



ผลกระทบของการเติมวัสดุเศษเหลือจากธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงในวัสดุผสม
ต่อสมบัติการหน่วงของการติดไฟและการขยายตัวทางความร้อน
Effect of Natural Waste Materials with High Cellulose in Composites on
Flame Retardant Properties and Thermal Expansion

ณคนัท รักษารักษ์
Nakanat Raksarak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ผลกระทบของการเติมวัสดุเศษเหลือจากธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงในวัสดุผสม
ต่อสมบัติการหน่วงของการติดไฟและการขยายตัวทางความร้อน
Effect of Natural Waste Materials with High Cellulose in Composites on
Flame Retardant Properties and Thermal Expansion

ณคนัท รักษารักษ์
Nakanat Raksarak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการเติมวัสดุเศษเหลือจากธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง ในวัสดุผสมต่อสมบัติการหน่วงของการติดไฟและการขยายตัวทางความ ร้อน
ผู้เขียน	นายณคนัท รักษารักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลพัฒน์ รวมเจริญ)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อ๋อง สักขพงศ์)
กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ชเนศ รัตนวิไล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคล
ที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตน์วิไล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายณคนัท รักษารักษ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายณคนัท รักษารักษ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการเติมวัสดุเศษเหลือจากธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง ในวัสดุผสมต่อสมบัติการหน่วงของการติดไฟและการขยายตัวทางความ ร้อน
ผู้เขียน	นายณคนัท รักษารักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยเหลือใช้จากเศษวัสดุทางการเกษตร 3 ชนิดได้แก่ เส้นใยกาบมะพร้าว เส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยชังข้าวโพด โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใย ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การขยายตัวทางความร้อน และการติดไฟ โดยทำการผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยไม้ สารเติมแต่ง และสารหล่อลื่น ที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลร้อยละ 50, 60 และ 70 ปริมาณเส้นใยในช่วงร้อยละ 45-48, 35-38 และ 25-28 สารเติมแต่งในช่วงร้อยละ 1-4 และสารหล่อลื่น ร้อยละ 1 จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบวัสดุไม้พลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ และเครื่องอัดร้อน ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิธี Tukey's multiple comparison test พบว่าที่สารเติมแต่ง ร้อยละ 3 ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าปริมาณของเส้นใยส่งผลกระทบต่อสมบัติการต้านทานแรงแรงดึง สมบัติการต้านทานแรงดึง สมบัติแรงการต้านทานแรงอัดและ สมบัติความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติก โดยค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงดึงและ แรงอัดจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับค่าความแข็งผิวและค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น และพบว่าวัสดุผสมที่ผสมกับเส้นใยกาบมะพร้าวมีค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงอัด และค่าความแข็งผิวที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มากกว่าเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมันและเส้นใยชังข้าวโพด ตามลำดับ ในส่วนของความขรุขระผิว พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นในไม้ทุกชนิดส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวของวัสดุผสมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ในส่วนของการทดสอบสมบัติทางความร้อน การขยายตัวทางความร้อนและการติดไฟ พบว่า วัสดุผสมที่สร้างจากเส้นใยแต่ละชนิด ในอัตราส่วนปริมาณที่แตกต่างกันจะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สมบัติการขยายตัวทางความร้อนนั้นจะพบว่าการขยายตัวจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับสมบัติการติดไฟข้างลงเมื่อปริมาณเส้นใยธรรมชาติลดลง นอกจากนี้เมื่อนำวัสดุผสมไม้พลาสติกจากไม้ทุกชนิดที่อัตราส่วน rPP70NF26M3 ซึ่งให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การขยายตัวทางความร้อน และการติดไฟที่ดีที่สุด ไปเทียบกับมาตรฐานแผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (มอก.966-2547) และแผ่นไม้

อัฒนิตราบ (มอก.876-2547) พบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกที่อัตราส่วน rPP70NF26M3 นั้นผ่านเกณฑ์ทั้งสอง นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต พบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกนั้นมีต้นทุนที่ไม่แตกต่างกันมากนักโดยที่วัสดุผสมไม้พลาสติกที่เกิดจากผสมของเส้นใยกาบมะพร้าวมีต้นทุนการผลิตที่ 25.57 บาทต่อชิ้น จากเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน มีต้นทุนการผลิตที่ 24.73 บาทต่อชิ้น และจากซังข้าวโพดมีต้นทุนการผลิตที่ 24.41 บาทต่อชิ้น

Thesis Title	Effect of Natural Fibers with High Cellulose in Composites on Flame Retardant Properties and Thermal Expansion
Author	Mr.Nakanat Raksarak
Major Program	Industrial and Systems Engineering
Academic Year	2018

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the effects of wood plastic composites (WPCs) reinforced with three types of natural fibers from agricultural waste; coconut fiber (COF), palm oil fiber (PF) and corn fiber (CF) on the mechanical, physical, thermal and flammability properties by mixing recycled polypropylene plastic (rPP) with the fibers, coupling agent and lubricant. The percentages of recycled polypropylene are 50%, 60% and 70%, natural fiber (NF) contents are in the range of 45%-48%, 35%-38%, and 25%-28%, coupling agent (MAPP) is in the range of 1%-4% and lubricant (L) is 1%. The composite materials were manufactured into panels by using a twin-screw extruder and hot press machine. The data were statistically analyzed by analysis of variance (ANOVA) and the Tukey's multiple comparison tests to detect the significant differences between groups. It was found that WPCs with 3% of coupling agent obtained the best mechanical properties and the amount of natural fiber had significant effect on the flexural, tensile, compressive and surface hardness properties of WPCs. The flexural, tensile and compressive strength are reduced when the amount of natural fibers increased in contrast to the surface hardness and modulus values that increased. For the mechanical properties, it was found that the flexural strength, tensile strength, compressive strength and surface hardness of WPCs reinforced with coconut fiber (rPP/COF) obtained the best when compared to those of WPCs reinforced with oil palm fiber (rPP/PF) and corn fiber (rPP/CF). For the physical properties, it was found that the surface roughness significantly increased as the amount of wood fiber was increased. For the thermal properties, no significant differences were found between groups in thermal stability test. But it was found that the thermal expansion of WPCs with higher fiber content was lower. For the flammability properties, it was found that WPCs with lower fiber

content were less flammable. In addition, when comparing WPCs from the natural fibers using the composition ratio at rPP70NF26M3 which obtained the best in mechanical, physical, thermal expansion and flammability properties with the medium density fiberboard standard (TIS.966-2547) and flat pressed fiberboard standard (TIS.876-2547), it was found that WPCs with this composition ratio met the both criteria. In terms of production costs, no significant differences were found between groups as the production cost of rPP/COF is 25.57 baht per piece, rPP/PF is 24.73 baht per piece and rPP/CF is 24.41 baht per piece.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยการให้ความช่วยเหลือจากผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ทั้งที่ได้ออกนามและมีได้ออกนาม ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงการดำเนินการวิจัย ตลอดจนสละเวลาในการตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนจากบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนทุนในการวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อน ๆ ทุกคน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ณคนัท รักษารักษ์

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(16)
รายการภาพประกอบ	(21)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
1.2.1 ประเภทผสมของวัสดุผสม	6
1.2.2 กรรมวิธีในการผลิตขึ้นรูป	8
1.2.3 การทดสอบสมบัติ	9
1.2.4 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตรของไม้พลาสติก	10
1.3 วัตถุประสงค์	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
1.4.1 ด้านสิ่งแวดล้อม	11
1.4.2 ด้านเศรษฐกิจและสังคม	11
1.4.3 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์	11
1.5 ขอบเขตการวิจัย	11
1.6 สถานที่ทำการวิจัย	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composites)	13

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
2.1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต	14
2.1.2 ชนิดของวัสดุคอมโพสิต	15
2.2 เส้นใยธรรมชาติ	15
2.2.1 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ	15
2.2.2 องค์ประกอบเส้นใยธรรมชาติ	16
2.3 มะพร้าว (Coconut wood)	17
2.4 ไม้ปาล์ม (Oil palm wood)	18
2.5 ข้าวโพด (Corn wood)	19
2.6 พลาสติก (Plastic)	20
2.7 พอลิโพรพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene Grafted Maleic Anhydride; PP-g-MA)	22
2.8 ไม้ผสมพลาสติก (Wood plastic composites; WPCs)	22
2.8.1 โครงสร้าง (Structure)	23
2.8.2 สมรรถนะ (Performance)	23
2.8.3 ข้อดีของไม้ผสมพลาสติก	23
2.8.4 ข้อด้อยของไม้ผสมพลาสติก	24
2.9 กรรมวิธีในการผลิต (Manufacturing)	24
2.9.1 กระบวนการฉีดเข้าแบบ (Injection Molding)	24
2.9.2 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion)	25
2.9.3 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding)	25
2.10 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties Testing)	26
2.10.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)	26
2.10.2 การทดสอบแรงอัด (Compression Testing)	26
2.10.3 การทดสอบแรงดัด (Flexural Testing)	27

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
2.10.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)	27
2.11 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties Testing)	28
2.11.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC)	28
2.11.2 เทอร์มอแกรวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA)	29
2.11.3 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion; CTE)	29
2.12 การทดสอบความหนาแน่น (Density)	30
2.13 การทดสอบการติดไฟ (Flammability Testing)	30
2.13.1 การทดสอบการหน่วงไฟของวัสดุตามมาตรฐาน UL-94	30
2.13.2 ลิมิเต้ดออกซิเจนอินเด็กซ์ (Limited Oxygen Index; LOI)	31
2.14 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphological Properties Testing)	31
2.15 ไม้	32
2.15.1 โครงสร้างและรูปร่างลักษณะของไม้	32
2.15.2 ชนิดของไม้	33
2.16 สารเติมแต่ง (Additive)	33
2.16.1 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)	33
2.16.2 สารคงสภาพ (Stabilizer)	34
2.16.3 สารตัวเติม (Filler)	34
2.16.4 สารช่วยในการกระบวนการผลิต (Processing aids)	34
2.16.5 สารช่วยผสม (Compatibilizer)	34
2.16.6 สารหน่วงไฟ Fire retardant	34
2.16.7 พอลิโพรพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene Grafted Maleic Anhydride; PP-g-MA)	34
2.17 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ	35

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1 วัสดุ และสารเคมี	36
3.1.1 วัสดุ	36
3.1.2 สารเคมี	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	39
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานทดสอบ	39
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล	42
3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติความร้อน	43
3.2.4 เครื่องทดสอบการติดไฟ	46
3.2.5 เครื่องทดสอบความขรุขระ	46
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม	46
3.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล	46
3.3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม	48
3.3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	49
3.3.4 สมบัติการทดสอบการติดไฟ	50
3.3.5 การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสม	51
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	52
3.4.1 ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	52
3.4.2 จัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	52
3.4.3 การสร้างชิ้นงานทดสอบ	52
3.4.4 ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุผสม	55

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
3.4.5 จำนวนต้นทุนรวมต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติก	55
3.4.6 วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย	55
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์	57
4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมไม้พลาสติก	57
4.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัด	57
4.1.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง	77
4.1.3 ผลการทดสอบแรงอัด	92
4.1.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงผิว	99
4.1.5 ผลการทดสอบความขรุขระของผิว	106
4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น	113
4.3 สมบัติทางด้านความร้อน	114
4.3.1 การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป (Thermogravimetric Analysis; TGA)	114
4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (Differential Scanning Calorimetry; DSC)	117
4.3.3 สมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal expansion; CTE)	118
4.4 สมบัติการต้านการติดไฟ	122
4.5 ต้นทุนการผลิต	125
4.5.1 การคำนวณราคาต้นทุนวัสดุ	125
4.5.2 การคำนวณราคาต้นทุนพลังงาน	126
4.5.3 ต้นทุนรวม	128
4.6 การเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	129
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	131

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
5.1 สรุปผล	131
5.2 ข้อเสนอแนะ	133
บรรณานุกรม	134
ภาคผนวก	139
ภาคผนวก ก	140
ภาคผนวก ก – 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งแรงตัด	140
ภาคผนวก ก – 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมอดูลัสแรงดึง	146
ภาคผนวก ก – 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งแรงดึง	151
ภาคผนวก ก – 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมอดูลัสแรงดึง	156
ภาคผนวก ก – 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งแรงอัด	161
ภาคผนวก ก – 6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งผิว	166
ภาคผนวก ก – 7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความขรุขระ	171
ภาคผนวก ข	177

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ร้อยละความต้องการใช้ของวัสดุ	1
1.2 ร้อยละการเจริญเติบโตของไม้ผสมพลาสติก	2
1.3 พื้นที่ในการเพาะปลูกพืชชนิดต่าง ๆ ในไทย	3
2.1 ปริมาณเซลล์โลสในเส้นใยธรรมชาติ	14
3.1 สัดส่วนร้อยละของปริมาณเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ	53
4.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงตัด	66
4.2 ค่าความแข็งแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)	69
4.3 ค่าความแข็งแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)	70
4.4 ค่าความแข็งแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)	71
4.5 ค่ามอดูลัสแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)	74
4.6 ค่ามอดูลัสแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)	75
4.7 ค่ามอดูลัสแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)	76
4.8 ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)	84
4.9 ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)	85
4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)	86
4.11 ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)	89
4.12 ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)	90
4.13 ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)	91
4.14 ค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)	96
4.15 ค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)	97
4.16 ค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)	98
4.17 ค่าความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)	103
4.18 ค่าความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)	104
4.19 ค่าความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)	105
4.20 ค่าความขรุขระของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (μm)	110
4.21 ค่าความขรุขระของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (μm)	111
4.22 ค่าความขรุขระของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (μm)	112

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.23 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่ มีการเติมเส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ	116
4.24 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและค่าองศาความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วย DSC	117
4.25 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากเส้นใยธรรมชาติ	118
4.26 สมบัติสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่มีการใส่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ	121
4.27 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติก มีการใส่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ	124
4.28 ต้นทุนวัสดุของวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชั้น (25 มม. x 130 มม. x 7 มม.) จากเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดในสัดส่วน rPP70NF26M3	126
4.29 ต้นทุนพลังงานของวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชั้น (25 มม. x 130 มม. x 7 มม.) ในเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ	128
4.30 ต้นทุนรวมของวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชั้น (25 มม. x 130 มม. x 7 มม.) ในเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ	129
4.31 การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ และต้นทุนการผลิตของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่สัดส่วน rPP70NF26M3 กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไม้ทั้ง 3 ชนิด	130
ก 1.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดัด	142
ก 1.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Strength : Level of Additive	143
ก 1.3 Tukey Simultaneous Test for Flexural Strength : Level of Additive	143
ก 1.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Strength : Level of Volume	144
ก 1.5 Tukey Simultaneous Test for Flexural Strength : Level of Volume	144
ก 1.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Strength : Level of Species	144
ก 1.7 Tukey Simultaneous Test for Flexural Strength : Level of Species	145
ก 2.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่ามอดูลัสแรงดัด	147

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก 2.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Modulus : Level Of Additive	148
ก 2.3 Tukey Simultaneous Test for Flexural Modulus : Level of Additive	148
ก 2.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Modulus : Level Of Volume	149
ก 2.5 Tukey Simultaneous Test for Flexural Modulus : Level of Volume	149
ก 2.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Modulus : Level Of Species	149
ก 2.7 Tukey Simultaneous Test for Flexural Modulus : Level of Species	150
ก 3.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งแรงดึง	152
ก 3.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Strength : Level of Additive	153
ก 3.3 Tukey Simultaneous Test for Tensile Strength : Level of Additive	153
ก 3.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Strength : Level of Volume	154
ก 3.5 Tukey Simultaneous Test for Tensile Strength : Level of Volume	154
ก 3.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Strength : Level of Species	154
ก 3.7 Tukey Simultaneous Test for Tensile Strength : Level of Species	155
ก 4.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่ามอดูลัสแรงดึง	157
ก 4.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Modulus : Level of Additive	158
ก 4.3 Tukey Simultaneous Test for Tensile Modulus : Level of Additive	158
ก 4.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Modulus : Level of Volume	159
ก 4.5 Tukey Simultaneous Test for Tensile Modulus: Level of Volume	159
ก 4.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Modulus : Level of Species	159
ก 4.7 Tukey Simultaneous Test for Tensile Modulus : Level of Species	160

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก 5.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งแรงอัด	162
ก 5.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Additive	163
ก 5.3 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Additive	163
ก 5.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Volume	164
ก 5.5 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Volume	164
ก 5.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Species	165
ก 5.7 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Species	165
ก 6.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งผิว	167
ก 6.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Additive	168
ก 6.3 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Additive	168
ก 6.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Volume	169
ก 6.5 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Volume	169
ก 6.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Species	169
ก 6.7 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Species	170
ก 7.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าซรุชระ	172
ก 7.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Additive	173
ก 7.3 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Additive	173
ก 7.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Volume	174
ก 7.5 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Volume	174

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก 7.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Species	174
ก 7.7 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Species	175
ข.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก	176
ข 1.2 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก	177
ข 1.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก	178
ข 1.4 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก	180
ข 1.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก	181
ข 1.6 ผลการทดสอบความขรุขระของวัสดุไม้ผสมพลาสติก	183
ข 1.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุไม้ผสมพลาสติกที่สัดส่วน rPP70CO26M3 ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	186

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 กาบมะพร้าว	4
1.2 กากทะเลลายปาล์มน้ำมัน	4
1.3 ชั่งข้าวโพด	5
2.1 โครงสร้างพันธะของเซลลูโลส	16
2.2 แสดงภาพตัดขวางของเครื่องฉีดเข้าแบบ	24
2.3 เครื่องอัดรีด และสัดส่วนต่าง ๆ	25
2.4 เครื่องอัดขึ้นรูป และสัดส่วนต่าง ๆ	
2.5 ลักษณะโครงสร้างของไม้	32
3.1 เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP)	36
3.2 เส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน	37
3.3 เส้นใยกาบมะพร้าว	37
3.4 เส้นใยชั่งข้าวโพด	38
3.5 มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (MA)	38
3.6 ตู้อบความร้อน	39
3.7 เครื่องร่อนแยกขนาด	40
3.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่	41
3.9 เครื่องอัดรีดร้อน	41
3.10 เครื่องทดสอบสมบัติทางกลวัสดุ	42
3.11 เครื่องทดสอบความแข็งผิว	43
3.12 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน	44
3.13 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	44
3.14 อุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุสเตรนเกจ	45
3.15 เครื่อง Universal Bridge Box	45
3.16 เครื่อง Universal Data Recorder Box	46
3.17 การทดสอบความแข็งแรงดัด	47
3.18 การทดสอบความแข็งแรงดึง	47
3.19 การทดสอบความแข็งแรงอัด	48
3.20 อุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุสำหรับพลาสติก	50
3.21 ชุดทดสอบการขยายตัวทางความร้อน	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 แผนผังการดำเนินงาน	56
4.1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3% และ กำลังขยาย 150x (C1 P1 CO1) ที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก (C2 P2 CO2) ที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก (C3 P3 CO3) ที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก (7-9) ที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	59
4.2 สัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 500x	60
4.3 ค่าความแข็งแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	60
4.4 ค่าความแข็งแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก	61
4.5 ค่าความแข็งแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก	61
4.6 ค่ามอดูลัสแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	62
4.7 ค่ามอดูลัสแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก	62
4.8 ค่ามอดูลัสแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก	63
4.9 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดัด	64
4.10 Normal Probability Plot of Flexural Strength	65
4.11 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 500x	78
4.12 ค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	79
4.13 ค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก	79
4.14 ค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก	80
4.15 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	80
4.16 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก	81
4.17 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก	81
4.18 ค่าความแข็งแรงอัดที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	93
4.19 ค่าความแข็งแรงอัดที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก	93
4.20 ค่าความแข็งแรงอัดที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก	94
4.21 ค่าความแข็งแรงผิวที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	100
4.22 ค่าความแข็งแรงผิวที่ปริมาณพลาสติก 60 % โดยน้ำหนัก	100
4.23 ค่าความแข็งแรงผิวที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก	101

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ค่าความขรุขระที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	107
4.25 ค่าความขรุขระที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก	107
4.26 ค่าความขรุขระที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก	108
4.27 ความหนาแน่นของวัสดุไม้ผสมพลาสติกที่สัดส่วน rPP70NF26M3 ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก	113
4.28 กราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ	116
4.29 กราฟ CTE ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ	121
4.30 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3% และปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก หลังการทดสอบการขยายตัวทางความร้อน กำลังขยาย 1500x	122
4.31 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและพอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีการใส่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง	125
ก 1.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดัด	140
ก 1.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Strength : Level of Additive	141
ก 2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดัด	143
ก 2.2 Normal Probability Plot of Flexural Modulus	144
ก 3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง	148
ก 3.2 Normal Probability Plot of Tensile Strength	149
ก 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดึง	153
ก 4.2 Normal Probability Plot of Tensile Modulus	154
ก 5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งแรงอัด	158
ก 5.2 Normal Probability Plot of Compressive	159
ก 6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งแรงฉีก	160
ก 6.2 Normal Probability Plot of Compressive	164

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก 7.1	การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งผิว	168
ก 7.2	Normal Probability Plot of Compressive	169

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

วัสดุไม้ผสมพลาสติก (Wood plastic composites; WPCs) เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ได้รับความต้องการของวัสดุอย่างมากดังตารางที่ 1.1 ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมงานก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ [1], [2] เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีหลายประเทศได้พัฒนารูปแบบและกระบวนการผลิตของไม้ผสมพลาสติกเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เช่น ประเทศเยอรมัน ประเทศญี่ปุ่น และกลุ่มประเทศยุโรป [2], [3] จึงทำให้ไม้ผสมพลาสติกเป็นที่ต้องการของตลาดและมีการเติบโตที่เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับในอดีต ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 ร้อยละความต้องการใช้ของวัสดุ [4]

วัสดุ		ปี พ.ศ.				
		2535	2545	2548	2549	2554
ร้อยละความต้องการของวัสดุ	ไม้	97	91	77	73	66
	ไม้ผสมพลาสติก	2	7	19	22	30
	พลาสติก	1	2	4	5	4

ไม้ผสมพลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้ทดแทนไม้จากการนำผงไม้ ไม้เลื่อยไม้ หรือเส้นใยไม้ผสมกับพลาสติก นำมาผ่านกระบวนการผลิตโดยเทคนิคการขึ้นรูปของพลาสติกออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใช้งานได้เสมือนไม้จริง โดยสมบัติเด่นของไม้ผสมพลาสติก คือ มีความแข็งแรงทนทาน การบำรุงรักษาง่าย ราคาต่ำ และอายุการใช้งานค่อนข้างนาน [2] แต่ไม้ผสมพลาสติกยังมีข้อจำกัดในด้านการใช้งานบางประเภทโดยเฉพาะงานโครงสร้างภายนอกซึ่งเป็นลักษณะงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำ แสงแดด และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม เนื่องจากไม้ผสมพลาสติกมีเนื้อไม้เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีโครงสร้างหลักคือ เซลลูโลส และลิกนิน โดยเซลลูโลสจะประกอบด้วยโครงสร้างหมู่ไฮดรอกซิลที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ เมื่อนำมาทำการผสมกับพลาสติกทำให้เกิดการบวมของเนื้อไม้ผสมพลาสติก

ตารางที่ 1.2 ร้อยละการเจริญเติบโตของไม้ผสมพลาสติก [4]

เขตพื้นที่	พ.ศ. 2553 (ตัน)	พ.ศ. 2558 (ตัน)	ร้อยละการใช้ไม้พลาสติกในปี พ.ศ. 2558
อเมริกาเหนือ	900,000	1,300,000	48
จีน	300,000	900,000	33
ยุโรป	150,000	250,000	9
ญี่ปุ่น	60,000	120,000	4
รัสเซีย	10,000	70,000	3
เอเชียตะวันออกเฉียงใต้	30,000	55,000	2
รวมทั้งหมด	1,450,000	2,695,000	100

ในส่วนของลิกนินจะเป็นโครงสร้างที่ส่งผลต่อการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ทำให้ไม้ผสมพลาสติกเกิดการผุกร่อน โดยทั้ง 2 ปัจจัยดังกล่าวนี้จะส่งผลโดยตรงทำให้สมบัติเชิงกลของไม้ผสมพลาสติกด้อยลง [1-2] และองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือพลาสติก เมื่อพลาสติกได้รับความร้อนจะส่งผลต่อการขยายตัวหรือการเปลี่ยนโครงสร้างพันธะภายในทำให้วัสดุเสียรูปไม่เหมาะในการใช้งานในที่อุณหภูมิสูง [5] และอีกข้อต่อที่สำคัญของไม้ผสมพลาสติกคือ สมบัติด้านการหน่วงไฟ [6-9] เมื่อไม้พลาสติกถูกเผาหรือได้รับความร้อนมากเกินไปจะทำให้เกิดการเผาไหม้เนื่องจากองค์ประกอบที่มีสัดส่วนเป็นพลาสติกและไม้ ทำให้ไม้ผสมพลาสติกมีสมบัติในการติดไฟได้ง่ายส่งผลให้ไม้พลาสติกมีการหน่วงไฟที่ต่ำไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงและที่เสี่ยงต่อการติดไฟ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นข้อจำกัดสำหรับการนำไม้ผสมพลาสติกไปประยุกต์ใช้ในงาน อุตสาหกรรม งานก่อสร้างอุตสาหกรรมยานยนต์ และอื่น ๆ

กระบวนการผลิตของไม้ผสมพลาสติกนั้นเริ่มต้นโดยการนำพลาสติกผสมกับผงไม้ จากนั้นทำการขึ้นรูปไม้ผสมพลาสติก ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปไม้ผสมพลาสติกนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การอัดรีด (Extrusion) การอัดร้อน (Hot press) และการฉีด (Injection) เป็นต้น นอกจากนี้ไม้ผสมพลาสติกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายลักษณะงาน เช่น

งานด้านโครงสร้าง งานรับน้ำหนัก งานเสริมความแข็งแรง และงานตกแต่งอาคารสถานที่ เช่นการตกแต่งภายนอก และภายใน ดังนั้นไม้ผสมพลาสติกในปัจจุบันจึงต้องมีสมบัติในด้านความแข็งแรง ความเหนียว ทนต่อแรงเสียดทาน ทนต่อการสึกหรอ ทนต่อสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติทางด้านเคมี [1], [2], [4] เป็นต้น

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ ที่ต่อกันด้วยพันธะมากกว่า 2,000 โมเลกุล เซลลูโลสเป็นโครงสร้างหลักที่สำคัญของผนังเซลล์พืช โดยเซลลูโลสมักจะอยู่รวมกับเฮมิเซลลูโลส และเพกทิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในพืช ในปัจจุบันมีผู้ให้ความสำคัญทำการศึกษาเซลลูโลสอย่างแพร่หลายทำให้พบข้อดีของเซลลูโลสคือมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเสริมแรงที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์ เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับชิ้นงาน และมีคุณสมบัติช่วยลดการขยายตัวทางความร้อนให้กับชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เซลลูโลสได้รับความนิยมนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมโพสิต [5], [10]

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศแห่งการเกษตรกรรมของโลก โดยในแต่ละปีประเทศไทยมีพื้นที่ใช้ในการเพาะปลูกพืชชนิดต่างๆ อาทิเช่น มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน ข้าวโพด เป็นต้น ดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 พื้นที่ในการเพาะปลูกพืชชนิดต่าง ๆ ในไทย [12], [13]

ชนิดของพืช	ปริมาณพื้นที่ (ไร่)
มะพร้าว	1,299,799
ปาล์มน้ำมัน	4,515,678
ข้าวโพด	7,164,585
สับปะรด	459,555
ถั่วเหลือง	217,171

มะพร้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทยซึ่งมีพื้นที่ในการเพาะปลูกทุกภาคของประเทศไทย เช่น ภาคใต้ ได้แก่จังหวัด สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช ชุมพร กระบี่ และตรัง ภาคกลาง ได้แก่จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ สมุทรสงคราม นครปฐม เพชรบุรี ราชบุรี และสมุทรสาคร ภาคตะวันออก ได้แก่จังหวัด ชลบุรี ระยอง ตราด จันทบุรี และฉะเชิงเทรา การเพาะปลูกมะพร้าวมีความสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมอย่างมาก ในด้านการผลิตภัณฑ์แปรรูปเพื่อการบริโภค เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน มะพร้าวอุตสาหกรรมมะพร้าวแห้ง อุตสาหกรรมน้ำตาลมะพร้าว อุตสาหกรรมกะทิเข้มข้น เป็นต้น ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จะใช้วัตถุดิบหลักคือน้ำมันมะพร้าวและน้ำมะพร้าวในการผลิต ซึ่งเป็นเศษที่เหลือจากการผลิต ยกตัวอย่าง เช่น กะลามะพร้าว และกากมะพร้าว ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบคิดเป็นร้อยละ 35 ปริมาณเฮลมิเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 25.8 และลิกนินคิดเป็นร้อยละ 15 ของน้ำหนัก [11] จะถูกนำไปแปรรูปใช้งานในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมเส้นใยกาบมะพร้าว อุตสาหกรรมเพาะชำ อุตสาหกรรมเผาถ่าน นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีการเพาะปลูกพืชชนิดอื่น ๆ แต่จากข้อมูลในอดีตพบว่า ปาล์มน้ำมัน

มะพร้าว ข้าวโพด ได้รับความนิยมปลูกแพร่หลายในประเทศไทยเป็นจำนวนมากและมีการเติบโตของพื้นที่การเพาะปลูกที่สูงขึ้นมากในปัจจุบัน [14]



รูปที่ 1.1 กาบมะพร้าว

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจอันดับต้นๆของไทย ซึ่งพบว่าในปัจจุบันปาล์มน้ำมันในประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 4 ล้านไร่ โดยเฉพาะในภาคตะวันออกและภาคใต้ของประเทศ [13] ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง แต่ไม่เพียงพอต่อความต้องการในปัจจุบันและมีแนวโน้มความต้องการที่เพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้น้ำมันจากปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 70 ต่อปี หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตจะได้น้ำมันปาล์มและกากทะเลา ปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมาก [14] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งเศษจากกากทะเลาปาล์มน้ำมันที่ได้จากกระบวนการผลิตมีส่วนประกอบของเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 33 ปริมาณเฮลมิเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 20.5 และลิกนินคิดเป็นร้อยละ 15.1 ของน้ำหนัก [11], [14]



รูปที่ 1.2 กากทะเลาปาล์มน้ำมัน

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของไทยซึ่งสร้างรายได้ให้กับประเทศ คิดเป็นมูลค่าประมาณปีละ 10,000 ล้านบาท โดยประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดประมาณ 7 - 8 ล้านไร่ ส่งผลให้ได้ผลผลิตทางการเกษตรประมาณปีละ 4 - 5 ล้านตัน และมีสัดส่วนเป็น 65% ของผลผลิตที่ใช้บริโภคภายในประเทศในรูปแบบที่เป็นวัตถุดิบให้แก่ โรงงานอาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ส่วนที่เหลือส่งออกในรูปแบบของข้าวโพดดิบ ข้าวโพดบด และแป้งข้าวโพด โดยคิดเป็นมูลค่าประมาณ 5,000 - 6,000 ล้านบาท [12] จึงทำให้เกิดการเพาะปลูกข้าวโพดได้รับความนิยมสูงในประเทศจึงทำการขยายตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยแหล่งเพาะปลูกข้าวโพดที่สำคัญตั้งอยู่ในภาคเหนือซึ่งมีพื้นที่ปลูกมากกว่าครึ่งของประเทศและมีกระจายอยู่ในทุกภาคของประเทศ ซึ่งจังหวัดที่นิยมในการเพาะปลูกข้าวโพด ได้แก่ เพชรบูรณ์ นครราชสีมา เลย ลพบุรีและนครสวรรค์ นอกเหนือจากการบริโภคแล้ว ข้าวโพดยังถูกใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์ จึงทำให้พื้นที่เพาะปลูกจะเพิ่มขึ้นเกือบทุกปี และหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตของข้าวโพดจะเหลือซึ่งข้าวโพดดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งซึ่งข้าวโพดจะมีปริมาณเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 39 ปริมาณเฮลมิเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 22.9 และลิกนินคิดเป็นร้อยละ 17.8 ของน้ำหนัก [11] เนื่องจากพืชเศรษฐกิจเหล่านี้เป็นพืชที่สร้างรายได้ให้ประเทศอย่างมหาศาล และยังเป็นที่ต้องการเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 1.3 ซึ่งข้าวโพด

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมบัติของไม้ผสมพลาสติก ด้านสมบัติการหน่วงไฟ สมบัติการขยายตัวทางความร้อน โดยมีการนำพลาสติกผสมกับเส้นใยเหลือใช้จากธรรมชาติ จากกากมะพร้าว กากทะลายปาล์มน้ำมัน และซึ่งข้าวโพด โดยมีการใช้สารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มสมบัติด้านการหน่วงไฟ สมบัติการขยายตัวทางความร้อนให้กับไม้พลาสติก และเป็นการส่งเสริมการใช้งานจากวัสดุเหลือใช้ในธรรมชาติให้เกิดการใช้งานที่หลากหลายและลดต้นทุนทางด้านการผลิตเนื่องมาจากการใช้สารเคมีเป็นส่วนผสม โดยการดำเนินงานวิจัยนี้เพื่อหาอัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ

(กาบมะพร้าว กากทะเลลายปาล์มน้ำมัน ชั่งข้าวโพด) พลาสติก (พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล) และสารเติมแต่งอื่น ๆ เพื่อทำการทดสอบสมบัติของวัสดุโดยเปรียบเทียบกับสมบัติของพลาสติกที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ที่มีความเหมาะสมพร้อมนำไปใช้ได้จริงในด้านอุตสาหกรรม

1.2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การตรวจสอบสำรวจเอกสารที่ผ่านมาในอดีตจนถึงปัจจุบันมีการผสมวัตถุดิบระหว่างไม้ และพลาสติกเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและเป็นที่สนใจอย่างมาก ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลายเช่น อุตสาหกรรมงานก่อสร้าง [5] อุตสาหกรรมรถยนต์ [2], [3] ในปัจจุบันได้มีหลายประเทศพัฒนารูปแบบและกระบวนการผลิต ของไม้ผสมพลาสติกเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพที่ดี เช่น เยอรมัน อเมริกา มาเลเซีย ญี่ปุ่น และจีน [3], [4] ซึ่งกระบวนการเริ่มต้นโดยการนำพลาสติกผสมกับผงไม้ จากนั้นทำการขึ้นรูปไม้ผสมพลาสติก ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปไม้ผสมพลาสติกนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอัดรีด (Extrusion) การอัดร้อน (Hot press) และการฉีด (Injection) เป็นต้น ไม้ผสมพลาสติกสามารถใช้งานได้หลายลักษณะงาน เช่น งานด้านโครงสร้าง งานรับน้ำหนัก งานเสริมความแข็งแรง และงานตกแต่งอาคารสถานที่ ดังนั้น ไม้ผสมพลาสติก จึงต้องมีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อแรงเสียดทาน ทนต่อการสึกหรอ ทนต่อสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติทางด้านเคมี [2], [3], [5] เป็นต้น มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.2.1 ประเภทผสมของวัสดุผสม

จากงานวิจัยในอดีตจะพบว่าได้มีการศึกษาอัตราส่วนในการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPCs) โดยผสมวัสดุที่มีในอัตราส่วนพลาสติกไม่ต่ำกว่า 30% โดยน้ำหนักหรือมีการปรับปรุงตามสูตรที่ต้องการแต่จะไม่มีการใช้พลาสติกน้อยกว่า 30% เพราะจะทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้หรือเมื่อขึ้นรูปขึ้นงานออกมาจะทำให้ชิ้นงานเปราะ หักได้ง่าย และเสียสมบัติความยืดหยุ่น [24] กระบวนการผลิตไม้ผสมพลาสติกคอมโพสิต ประกอบด้วยวัสดุ 3 ประเภท คือ (1) พอลิเมอร์ เช่น พลาสติก (2) วัสดุเสริมแรง เช่น ผงไม้หรือเส้นใยธรรมชาติ และ (3) สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

โดยในปัจจุบันวัสดุที่ทำมาจากพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างมาก ที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นกว่าในอดีต เนื่องจากสามารถทดแทนทรัพยากรธรรมชาติได้ เช่น ไม้ เพราะพลาสติกมีราคาถูก มีน้ำหนักเบาและมีลักษณะการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และเหมาะแก่การใช้งานทุกประเภท [28] นอกจากนี้พลาสติกนั้นยังสามารถผลิตให้ให้มีสมบัติต่าง ๆ แตกต่างกับไม้ที่เกิดขึ้นเองทางธรรมชาติจึงไม่สามารถควบคุมคุณภาพของวัสดุรูปร่างได้ตามที่ต้องการ โดยการผลิตพลาสติกขึ้นกับการเลือกใช้วัตถุดิบ สารเคมี กระบวนการผลิต

และกรรมวิธีในการขึ้นรูปต่าง ๆ ตามความเหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่าย โดยการเติมสารเติมแต่ง เช่น สารคงสภาพ สารเสริมความแข็งแรง และผงสี เป็นต้น [17], [29] โดยทั่วไปพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ เทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ซึ่งพลาสติกที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรม คือ พอลิโพรพิลีน ซึ่งเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกมีคุณสมบัติ คือ ทนความร้อนสูง ต้านทานความร้อน ต้านทานการดูดซับน้ำ มีสมบัติการยืดหยุ่นที่ดี ทนต่อแรงดึง และทนต่อแรงกระแทก [9] สามารถนำไปขึ้นรูปและใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ได้ เช่น บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ และชิ้นส่วนรถยนต์ และที่สำคัญพอลิโพรพิลีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ[10]

วัสดุเสริมแรงที่นำมาใช้ในการผสมกับพลาสติก คือ เส้นใยจากไม้ธรรมชาติเพราะจากงานวิจัยที่ผ่านมาไม้จะมีองค์ประกอบหลักเป็นสารทางเคมีที่สำคัญ 2 อย่างคือ เซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติที่ดีในการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ และเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในธรรมชาติ เช่น มีการใช้ผงไม้จากต้นยางพาราเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับวัสดุ มีการใช้เส้นใยป่านครนารายณ์ในการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลสมบัติด้านการติดไฟ มีการใช้เส้นใยจากปาล์มน้ำมันและเส้นใยจากอ้อยเพื่อความยืดหยุ่นให้ขึ้นงาน [5], [18] ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันเป็นอันดับต้นๆ ของเอเชีย โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำส่วนต่าง ๆ ของปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย เช่น นำเส้นใยจากใบเป็นสารเสริมความแข็งแรง มีการนำขี้เถ้าที่เหลือใช้จากการเผาไหม้ในอุตสาหกรรมมาเสริมความแข็งแรงให้คอนกรีตทำถนน และมีการประยุกต์ใช้ส่วนต่างของปาล์มน้ำมันตามความเหมาะสมตามการใช้งาน [30] โดยเส้นใยปาล์มมีองค์ประกอบที่สำคัญซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) ร้อยละ 65 ลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 19 และอื่น ๆ เนื่องจากปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติสร้างความแข็งแรงจึงทำให้เส้นใยปาล์มน้ำมันมีสมบัติในการเสริมความแข็งแรงที่ดี มีความยืดหยุ่นที่ดี ทนต่อการตัดและการงอ จึงได้รับความนิยมมากนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงมากในปัจจุบัน

สารเติมแต่งที่ถูกรวมเข้าไปในวัสดุผสมพลาสติกและไม้ ด้วยปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณพลาสติกและไม้ เพื่อเป็นการปรับเปลี่ยนสมบัติให้เหมาะสมในการผลิตและการใช้งานของวัสดุผสม โดยปกติสารเติมแต่งนี้จะเข้าไปกระจายอยู่ในเนื้อของวัสดุผสมโดยทางกายภาพและไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญของวัสดุผสม [30] ซึ่งสารเติมแต่งจะมีลักษณะเฉพาะที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุผสม ทำให้วัสดุมีการไหลตัวที่ดี มีการยึดเกาะที่ดี มีการต้านทานความร้อน มีน้ำหนักเบา มีการย่อยสลายทางชีวภาพ [7] เนื่องจากในปัจจุบันวัสดุผสมพลาสติกและไม้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นงานโครงสร้าง งานรับน้ำหนัก และงานที่ทนต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการเพื่อให้ได้วัสดุผสมมีความเหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภท ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา มีสารเติมแต่งบางประเภทเมื่อเติม

เข้าไปในวัสดุผสมพลาสติกในอัตราส่วนไม่เกิน 1% โดยน้ำหนัก ทำให้มีผลต่อสมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ และการคืบของวัสดุผสม เช่น สมบัติการหน่วงไฟมีการวิจัยโดยการเติมแอมโมเนียมโพลีฟอสเฟต ผสมซิงค์บอเรท และอลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ซึ่งส่งผลด้านการหน่วงไฟได้ดีขึ้น โดยทำให้เวลาหน่วงการติดไฟช้าลง [8], [12] การเติมสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต และจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการผสมพลาสติกกับสารเสริมแรงจะมีการนิยมใช้สารประเภทกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในอัตราส่วนไม่เกิน 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งสารตัวนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านการยึดเกาะระหว่างสารเสริมแรงกับพลาสติกทำให้พลาสติกผสมสารเสริมแรงเข้ากันได้ดีจึงทำให้สมบัติเชิงกลและกายภาพดีขึ้น [31]

1.2.2 กรรมวิธีในการผลิตขึ้นรูป

การผลิตไม้ผสมพลาสติกเป็นการนำเม็ดพลาสติกมาอัดผ่านความร้อนผสมกับไม้เข้าไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแล้วนำไปขึ้นรูปโดยมีวิธีการหลากหลาย แต่จากการสำรวจพบว่ามีวิธีการขึ้นรูปของไม้ผสมพลาสติกที่เป็นที่นิยมอยู่หลักๆอยู่ 3 กระบวนการได้แก่

การฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) [5], [24], [32] เป็นการฉีดเข้าไปในแบบเป็นวิธีการที่สำคัญที่นิยมใช้ผลิตจำพวกเทอร์โมพลาสติก โดยกระบวนการขึ้นรูปจะใช้การขึ้นรูปด้วยสกรูเดี่ยวเป็นตัวนำพลาสติกผ่านความร้อน ให้พลาสติกหลอมเหลวแล้วฉีดเข้าไปในแบบพิมพ์ ซึ่งข้อดีของกระบวนการผลิตนี้ คือ สามารถนำพลาสติกที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวส่งเข้าไปในแบบพิมพ์ได้ในปริมาณมาก

กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) [15], [24] กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอีกวิธีหนึ่ง สำหรับใช้กับเทอร์โมพลาสติก โดยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้ผลิตวัสดุพวกท่อ แท่ง หรือแผ่นพลาสติกเป็นหลัก โดยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป นั้นสามารถใช้ได้กับวัสดุหลากหลาย สามารถใช้ในการผสมพลาสติกให้ออกมามีรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น ทำเม็ดผสม แผ่นพลาสติกผสม

กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) [26] กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งเช่นกัน สำหรับอุตสาหกรรมใช้กันมากในประเภทของเทอร์โมเซต กระบวนการนี้โดยมากใช้ผลิตพวกภาชนะหรือถังที่มีขนาดใหญ่ เพื่อใช้บรรจุสารเคมีและผลิตภัณฑ์สามารถใช้งานได้ในที่ที่อุณหภูมิสูงกว่าเทอร์โมพลาสติก โดยในกระบวนการอัดจะใช้แรงดัน อุณหภูมิในการกดและการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นรูปต่าง ๆ ตามความต้องการของผู้ผลิต แต่วิธีการที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับแรกในการทดลองคือกระบวนการอัดรีด โดยจะนิยมใช้เครื่องกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวคู่เพราะเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ [15] จะมีเกลียวช่วยในการผสมทำให้วัสดุสามารถผสมเข้ากันด้วยดี ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดการกระจุกของวัสดุ และก่อให้เกิดการกระจายของวัสดุได้อย่างทั่วถึง

1.2.3 การทดสอบสมบัติ

เนื่องจากไม้ผสมพลาสติก มีส่วนประกอบหลักคือพลาสติกและไม้ ดังนั้นเมื่อมีการใช้งานในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ในด้านความเสถียรของไม้ผสมพลาสติก เมื่อทำการนำไม้ผสมพลาสติกไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขสถานที่โล่งแจ้งหรือสถานที่ที่มีความชื้นทำให้มีข้อจำกัดของไม้ผสมพลาสติกต่อการประยุกต์ใช้งาน และเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อไม้ผสมพลาสติก คือ อุณหภูมิ ความชื้น และแสงอาทิตย์ ส่งผลให้ไม้ผสมพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี หรือนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรม งานก่อสร้าง งานรับแรงส่งผลให้ไม้ผสมพลาสติก มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์จึงต้องมีการทดสอบไม้ผสมพลาสติกเพื่อจุดที่เหมาะสมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ซึ่งจากผลสำรวจจากงานวิจัยจะมีการทดสอบอยู่ 3 ด้านหลัก คือ 1. การทดสอบสมบัติทางความร้อนเป็นการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและพลังงาน โดยทดสอบการถ่ายเทอุณหภูมิหรือพลังงานไปยังบริเวณที่ต่างกันเพื่อทดสอบการต้านทานทางความร้อนของวัสดุ หรือเป็นการวัดความจุความร้อน นอกเหนือจากการต้านทานทางความร้อนของวัสดุ การขยายตัวทางความร้อน และการนำความร้อนยังเป็นสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุ เมื่อนำไปใช้งาน [5], [12] 2. สมบัติเชิงวิโคอีลาสติกของวัสดุพอลิเมอร์ โดยเป็นการทดสอบการยืดหยุ่นที่อุณหภูมิปานกลาง โดยดูการเปลี่ยนสภาพของการยึดของผลิตภัณฑ์ เพื่อศึกษาถึงการเสีรูปร่างหรือการเกิดเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางกลของวัสดุที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เช่นการทดสอบการคืบแบบยืดหยุ่นชนิด การทดสอบการคลายตัวแบบยืดหยุ่นชนิด [5] 3. การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุ สามารถทนต่อแรงต้านทานแรงเชิงกลที่เกิดจากภายนอก ได้มากน้อยเท่าไรเพียงใด เช่น การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงดัดงอ การทดสอบความแข็ง [4-5] จากการศึกษางานวิจัยของวัสดุผสมพลาสติกและไม้ เช่น การคืบ (Creep) และการคลายความเค้น (Stress Relaxation) ของวัสดุผสมเทอร์โมพลาสติกและสารเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ เช่น กัญชง ไม้ยาง ไยมะพร้าว ใผ่ เป็นต้น เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการคืบ การคลายความเค้น โดยขึ้นอยู่กับเวลา และอุณหภูมิ [1], [5], [9], [33], [34]

การตรวจสอบเอกสารที่ผ่านมาในอดีตจนถึงปัจจุบันมีพบว่าไม้ผสมพลาสติกนั้น เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องมาจากไม้พลาสติกสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในงานที่หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมงานก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ [1-2] ในปัจจุบันได้มีหลายประเทศพัฒนารูปแบบและกระบวนการผลิต ของไม้ผสมพลาสติกเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพที่ดี เช่น เยอรมัน อเมริกา มาเลเซีย ญี่ปุ่น และจีน [2-3] ซึ่งกระบวนการผลิตเริ่มต้นโดยการนำพลาสติกผสมกับผงไม้ จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยในกระบวนการขึ้นรูปไม้ผสมพลาสติก สามารถทำหลายวิธี เช่น การอัดรีด (Extrusion) การอัดร้อน (Hot Press) และการฉีด (injection) เป็นต้น ไม้ผสมพลาสติก

สามารถใช้งานได้หลายลักษณะงาน เช่น งานด้านโครงสร้าง งานรับน้ำหนัก งานเสริมความแข็งแรง และงานตกแต่งอาคารสถานที่ ดังนั้น ไม้ผสมพลาสติก จึงต้องมีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อแรงเสียดทาน ทนต่อการสึกหรอ ทนต่อสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติทางด้านเคมี [1], [2], [4] เป็นต้น

1.2.4 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตรของไม้พลาสติก

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ [39] ได้ผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีกับซีลีโอไม โดยใช้พีวีซีเรซินปริมาณ 100 phr ซีลีโอไมปริมาณ 40 - 70 phr สารเพิ่มความเหนียวพีวีซีปริมาณ 3 - 5 phr สารเพิ่มความเสถียรทางความร้อนปริมาณ 3.4 - 3.8 phr สารหล่อลื่น 0.4-0.8 phr แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 10 - 14 phr แคลเซียมสเตียเรตปริมาณ 0.4 - 0.8 phr และสารช่วยผลิตปริมาณ 3 - 6 phr ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดร้อน

หทัยกร สัตตบงกช [40] ใช้เศษไม้หรือเส้นใยไม้ที่เป็นเศษวัสดุมาจากภาคอุตสาหกรรมไม้ในประเทศไทย โดยที่เส้นใยมีขนาดความยาวอยู่ในช่วง 1.27 - 0.425 มิลลิเมตร (20 - 60 Mesh) ในอัตราส่วนระหว่างร้อยละ 50 - 80 โดยน้ำหนักทั้งหมด มาผสมเข้ากับโพลีโอเลฟิน ประเภทโพลีเอธิลีนอยู่ในสัดส่วนระหว่างร้อยละ 3 - 39 โดยน้ำหนักทั้งหมด นอกจากนี้ในส่วนผสมที่เหลือร้อยละ 11 จะผสมเข้ากับสารหล่อลื่น สารเคมี และสารเสริมแรง เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพให้กับชิ้นงาน

W. D. Yang et al. [41] ได้ประดิษฐ์วัสดุผสมวัสดุเทอร์โมพลาสติกร่วมกับเสริมแรงด้วยเซลลูโลสและสารเพิ่มการยึดเกาะ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการการยึดเกาะระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเซลลูโลส ซึ่งมีอัตราส่วนในการผสม คือเทอร์โมพลาสติกปริมาณร้อยละ 20 - 95 โดยน้ำหนัก เซลลูโลสปริมาณร้อยละ 5 - 80 โดยน้ำหนัก และสารเพิ่มการยึดเกาะปริมาณร้อยละ 0.1 - 20 โดยน้ำหนัก

K. P. Gohr et al. [42] ได้ประดิษฐ์ไม้พลาสติกจากเม็ดพลาสติกผสมผงไม้ ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ และผ่านกระบวนการควบคุมความชื้นในขั้นตอนอัดรีด โดยขั้นตอนผลิต เริ่มจากใส่พอลิเมอร์ลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นพอลิเมอร์จะถูกลำเลียงตามบาเรล แล้วนำเส้นผงไม้ตามลงไป ซึ่งในช่วงนี้จะต้องทำการระบายอากาศออก จนกระทั่งพอลิเมอร์ได้ผสมเข้ากับผงไม้ แล้วหลอมเหลวถูกอัดออกมา แล้วทำการตัดเม็ดและเคลือบด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตและทัลค์

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อหาอัตราส่วนผสมและสร้างวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยที่เหลือใช้จากธรรมชาติที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

1.3.2 เปรียบเทียบวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยที่เหลือใช้จากธรรมชาติที่มีสมบัติที่ดีที่สุดที่มีผลต่อการหน่วงของการติดไฟและลดการขยายตัวทางด้านความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

1) ช่วยลดมลภาวะที่เกิดขึ้นจากพลาสติก เช่น มลภาวะที่เกิดจากการเผาไหม้พลาสติก และมลภาวะที่เกิดจากเศษที่เหลือของไม้ปาล์ม

2) สามารถย่อยสลายได้โดยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น ในส่วนของพลาสติกสามารถนำมาย่อยสลายผ่านกระบวนการขึ้นรูปเพื่อนำกลับไปใช้งานใหม่ได้

1.4.2 ด้านเศรษฐกิจและสังคม

เป็นการส่งเสริมในการนำวัสดุที่เหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์ เช่น การนำพลาสติกรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่ และปรับปรุงเพื่อเพิ่มมูลค่าให้ชิ้นงาน

1.4.3 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์

1) ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา สามารถใช้งานได้ในสถานะที่ทนต่อความร้อน ซึ่งผลิตมาจากวัสดุผสมที่มีส่วนผสมเส้นใยที่เหลือใช้จากธรรมชาติ ทำให้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่ของผู้บริโภค

2) ได้วัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีความสามารถในการหน่วงไฟและลดการขยายตัวทางด้านความร้อนมากกว่าวัสดุคอมโพสิตชนิดอื่น

3) ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถที่ดีกว่าในท้องตลาดและราคาต้นทุนที่ถูกกว่าชิ้นงานที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 คัดเลือกเศษเหลือใช้จากวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติ

1) เส้นใยกาบมะพร้าวที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม

2) เส้นใยกากทะเลปาล์มน้ำมันที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม

3) ซังข้าวโพดที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม สายพันธุ์ข้าวโพดหวาน

1.5.2 ผลิตเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติที่มีขนาดในการลอดผ่านตะแกรง 60 Mesh

1.5.3 ช่วงของการผสมที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย พลาสติกร้อยละ 50, 60, 70 เส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติร้อยละ 25, 26, 27, 28, 35, 36, 37, 38, 45, 46, 47 และ 48 สารเติมแต่งร้อยละ 1 - 4 และสารหล่อลื่นร้อยละ 1

1.5.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ที่ใช้การขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส - 190 องศาเซลเซียส และความเร็วหมุนของเกลียวคือ 40 rpm [13] โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อนที่แรงอัด 1,000 psi ที่อุณหภูมิ 190 °C

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

วัสดุทางวิศวกรรมคือ วัสดุพวกของแข็ง ก๊าซ ของเหลว โลหะ อโลหะ สารอินทรีย์ และอนินทรีย์ ซึ่งสามารถจำแนกออกมาได้ 3 ประเภท คือ ประเภทโลหะ ประเภทเซรามิก และพอลิเมอร์ โดยวัสดุประเภทพอลิเมอร์และวัสดุประเภทโลหะนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ วัสดุชีวภาพ วัสดุคอมโพสิต และวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการสร้างผลิตภัณฑ์จากวัสดุคอมโพสิตระหว่าง เส้นใยวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ กับพลาสติกกรีไซเคิล

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composites)

วัสดุคอมโพสิต [13] เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และในปัจจุบันมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุคอมโพสิตมากกว่า 10 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้งานเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 - 10 ในแต่ละปี โดยวัสดุคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรมที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้าง และรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ สมบัติที่เด่นที่สุด คือมีความแข็งแรงสูง และมีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงที่โดดเด่นในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เมื่อใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง เช่น ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้เร็ว ประสิทธิภาพในการขนส่งมากขึ้น และช่วยให้ประหยัดพลังงาน นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่อยู่ในช่วงกว้าง เนื่องจากคอมโพสิตมีหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ ออกแบบ และสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน ทำให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตอย่างหลากหลายในการใช้งาน การใช้งานในปัจจุบันมีการเรียกวัดวัสดุคอมโพสิตหลากหลายชื่อ เช่น พลาสติกเสริมแรง พลาสติกเสริมแรงไฟเบอร์กลาส แผ่นลามิเนตเสริมแรง หรือไฟเบอร์กลาส เป็นต้น คอมโพสิต เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุอย่างน้อย 2 อย่างร่วมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง การทนต่ออุณหภูมิสูง การทนต่อการกัดกร่อน ความแข็ง การนำไฟฟ้า และวัสดุทั้ง 2 ต้องไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ซึ่งจะเป็นสารพวกพอลิเมอร์ และอีกชนิดเป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งสารเสริมแรงจะมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคที่มีขนาดเล็ก สารเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย โดยเส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ หรืออาจจะเป็นเส้นใยขนาดสั้นกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์

2.1.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตนั้นสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วนหลักๆได้ดังนี้

1) ส่วนของเมตริกซ์ (Matrix phase) [16] ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งจัดเป็นส่วนที่มีความสัมพันธ์ที่เกิดแบบต่อเนื่องกัน ซึ่งเมตริกซ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากจะเป็น วัสดุประเภท พอลิเมอร์ เซรามิกและโลหะ ซึ่งใช้เป็นส่วนที่ใช้ห่อหุ้มและยึดเกี่ยวส่วนวัสดุเสริมแรงเอาไว้เข้าด้วยกัน โดยทั่วไปส่วนของเมตริกซ์นั้นจะมีคุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความแข็งแรง และเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าสารเสริมแรง

2) วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) เป็นสารเติมแต่งที่อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากพอลิเมอร์ ช่วยทำให้สมบัติทางกลหรือทางกายภาพดีขึ้น [15] เช่น เพิ่มความต้านทานแรงดึง วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ได้แก่ ไยแก้ว ไยคาร์บอน เส้นใยธรรมชาติ หรืออนุภาค ซึ่งในปัจจุบันเส้นใยธรรมชาติสามารถหาได้ง่ายทั่วไปจากภาคอุตสาหกรรม และภาคการเกษตร เนื่องจากเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากการผลิตมีมูลค่าต่ำ แต่ในงานวิจัยกลับพบว่าเส้นใยธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ในภาคอุตสาหกรรมและทางภาคการเกษตร มีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่สูงดังตารางที่ 2.1 ตารางที่ 2.1 ปริมาณเซลลูโลสในเส้นใยธรรมชาติ [12]

ชนิด	ร้อยละเซลลูโลส
ชานอ้อย	41.26
ชังข้าวโพด	39.35
ฟางข้าว	37.70
ต้นกก	37.28
กากปาล์ม	33.08
ใบคะน้า	26.78
ใบสับปะรด	26.70
หญ้านวลจันทร์	26.48
ผักตบชวา	24.37

การเสริมแรงนั้นจะช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการยืด และเพิ่มความแข็งแรงจึงเป็นที่นิยมใช้เป็นวัสดุเสริมแรง สารเสริมแรงควรมีสมบัติดังนี้ [15]

- (1) ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- (2) ต้องเสถียร (Stable) ภายใต้สภาวะของกระบวนการผลิตต่าง ๆ
- (3) ต้องเสถียรภายใต้สภาวะของการใช้งาน
- (4) ต้องไม่เกิดการตกสี (Bleeding)

2.1.2 ชนิดของวัสดุคอมโพสิต

ชนิดของวัสดุคอมโพสิต สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่

(1) วัสดุคอมโพสิตแบบลาร์มินาร์ (Laminar Composites) ลาร์มินาร์คอมโพสิต เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการซ้อนตัวและยึดติดกันระหว่างสารเสริมแรงกับเมทริกซ์ในรูปแบบขนม้วน และนำไปอัดแน่นด้วยความดันที่สูงจนได้รูปแบบเป็นชั้น ๆ

(2) วัสดุคอมโพสิตแบบอนุภาค (Particular Composites) คอมโพสิตแบบอนุภาค เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการนำอนุภาคของสารเสริมแรงนั้นผสมลงไปในเรื่องของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างอิสระ โดยอนุภาคนั้นอาจมีขนาดที่แตกต่างกัน อาจเป็นผง หรือเป็นเม็ด ทรงกลมเล็ก ๆ หรือเป็นผลึก

(3) วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous Composites) คอมโพสิตแบบเส้นใยเป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการ นำเส้นใยของสารเสริมแรงนั้นผสมลงไปในเรื่องของเมทริกซ์ โดยเส้นใยดังกล่าวนี้ อาจเป็นเส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) หรือเส้นใยสังเคราะห์ หรือเส้นใยแก้ว (Glass Fiber)

2.2 เส้นใยธรรมชาติ

จัดเป็นสารเสริมแรงประเภทหนึ่งที่มีความนิยมใช้งานอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามธรรมชาติ เช่น ในพืช ผัก และไม้ นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาตินั้นยังมีความแข็งแรงที่สูง และมีราคาที่ถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ โดยเส้นใยธรรมชาตินั้นเกิดมาจากองค์ประกอบของสารอินทรีย์หลายตัวรวมกันจึงทำให้เส้นใยธรรมชาตินั้นได้รับความนิยมนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงอย่างแพร่หลาย เช่น เป็นสารเสริมแรงให้กับพลาสติก เพื่อช่วยในการเสริมความแข็งแรงและเป็นการลดต้นทุนที่ใช้ในการผลิต และง่ายต่อการปรับปรุงคุณสมบัติ โดยเส้นใยธรรมชาตินั้นจะมีองค์ประกอบหลักเป็น เซลลูโลส เฮลมิเซลลูโลส และลิกนิน ยกตัวอย่างเช่น ชานอ้อย ช้างข้าวโพด ฟางข้าว ต้นกก กาบมะพร้าว กัล้วย กากทะเลลายปาล์ม น้ำมัน ผักตบชวา [12] โดยในเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดนั้นจะมีปริมาณเซลลูโลส เฮลมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุธรรมชาติ

2.2.1 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

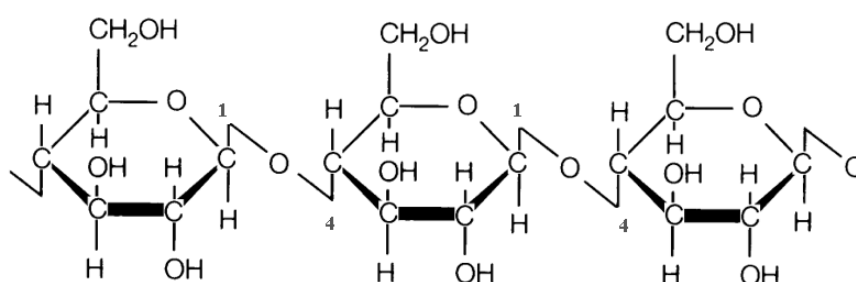
1) โครงสร้างทางกายภาพ โครงสร้างทางกายภาพหรือโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเส้นใยสามารถศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์ ที่มีกำลังขยาย 250 - 1500 เท่า ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพนั้น จะรวมไปถึงรูปร่างของเส้นใย ความยาว ความสั้นของเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลาง รูปร่างตัดขวาง ผิวสัมผัส และรูภายในเส้นใย

2) การเรียงตัวของโมเลกุลเส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมาก โมเลกุลเหล่านี้มาจับตัวกันเรียงตัวมีลักษณะเป็นเส้นโซยาว เรียกว่า พอลิเมอร์ (Polymer) โดยมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีที่เรียกว่า พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งขนาดของพอลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของพันธะที่ต่อกัน ยิ่งมีโมเลกุลมาต่อกันมาเท่าไรความยาวของพอลิเมอร์จะยาวขึ้นเท่านั้น สำหรับความแข็งแรงของโซ่พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในโมเลกุล ซึ่งจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการเรียงตัวของโมเลกุล แต่หากเมื่อแต่ละโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไร้ทิศทาง (Random) จะทำให้โซ่บริเวณนั้นมีความอิสระจะเรียกว่าอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนบริเวณที่โมเลกุลเรียงตัวซ้อนกันแบบขนานมีระเบียบจะเรียกผลึก (Crystalline) ซึ่งหากพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกที่สูง จะมีความแข็งแรงที่มากกว่า พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกที่ต่ำ ดังนั้นหากมีการจัดเรียงตัวโมเลกุลของพอลิเมอร์ในทิศทางกับแกนตามยาวของเส้นใยจะทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น

2.2.2 องค์ประกอบเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาตินั้นจะมีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ เซลลูโลส เฮลมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) เซลลูโลส (Cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นโซยาว พบมากในพืชทำหน้าที่เสริมโครงสร้างของลำต้น เพื่อให้ความแข็งแรง เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์พืชและพบว่าสารในโลกล้นมากกว่าครึ่งหนึ่งมีส่วนของเซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากมีโมเลกุลใหญ่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,250 - 10,000 โมเลกุล [18] พบมากสุดในพืชโดยภายในจะมีการต่อกันของพันธะเป็นพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากที่สุดมีความเป็นผลึกสูง และทนต่อความร้อนได้ดี จึงทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงมากซึ่งเซลลูโลสส่วนมากจะพบที่ผนังเซลล์พืช โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



cellulose (เซลลูโลส)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างพันธะของเซลลูโลส [18]

2) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) เป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลากหลาย

ชนิด ชนิดแรกได้แก่น้ำตาลไซโลส (Xylose) ที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างพันธะด้วยไกลโคไซด์ (Glycosidic Bond) ที่จุดปีตา (1 - 4) เป็นโซ่หลัก ซึ่งระหว่างต่อพันธะอาจมีน้ำตาลกาแล็กโทส (Galactose) แมนโนส (Mannose) หรือกลูโคส (Glucose) มาต่อรวมเข้าด้วยกัน นอกจากนี้อาจมีโซ่แขนงที่แยกออกมาจากต่อของน้ำตาลชนิดอื่นได้แก่ น้ำตาลอะราบินอส (Arabinose) เป็นต้น เฮมิเซลลูโลส จัดเป็นเส้นใยอาหารจึงมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้เฮมิเซลลูโลสนั้นสามารถละลายได้ในสารละลายต่างเจือจาง [18] และสัตว์กินพืช แต่ไม่สามารถย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในระบบของมนุษย์ เฮมิเซลลูโลสมีสมบัติทางกายภาพที่สำคัญหลายอย่าง เช่น มีความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Holding Capacity) การแลกเปลี่ยนประจุบวกของไอออน โดยพบมากในแกลบ และ ชังข้าวโพด

3) ลิกนิน (Lignin) เป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทใยอาหาร เช่นเดียวกับเฮมิเซลลูโลส โดยโครงสร้างโมเลกุลของลิกนินเป็นโครงสร้างแบบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ โดยลิกนินนั้นจะไม่สลายตัวในกรด ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช โดยพบมาในส่วนชั้นของผนังเซลล์ จึงทำให้ผนังเซลล์พืชนั้นแข็งแรง นอกจากนี้ลิกนินนั้นยังอยู่ร่วมกับเซลลูโลส (Cellulose) และ เฮมิเซลลูโลส จึงทำให้เพื่อนั้นแข็งแรงอย่างมาก หากพบในส่วนลำต้น จะช่วยให้พืชสามารถตั้งตัวขนานกับแนวแกนได้ นอกจากนี้เมื่อพืชมีอายุเพิ่มขึ้น ปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นตามอายุ

2.3 มะพร้าว (Coconut wood)

พฤกษศาสตร์ทั่วไป

วงศ์ (Family): Palmae หรือ Recaceae

จีนัส (Genus): Cocos

สปีชีส์ (Species): C. nucifera

ชื่อสามัญ (Common Name): Coconut

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific Name): *Cocos Nucifera Linn.*

มะพร้าว (Coconut) เป็นพืชยืนต้นใบเลี้ยงเดี่ยว โดยปกติมะพร้าวที่โตเต็มวัยจะมีความสูงอยู่ในช่วง 20 – 30 เมตร เปลือกนอกจะมีสีเทา นอกจากนี้มะพร้าวยังถูกจัดอยู่ในตระกูลเดียวกับปาล์ม น้ำมัน ใบของมะพร้าวนั้นจะอยู่ในรูปแบบของขนนกแบบกระจาย รูปพัดจิ้น มีความยาวขั้นต่ำประมาณ 0.8 – 1.2 เมตร มีความกว้างในช่วง 3 - 3.5 เซนติเมตร ในหนึ่งปีมะพร้าวจะงอกใบออกมาได้ประมาณ 12 - 14 ใบ นอกจากนี้มะพร้าวยังมีดอกเป็นแบบช่อแขนง ตามร่องใบ ซึ่งในหนึ่งช่อจะประกอบไปด้วยดอกตัวผู้ และตัวเมีย โดยตัวผู้จะอยู่ที่ปลายสุดของช่อ ดอกตัวเมียจะอยู่ที่โคนช่อ

ปกติดอกของมะพร้าว นั้นจะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งประกอบไปด้วยกลีบ 4 - 6 กลีบ ลักษณะเป็นสีครีม สำหรับผลมะพร้าวจะมีลักษณะเป็นผลแบบไฟบรัส ดรูป (Fibrous Drupe) ที่มีรูปร่างกลมรี มีเปลือก 3 ชั้น คือเปลือกชั้นนอก (Exocarp) ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียวแข็ง ชั้นกลาง (Mesocarp) จะมีลักษณะเป็นเส้นใยนุ่มเรียบกาบมะพร้าว เปลือกชั้นใน (Endocarp) เป็นชั้นที่อยู่ลึกที่สุดที่ถูกห่อหุ้มไปด้วยกาบมะพร้าว เมื่อแก่ตัวจะมีลักษณะแข็ง เรียก กะลา (Husk or Shell) ภายในกะลามะพร้าวจะประกอบไปด้วยส่วนหลัก คือ เนื้อมะพร้าว (Endosperm) และน้ำ ซึ่งเนื้อมะพร้าวจะมีลักษณะที่เป็นสีขาวมีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1 - 2 เซนติเมตร

2.4 ไม้ปาล์ม (Oil palm wood)

พฤกษศาสตร์ทั่วไป

วงศ์ (Family): Palmae หรือ Recaceae

จีนัส (Genus): Elaeis

สปีชีส์ (Species): guineensis

ชื่อสามัญ (Common Name): oil palm

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific Name): *Elaeis Guineensis Jacq.*

ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm) นั้นจัดเป็นพืชใบตระกูลพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในตระกูลปาล์ม (Palmae) เช่นเดียวกับ ตาล และมะพร้าว ซึ่งปาล์มน้ำมันนั้นเป็นพืชที่นิยมปลูกอย่างมากในประเทศไทย เพื่อใช้ในการสกัดน้ำมัน โดยน้ำมันของปาล์มน้ำมันนั้นจะถูกสกัดมาจากส่วนของผลที่อยู่ข้างในเปลือก (Mesocarp) และถูกสกัดมาจากแกนเนื้อใน (Kernel) ซึ่งพบว่าในปัจจุบันปาล์มน้ำมันในประเทศไทย มีพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 4 ล้านไร่ โดยเฉพาะในภาคตะวันออกและภาคใต้ของประเทศ [13] โดยในภาคใต้ของประเทศได้ทำการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันสูงถึง 3 ล้านไร่ โดยปาล์มน้ำมันนั้นได้รับความนิยมปลูกอย่างมากในจังหวัดกระบี่ ชุมพร สุราษฎร์ธานี สตูล และตรัง ซึ่งเป็นพื้นที่ ๆ เหมาะสมในการปลูกปาล์มน้ำมัน เนื่องจากภูมิศาสตร์ที่ที่ฝนตกหนักและสม่ำเสมอในตลอดทั้งปี มีความชื้นในอากาศปริมาณสูง จึงทำให้เป็นสถานที่เหมาะสมในการปลูก นั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้ภาคใต้ของประเทศเป็นบริเวณที่มีการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดมากกว่าภาคอื่น ๆ ของประเทศ โดยในจังหวัดกระบี่นั้นมีการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันในจำนวนที่มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 39.40 รองลงมาเป็นจังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดชุมพร และอื่น ๆ คิดเป็น 29.70 15.89 และ 15.01 ตามลำดับของพื้นที่เพาะปลูกในประเทศไทย ปาล์มน้ำมันหลังจากเพาะปลูกผ่านไป 3 ปีแล้วก็สามารถให้ผลผลิตไปจนถึงอายุ 25 ปีแล้วต้องโค่นเพื่อทำการเพาะปลูกใหม่ โดยผลผลิตของปาล์มน้ำมันส่วนมากจะถูกใช้ไปในทางอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งในปัจจุบันความต้องการของปริมาณน้ำมันปาล์มนั้นได้เพิ่มสูงขึ้น

อย่างต่อเนื่อง จากร้อยละ 11.7 ในช่วงปี 2519 ถึง ปี 2543 และ เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 4 ปีจากปี 2544 ถึงปี 2548 เพิ่มขึ้นไปอีกร้อยละ 15.8 เป็น ร้อยละ 27.5 และมีการคาดการณ์ว่าในอนาคตจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 31.2 ในช่วงปี 2559 ถึงปี 2563 โดยน้ำมันปาล์มสามารถนำไปงานได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมพลังงานและสาธารณสุขปโภค เป็นต้น หลังจากทำการสกัดน้ำมันปาล์มออกมา จะเหลือเศษวัสดุเหลือใช้มากมายที่เหลือจากการสกัด ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกหลากหลายดังนี้

1) เส้นใยแห้ง ใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถให้ความร้อนได้ประมาณ 13.9 MJ/kg

2) กะลาปาล์ม ใช้ผสมกับสารและเส้นใย เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรมสามารถให้ความร้อนได้ประมาณ 16 MJ/kg

3) ทะลายปาล์ม ใช้ในการปรับสภาพความชื้นบนผิวดิน เพิ่มปริมาณเนื้อดิน และ นิยมนำมาใช้ในการเพาะเห็ดเนื่องจากทะลายปาล์มนั้นมีปริมาณความชื้นสะสมที่สูง

4) กากของเสียหลังจากการสกัด ใช้ในการหมักปุ๋ย

ซึ่งหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต การสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือเส้นใยแห้งเป็นจำนวนมากจากเศษที่เหลือจากกากทะลายปาล์มน้ำมันที่ได้จากกระบวนการคิดเป็นร้อยละ 70 ของน้ำหนักของการผลิต เส้นใยแห้งของปาล์มน้ำมันนั้นจะมีส่วนประกอบของเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 33 จากน้ำหนัก [14] ซึ่งจัดว่าเป็นปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่น ๆ ของต้นปาล์ม ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้สนใจใช้เส้นใยแห้งที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมาใช้ประโยชน์ต่อไป

2.5 ข้าวโพด (Corn wood)

พฤกษศาสตร์ทั่วไป

วงศ์ (Family): GRAMINEAE

จีนัส (Genus): Zea

สปีชีส์ (Species): Z. mays

ชื่อสามัญ (Common Name): Corn Z. mays

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific Name): *Indian Corn, Maize, Corn*

ข้าวโพด (Corn) เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้า ที่มีลำต้นแข็ง ไม่กลวง มีความสูงอยู่ในช่วง 0.6 - 2.2 เมตร มีเส้นรัศมีลำต้นอยู่ในช่วง 0.25 - 1.0 นิ้ว เมื่อตัดตามขวางจะพบเนื้อที่มีลักษณะคล้าย ฟองน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วยท่อน้ำ และท่ออาหาร โดยลำต้นของข้าวโพดนั้นจะประกอบไปด้วยสอง ส่วนหลัก คือ ข้อ (Node) และปล้อง (Internode) ซึ่งปล้องของข้าวโพดจะเป็นตัวยืดยาวเพื่อเพิ่ม

ความสูงให้กับข้าวโพด โดยปกติข้าวโพดจะมีปล้องอยู่ในช่วงจำนวนเฉลี่ยประมาณ 8 - 20 ปล้อง และมีสีเขียวเข้ม ส่วนใบของข้าวโพดมีลักษณะเรียวยาวปลายแหลม มียาวประมาณ 0.30 – 1 เมตร และมีใบตั้งแต่ 8 - 48 ใบ ตามชนิดของสายพันธุ์ นอกจากนี้ข้าวโพดยังมีดอกตัวผู้ และดอกตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน โดยดอกตัวผู้จะอยู่ที่ปลายยอด และดอกตัวผู้หนึ่งดอกจะประกอบไปด้วยอัชเกสร 3 อัช ส่วนดอกตัวเมียจะอยู่ระหว่างกาบใบ ระบบรากของข้าวโพดเป็นระบบรากฝอย เมื่อโตเต็มที่แล้วจะสามารถแผ่กว้างออกมาถึง 1 เมตร

2.6 พลาสติก (Plastic)

ในปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทร่วมกับชีวิตประจำวันของคนเราเพิ่มขึ้น โดยมีการนำพลาสติกมาใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติจำพวกโลหะต่าง ๆ ไม้ หนังสัตว์ อย่างแพร่หลาย นอกจากนี้พลาสติกยังเข้าไปมีบทบาทในเกือบทุกอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอื่น ๆ เนื่องจากพลาสติกนั้นมีน้ำหนักที่เบา มีความยืดหยุ่นที่สูง มีความแข็งแรงทนทาน สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาที่ไม่สูงมาก

พลาสติกเป็นสารประกอบของพันธะไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นวัสดุสังเคราะห์กลุ่มใหญ่และอาจมีหมู่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน โดยส่วนมากพลาสติกมีแหล่งกำเนิดมาจาก 4 แหล่งใหญ่ ๆ ดังนี้

- 1) ผลิตผลจากการเกษตร และน้ำมัน เช่น Furan
- 2) ผลิตผลจากการเกษตร เช่น Cellulose Nitrate, Ethyl Cellulose, Casein เป็นต้น
- 3) ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งที่ใช้ในการผลิตพลาสติกชนิดต่าง ๆ มากที่สุด และเป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น Polypropylene, Polyethylene, Polystyrene, Epoxy เป็นต้น
- 4) สลีนแร่ เช่น Polyvinyl Acetate, Polyvinyl Chloride Calcium Aluminum Silicate เป็นต้น

โดยประเภทของพลาสติก นั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดขึ้นอยู่กับพันธะเคมีที่กระทำกันได้ออกมาเป็นโครงสร้าง และลักษณะเฉพาะเมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น คือ เทอร์โมเซตติงพลาสติก และเทอร์โมพลาสติก [9] ดังนี้

- 1) เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติในการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทนทานต่อปฏิกิริยาทางเคมี สามารถลดการเกิดคราบและรอยเปื้อน เทอร์โมเซตติงพลาสติกนั้นเมื่อทำการหลอมแล้วจะทำการคงรูปอย่างถาวร ไม่สามารถนำ

กลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมต่อของระหว่างขาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์ การขึ้นรูปพลาสติกชนิดนี้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงและต้องใช้แรงในการอัด เทอร์โมเซตติงพลาสติก [9] ได้แก่

(1) เมลามีน พอร์มาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) มีสมบัติในการทนแรงดันในช่วง 7,000 - 135,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถทนแรงอัดได้ 25,000 - 50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทนแรงกระแทกได้ 0.25 - 0.35 J/cm² ทนทานต่อความร้อนได้ถึง 140 องศาเซลเซียส และ ทนการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบรอยเปื้อนได้ยาก เมลามีนนิยมใช้ทำภาชนะบรรจุอาหาร

(2) ฟีนอลพอร์มาลดีไฮด์ (Phenol - Formaldehyde) มีความสามารถพิเศษในการต้านทานต่อตัวทำละลาย ในสารละลายประเภทเกลือและน้ำมัน แต่พลาสติกฟีนอลพอร์มาลดีไฮด์มีข้อด้อย เนื่องจากสามารถบวมน้ำหรือแอลกอฮอล์ได้ง่าย

(3) อีพ็อกซี (Epoxy) นิยมใช้เคลือบผิวของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่อเก็บก๊าซ อุปกรณ์โลหะ แก้ว และเซรามิก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนผสมใช้ในส่วนของประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ท่อความดัน เป็นต้น

(4) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นโพลิเมอร์ที่นำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ทำพลาสติกสำหรับเคลือบผิว ขวดใส่น้ำ เส้นใย ยาง พิล์มและยางรถยนต์ ตัวอย่างโพลิเมอร์ในกลุ่มของโพลีเอสเตอร์ที่รู้จักกันแพร่หลายได้แก่ โพลีบิวทิลีนเทเรฟทาเลต โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลิเมอร์ผลึกเหลว

2) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพลาสติกที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อได้รับความร้อน แล้วสามารถกลับมาแข็งตัวได้ใหม่เมื่อเย็นตัวลง หรือสามารถนำมาใช้ซ้ำได้โดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง ชนิดเทอร์โมพลาสติก [9], [32] ได้แก่

(1) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate ; PET) ใช้ทำขวดบรรจุน้ำ ภาชนะบรรจุอาหารสำหรับเตาอบ และที่เก็บเครื่องสำอาง เมื่อหลอมเหลวสามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่เป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม ใยสังเคราะห์สำหรับหมอน

(2) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE) ใช้ทำขวดนม ขวดน้ำ บรรจุภัณฑ์ใส่ของ แชมพูสระผม แป้งเด็ก และถุงหิ้วสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่เป็นขวดใส่น้ำยาซักผ้า เป็นต้น

(3) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride ; PVC) เป็นพลาสติกที่มักนิยมปรับแต่งคุณสมบัติด้วยสารเคมี จึงทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์มักนิยมไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม จุดเด่นของพอลิไวนิลคลอไรด์คือสามารถทนต่อน้ำมัน ป้องกันกลิ่นได้ดี ทนต่อแรงเสียดสี ทนความร้อนได้ไม่เกิน ช่วง 90 องศาเซลเซียส

(4) โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene ; LDPE) เป็นพลาสติกที่ความยืดหยุ่นที่สูง มีความนิ่ม มีสีไม่ใสมาก มีความเหนียวที่ดี แต่มีความสามารถทนความร้อนที่ต่ำ และลอยน้ำได้ จึงมักนิยมนำมาใช้ทำถุงเป็นหลัก

(5) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene ; PP) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติทนต่อความร้อนและสารเคมีที่ดี มีความใส ทนต่อความชื้น จึงมักทำบรรจุภัณฑ์อาหาร

(6) โพลิสไตรีน (Polystyrene ; PS) ใช้ทำภาชนะบรรจุของใช้ เช่น เทป เพลง สำลี หรือภาชนะบรรจุของแข็ง นอกจากนี้ ยังนำมาทำโฟมสำหรับใส่อาหารซึ่งมีน้ำหนักเบาสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่เป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวิดีโอ ไม้บรรทัด ถาดใส่ไข่ ฉนวนกันความร้อน กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ แผงสวิทช์ไฟ และเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ

(7) พลาสติกชนิดอื่น ที่ไม่ใช่พลาสติกที่กล่าวมาในข้างต้น

2.7 โพลีโพรพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene Grafted Maleic Anhydride; PP-g-MA)

โพลีโพรพิลีน (PP) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมรวมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดลงไป เพื่อเพิ่มสมบัติการกันน้ำได้ [13] โพลีโพรพิลีนต่อกิ่งมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) เป็นการต่อกิ่งโพลีโพรพิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical Properties) ดีขึ้นโดยการเพิ่มความแข็งแรงของโพลีโพรพิลีนโดยทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อน และเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่นรวมทั้งสารตัวเติม (Fillers) ได้เป็นอย่างดี

2.8 ไม้ผสมพลาสติก (Wood plastic composites; WPCs)

ไม้ผสมพลาสติกเป็นวัสดุคอมโพสิตที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุหลักคือ ไม้และพลาสติกซึ่งทำเพื่อเป็นการทดแทนการใช้ไม้จริงที่ปริมาณลดน้อยลง ไม้พลาสติกเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเป็นที่น่าสนใจในต่างประเทศ [13], [19] ประเทศไทยได้นำแนวคิดริเริ่มจากต่างประเทศเป็นหลัก โดยไม้พลาสติกเป็นการนำเอาความรู้ด้านไม้และพลาสติกมาผสมกันแล้วเกิดการพัฒนาออกมา [20] เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ เมื่อพิจารณาในด้านวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ

2.8.1 โครงสร้าง (Structure)

โครงสร้างของไม้เป็นส่วนที่ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากไม้เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองทางธรรมชาติมีความหลากหลายที่แตกต่างกัน เช่น การเรียงตัวของเนื้อเยื่อ ความแข็งของผิวไม้ ความชื้นสะสม ขนาดวงปี จึงทำให้เกิดความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างไม้ชนิดเดียวกัน จึงเป็นได้ยากในเชิงปฏิบัติที่จะทำการควบคุมให้ไม้มีลักษณะสมบัติที่เหมือนกัน จึงเน้นในการควบคุมส่วนที่เป็นพลาสติกแทน

2.8.2 สมรรถนะ (Performance)

เนื่องจากประเภทของวัตถุดิบที่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ไม้ผสมพลาสติกมีสมบัติแตกต่างกัน ทำให้สมรรถนะบางอย่างเปลี่ยนไป เช่น การเติมไม้ในพลาสติกจะทำให้เพิ่มความแข็งแรงแต่ก็ทำให้ขึ้นงานเปราะ [19] จึงได้มีการพัฒนาการปรับปรุงเพิ่มสมรรถนะ เช่น มีการต้านทานการดูดซึมน้ำให้ดีขึ้น แก้ไขปัญหาเรื่องการผุกร่อนจากปลวกและแมลง ทนทานต่อการแตกหักเมื่อตอกตะปู เป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น และมีน้ำหนักเบา เป็นต้น [19], [21] นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติได้ง่าย โดยการเพิ่มสารเติมแต่ง (Additives) เช่น พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) สารเพิ่มเนื้อ (Filler) สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น

2.8.3 ข้อดีของไม้ผสมพลาสติก [19]

ข้อดีของไม้ผสมพลาสติกเมื่อเทียบกับไม้	ข้อดีของไม้ผสมพลาสติกเมื่อเทียบกับพลาสติก
1) ทนทานต่อความชื้นได้ดีกว่า เนื่องจากไม้พลาสติกมีส่วนผสมของพลาสติก จึงทำให้ลดการดูดซึมน้ำลดลง ทำให้ไม้ผสมพลาสติกนั้นทนทานต่อการบวมน้ำได้ดีกว่าไม้ธรรมชาติ	1) สามารถรับแรงได้มากขึ้น เพราะเมื่อเทียบกับอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักแล้วไม้มีความแข็งแรงมากกว่าพลาสติก
2) ทนทานต่อเชื้อรา และแมลงที่เป็นศัตรูของไม้ เพราะส่วนผสมของพลาสติกทำให้แมลงและเชื้อราไม่สามารถเข้าถึงตัวเนื้อไม้ได้	2) สามารถทนทานต่อแสง UV ที่ดีกว่าพลาสติกทั่วไป เพราะแสง UV มีความสามารถในการทำลายพันธะภายในโมเลกุลของพลาสติก ทำให้ไม้พลาสติกสามารถทนแสงได้ดีกว่าพลาสติก
3) สามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ โดยไม่ทำให้เกิดเศษเหลือใช้ เนื่องจากจากไม้พลาสติกนั้นมีการขึ้นรูปขึ้นงานที่หลากหลายตามความเหมาะสม	3) มีการขยายตัวทางความร้อนน้อยกว่าพลาสติก เนื่องจากมีส่วนประกอบของไม้
4) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle)	4) น้ำหนักเบา

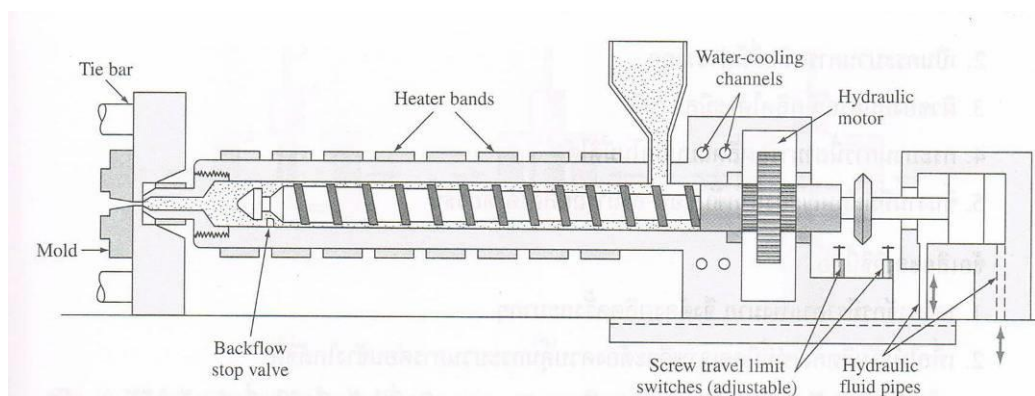
2.8.4 ข้อดีของไม้ผสมพลาสติก [19]

ข้อดีของไม้ผสมพลาสติกเมื่อเทียบกับไม้	ข้อดีของไม้ผสมพลาสติกเมื่อเทียบกับพลาสติก
1) สมบัติเชิงกลด้อยกว่าไม้ เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าไม้	1) เกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความชื้นมากกว่าพลาสติก จึงทำให้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องโดนความชื้นตลอดเวลา
2) มีความหนาแน่นมากกว่าไม้ธรรมชาติส่งผลให้น้ำหนักมีมากกว่าไม้ธรรมชาติ	2) ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานมีความซับซ้อนมากกว่า
3) การขยายตัวสูงกว่าไม้ธรรมชาติ	3) อายุการใช้งานสั้นกว่าพลาสติก เพราะมีไม้ผสมอยู่ แต่จะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เพราะย่อยสลายตัวได้เร็วกว่าพลาสติก

2.9 กรรมวิธีในการผลิต (Manufacturing)

2.9.1 กระบวนการฉีดเข้าแบบ (Injection Molding) [21]

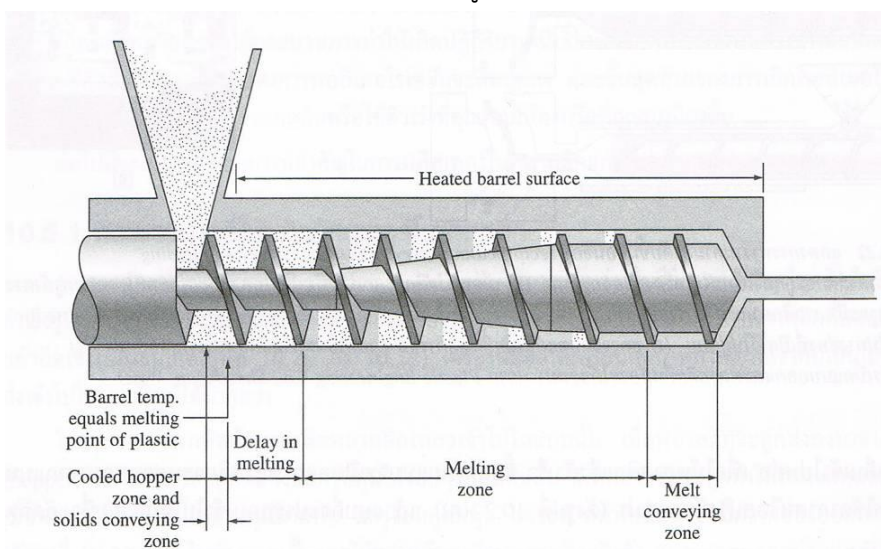
การฉีดเข้าในแม่พิมพ์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากสำหรับวัสดุเทอร์โมพลาสติก โดยใช้สกรูเป็นตัวนำพลาสติกที่หลอมเหลวเข้าไปในตัวแม่พิมพ์ โดยพลาสติกจะหลอมและหมุนเข้าไปตามเกลียวจากนั้นจะถูกอัดเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งข้อดีของกระบวนการผลิตนี้ คือ เป็นการฉีดพลาสติกจำนวนมากให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้ชิ้นงานตามแม่พิมพ์ ในกระบวนการผลิต เม็ดพลาสติกจะถูกส่งลงไปจนถึงแล้วนำเข้าไปโดยสกรูหมุนไปรอบ ๆ โดยได้รับความร้อนจะทำให้เม็ดพลาสติกเริ่มละลาย เมื่อมีพลาสติกเหลวมากพอสกรูจะหยุดแล้วฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ สกรูจะถอยออกมา แล้วมีการฉีดน้ำหล่อเย็นเข้าไปช่วยเพื่อให้พลาสติกแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดขวางของเครื่องฉีดเข้าแบบ [15]

2.9.2 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) [22]

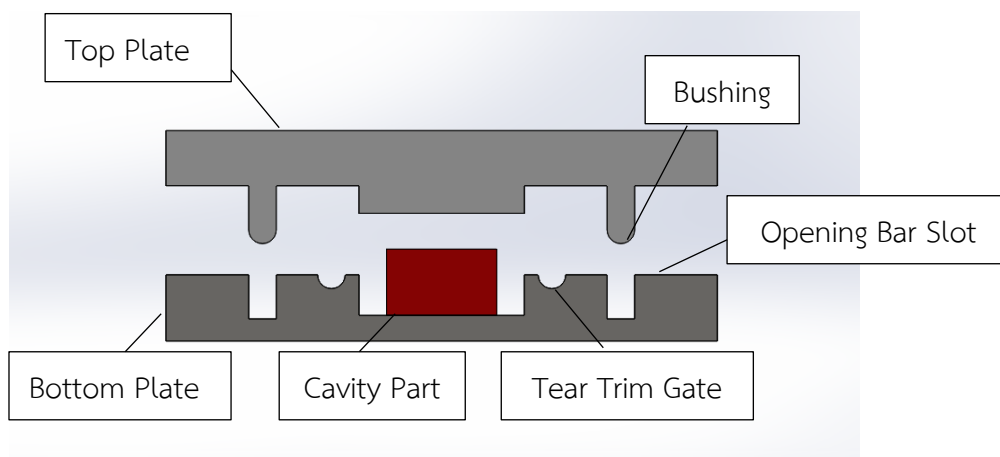
กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการสำคัญอีกวิธีหนึ่ง สำหรับใช้ในการผลิตเทอร์โมพลาสติก กระบวนการนี้มักนิยมใช้กับพลาสติกที่เป็น ท่อ แท่ง เป็นฟิล์มและแผ่นพลาสติก โดยเม็ดพลาสติกจะเข้าสู่เครื่องทางท่อ จากนั้นจะถูกหลอมและลำเลียงโดยเกลียวภายใน โดยอาศัยความร้อนแรงเฉือน และความดัน จากนั้นพลาสติกที่หลอมจะถูกอัดเข้าสู่แม่พิมพ์ที่ส่วนปลายของเครื่อง เพื่อขึ้นรูป โดยชนิดของแม่พิมพ์จะขึ้นตามความต้องการ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องอัดรีด และสัดส่วนต่าง ๆ [15]

2.9.3 กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) [22]

กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่จะไม่ใส่พลาสติกลงในแม่แบบเปิด แต่จะใช้แรงดันจากลูกสูบอัดพลาสติกให้เข้าไปในแม่แบบปิดด้วยแรงดันและความร้อน สำหรับกระบวนการในการเตรียมพลาสติกเพื่อใช้ในการผลิตชิ้นงาน พลาสติกตั้งต้นต้องอยู่ในรูปเม็ด ถ้าเป็นของเหลวต้องอยู่ในลักษณะคล้ายแป้งเปียก ซึ่งลักษณะนี้เป็นลักษณะที่ดีและเหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูป ในกระบวนการอัดขึ้นรูปต้องมีการเตรียมเม็ดพลาสติกสำหรับการอัด จากนั้นทำการอุ่นแม่แบบให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วบรรจุเม็ดพลาสติกลงไปแม่แบบ เมื่อเม็ดพลาสติกเกิดการหลอมเหลวและอัดไปพร้อม เมื่อผ่านไปสักระยะทำการหล่อเย็นแล้วนำไปตัดส่วนที่ไม่จำเป็นออก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องอัดขึ้นรูป และสัดส่วนต่าง ๆ [15]

2.10 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties Testing)

2.10.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) [22]

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงชิ้นงานทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นงานทดสอบตกอยู่ภายใต้สภาวะการยืด และเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นงานทดสอบจากแรงที่กระทำ การตรวจวัดค่าการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นงานทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้น นั่นคือ การเสียรูปของชิ้นงานทดสอบจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (Gauge Length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบ เป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยความยาวระยะทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงปกติเท่ากับ 2 นิ้ว

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile Properties) ทำโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Instron, Model 5582) โดยใช้เซลล์วัดแรง (Load Cell) ความยาวของเกท (Gauge Length) 80 เซนติเมตร ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที

2.10.2 การทดสอบแรงอัด (Compression Testing) [22]

แรงเค้นอัดเกิดจากแรงอัดที่ให้กับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการหดตัวหรืออัดตัวภายใต้แรงอัด ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดนี้ต้องมีลักษณะสั้นและต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความยาว เนื่องจากการทดสอบแรงอัดกับชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดยาวจะเกิดการโค้งงอด้านข้าง ซึ่งมีรูปแบบการเกิดที่ไม่แน่นอนจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ดังนั้นโดยปกติชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดมักเตรียมเป็นทรงกระบอก อย่างไรก็ตามบางวัสดุ เช่น อลูมิเนียม

ซึ่งเตรียมเป็นทรงกระบอกได้ยาก กรณีเช่นนี้จะเตรียมชิ้นงานทดสอบในรูปทรงที่สะดวกที่สุด อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุกับเงื่อนไขการทดสอบเนื่องจากความคงรูปของชิ้นงานทดสอบจะลดลงตามความสูงหรือความยาวของชิ้นงานทดสอบที่เพิ่มขึ้น

2.10.3 การทดสอบแรงดัด (Flexural Testing)

การทดสอบแรงดัด เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุหลังจากทำการดัดโค้ง โดยพิจารณาว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดโค้งเกิดการรอยแตกขึ้นหรือไม่ หลังจากทำการดัดโค้งชิ้นงานด้วยรัศมีความโค้งที่กำหนด จนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน การทดสอบ ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบอาจมีหน้าตัดเป็นวงกลม, สี่เหลี่ยม หรือรูปทรงหลายเหลี่ยมให้รัศมีความโค้งตามที่กำหนดไว้หรือให้ได้มุมตามที่กำหนดตามมาตรฐาน โดยทิศทางของแรงที่ใช้ในการดัดโค้งต้องคงที่ และการให้แรงในการดัดโค้งต้องเป็นไปอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นงานทดสอบในแนวข้าง เมื่อชิ้นงานทดสอบโค้งงอตามที่กำหนดทำการตรวจสอบดูว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานตรงบริเวณที่ดัดโค้ง ซึ่งจะเป็นบริเวณที่ได้รับความเค้นแรงดึงในระหว่างการดัดโค้งมีรอยแตกเกิดขึ้นหรือไม่

2.10.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็งเป็นสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดการรอยกดที่พื้นผิว โดยหลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับความเร็วความต้านทานต่อการเกิดการรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่าง ๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอนแบบระนาบ หรือแบบกรวยปากมน หรือพีรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้า หรือหัวเพชร และใช้ทดสอบภายใต้ภาวน้ำหนักที่คงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดการรอยกดตามที่กำหนด หรือวัดการรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น

การทดสอบความแข็งของพลาสติก สามารถทำได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น การทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับการทดสอบพลาสติกที่มีความแข็งแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมธาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับการทดสอบพลาสติกที่มีความอ่อนตัวมากกว่า เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิเอทิลีน

การทดสอบแบบ Durometer แบบ Shore เป็นเครื่องทดสอบด้วยมือ ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้กับการทดสอบกับวัสดุอ่อน เช่น ยาง พลาสติก เป็นต้น การทำงานของเครื่องทดสอบความแข็งแบบดูโรมิเตอร์ ซึ่งมีสองชนิดพื้นฐานได้แก่ Shore A กับ Shore D ซึ่งทั้งสองชนิดนั้นก็มีส่วนการทำงานเหมือนกัน คือสปริงจะส่งน้ำหนักไปยังหัวกด ทุกลงบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ จะได้ค่าความต้านทานต่อการเกิดการรอยกดของผิวชิ้นงานออกมา ซึ่งสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าจอ โดย

แบบ Shore A จะมีสปริงให้น้ำหนักกระหว่าง 0.056 – 0.822 กิโลกรัม ส่วนแบบ Shore D น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 0 – 4.53 กิโลกรัม ซึ่งวัสดุที่อ่านค่าได้สูงแสดงว่ามีความแข็งมาก

2.11 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties Testing)

สมบัติทางความร้อนเป็นการทดสอบการตอบสนองของวัสดุต่อปฏิบัติการทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและขนาดพลังงานจะถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ถ้าวัสดุมีสองบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกันโดยวัสดุอาจเกิดการหลอมเหลวในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งส่งผลต่อความจุความร้อน การขยายตัวจากความร้อนและการนำความร้อนเป็นสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุเมื่อนำไปใช้งาน

2.11.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC) [23]

เทคนิค DSC เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบ โดยแหล่งความร้อนที่แยกจากกัน พลังงานที่ให้แต่ละแหล่งถูกควบคุมให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ทั้งสองมีอุณหภูมิที่เท่ากัน ผลต่างของพลังงานจากแหล่งทั้งสองจะถูกบันทึกตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในระหว่างการสแกน ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชิ้นงานพลังงานจะถูกนำมาคิดรวมกันตลอดช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยไม่ได้คิดเพียงเฉพาะที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง[24] DSCสามารถใช้วัดและวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนและการถ่ายความร้อนออกจากระบบ กระบวนการหลอมและตกผลึก อีกทั้งทำให้ได้ข้อมูลของพอลิเมอร์เกี่ยวกับจุดเปลี่ยนทางความร้อนต่าง ๆ และปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการหลอมและการตกผลึก (Δh_f และ Δh_c) ความจุความร้อน ดีกรีของการบ่มของพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงโมเลกุล เช่น เทอร์โมเซตติง และยางต่าง ๆ ตลอดถึงการวิเคราะห์การนำความร้อน

$$C_{m(\%)} = \frac{(\Delta h_f)}{(\Delta h_{of})} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยที่ $C_{m(\%)}$ คือ เปอร์เซ็นต์ที่เกิดผลึก
 Δh_f คือ เอนทาลปีของการเกิดผลึกที่เกิดในกระบวนการหลอม
 Δh_{of} คือ เอนทาลปีของการเกิดผลึกที่ 100% ของโพลีโพรพิลีน (165 J/g)

2.11.2 เทอร์มอแกรวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA)

เทคนิค TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรสภาพทางความร้อนของวัสดุ โดยเฉพาะพลาสติก โดยทำการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ด้วยเครื่อง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพหรือศึกษาน้ำหนักที่หายไปของการดูดซับแก๊ส หรือการระเหยของไอน้ำ [8] การตกผลึก (Crystallization) ที่เกิดจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป การแตกตัว การเกิดปฏิกิริยาเคมีออกซิเดชัน และรีดักชัน โดยการทดสอบจะเกิดอยู่ในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิ ที่สามารถปรับอุณหภูมิ แรงดัน ออกซิเจน ไนโตรเจนได้ โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของวัสดุนั้นๆ โดยน้ำหนักที่หายไปอาจเกิดจากการระเหย หรือ ย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

2.11.3 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion; CTE)

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion; CTE) เป็นค่าของความยาวของชิ้นงานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป โดยเทียบกับความยาวตั้งต้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเป็นค่าที่มีลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก จุดหลอมตัว ความหนาแน่น โดยการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้นมากหลายหลายวิธี เช่น ใช้การคำนวณจาก % ออกไซด์ที่มีอยู่ในสูตร การใช้วงแหวนสำหรับการทดสอบ (Fit Ring) สำหรับการตรวจวัดค่าที่ถูกต้องแม่นยำที่สุด จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่อง Dilatometer โดยการนำชิ้นทดสอบ มาตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ แล้วนำเข้าไปใส่ในเครื่อง Dilatometer จากนั้นให้อุณหภูมิกับชิ้นงาน โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่กำหนดไว้ แล้วทำการวัดค่าในขณะที่ชิ้นงานกำลังขยายตัวและทำการบันทึกไว้ จากนั้นนำมาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากสมการที่ 2.2

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

โดยที่	α	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ
	L_0	คือ ความยาวเริ่มต้น
	ΔL	คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับอุณหภูมิ
	ΔT	คือ ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

2.12 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

เป็นการนำวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปมาทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D972-08 โดยการนำชิ้นงานทดสอบไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานทดสอบออกมาจากตู้อบทิ้งให้เย็นตัว หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 0.01 กรัม และวัดขนาดของชิ้นงานทั้ง 3 ด้าน คือ ด้านกว้าง ด้านยาว และด้านหนา จากนั้นทำการคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบจากสมการที่ 2.3

$$\text{Density} = \frac{M_0}{V_0} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดยที่ M_0 คือ มวลของชิ้นงานทดสอบ (กรัม)

V_0 คือ ปริมาตรของชิ้นงานทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.13 การทดสอบการติดไฟ (Flammability Testing)

2.13.1 การทดสอบการหน่วงไฟของวัสดุตามมาตรฐาน UL-94

การทดสอบสมบัติการด้านการติดไฟ โดยการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน (Horizontal Burning Test) และทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้ง (Vertical Burning Test) ตามมาตรฐาน ASTM D635 และ ASTM D3801 ตามลำดับ [8] ซึ่งการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน ยึดชิ้นงานทดสอบตามแนวนอนปรับท่อไฟ (Burning Tube) ให้มีความยาวของไฟประมาณ 2 เซนติเมตร และท่อไฟทำมุมกับพื้น 45 องศา ท่อไฟจ่อที่ปลายชิ้นงานทดสอบ โดยให้ระยะห่างปลายท่อไฟกับปลายชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 1 เซนติเมตร ทำจุดอ้างอิงไว้ที่ชิ้นงานทดสอบสองจุด จุดแรกคือที่ 25 มิลลิเมตร จากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ จุดที่สองคือที่จากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ นำท่อไฟออกจากชิ้นงานทดสอบ หลังจากไฟต่อที่ปลายชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 30 นาที และเริ่มจับเวลาหลังจากการเผาไหม้ผ่านจุดอ้างอิงที่ 25 มิลลิเมตร จากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ บันทึกเวลาเมื่อการเผาไหม้ถึงจุดอ้างอิงที่ 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นคำนวณอัตราการเผาไหม้ (Burning Rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะทางที่เผาไหม้ขึ้นทดสอบมีหน่วย เป็นมิลลิเมตร (mm) กับเวลาในการเผาไหม้มีหน่วยเป็นนาที (min) สมการการคำนวณอัตราการเผาไหม้แสดงดังนี้

$$V = L / t \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

โดยที่ V คือ อัตราการเผาไหม้ (มิลลิเมตรต่อนาที)

L คือ ระยะทางในการเผาไหม้ (ระยะทาง 25 ถึง 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของชิ้นงานตัวอย่าง เท่ากับ 75 มิลลิเมตร)

t คือ เวลาในการเผาไหม้ที่ระยะทาง 25 ถึง 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของชิ้นงานตัวอย่างมีหน่วยเป็นนาที

2.13.2 ลิ้มเต็ดออกซิเจนอินเด็กซ์ (Limited Oxygen Index: LOI)

การทดสอบกระทำโดยทดสอบการติดไฟของชิ้นงานภายใต้อัตราส่วนของไนโตรเจนต่อออกซิเจนต่าง ๆ กัน เพื่อจะวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ชิ้นงานจะมีการติดไฟและลุกไหม้ต่อเนื่องได้ใต้อัตราส่วนของไนโตรเจนต่อออกซิเจนต่าง ๆ กัน [8] เพื่อจะวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ชิ้นงานจะมีการติดไฟและลุกไหม้ต่อเนื่องได้ ค่า LOI จึงเป็นค่าที่แสดงถึงความยากในการติดไฟของวัสดุใต้อัตราส่วนของไนโตรเจนต่อออกซิเจนต่าง ๆ กัน เพื่อจะวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ชิ้นงานจะมีการติดไฟและลุกไหม้ต่อเนื่องได้ ค่า LOI จึงเป็นค่าที่แสดงถึงความยากในการติดไฟของวัสดุตั้งความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$LOI = \frac{100V}{V_o + V_N} \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

โดยที่ LOI = ดัชนีจำกัดออกซิเจน (ร้อยละโดยปริมาตร)

V_o = ปริมาณของออกซิเจนต่อปริมาณของส่วนผสม

V_N = ปริมาณของไนโตรเจนต่อปริมาณของส่วนผสม

V = ปริมาณทั้งหมดของส่วนผสม

2.14 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphological Properties Testing)

การทดสอบสัณฐานวิทยาเป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [8], [24], [25], [35] ศึกษาที่ผิวหรือบริเวณส่วนลึกใกล้ผิว โดยจะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ ปืนอิเล็กตรอนซึ่งจะมีการเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานประมาณ 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ถึง 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นจะมีเลนส์คอนเดนเซอร์ เลนส์ใกล้วัตถุ และที่สำคัญมีส่วนที่เรียกว่า ขดลวดสแกนซึ่งคอยส่องกราดลำอิเล็กตรอนลงบนชิ้นงานและเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิวของชิ้นงาน อิเล็กตรอนสะท้อนกลับ ที่ปลดปล่อยออกมาจากผิว ซึ่งจะถูกรวบรวมด้วยหัววัดแบบต่าง ๆ โดยจะทำการวัดแต่ละจุดที่มีการสแกน ซึ่งหลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะมีบางส่วนที่มีลักษณะการทำงานคล้ายการสแกนภาพในโทรทัศน์ สำหรับกำลังขยายภาพนั้นจะพิจารณาจากกรอบสี่เหลี่ยม ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของเส้นตรงที่เรียกว่า เรสเตอร์ จะพบว่าเรสเตอร์ที่ถูกสแกนด้วยอิเล็กตรอนจะเล็ก

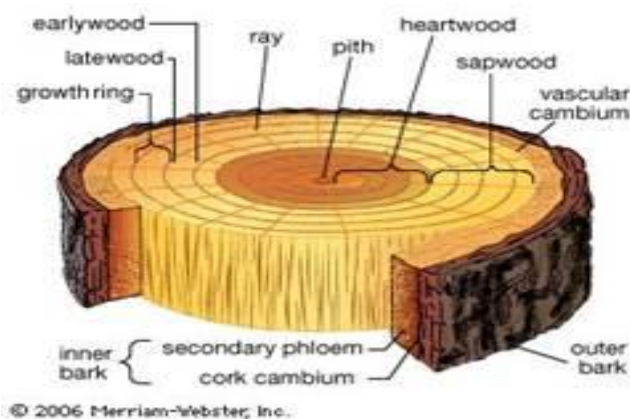
กว่าเรสเตอร์ที่ปรากฏบนจอภาพในการสร้างภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะใช้การตรวจจับอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิว ซึ่งก็ได้จากการทำอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิต่อชิ้นงาน สำหรับการสร้างภาพส่วนใหญ่แล้ว ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมไม้พลาสติก ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (JEOL, Model JSM6400) ที่ 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) การเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยนำพื้นผิวที่ได้จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile Fracture Surface) ไปเคลือบทองคำก่อนนำไปศึกษา

2.15 ไม้

2.15.1 โครงสร้างและรูปร่างลักษณะของไม้

เนื้อไม้มีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (lignin) และส่วนประกอบอื่น ๆ เล็กน้อย เช่น เพคติน (Pactin) แป้ง (Starch) เป็นต้น และรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างของไม้ ซึ่งประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของไม้ [19]

1) เปลือก (Bark) หรือส่วนที่ห่อหุ้มลำต้นเอาไว้ ประกอบด้วยสารจำพวกลิกนินเป็นส่วนมาก โดยส่วนมากผิวที่อยู่ด้านนอกจากเป็นส่วนที่ตายแล้ว แต่ส่วนที่อยู่ข้างในยังคงมีชีวิตอยู่ เรียกว่าเปลือกชั้นใน

2) กระจพี (Sapwood) เป็นส่วนกลางของเนื้อไม้ที่ยังคงมีการเจริญเติบโตอยู่ โดยกระจพีจะอยู่ระหว่างเปลือกแก่นและเปลือกชั้นใน ทำหน้าที่ลำเลียงอาหารและน้ำให้กับต้นไม้

3) แก่นไม้ (Heart Wood) เป็นส่วนที่แปรสภาพมาจากกระพี้ มีเนื้อไม้มีความแข็งแรงสูง และความหนาแน่นที่มาก

4) วงเจริญ หรือ วงปี (Annual Ring) เป็นแนวข้อต่อของไม้ที่เติบโตขึ้นมาในแต่ละฤดูที่ไม้เจริญเติบโต หรือปี ซึ่งวงปีนั้นเป็นส่วนที่ใช้ในการศึกษาอายุของไม้ โดยหนึ่งวงเทียบเท่ากับระยะเวลา หนึ่งปี

5) เส้นรัศมี เป็นเส้นตัดตามขวางของลำต้นจากใจไม้ถึงเปลือก

6) ใจไม้ (Pith) เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางสุดของลำต้น เป็นจุดที่เกิดการเติบโตตลอดเวลา หากใจไม้ตายลงต้นไม้อาจจะตาย

2.15.2 ชนิดของไม้

ในปัจจุบันไม้สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทกลุ่ม คือ ไม้เนื้ออ่อน (Softwoods) และ ไม้เนื้อแข็ง (Hardwoods) โดยใช้การอธิบายเชิงวิชาการทางพฤกษศาสตร์ในการแยกกลุ่ม

1) ไม้เนื้ออ่อน เป็นไม้ที่มีลักษณะใบเรียวยาวเล็ก (Needle leaves) มีวงปีที่กว้าง เนื่องจากเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และมักจะมีเนื้อที่เหนียว โดยส่วนมากไม้พวกนี้มักจะขึ้นอยู่ในถิ่นที่สูง มีอากาศหนาวเย็น ซึ่งลักษณะของไม้เนื้ออ่อนนั้นเหมาะสมอย่างสำหรับการใช้งานก่อสร้าง เนื่องจากที่ความแข็งแรงดี มีความเหนียวคงทน และมีน้ำหนักเบา

2) ไม้เนื้อแข็ง เป็นไม้ที่มีลักษณะใบกว้าง (Broad Leaved Trees) มีลำต้นขนาดใหญ่ มีวงปีที่มากกว่าไม้เนื้ออ่อน เพราะโตช้า มีอายุที่ยืนยาว มักมีผิวมัน สีเข้ม เนื้อหนาแน่น แข็งแรง โดยลักษณะโครงสร้างของไม้เนื้อแข็งจะมีความยุ่งยากกว่าไม้เนื้ออ่อน นอกจากนี้ไม้เนื้อแข็งก็มีความแตกต่างระหว่างตัวมันเอง ขึ้นอยู่กับชนิดไม้

2.16 สารเติมแต่ง (Additive)

นอกจากไม้และพลาสติกที่จะเป็นส่วนผสมสำคัญในการสร้างไม้ผสมพลาสติก ยังมีสารเติมแต่งอีกมากมายที่ช่วยในการปรับปรุงสมบัติบางประการที่ทำให้ไม้พลาสติกสามารถใช้งานได้ดีขึ้น โดยการแบ่งประเภทของสารเติมแต่งที่ใช้ในปัจจุบันจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้งานของผู้ผลิตให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต ซึ่งสามารถแบ่งตามประเภทดังนี้

2.16.1 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดความแข็งแรงของพลาสติกลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นและนิ่ม

2.16.2 สารคงสภาพ (Stabilizer)

เป็นสารเติมที่ผสมในวัสดุ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการเสื่อมสภาพ เนื่องจากความร้อน ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป และระหว่างการใช้งาน

2.16.3 สารตัวเติม (Filler)

เป็นสารที่ใช้ผสมกับวัสดุเพื่อช่วยในการเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับผลิตภัณฑ์ สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement filler) ซึ่งเป็นสารที่มีขนาดเล็กมาก ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon Black) เกรดต่าง ๆ และผงเขม่าขาวหรือซิลิกา

2.16.4 สารช่วยในการกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารกลุ่มนี้มีหน้าที่เฉพาะตัวต่างกัน เช่น สารที่ช่วยในการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ให้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการลื่นไหล สารทำให้ยางนิ่มลงในระหว่างการบดผสม เช่น น้ำมัน (Oils) สารเคมีช่วยย่อยยาง (Peptizer)

2.16.5 สารช่วยผสม (Compatibilizer)

เป็นสารเติมแต่งที่ผสมในวัสดุ เพื่อทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น ทำให้วัสดุเข้าหากันได้ดีขึ้น เกิดเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride)

2.16.6 สารหน่วงไฟ Fire retardant

เป็นสารเติมแต่งที่คุณสมบัติในการเข้าไปรบกวนขั้นตอนในขบวนการสันดาปในการติดไฟ หรือ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการติดไฟของเชื้อเพลิง ทำให้อัตราการติดไฟช้าลง หรือทำให้กระบวนการติดไฟหยุดลง ซึ่งสารเคมีที่มีคุณสมบัติที่ดีในการหน่วงมีหลายชนิด เช่น แอนติโมนี พอสฟอรัส โบรไมน์ คลอไรน์ ไนโตรเจน และโบรอน ซึ่งสารเหล่านี้อยู่ในรูปสารประกอบที่แตกต่างกัน โดยสารประกอบที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในการดับไฟหรือชะลอการติดไฟ ที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายและนิยมใช้ในวงกว้าง ได้แก่ แอมโมเนียมซัลเฟต และไดแอมโมเนียมฟอสเฟต

2.16.7 พอลิโพรพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene Grafted Maleic Anhydride; PP-g-MA)

พอลิโพรพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) เป็นการต่อกิ่งพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical Properties) ดีขึ้นโดยการเพิ่มความเปราะบางของพอลิโพรพิลีนโดยทำให้ความเปราะบางเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น

2.17 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เป็นวิธีการทางสถิติเพื่อใช้ทดสอบหาค่าความแตกต่างระหว่างกลุ่มของตัวอย่าง ตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (within-group variance) และระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (between-group variance) ถ้าค่าที่ออกมาในกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมาก นั้นหมายความว่าค่าความแปรปรวนจะแตกต่างกันมากเช่นเดียวกัน สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มนั้นเป็นการแสดงออกถึงการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูล ว่าข้อมูลมีการกระจายมากน้อยแค่ไหน ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าค่าความคลาดเคลื่อน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินวิจัย

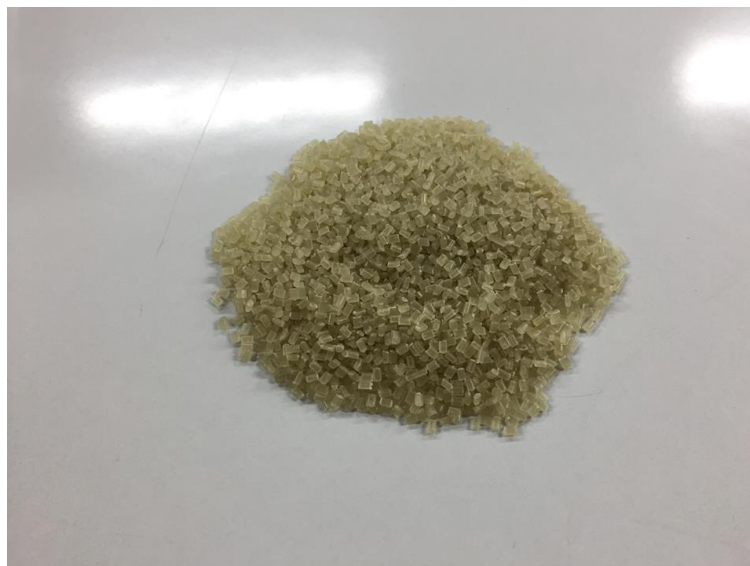
วิธีการวิจัย เป็นการอธิบายถึง วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และการทดสอบ โดยจะแบ่งออกเป็นหัวข้อหลัก คือ 1. วัสดุ และสารเคมี 2. เครื่องมือและอุปกรณ์ และ 3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย

1) เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP) เกรด WT 170 มีค่าดัชนีการไหล 11 กรัมต่อ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท วิทยาอินเตอร์เทรด จำกัด (จังหวัดสมุทรปราการ) ทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์ที่ยึดติดกับสารเสริมแรง ดังแสดงรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP)

2) เส้นใย

2.1) เส้นใยกาบมะพร้าว เป็นส่วนของสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต ซึ่งได้มาจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยกาบมะพร้าว โดยนำเส้นใยกาบมะพร้าวอบที่อุณหภูมิ 80 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตัดให้มีขนาดเล็กลง แล้วนำไปร่อนด้วยเครื่องร่อน ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 60 - 100 Mesh แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เส้นใยจากมะพร้าว

2.2) เส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน เป็นส่วนของสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตซึ่งได้มาจากเส้นใยแห้งจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตัดให้มีขนาดเล็กลง แล้วนำไปร่อนด้วยเครื่องร่อน ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 60 - 100 Mesh แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน

2.3) เส้นใยสังข์ข้าวโพด เป็นส่วนของสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต ซึ่งได้มาจากสังข์ของข้าวโพดที่เหลือจากอุตสาหกรรม นำเส้นใยที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตัดให้มีขนาดเล็กลง แล้วนำไปร่อนด้วยเครื่องร่อน ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 60 - 100 Mesh แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เส้นใยสังข์ข้าวโพด

3.1.2 สารเคมี

1) พอลิโพรพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มี maleic anhydride ในช่วงร้อยละ 8 ถึง 10 ของน้ำหนัก ซึ่งเป็นสารที่ช่วยในการเพิ่มการยึดติดกันระหว่างเมตริกซ์กับสารเสริมแรง โดยมีการจัดจำหน่ายจากบริษัทวิทยาศาสตร์ จำกัด ดังแสดงรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (MA)

2) สารหล่อลื่นพาราฟินแว็กซ์ ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มการหล่อลื่นในการผสมของเม็ดพลาสติกกับสารเสริมแรง จากบริษัท Nippon Seiro จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานทดสอบ

1) ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Heraeus รุ่น IEML 21-002 ผลิตโดยบริษัท Heraeus Precious Metals GmbH & Co. KG จำกัด (Germany) ใช้สำหรับอบไล่ความชื้นของผงไม้และชิ้นงานก่อนการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังแสดงรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตู้อบความร้อน

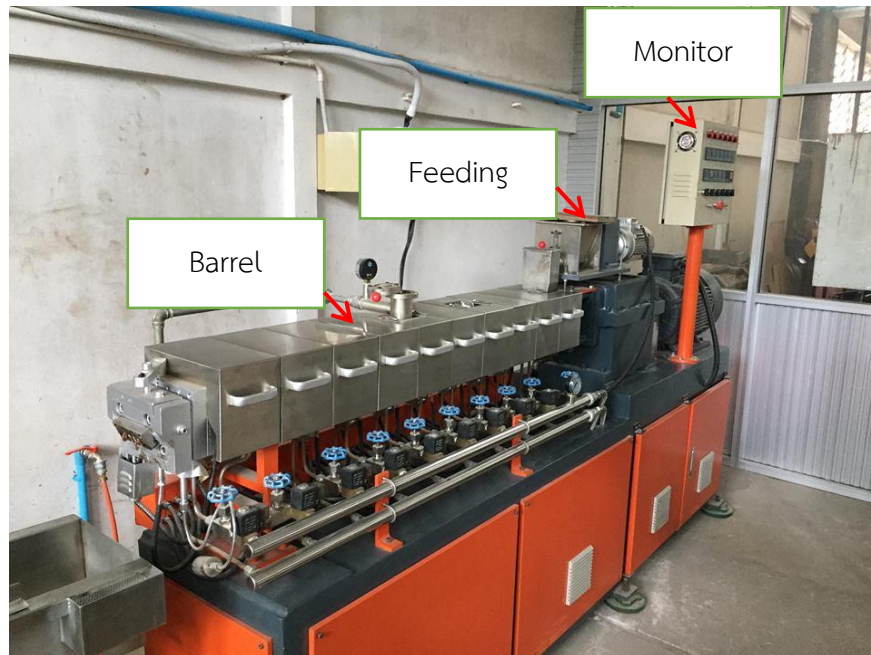
2) เครื่องร่อนแยกขนาด ยี่ห้อ RO -TAP ผลิตโดยบริษัท W.S. Tyler (Ohio, USA) ใช้สำหรับแยกผงไม้ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ตะแกรงที่ใช้สำหรับร่อนผงไม้มีตั้งแต่ขนาด 60 -100 Mesh (595 μm – 149 μm) ดังแสดงรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องร่อนแยกขนาด

3) เครื่องปั่น (Blenders) ยี่ห้อ Vibrofood โมเดล SY-10 ผลิตโดยบริษัท Vibrofood Mulry Function Disintegrator (China) ขนาดความจุ 2 กิโลกรัม ใช้สำหรับตัดขนาดเส้นใยให้มีความยาวที่สั้นลง

4) เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ยี่ห้อ ENMACH รุ่น EMT-26 ผลิตโดยบริษัทเอ็นแมช จำกัด ดังแสดงรูปที่ 3.8 ใช้ในการผสมเม็ดพลาสติกโพรพิลีนรีไซเคิล เส้นใยธรรมชาติ MA และสารหล่อลื่นเข้าด้วยกัน โดยใช้ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และความเร็วหมุนของเกลียวคือ 40 อัตราป้อน 1.5 (มม./รอบ) rpm [13] โดยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางบาร์เรล 51 มม. มีเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 50.5 มม. กำลังมอเตอร์หลัก 75/90/110/132 กิโลวัตต์



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

5) เครื่องอัดรีด ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ตัวเครื่องประกอบไปด้วยส่วนของแม่พิมพ์อัดรีด และแม่พิมพ์หล่อเย็น กำลังในการอัดสูงสุด 2,500 psi สามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงรูปที่ 3.9

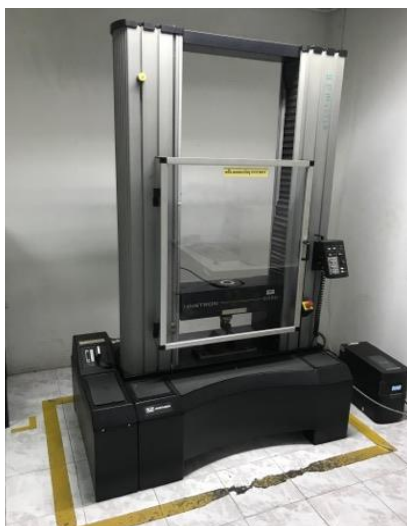


รูปที่ 3.9 เครื่องอัดรีด

6) แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ แม่พิมพ์แผ่นบนและแม่พิมพ์แผ่นล่างขนาด 240 มม. x 340 มม. x 6 มม. ใช้สำหรับประกบอัดแบบแม่พิมพ์แนบกลางที่มีรูปร่างเป็นชิ้นงานและได้ใส่เม็ดวัสดุผสมไว้

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล

1) เครื่องทดสอบสมบัติทางกลวัสดุ ยี่ห้อ Instron โมเดล 5582 ผลิตโดยบริษัท Instron corporation จำกัด (Massachusetts, USA) ใช้สำหรับวัดค่าสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง ดัด ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงอัด ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามแต่ มาตรฐานการทดสอบและทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติทางกลวัสดุ

2) เครื่องทดสอบความแข็งผิว ยี่ห้อ Shore D Durometer โมเดล GS-702G ผลิตโดยบริษัท Teclock Corporation (Nagano, Japan) ใช้สำหรับวัดค่าความแข็งผิว ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส สถานที่ทดสอบภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็งผิว

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติความร้อน

1) เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (Macro Thermogravimetric Analyzer :TGA) ยี่ห้อ LECO โมเดล TGA 701 มีหลักการทำงาน โดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างและชั่งน้ำหนักตัวอย่างตามช่วงเวลาที่เหมาะสมอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถวัดน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบต่าง ๆ ในตัวอย่าง เช่น คุณลักษณะของสารอนินทรีย์ สารพอลิเมอร์ แร่ธาตุ หรือถ่านหิน ใช้งานได้ดีทั้งตัวอย่างชนิดของแข็ง ของเหลว ผง แผ่นฟิล์ม เส้นใย เป็นต้น เตาเผาเป็นแบบ Single Furnace มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Ramp Rate) ได้รวดเร็ว สูงสุดถึง 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ตัวเครื่องมีเครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง มีความแม่นยำสูงโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 0.02 % และมีระบบการป้องกันเครื่องชั่งจากการรบกวนจากอุปกรณ์อื่นในเครื่อง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน

2) เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (Differential Scanning Calorimeter :DSC) ยี่ห้อ Perkin Elmer โมเดล DSC7 เป็นเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว ซึ่งมีจุดเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -170 ถึง 500 องศาเซลเซียส สำหรับ DSC และในช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง 1300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.13

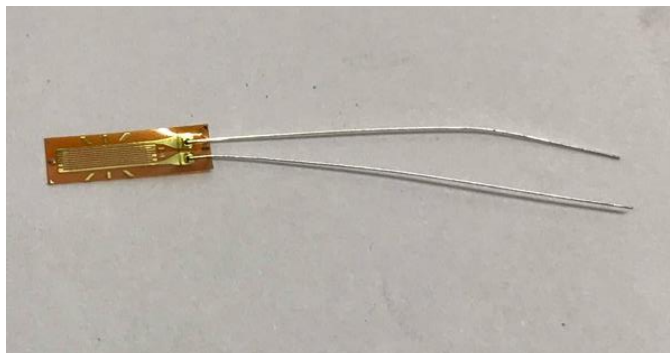


รูปที่ 3.13 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

3) ชุดอุปกรณ์ในการทดสอบการขยายตัวทางความร้อน

(1) อุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุ สเตรนเกจ ยี่ห้อ Kyowa โมเดล KFP-5-120-C1-65 ผลิตโดยบริษัท เคียวว่า เด็นเกียว (ไทยแลนด์) ใช้สำหรับทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติ หรือความเครียดในเนื้อวัสดุ โดยสเตรนเกจจะทำหน้าที่เป็น

ตัวแปลงผลจากแรงภายนอกที่มากระทำต่อชิ้นงาน ซึ่งโดยสเตรนเกจจะแปลงข้อมูลที่ได้รับข้อมูลเข้ามาเป็นสัญญาณไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุสเตรนเกจ

(2) เครื่อง Universal Bridge Box ยี่ห้อ Kyowa โมเดล DBT-120A-8 ผลิตโดยบริษัท เคียวว่า เด็นเกียว (ไทยแลนด์) ใช้เป็นทางผ่านของสัญญาณไฟฟ้า โดยทำหน้าที่รับข้อมูลสัญญาณในส่วนต้นก่อนส่งข้อมูลต่อไป ดังแสดงรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่อง Universal Bride Box

(3) เครื่อง Universal data recorder box ยี่ห้อ Kyowa โมเดล EDX-100A-4H ผลิตโดยบริษัท เคียวว่า เด็นเกียว (ไทยแลนด์) เป็นอุปกรณ์ที่นับข้อมูลมาจากเครื่อง Universal Bride Box โดยเครื่อง Universal data recorder box ทำหน้าที่สำหรับบันทึกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่แปลงมา ก่อนที่จะประมวลผล และส่งต่อข้อมูลสู่คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่อง Universal Data Recorder Box

3.2.4 เครื่องทดสอบการติดไฟ ยี่ห้อ Yasuda โมเดล 214 เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับวัดดัชนีการติดไฟกับวัสดุยาง, พลาสติก, สิ่งทอ เป็นต้น โดยดัชนีออกซิเจนตามมาตรฐาน

3.2.5 เครื่องทดสอบความขรุขระ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น Mitutoyo SJ-301 จาก Mitutoyo Corporation (ญี่ปุ่น) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความขรุขระผิวของชิ้นงาน

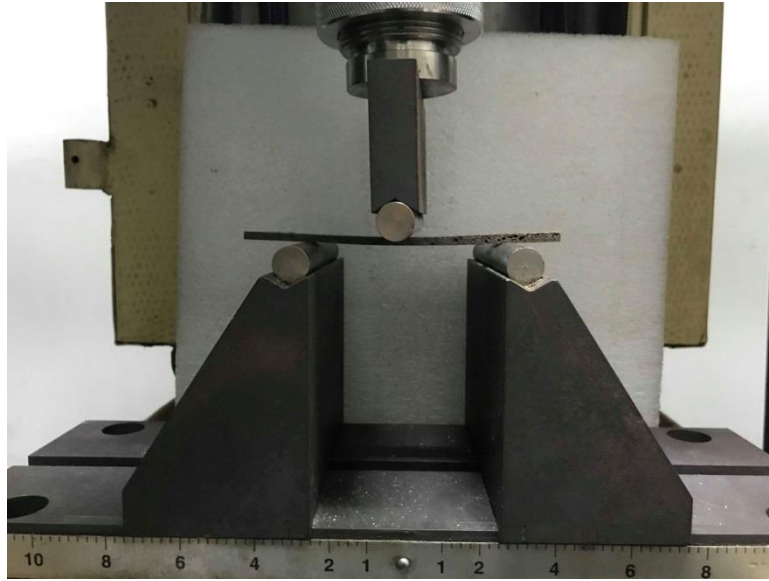
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

3.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบเชิงกล เป็นการนำวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปไปทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งประกอบด้วย ความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัด และความแข็งแรงผิว ตามมาตรฐาน ASTM โดยทำการทดสอบ 5 ซ้ำ ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

1) การทดสอบความแข็งแรงดัด (Flexural Test)

การทดสอบความแข็งแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM D790-92 ใช้การทดสอบแรงดัดงอแบบสามจุด โดยใช้ชิ้นงานขนาด 13 มม. X 100 มม. X 4.8 มม. วางบนขารองรับที่มีระยะห่าง 80 มม. บนเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล โดรนให้ลิ้มทดสอบกดลงตรงกึ่งกลางชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.20 โดยใช้ความเร็ว 2 มม./นาที ออกแรงกดจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก จากนั้นทำการอ่านค่าแรงดัดและมอดูลัสที่บันทึกเอาไว้ แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การทดสอบความแข็งแรงดัด

2) การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638-99 ใช้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบ dogbone โดยจับที่ปลายทั้งสองของชิ้นงานด้วยหัวจับทั้งสองข้าง ให้หัวจับทำมุมฉากกับเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล ดังภาพที่ 3.18 จากนั้นทำการเดินเครื่องให้หัวจับด้านบนเคลื่อนที่ขึ้นโดยใช้ความยาวของเกท (Gauge Length) 80 เซนติเมตร ความเร็ว 5 มม./นาที จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน ทำการอ่านค่าแรงดึงและมอดูลัสที่บันทึกเอาไว้



รูปที่ 3.18 การทดสอบความแข็งแรงดึง

3) การทดสอบความแข็งแรงอัด (Compressive Test)

การทดสอบความแข็งแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D6108-97 ใช้ชิ้นงานขนาด 6 มม. x 12 มม. x 6 มม. ทำการทดสอบโดยนำชิ้นงานวางลงบนฐานรองรับของเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล ให้ชิ้นงานตั้งฉากกับหัวด้านบน จากนั้นเคลื่อนหัวกดลงมาด้วยอัตราการเคลื่อนที่คงที่ 0.5 มม./นาที รอจนหัวกดเคลื่อนที่ลงมา 2.5 มม. จากนั้นทำการอ่านค่าแรงอัดที่บันทึกเอาไว้ แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การทดสอบความแข็งแรงอัด

4) การทดสอบความแข็งผิว (Hardness Test)

การทดสอบความแข็งผิว แบบชอร์ดูโรมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยเลือกใช้ Durometer แบบ Shore D ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบความแข็งผิวแบบพกพา และยังสามารถอ่านค่าทางหน้าปัด โดยใช้ชิ้นงานขนาด 16 มม. x 16 มม. x 6.5 มม. ทำการทดสอบโดยนำชิ้นงานวางลงบนฐาน จากนั้นใช้เข็มของเครื่องวัดกดลงที่ตรงกลางของชิ้นงานดังรูปที่ 3.11 จากนั้นทำการอ่านค่าความแข็งผิวที่แสดงออกมาและบันทึกเอาไว้

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม

1) การทดสอบความขรุขระ (Surface Roughness)

การทดสอบความขรุขระ ตามมาตรฐานของการทดสอบความขรุขระ ANSI/ASME B 46.1-1995 โดยใช้นำชิ้นงานทดสอบมาประกบฐานของเครื่องวัดความขรุขระผิว จากนั้นกดวัดความขรุขระลงมา ให้เข็มของเครื่องวัดลากผ่านชิ้นงานอย่างช้า ๆ จากนั้นบันทึกค่าความขรุขระผิวที่แสดงออกมาทางหน้าจอ

2) การทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบความหนาแน่น เป็นการนำตัวอย่างไม้พลาสติกที่ได้มาทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D792-08 5 ซ้ำ โดยนำชิ้นงานที่ทดสอบไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและวัดขนาดชิ้นงานด้วยเวอร์เนียแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดสูง โดยทำการวัดขนาดทั้งสามด้านของชิ้นงาน คือ กว้าง ยาว และหนา จากนั้นนำค่าที่ได้มาเข้าสมการที่ 2.3 เพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นของวัสดุผสม

3.3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

1) เทอร์มอแกรวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA)

การทดสอบหาค่าอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (Decomposition Temperature) โดยการนำวัสดุผสมไม้พลาสติกไปทดสอบด้วยเครื่อง Macro Thermogravimetric Analyzer, TGA 701, LECO) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (10 - 20 มิลลิกรัม) ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน

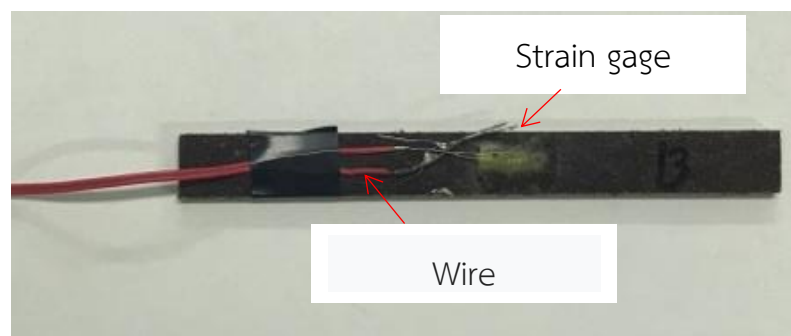
2) ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC)

การทดสอบแคลอริเมตรีแบบส่องกราดอนุพันธ์ โดยการนำวัสดุผสมไม้พลาสติกไปทดสอบด้วยเครื่องแคลอริเมตรีแบบส่องกราดอนุพันธ์ (Differential Scanning Calorimetry, DSC-7, Perkin Elmer) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (10 - 20 มิลลิกรัม) ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 240 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำค่าการหลอมและการตกผลึก (Δ_{hf} และ Δ_{hc}) ความจุความร้อน ดิกรีของการบ่มของพอลิเมอร์ที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่เกิดผลึกของวัสดุผสมดังสมการที่ 2.1

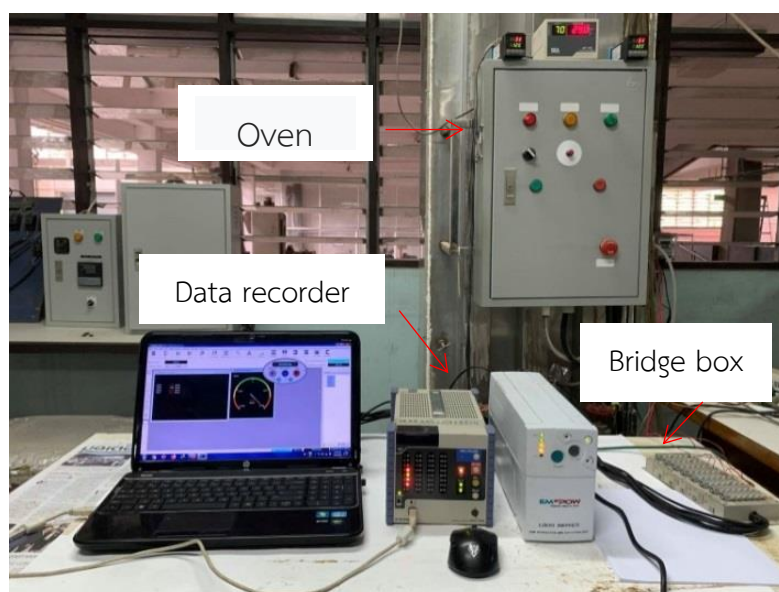
3) การทดสอบสมบัติการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุผสม

การทดสอบการขยายตัวทางความร้อน เป็นการนำตัวอย่างไม้พลาสติกที่ได้มาทดสอบโดยผ่านกระบวนการให้ความร้อน 5 ซ้ำ โดยนำชิ้นงานที่ทดสอบไปติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุ (Strain gage, Kyowa, model KFP-5-120-C1-65) ดังรูปที่ 3.20 จากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานของอุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุ เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ แล้วทำการติดตั้งเทอร์โมคอปเปอร์ (K type) ให้ติดกับตัวชิ้นงาน เพื่อตรวจจับอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานระหว่างดำเนินการต่อไปนำชิ้นงานที่ผ่านการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุ และเทอร์โมคอปเปอร์ไปติดตั้งไว้ในตู้อบ จากนั้นให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ 5 นาที

ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 150 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าความเครียดที่ได้จะถูกส่งผ่านกล่องสะพาน (Universal bridge box, DBT-120A-8) เป็นสัญญาณไฟฟ้า และบันทึกไว้ด้วยเครื่องบันทึกค่า (Universal data recorder, EDX-100A-4H) ดังรูปที่ 3.21 จากนั้นนำค่าความเครียดที่ได้ไปใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนได้ดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 3.20 อุปกรณ์ทดสอบความเครียดในเนื้อวัสดุสำหรับพลาสติก



รูปที่ 3.21 ชุดทดสอบการขยายตัวทางความร้อน

3.3.4 สมบัติการทดสอบการติดไฟ

การทดสอบสมบัติการด้านการติดไฟ โดยการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน (Horizontal Burning Test) และทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้ง (Vertical Burning Test) ตามมาตรฐาน UL-94 [8]

1) ทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้ง จะทำการเผาไหม้ชิ้นงานจากด้านล่างของชิ้นงาน โดยวางชิ้นงานตั้งฉากกับเปลวไฟ โดยการเผาไหม้ชิ้นงานนั้นจะทำการเผาสองครั้ง โดยแต่ละครั้งจะทำการเผา

ไฟเป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำตะเกียงเผาไหม้ ออก ปล่อยให้เปลวไฟลามผ่านจุดที่บันทึกไว้ เมื่อเปลวไฟผ่านมาถูกจุดที่บันทึกไว้ทำการจับเวลาจนเปลวไฟดับลง (t_1) จากนั้นทำการจุดไฟครั้งที่สองบันทึกค่าจนไฟดับลง (t_2) หลังจากทีเปลวไฟจากการจุดครั้งที่สองดับลงทำการจับเวลาอีกครั้ง โดยส่วนนี้จะเป็นการจับเวลาในการหดตัวของวัสดุหลังจากการติดไฟ (t_3) ซึ่งวัสดุที่ผ่านการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

(1) เกณฑ์ v-0 คือ เวลาของ t_1 หรือ t_2 ต้องต่ำกว่า 10 วินาที และเมื่อเวลาของ t_2 บวกกับ t_3 จะต้องมีเวลาน้อยกว่า 30 วินาที

(2) เกณฑ์ v-1 คือ เวลาของ t_1 หรือ t_2 ต้องต่ำกว่า 30 วินาที และเมื่อเวลาของ t_2 บวกกับ t_3 จะต้องมีเวลาน้อยกว่า 60 วินาที แต่ไม่เผาไหม้สำลีสที่แทนทดสอบ

(3) เกณฑ์ v-2 คือ เวลาของ t_1 หรือ t_2 ต้องต่ำกว่า 30 วินาที และเมื่อเวลาของ t_2 บวกกับ t_3 จะต้องมีเวลาน้อยกว่า 60 วินาที มีเผาไหม้สำลีสที่แทนทดสอบ หากไม่ผ่านเกณฑ์ในการทดสอบเกณฑ์ v-2 จะถือว่าไม่ผ่านการทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้งในแนวตั้ง

2) การทดสอบการเผาไหม้ทางแนวนอน จะเป็นการทดสอบหลังไม่ผ่านเกณฑ์การเผาไหม้แนวตั้ง โดยการยึดชิ้นงานทดสอบตามแนวนอน จากนั้นปรับท่อไฟ (Burning Tube) ให้มีความยาวของไฟประมาณ 2 เซนติเมตร และท่อไฟทำมุมกับพื้น 45 องศา ท่อไฟจ่อที่ปลายชิ้นงานทดสอบ โดยให้ระยะห่างปลายท่อไฟกับปลายชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 1 เซนติเมตร ทำจุดอ้างอิงไว้ที่ชิ้นงานทดสอบสองจุด จุดแรกคือ ที่ 25 มิลลิเมตร จากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ จุดที่สองคือที่จากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ นำท่อไฟออกจากชิ้นงานทดสอบ หลังจากไฟต่อที่ปลายชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 30 นาที และเริ่มจับเวลาหลังจากการเผาไหม้ผ่านจุดอ้างอิงที่ 25 มิลลิเมตร จากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ บันทึกเวลาเมื่อการเผาไหม้ถึงจุดอ้างอิงที่ 100 มิลลิเมตรจากจุดปลายของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นคำนวณอัตราการเผาไหม้ (Burning Rate) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะทางที่เผาไหม้ขึ้นทดสอบมีหน่วย เป็นมิลลิเมตร (mm) กับเวลาในการเผาไหม้มีหน่วยเป็นนาที (min) สมการการคำนวณอัตราการเผาไหม้แสดงดังสมการที่ 3.4

3.3.5 การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสม

การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยา การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมไม้พลาสติก โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM, โมเดล Quanta 400, FEI Company, Oregon, USA) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของเส้นใย และการยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับเส้นใย โดยก่อนทำการทดสอบ ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบปิดด้วยทองคำบริเวณผิวหน้า โดยการส่อง SEM ที่กำลังขยาย 50x 150x และ 500x

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีต ทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น สมบัติของวัสดุผสม พอลิโพรพิลีน เส้นใยธรรมชาติ การทดสอบสมบัติเชิงกล การทดสอบทางด้านความร้อน และด้านการติดไฟ เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยทำการศึกษาจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น อินเทอร์เน็ต บทความ และหน่วยงานต่าง ๆ เป็นต้น

3.4.2 จัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

1) เตรียมวัสดุที่ใช้ในการผสมของวัสดุผสม เช่น พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เส้นใยธรรมชาติ โดยรับเส้นใยกาบมะพร้าวจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยกาบมะพร้าว เส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมันจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม และรับซังของข้าวโพดที่เหลือจากอุตสาหกรรมโดยใช้ข้าวโพดชนิดสายพันธุ์ข้าวโพดหวาน นำไปทำการบดแล้วทำการดั่งเส้นใยออกมา ทำการตากแดดเส้นใยแต่ละประเภทเป็นเวลา 3 วัน

2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป และการทดสอบ เช่น เครื่องร่อนแยกขนาด เตาอบ เครื่องอัดรีดเกลียวคู่ เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน เครื่องทดสอบแรงดึง แรงอัด แรงกระแทก

3.4.3 การสร้างชิ้นงานทดสอบ

1) ทำการเตรียมเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติ (เส้นใยกาบมะพร้าว เส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน และ เส้นใยซังข้าวโพด) [7] ล้างด้วยน้ำกลั่นจนมี PH 6 - 7 [23] และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [8] จากนั้นนำไปบดละเอียดแล้วแยกขนาด โดยการใช้ตะแกรงขนาดตั้งแต่ 60 - 100 Mesh [33] แล้วนำไปทำการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการจัดเก็บโดยการบรรจุเพื่อรอการผสม

2) ทำการผสมวัสดุที่ได้เตรียมไว้ ตามอัตราส่วนที่กำหนดของวัสดุผสม คือ พลาสติก ร้อยละ 50, 60, 70 เส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติร้อยละ 25 - 28, 35 - 38 และ 45 - 48 สารเติมแต่งร้อยละ 1 - 4 และสารหล่อลื่นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะได้สูตรออกมาดังตารางที่ 3.1 จากนั้นทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยการเขย่าเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการจัดเก็บโดยการบรรจุเพื่อรอการขึ้นรูป

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนร้อยละของปริมาณเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ [31]

ลำดับ	สูตร	ชนิดไม้ (NF)	ปริมาณโพลี โพรพิลีนรี ไซเคิล (wt%)	ปริมาณเส้น ใยธรรมชาติ (wt%)	ปริมาณสารเติม แต่ง (MA)(wt%)	ปริมาณสาร หล่อลื่น (L) (wt%)
1	rPP70P25M4	ปาล์ม	70	25	4	1
2	rPP70P26M3	ปาล์ม	70	26	3	1
3	rPP70P27M2	ปาล์ม	70	27	2	1
4	rPP70P28M1	ปาล์ม	70	28	1	1
5	rPP60P35M4	ปาล์ม	60	35	4	1
6	rPP60P36M3	ปาล์ม	60	36	3	1
7	rPP60P37M2	ปาล์ม	60	37	2	1
8	rPP60P38M1	ปาล์ม	60	38	1	1
9	rPP50P45M4	ปาล์ม	50	45	4	1
10	rPP50P46M3	ปาล์ม	50	46	3	1
11	rPP50P47M2	ปาล์ม	50	47	2	1
12	rPP50P48M1	ปาล์ม	50	48	1	1
13	rPP70CO25M4	มะพร้าว	70	25	4	1
14	rPP70CO26M3	มะพร้าว	70	26	3	1
15	rPP70CO27M2	มะพร้าว	70	27	2	1
16	rPP70CO28M1	มะพร้าว	70	28	1	1
17	rPP60CO35M4	มะพร้าว	60	35	4	1
18	rPP60CO36M3	มะพร้าว	60	36	3	1
19	rPP60CO37M2	มะพร้าว	60	37	2	1
20	rPP60CO38M1	มะพร้าว	60	38	1	1
21	rPP50CO45M4	มะพร้าว	50	45	4	1
22	rPP50CO45M3	มะพร้าว	50	46	3	1
23	rPP50CO47M2	มะพร้าว	50	47	2	1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนร้อยละของปริมาณเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ [31] (ต่อ)

ลำดับ	สูตร	ชนิดไม้ (NF)	ปริมาณโพลีโพรพิลีนรีไซเคิล (wt%)	ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ (wt%)	ปริมาณสารเติมแต่ง (MA)(wt%)	ปริมาณสารหล่อลื่น (L) (wt%)
24	rPP50CO48M1	มะพร้าว	50	48	1	1
25	rPP70C25M4	ข้าวโพด	70	25	4	1
26	rPP70C26M3	ข้าวโพด	70	26	3	1
27	rPP70C27M2	ข้าวโพด	70	27	2	1
28	rPP70C28M1	ข้าวโพด	70	28	1	1
29	rPP60C35M4	ข้าวโพด	60	35	4	1
30	rPP60C36M3	ข้าวโพด	60	36	3	1
31	rPP60C37M2	ข้าวโพด	60	37	2	1
32	rPP60C38M1	ข้าวโพด	60	38	1	1
33	rPP50C45M4	ข้าวโพด	50	45	4	1
34	rPP50C46M3	ข้าวโพด	50	46	3	1
35	rPP50C47M2	ข้าวโพด	50	47	2	1
36	rPP50C48M1	ข้าวโพด	50	48	1	1

** ชิ้นงานตัวอย่าง rPP70P25M4 เกิดจากการผสมของ 70 wt% rPP, 25 wt% NF, 3 wt% MAPP, 1 wt% lub.

3) นำวัตถุดิบที่ได้จากการผสมไปขึ้นรูปโดยผ่านกระบวนการอัดรีดเกลียวหอนคู่ที่อุณหภูมิ 180 - 190 องศาเซลเซียส และความเร็วหมุนของเกลียวคือ 40 rpm จากนั้นผ่านกระบวนการตัดเม็ดเพื่อให้ได้เม็ดวัสดุผสมที่มีขนาดความยาวของเม็ดประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร

4) นำเม็ดพลาสติกที่ได้จากการผสมมาขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยแรงอัด 1,000 psi ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยการอุ่นชิ้นงานเป็นเวลา 10 นาที กดอัดร้อนขึ้นงานเป็นเวลา 15 นาที และ อัดเย็นขึ้นงานเป็นเวลา 30 นาที ให้มีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบ

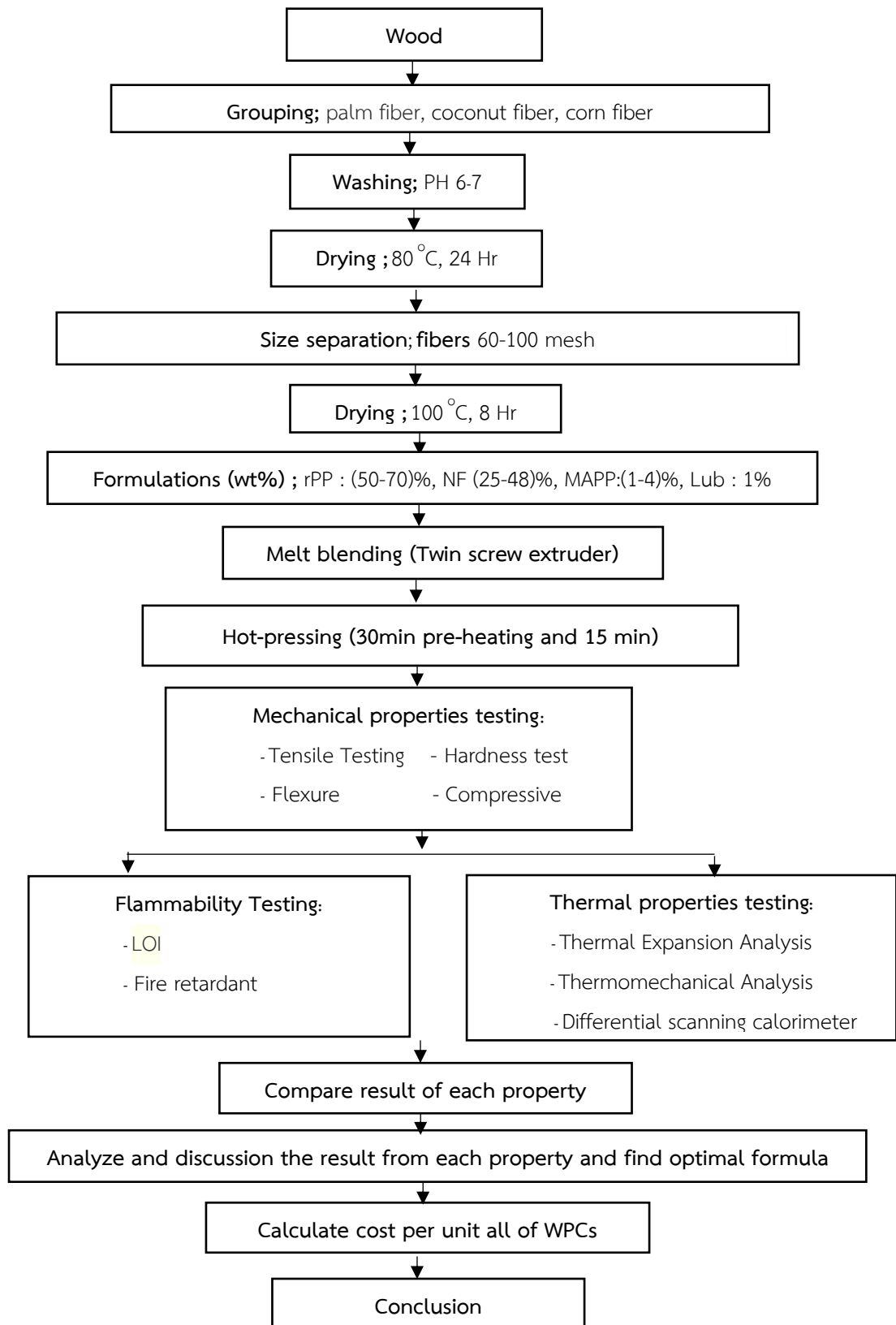
3.4.4 ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุผสม

เตรียมชิ้นงานทดสอบทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอกุ้ให้ชิ้นงานทดสอบมีลักษณะตามมาตรฐานการทดสอบแต่ละประเภท เช่น การทดสอบการตัด ASTM D790-92 การทดสอบการดึงตาม ASTM D638-99 การทดสอบการอัดตาม ASTM D6108-97 การทดสอบความแข็ง ASTM D2240-91 การทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ตาม ASTM D2900 การทดสอบการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนตาม ASTM D 635 การทดสอบการวิเคราะห์ความร้อนเชิงกล การทดสอบการหน่วงไฟของวัสดุตาม UL-97 [25] การทดสอบหาค่าปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟตาม ASTM D2863 [8] และการทดสอบความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D972-08

3.4.5 คำนวณต้นทุนรวมต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติก โดยการหาต้นทุนในการผลิต เพื่อต้องการทราบถึงต้นทุนวัตถุดิบทางตรง ซึ่งงานวิจัยนี้จะคำนวณต้นทุนในระดับห้องปฏิบัติการ

3.4.6 วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบวิเคราะห์ เพื่อเลือกสูตรไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วนผสมมีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งทำการตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์วัสดุไม้ทางการค้าสำหรับงานที่ทนความร้อน และทำการสรุปผลของการดำเนินงานวิจัย ซึ่งแผนผังการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนผังการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบสมบัติเชิงกลประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงดัด (Flexural Test) ความแข็งแรงดึง (Tensile Test) และความแข็งแรงอัด (Compressive Test) โดยใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณค่าทางสถิติและการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ F-ratio ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย วัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติ ชั่งข้าวโพดที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมสายพันธุ์ข้าวโพดหวาน เส้นใยปาล์มน้ำมันที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม และเส้นใยกาบมะพร้าวที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม โดยการผลิตเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติที่มีขนาดในการลอดผ่านตะแกรง 60 Mesh ซึ่งอัตราส่วนผสมของการทดสอบจะผสมพลาสติกร้อยละ 50, 60, 70 เส้นใยจากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติร้อยละ 25, 26, 27, 28, 35, 36, 37, 38, 45, 46, 47 และ 48 สารเติมแต่งร้อยละ 1 - 4 และสารหล่อลื่นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยผลจากการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมไม้พลาสติก

4.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัด

1) ผลของชนิดเส้นใยไม้ และปริมาณพลาสติก

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% และพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงที่สุด จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของเส้นใยธรรมชาติและปริมาณของพลาสติกในช่วงของขนาดเส้นใยธรรมชาติเดียวกัน คือ 70% โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่า สัดส่วน rPP70CO26M3 คือพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 70% โดยน้ำหนัก และสัดส่วนของเส้นใยกาบมะพร้าวที่ขนาด 26 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดัดที่มากกว่าสัดส่วน rPP70P26MA3 และ rPP70C26M3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงดัดจะมีปริมาณสูงตามปริมาณอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่สูงขึ้น เมื่อมีพลาสติกในปริมาณที่มากจะช่วยให้เส้นใยธรรมชาติสามารถกระจายตัวได้ดีส่งผลให้การยึดติดมากขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ดีที่สุดจึงเลือกสัดส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่มีขนาด 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่มีขนาด 26 wt% นอกจากนี้ จากผลการทดลองยังพบว่า วัสดุผสมที่ผสมเข้ากับเส้นใยกาบมะพร้าวนั้นให้ค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากเส้นใยกาบมะพร้าว มีปริมาณลิกนินที่สูงกว่าเส้นใยกาบทะเลปาล์มน้ำมัน และชั่งข้าวโพด ทำให้

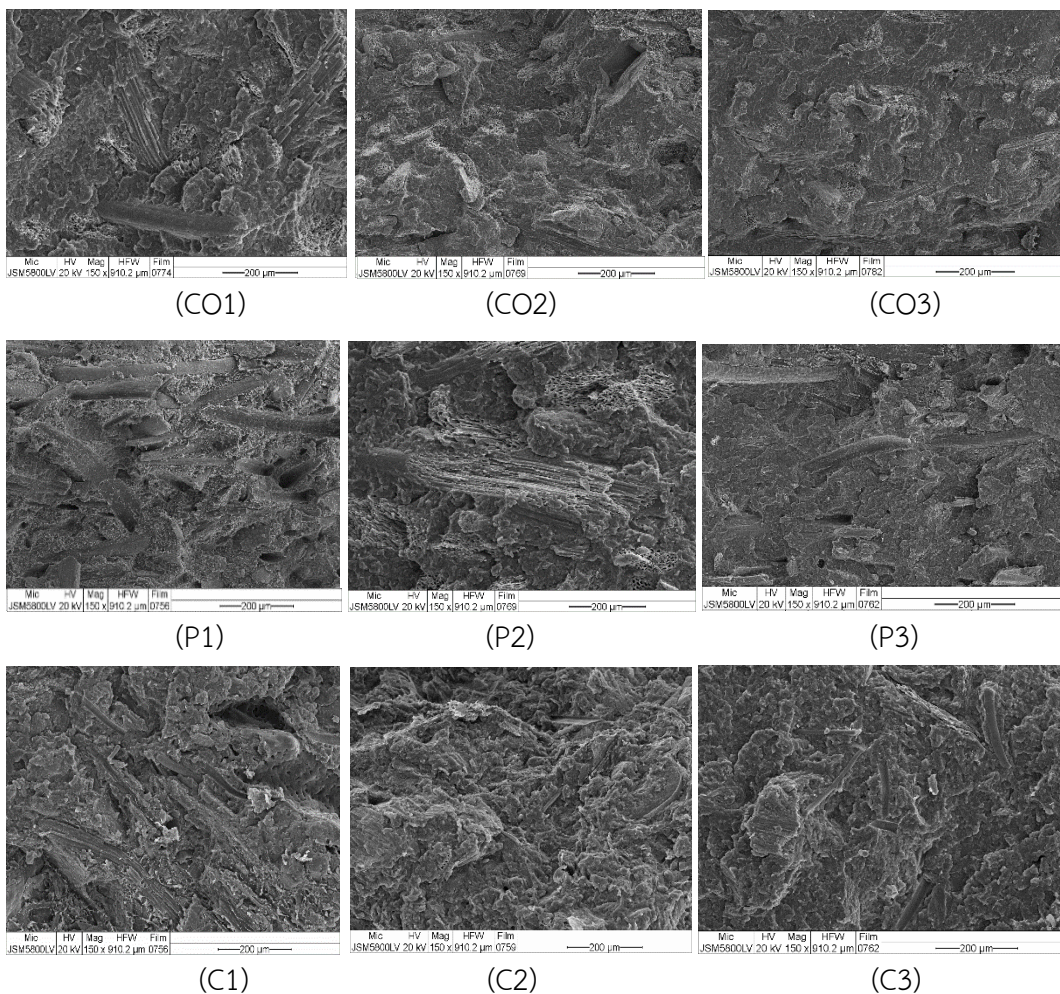
โครงสร้าง OH ของเส้นใยกาบมะพร้าวผสานเข้ากับเมทริกซ์พลาสติกได้มากกว่าไม้ชนิดอื่น จึงทำให้เส้นใยกาบมะพร้าวนั้นมีค่าแรงดัดที่สูงกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ

จากการศึกษาสูตรวัสดุไม้ผสมพลาสติกพบว่าค่ามอดูลัสแรงดัดให้ผลที่ตรงข้ามจากค่าความแข็งแรงดัด ซึ่งค่ามอดูลัสแรงดัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่มากขึ้น และมีสัดส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่น้อยที่ขนาด 50% โดยน้ำหนัก โดยจากรูปที่ 4.6 – 4.8 สัดส่วน rPP50CO46M3 คือพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 50% โดยน้ำหนัก และสัดส่วนของเส้นใยกาบมะพร้าวที่ขนาด 46 wt% มีค่ามอดูลัสแรงดัดสูงกว่าสัดส่วนอื่น เนื่องจากมอดูลัสแรงดัดเป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งเส้นใยไม้ที่เติมลงไปจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากและส่งผลให้ค่ามอดูลัสแรงดัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 4.6 การทดสอบพื้นฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณสารเติมแต่ง และปริมาณพลาสติก 70%โดยน้ำหนัก ของเส้นใยไม้ทั้ง 3 ชนิด (1) เส้นใยกาบมะพร้าว (2) เส้นใยกาบทะเลสาบปาล์ม (3) เส้นใยซังข้าวโพด พบว่า ที่เส้นใยกาบมะพร้าวมีช่องว่างระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติกที่น้อย เนื่องจากพลาสติกสามารถสอดแทรกเข้าไปผสมและสร้างพันธะกับเส้นใยกาบมะพร้าวได้ดีกว่าเส้นใยปาล์ม และเส้นใยซังข้าวโพด จึงทำให้วัสดุผสมที่ผสมเข้ากับเส้นใยกาบมะพร้าวนั้นมีค่าที่ดีที่สุด

2) ผลของปริมาณสารเติมแต่ง (MAPP)

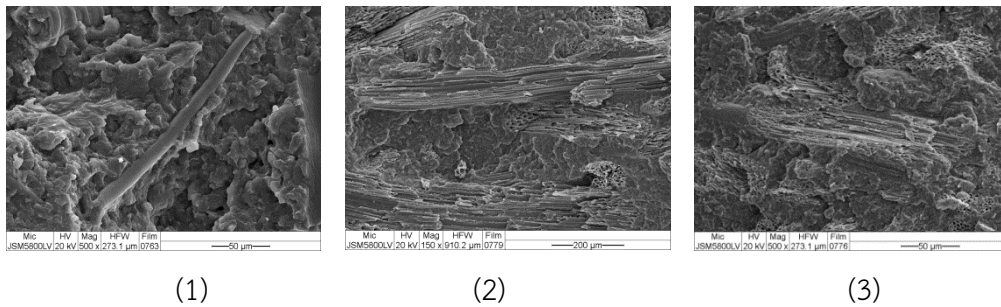
การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุไม้ผสมพลาสติก ทำการศึกษาปริมาณของสารเติมแต่งทั้ง 4 ระดับ โดยปริมาณสารเติมแต่งที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลนั้น ๆ ที่ดีที่สุดจะนำไปศึกษาชนิดและปริมาณของเส้นใยหรือสัดส่วนที่ให้ค่าที่ดีที่สุดต่อไป จากนั้นทำการทดสอบหาปริมาณ และสัดส่วนที่ให้ค่าที่ดีที่สุดในกลุ่มที่ศึกษาไปวิเคราะห์ปัจจัยของชนิดเส้นใยธรรมชาติที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล จากรูปที่ 4.1 – 4.6 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงดัดและมอดูลัสของวัสดุไม้ผสมพลาสติกที่สัดส่วนของสารเติมแต่งต่างกัน จากการทำซ้ำ 5 ครั้ง กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงดัดของไม้จากเส้นใยธรรมชาติที่มีอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 50% – 70% โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิโพรพิลีนที่ 70% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด และปริมาณของสารเติมแต่งพบว่าปริมาณสารเติมแต่งในระดับที่ 3 wt% ของทุกอัตราส่วนของพลาสติกที่ 50% 60% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงดัดที่สูงตามลำดับ เช่นเดียวกันกับค่ามอดูลัสแรงดัด ที่อัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสแรงดัดสูงสุดในทุกขนาดของพลาสติก และปริมาณของสารเติมแต่งพบว่าปริมาณสารเติมแต่งในระดับที่ 3 wt% ให้ค่ามอดูลัสแรงดัดสูงสุดในทุกขนาดของพลาสติกที่ 60% และ 70% โดยน้ำหนัก จะให้ค่ามอดูลัสแรงดัดที่สูงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับโครงสร้างพื้นฐานวิทยาในรูปที่ 4.1 (C1 P1 CO1) แสดงวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติที่สารเติมแต่งปริมาณ

3% และปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยไม่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติก และ รูปที่ 4.1 (C3 P3 CO3) แสดงวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติที่สารเติมแต่งปริมาณ 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าการกระจุกตัวกันเป็นก้อนของเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความร้อนขณะขึ้นรูป ซึ่งมีความสัมพันธ์งานวิจัยของ Li [36] ที่กล่าวว่าปริมาณพลาสติกที่แตกต่างกันจะให้สมบัติของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่แตกต่างกัน หากมีปริมาณพลาสติกที่น้อยจะทำให้พลาสติกกับเส้นใยธรรมชาติจะไม่สามารถรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวได้ ก่อให้เกิดช่องว่างภายในระหว่างวัสดุ จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลง

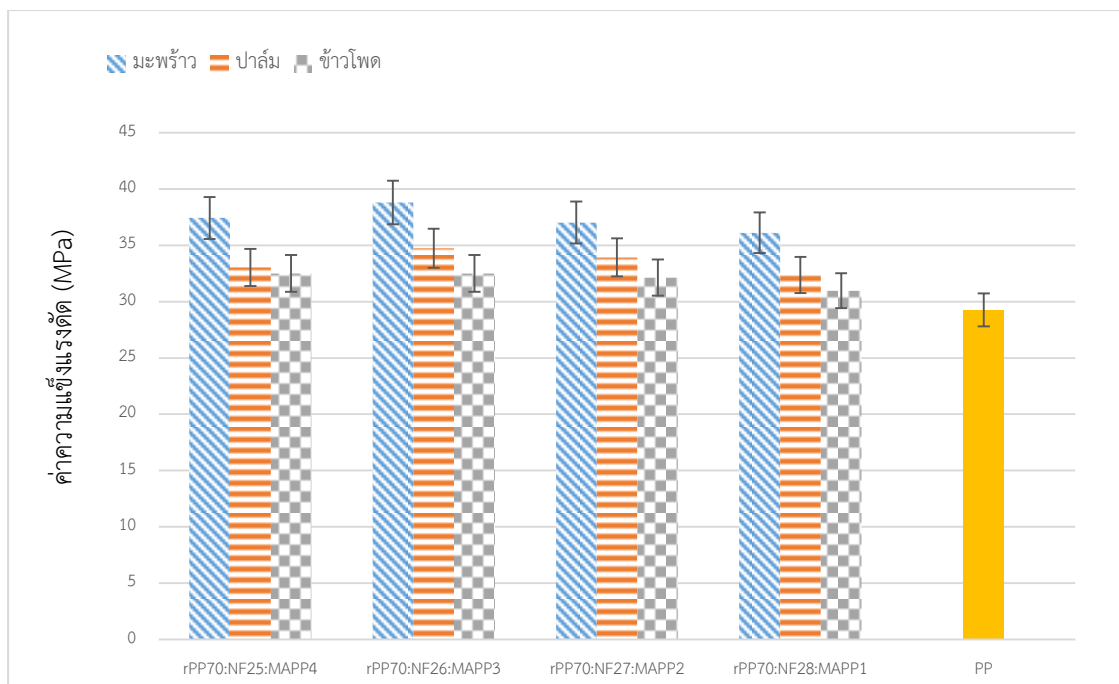


หมายเหตุ : (CO) เส้นใยกามะพร้าว (P) เส้นใยจากทะเลสาบปาล์ม (C) เส้นใยชังข้าวโพด

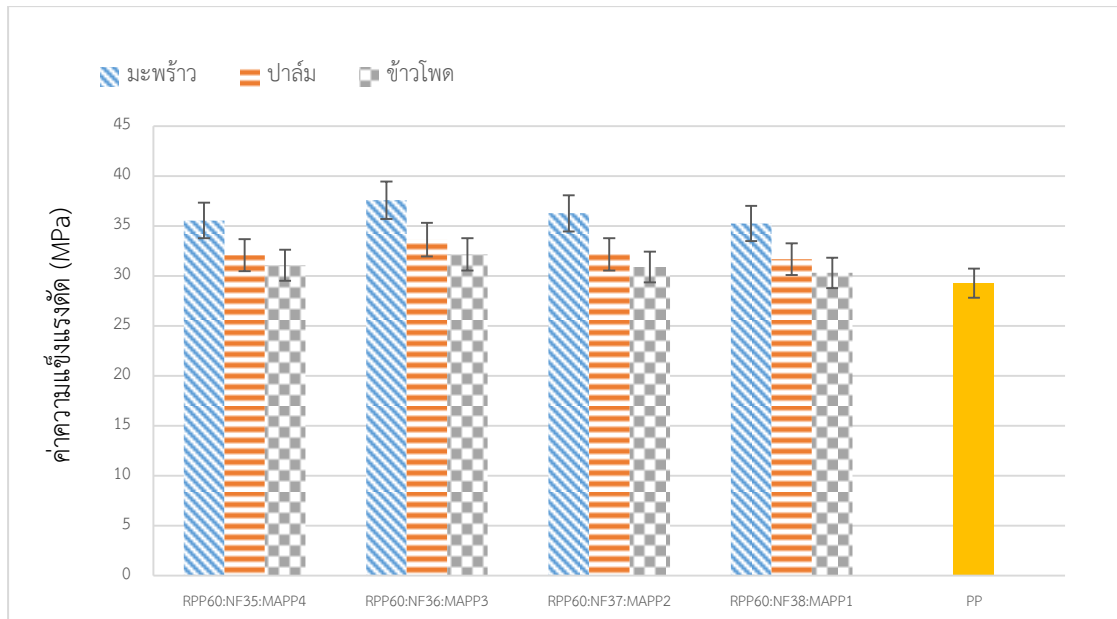
รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณสารเสริมแต่ง 3% และกำลังขยาย 150x (C1 P1 CO1) ที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก (C2 P2 CO2) ที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก (C3 P3 CO3) ที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก (7-9) ที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ปริมาณสารเสริมแต่ง 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 500x (1) เส้นใยคาบมะพร้าว (2) เส้นใยกาทะลายปาล์ม (3) เส้นใยซังข้าวโพด

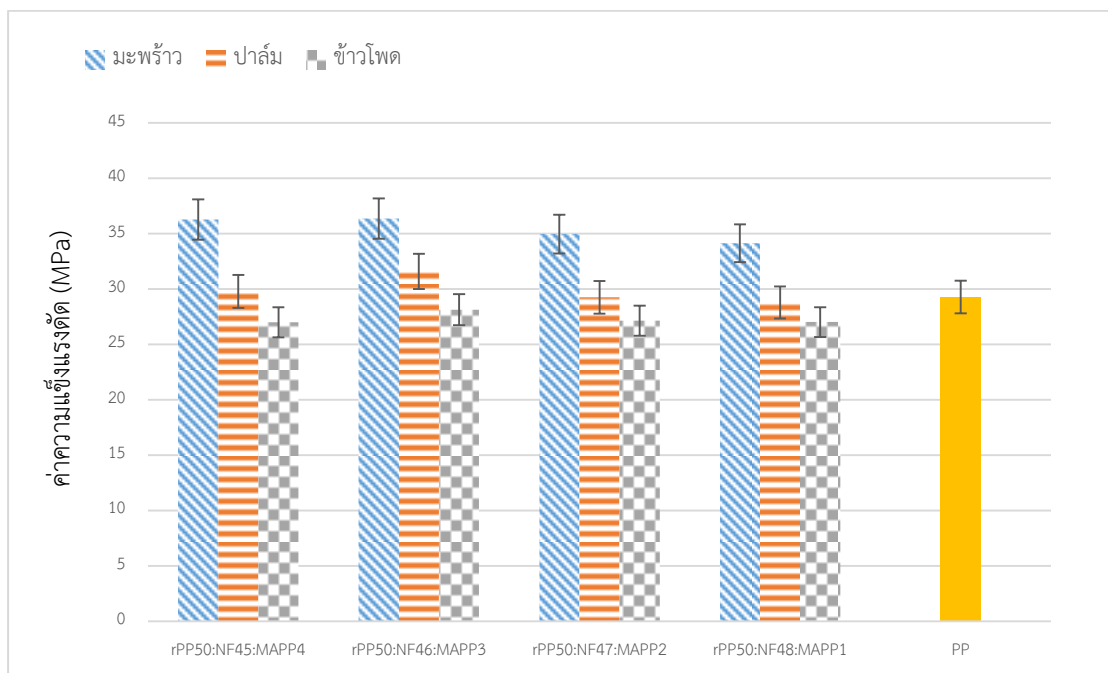


รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก
หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



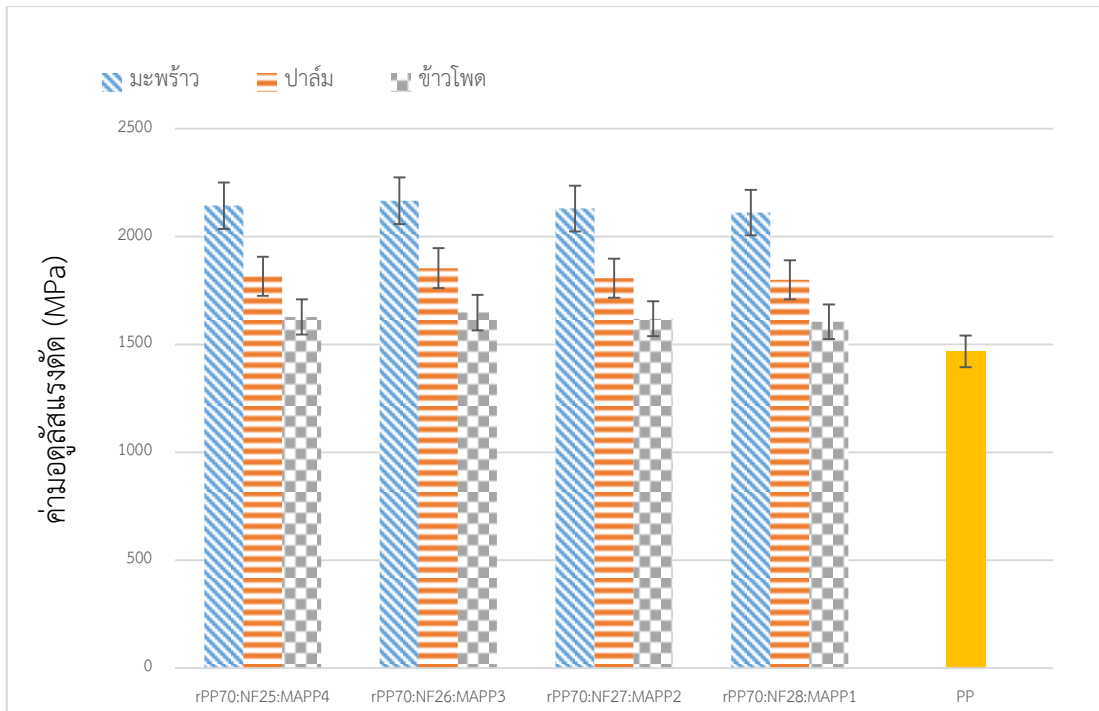
รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงตดที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเสริมแต่ง



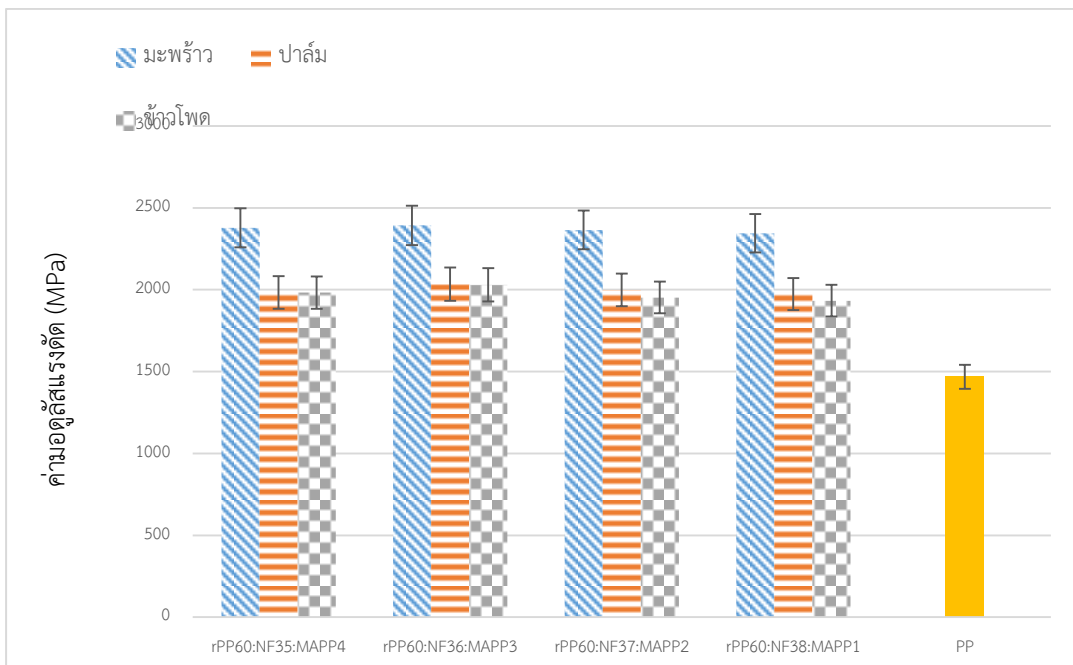
รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงตดที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเสริมแต่ง



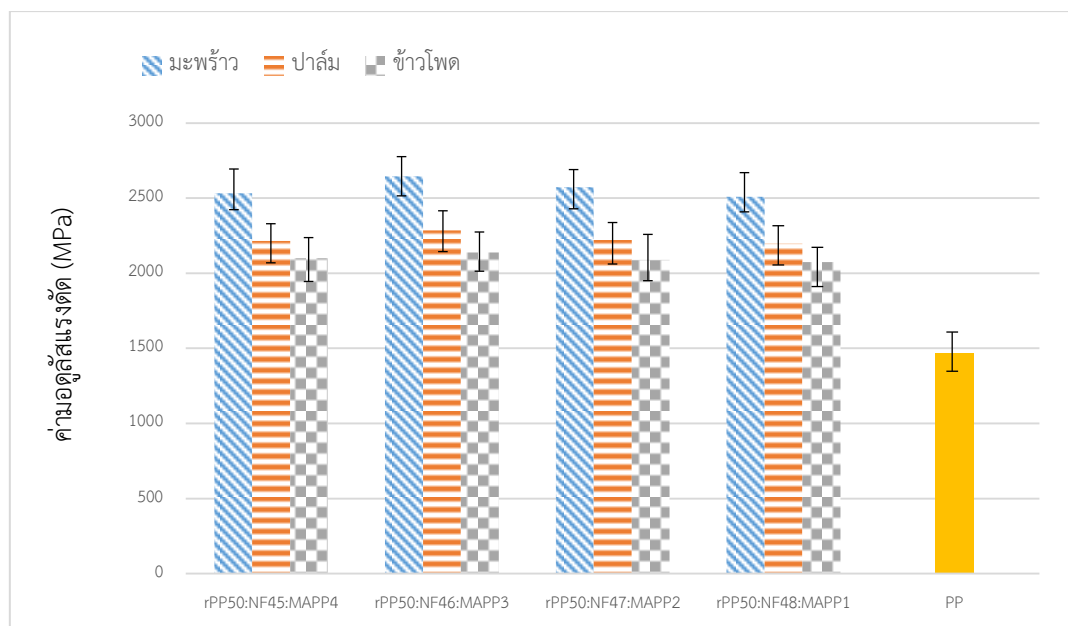
รูปที่ 4.6 ค่ามอดูลัสแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.7 ค่ามอดูลัสแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.8 ค่ามอดูลัสแรงดัดที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง

4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สถิติทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณค่าทางสถิติ และทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง General Full Factorial ที่ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบ ANOVA และการพิจารณาสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ดังต่อไปนี้

1) ผลการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบ

ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งประกอบด้วยความเป็นอิสระของข้อมูล ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูลซึ่งต้องทำการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติของสมบัติความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ที่ได้เป็นในทางทิศเดียวกัน กล่าวคือ ข้อมูลแต่ละตัวที่นำมาทำการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน ข้อมูลที่นำมาพิจารณามีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลมีความเสถียรของค่าความแปรปรวน โดยรายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก

(1) ความเป็นอิสระของข้อมูล

ความเป็นอิสระของข้อมูลต้องพิจารณาจากกราฟว่ามีการกระจายตัวที่ไม่สามารถทำนายได้ว่ามีแนวโน้มหรือทิศทางเป็นอย่างไร จากรูปที่ 4.9 พบว่ากราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางเคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั่นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน

(2) ความเป็นปกติของข้อมูล

การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลเพื่อทำการตรวจสอบว่าข้อมูลที่สุ่มเก็บมามีแนวโน้มเข้าหาค่าคงที่ที่ค่าหนึ่งที่จะเป็นหรือไม่ เนื่องจากสาเหตุของการเฉื่อยออกของสิ่งที่ไม่ได้รับการควบคุม และมีการกระจายเป็นลักษณะแบบสมมาตร เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ Normal Probability Plot : NOOP ถ้าหากเป็นการแจกแจงปกติกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งถ้าข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติจะทำให้ข้อมูลชุดนั้นไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ ซึ่งในการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 แสดงดังรูปภาพที่ 4.10 ผลการทดสอบค่าความแข็งแกร่งตัด โดยมีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

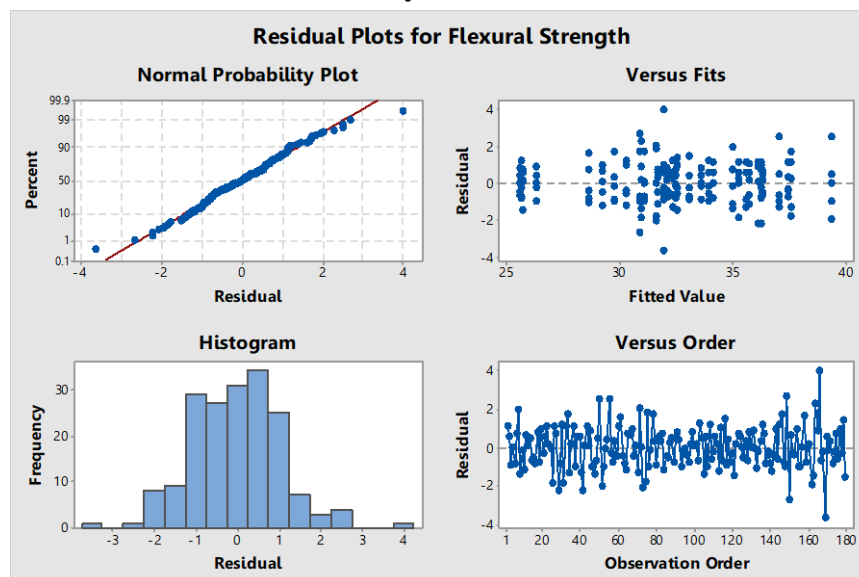
H_0 : ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

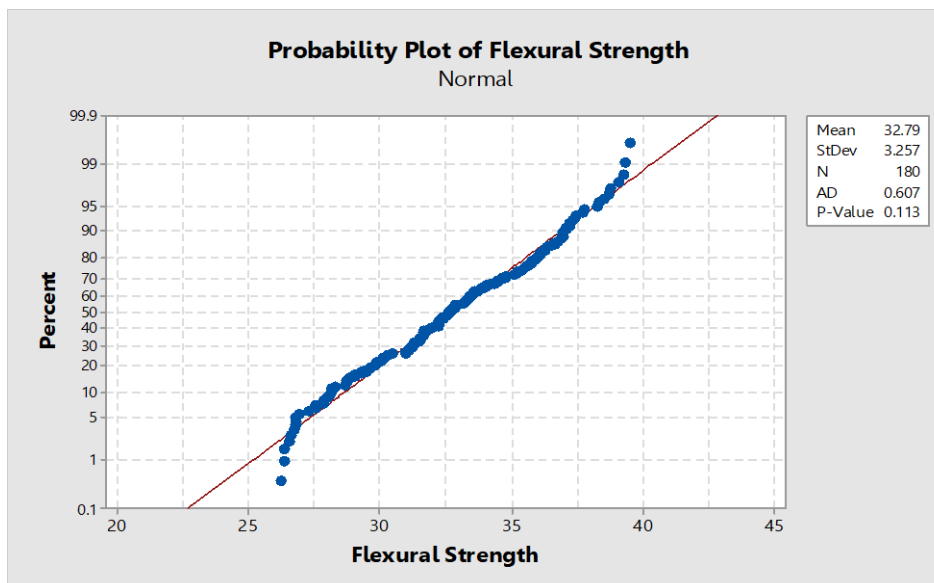
จากรูปที่ 4.10 พบว่าการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลที่เก็บมามีกราฟเป็นลักษณะเส้นตรงเส้นหนึ่ง และค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.113 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ดังนั้นแสดงว่าข้อมูลนี้มีการแจกแจงแบบปกติ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้

(3) ความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล

ความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนเป็นการสังเกตค่าความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีค่าการกระจายตัวรอบค่าศูนย์คลาดเคลื่อนสม่ำเสมอมากน้อยหรือไม่ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.9 ข้อมูลมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ดังนั้นข้อมูลจึงมีความเสถียรของค่าความแปรปรวน



รูปที่ 4.9 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบผลการทดสอบค่าความแข็งแกร่งตัด



รูปที่ 4.10 Normal Probability Plot of Flexural Strength

2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อให้เป็นการเข้าใจในการวิเคราะห์โดยง่าย จึงทำการยกตัวอย่างวิธีการวิเคราะห์เฉพาะสมบัติความแข็งแรงดัดเพียงอย่างเดียว โดยมีการตั้งสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานที่ใช้ทดสอบ

1. $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3$
 $H_1: \text{At least one } \tau_i \neq 0$
2. $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$
 $H_1: \text{At least one } \beta_j \neq 0$
3. $H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3$
 $H_1: \text{At least one } \gamma_k \neq 0$
4. $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$ ทุกค่าของ i, j
 $H_1: \text{At least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$
5. $H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0$ ทุกค่าของ i, k
 $H_1: \text{At least one } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$
6. $H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$ ทุกค่าของ j, k
 $H_1: \text{At least one } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$
7. $H_0: (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0$ ทุกค่าของ i, j, k
 $H_1: \text{At least one } (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$

3) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงดัด

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดัด

General Factorial Regression: Flexural Strength versus Species, Volume, Additive

Factor Information

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volume	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	1754.77	50.136	50.06	0.000
Linear	7	1674.06	239.151	238.80	0.000
Species	2	1206.89	603.443	602.56	0.000
Volume	2	366.57	183.283	183.01	0.000
Additive	3	100.60	33.535	33.49	0.000
2-Way Interactions	16	68.89	4.306	4.30	0.000
Species*Volume	4	57.98	14.494	14.47	0.000
Species*Additive	6	6.11	1.018	1.02	0.417
Volume*Additive	6	4.81	0.801	0.80	0.572
3-Way Interactions	12	11.82	0.985	0.98	0.467
Species*Volume*Additive	12	11.82	0.985	0.98	0.467
Error	144	144.21	1.001		
Total	179	1898.98			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.00073	92.41%	90.56%	88.13%

จากตารางที่ 4.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 92.41% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาณสารเติมแต่ง 92.41% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 7.59%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก ต่างมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 โดยมีค่า P-value < 0.05 หมายความว่า

ว่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.417, 0.572 และ 0.467 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่งไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสมมติฐานหลัก H_0 ทั้ง 3 ปัจจัยถูกปฏิเสธ ดังนั้นจึงทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีส่วนในการปฏิเสธ H_0 โดยใช้วิธี Tukey's HSD Test ซึ่งเป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยหลัก เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรคู่ไหนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และตัวแปรใดที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นมากที่สุด ซึ่งลำดับในการวิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยหลัก จะไล่ลำดับจากปัจจัยชนิดไม้ ปัจจัยปริมาณของพลาสติก และสิ้นสุดที่ปัจจัยปริมาณสารเติมแต่ง เพื่อสอดคล้องกับผลข้างต้น

จากการอธิบายผลข้างต้นที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดัดที่สูงกว่าปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% จากตารางที่ 4.2 เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยภายในของช่วงปริมาณสารเติมแต่งด้วยวิธี ANOVA ซึ่งอ่านค่าจากตารางได้ดังนี้ ไม้มะพร้าว ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก มีค่า P-value = 0.006 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ค่าความแข็งแรงดัดแตกต่างกันตามช่วงปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt%, 2 wt%, 3 wt% และ 4 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดัด 34.12, 34.96, 36.34 และ 36.26 MPa ตามลำดับ กล่าวคือ ความแข็งแรงดัดที่ช่วงปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt% และ 2 wt% ที่มีตัวอักษร b หมายความว่า ความแข็งแรงดัดที่ช่วงปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt% และ 2 wt% ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% และ 4 wt% มีตัวอักษร a หมายความว่า ความแข็งแรงดัดที่ช่วงปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% และ 4 wt% แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับความแข็งแรงดัดจากปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt% และ 2 wt%

จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.2 พบว่าที่มะพร้าว 50% และ 70%, ปาล์ม 50%, 60% และ 70% และข้าวโพด 50% โดยน้ำหนัก มีค่า P-value < 0.05 คือ 0.006, 0.012, 0.013, 0.002, 0.006 และ 0.031 ตามลำดับ และเมื่อจับคู่ตัวแปรปริมาณสารเติมแต่งภายในเงื่อนไขเดียวกันเพื่อหาความแตกต่างด้วยวิธี Tukey's HSD Test จะพบว่า ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณพลาสติกด้วยวิธี Tukey's HSD Test และทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ตามผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA ดังในตารางที่ 4.3 พบว่าค่า P-value < 0.05 ในทุกเงื่อนไข นั้นหมายความว่าปริมาณพลาสติกมีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างตัวแปรภายในปัจจัยหลักด้วยวิธีเดียวกัน พบว่า ปริมาณพลาสติกทั้ง 3 ปริมาณ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดัดที่สูงกว่า ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 60% และ 50% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดไม้ด้วยวิธี Tukey's HSD Test โดยทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่า P-value < 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลักพบว่า เส้นใยกาบมะพร้าวให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด คือ 38.8 MPa และเส้นใยชังข้าวโพดให้ค่าความแข็งแรงดัดต่ำที่สุดที่ 32.5 MPa และผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการวิเคราะห์ภายในกลุ่มปัจจัยหลักพบว่าผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยกาบมะพร้าว ที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% หรือสัดส่วน rPP70COM3 ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว			ปาล์ม			ข้าวโพด		
	ปริมาณพลาสติก (%โดยน้ำหนัก)								
ปริมาณสารเติมแต่ง	50	60	70	50	60	70	50	60	70
1	34.12 ^b	35.26 ^a	36.1 ^b	28.78 ^b	31.68 ^b	32.36 ^b	27 ^{ab}	30.3 ^b	30.96 ^a
2	34.96 ^{ab}	36.26 ^a	37.02 ^{ab}	29.24 ^b	32.16 ^b	33.92 ^{ab}	27.12 ^{ab}	30.88 ^{ab}	32.12 ^a
3	36.34 ^a	37.58 ^a	38.8 ^a	31.58 ^a	33.62 ^a	34.74 ^a	28.12 ^a	32.16 ^{ab}	32.5 ^a
4	36.26 ^a	35.54 ^a	37.42 ^{ab}	29.78 ^{ab}	32.08 ^b	33.02 ^{ab}	26.98 ^b	31.08 ^a	32.5 ^a
P-value	0.006 [*]	0.054	0.012 [*]	0.013 [*]	0.002 [*]	0.006 [*]	0.031 [*]	0.061	0.055

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)

ชนิดไม้ ปริมาณ พลาสติก	มะพร้าว				ปาล์ม				ข้าวโพด			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
50	34.12 ^b	34.96 ^a	36.34 ^b	36.26 ^{ab}	28.78 ^b	29.24 ^c	31.58 ^b	29.78 ^b	27 ^b	27.12 ^b	28.12 ^b	26.98 ^b
60	35.26 ^{ab}	36.26 ^a	37.58 ^{ab}	35.54 ^b	31.68 ^a	32.16 ^b	33.62 ^{ab}	32.08 ^a	30.3 ^a	30.88 ^a	32.16 ^a	31.08 ^a
70	36.1 ^a	37.02 ^a	38.8 ^a	37.42 ^a	32.36 ^a	33.92 ^a	34.74 ^a	33.02 ^a	30.96 ^a	32.12 ^a	32.5 ^a	32.5 ^a
P-value	0.05	0.131	0.007 [*]	0.020 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.008 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงตัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)

ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
มะพร้าว	34.12 ^a	34.96 ^a	36.34 ^a	36.26 ^a	35.26 ^a	36.26 ^a	37.58 ^a	35.54 ^a	36.1 ^a	37.02 ^a	38.8 ^a	37.42 ^a
ปาล์ม	28.78 ^b	29.24 ^b	31.58 ^b	29.78 ^b	31.68 ^b	32.16 ^b	33.62 ^b	32.08 ^b	32.36 ^b	33.92 ^b	34.74 ^b	33.02 ^b
ข้าวโพด	27 ^c	27.12 ^c	28.12 ^c	26.98 ^c	30.3 ^b	30.88 ^b	32.16 ^b	31.08 ^b	30.96 ^b	32.12 ^b	32.5 ^c	32.5 ^b
P-value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

4) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่ามอดูลัสแรงดัด

จากตารางที่ ก 2.1 (ภาคผนวก ก) พบว่าสมมติฐานหลัก H_0 ทั้ง 3 ปัจจัยถูกปฏิเสธ ดังนั้นจึงทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีส่วนในการปฏิเสธ H_0 โดยใช้วิธี Tukey's HSD Test ซึ่งเป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยหลัก เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรคู่ไหนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และตัวแปรใดที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นมากที่สุด ซึ่งลำดับในการวิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยหลัก จะไล่ลำดับจากปัจจัยชนิดไม้ ปัจจัยปริมาณของพลาสติก และสิ้นสุดที่ปัจจัยปริมาณสารเติมแต่ง เพื่อสอดคล้องกับผลข้างต้น

จากการทดสอบมอดูลัสแรงดัดในตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรแต่ละคู่ของปริมาณสารเติมแต่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จากการวิเคราะห์ ANOVA พบเงื่อนไขที่มีค่า P-value > 0.05 จำนวน 2 เงื่อนไข คือ 0.371 และ 0.064 จากนั้นทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสารเติมแต่งอีก 3 ขนาด และปริมาณสารเติมแต่ง 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ให้ค่ามอดูลัสแรงดัดสูงที่สุด ขณะที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ให้ค่ามอดูลัสแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งแรงดัด

ทำการวิเคราะห์ปริมาณพลาสติกด้วยวิธี Tukey's HSD Test และทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ตามผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA ดังในตารางที่ 4.6 พบว่าค่า P-value < 0.05 ในทุกเงื่อนไข นั้นหมายความว่าปริมาณพลาสติกมีผลต่อค่าความแข็งแรงดัดมากกว่าปัจจัยหลักอีก 2 ปัจจัย และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างตัวแปรภายในปัจจัยหลักด้วยวิธีเดียวกัน พบว่า ปริมาณพลาสติกทั้ง 3 ปริมาณ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสแรงดัดที่สูงกว่า ปริมาณพลาสติกที่ 60% และ 70% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือ ค่ามอดูลัสแรงดัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกมีปริมาณลดลง

จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดไม้ด้วยวิธี Tukey's HSD Test โดยทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.7 พบว่าค่า P-value < 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลักพบว่า เส้นใยกาบมะพร้าวให้ค่ามอดูลัสแรงดัดสูงสุด คือ 2522.1 MPa และเส้นใยซังข้าวโพดให้ค่ามอดูลัสแรงดัดต่ำที่สุดที่ 1647.8 MPa และผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการวิเคราะห์ภายในกลุ่มปัจจัยหลักพบว่าผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยกาบมะพร้าว ที่ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดย

น้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% หรือสัดส่วน rPP50COM3 ให้ค่ามอดูลัสแรงดัดสูงที่สุด

ตารางที่ 4.5 ค่ามอดูลัสแรงดัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว			ปาล์ม			ข้าวโพด		
	ปริมาณพลาสติก (%โดยน้ำหนัก)								
ปริมาณสารเติมแต่ง	50	60	70	50	60	70	50	60	70
1	2508.60 ^a	2344.46 ^a	2111.66 ^a	2197.64 ^a	1973.28 ^a	1799.90 ^a	2074.70 ^a	1933.02 ^b	1605.52 ^b
2	2572.98 ^a	2364.52 ^a	2130.12 ^a	2221.42 ^a	1998.86 ^a	1807.54 ^a	2090.12 ^a	1952.76 ^b	1619.14 ^{ab}
3	2646.18 ^a	2392.88 ^a	2166.08 ^a	2285.42 ^a	2033.72 ^a	1853.60 ^a	2138.16 ^b	2029.90 ^a	1647.84 ^a
4	2531.54 ^a	2377.78 ^a	2123.38 ^a	2243.92 ^a	1983.12 ^a	1815.76 ^a	2099.88 ^a	1982.64 ^b	1627.14 ^b
P-value	0.371	0.046 ^{**}	0.0614	0.018 ^{**}	0.005 ^{**}	0.03 ^{**}	0.000 ^{**}	0.000 ^{**}	0.009 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

** ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง ที่เงื่อนไขเส้นใยกาบมะพร้าว ที่ปริมาณพลาสติก 50% และ 60% โดยน้ำหนัก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P=0.000$ และภายในเงื่อนไขเดียวกันที่มีอักษรต่างกัน

ตารางที่ 4.6 ค่ามอดูลัสแรงดัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว				ปาล์ม				ข้าวโพด			
ปริมาณพลาสติก	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
50	2508.60 ^a	2572.98 ^a	2646.18 ^a	2531.54 ^a	2197.64 ^a	2221.42 ^a	2285.42 ^a	2243.92 ^a	2074.70 ^a	2090.12 ^a	2138.16 ^a	2099.88 ^a
60	2344.46 ^b	2364.52 ^b	2392.88 ^b	2377.78 ^b	1973.28 ^a	1998.86 ^b	2033.72 ^b	1983.12 ^b	1933.02 ^b	1952.76 ^b	2029.90 ^b	1982.64 ^b
70	2111.66 ^c	2130.12 ^c	2166.08 ^c	2123.38 ^c	1799.9 ^b	1807.54 ^c	1853.6 ^c	1815.7 ^c	1605.52 ^c	1619.14 ^a	1647.84 ^c	1627.14 ^c
P-value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.7 ค่ามอดูลัสแรงดัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)

ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
มะพร้าว	2508.6 ^a	2572.98 ^a	2646.18 ^a	2531.54 ^a	2344.46 ^a	2364.52 ^a	2392.88 ^a	2377.78 ^a	2111.66 ^b	2130.1 ^a	2166.1 ^b	2123.3 ^a
ปาล์ม	2197.64 ^b	2221.4 ^b	2285.42 ^b	2243.92 ^b	1973.28 ^a	1998.86 ^b	2033.72 ^b	1983.12 ^b	1799.9 ^c	1807.5 ^b	1853.6 ^c	1815.7 ^b
ข้าวโพด	2074.70 ^b	2090.12 ^c	2138.16 ^c	2099.88 ^c	1933.02 ^b	1952.76 ^c	2029.90 ^b	1982.64 ^c	1605.52 ^a	1619.14 ^c	1647.84 ^a	1627.14 ^a
P-value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

4.1.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง

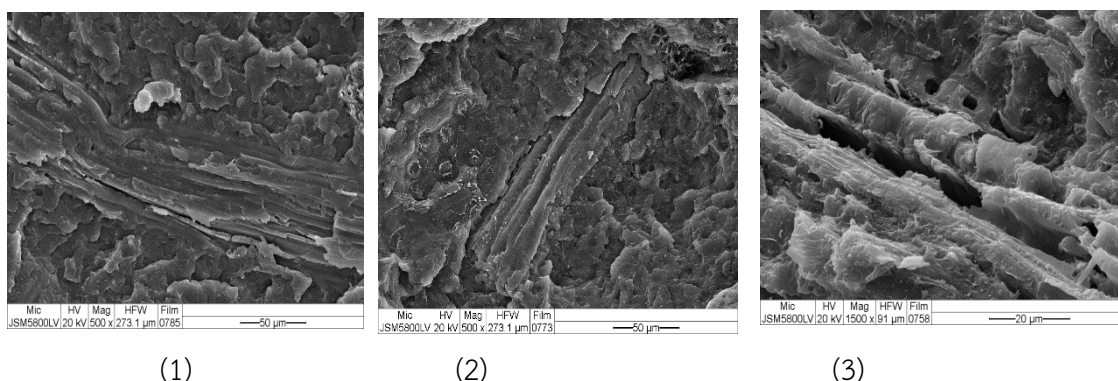
1) ผลของชนิดเส้นใยไม้ และปริมาณพลาสติก

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ปริมาณสารเติมแต่งระดับที่ 3 wt% และพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงสุดในปริมาณสารเติมแต่งทั้ง 4 ระดับ จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของปริมาณเส้นใยธรรมชาติในช่วงขนาดพลาสติกเดียวกันที่ 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งระดับที่ 3 wt% จากรูปที่ 4.12 – 4.17 จะเห็นได้ว่าสัดส่วน rPP70CO26 คือพลาสติกพอลิโพรพิลีน 70% โดยน้ำหนัก และสัดส่วนของเส้นใยกาบมะพร้าวที่ 26 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่มากกว่าสัดส่วน rPP70P26 และ rPP70C26 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบความแข็งแรงดัด จากรูปที่ 4.1 – 4.9 สรุปได้ว่าความแข็งแรงดัดและความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากปริมาณสัดส่วนของพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้น และในขณะที่มอดูลัสแรงดึง และดัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่มากขึ้น โดยพบว่าสัดส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณ 50% โดยน้ำหนักให้ค่ามอดูลัสที่ที่ดีที่สุด เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของเส้นใยธรรมชาติทำให้ค่าแรงดึงลดลง เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติในปริมาณที่สูงจะเกิดการกระจายไม่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติก ขึ้นอยู่กับความสามารถของความเค้นในการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยธรรมชาติมากขึ้นจะทำให้เข้าไปแทรกในสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นสาเหตุให้การเกี่ยวพันของสายโซ่ลดลง นอกจากนี้จากรูปที่ 4.10 – 4.12 พบว่าที่ rPP50CO46M3 คือพลาสติกพอลิโพรพิลีน 50% โดยน้ำหนัก และมีสัดส่วนของเส้นใยกาบมะพร้าวอยู่ 46 wt% ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นผลจากองค์ประกอบเคมีของเส้นใยกาบมะพร้าวที่มีปริมาณลิกนินสูงกว่าไม้ชนิดอื่น จึงสามารถยึดติดกับพลาสติกได้ดีกว่าไม้ชนิดอื่น นอกจากนี้ทางด้านโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.11 (1) – (3) พบว่าเส้นใยกาบมะพร้าวมีการกระจายที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ส่งผลให้พลาสติกสามารถแทรกเข้าไปในเส้นใยธรรมชาติ เพิ่มการยึดเกาะและช่วยในการกระจายแรง เมื่อทำการทดสอบเชิงกล

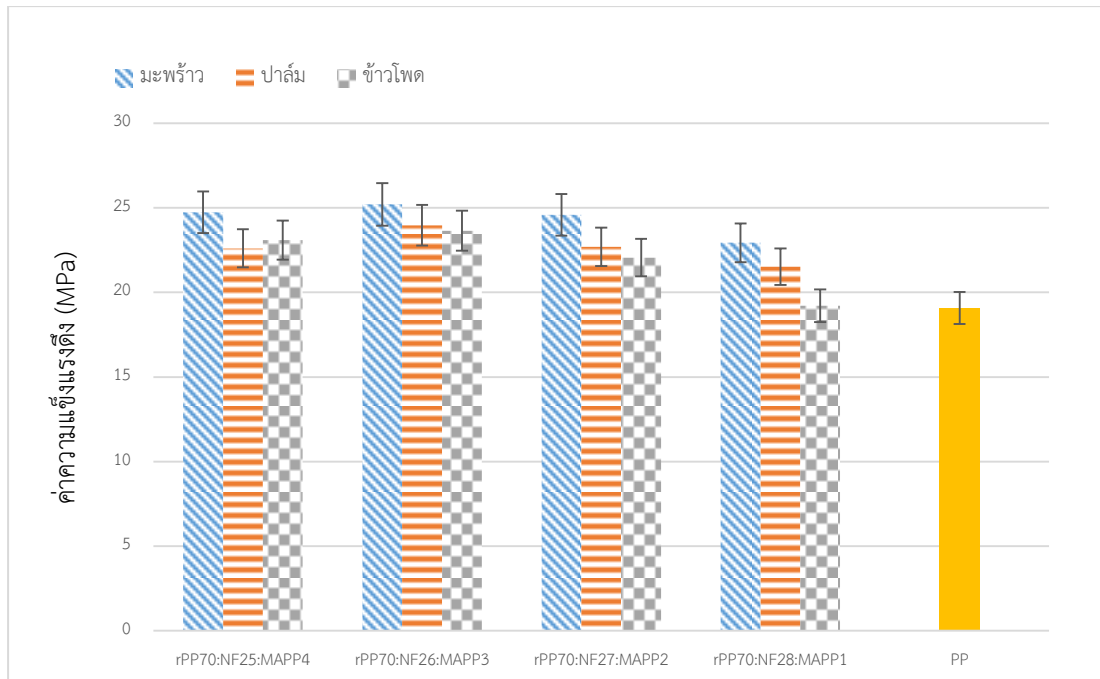
2) ผลของปริมาณสารเติมแต่ง (MAPP)

จากการนำค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติกที่มีระดับสารเติมแต่งทั้ง 4 ระดับ เพื่อมาศึกษาาระดับของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงที่ดีที่สุด จากรูปที่ 4.12 – 4.17 พบว่า ความแข็งแรงดึงในอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ 70% โดยน้ำหนัก และพบว่าที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% ของทุกอัตราส่วนของพลาสติกที่ 50% 60 % โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงในปริมาณพลาสติกเดียวกัน เช่นเดียวกันกับผลของการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดึงที่อัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงสูงสุดในทุกขนาด

ของพลาสติก และปริมาณของสารเติมแต่งพบว่าปริมาณสารเติมแต่งในระดับที่ 3 wt% ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงสูงสุดในทุกขนาดของพลาสติกที่ 60% 70% โดยน้ำหนัก จะให้ค่ามอดูลัสแรงดึงที่สูงตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพอลีน ที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3% และกำลังขยาย 150X ในรูปที่ 4.1 (C3 P3 CO3) ที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยธรรมชาติมีการกระจายตัวได้ดีในพลาสติก มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติก ในขณะที่รูปที่ 4.11 (1-3) ที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยธรรมชาติมีการกระจายตัวได้ไม่ดีในพลาสติก มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติกในรูปแบบของช่องว่าง เกิดการเสียดสีของผิวสัมผัสที่บริเวณรอยต่อทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง โดยงานวิจัย Leu และคณะ [37] ที่กล่าวว่าค่าความแข็งแรงดัด และค่าความแข็งแรงดึง ที่เพิ่มขึ้น มีผลจากขนาดปริมาณพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่โมดูลัสแรงดึงดัดและโมดูลัสแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณพลาสติกที่มีขนาดน้อยลงปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย Kaymakci และ Aynilmis [38] กล่าวว่า การเพิ่มปริมาณไม้ จะส่งผลต่อค่าแรงดึงลดลง

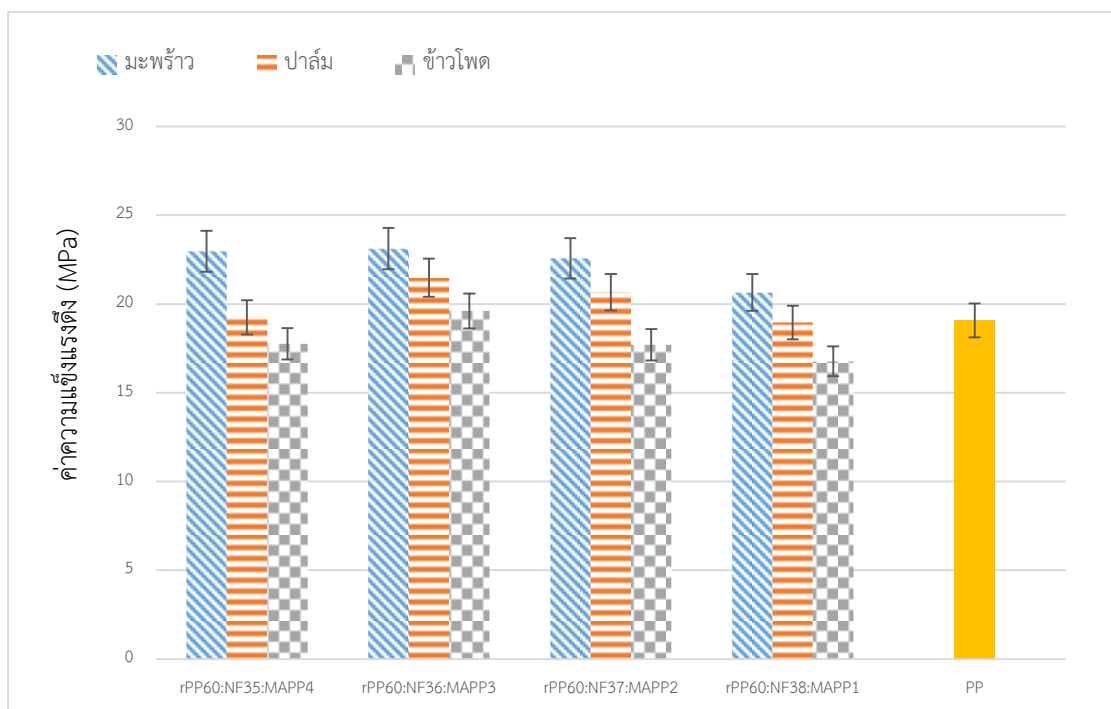


รูปที่ 4.11 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพอลีนที่ปริมาณสารเสริมแต่ง 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 500x (1) เส้นใยมะพร้าว (2) เส้นใยปาล์ม (3) เส้นใยข้าวโพด



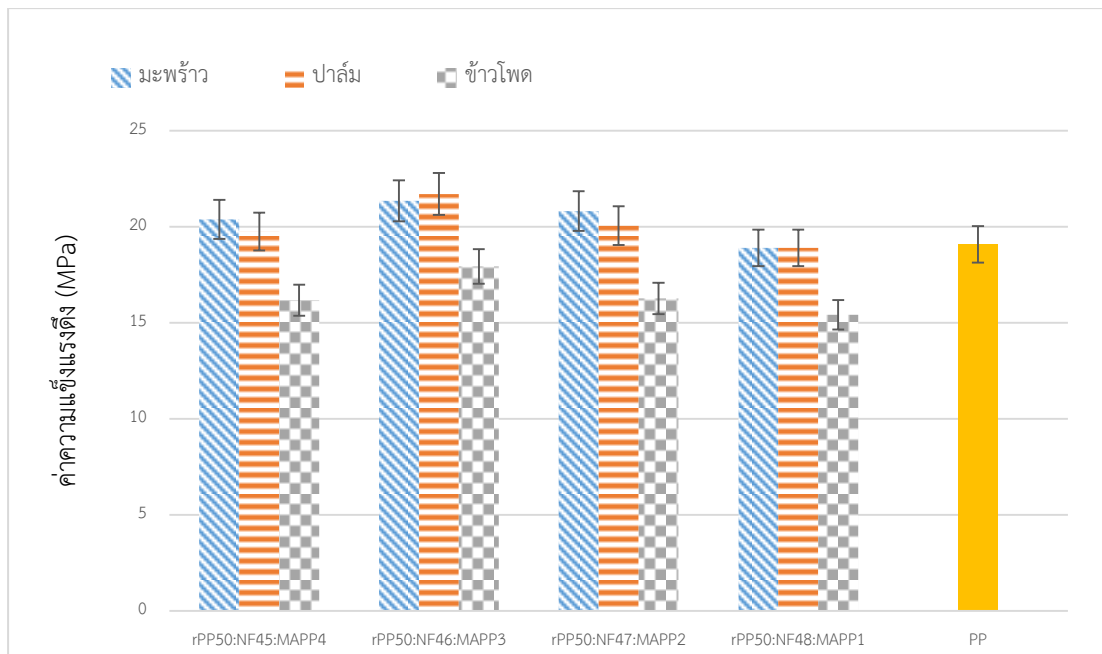
รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



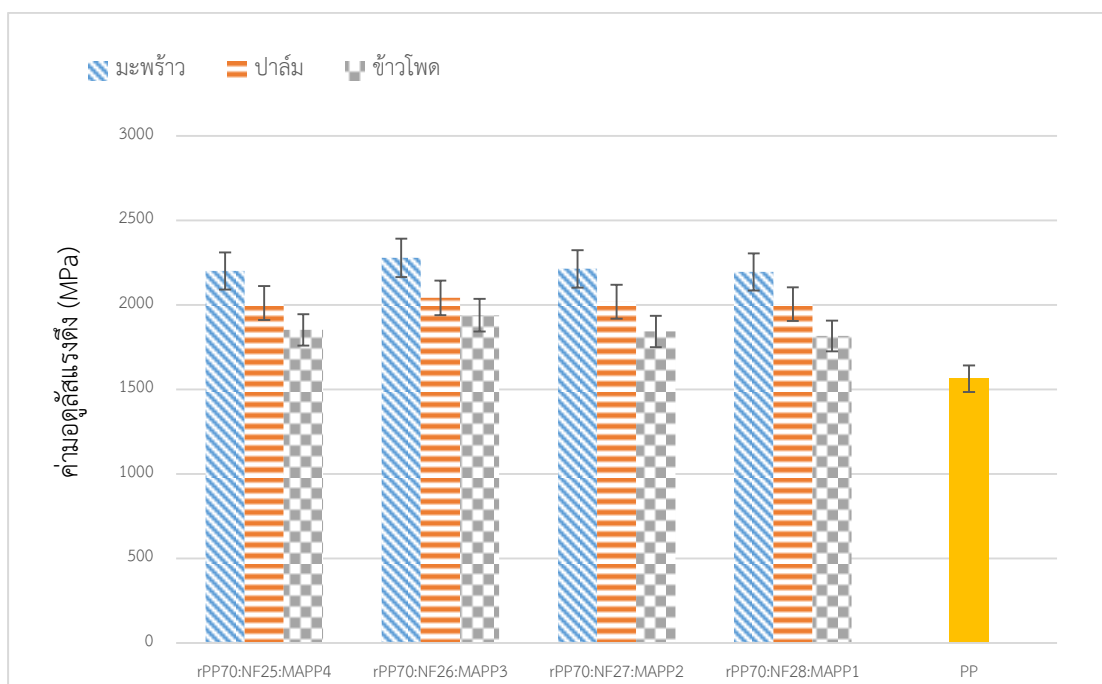
รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



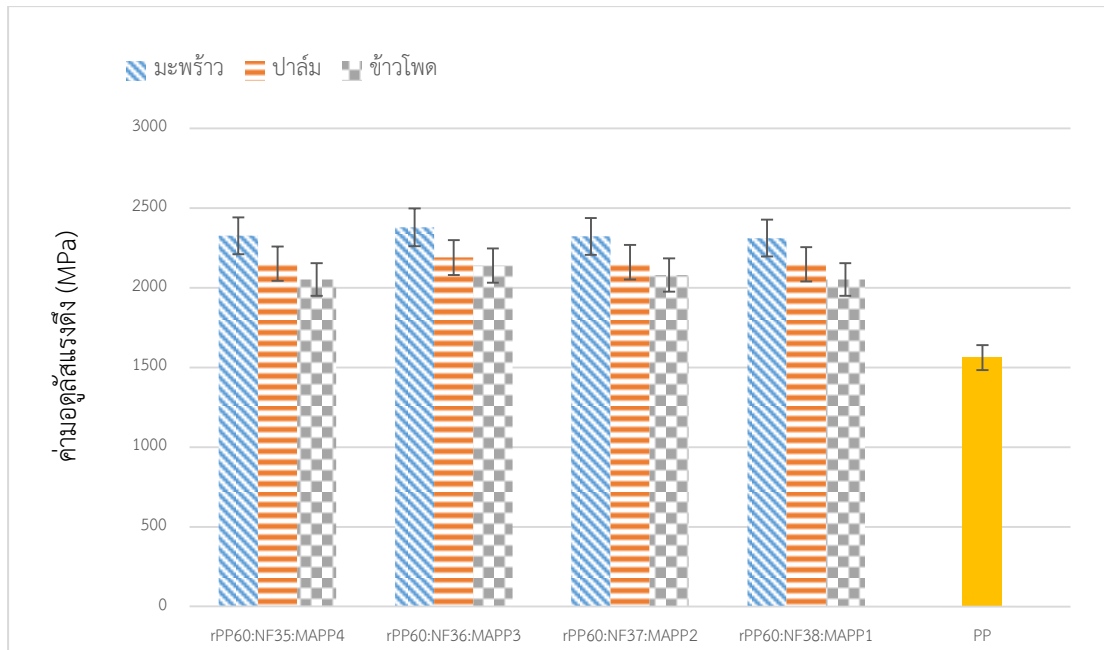
รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



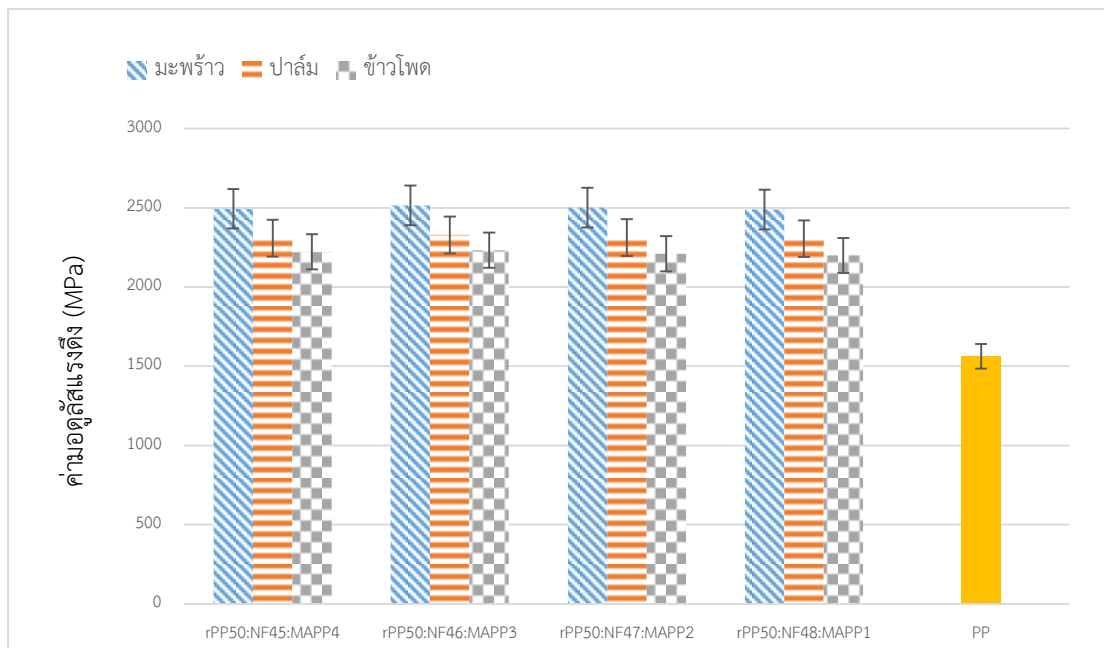
รูปที่ 4.15 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.16 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.17 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง

4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

1) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงดึง

จากตารางที่ ก 3.1 (ภาคผนวก ก) พบว่าสมมติฐานหลัก H_0 ทั้ง 3 ปัจจัยถูกปฏิเสธ ดังนั้นจึงทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีส่วนในการปฏิเสธ H_0 โดยใช้วิธี Tukey's HSD Test ซึ่งเป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยหลัก เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรคู่ไหนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และตัวแปรใดที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นมากที่สุด ซึ่งลำดับในการวิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยหลัก จะไล่ลำดับจากปัจจัยชนิดไม้ ปัจจัยปริมาณของพลาสติก และสิ้นสุดที่ปัจจัยปริมาณสารเติมแต่ง เพื่อสอดคล้องกับผลข้างต้น

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงในตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรแต่ละคู่ของปริมาณสารเติมแต่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าทุกเงื่อนไขที่มีค่า P-value > 0.05 จากนั้นทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสารเติมแต่งอีก 3 ขนาด และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ขณะที่ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบก่อนหน้า

ทำการวิเคราะห์ปริมาณพลาสติกด้วยวิธี Tukey's HSD Test และทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ตามผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA ดังในตารางที่ 4.9 พบว่าทุกเงื่อนไขมีค่า P-value < 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรปริมาณพลาสติกภายในเงื่อนไขเดียวกันเพื่อหาความแตกต่างด้วยวิธีเดียวกัน พบว่า ปริมาณพลาสติกทั้ง 3 ปริมาณ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงกว่า ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 60% และ 50% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกมีขนาดเล็กลง

จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดไม้ด้วยวิธี Tukey's HSD Test โดยทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.10 พบว่าค่า P-value > 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า ไม้มะพร้าวให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ 25.21 MPa และข้าวโพดให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุดที่ 23.65 MPa และผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการวิเคราะห์ภายในกลุ่มปัจจัยหลักพบว่าผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ นั่นหมายความว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยกาบมะพร้าว ที่ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดย

น้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% หรือสัดส่วน rPP70COM3 ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว			ปาล์ม			ข้าวโพด		
ปริมาณ	ปริมาณพลาสติก (%โดยน้ำหนัก)								
สารเติมแต่ง	50	60	70	50	60	70	50	60	70
1	18.89 ^b	20.65 ^b	22.94 ^b	18.89 ^b	18.96 ^b	21.52 ^b	15.41 ^b	16.77 ^b	19.21 ^b
2	20.81 ^{ab}	22.57 ^a	24.59 ^{ab}	20.05 ^{ab}	20.66 ^{ab}	22.70 ^{ab}	16.26 ^b	17.70 ^{ab}	22.06 ^a
3	21.34 ^a	23.12 ^a	25.21 ^a	21.70 ^a	21.48 ^a	23.97 ^a	17.93 ^a	19.61 ^a	23.65 ^a
4	20.38 ^{ab}	22.97 ^a	24.74 ^a	19.74 ^{ab}	19.24 ^{ab}	22.61 ^{ab}	16.17 ^b	17.76 ^{ab}	23.09 ^a
P-value	0.035 [*]	0.005 [*]	0.007 [*]	0.007 [*]	0.018 [*]	0.034 [*]	0.000 [*]	0.009 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว				ปาล์ม				ข้าวโพด			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
ปริมาณพลาสติก	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
50	18.89 ^b	20.81 ^a	21.34 ^a	20.38 ^a	18.89 ^b	20.05 ^b	21.7 ^b	19.74 ^b	15.41 ^b	16.26 ^b	17.93 ^c	16.17 ^c
60	20.65 ^{ab}	22.57 ^b	23.12 ^b	22.97 ^b	18.96 ^b	20.66 ^a	21.48 ^{ab}	19.24 ^b	16.77 ^b	17.7 ^b	19.61 ^b	17.76 ^b
70	22.94 ^a	24.59 ^c	25.21 ^c	24.74 ^c	21.52 ^a	22.7 ^a	23.97 ^a	22.61 ^a	19.21 ^a	22.06 ^a	23.65 ^a	23.09 ^a
P-value	0.007 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.022 [*]	0.001 [*]	0.026 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)

ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
มะพร้าว	18.89 ^a	20.81 ^a	21.34 ^a	20.38 ^a	20.65 ^a	22.57 ^a	23.12 ^a	22.97 ^a	22.94 ^a	24.59 ^a	25.21 ^a	24.74 ^a
ปาล์ม	18.89 ^a	20.05 ^a	21.7 ^a	19.74 ^a	18.96 ^{ab}	20.66 ^a	21.48 ^{ab}	19.24 ^b	21.52 ^a	22.7 ^b	23.97 ^a	22.61 ^b
ข้าวโพด	15.41 ^b	16.26 ^b	17.93 ^b	16.17 ^b	16.77 ^b	17.7 ^b	19.61 ^b	17.76 ^c	19.21 ^b	22.06 ^b	23.65 ^a	23.09 ^b
P-value	0.001 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.004 [*]	0.000 [*]	0.002 [*]	0.000 [*]	0.003 [*]	0.000 [*]	0.084	0.001 [*]

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

2) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่ามอดูลัสแรงดึง

จากตารางที่ ก 4.1 (ภาคผนวก ก) พบว่าสมมติฐานหลัก H_0 ทั้ง 3 ปัจจัยถูกปฏิเสธ ดังนั้นจึงทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีส่วนในการปฏิเสธ H_0 โดยใช้วิธี Tukey's HSD Test ซึ่งเป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยหลัก เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรคู่ไหนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และตัวแปรใดที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นมากที่สุด ซึ่งลำดับในการวิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยหลัก จะไล่ลำดับจากปัจจัยชนิดไม้ ปัจจัยปริมาณของพลาสติก และสิ้นสุดที่ปัจจัยปริมาณสารเติมแต่ง เพื่อสอดคล้องกับผลข้างต้น

จากการทดสอบมอดูลัสแรงดึงในตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรแต่ละคู่ของปริมาณสารเติมแต่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าทุกเงื่อนไขที่มีค่า P-value < 0.05 จากนั้นทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่าปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสารเติมแต่งอีก 3 ขนาด และปริมาณสารเติมแต่ง 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงสูงที่สุด ขณะที่ปริมาณสารเติมแต่ง 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งแรงดึง

ทำการวิเคราะห์ปริมาณพลาสติกด้วยวิธี Tukey's HSD Test และทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ตามผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA ดังในตารางที่ 4.12 พบว่าค่า P-value < 0.05 ในทุกเงื่อนไข นั้นหมายความว่าปริมาณพลาสติกมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าปัจจัยหลักอีก 2 ปัจจัย และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างตัวแปรภายในปัจจัยหลักด้วยวิธีเดียวกัน พบว่า ปริมาณพลาสติกทั้ง 3 ปริมาณ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงที่สูงกว่า ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 60% และ 70% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือ ค่ามอดูลัสแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกลดลง

จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดไม้ด้วยวิธี Tukey's HSD Test โดยทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.13 พบว่าค่า P-value < 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลักพบว่า เส้นใยคาบมะพร้าวให้ค่ามอดูลัสแรงดึงสูงสุด คือ 2515.71 MPa และเส้นใยซังข้าวโพดให้ค่ามอดูลัสแรงดึงต่ำที่สุดที่ 2232.58 MPa และผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการวิเคราะห์ภายในกลุ่มปัจจัยหลักพบว่าผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยคาบมะพร้าว ที่ปริมาณ

พลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3wt% หรือสัดส่วน rPP50COM3
ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงสูงที่สุด

ตารางที่ 4.11 ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว			ปาล์ม			ข้าวโพด		
	ปริมาณพลาสติก (%โดยน้ำหนัก)								
ปริมาณสารเติมแต่ง	50	60	70	50	60	70	50	60	70
1	2488.98 ^a	2312.43 ^a	2193.97 ^a	2305.85 ^a	2148.25 ^a	2004.13 ^a	2199.44 ^a	2052.67 ^a	1815.70 ^a
2	2501.01 ^a	2322.85 ^a	2212.60 ^a	2312.60 ^a	2160.62 ^a	2018.73 ^a	2209.88 ^a	2080.55 ^a	1842.61 ^a
3	2515.71 ^a	2379.57 ^a	2277.83 ^a	2328.80 ^a	2190.35 ^a	2041.92 ^a	2232.58 ^a	2139.82 ^a	1939.44 ^a
4	2493.87 ^a	2326.77 ^a	2200.76 ^a	2308.37 ^a	2151.73 ^a	2011.58 ^a	2221.54 ^a	2051.47 ^a	1852.46 ^a
P-value	0.007*	0.033*	0.011*	0.052	0.01*	0.0473*	0.01*	0.056	0.022*

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.12 ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว				ปาล์ม				ข้าวโพด			
ปริมาณพลาสติก	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
50	2488.98 ^a	2501.01 ^a	2515.71 ^a	2493.87 ^a	2305.85 ^a	2312.6 ^a	2328.8 ^a	2308.37 ^a	2199.44 ^a	2209.88 ^a	2232.58 ^a	2221.54 ^a
60	2312.43 ^b	2322.85 ^b	2379.57 ^b	2326.77 ^b	2148.25 ^b	2160.62 ^b	2190.35 ^b	2151.73 ^b	2052.67 ^a	2080.55 ^a	2139.82 ^a	2051.47 ^b
70	2193.97 ^c	2212.6 ^c	2277.83 ^b	2200.76 ^c	2004.13 ^c	2018.73 ^c	2041.92 ^c	2011.58 ^c	1815.7 ^b	1842.61 ^b	1939.44 ^b	1852.46 ^c
P-value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.002 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.13 ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)

ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
มะพร้าว	2488.98 ^a	2501.01 ^a	2515.71 ^a	2493.87 ^a	2312.43 ^a	2322.85 ^a	2379.57 ^a	2326.77 ^a	2193.97 ^a	2212.6 ^a	2277.83 ^a	2200.76 ^a
ปาล์ม	2305.85 ^b	2312.6 ^b	2328.8 ^b	2308.37 ^b	2148.25 ^b	2160.62 ^b	2190.35 ^b	2151.73 ^b	2004.13 ^b	2018.73 ^b	2041.92 ^b	2011.58 ^b
ข้าวโพด	2199.44 ^b	2209.88 ^c	2232.58 ^c	2221.54 ^c	2052.67 ^b	2080.55 ^b	2139.82 ^b	2051.47 ^c	1815.7 ^c	1842.61 ^c	1939.44 ^b	1852.46 ^c
P-value	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.003*	0.005*	0.001*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

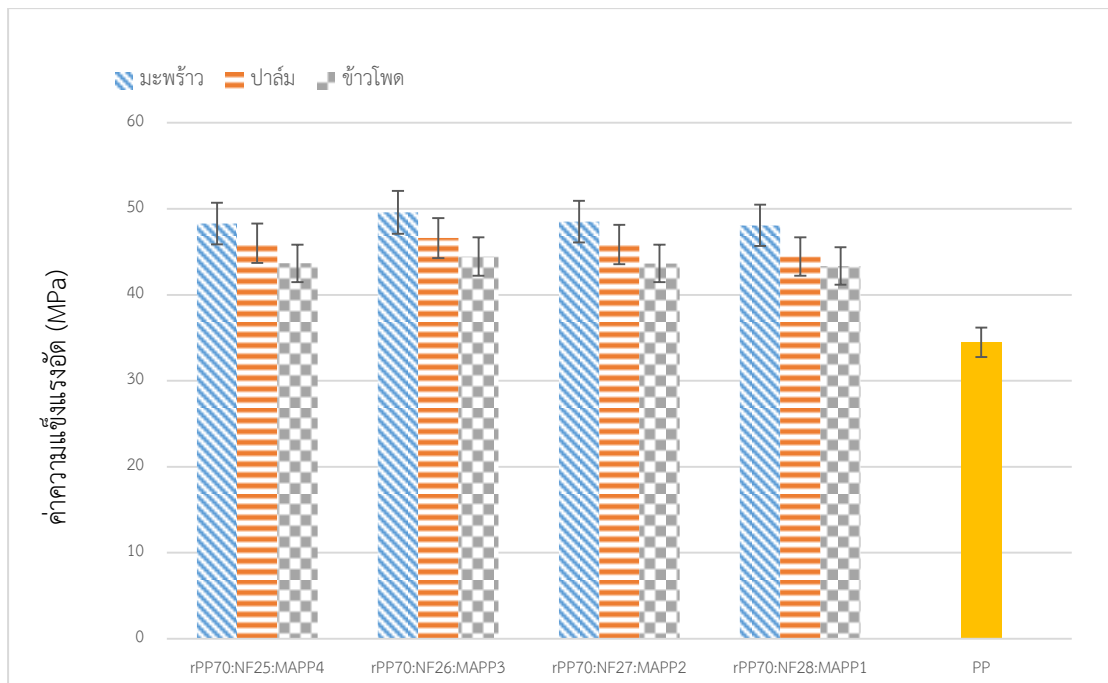
4.1.3 ผลการทดสอบแรงอัด

1) ผลของชนิดเส้นใยไม้

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% และพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงอัดที่ดีที่สุดในปริมาณสารเติมแต่งทั้ง 4 ระดับ จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของปริมาณเส้นใยไม้ในช่วงขนาดพลาสติกเดียวกันที่ 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งระดับที่ 3 wt% จากรูปที่ 4.18- 4.20 จะเห็นได้ว่าสัดส่วน rPP70CO26M3 คือพอลิโพรพิลีน 70% โดยน้ำหนัก และสัดส่วนปริมาณของเส้นใยกาบมะพร้าว 26 wt% ให้ค่าความแข็งแรงอัดที่มากกว่าสัดส่วน rPP70P26M3 และ rPP70C26M3 ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 4.18- 4.20 การทดสอบสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณสารเติมแต่ง และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก ของเส้นใยไม้ทั้ง 3 ชนิด (1) เส้นใยกาบมะพร้าว (2) เส้นใยปาล์ม (3) เส้นใยซังข้าวโพด พบว่า ที่เส้นใยกาบมะพร้าวมีช่องว่างที่เป็นรูพรุน ระหว่างเส้นใยกับพลาสติกที่น้อย แสดงว่าพลาสติกสามารถสอดแทรกเข้าไปผสมกับเส้นใยกาบมะพร้าวได้ดี จึงทำให้เส้นใยกาบมะพร้าวนั้นให้ค่าความแข็งแรงอัดที่สูงกว่าเส้นใยปาล์ม และเส้นใยซังข้าวโพด นอกจากนี้ ยังพบว่าเส้นใยกาบมะพร้าวที่ความขรุขระผิวที่มาก จึงทำให้เนื้อของเมทริกซ์พลาสติกสามารถยึดเกาะกับผิวของเส้นใยกาบมะพร้าวได้มากกว่า ปาล์มและข้าวโพด

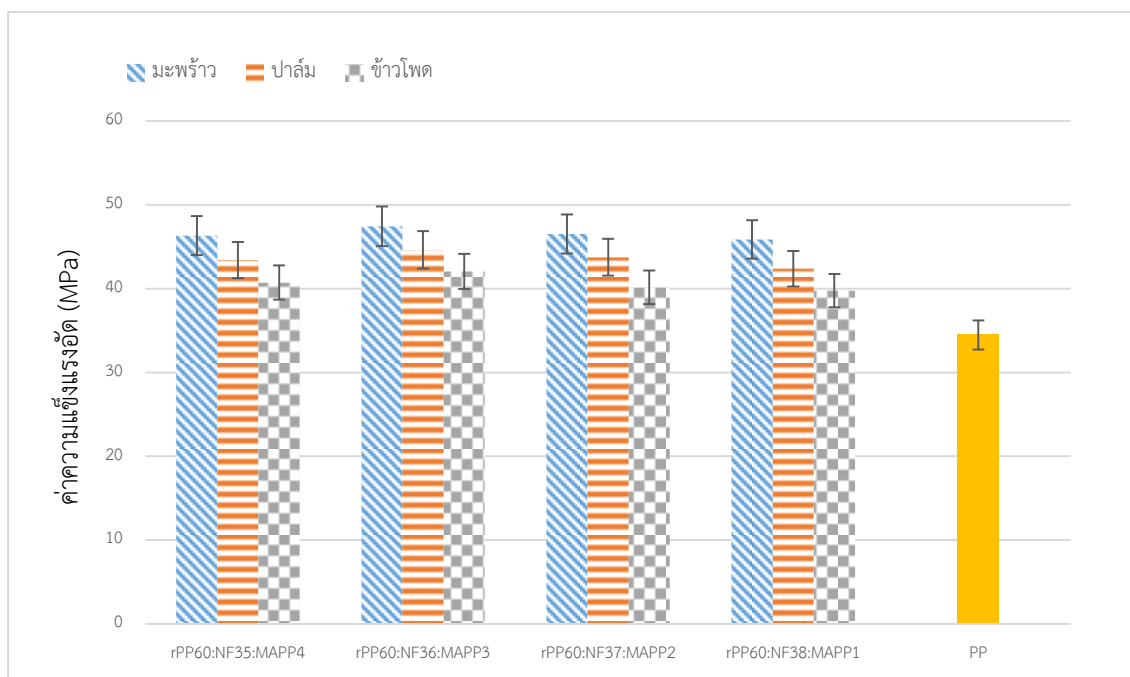
2) ผลของปริมาณสารเติมแต่ง (MAPP)

การพิจารณาการนำค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก ระดับของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัดที่ดีที่สุด พบว่าความแข็งแรงอัดในอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนปริมาณ 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณของสารเติมแต่งพบว่าปริมาณสารเติมแต่งในระดับที่ 3 wt% ให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด และปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ของทุกอัตราส่วนของพลาสติกที่ 50% 60% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงอัดที่สูงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.1 (C1 P1 CO1) แสดงวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติที่สารเติมแต่งปริมาณ 3% และปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยไม้มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติก และ รูปที่ 4.1 (C3 P3 CO3) แสดงวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติที่สารเติมแต่งปริมาณ 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าการกระจุกตัวกันเป็นก้อนของเส้นใยธรรมชาติ



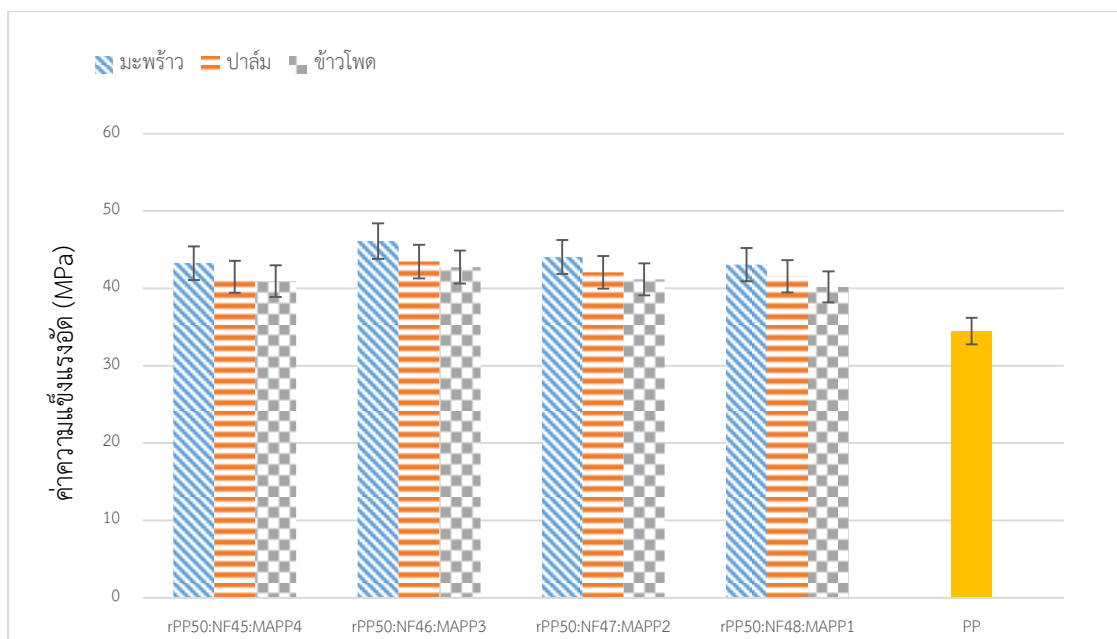
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงอัดที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงอัดที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงอัดที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง

4.1.3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

1) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงอัด

จากตารางที่ ก 5.1 (ภาคผนวก ก) พบว่าสมมติฐานหลัก H_0 ทั้ง 3 ปัจจัยถูกปฏิเสธ ดังนั้นจึงทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีส่วนในการปฏิเสธ H_0 โดยใช้วิธี Tukey's HSD Test ซึ่งเป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยหลัก เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรคู่ไหนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และตัวแปรใดที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นมากที่สุด ซึ่งลำดับในการวิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยหลัก จะไล่ลำดับจากปัจจัยชนิดไม้ ปัจจัยปริมาณของพลาสติก และสิ้นสุดที่ปัจจัยปริมาณสารเติมแต่ง เพื่อสอดคล้องกับผลข้างต้น

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงอัดในตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรแต่ละคู่ของปริมาณสารเติมแต่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่ามีจำนวน 6 ทุกเงื่อนไขที่มีค่า P-value > 0.05 จากนั้นทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสารเติมแต่งอีก 3 ขนาด และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% ให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงที่สุด ขณะที่ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ให้ค่าความแข็งแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบก่อนหน้า

ทำการวิเคราะห์ปริมาณพลาสติกด้วยวิธี Tukey's HSD Test และทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ตามผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.14 ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA ดังในตารางที่ 4.15 พบว่าค่า P-value < 0.05 จำนวน 9 เงื่อนไข และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรปริมาณพลาสติกภายในเงื่อนไขเดียวกันเพื่อหาความแตกต่างด้วยวิธีเดียวกันพบว่า ปริมาณพลาสติกทั้ง 3 ปริมาณ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงอัดที่สูงกว่า ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 60% และ 50% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกลดลง

จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดไม้ด้วยวิธี Tukey's HSD Test โดยทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.16 พบว่าค่า P-value < 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า เส้นใยคาบมะพร้าวให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด คือ 49.59 MPa และเส้นใยสังข์ข้าวโพดให้ค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำที่สุดที่ 44.46 MPa และผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการวิเคราะห์ภายในกลุ่มปัจจัยหลักพบว่าผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยคาบมะพร้าว ที่ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% หรือสัดส่วน rPP70COM3 ให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงที่สุด

ตารางที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว			ปาล์ม			ข้าวโพด		
	ปริมาณพลาสติก (%โดยน้ำหนัก)								
ปริมาณสารเติมแต่ง	50	60	70	50	60	70	50	60	70
1	43.06 ^b	45.87 ^b	48.07 ^a	41.54 ^a	42.40 ^b	44.46 ^b	40.18 ^b	39.78 ^a	43.35 ^a
2	44.04 ^b	46.52 ^{ab}	48.52 ^a	42.07 ^a	43.75 ^{ab}	45.86 ^{ab}	41.15 ^{ab}	40.15 ^a	43.65 ^a
3	46.11 ^a	47.45 ^a	49.59 ^a	43.46 ^a	44.63 ^a	46.60 ^a	42.74 ^a	42.04 ^a	44.46 ^a
4	43.25 ^b	46.34 ^{ab}	48.30 ^a	41.49 ^a	43.42 ^{ab}	46.00 ^a	40.93 ^{ab}	40.73 ^a	43.66 ^a
P-Value	0.002 [*]	0.066	0.05	0.071	0.048	0.003 [*]	0.007 [*]	0.013	0.205

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว				ปาล์ม				ข้าวโพด			
ปริมาณพลาสติก	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
50	43.06 ^a	44.04 ^a	46.11 ^a	43.25 ^a	41.54 ^a	42.07 ^a	43.46 ^a	41.49 ^a	40.18 ^a	41.15 ^a	42.74 ^a	40.93 ^a
60	45.87 ^{ab}	46.52 ^b	47.45 ^b	46.34 ^{ab}	42.4 ^b	43.75 ^b	44.63 ^b	43.42 ^b	39.78 ^b	40.15 ^b	42.04 ^b	40.73 ^b
70	48.07 ^b	48.52 ^b	49.59 ^b	48.3 ^b	44.46 ^c	45.86 ^c	46.6 ^c	46 ^c	43.35 ^b	43.65 ^c	44.46 ^c	43.66 ^c
P-Value	0.002 [*]	0.003 [*]	0.001 [*]	0.031 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.16 ค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)

ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
มะพร้าว	43.06 ^a	44.04 ^a	46.11 ^a	43.25 ^a	45.87 ^a	46.52 ^a	47.45 ^a	46.34 ^a	48.07 ^a	48.52 ^a	49.59 ^a	48.3 ^a
ปาล์ม	41.54 ^{ab}	42.07 ^b	43.46 ^b	41.49 ^{ab}	42.4 ^b	43.75 ^b	44.63 ^b	43.42 ^b	44.46 ^b	45.86 ^b	46.6 ^b	46 ^b
ข้าวโพด	40.18 ^b	41.15 ^b	42.74 ^b	40.93 ^b	39.78 ^c	40.15 ^c	42.04 ^c	40.73 ^c	43.35 ^b	43.65 ^c	44.46 ^c	43.66 ^c
P-Value	0.002 [*]	0.003 [*]	0.001 [*]	0.031 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

4.1.4 ผลการทดสอบความแข็งผิว

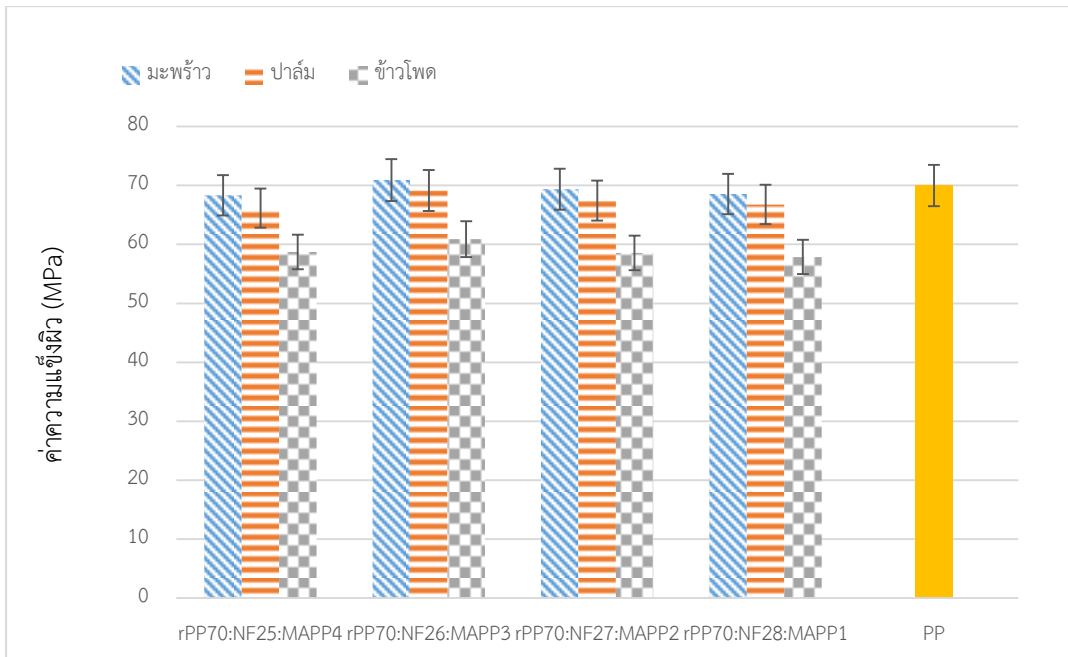
1) ผลของชนิดเส้นใยไม้

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ปริมาณสารเติมแต่งระดับที่ 3 wt% ในขนาดของพลาสติก 70 % โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งผิวที่ดีที่สุดในปริมาณสารเติมแต่งทั้ง 4 ระดับ จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของปริมาณเส้นใยไม้ในช่วงขนาดพลาสติกเดียวกันที่ 50% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งระดับที่ 3 wt% จากรูปที่ 4.21 – 4.23 จะเห็นได้ว่าสัดส่วน rPP50CO46M3 คือพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 50% โดยน้ำหนัก และสัดส่วนของเส้นใยกาบมะพร้าวที่ขนาด 46 wt% ให้ค่าความแข็งผิวที่มากกว่าสัดส่วน rPP50P45M4 และ rPP50C47M2 ตามลำดับ

แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งผิวจะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณผงไม้ เนื่องจากไม้เป็นวัสดุที่มีความแข็งในขณะที่พอลิโพรพิลีนมีความนิ่ม ยึดหยุ่นจึงรับแรงกดได้น้อย ดังนั้นเมื่อเติมผงไม้ลงไปในพอลิโพรพิลีน จึงขอให้ค่าความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกมีค่ามากขึ้น

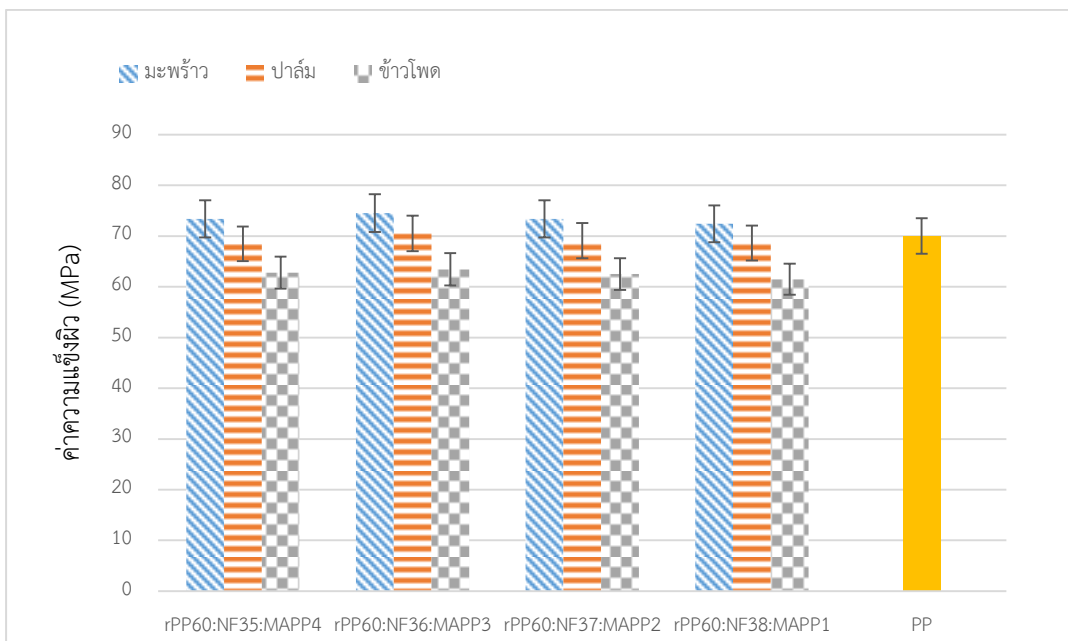
2) ผลของปริมาณสารเติมแต่ง (MAPP)

การพิจารณาการนำค่าความแข็งผิวของวัสดุไม้ผสมพลาสติก ระดับของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าความแข็งผิวที่ดีที่สุด พบว่าความแข็งผิวในอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 50% โดยน้ำหนัก และพบที่ปริมาณสารเติมแต่งในระดับที่ 3 wt% ให้ค่าความแข็งผิวสูงสุด และปริมาณสารเติมแต่งในระดับที่ 3 wt% ของทุกอัตราส่วนของพลาสติกที่ 60% 70% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งผิวที่สูงตามลำดับ โดยในอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีน 50% โดยน้ำหนัก จะมีผงไม้ขนาดใหญ่เมื่อทำการผสมขึ้นรูปกับพลาสติกจะให้ความหนาแน่นแก่วัสดุมากกว่า เนื่องจากเป็นผงไม้ขนาดใหญ่ก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างผงไม้และพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น เกิดค่าความแข็งผิวรับแรงกดเพิ่มขึ้น



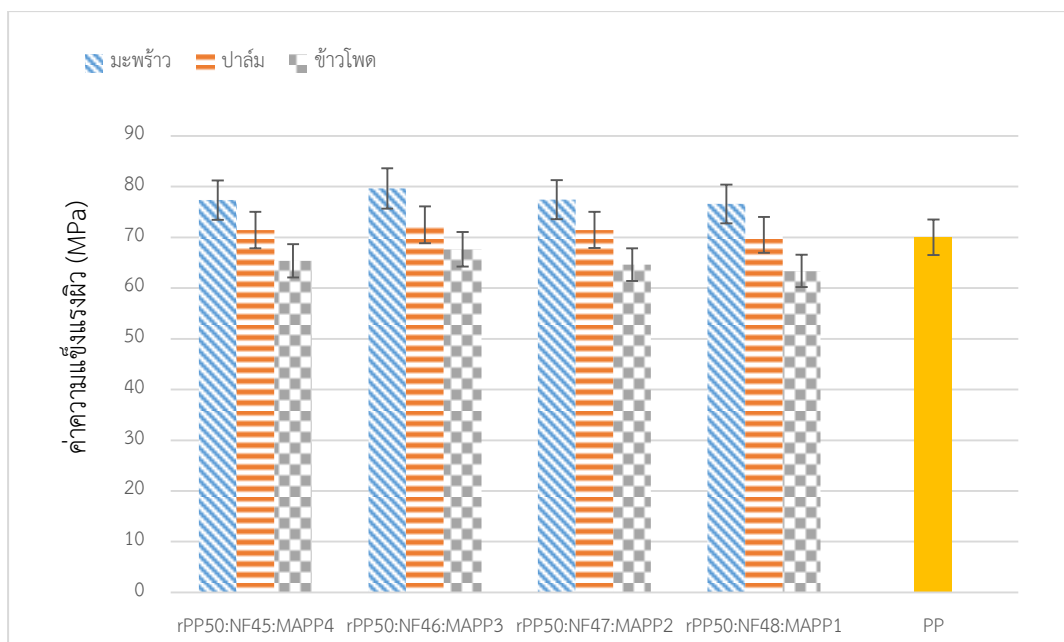
รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งแรงที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงผิวที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง

4.1.4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

1) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงผิว

จากตารางที่ ก 6.1 (ภาคผนวก ก) พบว่าสมมติฐานหลัก H_0 ทั้ง 3 ปัจจัยถูกปฏิเสธ ดังนั้นจึงทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีส่วนในการปฏิเสธ H_0 โดยใช้วิธี Tukey's HSD Test ซึ่งเป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยหลัก เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรคู่ไหนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และตัวแปรใดที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นมากที่สุด ซึ่งลำดับในการวิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยหลัก จะไล่ลำดับจากปัจจัยชนิดไม้ ปัจจัยปริมาณของพลาสติก และสิ้นสุดที่ปัจจัยปริมาณสารเติมแต่ง เพื่อสอดคล้องกับผลข้างต้น

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงอัดในตารางที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรแต่ละคู่ของปริมาณสารเติมแต่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่ามีจำนวน 9 ทุกเงื่อนไขที่มีค่า P-value < 0.05 จากนั้นทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า ปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสารเติมแต่งอีก 3 ขนาด และปริมาณสารเติมแต่ง 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% ให้ค่าความแข็งแรงผิวสูงที่สุด ขณะที่ปริมาณสารเติมแต่ง 1 wt%, 2 wt% และ 4 wt% ให้ค่าความแข็งแรงผิวที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบก่อนหน้า

ทำการวิเคราะห์ปริมาณพลาสติกด้วยวิธี Tukey's HSD Test และทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 3 wt% ตามผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.17 ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA ดังในตารางที่ 4.18 พบว่าค่า P-value < 0.05 จำนวน 9 เงื่อนไข และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรปริมาณพลาสติกภายในเงื่อนไขเดียวกันเพื่อหาความแตกต่างด้วยวิธีเดียวกันพบว่า ปริมาณพลาสติกทั้ง 3 ปริมาณ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 60% และ 70% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกมีขนาดเล็กใหญ่ขึ้น

จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดไม้ด้วยวิธี Tukey's HSD Test โดยทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3 wt% ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.19 พบว่าค่า P-value < 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า เส้นใยกาบมะพร้าวให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด คือ 70.44 MPa และเส้นใยชังข้าวโพดให้ค่าความแข็งแรงต่ำที่สุดที่ 60.51 MPa และผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการวิเคราะห์ภายในกลุ่มปัจจัยหลักพบว่าผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยกาบมะพร้าว ที่ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% หรือสัดส่วน rPP50COM3 ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด

ตารางที่ 4.17 ค่าความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว			ปาล์ม			ข้าวโพด		
	ปริมาณพลาสติก (%โดยน้ำหนัก)								
ปริมาณสารเติมแต่ง	50	60	70	50	60	70	50	60	70
1	76.60 ^c	72.44 ^c	68.56 ^c	70.50 ^c	68.64 ^c	66.69 ^c	63.38 ^d	61.49 ^b	58.07 ^c
2	77.43 ^b	73.40 ^b	69.36 ^b	71.45 ^b	69.09 ^b	67.38 ^b	64.64 ^c	62.51 ^a	58.78 ^b
3	79.62 ^a	74.52 ^a	70.92 ^a	72.48 ^a	70.53 ^a	69.15 ^a	67.65 ^b	63.44 ^a	60.51 ^a
4	77.35 ^{bc}	73.40 ^b	68.34 ^c	71.44 ^b	68.47 ^c	66.52 ^c	65.39 ^a	62.80 ^a	59.23 ^b
P-Value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.18 ค่าความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (MPa)

ชนิดไม้	มะพร้าว				ปาล์ม				ข้าวโพด			
ปริมาณพลาสติก	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
50	76.60 ^a	77.42 ^a	79.61 ^a	77.34 ^a	70.504 ^a	71.45 ^a	72.48 ^a	71.44 ^a	63.38 ^a	64.63 ^a	67.64 ^a	65.38 ^a
60	72.44 ^b	73.40 ^b	74.52 ^b	73.39 ^b	68.638 ^b	69.09 ^b	70.52 ^b	68.47 ^b	61.48 ^b	62.51 ^b	63.43 ^b	62.79 ^b
70	68.56 ^c	69.36 ^c	70.92 ^c	68.34 ^c	66.69 ^c	67.38 ^c	69.15 ^c	66.52 ^c	58.07 ^c	58.78 ^c	60.50 ^c	59.23 ^c
P-Value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (MPa) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.19 ค่าความแข็งผิวของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (MPa)

ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
มะพร้าว	76.60 ^a	77.43 ^a	79.62 ^a	77.35 ^a	72.50 ^a	73.23 ^a	74.92 ^a	73.26 ^a	68.61 ^a	69.44 ^a	70.44 ^a	68.32 ^a
ปาล์ม	70.50 ^b	71.45 ^b	72.48 ^b	71.44 ^b	68.64 ^b	69.09 ^b	70.53 ^b	68.47 ^b	66.69 ^b	67.38 ^b	69.15 ^b	66.52 ^b
ข้าวโพด	63.38 ^c	64.64 ^c	67.65 ^c	65.39 ^c	61.49 ^c	62.51 ^c	63.44 ^c	62.80 ^c	58.07 ^c	58.78 ^c	60.51 ^c	59.23 ^c
P-Value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

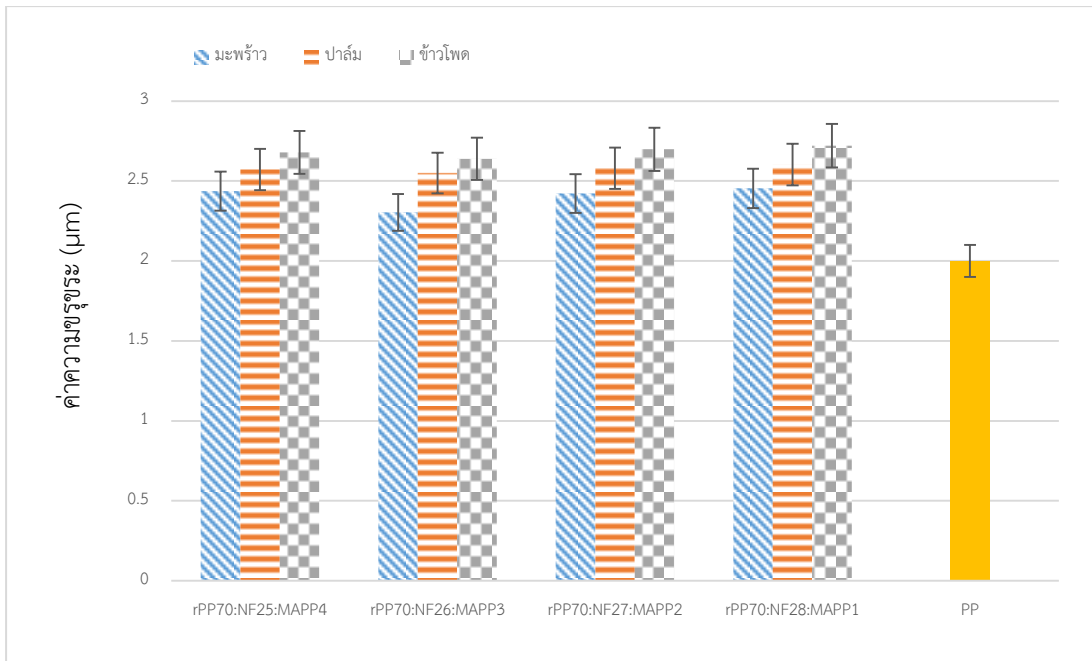
4.1.5 ผลการทดสอบความขรุขระของผิว

1) ผลของชนิดเส้นใยไม้ และปริมาณพลาสติก

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ปริมาณสารเติมแต่งระดับที่ 1 wt% ในขนาดของพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความขรุขระมากที่สุดในปริมาณสารเติมแต่งทั้ง 4 ระดับ จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของปริมาณเส้นใยไม้ในช่วงปริมาณพลาสติกเดียวกันที่ 50% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งระดับที่ 1 wt% จากรูปที่ 4.24 – 4.26 จะเห็นได้ว่าสัดส่วน rPP50P48 คือพลาสติกพอลิโพรพิลีนปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก และสัดส่วนของเส้นใยกาบมะพร้าวที่ขนาด 48 wt% ให้ค่าความขรุขระที่มากกว่าสัดส่วน rPP50P38 และ rPP50P28 ตามลำดับ

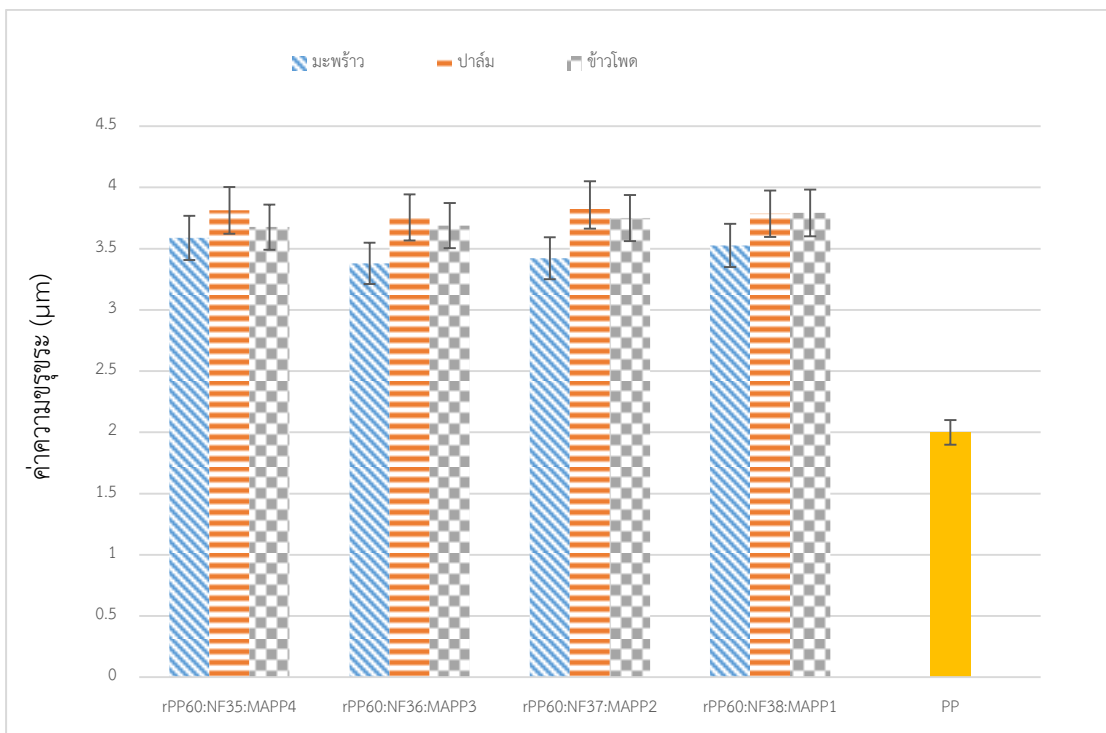
2) ผลของปริมาณสารเติมแต่ง (MAPP)

การพิจารณาการนำค่าความขรุขระของวัสดุไม้ผสมพลาสติก ระดับของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าความขรุขระ พบว่าความขรุขระในอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีน ปริมาณ 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณของสารเติมแต่งพบว่าปริมาณสารเติมแต่งในระดับที่ 3 wt% ให้ค่าความขรุขระที่ต่ำที่สุด โดยในอัตราส่วนผสมของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณ 70% โดยน้ำหนัก เนื่องจาก เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนของพลาสติกลดลงส่งผลให้เมทริกซ์พลาสติกสามารถยึดติดกับเส้นใยได้น้อยลง จึงทำให้ช่องว่างภายในชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมลดลงส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อปริมาณพลาสติกน้อยลง ยังทำให้เส้นใยถูกห่อหุ้มด้วยเนื้อเมทริกซ์พลาสติกได้น้อยลง จึงส่งผลทำให้วัสดุผสมที่มีปริมาณเส้นใยสูงมีผิวเรียบที่น้อยกว่าที่มีปริมาณเส้นใยน้อย



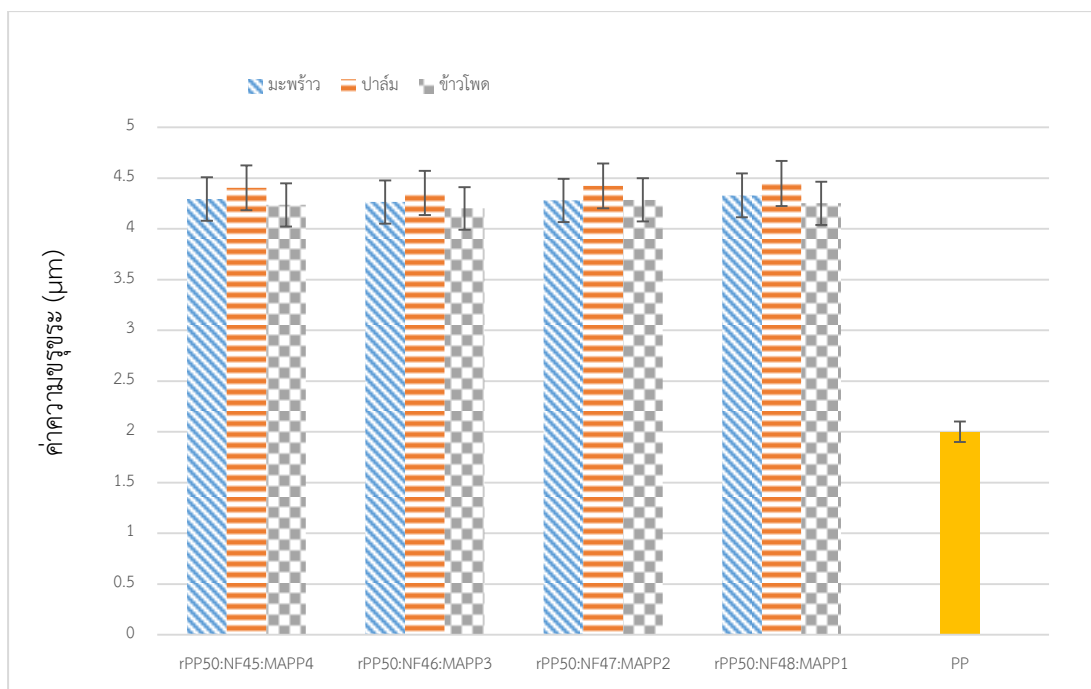
รูปที่ 4.24 ค่าความขรุขระที่ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.25 ค่าความขรุขระที่ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง



รูปที่ 4.26 ค่าความขรุขระที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ; ปริมาณพลาสติก:ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ:ปริมาณสารเติมแต่ง

4.1.4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

1) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความขรุขระ

จากตารางที่ ก 7.1 (ภาคผนวก ก) พบว่าสมมติฐานหลัก H_0 ทั้ง 3 ปัจจัยถูกปฏิเสธ ดังนั้นจึงทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่มีส่วนในการปฏิเสธ H_0 โดยใช้วิธี Tukey's HSD Test ซึ่งเป็นการจับคู่ตัวแปรภายในปัจจัยหลัก เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรคู่ไหนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ และตัวแปรใดที่มีความแตกต่างจากตัวแปรอื่นมากที่สุด ซึ่งลำดับในการวิเคราะห์ความแตกต่างภายในปัจจัยหลัก จะไล่ลำดับจากปัจจัยชนิดไม้ ปัจจัยปริมาณของพลาสติก และสิ้นสุดที่ปัจจัยปริมาณสารเติมแต่ง เพื่อสอดคล้องกับผลข้างต้น

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงอัดในตารางที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรแต่ละคู่ของปริมาณสารเติมแต่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่ามีจำนวน 9 เงื่อนไขที่มีค่า P-value > 0.05 จากนั้นทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า ปริมาณสารเติมแต่ง 1 wt% มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณสารเติมแต่งอีก 3 ขนาด และปริมาณสารเติมแต่ง 2 wt%, 3 wt% และ 4 wt% ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ปริมาณสารเติมแต่ง 1 wt% ให้ค่าความขรุขระสูงที่สุด ขณะที่ปริมาณสารเติมแต่ง 2 wt%, 3 wt% และ 4 wt% ให้ค่าความขรุขระที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบก่อนหน้า

ทำการวิเคราะห์ปริมาณพลาสติกด้วยวิธี Tukey's HSD Test และทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขที่ปริมาณสารเติมแต่งที่ 1 wt% ตามผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.20 ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ผลแบบ ANOVA ดังในตารางที่ 4.21 พบว่าค่า P-value < 0.05 จำนวน 9 เงื่อนไข และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรปริมาณพลาสติกภายในเงื่อนไขเดียวกันเพื่อหาความแตกต่างด้วยวิธีเดียวกันพบว่า ปริมาณพลาสติกทั้ง 3 ปริมาณ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความขรุขระที่สูงกว่า ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 60% และ 70% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือ ค่าความขรุขระจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพลาสติกลดลง

จากนั้นทำการวิเคราะห์ชนิดไม้ด้วยวิธี Tukey's HSD Test โดยทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1 wt% ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.22 พบว่าค่า P-value > 0.05 และเมื่อทำการจับคู่ตัวแปรเพื่อหาความแตกต่างของตัวแปรภายในปัจจัยหลัก พบว่า ไม้ปาล์มให้ค่าความขรุขระสูงสุด คือ 4.45 μm และข้าวโพดให้ค่าความขรุขระต่ำที่สุดที่ 4.25 μm และผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA และการวิเคราะห์ภายในกลุ่มปัจจัยหลักพบว่าผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ นั้นหมายความว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน ที่ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1 wt% หรือสัดส่วน rPP50PM1 ให้ค่าความขรุขระสูงสุด

ตารางที่ 4.20 ค่าความขรุขระของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณสารเติมแต่ง (μm)

ชนิดไม้	มะพร้าว			ปาล์ม			ข้าวโพด		
	ปริมาณพลาสติก (%โดยน้ำหนัก)								
ปริมาณสารเติมแต่ง	50	60	70	50	60	70	50	60	70
1	4.33 ^a	3.53 ^a	2.45 ^a	4.45 ^a	3.79 ^a	2.60 ^a	4.25 ^a	3.79 ^a	2.72 ^a
2	4.28 ^a	3.42 ^a	2.42 ^a	4.42 ^a	3.86 ^a	2.58 ^a	4.29 ^a	3.75 ^a	2.70 ^a
3	4.26 ^a	3.38 ^a	2.30 ^a	4.35 ^a	3.76 ^a	2.55 ^a	4.20 ^a	3.69 ^a	2.64 ^a
4	4.29 ^a	3.59 ^a	2.44 ^a	4.40 ^a	3.81 ^a	2.57 ^a	4.24 ^a	3.68 ^a	2.68 ^a
P-value	0.783	0.118	0.393	0.796	0.404	0.531	0.658	0.150	0.524

*ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (μm) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.21 ค่าความขรุขระของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของปริมาณพลาสติก (μm)

ชนิดไม้	มะพร้าว				ปาล์ม				ข้าวโพด			
ปริมาณพลาสติก	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
50	4.33 ^a	4.28 ^a	4.26 ^a	4.29 ^a	4.45 ^a	4.42 ^a	4.35 ^a	4.40 ^a	4.25 ^a	4.29 ^a	4.20 ^a	4.24 ^a
60	3.52 ^b	3.422 ^b	3.38 ^b	3.58 ^b	3.79 ^b	3.86 ^b	3.76 ^b	3.81 ^b	3.79 ^b	3.75 ^b	3.69 ^b	3.68 ^b
70	2.45 ^c	2.42 ^c	2.30 ^c	2.44 ^c	2.60 ^c	2.58 ^c	2.55 ^c	2.57 ^c	2.72 ^c	2.70 ^c	2.64 ^c	2.68 ^c
P-value	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]

* ผลกระทบจากปริมาณสารเติมแต่ง (μm) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

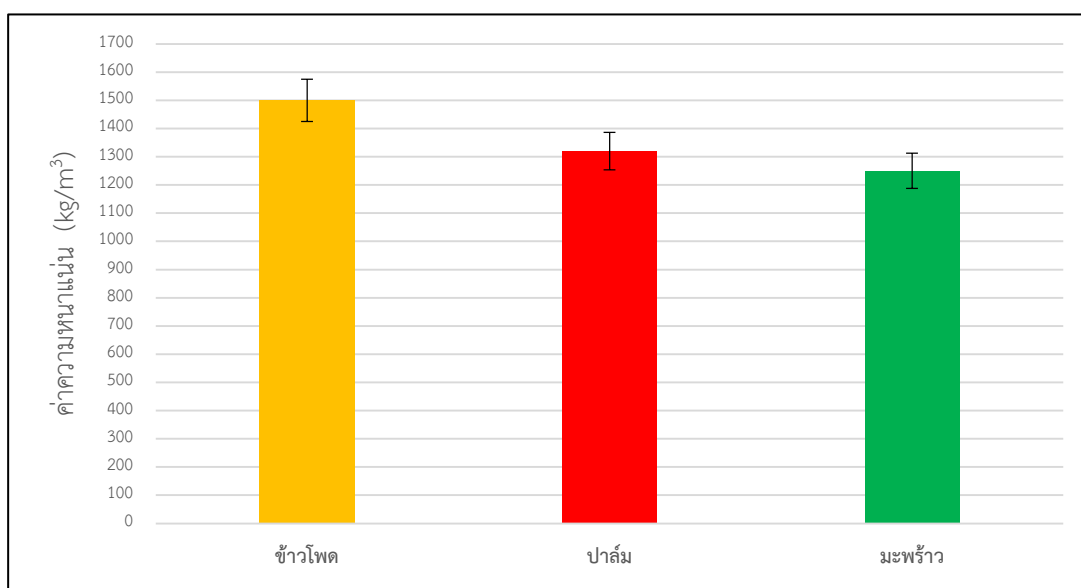
ตารางที่ 4.22 ค่าความขรุขระของวัสดุผสมไม้พลาสติกและผลกระทบของชนิดไม้ (μm)

ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 60% โดยน้ำหนัก				ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก			
	ปริมาณสารเติมแต่ง (wt%)											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
มะพร้าว	4.33 ^a	4.28 ^a	4.26 ^a	4.29 ^a	3.53 ^b	3.42 ^b	3.38 ^b	3.59 ^b	2.45 ^b	2.42 ^b	2.30 ^b	2.44 ^b
ปาล์ม	4.45 ^a	4.42 ^a	4.35 ^a	4.40 ^a	3.79 ^a	3.86 ^a	3.76 ^a	3.81 ^{ab}	2.60 ^{ab}	2.58 ^{ab}	2.55 ^a	2.57 ^{ab}
ข้าวโพด	4.25 ^a	4.29 ^a	4.20 ^a	4.24 ^a	3.79 ^a	3.75 ^a	3.69 ^a	3.68 ^a	2.72 ^a	2.70 ^a	2.64 ^a	2.68 ^a
P-value	0.097	0.293	0.130	0.140	0.004 [*]	0.000 [*]	0.000 [*]	0.042 [*]	0.002 [*]	0.003 [*]	0.002 [*]	0.016 [*]

*ผลกระทบจากชนิดไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ และจากการวิเคราะห์เงื่อนไขภายในด้วยวิธี Tukey's HSD Test ผลการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ตัวอักษรเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น

จากการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุไม้ผสมพลาสติกที่สัดส่วน rPP70NF26M3 ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในทุกเงื่อนไข โดยผลของการทดสอบค่าความหนาแน่น 5 ซ้ำ แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า ความหนาแน่นวัสดุไม้ผสมพลาสติกในสัดส่วนและปริมาณพลาสติกดังกล่าวอยู่ในช่วงระหว่าง 1,245 – 1,499 kg/m³ ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับมาตรฐาน มอก.878-2547 คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 1000 – 1300 kg/m³ ซึ่งหมายความว่า วัสดุไม้ผสมพลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ให้ความหนาแน่นที่มาตรฐาน มอก. และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานของไม้ประกอบที่มีการจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดได้ ดังตารางที่ 4.31 โดยไม้ประกอบ คือ ไม้ที่ผลิตขึ้นจากการใช้เศษเหลือจากการแปรรูปไม้ เพื่อให้มีรูปแบบใหม่ มีคุณลักษณะเหมาะกับการใช้ประโยชน์ โดยการมีน้ำหนักที่เบาและราคาถูกกว่าไม้จริง



รูปที่ 4.27 ความหนาแน่นของวัสดุไม้ผสมพลาสติกที่สัดส่วน rPP70NF26M3 ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

4.3 สมบัติทางด้านความร้อน

4.3.1 การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป (Thermogravimetric Analysis:TGA)

กราฟ TGA และสมบัติทางความร้อนของพอลิพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.23 ตามลำดับ พบว่ามีการสลายตัวของวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากการระเหยของความชื้นที่มีในเส้นใยธรรมชาติ $T_{50\%}$ มีค่าน้อยกว่า $T_{50\%}$ ของพอลิพรพิลีนรีไซเคิล เนื่องจากสารเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยธรรมชาตินั้นมีการเสื่อมสลายที่อุณหภูมิที่ต่ำ [31, 41] เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรพิลีนรีไซเคิล โดยที่ $T_{50\%}$ ของวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติ แสดงว่าเส้นใยธรรมชาติส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสถียรทางความร้อนของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งจากตารางที่ 4.23 ค่า $T_{50\%}$ ของพอลิพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติมีค่ามากกว่า $T_{50\%}$ ของพอลิพรพิลีนรีไซเคิล เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติจะมีส่วนประกอบของ ลิกนิน (Lignin) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นเถ้าในระหว่างการสลายตัวทางความร้อนที่ $T_{50\%}$ โดยทำหน้าที่เป็นฉนวนต้านความร้อนให้กับพอลิพรพิลีนรีไซเคิล

เถ้าที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนินในเส้นใยธรรมชาติ จะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนให้กับวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น ค่า $T_{50\%}$ ของวัสดุผสมไม้พลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.23 นอกจากนี้พบว่าพอลิพรพิลีนรีไซเคิลสลายตัวเนื่องจากความร้อนได้หมดโดยไม่หลงเหลือเถ้าที่อุณหภูมิ 590 องศาเซลเซียส ส่วนปริมาณเถ้าของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากมีการก่อตัวของโครงสร้างพอสพอริคคาร์บอนเซียสในระหว่างที่เส้นใยธรรมชาติสลายตัว [41]

จากรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.23 พบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 50 wt% ค่า $T_{50\%}$ น้อยกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 70 wt% เนื่องจากมีการผสมของเส้นใยธรรมชาติที่น้อยกว่าทำให้การระเหยตัวของน้ำภายในที่มีอยู่ในสารเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยธรรมชาตินั้นต่ำกว่าในวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณเส้นใยธรรมชาติผสมอยู่มากกว่า ซึ่งจากตารางที่ 4.23 พบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่

เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 50 wt% ค่า $T_{50\%}$ มากกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีน รีไซเคิลในอัตราส่วน 70 wt% เนื่องจากในสารเคมีเซลลูโลสของเส้นใยธรรมชาตินั้นได้ระเหยไปจนหมด นอกจากนี้ปริมาณสารลิกนินที่เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติได้เปลี่ยนเป็นเถ้าในระหว่างการสลายตัวทางความร้อนที่ $T_{50\%}$ โดยทำหน้าที่เป็นฉนวนด้านความร้อนให้กับพอลิโพรพิลีน รีไซเคิล จึงทำให้ค่า $T_{50\%}$ ของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติมากกว่าที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 70 wt% ซึ่งสังเกตได้จากจากรูปที่ 4.28 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมาถึง 320 องศาเซลเซียส กราฟ TGA จะมีการติดตัวขึ้น และมีการสูญเสียน้ำหนักช้าลงกว่าในช่วงแรก เพราะลิกนินในเส้นใยธรรมชาติ เริ่มสลายตัวเป็นเถ้าที่อุณหภูมิ 274-420 องศาเซลเซียส [31]

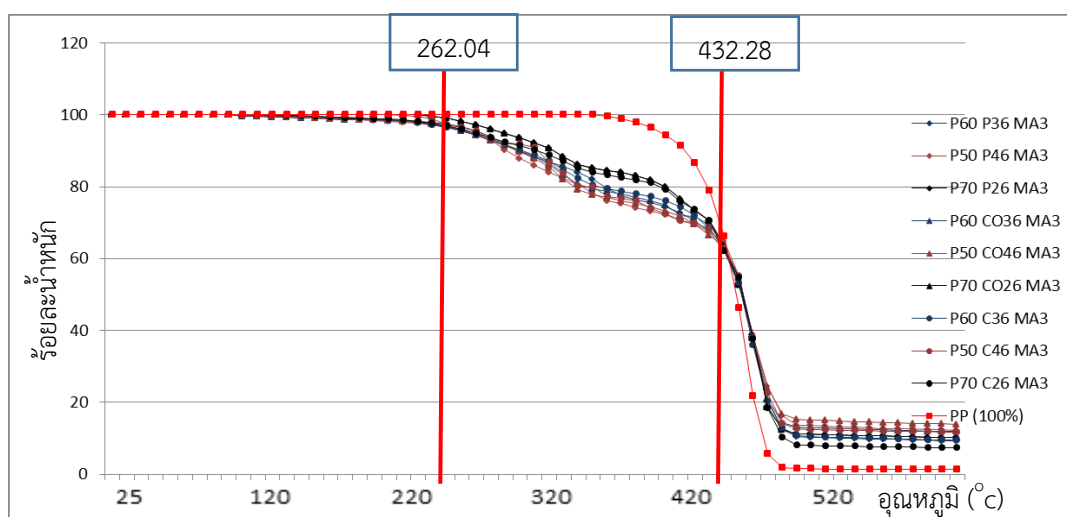
จากกราฟ TGA และสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ โดยมีชนิดเส้นใยที่แตกต่างกัน และเส้นใยธรรมชาติที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.23 ตามลำดับ พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยสังข์ข้าวโพดที่ปริมาณ 46 wt% มีค่า $T_{5\%}$ น้อยกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยจากมะพร้าวตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยสังข์ข้าวโพดนั้นมีปริมาณสารเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่สูงกว่าเส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยจากมะพร้าวตามลำดับ จึงทำให้การระเหยตัวของความชื้นที่มีอยู่ในเส้นใยธรรมชาติของสารเคมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงแรก แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยจากมะพร้าว ที่ปริมาณ 46 wt% มีค่า $T_{50\%}$ น้อยกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยสังข์ข้าวโพดตามลำดับ เนื่องจากนั้นมีเส้นใยจากมะพร้าวปริมาณของสารลิกนินที่ต่ำที่สุด ซึ่งลิกนินนั้นเป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติได้เปลี่ยนเป็นเถ้าในระหว่างการสลายตัวทางความร้อนที่ $T_{50\%}$ โดยทำหน้าที่เป็นฉนวนด้านความร้อนให้กับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจึงทำให้ค่า $T_{50\%}$ ของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ นั้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารลิกนินที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นสรุปได้ว่า วัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติมีการต้านทานความร้อนมากกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และพบว่าค่าของ $T_{5\%}$ ของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น เมื่อเติมเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งอย่างไรก็ตามค่า $T_{50\%}$ ปริมาณของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลนั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาตินั้นมีสารประกอบเป็นสารลิกนินที่มีเมื่อเผาไหม้ไปแล้วจะเกิดเถ้าที่มีสมบัติเป็นฉนวนด้านความร้อน จึงทำ

ให้ผลของค่า TGA พบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาตินั้นมีสมบัติต้านทานความร้อนได้ดีกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ไม่ผ่านการผสม นอกจากนี้ปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่ 46 wt% จะให้ค่า $T_{50\%}$ ที่สูงที่สุด โดยที่เส้นใยซึ่งข้าวโพดจะให้ค่า $T_{50\%}$ ที่สูงที่สุด 453.6 รองลงมาเป็นเส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน 452.22 และ เส้นใยซึ่งข้าวโพด 451.90 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่ มีการเติมเส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ

ลำดับที่	สูตร	ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไป								
		200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C	550°C	600°C
1	rPP(100%)	100.0	100.0	100.0	100.0	94.4	46.21	1.53	1.40	0
2	rPP70C26	98.98	96.57	91.58	80.61	75.03	55.24	12.44	12.05	7.42
3	rPP70CO26	98.57	96.62	89.69	80.63	75.94	52.79	15.55	14.44	10.23
4	rPP70P26	99.24	98.31	92.59	82.19	76.70	52.89	7.79	7.36	7.04
5	rPP60C36	99.23	95.46	90.63	79.96	73.55	53.31	10.49	9.93	9.46
6	rPP60CO361	98.58	96.81	89.92	79.37	74.51	53.51	12.96	12.33	11.86
7	rPP60P36	98.74	97.51	89.82	82.02	74.35	52.48	10.36	9.76	9.35
8	rPP50C46	98.94	96.88	88.91	78.20	71.10	51.70	7.99	7.62	11.70
9	rPP50CO46	99.89	99.00	92.80	79.18	73.22	54.68	13.52	12.7	13.96
10	rPP50P46	98.44	96.74	91.32	78.71	72.12	51.20	11.19	10.63	12.24



รูปที่ 4.28 กราฟ TGA ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน (Differential Scanning Calorimetry: DSC)

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อน(DSC) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของ WPC ของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ที่สารเติมแต่ง MAPP 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการศึกษาขนาด และองค์ประกอบเป็นผลึกของพอลิเมอร์ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับ WPC

จากตารางที่ 4.24 ที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่แตกต่างกัน และทำการพิจารณาที่เส้นใยชนิดเดียวกัน พบว่า ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ของ rPP ไม่ต่างกัน แต่เมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเพิ่ม มีแนวโน้มที่องค์ประกอบเป็นผลึกเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเส้นใยต่างชนิดกัน และพบว่าค่า T_m , T_c ไม่ต่างกัน แต่เมื่อปริมาณของ rPP เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มที่องค์ประกอบเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปริมาณเมทริกซ์พลาสติกที่เพิ่มส่งผลให้ค่าเอนทัลปีเพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดผลึกเกิดได้กว้างขึ้น จึงทำให้ที่มีปริมาณของ rPP สูงมีค่าความเป็นผลึกที่สูง และพบองค์ประกอบเป็นผลึกของ rPP ในเส้นใยกาบมะพร้าวมีค่ามากกว่าเส้นใยปาล์มและข้าวโพดตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11 แสดงผิวสัมผัสของเส้นใย ซึ่งเส้นใยกาบมะพร้าวมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าเส้นใยปาล์มและข้าวโพดตามลำดับ จึงทำให้เส้นใยกาบมะพร้าวสามารถยึดติดกันเข้ากับพอลิเมอร์ได้มากเส้นใยชนิดอื่น ๆ [13]

ตารางที่ 4.24 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและค่าองค์ประกอบเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วย DSC

ลำดับที่	สูตร	T_m	T_c	Δh_f (j/g)	%crystal
1	PP(100%)	161.67	119.63	75.10	45.51
2	rPP70C26M3	160.33	117.13	46.57	28.22
3	rPP70CO26M3	160.34	117.47	52.21	31.64
4	rPP70P26M3	160.33	117.97	48.47	29.37
5	rPP60C36M3	161.17	116.63	44.13	26.74
6	rPP60CO36 M3	162	118.3	48.59	29.45
7	rPP60P36 M3	160.82	118.47	44.52	26.98
8	rPP50C46 M3	159.83	115.47	40.92	24.80
9	rPP50CO46 M3	159.83	117.63	42.31	25.64
10	rPP50P46M3	160.34	118.3	41.01	24.85
P-value	-	0.144	0.733	0.001	0.000

4.3.3 สมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal expansion: CTE)

การศึกษาสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (CTE เป็นการศึกษากการเปลี่ยนแปลงการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ของ WPC ของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ที่สารเติมแต่ง MAPP 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการศึกษาค่าของค่าความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับความยาวหรือปริมาตรเริ่มต้น และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้นเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับ WPC

ตารางที่ 4.25 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากเส้นใยธรรมชาติ [12]

ชนิดเส้นใย	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ข้าวโพด	39.352	22.9	15.85
มะพร้าว	35.55	25.80	16.01
ปาล์ม	33.08	20.51	15.09

จากตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.29 พบว่าที่วัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติที่ T50 องศาเซลเซียส มีความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของที่สูงกว่า T50 องศาเซลเซียส ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซึ่งเกิดจากการระเหยของความชื้นที่มีในเส้นใยธรรมชาติบางส่วน นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากการสลายตัวของสายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่สามารถสลายตัวได้ในอุณหภูมิที่ต่ำ จึงทำให้ค่าความเครียดทางความร้อนของวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.30 T150 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่าง พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติมีค่าน้อยกว่า ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เนื่องจากความชื้นที่สะสมอยู่เส้นใยธรรมชาตินั้นได้ระเหยหายบางส่วน จึงทำให้การค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในส่วนของเส้นใยธรรมชาติลดลง ต่างกับค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้น เนื่องมาจากการเปลี่ยนสภาพของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่จะเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.26 ความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ โดยมีอัตราส่วนผสมของปริมาณพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุ

ผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 70 wt% ค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ T50 องศาเซลเซียส น้อยกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 50 wt% เนื่องจากมีการผสมของเส้นใยธรรมชาติที่น้อยกว่าทำให้การระเหยตัวของความชื้นที่มีอยู่ในเส้นใยธรรมชาติของสารเคมีเซลลูโลส นั้นต่ำกว่าในวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณเส้นใยธรรมชาติผสมอยู่มากกว่า ซึ่งจากตารางที่ 4.26 พบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 70 wt% ค่า T150 องศาเซลเซียส มากกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 50 wt% เนื่องจากความชื้นที่สะสมอยู่ในเส้นใยธรรมชาติในสารเคมีเซลลูโลสและเซลลูโลสนั้นได้ระเหยไป จึงทำให้ความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเส้นใยธรรมชาตินั้นลดลง นอกจากกราฟ CTE จะพบว่าที่ T120 องศาเซลเซียส พันธะโควาเลนต์ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจะเริ่มเปลี่ยนสภาพทำให้ค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลนั้นเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้วัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ ที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 70 wt% นั้นมีค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนมากกว่าที่เกิดจากการผสมของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 50 wt%

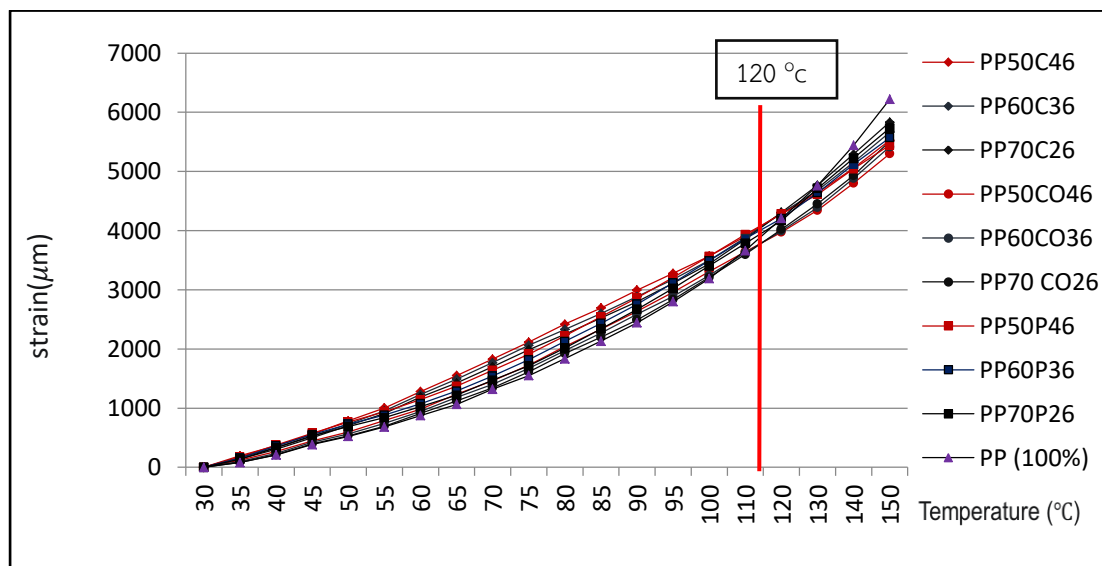
จากรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.26 ความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ โดยมีชนิดเส้นใยที่แตกต่างกัน และเส้นใยธรรมชาติที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยสังข์ข้าวโพดที่ปริมาณ 46 wt% มีค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ T50 องศาเซลเซียส มากกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยกากมะพร้าวตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยสังข์ข้าวโพดนั้นมีปริมาณสารเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่สูงกว่าเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยกากมะพร้าวตามลำดับ ดังตารางที่ 4.25 จึงทำให้ทำให้การระเหยตัวของความชื้นที่มีอยู่ในเส้นใยธรรมชาติของสารเคมีเซลลูโลสและเซลลูโลสนั้นถูกปล่อยออกมาในช่วงแรก แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยกากมะพร้าวที่ปริมาณ 46 wt% มีค่า T150 องศาเซลเซียส น้อยกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยกากทะเลลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยสังข์ข้าวโพดตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณสารเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่น้อยที่สุด นอกจากนี้จากรูปที่ 4.30 พบว่าเส้นใยสังข์ข้าวโพดที่มีปริมาณสารเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มากที่สุด หลังจากทดสอบการขยายตัวทางความร้อนจะเกิดหลุมขนาด

ใหญ่ที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อน มากกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ และยังพบว่าเส้นใยกาบมะพร้าวมีพื้นที่ผิวในยัดเกาะที่มากที่สุด จึงทำให้พอลิพรพิลีนรีไซเคิลมีพื้นที่ในการยัดเกาะที่มากกว่าเส้นใยกาบทะเลลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยซังข้าวโพดตามลำดับ จึงทำให้การผสมระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยกาบมะพร้าว นั้นเข้ากันได้ดีกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ จึงทำให้ค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเกิดได้น้อยกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ

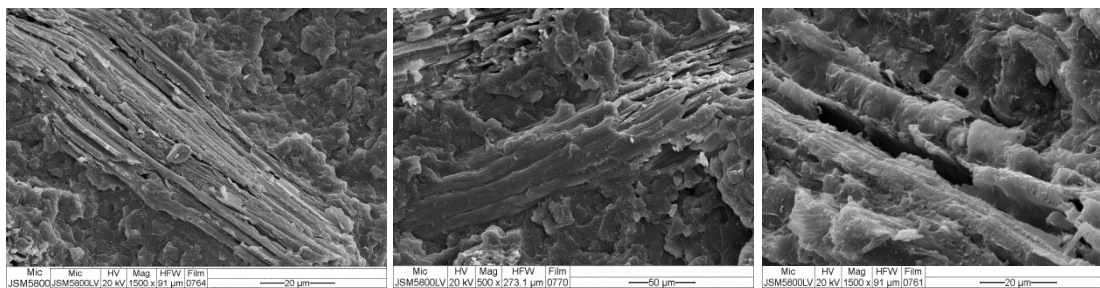
ดังนั้นสรุปได้ว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติมีค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่น้อยกว่า พอลิพรพิลีนรีไซเคิล และพบว่าค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเส้นใยธรรมชาติขึ้น ซึ่งอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณของพอลิพรพิลีนรีไซเคิลนั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากเนื่องมาจากการสลายตัวของพันธะโควาเลนต์ของพอลิพรพิลีนรีไซเคิล จึงทำให้ผลของค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาตินั้นมีสมบัติความเสถียรทางความร้อนมากกว่าพอลิพรพิลีนรีไซเคิลที่ไม่ผ่านการผสม นอกจากนี้ที่ปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่ 46 wt% จะให้ค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ต่ำที่สุด โดยที่เส้นใยกาบมะพร้าวจะให้ค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ต่ำที่สุดโดยมีค่าความเครียดคือ 5331.21 และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนคือ 42.64 รองลงมาเป็นเส้นใยปาล์มน้ำมันโดยมีค่าความเครียดคือ 5442.74 และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนคือ 43.54 ตามด้วยเส้นใยซังข้าวโพดโดยมีค่าความเครียดคือ 5527.43 และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนคือ 44.21 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.26 สมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่มีการใส่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ

ลำดับ ที่	สูตร	ค่าความเค้นที่อุณหภูมิเลื่อนไป (10^{-6} m)			อัตราการขยายตัว ทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (10^{-6} m/(m $^{\circ}$ C))	อัตราการขยายตัว ทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (10^{-6} m/(m $^{\circ}$ C))
		T50 $^{\circ}$ C	T100 $^{\circ}$ C	T150 $^{\circ}$ C		
1	rPP(100%)	521.73	3191.48	6221.40	20.87	51.84
2	rPP70C26	702.96	3438.56	5683.75	28.12	47.43
3	rPP70CO26	532.67	3208.94	5312.20	21.31	44.26
4	rPP70P26	690.34	3403.43	5692.23	27.61	45.85
5	rPP60C36	734.41	3496.00	5562.34	29.37	46.35
6	rPP60CO36	564.95	3242.21	5277.22	22.59	43.96
7	rPP60P36	726.77	3490.34	5572.43	29.07	46.43
8	rPP50C46	785.20	3569.36	5427.42	31.4	45.22
9	rPP50CO46	594.65	3309.34	5201.23	23.78	43.43
10	rPP50P46	767.34	3567.33	5382.74	30.69	44.85



รูปที่ 4.29 กราฟ CTE ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และ วัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติที่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ



(1)

(2)

(3)

รูปที่ 4.30 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุไม้ผสมพลาสติกพอลิโพรพอลีนที่ปริมาณสารเติมแต่ง 3% และปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก หลังการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนกำลังขยาย 1500x (1) เส้นใยคาบมะพร้าว (2) เส้นใยปาล์ม (3) เส้นใยซังข้าวโพด

4.4 สมบัติการต้านการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้แนวตั้ง (Vertical Burning Rating) ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติกแสดงดังตารางที่ 4.27 พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ปริมาณ พลาสติก 50% 60% และ 70 % โดยน้ำหนัก ไม่สามารถจัดอันดับของอัตราการเผาไหม้ได้ เนื่องจากชิ้นงานไม่หยุดการเผาไหม้ ซึ่งจากอัตราการเผาไหม้ พบว่าการทำผสมของเส้นใยธรรมชาติไม่ส่งผลต่อสมบัติการต้านการติดไฟของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและเส้นใยธรรมชาติ

อัตราการเผาไหม้แนวนอน (Horizontal Burning Rate) ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติก จากตารางที่ 4.27 เมื่อใส่เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการผสมลงในพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการเผาไหม้

จากตารางที่ 4.27 และดังรูปที่ 4.30 อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติกของชนิดไม้ 3 ชนิด ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 70% โดยน้ำหนัก มีอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุด เนื่องมาจากปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ผสมอยู่ 26% โดยน้ำหนัก เมื่อเกิดการเผาไหม้ เส้นใยธรรมชาติที่จะมีส่วนประกอบหลักเป็น เซลลูโลส เฮลมิเซลลูโลส และลิกนิน จะสลายตัวออกไปที่อุณหภูมิต่ำและปล่อยออกซิเจนออกมา จึงทำให้การลามไฟนั้นลามได้เร็วยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาชนิดของเส้นใยธรรมชาติ พบว่า เส้นใยคาบมะพร้าว rPP70NF46 มีอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับการทดสอบในปริมาณพลาสติกที่ 70% โดยน้ำหนัก รองลงมาเป็นเส้นใยปาล์ม rPP70NF46 และข้าวโพด rPP70NF46 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.32 จะพบว่าการกระจายตัวของเส้นใยธรรมชาติที่อยู่ในวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยคาบมะพร้าวจะมี

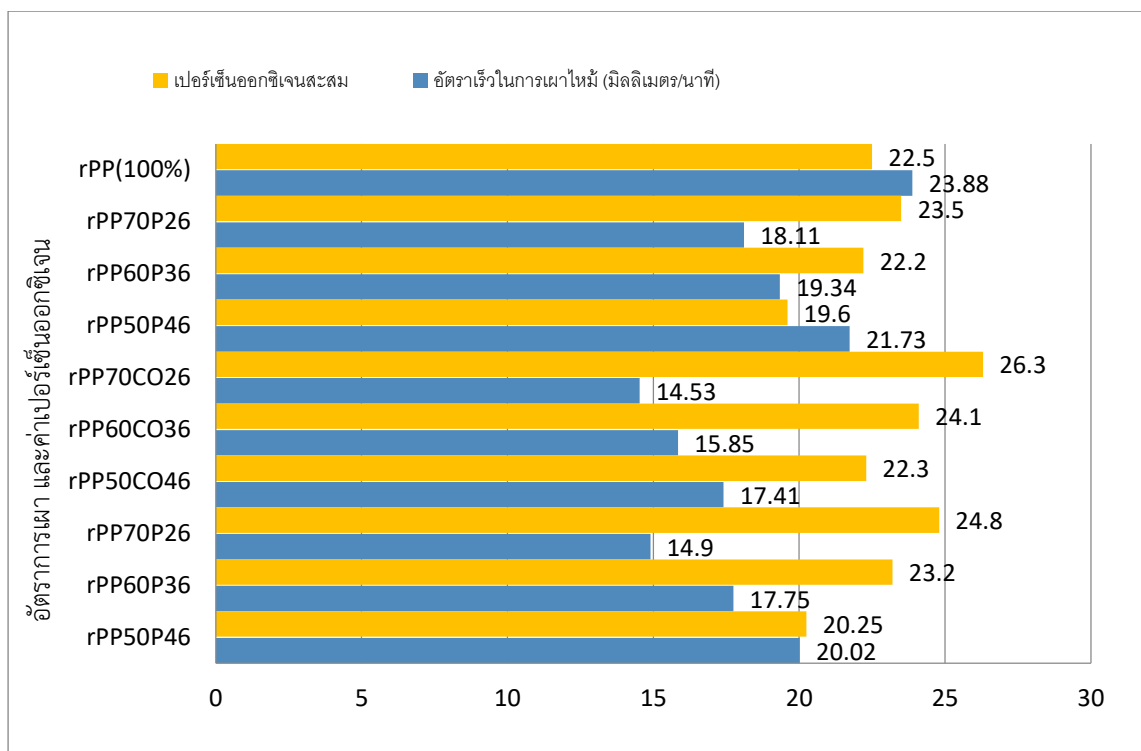
กระจายตัวแบบเกาะกลุ่มได้ทั่วถึงที่สุด จึงให้เมื่อจึงทำให้เกิดการลามของไฟได้ช้ากว่าเส้นใยพาล์มและข้าวโพดตามลำดับ

การทดสอบหาค่าปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟ (Limiting oxygen index) เป็นการวัดค่าของปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟ โดยที่ค่า ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมไม้พลาสติก แสดงดังตารางที่ 4.27 และดังรูปที่ 4.30 พิจารณาที่ปริมาณพลาสติกที่ 70% โดยน้ำหนัก มีค่าของปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟต่ำที่สุด เพราะมีเส้นใยธรรมชาติที่ผสมอยู่เพียง 26% โดยน้ำหนัก จึงทำให้มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วนที่ต่ำกว่าที่มีปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ผสมอยู่ 46% โดยน้ำหนัก โดยเส้นใยธรรมชาตินั้นจะมีส่วนประกอบหลักเป็น เซลลูโลส ซึ่งมีสูตรโครงสร้างคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวออกมาของพันธะและปล่อยออกซิเจนออกมาได้มากกว่าที่ 26% โดยน้ำหนัก จึงทำให้ที่ปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ผสมอยู่ 46% โดยน้ำหนัก มีค่าของปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟต่ำลง ทำให้การติดไฟนั้นง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาชนิดของเส้นใยธรรมชาติ พบว่า เส้นใยกาบมะพร้าว rPP70CO46M3 มีค่าของปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการทดสอบในปริมาณพลาสติกที่ 70% โดยน้ำหนัก รองลงมาเป็นพาล์ม rPP70P46M3 และ ข้าวโพด rPP70P46M3 เนื่องมาจากเส้นใยกาบมะพร้าวนั้นมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าเส้นใยพาล์มและข้าวโพดตาม จึงทำให้เส้นใยกาบมะพร้าวสามารถยึดติดเข้ากับพอลิเมอร์ได้มากเส้นใยชนิดอื่น ทำให้วัสดุผสมไม้พลาสติกที่ผสมกับเส้นใยกาบมะพร้าวมีการสลายตัวออกมาของออกซิเจนได้ยากกว่าไม้ชนิดอื่นๆ จึงทำให้ค่าปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่ช่วยในการติดไฟมีค่าสูง

ประสิทธิภาพที่ดีของการหน่วงไฟสามารถพิจารณาได้จากความเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% ของน้ำหนักที่สูญหายไป เนื่องจากความร้อน ($T_{5\%}$) และอุณหภูมิการสลายตัวที่ 50% ของน้ำหนักที่สูญหายไป เนื่องจากความร้อน ($T_{50\%}$) นอกจากนี้ยังพิจารณาที่ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ดังนั้น ค่า $T_{5\%}$, $T_{50\%}$ และปริมาณเถ้ามีค่ามากแสดงว่าพอลิเมอร์มีความเสถียรทางความร้อนสูง

ตารางที่ 4.27 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติกที่มีการใส่เส้นใยธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ

ลำดับ	ชนิดไม้	ปริมาณพลาสติก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สูตร	หน่วงไฟแนวนอน					ค่าเฉลี่ย (วินาที)	อัตราเผาไหม้ (มม./นาที)	หน่วงไฟแนวตั้ง (วินาที)	เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนสะสม (%)
					การทำซ้ำ (วินาที)							อัตราเผาไหม้ (มม./นาที)	
					1	2	3	4	5	อัตราเผาไหม้ (มม./นาที)			
1	ปาล์ม	70	26	rPP70P26	224.27	226.38	223.12	224.56	225.21	224.70	14.90	NC	24.80
2	ปาล์ม	60	36	rPP60P36	254.16	253.82	251.71	253.21	254.42	253.46	17.75	NC	23.20
3	ปาล์ม	50	46	rPP50P46	301.82	299.28	302.42	304.41	302.1	302.00	20.02	NC	20.25
4	มะพร้าว	70	26	rPP70CO26	260.16	256.12	257.94	259.67	258.31	258.44	14.53	NC	26.30
5	มะพร้าว	60	36	rPP60CO36	283.69	284.9	282.38	284.21	283.75	283.78	15.85	NC	24.10
6	มะพร้าว	50	46	rPP50CO46	311.26	309.78	308.11	310.73	307.59	309.49	17.41	NC	22.30
7	ข้าวโพด	70	26	rPP70P26	208.88	204.87	207.83	208.12	205.41	207.02	18.11	NC	23.50
8	ข้าวโพด	60	36	rPP60P36	229.88	233.3	231.4	235.61	232.84	232.60	19.34	NC	22.20
9	ข้าวโพด	50	46	rPP50P46	250.76	247.64	247.77	248.84	246.78	248.35	21.73	NC	19.60
10	pp	100	100	PP(100%)	186.23	188.12	189.12	187.34	191.23	188.40	23.88	NC	22.50



รูปที่ 4.31 อัตราการเผาไหม้และอันดับการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ปริมาณเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ

4.5 ต้นทุนการผลิต

การหาต้นทุนในการผลิต เพื่อต้องการทราบถึงต้นทุนวัตถุดิบทางตรง ซึ่งงานวิจัยนี้จะคำนวณต้นทุนในระดับห้องปฏิบัติการ คือ ต้นทุนวัสดุของไม้ทั้ง 3 ชนิด ในสัดส่วน rPP70NF26M3 (rPP:WOOD:MAPP) ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในการทดลอง โดยแสดงวิธีการคำนวณดังนี้

4.5.1 การคำนวณราคาต้นทุนวัสดุ

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติ พลาสติกพอลิโพรพิลีน และสารเติมแต่ง

เส้นใยธรรมชาติ ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยกาบมะพร้าว เส้นใยปาล์ม และเส้นใยซังข้าวโพด ราคาของเส้นใยธรรมชาติจะเป็นราคาที่สอบถามจากผู้ที่เกี่ยวข้อง เช่น โรงงานไม้แปรรูป โรงงานรับซื้อขี้เถ้าและเศษไม้ เป็นต้น โดยราคาเส้นใยธรรมชาติแสดงดังตารางที่

4.28

สำหรับวิธีต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างการคิดต้นทุนของเส้นใยกาบมะพร้าว คือ 50 กิโลกรัม ราคา 450 บาท คิดเป็นกิโลกรัมละ $(450/50) = 9$ บาท เนื่องจากช่วงขนาดเส้นใยธรรมชาติที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดี คือ เส้นใยธรรมชาติขนาด 26% โดยน้ำหนัก ทำให้ก่อนการขึ้นรูปต้องทำการร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ใน 1 กิโลกรัมสำหรับสัดส่วน rPP70NF26M3 ต้องการใช้เส้นใยกาบมะพร้าว 260 กรัม ทำการร่อนเส้นใยกาบมะพร้าวจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งจะใส่เส้นใยกาบมะพร้าว 250 กรัม ดังนั้นใช้เส้นใยกาบมะพร้าวจำนวน $(3 \times 250)/1000 = 0.75$ กิโลกรัม โดยมีต้นทุนสำหรับเส้นใยกาบมะพร้าว $(0.75 \times 9) = 6.75$ บาท และปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชิ้น ซึ่งมีขนาด 25 มม. x 130 มม. x 7 มม. มีปริมาณ 12 กรัม ดังนั้นจึงมีต้นทุนเส้นใยกาบมะพร้าว $(6.75/260) \times 12 = 0.31$ บาท

พลาสติก PP เกรด 1100 NK มี melt flow index (MFI) 11 g/10 min จาก IRPC public company limited ราคา กิโลกรัมละ 52.50 บาท ดังนั้น ปริมาณพลาสติก 17.1 กรัม ที่ใช้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก จะมีต้นทุนวัสดุเท่ากับ $(52.50 \times 17.1)/1000 = 0.90$ บาท

สารเสริมแต่ง MAPP ราคา กิโลกรัมละ 6,520 บาท ปริมาณที่ใช้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก 0.9 กรัม มีต้นทุนเท่ากับ $(6520 \times 0.9)/1000 = 5.87$ บาท

ตารางที่ 4.28 ต้นทุนวัสดุของวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชิ้น (25 มม. x 130 มม. x 7 มม) จากเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดในสัดส่วน rPP70NF26M3

ชนิดเส้นใยธรรมชาติ	เส้นใยธรรมชาติ (บาท)	พลาสติก (บาท)	สารเติมแต่ง MAPP (บาท)	ต้นทุนวัสดุรวม (บาท/ชิ้น)
มะพร้าว	0.31	0.90	5.87	7.08
ปาล์ม	0.07	0.90	5.87	6.84
ข้าวโพด	0.05	0.90	5.87	6.82

4.5.2 การคำนวณราคาต้นทุนพลังงาน

เครื่องใช้ไฟฟ้าตลอดการขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติกทั้งหมดจำนวน 5 เครื่อง ได้แก่ เครื่องร่อนแยกขนาด ใช้กำลังไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์ การร่อนไม้แต่ละรอบจะใช้เวลา 15 นาที ปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่จะได้รับหลังจากการร่อนจะแตกต่างกันไป ทำให้ค่าไฟฟ้าของการร่อนเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดแตกต่างกัน เช่น การคำนวณค่าไฟฟ้าในการร่อนเส้นใยกาบมะพร้าว ต้องทำการร่อนจำนวน 3 รอบ สำหรับสัดส่วน rPP70NF26M3 ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการร่อนเท่ากับ $(3 \times 15)/60 = 0.75$ ชั่วโมง จะใช้พลังงานเท่ากับ $2 \times 0.75 = 1.5$ หน่วย ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย 5.1135 บาท

จะเสียค่าไฟฟ้าของการร่อนแยกขนาดสำหรับเส้นใยธรรมชาติขนาด 260 กรัม เท่ากับ $1.5 \times 5.1135 = 7.67$ บาท และปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติกขนาด 25 มม. \times 130 มม. \times 7 มม. มีปริมาณ 12 กรัม ดังนั้น ต้นทุนค่าไฟฟ้าของการร่อนแยกขนาดสำหรับเส้นใยกาบมะพร้าว $(7.67/260) \times 12 = 0.35$ บาทต่อวัน โดยค่าไฟฟ้าสำหรับการร่อนเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 4.29

ตู้อบความร้อน ใช้กำลังไฟฟ้า 5.6 กิโลวัตต์ แม้แต่ละชนิดจะใช้เวลาในการอบ 8 ชั่วโมง ซึ่งตู้อบความร้อนใช้สำหรับอบเส้นใยธรรมชาติเพื่อไล่ความชื้นออกจากเส้นใยไม้ก่อนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และเครื่องอัดรีด การอบความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1) อบผงไม้ก่อนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ในการอบแต่ละรอบสามารถอบเส้นใยธรรมชาติได้ปริมาณ 3 กิโลกรัม ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ $(5.6 \times 8 \times 5.1135)/3000 = 0.008$ บาทต่อกรัม ปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ใช้สำหรับขึ้นรูป 1 ชิ้น เท่ากับ 12 กรัม ทำให้ค่าไฟฟ้าสำหรับการอบเท่ากับ $12 \times 0.08 = 0.96$ บาทต่อชิ้น

2) อบเม็ดวัสดุผสมที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ เพื่อนำไปอัดเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีด ในแต่ละรอบทำการอบเม็ดวัสดุผสมปริมาณ 1 กิโลกรัม ดังนั้นค่าไฟฟ้าเท่ากับ $(5.6 \times 8 \times 5.1135)/1000 = 0.23$ บาทต่อกรัม ปริมาณเม็ดวัสดุผสมที่ใช้สำหรับการขึ้นรูป 1 ชิ้น เท่ากับ 30 กรัม ทำให้ค่าไฟฟ้าสำหรับการอบเท่ากับ $30 \times 0.23 = 6.90$ บาทต่อชิ้น

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ใช้ผสมวัสดุทั้งสามชนิดในสัดส่วน rPP70:NF26:MAPP3 ในปริมาณครั้งละ 1 กิโลกรัม ซึ่งจะใช้กำลังไฟฟ้า 23.5 กิโลวัตต์ เวลาในการอัดรีดขึ้นรูปของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน เช่น เส้นใยกาบมะพร้าว ต้องใช้เวลาในการอัดรีด 60 นาที หรือ 1 ชั่วโมง ดังนั้นจะเสียค่าไฟฟ้า $(23.5 \times 1 \times 5.1135)/1000 = 0.12$ บาทต่อกรัม ใช้เม็ดวัสดุผสมในการอัดรีดขึ้นรูป 30 กรัม ทำให้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ $30 \times 0.12 = 3.6$ บาทต่อชิ้น โดยค่าไฟฟ้าสำหรับการอัดรีดแบบเกลียวคู่ของเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 4.29

เครื่องบดพลาสติก ใช้สำหรับบดเส้นวัสดุผสมที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ให้เป็นเม็ดวัสดุผสม ใช้กำลังไฟฟ้า 3.6 กิโลวัตต์ ซึ่งในการบดจะแบ่งออกเป็น 2 รอบ รอบแรกบดจากเส้นวัสดุผสมให้เป็นเม็ดวัสดุผสม ใช้เวลา 20 นาที รอบสองบดเม็ดวัสดุผสมให้มีขนาดเล็กใช้เวลา 10 นาที รวมเวลาใช้เวลา 30 นาที หรือ 0.5 ชั่วโมง สำหรับเม็ดวัสดุ 1 กิโลกรัม ดังนั้นค่าไฟฟ้า $(3.6 \times 0.5 \times 5.1135)/1000 = 0.01$ บาทต่อกรัม ปริมาณเม็ดวัสดุผสม 1 ชิ้น เท่ากับ 30 กรัม ทำให้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ $30 \times 0.1 = 3$ บาทต่อชิ้น

เครื่องอัดรีด สามารถอัดรูปชิ้นงานได้ครั้งละ 6 ชิ้น ซึ่งการคิดค่าไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1) ชุดอัดรีด คำนวณค่าไฟฟ้าตั้งแต่เปิดเครื่องเพื่ออุ่นชุดแม่พิมพ์จนจบขั้นตอนการอัดรีด ใช้กำลังไฟฟ้า 9.9 กิโลวัตต์ เวลาที่ใช้งาน 25 นาที หรือ 0.42 ชั่วโมง ดังนั้นค่าไฟฟ้า ($9.9 \times 0.42 \times 5.1135$) = 3.54 บาทต่อชิ้น

2) ชุดไฮดรอลิก ใช้กำลังไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์ จะใช้งานเมื่อมีการเปิดปิดแผ่นเพลท เวลาที่ใช้ 3.5 นาที หรือ 0.06 ชั่วโมง ดังนั้นค่าไฟฟ้า ($2.2 \times 0.06 \times 5.1135$)/6 = 0.11 บาทต่อชิ้น เครื่องหล่อเย็น สามารถอัดรูปชิ้นงานได้ครั้งละ 6 ชิ้น ซึ่งการคิดค่าไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1) คิดค่าไฟฟ้าในส่วนของปั้มน้ำขนาดเล็ก ใช้สำหรับดูดวนน้ำสำหรับหล่อเย็น ใช้กำลังไฟฟ้า 0.06 กิโลวัตต์ เวลาใช้งานตั้งแต่เปิดเครื่องชุดอัดรีดเพื่ออุ่นแม่พิมพ์จนหล่อเย็นชิ้นงานเสร็จ ใช้เวลา 33 นาที หรือ 0.55 ชั่วโมง ดังนั้นค่าไฟฟ้า ($0.06 \times 0.55 \times 5.1135$)/6 = 0.03 บาทต่อชิ้น

2) ชุดไฮดรอลิก ใช้กำลังไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์ จะใช้งานเมื่อมีการเปิดปิดแผ่นเพลท เวลาที่ใช้ 3.5 นาที หรือ 0.06 ชั่วโมง ดังนั้นค่าไฟฟ้า ($2.2 \times 0.06 \times 5.1135$)/6 = 0.11 บาทต่อชิ้น

ตารางที่ 4.29 ต้นทุนพลังงานของวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชิ้น (25 มม. x 130 มม. x 7 มม.) ในเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ

ชนิดเส้นใยธรรมชาติ	เครื่องร้อนแยกขนาด (บาท)	ตู้อบความร้อน (บาท)	เครื่องอัดรีด (บาท)	เครื่องบดเม็ด (บาท)	เครื่องอัดร้อน (บาท)	เครื่องหล่อเย็น (บาท)	ต้นทุนพลังงาน (บาท/ชิ้น)
มะพร้าว	0.35	7.86	3.6	3	3.68	0.14	18.63
ปาล์ม	0.35	7.86	3.00	3	3.68	0.14	18.03
ข้าวโพด	0.35	7.86	2.70	3	3.68	0.14	17.73

*การคำนวณค่าไฟฟ้าที่ 5.1135 บาท/หน่วย อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย ที่แรงดัน 22 - 33 กิโลโวลต์ ประจำเดือน กันยายน 2561

4.5.3 ต้นทุนรวม

ต้นทุนรวมเกิดจากการรวมระหว่างต้นทุนวัสดุกับต้นทุนพลังงาน แสดงดังตารางที่ 4.30 ซึ่งเป็นต้นทุนที่คำนวณจากการขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก จะเห็นได้ว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ต่างมีต้นทุนรวมที่ใกล้เคียงกัน โดยต้นทุนรวมคือ 24.41 - 25.57 บาทต่อ

วัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชั้น เนื่องจากราคาเส้นใยธรรมชาติมีราคาขายตามท้องตลาดใกล้เคียงกัน และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการของแต่ละเครื่องจักรใกล้เคียงกัน ทำให้ต้นทุนรวมของวัสดุผสมไม้พลาสติกมีราคาไม่แตกต่างกัน ซึ่งเส้นใยซังข้าวโพดมีต้นทุนที่ต่ำที่สุด คือ 24.41 บาทต่อชิ้น และเส้นใยกาบมะพร้าวมีต้นทุนสูงสุด คือ 25.57 บาทต่อชิ้น

ตารางที่ 4.30 ต้นทุนรวมของวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชั้น (25 มม. x 130 มม. x 7 มม.) ในเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ

ชนิดเส้นใยธรรมชาติ	ต้นทุนวัสดุ (บาท)	ต้นทุนพลังงาน (บาท)	ต้นทุนรวม (บาท/ชิ้น)
มะพร้าว	7.08	18.63	25.71
ปาล์ม	6.84	18.03	24.87
ข้าวโพด	6.82	17.73	24.55

4.6 การเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุผสมไม้พลาสติกในการให้ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 876-2547 สามารถนำสมบัติเชิงกลของวัสดุไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไม้พลาสติก

จากตารางที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลและต้นทุนการผลิตของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่สัดส่วน rPP70NF26M3 กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไม้พบว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากไม้ 3 ชนิด ให้สมบัติที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไม้พลาสติก ความหนาแน่น (มอก.966-2547) และเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไม้พลาสติก (มอก. 876-2547) ทุกสมบัติ

ตารางที่ 4.31 การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ และต้นทุนการผลิตของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่สัดส่วน rPP70NF26M3 กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไม้ทั้ง 3 ชนิด

คุณสมบัติ	ชนิดไม้ (rPP70:NF26:M3)			mdf	Particle board	ไม้อัดซีเมนต์
	มะพร้าว	ปาล์ม	ข้าวโพด			
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1500	1320	1250	มอก.966-2547	มอก.876-2547	มอก.878-2547
ความแข็งแรงดัด (MPa)	38.80	34.74	32.50	ไม่น้อยกว่า 23	ไม่น้อยกว่า 15	ไม่น้อยกว่า 9
มอดูลัสแรงดัด (MPa)	2522.10	2138.10	1647.80	ไม่น้อยกว่า 2700	ไม่น้อยกว่า 1950	ไม่น้อยกว่า 3000
ความแข็งแรงดึง (MPa)	25.21	23.97	23.65	ไม่น้อยกว่า 0.65	ไม่น้อยกว่า 0.45	ไม่น้อยกว่า 0.5
หน่วงไฟ (มม./นาที)	14.53	14.96	18.11	ไม่เกิน 1 นาที	ไม่เกิน 1 นาที	ไม่เกิน 1 นาที
ต้นทุนการผลิต (บาท)	25.71	24.87	24.55	-	-	-

*ผลการทดลองมาจากการทำซ้ำ 5 ครั้ง

**ต้นทุนการผลิตต่อวัสดุผสมพลาสติก 1 ชนิด ขนาด 25 มม. x 130 มม. x 7 มม.

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการหน่วงไฟ ของวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยกาบมะพร้าว ปาล์ม และข้าวโพด ที่สัดส่วนปริมาณพลาสติก 50%, 60% และ 70% โดยน้ำหนัก และพิจารณาปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1– 4% ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการทดสอบการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบความแข็งแรงดัด การทดสอบความแข็งแรงดึง การทดสอบความแข็งแรงอัด และการทดสอบสมบัติการหน่วงไฟ และการทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของสัณฐานวิทยา รวมถึงการคำนวณต้นทุนของวัสดุผสมไม้พลาสติกในสัดส่วนและปริมาณที่ให้ค่าที่ดีที่สุด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรม ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

จากผลการทดสอบความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัดของวัสดุผสมไม้พลาสติก ที่พิจารณาที่สัดส่วนปริมาณพลาสติก 50%, 60% และ 70% โดยน้ำหนัก และพิจารณาปริมาณสารเติมแต่งขนาด 1– 4% ซึ่งให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน หมายถึง ในสัดส่วนที่ใช้ในการขึ้นรูป หรือปริมาณพลาสติกพอลิโพรพิลีนในสัดส่วน 50% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัดมีค่าลดลง ส่วนปริมาณพลาสติกพอลิโพรพิลีนในสัดส่วน 60% 70% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่า ในสัดส่วนการทดลองเมื่อมีพลาสติกในปริมาณมากจะช่วยให้มีการยึดติดกันของพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้มากขึ้น แต่ในทางกลับกันค่ามอดูลัสแรงดัด และค่ามอดูลัสแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไม้ และลดปริมาณพลาสติกลง เนื่องจากมอดูลัสเป็นตั้แสดงถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างหรือความเสถียรภาพของวัสดุ โดยปริมาณไม้ที่เติมลงไปจะเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากขึ้น ดังนั้นสำหรับการพิจารณาสัดส่วนในการขึ้นรูป วัสดุผสมไม้พลาสติกที่ปริมาณพลาสติกขนาด 70% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% หรือสัดส่วน rPP70NF46M3 ให้ค่าความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัดสูงที่สุด และในวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยชั่งข้าวโพด ที่ปริมาณพลาสติกขนาด 50% โดยน้ำหนัก และปริมาณสารเติมแต่งขนาด 3 wt% หรือสัดส่วน rPP50NF46M3 ให้ค่ามอดูลัสแรงดัด และมอดูลัสแรงดึงสูง

ที่สุด และเมื่อศึกษาชนิดไม้จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสแรงดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าความแข็งแรงอัด พบว่าชนิดไม้ที่มีผลต่อคุณสมบัติดังกล่าวจากการทดสอบเส้นใยกาบมะพร้าวจะให้ค่าที่ดีที่สุดจากเส้นใยไม้ทั้ง 3 ชนิด และจากการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่า วัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติที่สารเติมแต่งปริมาณ 3% และปริมาณพลาสติก 50% โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยไม้มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติกวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติที่สารเติมแต่งปริมาณ 3% และปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าการกระจุกตัวกันเป็นก้อนของเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความร้อนขณะขึ้นรูป และขนาดของปริมาณพลาสติกที่แตกต่างกันจะให้สมบัติของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่แตกต่างกัน หากมีปริมาณพลาสติกที่น้อยจะทำให้ระหว่างการขึ้นรูปพลาสติกกันเส้นใยธรรมชาติจะเกาะตัวเป็นก้อนได้น้อย เนื่องจากความร้อนขณะขึ้นรูปจะทำให้พลาสติกไม่สามารถเข้าไปจับเส้นใยธรรมชาติได้ จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลง

อัตราการเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุผสมไม้พลาสติกของชนิดไม้ 3 ชนิด ปริมาณพลาสติกที่ขนาด 70% โดยน้ำหนัก มีอัตราการติดไฟที่ต่ำที่สุด เนื่องมาจากปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่ผสมอยู่สูงถึง 26% โดยน้ำหนัก เมื่อเกิดการเผาไหม้ เส้นใยธรรมชาติที่จะมีส่วนประกอบหลักเป็น เซลลูโลส เฮลมิเซลลูโลส และลิกนิน จะสลายตัวเป็นเถ้าได้หลังจากที่ได้รับความร้อน ซึ่งเถ้าที่เกิดจากเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้จะทำตัวเป็นฉนวนด้านการติดไฟให้กับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และเมื่อพิจารณาชนิดของเส้นใยธรรมชาติ พบว่า พบว่า เส้นใยกาบมะพร้าว rPP70CO26 มีอัตราการติดไฟต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับการทดสอบในปริมาณพลาสติกที่ 70% โดยน้ำหนัก ลองลงมาเป็นปาล์ม และข้าวโพด และการกระจายตัวของเส้นใยธรรมชาติที่อยู่ในวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล กับเส้นใยธรรมชาติ นั้นเส้นใยกาบมะพร้าวจะกระจายตัวแบบเกาะกลุ่มได้ทั่วถึงที่สุด จึงให้เมื่อเผาไหม้จะเกิดเถ้าขึ้นมาปกคลุมวัสดุผสมไม้พลาสติกได้อย่างทั่วถึงจึงทำให้เกิดการลามของไฟได้ช้ากว่าเส้นใยปาล์มและข้าวโพดตามลำดับ

วัสดุผสมไม้พลาสติกมีค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่น้อยกว่า พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และพบว่าค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเส้นใยธรรมชาติขึ้น ซึ่งอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลนั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ เนื่องมาจากการเปลี่ยนสภาพของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ 135 องศาเซลเซียส จึงทำให้ผลของค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาตินั้นมีสมบัติความเสถียรทางความร้อนมากกว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ไม่ผ่านการผสม นอกจากนี้ที่ปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่ 46

wt% จะให้ค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ต่ำที่สุด โดยที่เส้นใยกาบมะพร้าวจะให้ค่าความเครียดและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ต่ำที่สุดโดยมีค่าความเครียดคือ 5331.21 และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนคือ 42.64 รองลงมาเป็นเส้นใยปาล์มน้ำมันโดยมีค่าความเครียดคือ 5442.74 และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนคือ 43.54 ตามด้วยเส้นใยชังข้าวโพดโดยมีค่าความเครียดคือ 5527.43 และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนคือ 44.21 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาต้นทุนวัสดุและต้นทุนพลังงาน ของวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชั้น (25 มม. X 130 มม. X 7 มม.) ในเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกจากเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ต่างมีต้นทุนรวมที่ใกล้เคียงกัน โดยต้นทุนรวมคือ 24.41 และ 25.57 บาทต่อวัสดุผสมไม้พลาสติก 1 ชั้น เนื่องจากราคาเส้นใยธรรมชาติมีราคาขายตามท้องตลาดใกล้เคียงกัน และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการของแต่ละเครื่องจักรใกล้เคียงกัน ทำให้ต้นทุนรวมของวัสดุผสมไม้พลาสติกมีราคาไม่แตกต่างกัน ซึ่งเส้นใยชังข้าวโพด และปาล์มมีต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด คือ 24.55 บาทต่อชิ้น และเส้นใยกาบมะพร้าวมีต้นทุนรวมสูงสุด คือ 25.71 บาทต่อชิ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพียงพอลิโพรพิลีนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นผู้สนใจสามารถประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติกับพลาสติกอื่น ๆ ได้อีก
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอายุการใช้งาน และสมบัติอื่น ๆ เช่น สมบัติด้านงานโครงสร้าง เช่น โครงสร้างภายในแลภายนอก หากมีการนำไปใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- [1] Ashori, “Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries”, *Bioresour. Technol*, vol. 99, no.111, pp. 4661–4667, Jul. 2008.
- [2] G. Pritchard, “Two technologies merge: wood plastic composites”, *Plast. Addit.Compnd*, vol. 14, no.6, pp. 18–21, July. 2004.
- [3] M. Clemons, “Wood fiber-plastic composites in the United States–History and current and future markets”, in *the Proceedings of the 3rd International Wood and Natural fibred Composites Symposium*, Kassel, Germany, pp. 1–7. 2000.
- [4] A. A. Klyosov, “Wood-Plastic Composites”, 2 ed, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [5] M. Pollanen, M. Suvanto and TT. Pakkanen, “Cellulose reinforced high density polyethylene composites Morphology, mechanical and thermal expansion properties”, *Compos. Sci. Technol*, vol. 76, pp. 21–28, Mar. 2013.
- [6] เกษภัทร ธรรมานุกิจเจริญ, “การเตรียมและสมบัติของไฟเบอร์ของเส้นใยเชิงประกอบเซลลูโลสฟอสเฟต/พอลิโพรพิลีน”, วิทยาสตรมหาบัณฑิต.ภาควิชาวัสดุศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2554.
- [7] รพิตา จารปัญญาชีพ, “ผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมไม้พลาสติก ระหว่าง ผงซีลี้อยและพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้ว”, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.ภาควิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [8] ราชนิธิ์ จินแฉ่ม, “ผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์เชิงประกอบระหว่างเส้นใย ป่านครนารายณ์กับพอลิโพรพิลีน”, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.ภาควิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] ชีระศักดิ์ ถาวรเศรษฐวัฒน์, “การสังเคราะห์พลาสติกไฮเซอร์ชนิดหน่วงการติดไฟสำหรับพีวีซี จากกรด เทเรพทาติกที่ได้จากการรีไซเคิลขวดพลาสติกด้วยกระบวนการทางเคมี”, วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต.ภาควิชาวัสดุศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2543.
- [10] AN. Nakagaito and Y. Hiroyuki, “The effect of fiber content on the mechanical and thermal expansion properties of biocomposites based on microfibrillated cellulose”, *Spring. Sci. Bus. Media*, vol. 15, pp. 555–559, 2008.
- [11] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, “การพยากรณ์ผลการผลิต การเกษตร ปี พะาะปลูก 2559”, ครั้งที่ 11. การพยากรณ์ผลการผลิตการเกษตร, มีนาคม 2559.
- [12] วิทวัส จิรัฐพงศ์ และ กฤษณเวช ทรงธนศักดิ์, “การศึกษาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืชเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพ”, ครั้งที่ 21. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย, สงขลา, พฤศจิกายน, 2554.
- [13] จินตนา สุขสวัสดิ์, วรธรรม อุ่่นจิตติชัย และ อิทธิพล แจ่มชัด, “การศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ พลาสติกจากพอลิโพรพิลีน และเศษไม้จากปาล์มน้ำมัน เส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า และเส้นใย ทางใบ”, ครั้งที่ 8. การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 2554, หน้า 1578-1585.
- [14] ชาย ไชรวิส และ สุรกิตติ ศรีกุล, “ประวัติและความสำคัญ ใน เอกสารวิชาการปาล์ม น้ำมัน”, โรงพิมพ์ดอกเบ๊ย, หน้า 1-5, 2548.
- [15] แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา และ ธรรมบุญ อุดมมัน, “วัสดุวิศวกรรม”, ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์:แมคกรอ-ฮิล, 2551
- [16] J. Soucy, A. Koubaa, S. Migneault and B. Ried, “The potential of paper mill sludge for wood–plastic composites”, *Crops Prod*, vol. 54, pp. 248–256, 2014.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] A. Palm, J. Smith, M. Driscoll, L. Smith and L. Scott Larsen, “Chemical constituent influence on ionizing radiation treatment of a wood–plastic composite,” *Radiat. Phys. Chem*, vol. 124, pp. 164–168, 2016.
- [18] ดุษฎี สุริยพรรณพงศ์, ศุภจิน ตันวิเชียร, จิตติมา มานะกิจ และ ดวงรัตน์ ชูวิสิฐกุล, “การสกัดและประเมินคุณลักษณะของเซลลูโลสจากชานอ้อย ผักตบชวา และธูปฤๅษี”, เกษศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553.
- [19] ซีแลนด์ ฟอเรสต์ รีเสิร์ช อินสตีติว ลิมิเต็ด, “วิธีการผลิตผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่เป็นเส้นใยไม้-พลาสติก”, สิทธิบัตรประเทศไทย เลขที่ 1101003907, 2554.
- [20] ALD. Friedrich, “Standard-compliant development of a design value for wood–plastic composite cladding: An application-oriented perspective”, *Case Stud. Struct. Eng*, vol. 5, pp. 13–17, 2016.
- [21] เพ็ญศรี พูลผล, ไกรสร ไทยแท้, ช่ววัฒน์ สัมฤทธิ์, วณิชชา, ขวสิต แสงสวัสดิ์ และ อนินท์ มินนัต “การผลิตไม้เทียมจากเศษโฟมพีวีซีกับผงไม้”, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชชมงคลธัญบุรี. ปีที่ 4. ฉบับที่ 7, หน้า. 30-34, 2549.
- [22] อรรถพล ตะระะ, “คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ”, ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, หน้า. 165–249, 2551
- [23] มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์, ทิพย์รัตน์ พิฑูรทัศน์, พนิดา พุทธชาติสมบัติ และ รัชมาลินี สุเริงฤทธิ์, “สมบัติของแผ่นใยไม้อัดจากใยมะพร้าวกับโฟมพอลิสไตรีนผสมสารหน่วงไฟ”, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ฉบับที่ 15, หน้า 2, 2553.
- [24] วัชร จันฎ, “ผลกระทบของการเติมพอสเตอริสโตนในพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการหน่วงไฟ”, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2556
- [25] ศุภณัฐ ภัทรธีรา, “การศึกษาเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานการติดไฟในพอลิสไตรีน”, วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต.ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [26] K. Charlet, F. Saulnier, M. Dubois and A. Béakou, “Improvement of wood polymer composite mechanical properties by direct fluorinationl”, *Mater. Des*, vol. 74, pp. 61–66, 2015.
- [27] เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาติน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์”, ครั้งที่ 4. ฉบับที่ 1, วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2016.
- [28] HR. Nafchi, M. Abdouss, S. K.Najafi and RM. Gargari, “Effects of nano-clay particles and oxidized polypropylene polymers on improvement of the practical properties of wood-polypropylene composite”, *Adv.Compos. Mater*, vol. 24, pp. 239–248, May. 2015.
- [29] กษมา จารุกำจร, วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์, วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์, “ผลของการตัดแปรทางความร้อนและสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติของวัสดุผสมไม้พลาสติกระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านศรนารายณ์”, วิศวกรรมศาสตร์.ภาควิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- [30] AAA. Nourbakhsh, “Wood plastic composites from agro-waste materials: Analysis of mechanical properties”, *Bioresour. Technol*, vol. 101, no. 17, pp. 2525–2528, 2010.
- [31] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang, “Minimizing the creep of recycled polypropylene/rubberwood flour composites with mixture design experiments”, *J. Compos. Mater*, 2013.
- [32] P. Georgiopoulos, E. Kontou and A. Christopoulos, “Short-term creep behavior of a biodegradable polymer reinforced with wood-fibers”, *Compos. Part B Eng*, no. 80, pp. 134–144, 2015.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] รัตนา ตันทเทอดธรรม, วุฒินันท์ คงทัด และ กล้าณรงค์ ศรีรอด, “การศึกษาการเตรียมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยกาบมะพร้าวและปาล์มน้ำมัน”, ครั้งที่ 48. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 523-529, 2553.
- [34] น้ำอ้อย ศรีประสม, “ลักษณะทางลำต้นและอัตราพันธุกรรมในระยะกล้าของปาล์มน้ำมัน,” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.ภาควิชาพืชศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552
- [35] ต่อศักดิ์ กิตติกรรม, “การตัดแปรรเส้นใยปาล์มเพื่อนำไปใช้ร่วมกับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว”, ครั้งที่ 1. การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, 31 สิงหาคม, 2550.
- [36] Y. Li, 2012. “Effect of Coupling Agent Concentration, Fiber Content, and Size on Mechanical Properties of Wood/HDPE Composites”, *Polym. Mater*, vol. 61, no. 11, pp. 882-890.
- [37] SY. Leu, TH. Yang, SF. Lo and TH. Yang, “Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs)”, *Constr. Build. Mater*, vol. 1, no. 29, pp. 120-127, 2012.
- [38] A. Kaymakci and N. Ayitmis, “Waste chestnut shell as a source of reinforcing fillers for polypropylene composites”, *J. Thermoplast. Compos. Mater*, vol. 8, no. 1, pp. 1-11, 2012.
- [39] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ, ศิรินทร ทองแสง และวิชัย โรชาพิทักษ์, "สูตรส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีกับซีลื้อยไม้", ประเทศไทย, 2550.
- [40] หทัยกร สัตตบงกช, “องค์ประกอบใยธรรมชาติผสมโพลีโอเลฟินเพื่อทดแทนไม้ธรรมชาติ”, 18867, ประเทศไทย, 2548.
- [41] WD. Yang, P. Matthew and B. Stuart, “Cellulose reinforced composite composition”, World intellectual property organization, 2002.
- [42] KP. Gohr, WE. Neese and A. Savanuzzi, “Plastic wood-fiber pellets”, 5938994, 1999.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Minitab release 16 ช่วยในการคำนวณค่าทางสถิติ และทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง General Full Factorial ที่ค่าระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบ ANOVA และการพิจารณาสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก – 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งแรงตัด

ก – 1.1 ผลการวิเคราะห์การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบ

ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งประกอบด้วยความเป็นอิสระของข้อมูล ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูลซึ่งต้องทำการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบทางสถิติของสมบัติความแข็งแรงตัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ที่ได้เป็นไปในทางทิศเดียวกัน กล่าวคือ ข้อมูลแต่ละตัวที่นำมาทำการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน ข้อมูลที่นำมาพิจารณามีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลมีความเสถียรของค่าความแปรปรวน

(1) ความเป็นอิสระของข้อมูล

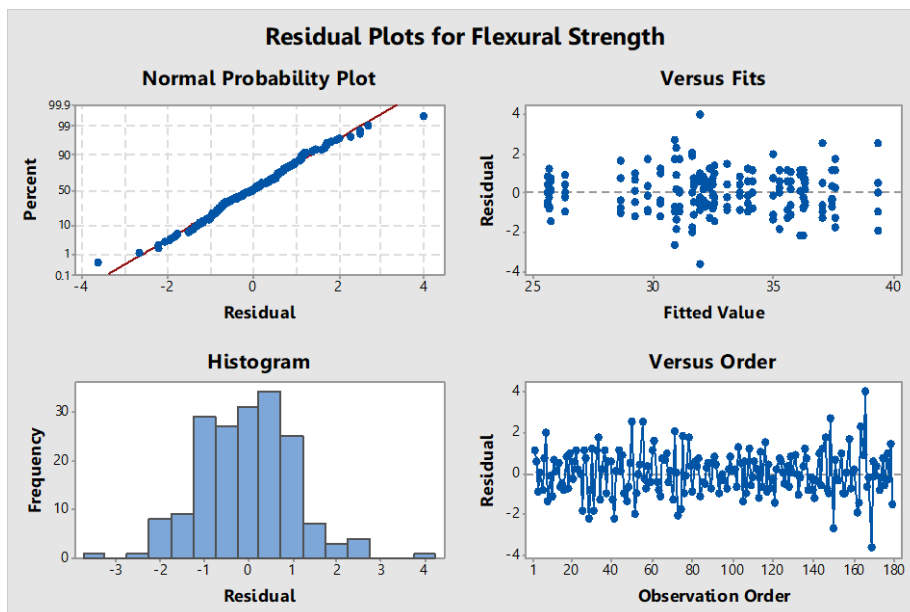
ความเป็นอิสระของข้อมูลต้องพิจารณาจากกราฟว่ามีการกระจายตัวที่ไม่สามารถทำนายได้ว่ามีแนวโน้มหรือทิศทางเป็นอย่างไร จากรูปที่ ก 1.1 (กราฟล่างขวา) พบว่ากราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางที่เคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั่นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน

(2) ความเป็นปกติของข้อมูล

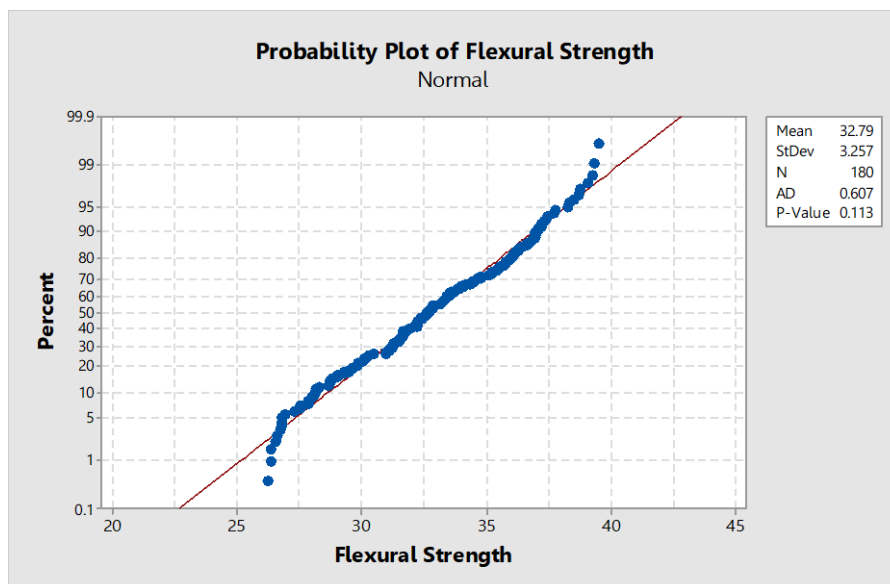
ความเป็นปกติของข้อมูล เป็นการพิจารณาตรวจสอบข้อมูลเป็นแบบปกติหรือไม่ โดยการพิจารณากราฟว่ามีลักษณะของข้อมูลเป็นเส้นตรง ซึ่งในกรณีที่ข้อมูลไม่เกิน 30 ข้อมูล แต่หากกรณีข้อมูลเกิน 30 ข้อมูล ให้พิจารณากราฟว่ามีลักษณะเป็นระฆังคว่ำหรือไม่ จากรูปที่ ก 1.1 (กราฟแท่งล่างซ้าย) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะโค้งปกติ จากนั้นทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยการทำการทดสอบ Normal Probability ดังแสดงในรูปที่ ก 1.2 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.113 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ และข้อมูลมีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่พิจารณามีการแจกแจงแบบปกติ

(3) ความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนข้อมูล

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนเป็นการสังเกตค่าความแปรปรวนของข้อมูลว่ามีค่าการกระจายตัวรอบค่าศูนย์คลาดเคลื่อนสม่ำเสมอหรือไม่ เมื่อพิจารณารูปที่ ก 1.1 (กราฟด้านบนขวา) ข้อมูลมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ดังนั้นข้อมูลจึงมีความเสถียรของค่าความแปรปรวน



รูปที่ ก 1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดัด



รูปที่ ก 1.2 Normal Probability Plot of Flexural Strength

ก - 1.2 การทดสอบสมมติฐานการทดลอง

แบบจำลองเชิงเส้นสำหรับการออกแบบ Three - Factor Factorial คือ

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (ก 1)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของ Response

τ_i คือ อิทธิพลของปัจจัยชนิดของไม้ (Species) ระดับที่ i^{th}

β_j คือ อิทธิพลของปริมาณพลาสติก (Volume) ระดับที่ j^{th}

γ_k คือ อิทธิพลของปริมาณสารเติมแต่ง (Additive) ระดับที่ k^{th}

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Species และปัจจัย Volume ระดับที่ i^{th} และ j^{th}

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Species และปัจจัย Additive ระดับที่ i^{th} และ k^{th}

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Volume และปัจจัย Additive ระดับที่ j^{th} และ k^{th}

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Species ปัจจัย Volume และปัจจัย Additive ระดับที่ i^{th} , j^{th} และ k^{th}

ε_{ijkl} คือ ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง ที่ระดับ i^{th} , j^{th} และ k^{th} ครั้งที่ l^{th}

สมมติฐานที่ใช้ทดสอบ

1. $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = \tau_6$
 $H_1: \text{At least one } \tau_i \neq 0$
2. $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$
 $H_1: \text{At least one } \beta_j \neq 0$
3. $H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3$
 $H_1: \text{At least one } \gamma_k \neq 0$
4. $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$ ทุกค่าของ i, j
 $H_1: \text{At least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$
5. $H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0$ ทุกค่าของ i, k
 $H_1: \text{At least one } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$
6. $H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$ ทุกค่าของ j, k
 $H_1: \text{At least one } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$
7. $H_0: (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0$ ทุกค่าของ i, j, k
 $H_1: \text{At least one } (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$

ตารางที่ ก 1.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดัด

General Factorial Regression: Flexural Strength versus Species, Volume, Additive

Factor Information

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volume	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	1754.77	50.136	50.06	0.000
Linear	7	1674.06	239.151	238.80	0.000
Species	2	1206.89	603.443	602.56	0.000
Volume	2	366.57	183.283	183.01	0.000
Additive	3	100.60	33.535	33.49	0.000
2-Way Interactions	16	68.89	4.306	4.30	0.000
Species*Volume	4	57.98	14.494	14.47	0.000
Species*Additive	6	6.11	1.018	1.02	0.417
Volume*Additive	6	4.81	0.801	0.80	0.572
3-Way Interactions	12	11.82	0.985	0.98	0.467
Species*Volume*Additive	12	11.82	0.985	0.98	0.467
Error	144	144.21	1.001		
Total	179	1898.98			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.00073	92.41%	90.56%	88.13%

ผลจากการวิเคราะห์

จากตารางที่ ก 1.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธ ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 92.41% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาตรสารเติมแต่ง 92.41% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 7.59%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ โดยมีค่า P-

value < 0.05 หมายความว่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.417, 0.572 และ 0.467 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

ตารางที่ ก 1.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Strength : Level of Additive

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of additive Means

Additive	N	Mean	StDev	95% CI
1	45	31.843	2.977	(30.902, 32.783)
2	45	32.634	3.256	(31.694, 33.575)
3	45	33.935	3.284	(32.995, 34.876)
4	45	32.745	3.260	(31.805, 33.686)

Pooled StDev = 3.19657

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Additive	N	Mean	Grouping
3	45	33.935	A
4	45	32.745	A B
2	45	32.634	A B
1	45	31.843	B

ตารางที่ ก 1.3 Tukey Simultaneous Test for Flexural Strength : Level of Additive

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	0.792	0.674	(-0.957, 2.541)	1.18	0.643
3 -1	2.093	0.674	(0.344, 3.842)	3.11	0.012
4 -1	0.903	0.674	(-0.846, 2.651)	1.34	0.539
3 -2	1.301	0.674	(-0.448, 3.050)	1.93	0.219
4 -2	0.111	0.674	(-1.638, 1.859)	0.16	0.998
4 -3	-1.190	0.674	(-2.939, 0.559)	-1.77	0.293

Individual confidence level = 98.97%

ตารางที่ ก 1.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Strength : Level of Volume

Means

Volume	N	Mean	StDev	95% CI
--------	---	------	-------	--------

1	60	30.868	3.631	(30.118, 31.617)
2	60	33.217	2.481	(32.467, 33.966)
3	60	34.284	2.576	(33.534, 35.033)

Pooled StDev = 2.94240

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volume	N	Mean	Grouping
3	60	34.284	A
2	60	33.217	A
1	60	30.868	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ๓ 1.5 Tukey Simultaneous Test for Flexural Strength : Level of Volume

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	2.349	0.537	(1.081, 3.618)	4.37	0.000
3 -1	3.416	0.537	(2.147, 4.685)	6.36	0.000
3-2	1.067	0.537	(-0.202, 2.336)	1.99	0.119

Individual confidence level = 98.07%

ตารางที่ ๓ 1.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Strength : Level of Species

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

All Pairwise Comparisons among Levels of species Means

Species	N	Mean	StDev	95% CI
1	60	36.304	1.601	(35.801, 36.808)
2	60	31.921	2.000	(31.417, 32.425)
3	60	30.143	2.273	(29.639, 30.647)

Pooled StDev = 1.97741

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Species	N	Mean	Grouping
1	60	36.304	A
2	60	31.921	B
3	60	30.143	C

Means that do not share a letter are significantly different

ตารางที่ ๓ 1.7 Tukey Simultaneous Test for Flexural Strength : Level of Species

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

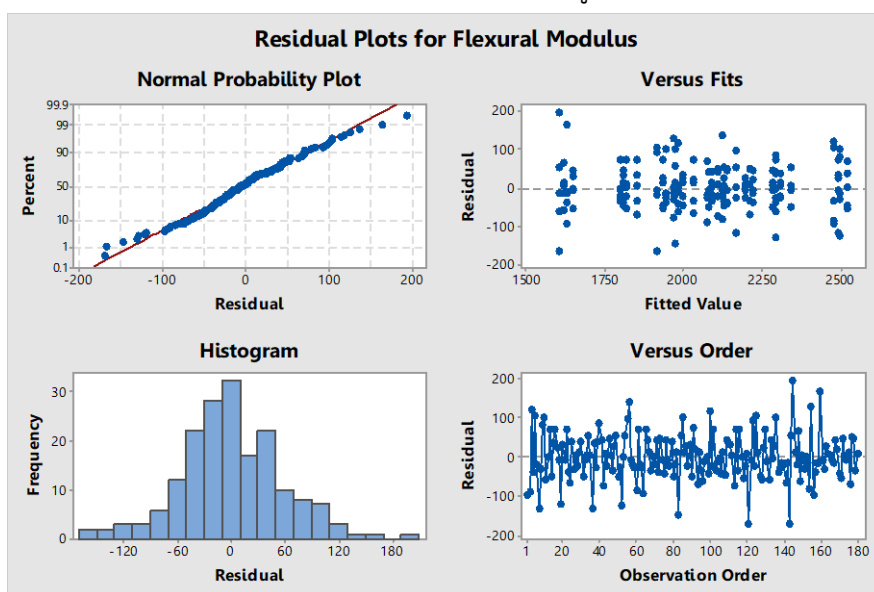
Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-4.384	0.361	(-5.236, -3.531)	-12.14	0.000

3	-1	-6.162	0.361	(-7.014, -5.309)	-17.07	0.000
3	-2	-1.778	0.361	(-2.631, -0.925)	-4.93	0.000

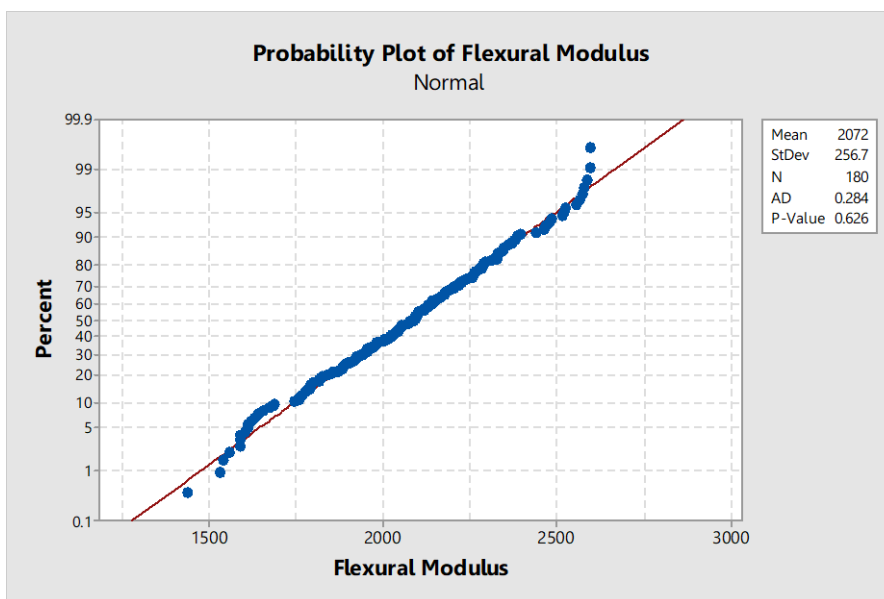
Individual confidence level = 98.07%

ภาคผนวก ก – 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมอดูลัสแรงดัด

จากผลการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดัด และการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ โดยพิจารณาจากรูป Residual Plot for Flexural Modulus ดังรูปที่ ก 2.1



รูปที่ ก 2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดัด



รูปที่ ก 2.2 Normal Probability Plot of Flexural Modulus

เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล จากรูปที่ ก 2.1 Residual Plot for Flexural Modulus (กราฟล่างขวา) พบว่าลักษณะข้อมูลเป็นแบบสุ่ม กราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั่นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Histogram of the Residual (กราฟล่างซ้าย) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะโค้งปกติ และทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยการทำการทดสอบ Normal Probability ดังแสดงในรูปที่ ก 2.2 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.626 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ และข้อมูลมีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่พิจารณา มีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณากราฟ Residual Versus the Fitted รูปที่ ก 2.1 (กราฟบนขวา) พบว่าข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน คือมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ตารางที่ ก 2.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่ามอดูลัสแรงดัด

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volum	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	12897561	368502	85.98	0.000
Linear	7	12337144	1762449	411.20	0.000
Species	2	6419563	3209782	748.89	0.000
Volum	2	5795786	2897893	676.12	0.000
Additive	3	121795	40598	9.47	0.000
2-Way Interactions	16	544837	34052	7.94	0.000
Species*Volum	4	529630	132407	30.89	0.000
Species*Additive	6	2961	494	0.12	0.995
Volum*Additive	6	12246	2041	0.48	0.825
3-Way Interactions	12	15580	1298	0.30	0.988
Species*Volum*Additive	12	15580	1298	0.30	0.988
Error	144	617193	4286		
Total	179	13514754			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
65.4680	95.43%	94.32%	92.86%

ผลจากการวิเคราะห์

จากตารางที่ ก 2.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธ ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่ามอดูลัสแรงดัด และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 94.32% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาตรสารเติมแต่ง 94.32% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 5.64%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาตรสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.000 0 และ 0.000 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value < 0.05 หมายความว่าค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.995 0.825 และ 0.988 โดยมีค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลระหว่างปริมาณไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงตัด

ตารางที่ ก 2.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Modulus : Level of Additive

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of additive

Means

Additive	N	Mean	StDev	95% CI
1	45	2049.6	261.8	(1973.7, 2125.6)
2	45	2067.7	257.0	(1991.8, 2143.6)
3	45	2106.6	257.9	(2030.7, 2182.6)
4	45	2064.0	255.4	(1988.1, 2139.9)

Pooled StDev = 258.046

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Additive	N	Mean	Grouping
3	45	2106.6	A
2	45	2067.7	A
4	45	2064.0	A
1	45	2049.6	A

Means that do not share a letter are significantly different

ตารางที่ ก 2.3 Tukey Simultaneous Test for Flexural Modulus : Level of Additive

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	18.1	54.4	(-123.1, 159.3)	0.33	0.987
3 -1	57.0	54.4	(-84.2, 198.2)	1.05	0.721
4 -1	14.4	54.4	(-126.8, 155.5)	0.26	0.994
3 -2	38.9	54.4	(-102.2, 180.1)	0.72	0.891
4 -2	-3.7	54.4	(-144.9, 137.5)	-0.07	1.000
4 -3	-42.6	54.4	(-183.8, 98.5)	-0.78	0.862

Individual confidence level = 98.97%

ตารางที่ ก 2.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Modulus : Level of Volume

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of volume

Means

Volume	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	2151.2	283.0	(2087.3, 2215.1)
2	60	2004.3	273.3	(1940.3, 2068.2)
3	60	2060.5	184.5	(1996.6, 2124.5)

Pooled StDev = 250.875

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volume	N	Mean	Grouping
1	60	2151.2	A
3	60	2060.5	A B
2	60	2004.3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 2.5 Tukey Simultaneous Test for Flexural Modulus : Level of Volume

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	P-Value	Adjusted
2 -1	-146.9	45.8	(-255.1, -38.8)	-3.21	0.005	
3 -1	-90.7	45.8	(-198.8, 17.5)	-1.98	0.120	
3 -2	56.3	45.8	(-51.9, 164.5)	1.23	0.438	

Individual confidence level = 98.07%

ตารางที่ ก 2.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Flexural Modulus : Level of Species

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of species

Means

Species	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	2313.9	164.2	(2265.1, 2362.7)
2	60	1970.7	127.5	(1921.9, 2019.5)
3	60	1931.4	258.3	(1882.6, 1980.1)

Pooled StDev = 191.429

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Species	N	Mean	Grouping
1	60	2313.9	A
2	60	1970.7	B
3	60	1931.4	B

Means that do not share a letter are significantly different.

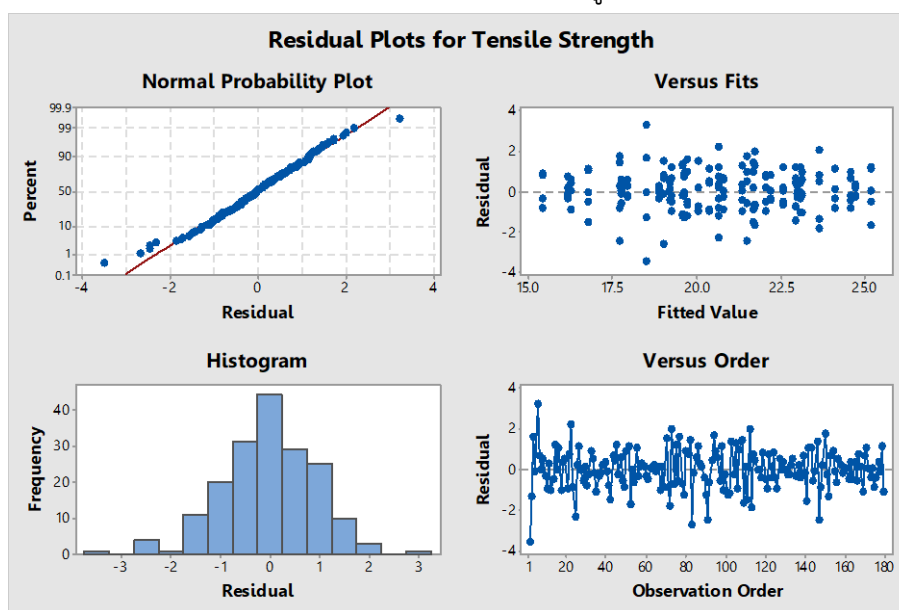
ตารางที่ ก 2.7 Tukey Simultaneous Test for Flexural Modulus : Level of Species

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-343.2	34.9	(-425.7, -260.7)	-9.82	0.000
3 -1	-382.5	34.9	(-465.1, -300.0)	-10.95	0.000
3 -2	-39.4	34.9	(-121.9, 43.2)	-1.13	0.499

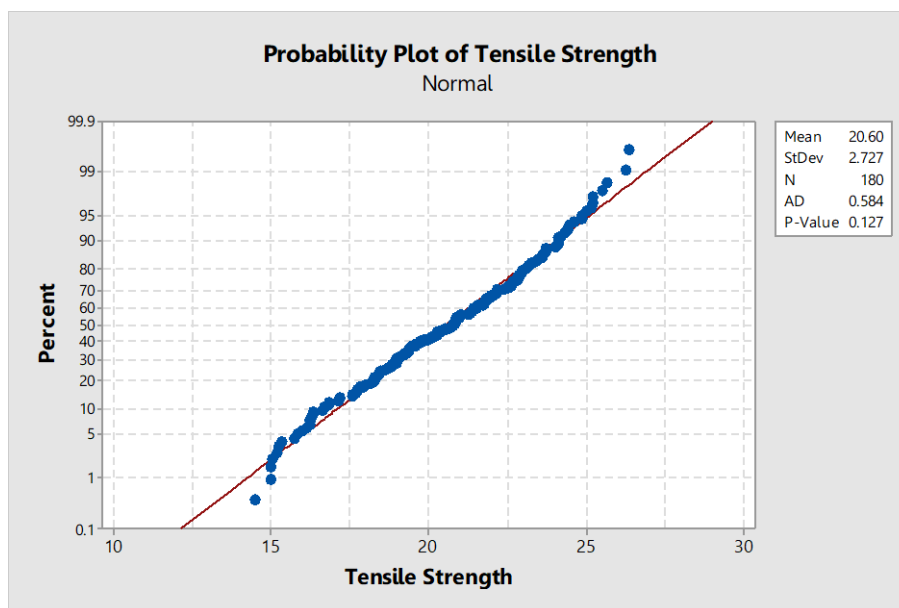
Individual confidence level = 98.07%

ภาคผนวก ก – 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งแรงดึง

จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง และการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ โดยพิจารณาจากกราฟ Residual Plot for Flexural Modulus ดังรูปที่ ก 3.1



รูปที่ ก 3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง



รูปที่ 3.2 Normal Probability Plot of Tensile Strength

เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล จากรูปที่ ก 3.1 Residual Plot for Flexural Modulus (กราฟล่างขวา) พบว่าลักษณะข้อมูลเป็นแบบสุ่ม กราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั่นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Histogram of the Residual (กราฟล่างซ้าย) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะโค้งปกติ และทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยการทำการทดสอบ Normal Probability ดังแสดงในรูปที่ ก 3.2 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.127 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ และข้อมูลมีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่พิจารณา มีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณากราฟ Residual Versus the Fitted รูปที่ ก 3.1 (กราฟบนขวา) พบว่าข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน คือมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ตารางที่ ก 3.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งแรงดึง

General Factorial Regression: Tensile Strength versus Species, Volume, Additive

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volum	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	1171.27	33.465	30.43	0.000
Linear	7	1080.47	154.354	140.33	0.000
Species	2	384.04	192.022	174.58	0.000
Volum	2	524.74	262.369	238.54	0.000
Additive	3	171.69	57.231	52.03	0.000
2-Way Interactions	16	77.54	4.847	4.41	0.000
Species*Volum	4	57.70	14.424	13.11	0.000
Species*Additive	6	12.97	2.162	1.97	0.074
Volum*Additive	6	6.88	1.146	1.04	0.401
3-Way Interactions	12	13.25	1.104	1.00	0.449
Species*Volum*Additive	12	13.25	1.104	1.00	0.449
Error	144	158.39	1.100		
Total	179	1329.65			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.04876	88.09%	85.19%	81.39%

ผลจากการวิเคราะห์

จากตารางที่ ก 3.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธ ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 85.19% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาตรสารเติมแต่ง 85.19% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 14.81%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ โดยมีค่า

P-value < 0.05 หมายความว่าค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก มีผลต่อค่าความแข็งแรงตัด

ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.074, 0.401 และ 0.449 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงตัด

ตารางที่ ก 3.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Strength : Level of Additive

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of additive Means

Additive	N	Mean	StDev	95% CI
1	45	18.991	2.395	(18.248, 19.735)
2	45	20.712	2.561	(19.969, 21.455)
3	45	22.013	2.410	(21.270, 22.756)
4	45	20.698	2.726	(19.955, 21.441)

Pooled StDev = 2.52645

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Additive	N	Mean	Grouping
3	45	22.013	A
2	45	20.712	A
4	45	20.698	A
1	45	18.991	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 3.3 Tukey Simultaneous Test for Tensile Strength : Level of Additive

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	1.721	0.533	(0.339, 3.103)	3.23	0.008
3 -1	3.022	0.533	(1.640, 4.404)	5.67	0.000
4 -1	1.707	0.533	(0.325, 3.089)	3.20	0.009
3 -2	1.301	0.533	(-0.081, 2.683)	2.44	0.003
4 -2	-0.014	0.533	(-1.396, 1.368)	-0.03	0.988
4 -3	-1.315	0.533	(-2.697, 0.067)	-2.47	0.048

Individual confidence level = 98.97%

ตารางที่ ก 3.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Strength : Level of Volume

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of volume

Means

Volume	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	18.931	2.279	(18.366, 19.497)
2	60	20.127	2.317	(19.562, 20.693)
3	60	22.753	2.054	(22.187, 23.318)

Pooled StDev = 2.21973

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volume	N	Mean	Grouping
3	60	22.753	A
2	60	20.127	B
1	60	18.931	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 3.5 Tukey Simultaneous Test for Tensile Strength : Level of Volume

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	1.196	0.405	(0.239, 2.153)	2.95	0.010
3 -1	3.822	0.405	(2.865, 4.779)	9.43	0.000
3 -2	2.626	0.405	(1.669, 3.583)	6.48	0.000

Individual confidence level = 98.07%

ตารางที่ ก 3.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Strength : Level of Species

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of species

Means

Species	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	22.318	2.222	(21.723, 22.913)
2	60	20.657	1.809	(20.061, 21.252)
3	60	18.836	2.859	(18.241, 19.432)

Pooled StDev = 2.33712

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Species	N	Mean	Grouping
1	60	22.318	A
2	60	20.657	B
3	60	18.836	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 3.7 Tukey Simultaneous Test for Tensile Strength : Level of Species

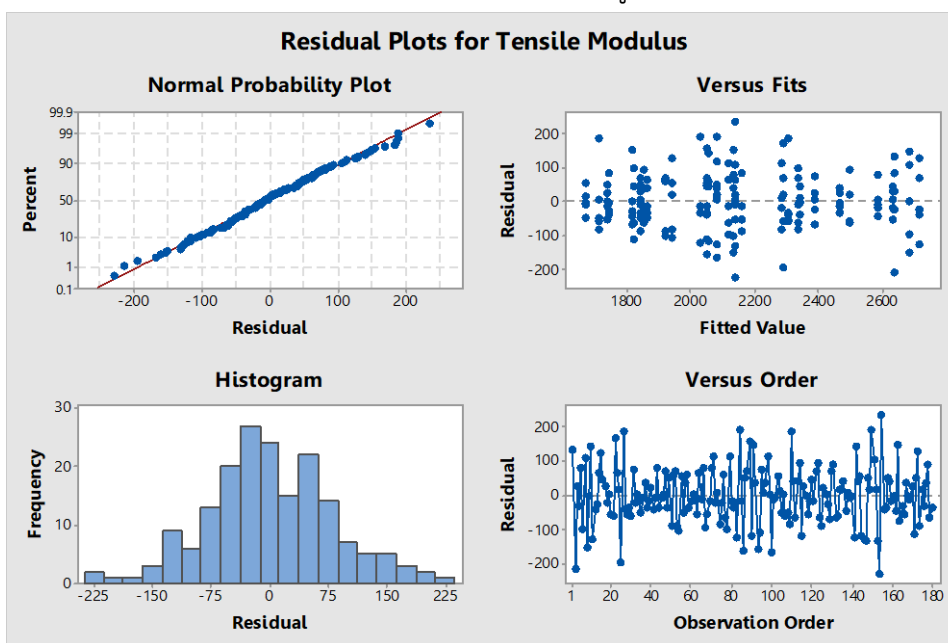
Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-1.661	0.427	(-2.669, -0.653)	-3.89	0.000
3 -1	-3.482	0.427	(-4.489, -2.474)	-8.16	0.000
3 -2	-1.820	0.427	(-2.828, -0.813)	-4.27	0.000

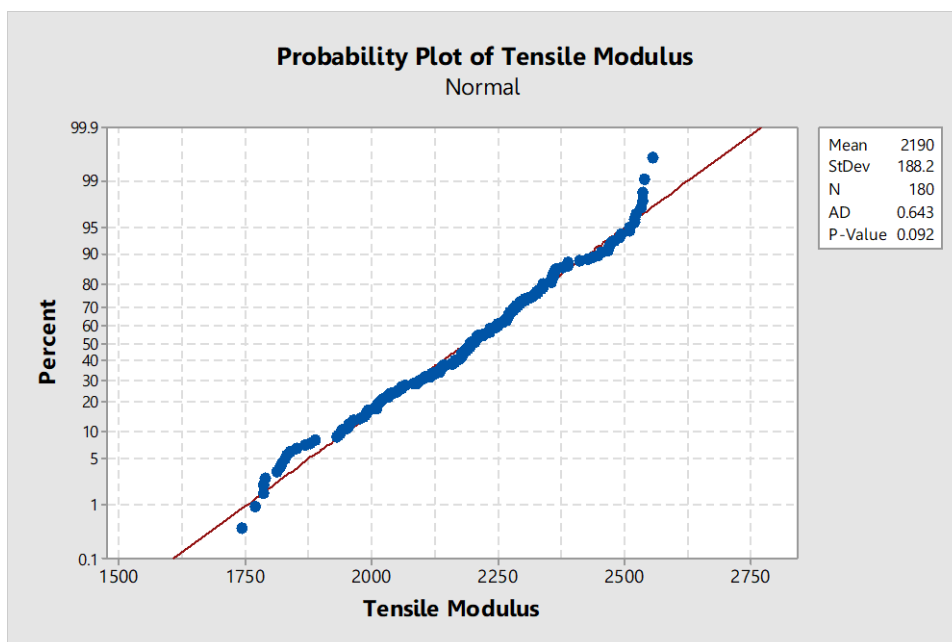
Individual confidence level = 98.07%

ภาคผนวก ก – 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมอดูลัสแรงดึง

จากผลการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดึง และการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ โดยพิจารณาจากกราฟ Residual Plot for Flexural Modulus ดังรูปที่ ก 4.1



รูปที่ ก 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่ามอดูลัสแรงดึง



รูปที่ 4.2 Normal Probability Plot of Tensile Modulus

เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล จากรูปที่ ก 2.1 Residual Plot for Flexural Modulus (กราฟล่างขวา) พบว่าลักษณะข้อมูลเป็นแบบสุ่ม กราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั้นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Histogram of the Residual (กราฟล่างซ้าย) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะโค้งปกติ และทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยการทำการทดสอบ Normal Probability ดังแสดงในรูปที่ ก 4.2 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.092 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ และข้อมูลมีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่พิจารณา มีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณากราฟ Residual Versus the Fitted รูปที่ ก 4.1 (กราฟบนขวา) พบว่าข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน คือมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ตารางที่ ก 4.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่ามอดูลัสแรงดึง

General Factorial Regression: Tensile Modulus versus Species, Volume, Additive

Factor Information

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volume	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	5784730	165278	42.68	0.000
Linear	7	5690277	812897	209.93	0.000
Species	2	2738370	1369185	353.60	0.000
Volume	2	2863480	1431740	369.75	0.000
Additive	3	88426	29475	7.61	0.000
2-Way Interactions	16	86965	5435	1.40	0.148
Species*Volume	4	62214	15553	4.02	0.000
Species*Additive	6	9415	1569	0.41	0.875
Volume*Additive	6	15336	2556	0.66	0.682
3-Way Interactions	12	7489	624	0.16	0.999
Species*Volume*Additive	12	7489	624	0.16	0.999
Error	144	557591	3872		
Total	179	6342321			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
62.2267	91.21%	89.07%	86.26%

ผลจากการวิเคราะห์

จากตารางที่ ก 4.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธ ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่ามอดูลัสแรงดึง และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 91.21% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาตรสารเติมแต่ง 91.21% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 8.79%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value < 0.05 หมายความว่าค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก มีผลต่อค่าความแข็งแรงตัด

ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาตรสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาตรสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.875, 0.682 และ 0.999 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาตรสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาตรสารเติมแต่ง ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงตัด

ตารางที่ ก 4.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Modulus : Level of Additive

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of additive Means

Additive	N	Mean	StDev	95% CI
1	45	2169.0	197.0	(2113.6, 2224.5)
2	45	2184.6	190.9	(2129.1, 2240.1)
3	45	2227.3	179.0	(2171.9, 2282.8)
4	45	2179.8	186.7	(2124.4, 2235.3)

Pooled StDev = 188.503

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Additive	N	Mean	Grouping
3	45	2227.3	A
2	45	2184.6	A
4	45	2179.8	A
1	45	2169.0	A

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 4.3 Tukey Simultaneous Test for Tensile Modulus : Level of Additive

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	15.6	39.7	(-87.6, 118.7)	0.39	0.280
3 -1	58.3	39.7	(-44.8, 161.4)	1.47	0.046
4 -1	10.8	39.7	(-92.3, 113.9)	0.27	0.393
3 -2	42.7	39.7	(-60.4, 145.9)	1.08	0.032
4 -2	-4.8	39.7	(-107.9, 98.4)	-0.12	0.299
4 -3	-47.5	39.7	(-150.6, 55.6)	-1.20	0.052

Individual confidence level = 98.97%

ตารางที่ ก 4.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Modulus : Level of Volume

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
 All Pairwise Comparisons among Levels of volume
 Means

Volume	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	2343.2	124.9	(2307.5, 2378.9)
2	60	2193.1	132.2	(2157.4, 2228.8)
3	60	2034.3	160.9	(1998.6, 2070.0)

Pooled StDev = 140.194
 Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volume	N	Mean	Grouping
1	60	2343.2	A
2	60	2193.1	B
3	60	2034.3	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 4.5 Tukey Simultaneous Test for Tensile Modulus: Level of Volume

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-150.1	25.6	(-210.6, -89.7)	-5.87	0.000
3 -1	-308.9	25.6	(-369.4, -248.5)	-12.07	0.000
3 -2	-158.8	25.6	(-219.2, -98.3)	-6.20	0.000

Individual confidence level = 98.07%

ตารางที่ ก 4.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Tensile Modulus : Level of Species

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
 All Pairwise Comparisons among Levels of species
 Means

Species	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	2352.2	127.1	(2315.8, 2388.5)
2	60	2165.2	128.6	(2128.9, 2201.6)
3	60	2053.2	168.4	(2016.8, 2089.5)

Pooled StDev = 142.693
 Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Species	N	Mean	Grouping
1	60	2352.2	A
2	60	2165.2	B
3	60	2053.2	C

Means that do not share a letter are significantly different

ตารางที่ ก 4.7 Tukey Simultaneous Test for Tensile Modulus : Level of Species

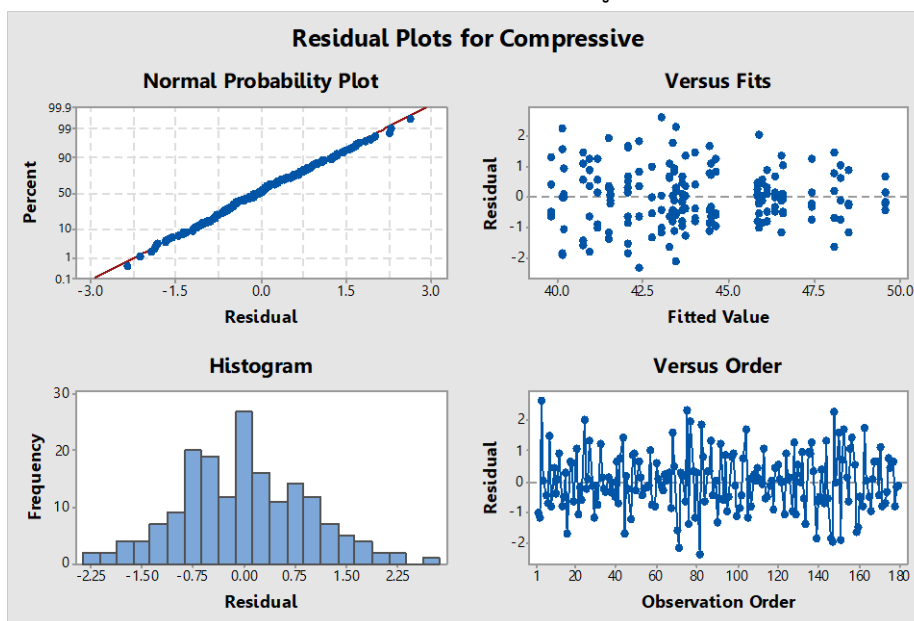
Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-187.0	26.1	(-248.5, -125.4)	-7.18	0.000
3 -1	-299.0	26.1	(-360.5, -237.5)	-11.48	0.000
3 -2	-112.1	26.1	(-173.6, -50.5)	-4.30	0.000

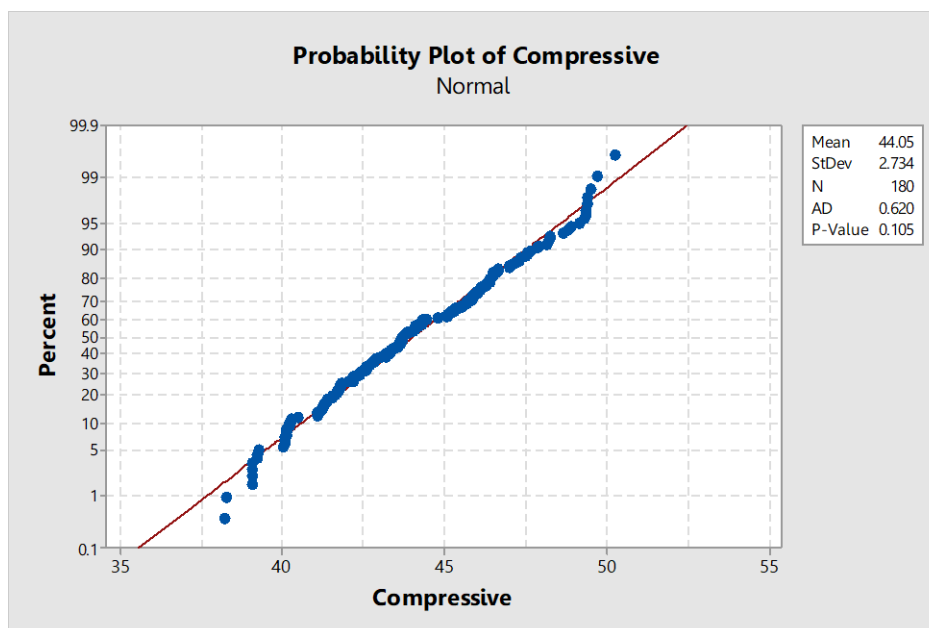
Individual confidence level = 98.07%

ภาคผนวก ก – 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งแรงอัด

จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงอัด และการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ โดยพิจารณาจากรูป Residual Plot for Flexural Modulus ดังรูปที่ ก 5.1



รูปที่ ก 5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งแรงอัด



รูปที่ ก 5.2 Normal Probability Plot of Compressive

เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล จากรูปที่ ก 5.1 Residual Plot for Compressive (กราฟล่างขวา) พบว่าลักษณะข้อมูลเป็นแบบสุ่ม กราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั่นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Histogram of the Residual (กราฟล่างซ้าย) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะโค้งปกติ และทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยการทำการทดสอบ Normal Probability ดังแสดงในรูปที่ ก 5.2 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.105 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ และข้อมูลมีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่พิจารณามีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณากราฟ Residual Versus the Fitted รูปที่ ก 5.1 (กราฟบนขวา) พบว่าข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน คือมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ตารางที่ ก 5.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งแรงอัด

General Factorial Regression: Compressive versus Species, Volume, Additive

Factor Information

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volume	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	1179.02	33.686	30.58	0.000
Linear	7	1113.94	159.134	144.47	0.000
Species	2	619.49	309.744	281.21	0.000
Volume	2	395.16	197.580	179.38	0.000
Additive	3	99.29	33.097	30.05	0.000
2-Way Interactions	16	59.00	3.687	3.35	0.000
Species*Volume	4	48.62	12.154	11.03	0.000
Species*Additive	6	2.72	0.454	0.41	0.870
Volume*Additive	6	7.66	1.277	1.16	0.331
3-Way Interactions	12	6.08	0.507	0.46	0.935
Species*Volume*Additive	12	6.08	0.507	0.46	0.935
Error	144	158.61	1.101		
Total	179	1337.64			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.04951	88.14%	85.26%	81.47%

ผลจากการวิเคราะห์

จากตารางที่ ก 5.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธ ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัด และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 88.14% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาตรสารเติมแต่ง 88.14% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 12.86%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ โดยมีค่า

P-value < 0.05 หมายความว่าค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.870, 0.331 และ 0.935 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

ตารางที่ ก 5.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Additive

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of additive Means

Additive	N	Mean	StDev	95% CI
1	45	43.191	2.737	(42.411, 43.971)
2	45	43.970	2.727	(43.189, 44.750)
3	45	45.231	2.480	(44.451, 46.011)
4	45	43.791	2.658	(43.011, 44.571)

Pooled StDev = 2.65256

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Additive	N	Mean	Grouping
3	45	45.231	A
2	45	43.970	A B
4	45	43.791	A B
1	45	43.191	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 5.3 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Additive

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	0.779	0.559	(-0.673, 2.230)	1.39	0.506
3 -1	2.040	0.559	(0.589, 3.491)	3.65	0.002
4 -1	0.600	0.559	(-0.851, 2.051)	1.07	0.707
3 -2	1.262	0.559	(-0.190, 2.713)	2.26	0.044
4 -2	-0.179	0.559	(-1.630, 1.273)	-0.32	0.989
4 -3	-1.440	0.559	(-2.891, 0.011)	-2.58	0.049

Individual confidence level = 98.97%

ตารางที่ 5.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Volume

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of volume

Means

Volume	N	Mean	StDev	95% CI
1	60	42.502	1.866	(41.914, 43.090)
2	60	43.590	2.746	(43.003, 44.178)
3	60	46.045	2.225	(45.457, 46.632)

Pooled StDev = 2.30754

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volume	N	Mean	Grouping
3	60	46.045	A
2	60	43.590	B
1	60	42.502	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ 5.5 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Volume

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	1.089	0.421	(0.094, 2.084)	2.58	0.028
3 -1	3.543	0.421	(2.548, 4.538)	8.41	0.000
3 -2	2.454	0.421	(1.459, 3.449)	5.83	0.000

Individual confidence level = 98.07%

ตารางที่ 5.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Species

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of species

Means

Species	N	Mean	StDev	95% CI
1	60	46.428	2.220	(45.914, 46.941)
2	60	43.807	1.943	(43.294, 44.320)
3	60	41.902	1.862	(41.389, 42.416)

Pooled StDev = 2.01428

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Species	N	Mean	Grouping
1	60	46.428	A
2	60	43.807	B
3	60	41.902	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 5.7 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Species

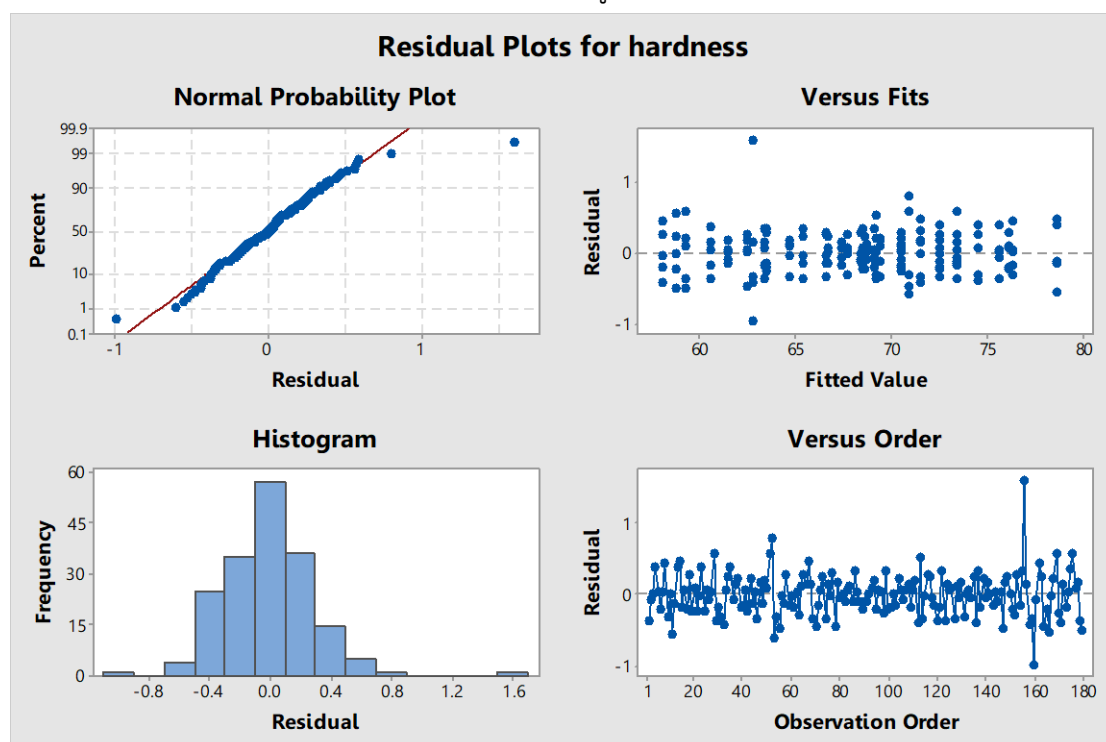
Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-2.621	0.368	(-3.489, -1.752)	-7.13	0.000
3 -1	-4.525	0.368	(-5.394, -3.657)	-12.31	0.000
3 -2	-1.905	0.368	(-2.773, -1.036)	-5.18	0.000

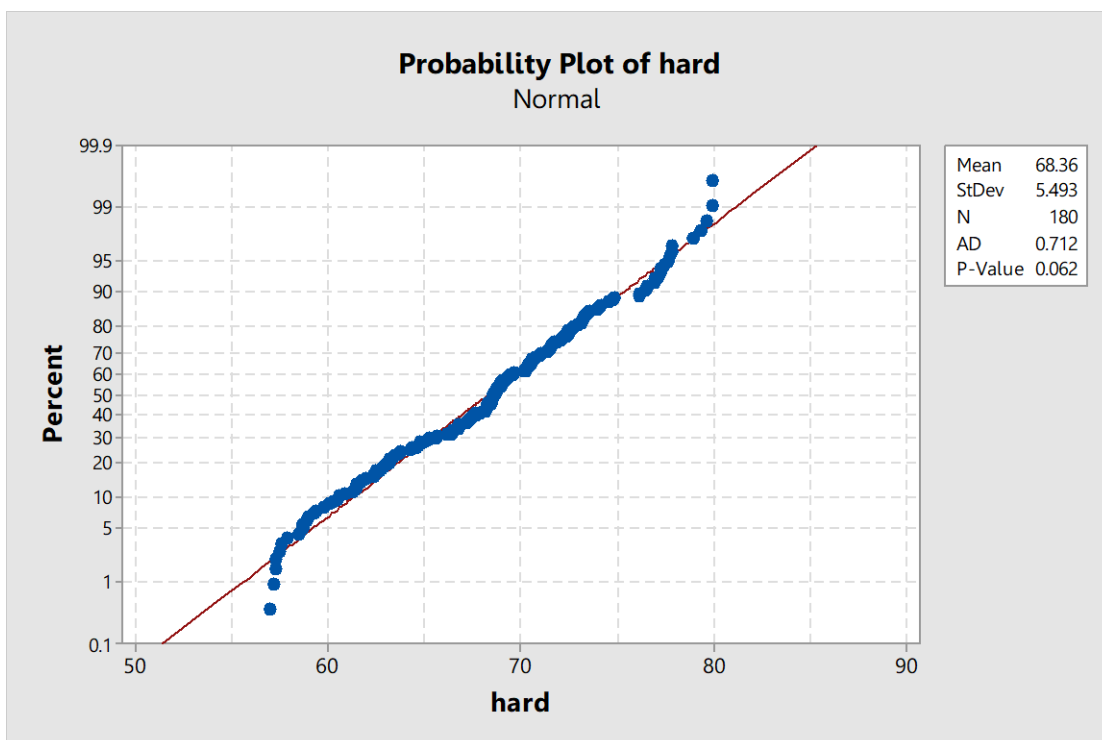
Individual confidence level = 98.07%

ภาคผนวก ก - 6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความแข็งผิว

จากผลการทดสอบค่าความแข็งผิว และการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ โดยพิจารณาจากรูป Residual Plot for Flexural Modulus ดังรูปที่ ก 6.1



รูปที่ ก 6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งผิว



รูปที่ 6.2 Normal Probability Plot of Compressive

เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล จากรูปที่ 6.1 Residual Plot for Compressive (กราฟล่างขวา) พบว่าลักษณะข้อมูลเป็นแบบสุ่ม กราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั่นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลจากกราฟ Histogram of the Residual (กราฟล่างซ้าย) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะโค้งปกติ และทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยการทำการทดสอบ Normal Probability ดังแสดงในรูปที่ 6.2 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.062 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ และข้อมูลมีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่พิจารณามีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณารูป Residual Versus the Fitted รูปที่ 6.1 (กราฟบนขวา) พบว่าข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน คือมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ตารางที่ ก 6.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งผิว

General Factorial Regression: hardness versus Species, Volum, Additive

Factor Information

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volum	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	4866.57	139.04	1268.82	0.000
Linear	7	4780.20	682.89	6231.53	0.000
Species	2	3608.89	1804.44	16466.06	0.000
Volum	2	1022.01	511.01	4663.07	0.000
Additive	3	149.31	49.77	454.16	0.000
2-Way Interactions	16	76.91	4.81	43.86	0.000
Species*Volum	4	60.55	15.14	138.14	0.000
Species*Additive	6	8.40	1.40	12.78	0.000
Volum*Additive	6	7.95	1.32	12.09	0.000
3-Way Interactions	12	9.46	0.79	7.19	0.000
Species*Volum*Additive	12	9.46	0.79	7.19	0.000
Error	144	15.78	0.11		
Total	179	4882.35			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.331037	99.68%	99.60%	99.49%

ผลจากการวิเคราะห์

จากตารางที่ ก 5.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธ ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัด และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 99.69% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาตรสารเติมแต่ง 99.69% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 0.21%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาตรสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value < 0.05 หมายความว่าค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก อิทธิพลร่วมระหว่าง

ชนิดไม้กับปริมาตรสารเติมแต่ง อิทธิพลระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาตรสารเติมแต่ง มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด

ตารางที่ ก 6.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Additive

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of additive Means

Additive	N	Mean	StDev	95% CI
1	45	67.265	5.265	(65.739, 68.791)
2	45	68.102	5.227	(66.577, 69.628)
3	45	69.749	5.230	(68.224, 71.275)
4	45	67.968	5.018	(66.443, 69.494)

Pooled StDev = 5.18578

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Additive	N	Mean	Grouping
3	45	69.749	A
2	45	68.102	A
4	45	67.968	A
1	45	67.265	A

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 6.3 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Additive

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	0.84	1.09	(-2.00, 3.67)	0.77	0.870
3 -1	2.48	1.09	(-0.35, 5.32)	2.27	0.108
4 -1	0.70	1.09	(-2.13, 3.54)	0.64	0.918
3 -2	1.65	1.09	(-1.19, 4.48)	1.51	0.436
4 -2	-0.13	1.09	(-2.97, 2.70)	-0.12	0.999
4 -3	-1.78	1.09	(-4.62, 1.06)	1.63	0.365

Individual confidence level = 98.97%

ตารางที่ 6.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Volume

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of volume

Means

Volum	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	71.127	4.848	(69.937, 72.316)
2	60	68.393	4.590	(67.203, 69.583)
3	60	65.294	4.567	(64.104, 66.484)

Pooled StDev = 4.67010

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volum	N	Mean	Grouping
1	60	71.127	A
2	60	68.393	B
3	60	65.294	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ 6.5 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Volume

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-2.733	0.853	(-4.747, -0.720)	-3.21	0.005
3 -1	-5.833	0.853	(-7.847, -3.819)	-6.84	0.000
3 -2	-3.099	0.853	(-5.113, -1.086)	-3.64	0.001

Individual confidence level = 98.07%

ตารางที่ 6.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Species

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of species

Means

Species	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	73.127	3.204	(72.444, 73.811)
2	60	69.363	1.891	(68.680, 70.046)
3	60	62.324	2.783	(61.640, 63.007)

Pooled StDev = 2.68229

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Species	N	Mean	Grouping
1	60	73.127	A
2	60	69.363	B
3	60	62.324	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 6.7 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Species

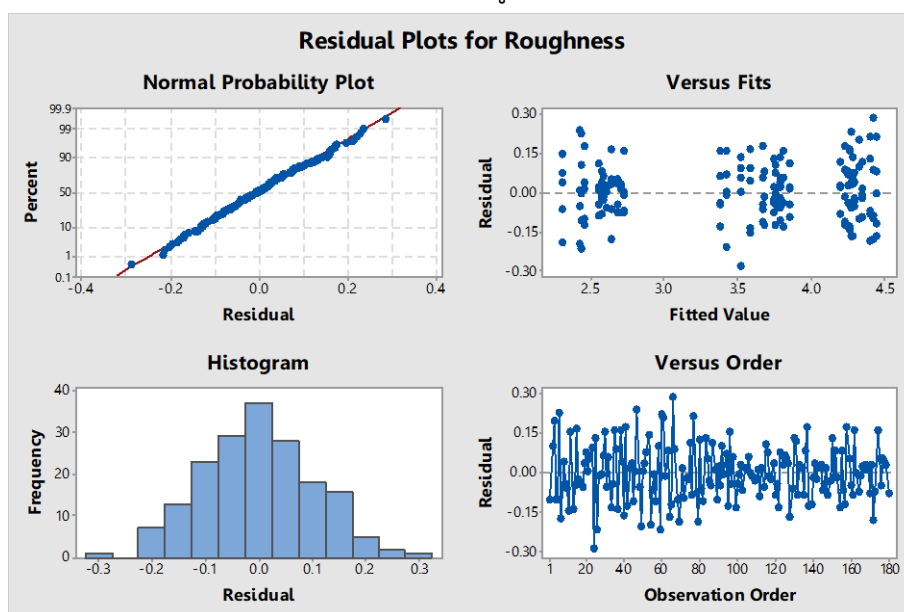
Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-3.764	0.490	(-4.921, -2.608)	-7.69	0.000
3 -1	-10.804	0.490	(-11.960, -9.647)	-22.06	0.000
3 -2	-7.040	0.490	(-8.196, -5.883)	-14.37	0.000

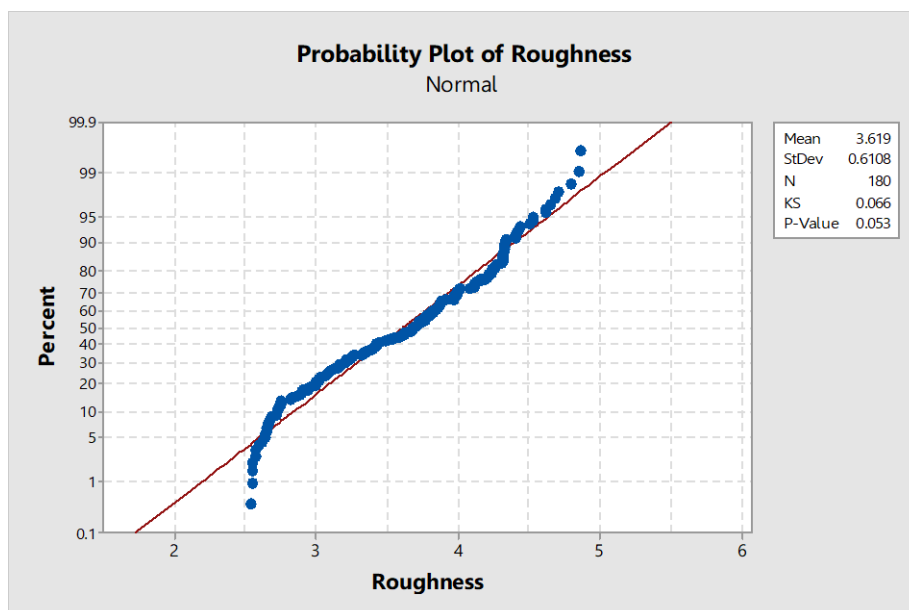
Individual confidence level = 98.07%

ภาคผนวก ก – 7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติความขรุขระ

จากผลการทดสอบค่าความขรุขระ และการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ โดยพิจารณาจากรูป Residual Plot for Flexural Modulus ดังรูปที่ ก 7.1



รูปที่ ก 7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบการทดสอบค่าความแข็งผิว



รูปที่ ก 7.2 Normal Probability Plot of Compressive

เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล จากรูปที่ ก 7.1 Residual Plot for Compressive (กราฟล่างขวา) พบว่าลักษณะข้อมูลเป็นแบบสุ่ม กราฟที่ได้ไม่สามารถคาดเดาหรือทำนายทิศทาง การเคลื่อนที่ของตัวข้อมูลได้อย่างแน่นอน นั่นหมายความว่า ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์มีความอิสระต่อกัน ไม่เกาะตัวไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลจาก กราฟ Histogram of the Residual (กราฟล่างซ้าย) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะโค้งปกติ และทำการ ทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยการทำการทดสอบ Normal Probability ดังแสดงในรูปที่ ก 7.2 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.053 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ และข้อมูลมีการกระจายตัวใน แนวเส้นตรง สรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่พิจารณามีการแจกแจง แบบปกติ และเมื่อพิจารณากราฟ Residual Versus the Fitted รูปที่ ก 7.1 (กราฟบนขวา) พบว่า ข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน คือมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ ดังนั้นข้อมูลมี ความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ตารางที่ ก 7.1 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าขรุขระ

General Factorial Regression: Roughness versus Species, Volum, Additive

Factor Information

Factor	Levels	Values
Species	3	1, 2, 3
Volum	3	1, 2, 3
Additive	4	1, 2, 3, 4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	97.7002	2.7914	209.35	0.000
Linear	7	96.6845	13.8121	1035.88	0.000
Species	2	1.3782	0.6891	51.68	0.000
Volum	2	95.1210	47.5605	3566.96	0.000
Additive	3	0.1854	0.0618	4.63	0.004
2-Way Interactions	16	0.9274	0.0580	4.35	0.000
Species*Volum	4	0.8448	0.2112	15.84	0.000
Species*Additive	6	0.0732	0.0122	0.91	0.486
Volum*Additive	6	0.0095	0.0016	0.12	0.994
3-Way Interactions	12	0.0882	0.0074	0.55	0.877
Species*Volum*Additive	12	0.0882	0.0074	0.55	0.877
Error	144	1.9200	0.0133		
Total	179	99.6202			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.115471	98.07%	97.60%	96.99%

ผลจากการวิเคราะห์

จากตารางที่ ก 7.1 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($\alpha = 0.05$) มีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ ถ้า P-value < 0.05 จะปฏิเสธ ซึ่งหมายถึงตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัด และค่า R-sq หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ซึ่งในตาราง R-sq มีค่าเท่ากับ 98.07% แสดงให้เห็นว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มาจากการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ คือ ชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก และปริมาตรสารเติมแต่ง 98.07% และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) คือสภาวะบรรยากาศโดยรอบระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และระหว่างการทดสอบ 1.93%

การวิเคราะห์ค่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาตรสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.000, 0.000, 0.004 และ 0.000 ตามลำดับ โดยมีค่า P-

value < 0.05 หมายความว่าชนิดไม้ ปริมาณพลาสติก ปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลระหว่างชนิดไม้กับปริมาณพลาสติก มีผลต่อค่าความแข็งแรงตัด

ส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง พบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.486, 0.994 และ 0.877 ตามลำดับ โดยมีค่า P-value > 0.05 หมายความว่าอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้กับปริมาณสารเติมแต่ง อิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดไม้ ปริมาณพลาสติกกับปริมาณสารเติมแต่ง ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงตัด

ตารางที่ ก 7.2 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Additive

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of additive Means

Additive	N	Mean	StDev	95% CI
1	45	3.546	0.746	(3.324, 3.767)
2	45	3.524	0.756	(3.303, 3.745)
3	45	3.460	0.759	(3.238, 3.681)
4	45	3.522	0.746	(3.301, 3.743)

Pooled StDev = 0.751645

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Additive	N	Mean	Grouping
1	45	3.546	A
2	45	3.524	A
4	45	3.522	A
3	45	3.460	A

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 7.3 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Additive

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
2-1	-0.021	0.158	(-0.433, 0.390)	-0.13	0.999
3-1	-0.086	0.158	(-0.497, 0.325)	-0.54	0.948
4-1	-0.024	0.158	(-0.435, 0.387)	-0.15	0.999
3-2	-0.065	0.158	(-0.476, 0.347)	-0.41	0.977
4-2	-0.002	0.158	(-0.414, 0.409)	-0.02	1.000
4-3	0.062	0.158	(-0.349, 0.473)	0.39	0.979

Individual confidence level = 98.97%

ตารางที่ ก 7.4 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Volume

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of volume

Means

Volum	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	4.3143	0.1399	(4.2737, 4.3550)
2	60	3.6695	0.1810	(3.6289, 3.7101)
3	60	2.5545	0.1546	(2.5139, 2.5951)

Pooled StDev = 0.159435

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Volum	N	Mean	Grouping
1	60	4.3143	A
2	60	3.6695	B
3	60	2.5545	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 7.5 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Volume

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	-0.6448	0.0291	(-0.7136, -0.5761)	-22.15	0.000
3 -1	-1.7598	0.0291	(-1.8286, -1.6911)	-60.46	0.000
3 -2	-1.1150	0.0291	(-1.1837, -1.0463)	-38.30	0.000

Individual confidence level = 98.07%

ตารางที่ ก 7.6 Tukey 95% Simultaneous Confidence Interval for Compressive : Level of Species

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of species

Means

Species	N	Mean	StDev	95%CI
1	60	3.392	0.792	(3.202, 3.581)
2	60	3.595	0.775	(3.406, 3.785)
3	60	3.5513	0.6609	(3.3615, 3.7411)

Pooled StDev = 0.745010

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Species	N	Mean	Grouping
2	60	3.595	A
3	60	3.5513	A
1	60	3.392	A

Means that do not share a letter are significantly different.

ตารางที่ ก 7.7 Tukey Simultaneous Test for Compressive : Level of Species

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95%CI	T-Value	Adjusted P-Value
2 -1	0.204	0.136	(-0.118, 0.525)	1.50	0.295
3 -1	0.160	0.136	(-0.162, 0.481)	1.17	0.470
3-2	-0.044	0.136	(-0.365, 0.277)	-0.32	0.944

Individual confidence level =98.07%

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกผลจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงตัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก

No	ชนิดไม้	ปริมาณ	ปริมาณ	ความแข็งแรงตัด (MPa)					ค่าเฉลี่ย	SD
		พลาสติก	สารเติมแต่ง	1	2	3	4	5	(MPa)	
		(wt%)	(%)							
1	มะพร้าว	50	1	35.2	34.7	33.3	34.1	33.3	34.12	0.84
2	มะพร้าว	50	2	35.7	36.9	33.6	34.8	33.8	34.96	1.37
3	มะพร้าว	50	3	37.0	36.5	36.8	35.6	35.8	36.34	0.61
4	มะพร้าว	50	4	35.4	37.1	35.6	37.2	36.0	36.26	0.84
5	มะพร้าว	60	1	35.8	36.4	35.5	35.2	33.4	35.26	1.13
6	มะพร้าว	60	2	37.4	37.0	34.1	35.4	37.4	36.26	1.46
7	มะพร้าว	60	3	35.8	38.7	39.3	36.3	37.8	37.58	1.51
8	มะพร้าว	60	4	36.7	34.6	36.1	36.1	34.2	35.54	1.08
9	มะพร้าว	70	1	33.9	36.2	37.2	36.2	37.0	36.1	1.31
10	มะพร้าว	70	2	36.1	35.7	36.3	37.5	39.5	37.02	1.54
11	มะพร้าว	70	3	39.4	38.4	38.3	38.8	39.1	38.8	0.46
12	มะพร้าว	70	4	37.1	36.7	37.7	37.0	38.6	37.42	0.75
13	ปาล์ม	50	1	28.1	28.2	28.8	29.5	29.3	28.78	0.63
14	ปาล์ม	50	2	29.9	30.2	28.8	29.3	28.0	29.24	0.88
15	ปาล์ม	50	3	33.6	31.6	29.5	29.8	33.4	31.58	1.93
16	ปาล์ม	50	4	28.8	29.6	31.5	30.1	28.9	29.78	1.10
17	ปาล์ม	60	1	32.3	32.0	32.4	30.5	31.2	31.68	0.81
18	ปาล์ม	60	2	31.7	32.4	32.6	31.4	32.7	32.16	0.58
19	ปาล์ม	60	3	34.4	34.0	32.7	33.4	33.6	33.62	0.64
20	ปาล์ม	60	4	31.7	31.3	32.3	32.9	32.2	32.08	0.61
21	ปาล์ม	70	1	32.6	31.7	33.6	32.9	31.0	32.36	1.02
22	ปาล์ม	70	2	34.5	32.9	35.1	33.3	33.8	33.92	0.89
23	ปาล์ม	70	3	33.3	35.9	34.6	34.8	35.1	34.74	0.94
24	ปาล์ม	70	4	34.5	32.1	33.4	32.3	32.8	33.02	0.97
25	ข้าวโพด	50	1	26.6	27.6	26.4	26.2	28.2	27	0.86
26	ข้าวโพด	50	2	26.8	26.9	27.9	26.4	27.6	27.12	0.61
27	ข้าวโพด	50	3	28.2	28.3	27.3	28.1	28.7	28.12	0.51
28	ข้าวโพด	50	4	26.8	26.6	26.8	27.9	26.8	26.98	0.52
29	ข้าวโพด	60	1	29.1	29.9	31.3	29.7	31.5	30.3	1.05

ตารางที่ ข 1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก (wt%)	ปริมาณ สารเติมแต่ง (%)	ความแข็งแรงดัด (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				1	2	3	4	5		
30	ข้าวโพด	60	2	32.6	30.1	29.9	31.6	30.2	30.88	1.17
31	ข้าวโพด	60	3	32.6	31.7	31.6	32.9	32.0	32.16	0.57
32	ข้าวโพด	60	4	30.1	31.1	32.8	30.3	31.1	31.08	1.06
33	ข้าวโพด	70	1	31.1	29.1	31.6	31.2	31.8	30.96	1.08
34	ข้าวโพด	70	2	32.9	31.2	31.7	32.3	32.5	32.12	0.67
35	ข้าวโพด	70	3	32.4	32.9	31.7	32.3	33.2	32.5	0.58
36	ข้าวโพด	70	4	31.9	33.5	32.2	33.9	31.0	32.5	1.19
37	PP			28.58	29.32	30.22	29.34	28.90	29.27	0.62

ตารางที่ ข 1.2 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก (wt%)	ปริมาณ สารเติม แต่ง (%)	มอดูลัสแรงดัด (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				1	2	3	4	5		
1	มะพร้าว	50	1	2512.9	2499.1	2517.4	2540.9	2472.7	2508.6	25.09123
2	มะพร้าว	50	2	2681.3	2570.3	2638.1	2478.0	2497.2	2572.98	87.67102
3	มะพร้าว	50	3	2626.4	2623.8	2689.7	2693.8	2597.2	2646.18	43.16482
4	มะพร้าว	50	4	2526.2	2499.6	2589.0	2575.4	2467.5	2531.54	50.92925
5	มะพร้าว	60	1	2386.5	2362.8	2354.0	2228.1	2390.9	2344.46	66.87872
6	มะพร้าว	60	2	2381.7	2204.6	2386.7	2402.3	2447.3	2364.52	93.06096
7	มะพร้าว	60	3	2401.4	2333.5	2415.7	2396.1	2417.7	2392.88	34.44462
8	มะพร้าว	60	4	2460.1	2410.3	2338.6	2302.0	2377.9	2377.78	61.46509
9	มะพร้าว	70	1	2253.1	2037.8	2021.2	2088.4	2157.8	2111.66	95.28052
10	มะพร้าว	70	2	2134.8	2095.2	2155.2	2183.4	2082.0	2130.12	41.90647
11	มะพร้าว	70	3	2137.7	2044.6	2167.9	2218.3	2261.9	2166.08	82.87721
12	มะพร้าว	70	4	2260.1	2115.1	2105.2	2097.9	2138.6	2143.38	67.03042
13	ปาล์ม	50	1	2143.0	2055.6	2047.9	1982.8	2144.2	2074.7	68.9634
14	ปาล์ม	50	2	2131.7	2103.2	2055.4	2090.3	2070.0	2090.12	29.62393
15	ปาล์ม	50	3	2180.6	2099.6	2185.4	2129.7	2095.5	2138.16	43.04385
16	ปาล์ม	50	4	2121.7	2073.0	2055.3	2120.1	2129.3	2099.88	33.39314
17	ปาล์ม	60	1	1953.9	1983.4	1826.2	2028.4	2074.5	1973.28	94.06677

ตารางที่ ข 1.2 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	มอดูลัสแรงดัด (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
18	ปาล์ม	60	2	2012.3	2024.7	1976.9	2029.5	1950.9	1998.86	33.79923
19	ปาล์ม	60	3	2105.3	2052.3	1965.7	2046.5	1998.8	2033.72	53.56857
20	ปาล์ม	60	4	1920.1	1972.8	1983.3	1941.1	2098.3	1983.12	69.11977
21	ปาล์ม	70	1	1777.8	1869.6	1765.7	1790.3	1796.1	1799.9	40.69011
22	ปาล์ม	70	2	1766.4	1817.8	1761.4	1851.6	1840.5	1807.54	41.69626
23	ปาล์ม	70	3	1884.7	1859.2	1781.2	1923.8	1819.1	1853.6	55.58467
24	ปาล์ม	70	4	1886.4	1817.1	1761.4	1791.9	1822.0	1815.76	46.24676
25	ข้าวโพด	50	1	2190.3	2168.0	2223.5	2204.3	2202.1	2197.64	20.40461
26	ข้าวโพด	50	2	2215.1	2204.7	2264.9	2241.8	2180.8	2221.46	32.69301
27	ข้าวโพด	50	3	2233.1	2329.9	2289.7	2278.8	2295.6	2285.42	34.93432
28	ข้าวโพด	50	4	2143.2	2263.1	2260.5	2179.6	2223.2	2213.92	52.09047
29	ข้าวโพด	60	1	1845.6	1905.3	2005.4	1891.3	2017.5	1933.02	75.0449
30	ข้าวโพด	60	2	1944.6	1983.4	1876.2	1956.0	2003.6	1952.76	48.63649
31	ข้าวโพด	60	3	1937.8	1969.6	1955.7	2190.3	2096.1	2029.9	109.2414
32	ข้าวโพด	60	4	2044.1	1903.3	1916.5	2126.1	1923.2	1982.64	98.1842
33	ข้าวโพด	70	1	1541.7	1591.4	1437.3	1658.2	1799.0	1605.52	134.8889
34	ข้าวโพด	70	2	1629.8	1601.7	1683.3	1558.3	1622.6	1619.14	45.40862
35	ข้าวโพด	70	3	1638.0	1591.2	1690.0	1645.1	1674.9	1647.84	38.15145
36	ข้าวโพด	70	4	1529.8	1589.1	1613.3	1611.2	1792.3	1627.14	98.29239
37	PP			1465.32	1470.43	1472.95	1469.02	1464.22	1468.39	3.61

ตารางที่ ข 1.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความแข็งแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
1	มะพร้าว	50	1	16.99	17.19	20.11	18.43	21.73	18.89	2.02
2	มะพร้าว	50	2	21.47	20.8	21.37	20.53	19.89	20.81	0.65
3	มะพร้าว	50	3	21.61	20.31	20.88	22.55	21.33	21.34	0.84
4	มะพร้าว	50	4	21.45	19.36	20.78	20.89	19.44	20.38	0.93

ตารางที่ ข 1.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความแข็งแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
5	มะพร้าว	60	1	21.38	22.85	19.77	18.34	20.9	20.65	1.70
6	มะพร้าว	60	2	23.73	22.54	22.03	22.72	21.84	22.57	0.74
7	มะพร้าว	60	3	22.91	24.03	23.64	22.99	22.02	23.12	0.77
8	มะพร้าว	60	4	22.64	22.84	23.17	23.32	22.9	22.97	0.27
9	มะพร้าว	70	1	22.15	21.45	23.6	23.37	24.14	22.94	1.11
10	มะพร้าว	70	2	24.34	25.23	24.09	23.77	25.53	24.59	0.75
11	มะพร้าว	70	3	26.39	23.5	25.22	24.63	26.3	25.21	1.21
12	มะพร้าว	70	4	24.47	24.88	25.02	24.91	24.42	24.74	0.27
13	ปาล์ม	50	1	18.47	19	19.02	19.12	18.85	18.89	0.25
14	ปาล์ม	50	2	20.23	19.02	20.21	19.23	21.55	20.05	1.01
15	ปาล์ม	50	3	20.9	19.98	23.66	21.03	22.95	21.70	1.54
16	ปาล์ม	50	4	19.21	21.32	19.02	18.48	20.66	19.74	1.20
17	ปาล์ม	60	1	19.25	20.47	16.63	18.84	19.61	18.96	1.43
18	ปาล์ม	60	2	21.81	21	20.81	20.29	19.4	20.66	0.89
19	ปาล์ม	60	3	19.02	20.83	21.93	23.2	22.42	21.48	1.62
20	ปาล์ม	60	4	19.85	18.67	20.42	18.24	19.02	19.24	0.89
21	ปาล์ม	70	1	18.31	21.31	23.4	23.21	21.35	21.52	2.05
22	ปาล์ม	70	2	21.75	22.66	23.12	23.13	22.85	22.70	0.57
23	ปาล์ม	70	3	25.2	24.13	23.12	24.15	23.27	23.97	0.83
24	ปาล์ม	70	4	22.22	22.19	22.33	23.02	23.27	22.61	0.50
25	ข้าวโพด	50	1	14.52	16.17	15.02	16.28	15.05	15.41	0.78
26	ข้าวโพด	50	2	15.34	16.83	16.25	16.65	16.25	16.26	0.58
27	ข้าวโพด	50	3	17.71	17.73	18.15	18.45	17.61	17.93	0.36
28	ข้าวโพด	50	4	15.87	16.36	15.78	16.84	15.99	16.17	0.44
29	ข้าวโพด	60	1	15.24	17.81	17.86	16.24	16.7	16.77	1.11
30	ข้าวโพด	60	2	19.08	15.23	16.82	17.93	19.42	17.70	1.72
31	ข้าวโพด	60	3	19.39	18.31	20.32	20.5	19.51	19.61	0.87
32	ข้าวโพด	60	4	17.13	18.32	18.02	17.59	17.74	17.76	0.45
33	ข้าวโพด	70	1	19.32	18.77	19.62	18.74	19.59	19.21	0.43
34	ข้าวโพด	70	2	21.54	22.83	22.18	21.01	22.75	22.06	0.78
35	ข้าวโพด	70	3	22.22	24.67	22.8	24.42	24.12	23.65	1.07

ตารางที่ ข 1.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความแข็งแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
36	ข้าวโพด	70	4	22.71	23.47	22.98	24.63	21.68	23.09	1.08
37	PP			18.28	19.11	20.02	19.22	18.77	19.08	0.64

ตารางที่ ข 1.4 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	มอดูลัสแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
1	มะพร้าว	50	1	2468.72	2539.12	2449.33	2512.29	2475.42	2488.98	36.14
2	มะพร้าว	50	2	2526.43	2473.33	2534.25	2541.38	2429.67	2501.01	48.05
3	มะพร้าว	50	3	2520.25	2557.63	2494.01	2483.44	2523.2	2515.71	28.92
4	มะพร้าว	50	4	2468.51	2512.21	2492.72	2456.91	2539.023	2493.87	33.11
5	มะพร้าว	60	1	2274.5	2361.67	2358	2361.3	2206.7	2312.43	69.83
6	มะพร้าว	60	2	2391	2363.5	2355.75	2268	2236	2322.85	66.95
7	มะพร้าว	60	3	2413.67	2367.74	2361.8	2314.22	2440.4	2379.57	48.96
8	มะพร้าว	60	4	2359.2	2303.82	2331.22	2248.88	2390.72	2326.77	54.21
9	มะพร้าว	70	1	2203.74	2196.25	2182.4	2209.25	2178.21	2193.97	13.38
10	มะพร้าว	70	2	2194.6	2207.66	2280.3	2188.5	2191.92	2212.60	38.54
11	มะพร้าว	70	3	2379.67	2287.5	2330.5	2115.75	2275.71	2277.83	99.39
12	มะพร้าว	70	4	2213.34	2252.1	2175.23	2177.8	2185.33	2200.76	32.45
13	ปาล์ม	50	1	2272.61	2340.23	2283.87	2304.22	2328.3	2305.85	28.62
14	ปาล์ม	50	2	2341	2267	2275.25	2341	2338.75	2312.60	37.98
15	ปาล์ม	50	3	2316.67	2326	2295.33	2341	2365	2328.80	26.15
16	ปาล์ม	50	4	2281.23	2355.55	2321.77	2289.29	2294	2308.37	30.47
17	ปาล์ม	60	1	2195	2271.75	2138.25	2021	2115.25	2148.25	93.30
18	ปาล์ม	60	2	2090.5	2170	2260.25	2147.25	2135.09	2160.62	62.77
19	ปาล์ม	60	3	2180.4	2180.4	2167.15	2197.4	2226.4	2190.35	22.83
20	ปาล์ม	60	4	2141	2121.22	2196.77	2135	2164.66	2151.73	29.67
21	ปาล์ม	70	1	1977.72	1990	2052.75	1983.19	2017	2004.13	31.09

ตารางที่ ข 1.4 ผลการทดสอบมอดูลัสแรงดึงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	มอดูลัสแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
22	ปาล์ม	70	2	2023.48	2033.2	2012.4	1988.25	2036.32	2018.73	19.43
23	ปาล์ม	70	3	2061	1955.7	2060	2049.34	2083.54	2041.92	49.78
24	ปาล์ม	70	4	2041	2023.3	1939.1	2061.01	1993.51	2011.58	47.50
25	ข้าวโพด	50	1	2126	2208.5	2234.2	2176	2252.5	2199.44	50.12
26	ข้าวโพด	50	2	2211.3	2191.5	2162.5	2221.6	2262.52	2209.88	37.06
27	ข้าวโพด	50	3	2290.32	2234.04	2138.44	2234.87	2265.22	2232.58	57.60
28	ข้าวโพด	50	4	2183.55	2299.23	2250.61	2233.22	2141.09	2221.54	61.10
29	ข้าวโพด	60	1	1931.44	2193.67	2095.33	2107.81	1935.09	2052.67	115.39
30	ข้าวโพด	60	2	1954	1950.66	2130.6	2096.5	2271	2080.55	134.09
31	ข้าวโพด	60	3	2246.3	2157.71	2008.42	2011.38	2275.29	2139.82	126.27
32	ข้าวโพด	60	4	2010.61	2015.42	2103.71	2092.24	2035.39	2051.47	43.64
33	ข้าวโพด	70	1	1814	1769.25	1965.5	1743.74	1786.01	1815.70	87.55
34	ข้าวโพด	70	2	1790.8	1880.5	1839.33	1833.67	1868.75	1842.61	34.98
35	ข้าวโพด	70	3	1829.32	1990.35	2067.12	1853.74	1956.68	1939.44	98.31
36	ข้าวโพด	70	4	1822.83	1890.11	1942.59	1788.04	1818.72	1852.46	62.66
37	PP			1552.30	1563.88	1573.49	1565.32	1558.57	1562.71	7.90

ตารางที่ ข 1.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความแข็งแรงอัด (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
1	มะพร้าว	50	1	42.03	41.87	45.69	43.07	42.62	43.06	1.55
2	มะพร้าว	50	2	43.35	45.52	43.23	44.46	43.64	44.04	0.96
3	มะพร้าว	50	3	46.21	47.01	45.32	45.63	46.4	46.11	0.66
4	มะพร้าว	50	4	41.56	43.91	43.84	42.61	44.32	43.25	1.14
5	มะพร้าว	60	1	44.82	45.7	45.3	47.9	45.65	45.87	1.19
6	มะพร้าว	60	2	46.61	47.86	46.41	45.34	46.4	46.52	0.90
7	มะพร้าว	60	3	46.68	48.67	47.56	47.22	47.11	47.45	0.75
8	มะพร้าว	60	4	46.5	46.01	46.32	45.86	47.02	46.34	0.45

ตารางที่ ข 1.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความแข็งแรงอัด (Mpa)					ค่าเฉลี่ย (Mpa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
9	มะพร้าว	70	1	47.37	48.83	49.51	46.39	48.26	48.07	1.22
10	มะพร้าว	70	2	48.28	47.32	49.38	49.41	48.22	48.52	0.88
11	มะพร้าว	70	3	50.27	49.72	49.17	49.38	49.43	49.59	0.43
12	มะพร้าว	70	4	48.18	49.31	47.55	47.52	48.92	48.30	0.80
13	ปาล์ม	50	1	41.63	41.42	41.28	41.8	41.57	41.54	0.20
14	ปาล์ม	50	2	42.38	41.2	43.68	42.59	40.51	42.07	1.24
15	ปาล์ม	50	3	41.33	43.76	43.63	42.83	45.75	43.46	1.60
16	ปาล์ม	50	4	40.113	43.42	41.82	40.32	41.77	41.49	1.34
17	ปาล์ม	60	1	40.03	44.234	43.2	41.76	42.76	42.40	1.59
18	ปาล์ม	60	2	44.09	45.09	43.34	43.8	42.45	43.75	0.97
19	ปาล์ม	60	3	44.09	45.88	44.04	45.47	43.68	44.63	0.98
20	ปาล์ม	60	4	42.93	44.22	44.34	43.31	42.305	43.42	0.86
21	ปาล์ม	70	1	43.59	44.01	45.23	46.14	43.32	44.46	1.19
22	ปาล์ม	70	2	45.93	45.04	46.09	45.91	46.32	45.86	0.49
23	ปาล์ม	70	3	46.67	46.51	47.66	46.07	46.1	46.60	0.65
24	ปาล์ม	70	4	45.88	46.02	45.12	46.443	46.54	46.00	0.57
25	ข้าวโพด	50	1	40.28	40.17	39.11	41.1	40.26	40.18	0.71
26	ข้าวโพด	50	2	41.29	40.22	42.41	40.11	41.72	41.15	0.98
27	ข้าวโพด	50	3	42.71	43.72	42.18	41.38	43.71	42.74	1.01
28	ข้าวโพด	50	4	41.82	42.18	41.27	39.11	40.27	40.93	1.25
29	ข้าวโพด	60	1	39.28	40.17	39.11	41.1	39.26	39.78	0.85
30	ข้าวโพด	60	2	38.29	38.22	42.41	40.11	41.72	40.15	1.92
31	ข้าวโพด	60	3	40.2	42.71	43.72	42.18	41.38	42.04	1.33
32	ข้าวโพด	60	4	41.82	42.18	41.27	39.11	39.27	40.73	1.44
33	ข้าวโพด	70	1	42.85	42.53	45.1	43.4	42.89	43.35	1.02
34	ข้าวโพด	70	2	42.68	43.73	44.31	44.33	43.22	43.65	0.71
35	ข้าวโพด	70	3	45.57	43.64	43.78	44.12	45.2	44.46	0.87
36	ข้าวโพด	70	4	44.09	44.32	42.87	43.49	43.54	43.66	0.57
37	PP			33.54	35.02	34.38	35.60	33.88	34.48	0.84

ตารางที่ ข 1.6 ผลการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุไม้ผสมพลาสติก

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความแข็งแรง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
1	มะพร้าว	50	1	76.23	76.53	76.61	76.98	76.64	76.60	0.27
2	มะพร้าว	50	2	77.72	77.34	77.76	77	77.32	77.43	0.32
3	มะพร้าว	50	3	79	79.43	79.94	80.02	79.7	79.62	0.42
4	มะพร้าว	50	4	77.2	77.93	77.5	77.89	76.22	77.35	0.70
5	มะพร้าว	60	1	72.22	72.43	72.84	72.21	72.5	72.44	0.26
6	มะพร้าว	60	2	73.34	73.43	73.97	73.03	73.23	73.40	0.35
7	มะพร้าว	60	3	74.21	74.11	74.59	74.77	74.92	74.52	0.35
8	มะพร้าว	60	4	73.32	73.54	73.64	73.23	73.26	73.40	0.18
9	มะพร้าว	70	1	68.62	68.34	68.8	68.453	68.61	68.56	0.18
10	มะพร้าว	70	2	69.01	69.53	69.24	69.57	69.44	69.36	0.23
11	มะพร้าว	70	3	71.5	71.72	70.32	70.61	70.44	70.92	0.64
12	มะพร้าว	70	4	68.33	68.23	68.61	68.2	68.32	68.34	0.16
13	ปาล์ม	50	1	70.32	70.55	70.23	70.62	70.8	70.50	0.23
14	ปาล์ม	50	2	71.6	71.93	71.6	71.11	71.01	71.45	0.38
15	ปาล์ม	50	3	72.34	72.54	72.74	72.14	72.64	72.48	0.24
16	ปาล์ม	50	4	71.43	71.75	71	71.62	71.41	71.44	0.28
17	ปาล์ม	60	1	68.642	68.55	68.7	68.75	68.55	68.64	0.09
18	ปาล์ม	60	2	69.43	69.13	69	68.88	69.01	69.09	0.21
19	ปาล์ม	60	3	70.43	70.53	70.61	70.74	70.33	70.53	0.16
20	ปาล์ม	60	4	68.53	68.51	68.23	68.82	68.28	68.47	0.24
21	ปาล์ม	70	1	66.53	66.71	66.54	66.92	66.77	66.69	0.16
22	ปาล์ม	70	2	67.32	67.44	67.52	67.2	67.44	67.38	0.13
23	ปาล์ม	70	3	69.34	68.77	69.67	68.82	69.15	69.15	0.37
24	ปาล์ม	70	4	66.8	66.78	66.48	66.38	66.17	66.52	0.27
25	ข้าวโพด	50	1	63.21	63.73	63.01	63.53	63.44	63.38	0.28
26	ข้าวโพด	50	2	64.72	64.29	64.77	64.6	64.81	64.64	0.21
27	ข้าวโพด	50	3	67.34	67.66	67.72	67.62	67.89	67.65	0.20
28	ข้าวโพด	50	4	65.01	65.73	65.22	65.62	65.35	65.39	0.29
29	ข้าวโพด	60	1	61.66	61.51	61.34	61.53	61.4	61.49	0.12
30	ข้าวโพด	60	2	62.54	62.04	62.68	62.77	62.52	62.51	0.28

ตารางที่ ข 1.6 ผลการทดสอบความแข็งผิวของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความแข็งผิว (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
31	ข้าวโพด	60	3	63.23	63.17	63.73	63.29	63.77	63.44	0.29
32	ข้าวโพด	60	4	64.4	62.94	62.37	62.455	61.81	62.80	0.98
33	ข้าวโพด	70	1	58.02	58.52	58.32	57.64	57.87	58.07	0.35
34	ข้าวโพด	70	2	58.26	58.76	59	59.35	58.54	58.78	0.42
35	ข้าวโพด	70	3	60.13	60.645	60.34	60.55	60.88	60.51	0.29
36	ข้าวโพด	70	4	59.82	59.32	59.42	58.87	58.73	59.23	0.44
37	PP			70.37	70.94	70.55	70.96	70.33	70.63	0.27

ตารางที่ ข 1.6 ผลการทดสอบความขรุขระของวัสดุไม้ผสมพลาสติก

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความขรุขระผิว (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
1	มะพร้าว	50	1	4.23	4.43	4.53	4.23	4.23	4.33	0.13
2	มะพร้าว	50	2	4.51	4.11	4.32	4.24	4.22	4.28	0.13
3	มะพร้าว	50	3	4.12	4.42	4.13	4.22	4.43	4.26	0.14
4	มะพร้าว	50	4	4.27	4.26	4.24	4.33	4.37	4.29	0.05
5	มะพร้าว	60	1	3.53	3.58	3.62	3.24	3.66	3.53	0.15
6	มะพร้าว	60	2	3.21	3.41	3.42	3.49	3.58	3.42	0.12
7	มะพร้าว	60	3	3.33	3.44	3.25	3.34	3.54	3.38	0.10
8	มะพร้าว	60	4	3.68	3.45	3.75	3.63	3.43	3.59	0.13
9	มะพร้าว	70	1	2.63	2.33	2.47	2.49	2.35	2.45	0.11
10	มะพร้าว	70	2	2.43	2.66	2.37	2.22	2.43	2.42	0.14
11	มะพร้าว	70	3	2.34	2.38	2.45	2.11	2.24	2.30	0.12
12	มะพร้าว	70	4	2.43	2.33	2.54	2.22	2.66	2.44	0.15
13	ปาล์ม	50	1	4.66	4.44	4.53	4.28	4.33	4.45	0.14
14	ปาล์ม	50	2	4.71	4.51	4.32	4.24	4.33	4.42	0.17
15	ปาล์ม	50	3	4.37	4.26	4.34	4.33	4.47	4.35	0.07
16	ปาล์ม	50	4	4.32	4.62	4.33	4.22	4.53	4.40	0.15
17	ปาล์ม	60	1	3.73	3.68	3.92	3.84	3.76	3.79	0.08

ตารางที่ ข 1.6 ผลการทดสอบความขรุขระของวัสดุไม้ผสมพลาสติก (ต่อ)

No	ชนิดไม้	ปริมาณ พลาสติก	ปริมาณ สารเติม แต่ง	ความขรุขระผิว (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)	SD
				(wt%)	(%)	1	2	3		
18	ปาล์ม	60	2	3.81	3.97	3.87	3.76	3.88	3.86	0.07
19	ปาล์ม	60	3	3.71	3.86	3.75	3.83	3.63	3.76	0.08
20	ปาล์ม	60	4	3.97	3.77	3.87	3.68	3.77	3.81	0.10
21	ปาล์ม	70	1	2.60	2.63	2.54	2.62	2.62	2.60	0.03
22	ปาล์ม	70	2	2.64	2.58	2.57	2.55	2.56	2.58	0.03
23	ปาล์ม	70	3	2.56	2.46	2.57	2.50	2.66	2.55	0.07
24	ปาล์ม	70	4	2.65	2.56	2.55	2.61	2.49	2.57	0.05
25	ข้าวโพด	50	1	4.21	4.12	4.33	4.28	4.32	4.25	0.08
26	ข้าวโพด	50	2	4.34	4.32	4.12	4.23	4.42	4.29	0.10
27	ข้าวโพด	50	3	4.32	4.12	4.23	4.22	4.12	4.20	0.08
28	ข้าวโพด	50	4	4.32	4.41	4.11	4.12	4.22	4.24	0.12
29	ข้าวโพด	60	1	3.83	3.77	3.81	3.82	3.73	3.79	0.04
30	ข้าวโพด	60	2	3.71	3.77	3.67	3.72	3.88	3.75	0.07
31	ข้าวโพด	60	3	3.67	3.77	3.67	3.56	3.77	3.69	0.08
32	ข้าวโพด	60	4	3.61	3.56	3.85	3.73	3.63	3.68	0.10
33	ข้าวโพด	70	1	2.64	2.88	2.72	2.65	2.71	2.72	0.09
34	ข้าวโพด	70	2	2.72	2.71	2.73	2.71	2.62	2.70	0.04
35	ข้าวโพด	70	3	2.67	2.46	2.57	2.80	2.69	2.64	0.12
36	ข้าวโพด	70	4	2.63	2.73	2.72	2.71	2.60	2.68	0.05
37	PP			1.84	1.66	1.93	1.61	1.66	1.74	0.12

ตารางที่ ข 1.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุไม้ผสมพลาสติกที่สัดส่วน rPP70CO26MA3L1 ปริมาณพลาสติก 70% โดยน้ำหนัก

ชนิดไม้	มวล (g)					ปริมาตร (cm ³)					ความหนาแน่น (g/cm ³)	SD
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
ข้าวโพด	3.5	3.38	3.51	3.5	3.42	2.33	2.35	2.38	2.32	2.41	1.50	0.58
ปาล์ม	3.1	3.21	3.09	3.12	3.22	2.42	2.41	2.36	2.38	2.34	1.32	0.41
มะพร้าว	2.75	2.76	2.8	2.82	2.78	2.21	2.23	2.33	2.21	2.19	1.25	0.29

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายณคนธ์ รักษารักษ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5910120045

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการการศึกษา)

1. ทุนบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีการศึกษา 2559 ได้รับจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ทุนอุดหนุนการทำวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2560 ได้รับจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ณคนธ์ รักษารักษ์, ธเนศ รัตนวิไล, ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร, “ผลของเส้นใยเหลือใช้จากเศษวัสดุทางการเกษตรต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของวัสดุไม้ผสมพลาสติกจากพอลิโพรพิลีน”, ปีที่ 42. ฉบับที่ 4. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, ตุลาคม – ธันวาคม 2562.