิต

การศึกษาปฏิบัติการทดลองหาค่าสมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต ครั้งนี้จะดำเนินการ เช่นเดียวกับการปฏิบัติทดลองหาค่า สมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้ สมบัติทางกลของไม้ หาได้จากชิ้นไม้ทดลองที่ปราศจากตำหนิ ชิ้นไม้ทดลองต้องมีขนาดเป็นไปตามมาตรฐานต่างๆ ของการทดลอง และต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณความชื้น ความแน่น วงรอบปี และลักษณะ โครงสร้างของเนื้อไม้ ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ มีผลต่อ สมบัติทางกลของไม้ การทดลองหาค่าสมบัติทางกลของไม้ ต้องปฏิบัติตามมาตรฐานของการทดลอง โดยจะมีขั้นตอนสำหรับปฏิบัติตามมาตรฐานของการทดลองที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น มาตรฐานของอเมริกัน หมายเลข ดี 143 (ASTM D 143) มาตรฐานอังกฤษ หมายเลข 373 (BS. 373) และมาตรฐานสากลหมายเลข 3129 (ISO 3129) เป็นต้น โดยมีขั้นตอนวิธีการทดลองเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่ขนาดของชิ้นไม้ทดลอง (specimens) เท่านั้นนี้ จะกล่าวถึงวิธีการทดลองหาค่าสมบัติทางกลของไม้ตามมาตรฐานอังกฤษ (British Standard) หมายเลข 373

2.6.1 การทดลอง (Testing)

สมบัติทางกลของไม้ทำการทดลองด้วยเครื่องทดลองแบบสากล (universal testing machine) ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้หาค่าสมบัติทางกลของวัสดุ โดยจะมีการให้น้ำหนักกระทำกับชิ้นทดลองในลักษณะต่างๆ ลักษณะของเครื่องมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนต่อการให้น้ำหนักที่กระทำต่อชิ้นทดลอง ส่งผ่านกำลังเพื่อให้น้ำหนักกับชิ้นทดลองด้วยระบบทางกล (mechanic) หรือระบบไฮดรอลิก (hydraulic) ค่าความแข็งแรงจะแสดงออกทางหน้าปัดแสดงผล โดยแสดงเป็นสเกล หรือแสดงเป็นค่าตัวเลข เครื่องทดลองนี้ในปัจจุบันสามารถจะประมวลผลของค่าความแข็งแรงออกมาได้เลย ด้วยการทำงานร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์ ลักษณะของเครื่องทดลองดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เครื่องทดลองเพื่อหาค่าสมบัติทางกลของไม้หรือวัสดุอื่น ๆ

2.6.1.1 การทดสอบการรับแรงตัด

ตัวอย่างทดสอบกำลังตัดของไม้มี ขนาด 2 x 2 x 30 ซม. นำชิ้นไม้ทดลองไปตั้งลงบน อุปกรณ์จับชิ้นงานแบบหมุนอิสระ (Rollor) ซึ่งมีจุดรองรับวางห่างกัน 28 ซม. (ดูรูปที่ 2.12) และให้น้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางของชิ้นไม้ทดลอง ด้วยอัตราความเร็ว 0.26 นิ้วต่อนาที หัวกดน้ำหนักมีรัศมีความโค้ง 3 ซม.



รูปที่ 2.12 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบแรงตัดเข้ากับเครื่องทดลอง

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ต้องบันทึกไว้เมื่อทำการทดลอง

1. สถานที่และวันที่ทำการทดลอง
2. ชนิดของการทดลอง
3. หมายเลขของชิ้นไม้ทดลอง (ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของลำต้น)
4. ชนิดของไม้ที่นำมาทดลอง
5. ชนิดของการให้น้ำหนักกระทำ
6. ระยะของจุดรองรับ
7. ความเร็วของหัวกด
8. ขนาดหน้าตัดของชิ้นไม้ทดลอง
9. น้ำหนักของชิ้นไม้ทดลอง
10. จำนวนวงปีใน 1 นิ้ว
11. สัดส่วนของไม้ปลายฤดู

12. ปริมาณความชื้นของชิ้นไม้ทดลอง

13. ชนิดของการแตกหัก

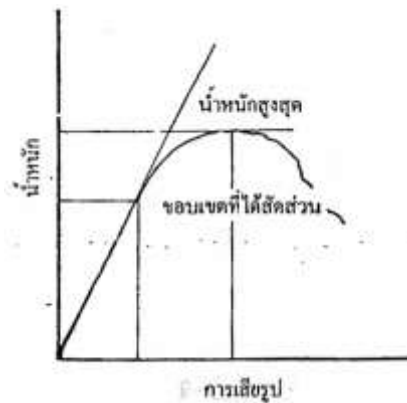
เมื่อเริ่มให้น้ำหนักกดลงบนชิ้นไม้ทดลอง ผู้ทดสอบต้องเตรียมอ่านค่าน้ำหนักที่กดลงบนชิ้นไม้ทดลอง และอ่านค่าการโก่งของชิ้นไม้ทดลอง โดยกำหนดค่าน้ำหนักเป็นช่วง ๆ จนกระทั่งชิ้นไม้ทดลองจะแตกหัก (failure) การแตกหักของชิ้นไม้ทดลองสำหรับการทดลองการรับแรงค้ำมีอยู่ 3 แบบ คือ

1. แตกหักด้วยแรงกด (compression failure) เมื่อน้ำหนักกดลงบนชิ้นไม้ทดลองไม้จะเสียรูปโดยการโก่งลงด้านบนของไม้จะอยู่ภายใต้แรงอัด โดยจะถูกบีบให้สั้นลง ส่วนด้านล่างของไม้จะยืดออกจนเกิดการตัดขาดขวางเส้นใยไม้กับที่น้ำหนักกระทำ (ดังรูป ก)
2. แตกหักด้วยแรงดึง (tension failure) โดยปกติจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือการแตกเป็นแนวยาวตอนล่างของไม้ทดลองแบบไม้สมำเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม้นั้นมีความเหนียวและการแตกออกแบบสมำเสมอ ซึ่งแสดงว่าไม้นั้นมีความเปราะ (ดังรูป ข)
3. แตกหักด้วยแรงเฉือน (horizontal shear) ลักษณะที่เกิดขึ้นจะเป็นรอยปริแตกตามแนวยาวบริเวณใกล้กับแนวกึ่งกลางของชิ้นไม้ทดลอง ไม้ที่มีกำลังเฉือนต่ำมักจะเกิดการแตกหักแบบนี้ (ดังรูป ค)



รูปที่ 2.13 การแตกหักของชิ้นไม้ทดลองการรับแรงค้ำ

การทดลองจะอ่านค่าน้ำหนักและการโก่งของชิ้นไม้ทดลอง โดยจดบันทึกไว้ตลอดจนกว่าไม้จะแตกหัก แล้วนำผลทดสอบมาพล็อต ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการเสียรูป (ดูรูปที่ 2.14) เพื่อคำนวณหาค่าความแข็งแรง



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการเสียรูปของชิ้นไม้ทดลอง

พารามิเตอร์การรับแรงดัดสถิต สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

1. สัมประสิทธิ์การแตกหัก (modulus of rupture หรือ MOR)

$$\text{MOR} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ MOR	=	ความแข็งแรง	กก./ซม. ²
P	=	น้ำหนักสูงสุด	กก
L	=	ระยะระหว่างจุดรองรับ	มม.
b	=	ความกว้างของชิ้นไม้ทดลอง	มม.
d	=	ความลึกของชิ้นไม้ทดลอง	มม.

2. สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (modulus of elasticity หรือ MOE)

$$\text{MOE} = \frac{P_{p1}d^2}{4D_{p1}bd^3} \quad (2.2)$$

เมื่อ MOE	=	ความแข็งดิ่ง	กก./ซม. ³
P_{p1}	=	น้ำหนักกระทำที่ขอบเขตของได้สัดส่วน	กก.
L	=	ระยะระหว่างจุดรองรับ	มม.
D_{p1}	=	ระยะโก่งของชิ้นไม้ทดลองที่ขอบเขตของความได้สัดส่วน	มม.
B	=	ความกว้างของชิ้นไม้ทดลอง	มม.
d	=	ความลึกของชิ้นไม้ทดลอง	มม.

ตัวอย่าง จากการทดลองหาค่าความแข็งแรงการรับแรงค้ำคดของชิ้นไม้ทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการทดลองดังต่อไปนี้

ชนิดของการทดลอง	การรับแรงค้ำคด
ความเร็วของหัวกด	0.26 นิ้ว/นาที
หมายเลขของชิ้นไม้ทดลอง	N1
ชนิดของไม้	ไม้เนื้อแข็งสัมประสิทธิ์
ทดลองที่สภาพ	แห้งในอากาศ(12%)
น้ำหนักของชิ้นไม้ทดลอง	กรัม
ปริมาณความชื้นในไม้ขณะทดลอง	
ขนาดของชิ้นไม้ทดลอง	
ความยาว (length)	300 มม.
ความกว้าง (width)	20.40 มม.
ความลึก (depth)	20.40 มม.

สัมประสิทธิ์การแตกหัก

$$\text{MOR} = \frac{3PL}{2bd^2}$$

MOR = ความแข็งแรง กก./ซม.²

P = 295 กก.

L = 280 มม.

B = 20.04 มม.

D = 20.04 มม.

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned} \text{MOR} &= \frac{3 \times 295 \times 28}{2 \times 20.04 \times (20.04)^2} \\ &= 1459 \text{ กก./ซม.}^2 \end{aligned}$$

สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

$$\text{MOE} = \frac{P_{p.1}d^2}{4D_{p.1}bd^3}$$

MOE = ความแข็งดิ่ง กก./ซม.²

P_{p.1} = 250 กก.

L = 280 มม.

$$\begin{aligned}
 D_{p,1} &= 5 && \text{มม.} \\
 b &= 20.4 && \text{มม.} \\
 d &= 20.4 && \text{มม.}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{MOR} &= \frac{250 \times (28)^2}{4 \times 0.50 \times 2.0 \times (20.4)^3} \\
 &= 158,439 \text{ กก./ซม.}^2
 \end{aligned}$$

ดังนั้น การทดลองหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงดัดสถิตย์ สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแตกหักได้ 1,459 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่นได้ 158,439 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2.6.1.2 การทดลองการรับแรงอัด (Compression Test)

มีขนาด 20 X 20 X 60 มิลลิเมตร ด้านล่างของชิ้นไม้ทดลองจะวางลงบนแท่นเครื่องทดลอง และที่ด้านบนจะมีหัวกดที่มีลักษณะปรับตัวได้เพื่อให้สามารถกด และกระจายน้ำหนักลงบนชิ้นไม้ได้อย่างสม่ำเสมอ ระหว่างการทดสอบ ผู้ทดสอบต้องวัดการเสียรูปของชิ้นไม้ด้วย (deflectometer) (ดูรูปที่ 2.15) อัตราความเร็วของหัวกดทดสอบเท่ากับ 0.025 นิ้วต่อนาที



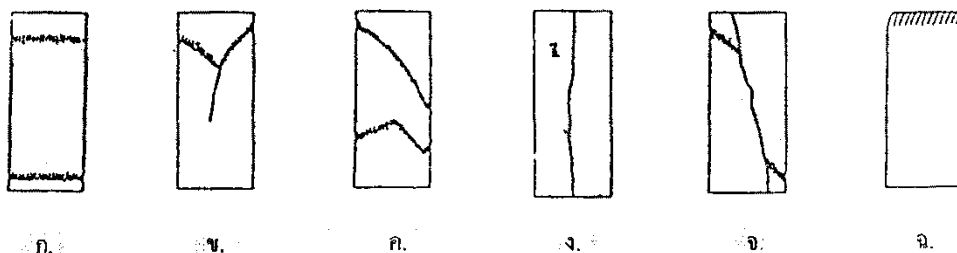
รูปที่ 2.15 การทดลองหาค่าการรับแรงอัด

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ต้องบันทึกไว้เมื่อทำการทดลอง

1. น้ำหนักของชิ้นไม้ทดลอง
2. ขนาดของชิ้นงานทดลอง
3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
4. ความสามารถในการรับแรง
5. ค่า Stress และ Strain

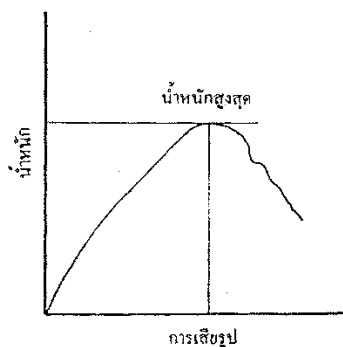
ลักษณะของการแตกหักของชิ้นไม้ทดลองจะมีลักษณะต่อไปนี้

1. แตกหักด้วยแรงกดอย่างแท้จริง (crushing) ซึ่งหมายถึงน้ำหนักที่กดลงจะขนานไปกับแนวเส้นไม้และหักดแบบลงไปกับหัวไม้ในแนวตั้งฉากกับเส้นไม้อย่างแท้จริง การวิบัติเกิดจากการแตกหรือยุบตัวด้วยแรงกด (ดูรูป 2.16ก)
2. แตกหักด้วยแรงเฉือน (shearing) เมื่อเนื้อไม้รับแรงกดในแนวขนานเส้นและเกิดการแตกหักทำมุมกับด้านหน้าตัดเป็นมุมมากกว่า 45 องศา แสดงว่าชิ้นไม้มีความต้านทานต่อการรับแรงเฉือนต่ำ (ดูรูปที่ 2.16ข)
3. แตกหักลักษณะเป็นลิ้ม (wedge spilt) การแตกหักเกิดจากการยุบตัวและแตกหักด้วยแรงเฉือน (ดูรูปที่ 2.16ค)
4. แตกตามยาว (splitting) เมื่อเนื้อไม้ได้รับแรงกดขนานเส้นและเกิดการแตกหักตลอดแนวตามยาวของชิ้นไม้ แสดงว่าอาจมีตำหนิในชิ้นไม้หรือชิ้นไม้มีความชื้นต่ำเกินไป (ดูรูปที่ 2.20ง)
5. แตกหักด้วยแรงอัดและแรงเฉือน (compressing and shearing) เกิดจากชิ้นไม้ตัวอย่างมีเส้นขวางตามยาวของชิ้นไม้ จึงทำให้เกิดการแตกหักด้วยแรงอัดตามขวางผสมกับแรงเฉือน (ดูรูปที่ 2.16จ)
6. เกิดการพอง (Inflated) เมื่อชิ้นไม้ได้รับแรงกดจะยุบตัวและเกิดการพองตัวขึ้นเมื่อเอาน้ำหนักออก การเสียรูปในลักษณะนี้จะเกิดเนื่องจากชิ้นไม้มีความชื้นสูงเกินไป (ดูรูปที่ 2.16ฉ)



รูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นถึงการแตกหักของชิ้นไม้ทดลองในลักษณะต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก และการเสียรูปของหิน ไม้ทดลองแสดงรูปที่(2.17)



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก และการเสียรูปของหิน ไม้ทดลอง

คำนิยาม หาค่าความแข็งแรงการรับแรงอัดจนานเสียนได้จากสมการดังต่อไปนี้

1. ค่าความแข็งแรงในช่วงขอบเขตของการได้สัดส่วน (proportional Limit)

$$S_{p.1} = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

$S_{p.1}$ = ค่าความแข็งแรงในช่วงขอบเขตของการได้สัดส่วน (กก/ม.²)

P = น้ำหนักที่กระทำ (กก.)

A = พื้นที่หน้าตัดของหิน ไม้ทดลอง (มม.²)

2. ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่แตกหัก (maximum crushing strength)

$$C_1 = \frac{P}{A} \quad (2.4)$$

C = ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่แตกหัก (กก/ซม.²)

P = น้ำหนักที่กระทำ (กก.)

A = พื้นที่หน้าตัดของหิน ไม้ทดลอง (มม.²)

3. ค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น

$$E = \frac{PL}{AD} \quad (2.5)$$

E = สัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น (กก/ซม.²)

- P = น้ำหนักที่กระทำ (กก.)
L = ระยะการวัดการเสียวรูป (มม.)
A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นไม้ทดลอง (มม.²)
D = การเสียวรูป (มม.)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

3.1 การศึกษาวัตถุดิบ และขั้นตอนการผลิตขึ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง

ในการทำขึ้นงานไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีนั้น จำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทำงานอย่างถูกวิธี เพื่อให้ขึ้นงานมีคุณภาพถูกต้องตามการใช้งานสำหรับการทดลอง ดังนี้คือ

3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง

1. ไยแก้วตาसान (Woven Roving) เบอร์ 200 กรัม/ม.²



รูปที่ 3.1 ไยแก้วตาसान (Woven Roving) # 200

ลักษณะ : เป็นใยแก้วเส้นยาวนำมาทอเป็นผืน เป็นรูปตาसान(90 องศา) น้ำหนัก 200 กรัม / ตารางเมตร

คุณสมบัติ : ช่วยรับแรงและเสริมกำลังให้สูงขึ้น ในทิศทางของเส้นใยแก้ว (2 ทิศทาง)

ราคาขาย : 20 บาท / ม.²

2. ไยแก้วเส้นสั้น (Chopped Stand)



รูปที่ 3.2 ไยแก้วเส้นสั้น (Chopped Stand)

ลักษณะ : เป็นใยแก้วเส้นสั้น ขนาดยาว มม.

คุณสมบัติ : ใช้เพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน ตามมุมและขอบ

ราคาขาย : 85 บาท / ม.²

3. แป้งทัลคัม (Talcum Power)



รูปที่ 3.3 แป้งทัลคัม (Talcum Power)

ลักษณะ : เป็นผงละเอียดสีขาวเหมือนแป้งโรยตัว (325 Mesh)

คุณสมบัติ : ใช้ผสมลงในน้ำยาเรซินเพื่อเพิ่มน้ำหนักและเพิ่มความแข็งแรง

ราคาขาย : 20 บาท / Kg

4. แม่สีแบบผง (Color Powder)



รูปที่ 3.4 แม่สีแบบผง (Color Powder)

ลักษณะ : เป็นผงเนื้อละเอียด สีดำ,แดง,เหลือง

คุณสมบัติ : ใช้ผสมปรับสีลงในผง Talcum เพื่อให้สีขึ้นงานเหมือนจริง

ราคาขาย : 90 บาท / Kg

5. โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Resin)



รูปที่ 3.5 โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Resin)

ลักษณะ : เหลวเหมือนน้ำเชื่อม ใช้ชนิดที่ผสมโคบอลต์แล้ว จะมีสีชมพู สำหรับใช้ในงานไฟเบอร์กลาส (FRP) ชนิดออร์โธเรซิน (Ortho Resin)

คุณสมบัติ : ใช้ทำชิ้นงานร่วมกับไฟเบอร์กลาส มีความสามารถรับแรงได้ดี

ราคาขาย : 90 บาท / Kg

6. ตัวทำแข็ง หรือฮาร์ทเดนเนอร์ (MEKPO: Methyl Ethyl Ketone Peronide) M-60



รูปที่ 3.6 ตัวทำแข็ง หรือฮาร์ทเดนเนอร์ MEKPO: M-60

ลักษณะ : เป็นของเหลวใสเหมือนน้ำ มีกลิ่นฉุนเหมือนกรด
 คุณสมบัติ : ใช้เป็นส่วนผสมในน้ำยาเรซินประมาณ 2% โดยปริมาตร เพื่อให้เกิดการแข็งตัว
 ราคาขาย : 190 บาท / Kg

7. อะซิโตน หรือน้ำยาล้าง (Acetone)



รูปที่ 3.7 อะซิโตน หรือน้ำยาล้าง (Acetone)

ลักษณะ : เป็นของเหลวใสเหมือนน้ำ มีกลิ่นหอมและเย็น ดัดไฟได้ง่าย
 คุณสมบัติ : ใช้สำหรับทำความสะอาดอุปกรณ์ และเครื่องมือ
 ราคาขาย : 810 บาท / ปีบ (14 Kg)

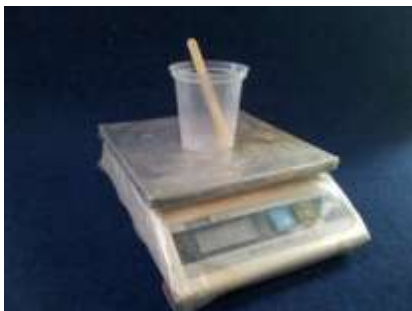
3.1.2 เครื่องมือ, อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง



แปรงทาสี



ไม้กวน, ถ้วยพลาสติก



Digital Scale



กรรไกร

3.1.3 ขั้นตอนการผลิตชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง

ในขั้นตอนการผลิตชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลองนั้น แบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่ 1 แบบทดสอบแรงอัด และแรงคัต ชนิดส่วนผสมเฉพาะเรซิน ไม่รวมวัสดุอื่น ๆ มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมแม่แบบหล่อขึ้นงาน โดยใช้กระดาษอาร์ตแข็ง ประกอบเป็นช่องๆช่องละ ขนาด 2x2x6 cm. จำนวน 5 ช่อง ขนาด 2x2x30 cm. จำนวน 5 ช่อง

ขั้นตอนที่ 2 ให้ผสมเรซิน+โคบอลต์ ในอัตราส่วน 100ส่วน กับตัวทำแข็ง 2ส่วน กวนให้เข้ากัน เทลงในแม่พิมพ์ ขนาด 2x2x6 cm. จำนวน 5 ช่อง ขนาด 2x2x30 cm. จำนวน 5 ช่อง

รูปแบบที่ 2 แบบทดสอบแรงอัดชนิด เรซิน+Talcum และผงสี มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมแม่แบบหล่อขึ้นงานโดยใช้กระดาษอาร์ตแข็ง ประกอบเป็นช่องๆช่องละ ขนาด 2x2x6 cm. จำนวน 5 ช่อง

ขั้นตอนที่ 2 ให้ผสมเรซิน+โคบอลต์ ในอัตราส่วน 50ส่วน เดิมทลคัม+ผงสีในอัตราส่วน 50ส่วน กับตัวทำแข็ง 2ส่วน กวนให้เข้ากัน เทลงในแม่พิมพ์ ขนาด 2x2x6 cm. จำนวน 5 ช่อง

รูปแบบที่ 3 แบบทดสอบแรงอัด และแรงคัต ชนิด เรซิน+ Talcum และผงสี+ใยแก้ว มีรายละเอียดดังนี้

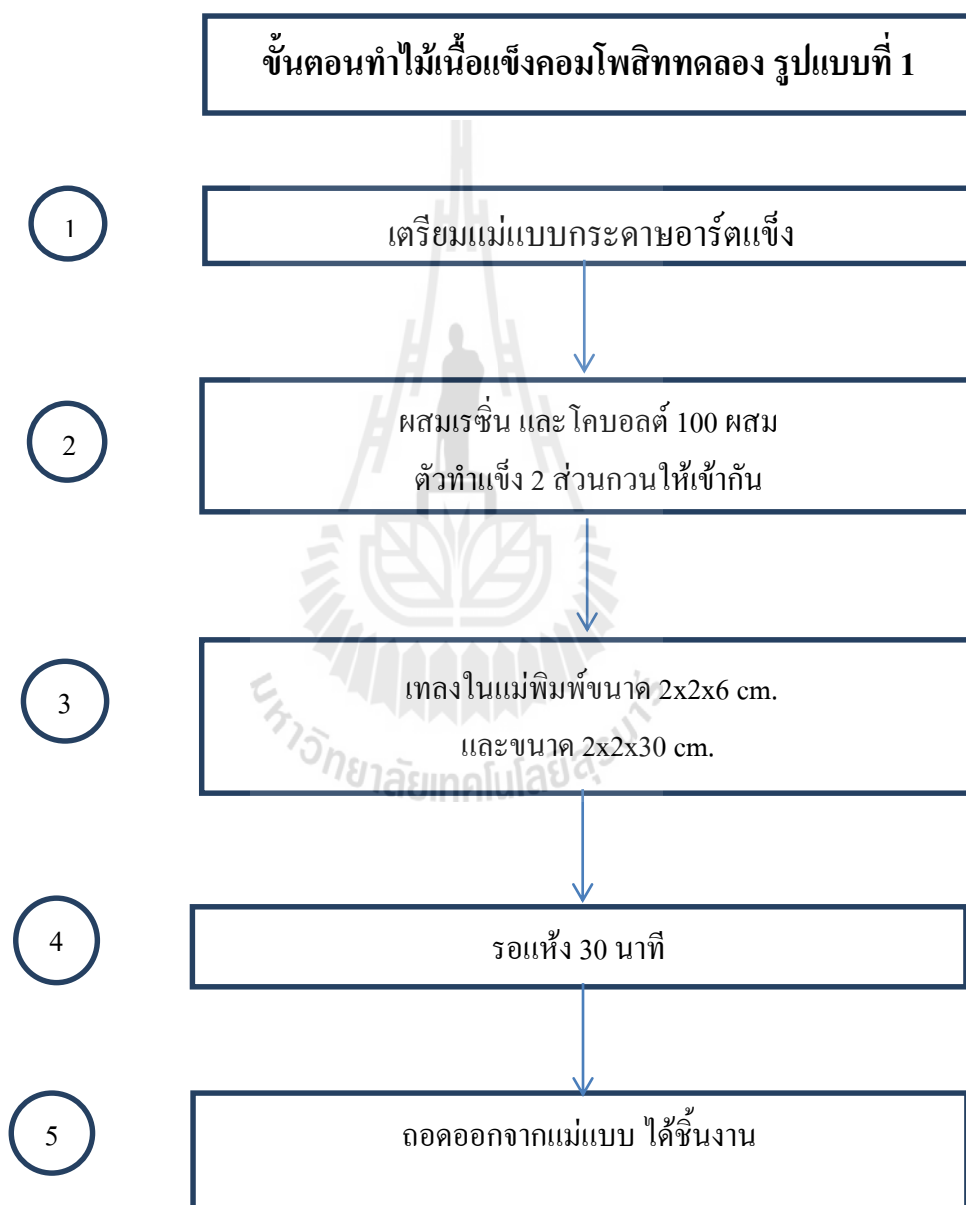
ขั้นตอนที่ 1 เตรียมแม่แบบหล่อขึ้นงานโดยใช้กระดาษอาร์ตแข็ง ประกอบเป็นช่องๆช่องละ ขนาด 2x2x6 cm. จำนวน 15 ช่อง ขนาด 2x2x30 cm. จำนวน 15 ช่อง

ขั้นตอนที่ 2 ให้ผสมเรซิน+โคบอลต์ 50ส่วน เดิมTalcum+ผงสี 50ส่วน และ เดิมตัวทำแข็ง 2 ส่วน กวนให้เข้ากัน เทลงในแบบหล่อแกนทั้ง 6ชุดๆละ 5ชิ้นงาน รอแห้ง 30นาที ได้ชิ้นงานเป็นแกนเตรียมไว้

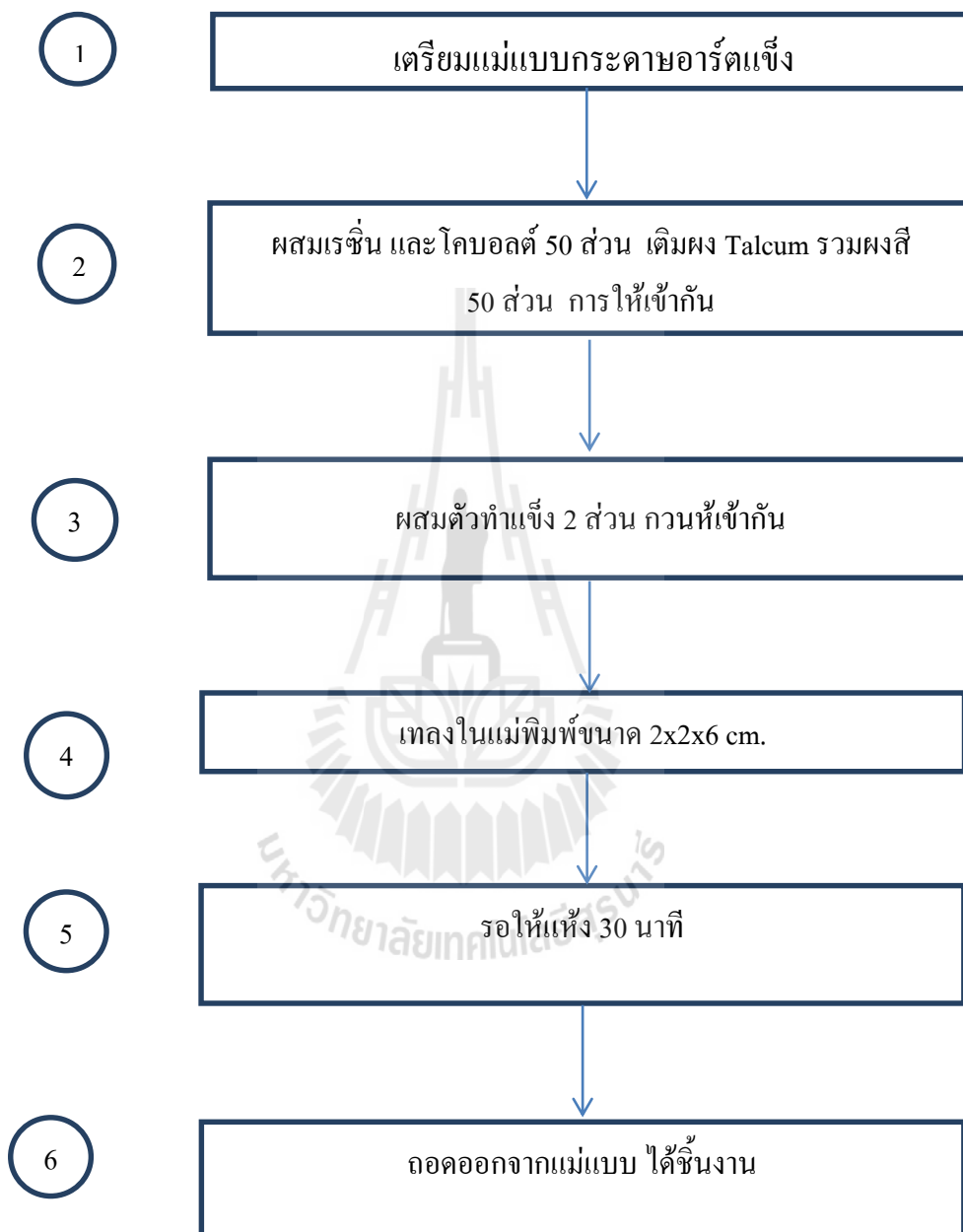
ขั้นตอนที่ 3 ให้ผสมเรซิน+โคบอลต์ 50ส่วน เดิมTalcum+ผงสี 25ส่วน และ เดิมตัวทำแข็ง 2 ส่วน กวนให้เข้ากันแล้วนำไป Lay up บนแผ่นใยแก้วเบอร์200 จำนวน6ชุด ดังนี้

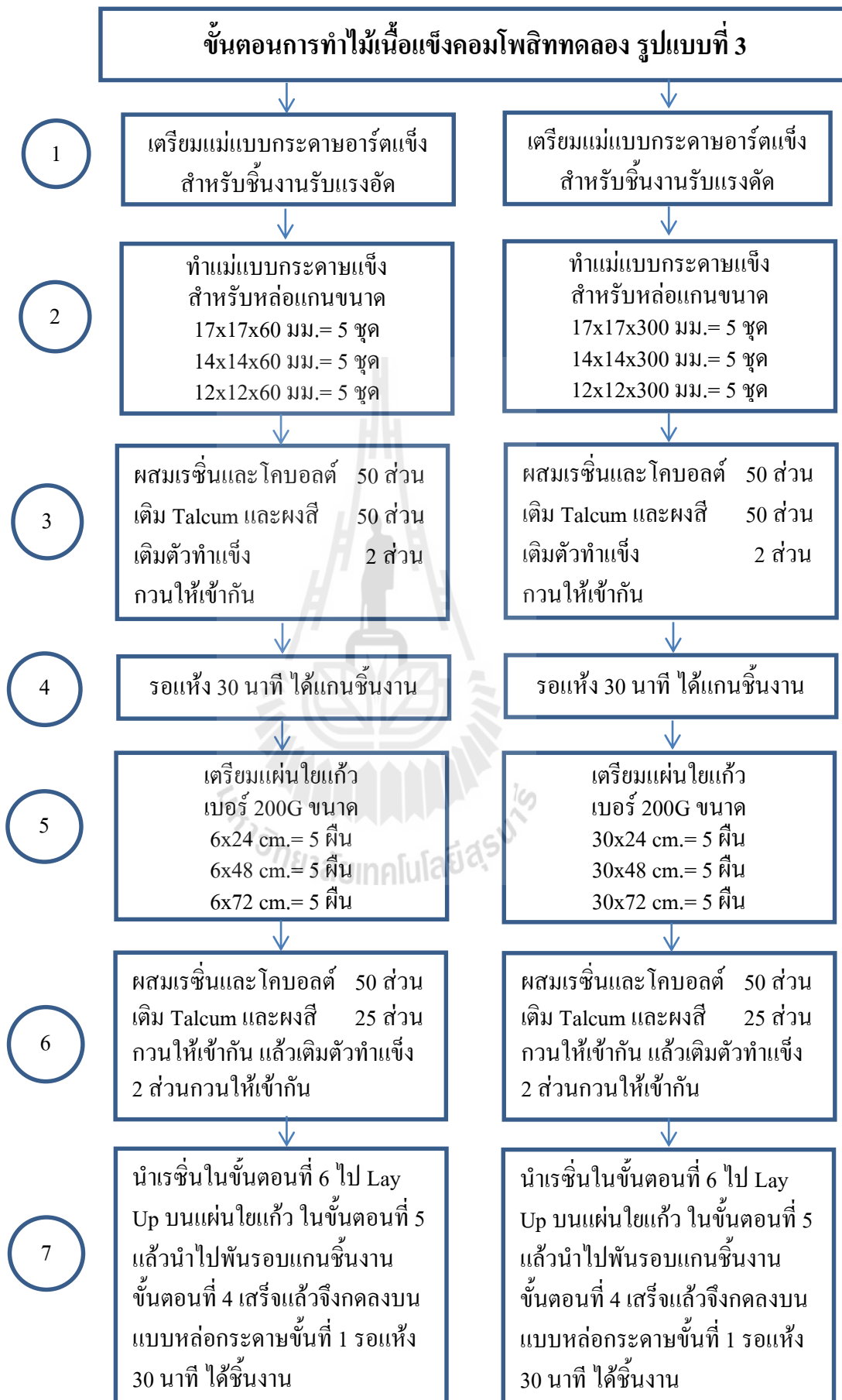
ชุดที่ 1 ใยแก้ว 6x24 cm. พันรอบแกน 17x17x60mm. นำใส่ในแบบ 2x2x6cm. ได้ 5 ชุด

ชุดที่ 2 ไยแก้ว 6x48 cm. พันรอบแกน 14x14x60mm. นำใส่ในแบบ 2x2x6cm. ได้ 5 ชุด
 ชุดที่ 3 ไยแก้ว 6x72 cm. พันรอบแกน 12x12x60mm. นำใส่ในแบบ 2x2x6cm. ได้ 5 ชุด
 ชุดที่ 4 ไยแก้ว 30x24 cm. พันรอบแกน 17x17x300mm. นำใส่ในแบบ 2x2x30cm. ได้ 5 ชุด ชุดที่ 5
 ไยแก้ว 30x48 cm. พันรอบแกน 14x14x300mm. นำใส่ในแบบ 2x2x30cm. ได้ 5 ชุด ชุดที่ 6 ไยแก้ว
 30x72 cm. พันรอบแกน 12x12x300mm. นำใส่ในแบบ 2x2x30cm. ได้ 5 ชุด



ขั้นตอนทำไม้เนื้อแข็งคอมโพสิททดลอง รูปแบบที่ 2





3.2 การทดสอบการรับแรงอัด (Compression Test)

3.2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

เพื่อต้องการหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงอัด (Compression Test)

3.2.2 เครื่องมือทดลอง

1. เครื่องทดสอบ Auto UTM 500T
2. เวอร์เนียคาลิเปอร์

3.2.3 ชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง

การทดสอบแรงอัด (Compression Test) โดยทำชิ้นงานไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต ขนาด 20x20x60 mm. ขึ้นมาเพื่อนำไปทำการทดสอบแรงอัด จำนวน 4 ชุด ๆ ละ 5 ชิ้น ดังนี้

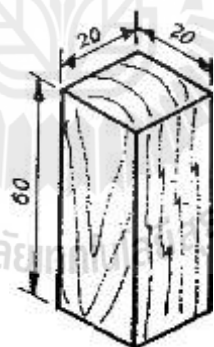
ชุดที่ 1 ใช้ Rasin ล้วน ๆ 5 ชิ้นงาน

ชุดที่ 2 ใช้เรซินคอมโพสิต ใช้ใยแก้วเบอร์ 200 พันรอบแกน มี 3 ขนาด คือ

แบบที่ 1. ขนาดพัน 3 รอบ ๆ ละ 8 cm. (หนา 1.5 ม.ม) จำนวน 5 ชิ้นงาน

แบบที่ 2. ขนาดพัน 6 รอบ ๆ ละ 8 cm. (หนา 3 ม.ม) จำนวน 5 ชิ้นงาน

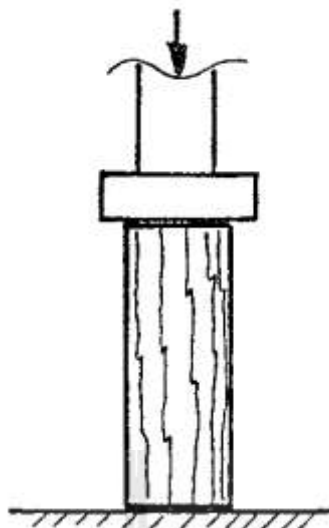
แบบที่ 3. ขนาดพัน 9 รอบ ๆ ละ 8 cm. (หนา 4.5ม.ม) จำนวน 5 ชิ้นงาน



3.2.4 วิธีการทดสอบ

นำชิ้นงานทั้ง 4 ชุด ไปทดสอบแรงอัดด้วยเครื่อง Auto UTM 500 tons ได้ค่าสรุปการรับแรงอัดตามมาตรฐาน BS 373 วิธีทดลองมีดังนี้

1. นำชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดสอบที่ปราศจากตำหนิ ให้ได้ตามขนาด และใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดขนาดจริงทางด้านหน้าตัด นำชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลองเข้าติดตั้งในเครื่องทดสอบ ปลายด้านหนึ่งวางตั้งลงบนแท่นเครื่องและปลายอีกด้านหนึ่งจะต้องสัมผัสกับหัวกดน้ำหนัก ซึ่งที่หัวกดน้ำหนักของเครื่องทดสอบ จะสามารถปรับให้แนบกับหน้าตัดของชิ้นไม้ทดลองอยู่ตลอดเวลา



2. เปิดเครื่องทดสอบโดยให้หัวกดน้ำหนักเคลื่อนลงด้วยอัตราความเร็ว 0.025 นิวตันต่อวินาที (จนกระทั่งชิ้นไม้ทดลองแตกหัก)
3. อ่านค่าน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้ชิ้นไม้ทดลองแตกหักและบันทึกค่าไว้

3.2.5 การคำนวณ

หาค่าทดสอบการรับแรงอัด และเขียนลงในตารางผลการทดสอบที่ 4.2

3.2.6 ผลการทดลอง

ให้รายงานผลการทดสอบ และเขียนลงในตารางผลการทดสอบที่ 4.2

3.3 การทดลองการรับแรงดัด (Bending Test)

3.3.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

เพื่อต้องการหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงดัด (Bending Test)

3.3.2 เครื่องมือทดลอง

1. เครื่องทดสอบมาตรฐาน UTM 100T (universal testing machine)
2. เวอร์เนียคาลิปเปอร์
3. ทดสอบแรงดัดตามมาตรฐาน BS 373

3.3.3 ชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง

ทำชิ้นงานไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต ขนาด 20x20x300 mm. ขึ้นมาเพื่อนำไปทดสอบแรงดัด จำนวน 2 ชุด รวม 4 แบบๆละ 5 ชิ้นงาน ดังนี้

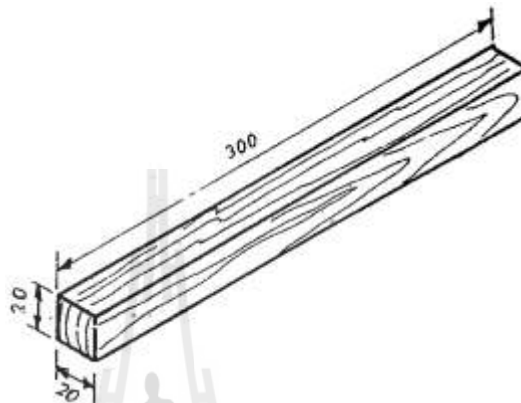
ชุดที่ 1 เป็นเรซิน ล้วนๆ 5 ชิ้นงาน นำไปทดสอบแรงดัด

ชุดที่ 2 เป็นเรซินผสมใยแก้วเบอร์ 200 พันรอบแกน มี 3 ขนาด คือ

แบบที่ 1. ขนาดพื้น 3 รอบๆ ละ 8 cm.(หนา 1.5 มม) จำนวน 5 ชิ้นงาน

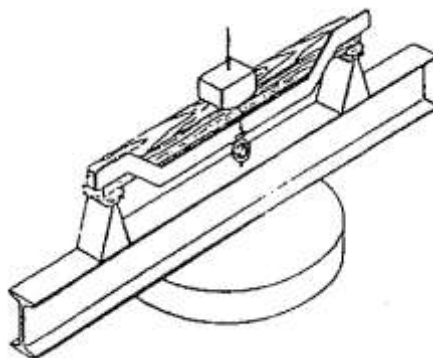
แบบที่ 2. ขนาดพื้น 6 รอบๆ ละ 8 cm.(หนา 3 มม) จำนวน 5 ชิ้นงาน

แบบที่ 3. ขนาดพื้น 9 รอบๆ ละ 8 cm.(หนา 4.5 มม) จำนวน 5 ชิ้นงาน



3.3.4 วิธีการทดลอง

- นำชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลองเข้าติดตั้งในเครื่องทดสอบ โดยมีระยะของจุดรองรับ (span) 280 มม. สำหรับเครื่องทดสอบที่ไม่สามารถวัดระยะการเสียรูปของชิ้นไม้ทดลองได้ จะต้องติดตั้งเครื่องมือวัดการเสียรูปเข้าไปกับเครื่องทดสอบด้วย
- เดินเครื่องทดสอบโดยให้หัวคาน้ำหนักเคลื่อนลงด้วยอัตราความเร็ว 0.26 นิวตันต่อวินาที
- บันทึกค่าระหว่างน้ำหนักที่กดลงบนชิ้นไม้ทดลอง กับระยะการเสียรูปของชิ้นไม้ทดลองจนกระทั่งไม้แตกหัก



3.3.5 การคำนวณ ให้คำนวณหาค่าความแข็งแรงของชิ้นไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทดลอง โดยหาค่าสัมประสิทธิ์การแตกหัก (MOR) และเขียนลงในตารางผลการทดลองที่ 4.2

3.3.6 ผลการทดลอง

ให้รายงานผลการทดลอง และเขียนลงในตารางผลการทดลองที่ 4.2



รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบ AutoUTM500T



รูปที่ 3.9 ชุดทดสอบ UTM100T



รูปที่ 3.10 การทดสอบแรงอัด
(Compression Test)



รูปที่ 3.11 การทดสอบแรงดัด (Bending Test)



รูปที่ 3.12 เครื่องแสดงผลการทดสอบแรงอัด



รูปที่ 3.13 เครื่อง Load Meter ทดสอบแรงดัด

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ผลการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้บิชและไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิชในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิชมีสีและผิวที่คเจอร์ (Texture) เหมือนหรือใกล้เคียงกับไม้บิชโดยธรรมชาติ ไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิชเป็นวัสดุพลาสติกเทอร์โมเซตติง ที่มีส่วนผสมระหว่างเรซิน (Resin) กับผงทัลคัม (Talcum) ที่ผสมสีฝุ่นในอัตราส่วนผสม 1:1 โดยน้ำหนัก และพันรัดด้วยไฟเบอร์ รูปที่ 4.1 แสดงชิ้นงานไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิชเปรียบเทียบกับไม้บิชธรรมชาติ สมบัติทางกลของไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิชที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกำลังอัดและกำลังคัด นอกจากนี้ตัวอย่างไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิช (ส่วนผสมระหว่างเรซิน ผงทัลคัม และเส้นใย) แล้ว ผู้วิจัยยังทำการทดสอบตัวอย่างเรซิน และตัวอย่างเรซินผสมทัลคัม เพื่อศึกษาตัวแปรที่ควบคุมพฤติกรรมการอัดและการคัดของตัวอย่างไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิช



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตทลายไม้บิชกับไม้บิชธรรมชาติ

4.1 สมบัติของวัสดุทดสอบ

4.1.1 สมบัติของ Polyester resin

- ความถ่วงจำเพาะ 13
- ทนแรงดึง 4.5-25 kg./mm.²(1000 lps/in²)
- ทนแรงอัด 12-25 kg./mm.² (1000 lps/in²)
- ทนแรงกระทบ ดีมาก
- ลักษณะสีความใส-ทึบ
- ทนไฟฟ้าดีมาก
- อุณหภูมิเสื่อมสภาพ 140-425 ฟาเรนไฮต์
- อัตราการเผาไหม้ช้าถึงดับเอง
- ความดูดซึมน้ำต่ำ

4.1.2 สมบัติของทลัคม

- ลักษณะผงสีขาวละเอียด ขนาด 325 Mesh
- วัตถุประสงค์การใช้ เพิ่มความหนืด, เพิ่มน้ำหนัก, เพิ่มความแข็งแรง
- ลักษณะชิ้นงานที่ได้ชิ้นงานมีสีกึ่งเงาด้าน
- อัตราส่วนผสมกับResin 1:1

4.1.3 สมบัติของเส้นใยแก้วขนาด 200 กรัม

สมบัติของเส้นใยแก้วที่ใช้พันรอบตัวอย่างส่วนผสมเรซินและทลัคม แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของเส้นใยแก้วขนาด 200 กรัม

	E-glass (%)	S-glass (%)	AR –glass (%)
SiO ₂	54	65	64
TiO ₂	-	-	3
ZiO ₂	-	-	13
Al ₂ O ₃	14	25	1
B ₂ O ₃	9	-	-
MgO	5	10	-
CaO	18	-	5

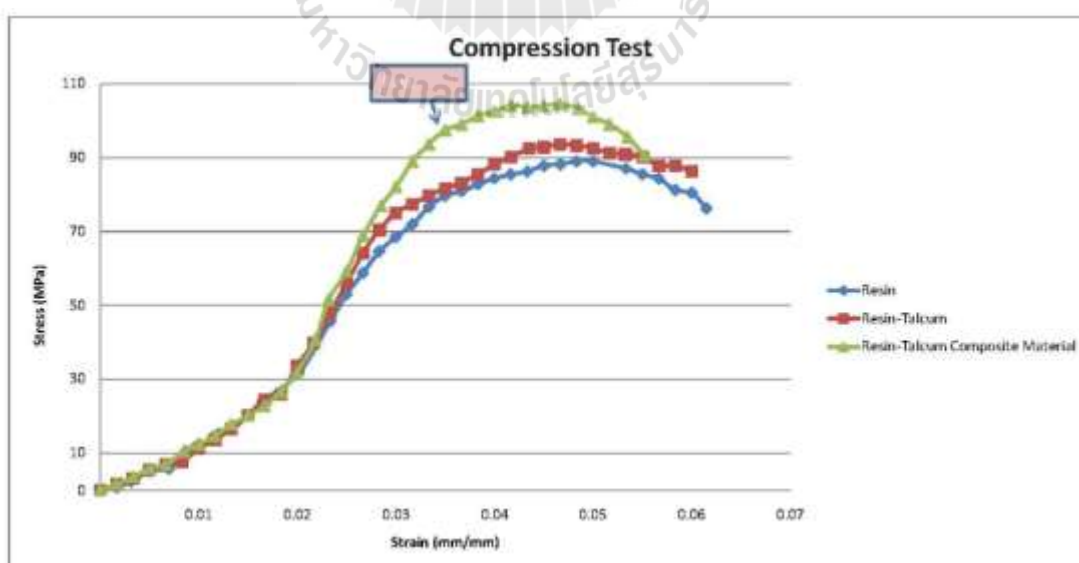
ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

	E-glass (%)	S-glass (%)	AR-glass (%)
Na ₂ O	-	-	14
Modulus (GPa)	70	80	75
Strength (MPa)	2200	2600	1700
Density (Mg/m ³)	2.54	2.49	2.70

หมายเหตุ งานวิจัยนี้ใช้เส้นใยแก้ว S-glass

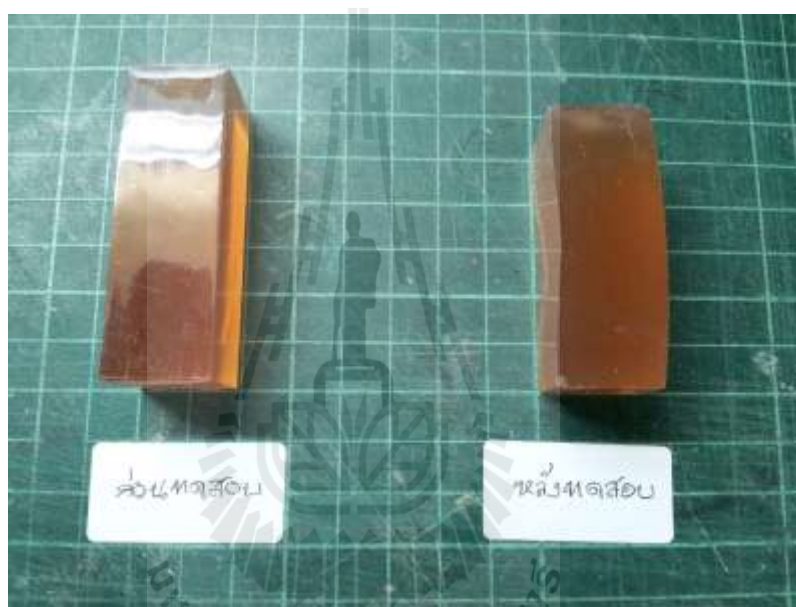
4.2 ผลการทดสอบแรงอัด (Compression Test)

ผลทดสอบแรงอัดของตัวอย่างเรซินและตัวอย่างไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บิชที่รัดและไม่รัดด้วยเส้นใยแก้วแสดงในรูปที่ 4.2 ตัวอย่างทั้งสามแสดงพฤติกรรมการรับแรงอัดที่คล้ายกัน แต่มีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกัน ในช่วงความเครียดระหว่าง 0 ถึง 0.02 (mm/mm) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันประมาณ 1,500 MPa เมื่อความเค้นมีค่าประมาณเท่ากับ 30 MPa ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดมีความชันที่สูงขึ้นแต่ไม่คงที่ (มีค่าลดลงตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น) จนกระทั่งถึงจุดที่ความเค้นสูงสุดเท่ากับ 80 MPa และความเครียดเท่ากับ 0.35 (mm/mm) หลังจากนั้น ตัวอย่างจะแสดงพฤติกรรมการลดลงของความเค้น (Strain-softening จนถึงจุดสิ้นสุดการทดสอบ



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงอัด (Compression Test) ของตัวอย่างเรซิน และตัวอย่างไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บิชที่รัดและไม่รัดด้วยเส้นใยแก้ว

ตัวอย่างเรซินก่อนและหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.3 เรซินเป็นวัสดุความยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastoplastic material) ที่มีความยืดตัวสูงในช่วงความเค้นต่ำและมีการคืนตัว (Recovery) ต่ำเมื่อความเค้นมีค่าเกินกว่าพิคคัสยืดหยุ่น ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 30 MPa เมื่อความเค้นมีค่าเกินกว่า 30 MPa ตัวอย่างเรซินเกิดการเสียรูปแบบไม่มีการคืนตัวจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างเรซินก่อนและหลังการทดสอบแรงอัด (Compression Test)

ชิ้นงานเรซินผสมทัลคัมมีพฤติกรรมการรับแรงอัดเช่นเดียวกับตัวอย่างเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ตัวอย่างเรซินผสมทัลคัมมีความชันในช่วงแรกของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดและมีค่าความเค้นที่พิคคัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับตัวอย่างเรซิน แต่มีค่ากำลังอัดที่จุดสูงสุดมากกว่าตัวอย่างเรซินเล็กน้อย กำลังอัดที่จุดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 92 MPa ที่ความเครียด 0.045 (mm/mm) ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมทัลคัมในเรซินไม่ได้ช่วยเพิ่มสติเฟเนสและกำลังอัดของตัวอย่างอย่างมีนัยยะ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เรซินเป็นตัวแปรที่ควบคุมพฤติกรรมการอัดตัวของตัวอย่างเรซินผสมทัลคัม การเติมทัลคัมทำให้ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแตกต่างจากตัวอย่างเรซิน การวิบัติของตัวอย่างเรซินผสมทัลคัมจะเป็นการแตกออกของตัวอย่าง (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเรซินผสมทลคัมก่อนและหลังการทดสอบแรงอัด(Compression Test)

การพันเส้นใยแก้วรอบตัวอย่างเรซินผสมทลคัมแบบไม่ได้ช่วยพัฒนาพฤติกรรมกรรมการอัดตัว ดังจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่คล้ายคลึงกัน (รูปที่ 4.2) อย่างไรก็ตาม การพันด้วยใยแก้วช่วยเพิ่มกำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากใยแก้วช่วยป้องกันการแตกร้าวของทลคัม ดังสังเกตได้ว่าแม้ผู้ทดสอบจะได้ยินเสียงของการแตกร้าวของตัวอย่างที่ความเค้น 92.5 MPa (ที่ความเครียด 0.033 (mm/mm)) แต่ตัวอย่างยังคงรับแรงอัดได้จนถึงค่าความเค้นสูงสุดที่เท่ากับ 105 MPa ที่ความเครียด 0.045 (mm/mm) รูปที่ 4.5 แสดงการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ จะเห็นได้ว่าลักษณะการวิบัติมีความแตกต่างจากตัวอย่างเรซินผสมทลคัม กล่าวคือ ตัวอย่างเรซินผสมทลคัมพันด้วยใยแก้วเกิดการวิบัติอย่างทั่วถึงทั้งก่อนตัวอย่าง ขณะที่การวิบัติของตัวอย่างเรซินผสมทลคัมเกิดขึ้นเฉพาะจุด

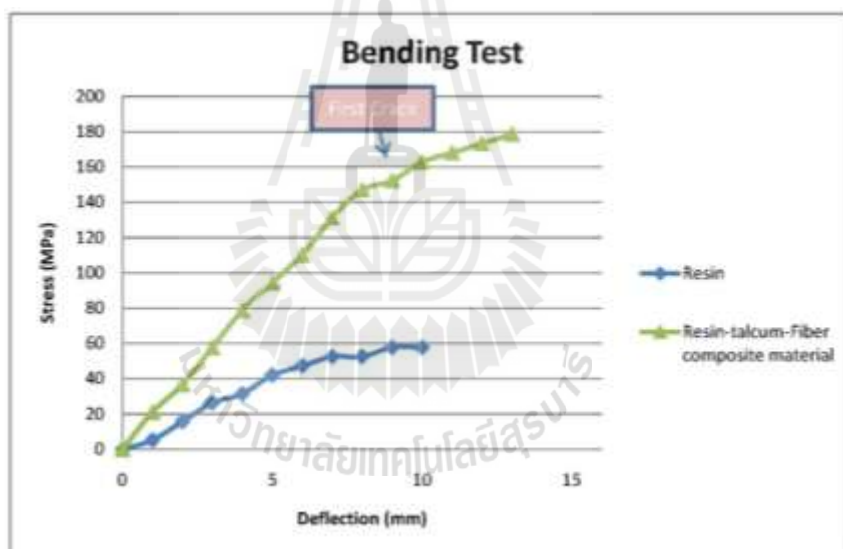


รูปที่ 4.5 ไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตที่พันด้วยเส้นใยแก้ว 9 รอบก่อนและหลังการทดสอบแรงอัด (Compression Test)

4.3 ผลการทดสอบแรงดัด (Bending Test)

ผลทดสอบแรงดัดของตัวอย่างเรซินและตัวอย่างเรซินผสมทัลคัมและพันรอบด้วยใยแก้ว 9 รอบ แสดงในรูปที่ 4.6 ตัวอย่างเรซินมีความเค้นเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามการเพิ่มขึ้นของความเครียด จนถึงความเค้นประมาณ 50 MPa ที่ระยะแอนตัว 7 มิลลิเมตร ต่อจากนั้น ความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของความเครียด จนถึงความเค้นสูงสุดที่เท่ากับ 60 MPa ที่ระยะแอนตัว 10 มิลลิเมตร

การพันตัวอย่างเรซินผสมทัลคัมด้วยใยแก้วช่วยเพิ่มสติเฟนและความเค้นดัดสูงสุดให้กับตัวอย่างอย่างเห็นได้ชัด ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดและการแอนตัวมีความชันเป็นเส้นตรงสองช่วง โดยที่ความชันในช่วงแรกมีค่าสูงกว่าความชันในช่วงหลัง จุดเปลี่ยนความชันคือจุดที่ตัวอย่างเริ่มเกิดรอยแตก ความเค้นที่จุดเปลี่ยนความชันมีค่าเท่ากับ 145 MPa ที่ค่าการแอนตัว 7.5 มิลลิเมตร ความเค้นที่จุดวิบัติมีค่าเท่ากับ 178 MPa ที่ค่าการแอนตัว 12.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงดัด (Bending Test) ของเรซินและไม้คอมโพสิตที่พันรัดด้วยเส้นใยแก้ว 9 รอบ

ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างเรซินผสมทัลคัมและพันรอบด้วยใยแก้ว 9 รอบแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการวิบัติเป็นการแตกร้าวที่จุดกึ่งกลาง ซึ่งเป็นจุดที่มีโมเมนต์สูงที่สุด จำนวนรอบการพันเส้นใยแก้วกับตัวอย่างเรซินผสมทัลคัมมีผลต่อการแอนตัวและกำลังอัดของไม้คอมโพสิต ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ากำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 115 เมื่อพันเส้นใยแก้ว 3 รอบ เป็น 155 และ 185 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อพันเส้นใยแก้ว 6 และ 9 รอบ ตามลำดับ รูป

ที่ 4.7 แสดงการวิบัติของตัวอย่าง ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการแ่นตัวของตัวอย่างหลังวิบัติมีค่าน้อยลงตามจำนวนรอบพันของเส้นใยแก้ว



รูปที่ 4.7 ลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบแรงคด (Bending Test) ของไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตที่พันรัดด้วยเส้นใยแก้ว 9 รอบ หลังการทดสอบ

4.4 ตารางสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล และราคาวัสดุของไม้บีช และไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต ภายไม้บีช

ตารางที่ 4.2 แสดงผลเปรียบเทียบด้านสมบัติกลและต้นทุนการผลิตไม้เนื้อแข็งคอมโพสิต ภายไม้บีช ตัวอย่างไม้คอมโพสิตมีกำลังอัดสูงกว่าไม้บีชธรรมชาติ แม้ไม่มีการพันรัดด้วยเส้นใยแก้ว ขณะที่ ตัวอย่างไม้คอมโพสิตมีกำลังคดสูงกว่าไม้บีชธรรมชาติ เมื่อมีการพันรัดด้วยเส้นใยแก้วเกินกว่า 6 รอบ ซึ่งมีค่ามากกว่า 155 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเทียบกับมาตรฐานของกรมป่าไม้ ไม้คอมโพสิตจัดเป็นไม้เนื้อแข็ง (กำลังอัดมีค่าสูงเกิน 98.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ตารางที่ 4.2 สรุปได้ว่าตัวอย่างไม้คอมโพสิตสามารถใช้ทดแทนไม้บีชธรรมชาติได้ (ไม้คอมโพสิตมีกำลังอัดและกำลังคดเกินกว่าไม้บีชธรรมชาติ) เมื่อพันรัดส่วนผสมระหว่างเรซินและทลคัมด้วยเส้นใยแก้วเท่ากับ 6 รอบ เมื่อเทียบต้นทุนการผลิตไม้คอมโพสิตภายไม้บีชกับไม้บีชธรรมชาติ พบว่าไม้คอมโพสิตมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า 8.7 (51.20 – 42.50) บาท ต่อ 120 ลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ข้อได้เปรียบด้านราคาแล้ว ไม้คอมโพสิตภายไม้บีชยังมีข้อได้เปรียบด้านการควบคุมสมบัติทางกลของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบสมบัติทางกล และราคาวัสดุของไม้ปืช และไม้เนื้อแข็งคอมโพสิท
ลายไม้ปืช

รายการ	จำนวน (ชิ้น)	ราคา (บาท)	ค่าแรง (บาท)	กำลังอัด (N/mm ²)	กำลังดัด (N/mm ²)	ราคารวม (บาท)
ไม้ขนาด 20x20x60 มม.						
ไม้ปืช	5	8	3.20	25-95	-	11.20
ไม้คอมโพสิท ทดสอบแรงอัด						
แบบที่ 1 เฉพาะเรซิน	5	11	1.10	35-47	-	12.10
แบบที่ 2 เรซิน+ทัลคัม (1:1)	5	6.05	0.60	80-105	-	6.65
แบบที่ 3/1 (FRP เบอร์ 200 พัน 3 รอบ)	5	5.44	1.36	90-105	-	6.80
แบบที่ 3/2 (FRP เบอร์ 200 พัน 6 รอบ)	5	6.88	1.72	80-85	-	8.60
แบบที่ 3/3 (FRP เบอร์ 200 พัน 9 รอบ)	5	8.32	2.08	95-105	-	10.40
ไม้ขนาด 20x20x300 มม.						
ไม้ปืช	5	40	11.20		55-160	51.20
ไม้คอมโพสิท ทดสอบแรงดัด						
แบบที่ 1 เฉพาะเรซิน	5	45	4.50	-	60	49.50
แบบที่ 2/1 (FRP เบอร์ 200 พัน 3 รอบ)	5	27	6.75	-	115	33.75
แบบที่ 2/2 (FRP เบอร์ 200 พัน 6 รอบ)	5	34	8.50	-	155	42.50
แบบที่ 2/3 (FRP เบอร์ 200 พัน 9 รอบ)	5	41	10.25	-	185	51.25
หมายเหตุ ค่าแรงไม้ปืช คิด 40% ของราคาวัสดุ ราคาไม้ปืช 1,150 บาท ต่อ Ft ³ ค่าแรงไม้คอมโพสิท คิด 25% ของราคาวัสดุ อัตราค่าแรงขั้นต่ำคิด 300 บาท ค่าแรงเฉพาะเรซิน คิด 10% ของราคาวัสดุ						

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้บีชและไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีช โดยวิธีแฮนด์เล็พ การทดสอบในห้องปฏิบัติการดำเนินการด้วยเครื่องมือทดสอบตามมาตรฐาน BS 373 บทสรุปด้านสมบัติทางกายภาพและทางกล และราคาของไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีชแสดงได้ดังนี้

5.1 สรุปข้อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพทางกลและราคาวัสดุ

ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีช มีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับไม้บีชธรรมชาติในด้านตัววัสดุ อุปกรณ์การผลิต และกระบวนการในการผลิต ชิ้นงานทดสอบ ผลจากการวิจัยพบว่า ข้อได้เปรียบของไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีชจะเหนือกว่าไม้บีชธรรมชาติในแง่ความง่ายในกระบวนการผลิตและ การจัดหาวัสดุอุปกรณ์ ในการประกอบชิ้นงานให้มีลักษณะทางกายภาพเหมือนหรือใกล้เคียงกันได้ตามต้องการ ขณะที่สมบัติทางกลไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีชจะเหนือกว่าไม้บีชธรรมชาติในประเด็นที่สามารถกำหนดได้ว่า ต้องการให้ชิ้นงานสามารถต้านกำลังอัด กำลังดัดได้ในระดับเท่าใด เช่น ต้องการให้กำลังอัดไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีชเท่ากับไม้บีชธรรมชาติ 80-105 (N/mm²) ราคาไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีชจะถูกกว่า ร้อยละ 40.6 และต้องการให้กำลังดัดไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีชเท่ากับไม้บีชธรรมชาติ 155-160 (N/mm²) ราคาไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีชจะถูกกว่า ร้อยละ 17 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ไม้เนื้อแข็งคอมโพสิตหลายไม้บีช สามารถทดแทนไม้บีชธรรมชาติได้

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

- 5.2.1 พื้นฐานของกระบวนการผลิต แบบแฮนด์เล็พต้องอาศัยแรงงาน และความรู้ความเข้าใจ วัสดุอุปกรณ์ ขั้นตอนการผลิตเป็นอย่างดี งานลักษณะนี้จึงไม่เหมาะกับแรงงานที่ขาดทักษะ หากทำชิ้นงานออกมาไม่ถูกต้องหรือเสียหาย ก็มีผลให้ต้นทุนสูงขึ้นตามไปด้วย
- 5.2.2 วัสดุพื้นฐานโดยวิธีแฮนด์เล็พ ประกอบด้วย สาร Polyester Resin และไฟเบอร์ใยแก้ว ซึ่งจัดเป็นวัสดุอันตราย ดังนั้น การปฏิบัติงานควรมีการใช้อุปกรณ์ป้องกันทุกครั้งระหว่างปฏิบัติการ

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 พื้นฐานของกระบวนการผลิตแบบ Hand lay up คือ การใช้มือทำงานโดยตรง ผู้ทำงานควรมีประสบการณ์ในการทำงาน ควรเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์ และมีกระบวนการผลิตที่ถูกต้องเหมาะสมในการทำงาน เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติที่ถูกต้องต่อการใช้งาน ลดของเสีย และได้ชิ้นงานที่มีมาตรฐานสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถควบคุมราคาค่าต้นทุนวัสดุและแรงงานได้คงที่
- 5.3.2 Hardener หรือตัวทำแข็งในเรซินต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสมประมาณร้อยละ 2 ไม่ควรเติมมากหรือน้อยเกินไปเพราะชิ้นงานร้อนมากหากเติมมากเกินไป และชิ้นส่วนจะหดตัวเร็วและเกิดการแตกร้าวร้าวเสียหายได้หากเติมน้อยไป
- 5.3.3 วิธีการผลิตแบบ Hand Lay Up เหมาะต่อการผลิตชิ้นงานที่แตกต่างกันและมีจำนวนไม่มาก ดังนั้น จึงไม่เหมาะกับการผลิตแบบชิ้นงานเดียวแต่ปริมาณผลิตมาก การผลิตชิ้นงานแบบซ้ำ ๆ ปริมาณมาก ๆ ต้องพิจารณาวิธีการผลิตในระบบอื่น ๆ เพื่อลดต้นทุนการผลิต



เอกสารอ้างอิง

- กวี หวังนิเวศน์กุล. (2556). **วัสดุวิศวกรรม**. บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
- สุชาติ ไทยพีธีร์ และคณะ. (2548). **ไม้เนื้อแข็งของประเทศไทย**.
- กลุ่มงานพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้ และผลิตผลป่าไม้ การป่าไม้ บางเขน
กรุงเทพฯ
- วรวิทย์ จตุรพานิชย์. (2535). **คุณสมบัติทางฟิสิกส์และแม่คณิกของไม้**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ
- พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. (2545). **พลาสติก**. เลขที่ 86 ซอย 60 ถ.จรัญสนิทวงศ์ กทม.1070.
- สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2544). **พลาสติก 1**. บริษัท สกายบู๊ค จำกัด.
- กิตติ อนุชาศักดิ์. (2548). **คอมโพสิต**. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- F.H. Titmuss and Douglas Patterson. (1988). **Commercial Timbers of the World**, Fifth Edition :
USA.



ภาคผนวก ก.

คู่มือผู้ใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติก



PRODUCT	PROPERTIES REQUIRED		High Barrier property	Good Chemical Resistance	Downdraining	High Durability	Good Heat Insulation	High Impact Strength	High Impact at Low Temperature	Good Processability	High Softening point	High Stiffness	Good Transparency	MATERIAL	
	PROCESS														
CUP															
Ice-Cream	Thermoforming				○					○				PS (High Impact)	
Coffee	Thermoforming						○				○			PS (Foam)	
Cocktail	Injection											○	○	PS	
Industrial Drum															
Color paint Drum	Injection		○		○		○					○		HDPE	
Large Size Garbage tank	Injection		○		○		○					○		HDPE	
Chemical Tank	Blow Moulding	○	○				○					○		HDPE (HMW) + NYLON	
Fuel tank	Blow Moulding													HDPE (HMW) + NYLON	
PALLET															
Pallet	Injection					○		○					○	HDPE / PP (COPO)	
CRATE															
Soft drink Crate	Injection					○		○					○	HDPE / PP (COPO)	
Fish's Sauce Crate	Injection					○		○					○	HDPE / PP (COPO)	
Fish Crate	Injection					○		○	○				○	HDPE / PP (COPO)	
BAG															
Shopping bag	Extrusion Blow					○	○					○	○	○	HDPE
Inser bag	Extrusion Blow					○	○					○	○	○	HDPE/LLDPE
Garbage bag	Extrusion Blow					○	○					○	○	○	HDPE/LLDPE
Rice bag	(CO) Extrusion		○				○			○	○				LLDPE
Sugar Bag	(CO) Extrusion		○				○			○	○				LLDPE
Flour bag	(CO) Extrusion		○				○			○	○				LLDPE
Fertilizer bag	Extrusion		○				○			○	○		○		PP
Feeding bag	Extrusion							○			○				LLDPE
Shirt bag	Extrusion					○				○			○	○	LDPE/LLDPE
Transparence bag	Extrusion	○				○			○	○			○	○	LDPE/PP LLDPE
Flat Yam	Extrusion		○	○			○		○				○	○	PP/PE
Bag in Box	Extrusion					○	○						○	○	PE
Boil in Bag	Extrusion											○	○		HDPE/PP



สัญลักษณ์อักษรย่อของพลาสติกต่าง ๆ (Plastics polymers, preproducts and rubbers) จาก International Plastics Handbook

ลำดับที่	อักษรย่อ	ชื่อพลาสติก
1	AAS	Methacrylate acrylic rubber styrene
2	ABA	Acrylonitrile butadiene acrylate
3	ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
4	ACM	Acrylic acid ester rubber
5	ACS	Acrylonitrile chlorinated PE styrene
6	ADC	Allyl diglyed carbonate
7	AES	Acrylonitrile ethylene propylene styrene
8	AMMA	Acrylonitrile methyl methacrylate
9	ANM	Acrylic acid ester rubber
10	APP	Atactic polypropylene
11	ASA	Acrylonitrile styrene acrylic ester
12	AXS	Acrylonitrile styrene terpolymers
13	BR	Cis-1, 4-polybutadiene rubber
14	BS	Butadiene styrene rubber
15	CA	Cellulose acetate
16	CAB	Cellulose acetate butyrate
17	CAP	Cellulose acetate propionate
18	CF	Cresol formaldehyde
19	CHR	Epichlorhydrine rubber
20	CMC	Carboxymethyl cellulose
21	CN	Cellulose nitrate
22	CP	Cellulose propionate
23	CPE	Chlorinated polyethylene (correctly : PEC)
24	CPVC	Chlorinated polyvinylchloride (correctly : PVCC)
25	CR	Chloroprene rubber
26	CSF	Casein formaldehyde
27	CSM	Chlorosulfonated polyethylene

ลำดับที่	อักษรย่อ	ชื่อพลาสติก
28	CTA	Cellulose triacetate
29	DAP	Diallyl phthalate
30	EC	Ethyl cellulose
31	ECB	Ethylene cop. Bitumen
32	ECTFE	Ethylene chlorotrifluoroethylene
33	EEA	Ethylene ethyl acrylate
34	EMA	Ethylene methacrylic acid
35	EP	Epoxy, epoxide
36	E/P	= PEP
37	EPDM	Ethylene propylene terpolymer rubber
38	EPM	Ethylene propylene rubber
39	EPS	Expanded polystyrene
40	ETE	Perfluorethylene propylene terpolymer
41	ETFE	Ethylene tetrafluoroethylene
42	EVA, EVAC	Ethylene vinyl acetate
43	FEP	Perfluoro ethylene propylene
44	FF	Furan formaldehyde
45	GR-I	Butyl rubber
46	GR-N	Nitrile rubber
47	GR-S	Styrene butadiene rubber
48	IIR	Butyl rubber
49	IPDI	Isophorone diisocyanate
50	IR	Cis-1, 4-polyisoprene rubber
51	LCP	Liquid crystals polymers
52	MBS	Methylmethacrylate butadiene styrene
53	MC	Methyl cellulose

ลำดับที่	อักษรย่อ	ชื่อพลาสติก
54	MDI	Diphenylmethane diisocyanate
55	MF	Melamine formaldehyde
56	MMA	Methylmethacrylate
57	MPF	Melamine phenol formaldehyde
58	NBR	Nitrile rubber
59	NC	Cellulose nitrate
60	NR	Natural rubber
61	PA	Polyamide (nylon)
62	PAA	Polyacrylic acid
63	PAI	Polyamideimide
64	PAK	Polyester alkyd
65	PAN	Polyacrylonitrile
66	PAUR	Polyesterurethane
67	PB	Polybutene-1
68	PBA	Polybutylacrylate
69	PBAN	Polybutadieneacrylonitrile
70	PBS	Polybutadienestyrene
71	PBT(P)	Polybutylene therephthalate
72	PC	Polycarbonate
73	PCD	Polycarbodiimide
74	PCTFE	Polymonochlorotrifluoroethylene
75	PDAP	Polydiallyl phthalate
76	PE	Polyethylene
77	PEBA	Polytherblockamides
78	PEC	Chlorinated polyethylene
79	PEEK	Polyetheretherketone
80	PEI	Polyetherimide
81	PEK	Polyetherketone
82	PEO, PEOX	Polyethylene oxide
83	PEPA	Polyether block amides
84	PEP	Polyethylenepropylene

ลำดับที่	อักษรย่อ	ชื่อพลาสติก
85	PES	Polyether sulfone
86	PET,PETP	Polyethylene terephthalate
87	PETG	Polyethylene terephthalate glycol comonomer
88	PEUR	Polyetherurethane
89	PF	Phenol formaldehyde
90	PFA	Perfluoro alkoxy alkane
91	PFEP	Polytetrafluoroethylene propylene
92	PFF	Phenol furfural
93	PI	Polyimide
94	PIB	Polyisobutylene
95	PIBI	Butylrubber
96	PIR	Polyisocyanurate
97	PMCA	Polymethyl α -chloroacrylate
98	PMI	Polymethacrylimide
99	PMMA	Polymethylmethacrylate
100	PMP	Poly-4-methylpentene-1
101	PMS	Poly α -methylstyrene
102	POM	Polyoxymethylene, Polyacetal
103	PP	Polypropylene
104	PPC	Chlorinated polypropylene
105	PPE	Polyphenylenether
106	PPMS	Polyparamethylstyrene
107	PPO(S)	Polyphenyleneoxide (styrene)
108	PPOX	Polypropyleneoxide
109	PPS	Polyphenylenesulfide
110	PPSU	Polyphenylenesulfone
111	PS	Polystyrene
112	PSB	Styrene butadiene rubber
113	PSU	Polysulfone
114	PTFE	Polytetrafluoroethylene
115	PTP	Polyterephthalates
116	PUR	Polyurethane

ลำดับที่	อักษรย่อ	ชื่อพลาสติก
117	PVAC	Polyvinylacetate
118	PVAL	Polyvinylalcohol
119	PVB	Polyvinylbutyral
120	PVC	Polyvinylchloride
121	PVCA	Polyvinylchlorideacetate
122	PVCC	Chlorinated polyvinylchloride
123	PVDC	Polyvinylidenechloride
124	PVDF	Polyvinylidenefluoride
125	PVF	Polyvinylfluoride
126	PVFM	Polyvinylformal
127	PVK	Polyvinylcarbazole
128	PVP	Polyvinylpyrrolidone
129	RF	Resorcinformaldehyde
130	SAN	Styrene acrylonitrile
131	SB	Styrene butadiene
132	SBR	Styrene butadiene rubber
133	SI	Silicone plastics
134	Si	Silicone rubber
135	SMA	Styrene maleic anhydride
136	SMS	Styrene α -methylstyrene
137	SP	Saturated polyesters
138	SRP	Styrene rubber plastics
139	TAC	Triallycyanurate
140	TDI	Toluyl diisocyanate
141	TFA	Fluoro-alkoxy-terpolymer
142	TFB	Perfluoro vinylidenechloride terpolymer
143	TMDI	Trimethyl hexamethylene diisocyanate
144	TPU	Thermoplastic polyurethane
145	UF	Urea formaldehyde

ลำดับที่	อักษรย่อ	ชื่อพลาสติก
146	UP	Unsaturated polyester
147	VAC	Vinyl acetate
148	VC	Vinyl chloride
149	VCE	Vinyl chloride ethylene
150	VCEMA	Vinylchloride ethylen methyl acrylate
151	VCEVA(C)	Vinyl chloride ethylene vinyl acetate
152	VCMA	Vinylchloride methyl acrylate
153	VCOA	Vinyl chloride octylacrylate
154	VCVAC	Vinyl chloride vinyl acetate
155	VCVDL	Vinyl chloride vinylidene chloride
156	VF	Vulcanized fiber



ภาคผนวก ค.
การนำเสนอ Power Point



ประวัติผู้เขียน

นายปณณวิช สถาปียะคุณ เกิดวันที่ 30 กรกฎาคม 2507 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียน บุญเหลือวิทยานุสรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2523 และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาสถาปัตยกรรมในปีการศึกษา 2529 จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา จากนั้นได้เดินทางไปศึกษาต่อภาคภาษาอังกฤษอเมริกันที่ Fairleigh Dickinson University มลรัฐ New Jersey สหรัฐอเมริกา และได้เริ่มทำงานเป็น Designer ให้ K&D Export Import crop. ควบคู่กับการทำรับเหมางาน Home Improvement ระหว่างวันหยุด และได้เดินทางกลับมาเมืองไทย เพื่อศึกษาต่อจนจบในระดับปริญญาตรี สาขาวิชา Industrial technology จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2543 ระหว่างที่ศึกษาอยู่ระดับปริญญาตรีนั้น ได้ร่วมกับเพื่อนเปิดบริษัท บัคคี่ วัสดุ จำกัด เพื่อรับงานผลิตงานไม้ ประเภทของตกแต่งบ้าน และเฟอร์นิเจอร์ เน้นส่งออกไปตลาดสหรัฐอเมริกา ยุโรป และปัจจุบันยังเป็นที่ปรึกษาอิสระให้กับ Siam Karat International co.,Ltd. ตำแหน่ง Architect & Furniture technologist และทำธุรกิจงานก่อสร้างรับเหมาของตนเอง ตำแหน่งสถาปนิก นักออกแบบวางแผน ควบคู่ไปกับการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2557