ไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิโอเลฟินส์และเส้นใยมะพร้าว

WOOD PLASTIC COMPOSITE (WPC)
FROM POLYOLEFINS AND COIR FIBERS

กนกอร แสงสุวรรณ
KANOK-ORN SAENGSUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553
KMITL-2010-SC-M-015-045

ไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิโอเลฟินส์และเส้นใยมะพร้าว

WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPC)
FROM POLYOLEFINS AND COIR FIBERS

กนกอร แสงสุวรรณ
KANOK-ORN SAENGSUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-015-045

WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPC)
FROM POLYOLEFINS AND COIR FIBERS

KANOK-ORN SAENGSUWAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010
KMITL-2010-SC-M-015-045

COPYRIGHT 2010

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิโอเลฟินส์และเส้นใยมะพร้าว
นักศึกษา	นางสาวกนกอร แสงสุวรรณ
รหัสประจำตัว	51067908
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	นายวรธรรม อุ่นจิตติชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites; WPC) เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ หรือไม้เทียมในงานวิจัยนี้เตรียมได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) และพอลิพรอพิลีน (Polypropylene; PP) ผสมกับเส้นใยมะพร้าว (Coir fibers) ชนิดเชิงกล โดยในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสองตอน การทดลองตอนที่ 1 เป็นการศึกษาเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการผลิต WPC โดยทำการผสมวัตถุดิบต่างๆ ให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าว (100:0 70:30 60:40 และ50:50) ปริมาณสารช่วยผสม พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted Polyethylene; MA-g-PE) และ พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted Polypropylene ; MA-g-PP) (0-3 % โดยน้ำหนักของเส้นใย) ขนาดของเส้นใย (>80 mesh, 50-80 mesh, 20-50 mesh และ<20 mesh) จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์กับเส้นใยมะพร้าว พบว่า สมบัติเชิงกลบางประการของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เช่น ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเส้นใยมากเกินไป การขึ้นรูปทำได้ยากขึ้น และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราส่วนของพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสม คือ 50:50 จากการศึกษาปริมาณของสารช่วยผสม พบว่า สมบัติเชิงกลดีขึ้นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง ปริมาณสารช่วยผสม MA-g-PE ที่เหมาะสมคือ 2% พบว่า เส้นใยมะพร้าวขนาด 50-80 mesh (เบอร์ 2) ให้ค่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตสูงที่สุด จากงานวิจัย พบว่า

สมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ และค่าความยืดเหนี่ยวของตะปูเกลียวของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงขึ้น

ในการทดลองตอนที่ 2 เป็นการพัฒนาคุณภาพของไม้เทียม จากผลงานวิจัยตอนที่ 1 เพื่อให้ได้ไม้เทียมที่มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น การใช้สารก่อนิวเคลียส (Nucleating agent) (1%) การใส่เม็ดแก้วกลวง (K15 และ W300) และการปิดผิว WPC ด้วยแผ่นไม้จริง (แผ่นไม้สัก) การใส่สารก่อนิวเคลียสทำให้ค่าองศาความเป็นผลึกของวัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ WPC มีค่าสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเพิ่มสมบัติความเป็นฉนวนและลดน้ำหนักของWPC สามารถทำได้โดยการใส่เม็ดแก้วกลวง จากการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) พบว่า เส้นใยมะพร้าวและเม็ดแก้วกลวงมีการกระจายตัวที่ดี การยึดเกาะระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ดีขึ้นเมื่อใช้สารช่วย การปรับปรุงความสวยงามของ WPC ด้วยการนำแผ่นไม้จริง (0.6 มิลลิเมตร) ปิดลงบนผิวของวัสดุ ทำให้วัสดุไม้เทียมมีความสวยงามเหมือนไม้ธรรมชาติ ซึ่งแผ่นไม้จริงมีการยึดเกาะกับ WPC ได้ดี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการทดสอบด้วยการต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการวิจัยทั้งหมดกล่าวได้ว่า วัสดุ WPC จากเส้นใยมะพร้าวมีสมบัติที่ดี มีความเป็นไปได้สูงในการผลิตเชิงพาณิชย์ และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

คำสำคัญ : ไม้พลาสติกคอมโพสิต, ไม้เทียม, พอลิโอเลฟินส์, เส้นใยมะพร้าว

Thesis	WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPC) FROM POLYOLEFINS AND COIR FIBERS
Student	Miss Kanok-orn Saengsuwan
Student ID.	51067908
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud
Thesis Co-advisor	Mr. Waratham Oonjittichai

ABSTRACT

In this research work, Wood Plastic Composites (WPC) used as artificial wood were prepared from linear low density polyethylene (LLDPE), polypropylene (PP) and mechanical-pulp coir fibers. In the first part of the research, it was focused on finding optimum formula of the WPC. Raw materials were first mixed and compounded by a two-roll mill and then shaped by a compression molding machine. WPC samples were characterized for physical, mechanical, thermal and morphological properties. Parameters affecting WPC properties were studied, such as, plastic/coir ratios (100:0, 70:30, 60:40, and 50:50), amount of compatibilizers (Maleic anhydride grafted Polyethylene; MA-g-PE or Maleic anhydride grafted Polypropylene; MA-g-PP) (0-3 %wt of fibers), sizes of fibers (>80 mesh; 50-80 mesh; 20-50 mesh; and <20 mesh). By studying effects of fiber loading, it was found that some mechanical properties of WPC were improved by increasing % fiber loading,i.e., flexural strength and flexural modulus. However, water absorption of the composites was also increased as the fiber loading was increased. An optimum ratio of plastic and fiber was found at 50:50. By studying the effects of the compatibilizers, it was found that the WPC with 2% MA-g-PE yielded optimum properties. The % water absorption was also declined when the compatibilizer was incorporated. By studying size of the fibers, it was found that properties of WPC with 50-80 mesh fibers seemed to be better than others. It was found that mechanical properties such as hardness, flexural strength, flexural modulus and screw holding of WPC-PP were higher than those of WPC-LLDPE.

In the second part, it was dedicated to improve some properties and appearance of the resulted WPC from Part I. These included addition of a nucleating agent (1%), addition of glass

bubble beads (K15 and W300) (20%) and covering WPC with thin natural teak wood sheet. As the nucleating agent was added, mechanical properties of the WPC were improved due to the higher % crystallinity. As the glass bubble beads were incorporated, mechanical properties, density and thermal conductivity of the WPC were decreased due to the glass bubble beads. Morphology of the fractured WPC was studied by SEM. It was revealed that good dispersion of the fiber and glass bubble beads, and good interfacial bonding between the fibers and the plastic matrix were observed. Finally, by hot-pressing the WPC top with the real natural teak sheet (0.6 mm), the appearance of the WPC was improved to be beautiful as natural wood. The cover seemed to adhere very well with the WPC since no change was observed when the samples were immerged in boiling water for 4 hrs. In conclusion, the resulted WPCs showed promising properties and good appearance. The WPCs from coir fibers have high possibility to be commercialized and used in several applications.

Keywords : Wood Plastic Composites (WPC), Artificial wood, Polyolefins, Coir fibers

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยการได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้จาก รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วรธรรม อุ่นจิตติชัย นักวิชาการป่าไม้ และเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม และเป็นผู้เอื้อเฟื้อการเตรียมเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในการทดลอง การขึ้นรูปชิ้นงานและเครื่องมือในการทดสอบ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สจล. และเจ้าหน้าที่กรมป่าไม้ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd. ในความอนุเคราะห์ให้ พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ และ เม็ดแก้วกลวง สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ Optimal Tech Co.,Ltd. ในความอนุเคราะห์ให้ สารป้องกันการเกิดแอนติออกซิเดชัน และ พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ HMC Polymers Co.,Ltd. ในความอนุเคราะห์ให้ พอลิพรอพิลีน สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ MBJ Enterprise Co.,Ltd. ในความอนุเคราะห์ให้ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และเส้นใยมะพร้าว สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ 3M (Thailand) Co.,Ltd. ในความอนุเคราะห์ให้ เม็ดแก้วกลวง สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย เพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจที่ดีและสนับสนุนช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กนกอร แสงสุวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย......I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ......III

กิตติกรรมประกาศ......V

สารบัญ......VI

สารบัญตาราง......IX

สารบัญรูป......X

บทที่ 1 บทนำ......1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย......1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย......5

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย......5

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ......6

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ......7

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composites)......7

2.1.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites)......8

2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต......10

2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers)......12

2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)......12

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)......14

2.2.3 ลิกนิน (Lignin)......15

2.3 ไม้และเส้นใยไม้ (Wood and Fibers)......17

2.4 มะพร้าว......17

2.5 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Linear Low Density Polyethylene)......21

2.6 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)......22

2.6.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน......23

2.7 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Polyethylene grafted maleic anhydride; PE-g-MA) และพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Polypropylene grafted Maleic anhydride; PP-g-MA)......24

2.8 เม็ดแก้ว (Glass Bubbles)......25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 การตกผลึกในพอลิเมอร์..27

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง...30

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย...36

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย...36

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย...39

3.3 วิธีการทดลอง...40

3.3.1 การเตรียมเส้นใยไม้...40

3.3.2 ขั้นตอนการผสม..40

3.3.3 การปรับปรุงไม้เทียมด้วยการปิดผิวหน้าด้วยแผ่นไม้จริง......................43

3.4 การทดสอบ..44

3.4.1 สมบัติเชิงกล...44

3.4.2 สมบัติทางกายภาพ...47

3.4.3 สมบัติทางความร้อน...48

3.4.4 สัณฐานวิทยา...49

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง...50

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยมะพร้าว......................50

4.2 การศึกษาปริมาณของสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์......54

4.3 การศึกษาผลของขนาดเส้นใย...59

4.4 การศึกษาผลของชนิดพอลิเมอร์เมตริกซ์..66

4.5 การศึกษาผลของสารก่อนิวเคลียส..67

4.6 การศึกษาผลของเม็ดแก้วกลวง..69

4.7 การปรับปรุงไม้เทียมด้วยการปิดผิวหน้าด้วยแผ่นไม้จริง..............................73

4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ...75

4.9 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)..77

4.10 การเปรียบเทียบสมบัติของไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตเทียบกับไม้จริงที่มีขายและใช้งานในท้องตลาด..85

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.11 การวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis)..86

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..88

5.1 สรุปผลการทดลอง...88

5.2 ข้อเสนอแนะ...89

เอกสารอ้างอิง...90

ภาคผนวก...94

ภาคผนวก ก. กราฟที่ได้จากเครื่อง DSC ของไม้พลาสติกคอมโพสิต.........................94

ภาคผนวก ข. ภาพของเส้นใยมะพร้าว...97

ภาคผนวก ค. การทดสอบสมบัติเชิงกลของ WPC...106

ประวัติผู้เขียน...111

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกเส้นใยมะพร้าวของประเทศไทย ปี 2544-2547......................18

2.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางชนิด..20

2.3 สมบัติบางประการของเม็ดแก้วและเม็ดแก้วกลวง..26

3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE ที่ใช้ในงานวิจัย...37

3.2 สมบัติบางประการของ PP ที่ใช้ในงานวิจัย..37

3.3 สมบัติบางประการและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัย................38

3.4 สมบัติบางประการของสารช่วยผสม MA-g-PE...38

3.5 สมบัติบางประการของเม็ดแก้วกลวงเกรด K15 และ W300..39

3.6 อัตราส่วนสูตรผสมต่างๆ..42

3.7 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบ WPC...44

4.1 ค่าอุณภูมิหลอมเหลวผลึก และค่าองศาความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วยเทตนิค DSC ของ WP- LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวเบอร์2 และสารช่วยผสม MA-g-PE..........................58

4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัย..63

4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของ WPC-LLDPE และ WPC-PP...66

4.4 การศึกษาผลของสารก่อนิวเคลียส...68

4.5 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และค่าองศาความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วย DSC...............68

4.6 ค่าความสามารถในการนำความร้อนของ WPC-PP ที่ได้จาก การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) ณ อุณหภูมิห้อง..73

4.7 สมบัติบางประการของ WPC ในงานวิจัยกับไม้จริงและวัสดุทดแทนไม้บางชนิด.................85

4.8 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของวัสดุประเภทต่างๆ.......................86

4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม...................................87

4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต WPC-PP..87

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ความแตกต่างระหว่างไม้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เป็นไม้เทียม......................................3

1.2 ตัวอย่างพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนเสริมแรง..................................4

2.1 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน...8

2.2 ประเภทของคอมโพสิต...9

2.3 วัสดุทดแทนไม้ในปัจจุบัน...12

2.4 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส...13

2.5 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส..13

2.6 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส...14

2.7 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส...15

2.8 หน่วยที่ซ้ำกันในโครงสร้างของลิกนิน..15

2.9 ตัวอย่างโมเลกุลของลิกนิน..16

2.10 แสดงการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้.....................................16

2.11 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยมะพร้าว...18

2.12 สมบัติเชิงกลส่วนต่างๆ ของเส้นใยมะพร้าว...19

2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน...21

2.14 แบบจำลองโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ...21

2.15 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน...22

2.16 โครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน...22

2.17 โครงสร้างของซินไดโอแทคติกพอลิพรอพิลีน...23

2.18 โครงสร้างของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน...23

2.19 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์..................................24

2.20 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์................................25

2.21 ขนาดและลักษณะของเม็ดแก้วกลวง ที่มีขนาดอนุภาค 100 µm...26

3.1 รูปถ่ายลักษณะของเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 1-4 ที่ได้จากกระบวนการบดเยื่อเชิงกล..................40

3.2 การปิดผิวไม้เทียมด้วยแผ่นไม้สัก..43

3.3 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก.....................................44

3.4 ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ...46

3.5 ลักษณะการทดสอบความยืดเหนี่ยวของตะปูเกลียว...46

3.6 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ..47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.7 วิธีวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ.....47

4.1 ค่าความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอดมีรอยบาก ของWPC-LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ.....51

4.2 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ.....52

4.3 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ.....52

4.4 ค่าความแข็งกด WPC-LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ.....53

4.5 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวของ WPC-LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ..53

4.6 ส่วนต่างๆ ของสารช่วยผสมที่ช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างพลาสติกและเส้นใย.....55

4.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชัน ระหว่าง หมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของ เส้นใยไม้ กับหมู่แอนไฮดรายด์ ($C_4H_3O_3$) ของสารช่วยผสม MA-g-PE.....55

4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC-LLDPE (50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว.....56

4.9 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-LLDPE (50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว.....56

4.10 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-LLDPE (50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว.....57

4.11 ค่าความแข็งกดของ WPC-LLDPE (50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว.....57

4.12 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว WPC-LLDPE (50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว.....58

4.13 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC-LLDPE (50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ.....60

4.14 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-LLDPE (50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ.....60

4.15 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-LLDPE (50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ.....61

4.16 ค่าความแข็งกด WPC-LLDPE (50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ.....61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.17 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว WPC-LLDPE (50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ..........62

4.18 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด >80 mesh (เบอร์ 1)..........64

4.19 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด 50-80 mesh (เบอร์ 2)..........64

4.20 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด 20-50 mesh (เบอร์ 3)..........65

4.21 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด <20 mesh (เบอร์ 4)..........65

4.22 ค่าความหนาแน่น WPC-PP (50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง..........70

4.23 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC-PP (50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง..........70

4.24 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-PP (50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง..........71

4.25 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-PP (50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง..........71

4.26 ค่าความแข็งกดของ WPC-PP (50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง..........72

4.27 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวของ WPC-PP (50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง..........72

4.28 ชิ้นงาน WPC ก่อนปิดผิว และ WPC ที่ปิผิวด้วยแผ่นไม้จริง..........73

4.29 ภาพถ่าย WPC ปิดผิวด้วยแผ่นไม้จริงก่อนและหลังการต้มน้ำเดือด 4 ชั่วโมง..........74

4.30 การยึดติดแบบล๊อคเชิงกล..........74

4.31 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-LLDPE ที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ..........76

4.32 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) และสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณต่างๆ..........76

4.33 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) สารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว และเม็ดแก้วกลวงชนิดต่างๆที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของ-ของผสม..........77

4.34 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50)..........79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.35 ภาพ SEM ของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่ใส่สารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว.....80

4.36 ภาพ SEM ของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่ใส่เส้นใยขนาดต่างๆ และใส่สารช่วยผสมผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว.....82

4.37 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) สารช่วยผสม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว และสารตัวเติมเม็ดแก้วกลวงเกรด K15 20% โดยน้ำหนักของของผสม.....83

4.38 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) สารช่วยผสม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว และสารตัวเติมเม็ดแก้วกลวงเกรด W300 20% โดยน้ำหนักของของผสม.....84

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย

ทรัพยากรป่าไม้เป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญยิ่งของประเทศ ที่มีผลต่อสภาวะสมดุลของระบบนิเวศ ดังนั้นหากมีการสูญเสียทรัพยากรป่าไม้มากเท่าไร ก็ย่อมทำให้เกิดความไม่สมดุลของธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากสภาวะวิกฤตจากภัยธรรมชาติในปัจจุบัน ซึ่งรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ สาเหตุที่สำคัญ สืบเนื่องจากการลดลงอย่างรวดเร็วของพื้นที่ป่าไม้ ปัจจัยที่ทำให้พื้นที่ป่าไม้ลดลงอย่างรวดเร็วนั้น นอกจากจะเกิดจากการบุกรุกเข้าครอบครองพื้นที่ป่าไม้เพื่ออยู่อาศัยทำกินแล้ว ยังเกิดจากการตัดไม้ทำลายป่าที่เกินกำลังการผลิตของป่า เพื่อนำไม้ธรรมชาติออกมาใช้ประโยชน์ให้เพียงพอกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร และความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ ภาวะการณ์ดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่ควรรีบเร่งแก้ไขและหาแนวทางปกป้องสภาพป่าไม้ให้สามารถเพิ่มพื้นที่ป่าไม้และอนุรักษ์สภาพป่าไม้ที่เหลืออยู่เพียง 86 ล้านไร่ หรือประมาณ 26 %ของพื้นที่ประเทศให้คงอยู่ต่อไปได้ [1]

แนวทางหนึ่งก็คือ การใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุไม้และเศษวัสดุการเกษตรเพื่อทดแทนการใช้ไม้จากป่าธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นวิธีการที่สามารถปกป้องป่าไว้ได้ เพราะนับวันปริมาณการบริโภคไม้สูงขึ้น โดยเฉพาะการบริโภคไม้ของประเทศไทยมีมากกว่า 3 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งเป็นไม้ที่นำเข้าจากประเทศต่างๆ ถึง 99 % ของการบริโภคไม้ในประเทศ [1] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถ้าสามารถนำเศษวัสดุไม้และเศษวัสดุการเกษตรมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบทดแทนไม้จากธรรมชาติได้แล้ว ก็จะมีผลต่อการอนุรักษ์ป่าไม้ ลดมูลค่าการนำเข้าจากต่างประเทศ และเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุไม้และเศษวัสดุการเกษตรที่นำมาใช้ได้มากขึ้น [1]

วิธีการแก้ปัญหาวิธีหนึ่งคือ การผลิตไม้เทียม (Artificial woods) จากวัสดุอื่นเพื่อใช้ทดแทนไม้ ไม้เทียม คือ วัสดุใดๆ ที่มีลักษณะภายนอกเหมือนหรือคล้ายกับวัสดุไม้ ไม้เทียมที่ดีควรมีสมบัติคล้ายวัสดุไม้ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง เหนียว ความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี สามารถตอกด้วยตะปู ตัดด้วยเลื่อย และอายุการใช้งานยาวนาน ฯลฯ สามารถใช้วัสดุไม้เทียมประกอบสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ได้ เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากไม้ในด้านต่างๆที่ได้กล่าวมา สามารถใช้วัสดุไม้เทียมประกอบสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ได้ วัสดุหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นไม้เทียมได้แก่ "ไม้พลาสติกคอมโพสิต" (Wood Plastic Composites; WPC) ซึ่งเป็นวัสดุประกอบจากวัสดุสองชนิดคือ พอลิเมอร์เมตริกซ์ (Polymer matrix) และเส้นใยเสริมแรง (Fibers reinforcement) WPC มีข้อดีหลายประการ เช่น

- น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ
- มีความแข็งแรง และค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง
- ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จากกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ฯลฯ
- มีอายุการใช้งานยาวนาน ไม่ผุกร่อนง่าย และไม่ถูกทำลายโดยแมลงเช่น มอด ปลวก ฯลฯ
- มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดี ดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าไม้

พอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาปรับปรุงสมบัติอยู่เสมอ เพื่อให้มีคุณภาพและสมบัติดียิ่งขึ้น และต้นทุนการผลิตต่ำ แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ และลดต้นทุนการผลิต คือการทำพอลิเมอร์คอมโพสิต พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตอาจเป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermosets) เช่น พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester) อิพอกซี (Epoxy) ฯลฯ เส้นใยเสริมแรงที่นิยมใช้ ได้แก่เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟล่าร์ (Kevlar fibers) ฯลฯ

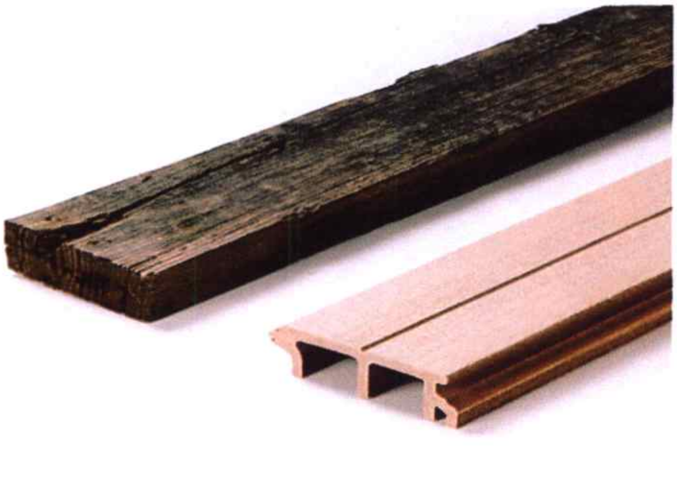
ปัจจุบันได้มีความสนใจในการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) มาใช้ประโยชน์เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์มีราคาแพง ประเทศไทยมีเส้นใยธรรมชาติมากมาย บางชนิดเป็นเศษเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น เส้นใยอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาล เส้นใยมะพร้าวจากอุตสาหกรรมกะทิ ขี้เลื่อยจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับไม้อื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมการเกษตร ฯลฯ เส้นใยธรรมชาติมีข้อดีหลายประการดังนี้

- หาง่าย เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีใช้ไม่หมดสิ้น และมีให้เลือกมากมายหลายชนิด
- เส้นใยบางชนิดเป็นของเหลือทิ้ง หรือเป็นวัชพืช มีราคาถูก ทำให้สามารถใช้ลดต้นทุนการผลิต ช่วยกำจัดและลดกากของเสียจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม
- เส้นใยมีสมบัติเชิงกลดี บางชนิดมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง
- ความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา
- สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่เป็นปัญหาในการกำจัด

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่พยายามที่จะนำเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ เช่น เส้นใยอ้อย เส้นใยมะพร้าว เส้นใยไผ่ ป่านศรนารายณ์ ฯลฯ อย่างไรก็ดีการใช้ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติใน ปัจจุบันยังไม่ประสบความสำเร็จในเชิงอุตสาหกรรมเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติ มีข้อจำกัดบางประการที่ต้องการการปรับปรุงคือ

- เส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ต่ำ เป็นสาเหตุให้สมบัติบางประการต่ำ เช่น สมบัติเชิงกล
- เส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำสูงกว่าคอมโพสิตเส้นใยสังเคราะห์และพอลิเมอร์
- เส้นใยธรรมชาติขาดความสม่ำเสมอของเส้นใย

มะพร้าว (*Cocos nucifera Linn.*) เป็นเส้นใยไม้ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับ WPC เนื่องจากในประเทศไทยมีการปลูกกันจำนวนมาก เพราะสามารถขึ้นได้ในทุกจังหวัดทั่วประเทศ มีการใช้ประโยชน์ได้ทั้งในส่วนลำต้นและกาบมะพร้าว ไม้ที่ถูกตัดและนำเข้าสู่อุตสาหกรรมไม้ เพื่อแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน เครื่องใช้ ในขณะเดียวกันกาบมะพร้าว หรือเส้นใยมะพร้าวจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่นอน หรือแผ่นไม้อัด ปริมาณของเศษวัสดุจากกาบมะพร้าวลักษณะต่างๆ ที่เหลือจากการแปรรูปกาบมะพร้าวมะพร้าว จะมีเป็นปริมาณมาก ดังนั้นการนำเศษวัสดุเหล่านี้มาแปรสภาพใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต จะทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุไม้เหล่านี้ได้



รูปที่ 1.1 ความแตกต่างระหว่างไม้จริงกับ WPC ที่ใช้เป็นไม้เทียม [2]

รูปที่ 1.2 ตัวอย่าง WPC ที่ใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนเสริมแรง [3]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตวัสดุไม้พลาสติกคอมโพสิต เพื่อใช้เป็นวัสดุแผ่นไม้เทียม โดยพลาสติกที่ใช้ในการทดลองคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene ; LLDPE) และพอลิพรอพิลีน (Polypropylene ; PP) ผสมกับเส้นใยมะพร้าวที่เหลือจากอุตสาหกรรมที่นอน ซึ่งเป็นส่วนที่ได้จากกาบมะพร้าว โดยเน้นศึกษาสูตรที่ใช้ในการผสม เพื่อผลิต WPC เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบ ผลของขนาดเส้นใยมะพร้าว ผลของการใช้สารช่วยผสม และผลของชนิดเมตริกซ์ LLDPE เทียบกับ PP นอกจากนี้ยังเน้นการปรับปรุงพัฒนา WPC ที่เตรียมได้โดยการใช้สารก่อนิวเคลียส การใช้เม็ดแก้วกลวง และการปิดผิวด้วยแผ่นไม้จริง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเตรียมไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastis Composites; WPC) จากเส้นใยมะพร้าว และพลาสติกพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) และพอลิพรอพิลีน (Polypropylene; PP) ในระดับห้องปฏิบัติการ ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติของไม้เทียม รวมทั้งทำการปรับปรุงพัฒนาคุณภาพไม้เทียมที่ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าว (100:0 70:30 60:40 และ 50:50)
2. ศึกษาผลของขนาดเส้นใยมะพร้าวที่เติมใน WPC
    - >80 mesh (เบอร์ 1)
    - 50-80 mesh (เบอร์ 2)
    - 20-50 mesh (เบอร์ 3)
    - <20 mesh (เบอร์ 4)
3. ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสม (Compatibilizer) โดยใช้พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted Polyethylene; MA-g-PE; Compoline®)
4. ศึกษาชนิดของพอลิเมอร์เมตริกซ์ ได้แก่ LLDPE และ PP
5. ศึกษาสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมได้ ได้แก่
    - ลักษณะทางกายภาพ
    - สมบัติเชิงกล
    - สัณฐานวิทยา
    - สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter ; DSC
6. ทำการปรับปรุงเพื่อการประยุกต์ใช้งาน และพัฒนาคุณภาพของไม้พลาสติกคอมโพสิต เช่น
    - การใช้สารก่อนิวเคลียส (Nucleating agent) เพื่อช่วยเพิ่มความเป็นผลึก และความแข็งแรงของไม้เทียม
    - การใช้เม็ดแก้วกลวง (Glass bubble bead) เพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นฉนวน และลดความหนาแน่นของไม้เทียม
    - การปิดผิวด้วยแผ่นไม้จริงเพื่อความสวยงาม

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC) จากเส้นใยธรรมชาติ ให้มีสมบัติที่ดี เพื่อทดแทนการใช้ไม้ และเหมาะแก่การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับไม้ได้ เช่น โครงสร้างอาคาร ไม้พื้น ไม้กระดาน กรอบหน้าต่าง ประตู เฟอร์นิเจอร์ กระถางต้นไม้ ส่วนประกอบของรถยนต์ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ
2. สามารถทราบสูตรที่เหมาะสม สำหรับการผลิต WPC จากพลาสติกผสมเส้นใยมะพร้าว เพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการได้
3. สามารถเพิ่มมูลค่าและประโยชน์การใช้สอยจากเศษวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าวได้
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปเป็นพื้นฐานความรู้ทางการวิจัยโดยการประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตอื่นๆได้ และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composites) [4]

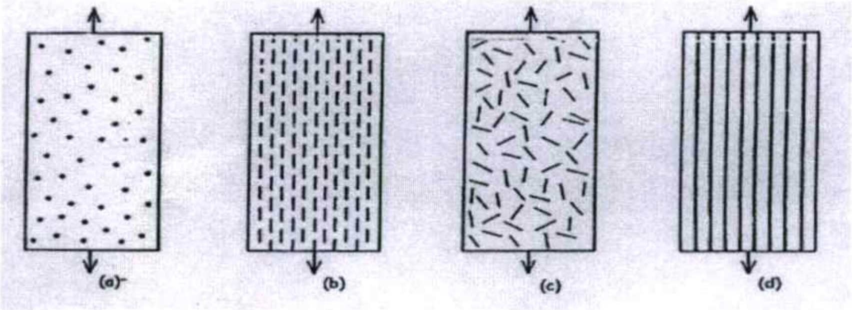
วัสดุคอมโพสิต หรือ"วัสดุประกอบ" เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างมาก ในปัจจุบันมีการใช้ผลิตภัณฑ์วัสดุคอมโพสิตมากกว่า 10 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นทุกปีประมาณ 5-10% [4] วัสดุคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering materials) ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากคอมโพสิตมีสมบัติที่ดี ซึ่งสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength, σ/ρ) สูง ดังนั้นเมื่อใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นเป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง เช่น ยานพาหนะ จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง แต่น้ำหนักเบา เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น มีประสิทธิภาพในการขนส่งมากขึ้น และประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่อยู่ในช่วงกว้าง เนื่องจากคอมโพสิตมีหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ ออกแบบ และสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ ทำให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตอย่างกว้างขวางมากมายหลากหลายการใช้งาน ในการใช้งานในปัจจุบันมีการเรียกวัสดุคอมโพสิตหลากหลายชื่อ เช่น พลาสติกเสริมแรง (Reinforced plastics, RP) พลาสติกเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Fiberglass reinforced plastics, FRP) แผ่นลามิเนตเสริมแรง (Reinforced plastics laminates) หรือไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) เป็นต้น

วัสดุคอมโพสิต คือวัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีสมบัติต่างกัน หรือแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกันและเสริมแรงกัน องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิต คือ

1. เมตริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน ให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

- พอลิเมอร์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Polymer Composites" สามารถใช้ได้ทั้ง พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermosets)
- โลหะ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Metal Composites"
- เซรามิกส์ เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า "Ceramic Composites"

2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอม-โพสิตวัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar® fibers) เป็นต้น เส้นใยอาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (Continuous fibers) หรือ เส้นใยสั้น (Discontinuous หรือ Chopped short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ โดยส่วนเสริมแรงทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน [4]

(a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาค จัดเรียงตัวแบบสุ่ม

(b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

(c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม

(d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

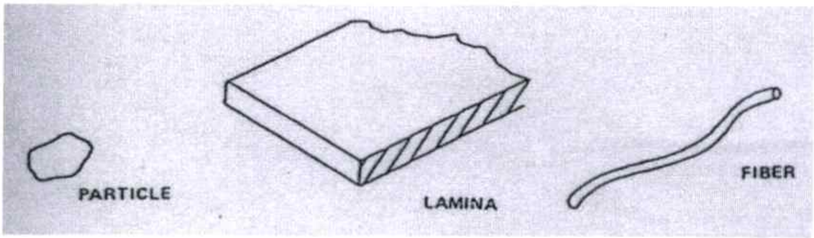
2.1.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites)

มีการแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตในหลายแบบ อาจแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้น (Short fibers) หรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar composites) คือคอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นเป็นชั้นๆ คล้ายแซนด์วิช (Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบก้อน (Particulate composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก (มักมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน)



รูปที่ 2.2 ประเภทของคอมโพสิต [4]

นอกจากนี้ สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต คือ

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ (Wood) ฟัน (Teeth) และกระดูก (Bone) ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมตริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีอพาไทต์ (Hydroxy apatite) อยู่ในเมตริกซ์ของสารอินทรีย์คอลลาเจน (Collagen) ที่เหนียว เป็นต้น
2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

สมบัติของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ

- การยึดเกาะระหว่างคอมโพสิต และสารเสริมแรง
- สมบัติของเมตริกซ์ และสารเสริมแรง
- ปริมาณสารเสริมแรง
- ขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรง
- กระบวนการผลิต
- การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง
- ตำหนิ (Flaws) หรือช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุคอมโพสิต

2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

ข้อดีของคอมโพสิต

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) มอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) ความเหนียวจำเพาะ (Specific stiffness) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง
- มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีสมบัติการรับแรงและมีการหน่วง (Damping) ที่ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ

ข้อเสียของคอมโพสิต

- ส่วนใหญ่มีต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูปคอมโพสิต
- มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการจัดเรียงตัว (Transverse direction)
- การต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่นทำได้ยาก
- การตรวจวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิตทำได้ยาก
- การทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ทำได้ยาก

คอมโพสิตในงานวิจัยนี้จัดเป็นไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites; WPC) ซึ่งเอาทั้งไม้และพลาสติกมาผสมกัน จึงเป็นผลทำให้สมบัติเดิมของไม้และพลาสติกเปลี่ยนไป ทั้งนี้สัดส่วนของไม้และพลาสติกก็ยังคงมีผลกระทบต่อ WPC ด้วยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่แล้วถ้าปริมาณของวัถุดิบตัวใดตัวหนึ่งมาก คุณสมบัติโดยรวมของ WPC ก็จะมีแนวโน้มเอียงไปทางวัสดุที่มีปริมาณมากกว่า

2.1.3 เปรียบเทียบ WPC กับไม้จริง

ข้อดี

- ทนทานต่อความชื้นได้ดีกว่า เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว ไม้จะชอบน้ำและดูดน้ำ ทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมา แต่เนื่องจาก WPC มีส่วนผสมของพลาติกอยู่ด้วย จึงทำให้ปริมาณการดูดซึมน้ำลดลงไปได้มาก
- ต้านทานต่อเชื้อราและแมลงที่เป็นศัตรูของไม้ต่างๆได้ดีกว่าไม้ เพราะส่วนผสมของพลาสติกนี่เองที่ทำให้แมลงและเชื้อราไม่สามารถจะเข้าไปถึงตัวเนื้อไม้ได้
- ทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้นานกว่า เพราะว่าส่วนผสมของพลาสติกทำให้เกิดการเน่าเปื่อยผุพังช้ากว่าไม้ตามธรรมชาติ
- สามารถผลิตให้มีรูปร่างต่างๆ ได้โดยไม่ทำให้เกิดเศษเหลือใช้ เพราะการผลิต WPC เป็นการขึ้นรูปชิ้นงาน
- สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่สมบัติต่างๆจะด้อยลง

ข้อด้อย

- สมบัติเชิงกลจะด้อยกว่าไม้เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ที่มีขนาดเท่ากัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการคือ พลาสติกมีสมบัติด้อยกว่าไม้ และไม้ที่นำมาผสมกับพลาสติกก็มีขนาดเล็ก ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงไปด้วย
- มีความหนาแน่นมากกว่าไม้จริง น้ำหนักจึงมากกว่า ดังนั้นจึงต้องอาศัยการออกแบบรูปทรงที่จะทำให้มีน้ำหนักเบาขึ้นเข้ามาลดข้อด้อยนี้

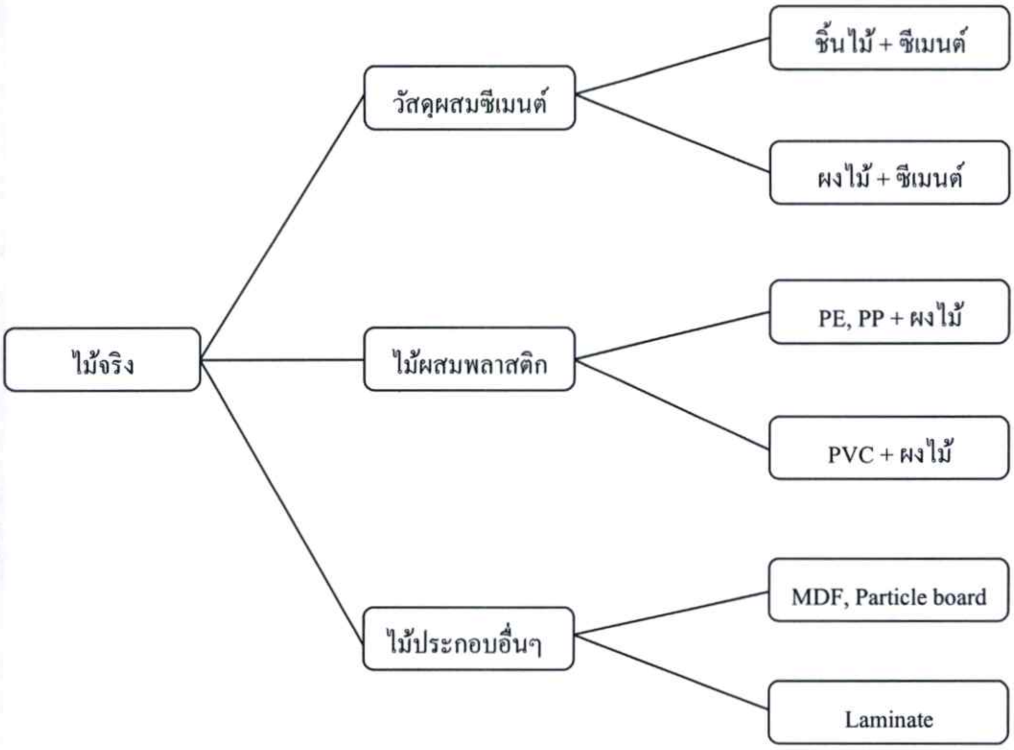
2.1.4 เปรียบเทียบ WPC กับพลาสติก

ข้อดี

- สามารถรับแรงได้มากขึ้น มีการหดตัวและขยายตัวน้อยกว่า
- ในปริมาตรเท่ากัน WPC จะมีน้ำหนักเบากว่าพลาสติก (แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตด้วย) ทำให้การนำมาใช้งานสะดวกมากขึ้น

ข้อด้อย

- เกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความชื้นมากกว่าพลาสติก จึงอาจไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องโดนความชื้นตลอดเวลา
- ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซับซ้อนกว่า เนื่องจากผลกระทบจากการผสมไม้ลงไปในปริมาณมาก ทำให้มีปัญหาอื่นๆตามมา
- อายุการใช้งานสั้นกว่าพลาสติก เพราะมีไม้ผสมอยู่ แต่ถือเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เพราะย่อยสลายได้เร็วกว่าพลาสติก



รูปที่ 2.3 วัสดุทดแทนไม้ในปัจจุบัน [5]

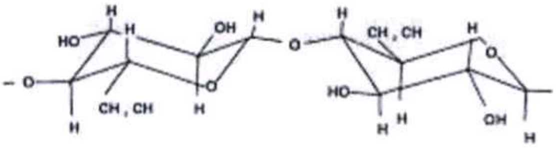
2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) [6]

เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้ เส้นใยธรรมชาติจึงสามารถใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรง ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้

โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ องค์ประกอบที่เหลือเป็นเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

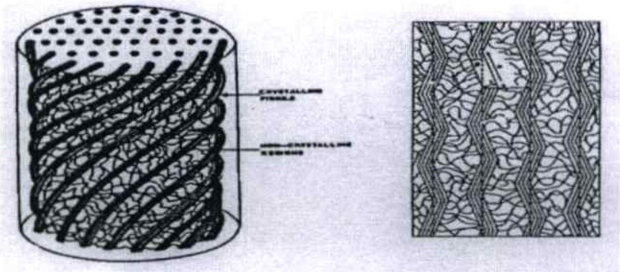
2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose) [7-9]

เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccarides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆกัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีหน่วยโมเลกุลยาวและแข็ง โดยเซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.4



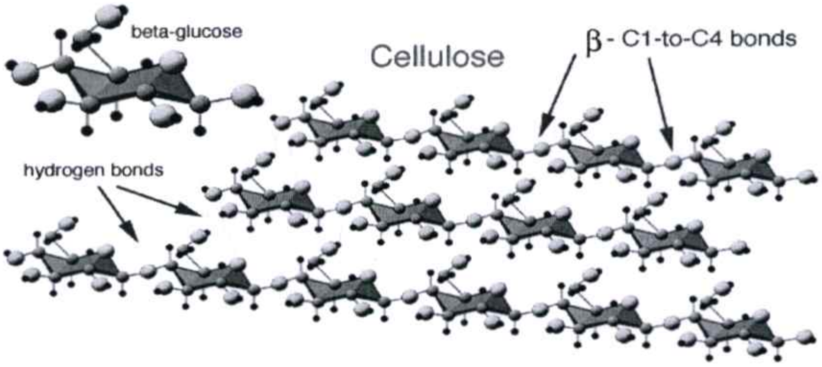
รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส [7]

ในแต่ละหน่วยซ้ำ (Repeating unit) เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล ถึง 3 หมู่ จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิหลอมตัวสูงจึงเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายต่ำแต่สามารถละลายได้ในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟุริก เป็นต้น เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด การจัดเรียงตัวของผลึกและอสัณฐานในโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส [7]

การจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลสจะอยู่เป็นโครงรูปแบบเก้าอี้ โมเลกุลของกลูโคสทุกหน่วยจะจัดเรียงตัวซ้ำๆ กัน ในทิศทางที่กลับกัน 180 องศา ดังรูปที่ 2.6 และพบว่าโมเลกุลของกลูโคสในแป้งจะเชื่อมต่อกันโดย Alpha linkages แต่โมเลกุลของกลูโคสในเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วย Beta linkages



รูปที่ 2.6 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส [7]

- **สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส**

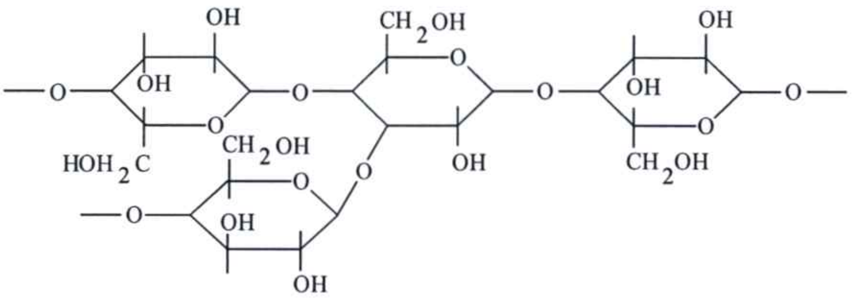
ความหนาแน่นของเซลลูโลสประมาณ 1.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งจะแปรไปตามแหล่งที่มาและการปรับปรุงทางเคมี เซลลูโลสเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีการดูดและคายไอน้ำและของเหลวอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ จนกระทั่งถึงสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 40% และกรดฟอสฟุริกเข้มข้น78% เซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำๆ สารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์เข้มข้น 72% จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ละลายได้

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามเฮมิเซลลูโลสยังมีข้อแตกต่างจากเซลลูโลส 3 ประการด้วยกัน คือ

- เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) แมนโนส (Mannose) ไซโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) และกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่
- สายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสายโซ่กิ่ง (Branch chain) ในขณะที่สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง (Linear chain)

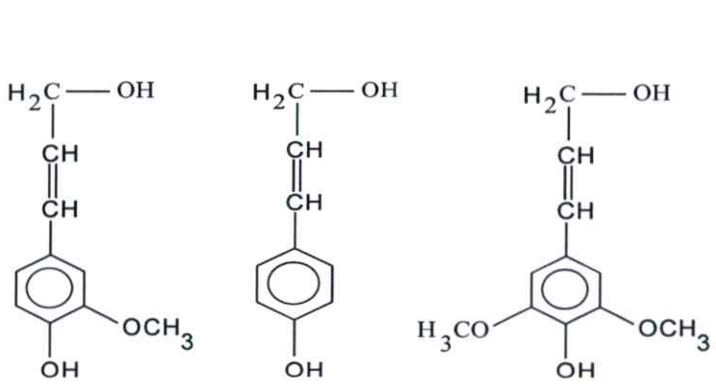
- องศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ของเซลลูโลสจะมีค่าสูงกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10-100 เท่าเฮมิเซลลูโลสมีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$ โดย n คือ จำนวนหน่วยซ้ำของเฮมิเซลลูโลส



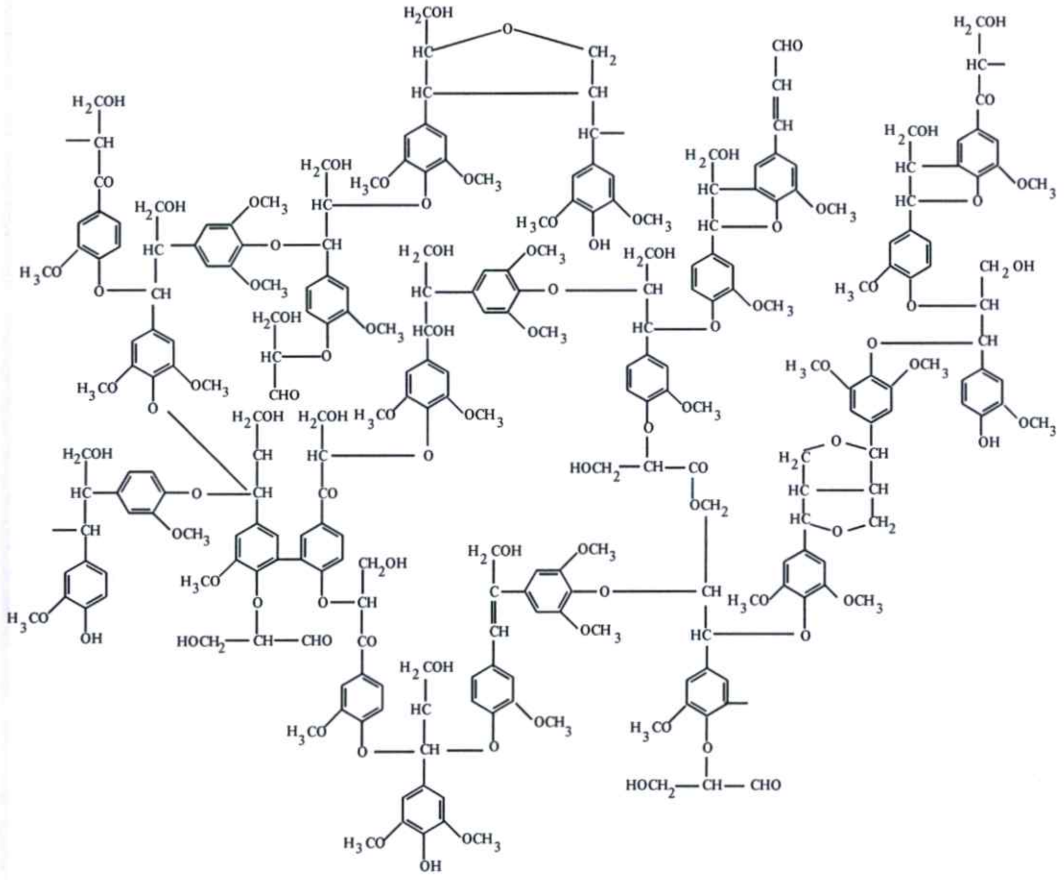
รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [8]

2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มักพบอยู่รวมกับเซลลูโลส โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารอะลิฟาติก (Aliphatic) และ อะโรมาติก (Aromatic) อยู่รวมกัน สารอะโรมาติกในโครงสร้างของลิกนินจะทำให้ลิกนินมีเสถียรภาพสูง ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ยึดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้พืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากมีความแข็งแรง ทนทานต่อดินฟ้าอากาศสูงมากด้วย เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือ ลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างหน่วยที่ซ้ำกันในโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.8

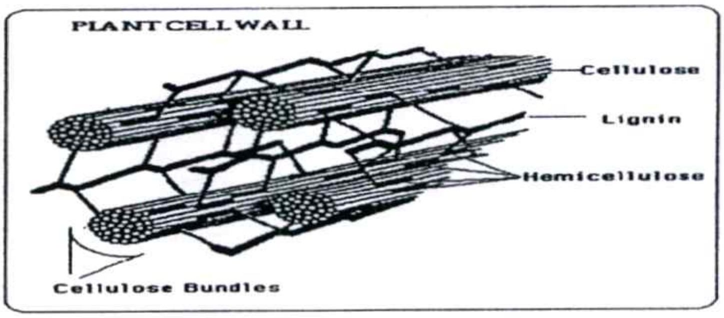


รูปที่ 2.8 หน่วยที่ซ้ำกันในโครงสร้างของลิกนิน [9]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโมเลกุลของลิกนิน [7]

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งสูง และในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน โดยการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ [8]

2.3 ไม้และเส้นใยไม้ (Wood and Fibers) [10]

ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำอาหาร ให้ความร้อน และผลิตไอน้ำ ซึ่งอาจใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ด้วย นอกจากนี้ยังนำไม้มาใช้เป็นเฟอร์นิเจอร์ เครื่องประดับตกแต่งได้อีกมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ก่อให้เกิดเศษไม้ (Wood flake) หรือ ขี้เลื่อย (Sawdust) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเส้นใยไม้ (Wood fibers)

- **ชนิดของไม้**

โดยทั่วไปไม้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) และไม้เนื้อ-อ่อน (Softwood) แต่สำหรับงานก่อสร้างแล้ว ไม้จะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งกำหนดตามมาตรฐานกรมป่าไม้ คือ [9]

1. ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) ต่ำกว่า 600 กก./ ซม^2 และมีค่าความทนทานตามธรรมชาติต่ำกว่า 2 ปี
2. ไม้เนื้อแข็งปานกลาง (Medium hardwood)) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) ระหว่าง 600-1000 กก./ซม^2 และมีค่าความทนทานตามธรรมชาติระหว่าง 2-6 ปี
3. ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static bending) สูงกว่า 1000 กก./ ซม^2 และมีค่าความทนทานตามธรรมชาติสูงกว่า 6 ปี

2.4 มะพร้าว [11]

มะพร้าว (Coconut) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera Linn.* เป็นพืชตระกูลเดียวกับหมาก ลำต้นกลม ฐานลำต้นกว้าง มีข้อปล้องตามลำต้น ใบเป็นใบประกอบเรียงขนานกันอยู่บนก้านใหญ่ มะพร้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย สามารถปลูกได้ในทุกจังหวัดของประเทศไทย แต่จะปลูกกันมากทางภาคใต้ ภาคกลางตอนล่างและภาคตะวันออก โดยประเทศไทยผลิตมะพร้าวผลอยู่ในอันดับที่ 6 ของตลาดโลก ประมาณ 1.38-1.45 ล้านตันต่อปี

สัดส่วนการใช้ประโยชน์จากมะพร้าวในประเทศไทย แบ่งออกเป็นสัดส่วนการบริโภคโดยตรงประมาณร้อยละ 60 ของปริมาณผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 40 ของผลผลิตทั้งหมดใช้ในอุตสาหกรรมหรือส่งออก ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มอุตสาหกรรมมะพร้าวใหญ่ๆได้ 2 กลุ่ม คือ

1. ผลิตภัณฑ์แปรรูปเพื่อการบริโภค เช่น อุตสาหกรรมมะพร้าวแห้ง อุตสาหกรรมน้ำมันมะพร้าว อุตสาหกรรมกะทิเข้มข้น อุตสาหกรรมมะพร้าวขูดแห้ง และอุตสาหกรรมน้ำตาลมะพร้าว
2. ผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภค เช่น อุตสาหกรรมเส้นใยมะพร้าว อุตสาหกรรมแท่งเพาะชำ และอุตสาหกรรมเผาถ่านจากกะลามะพร้าว

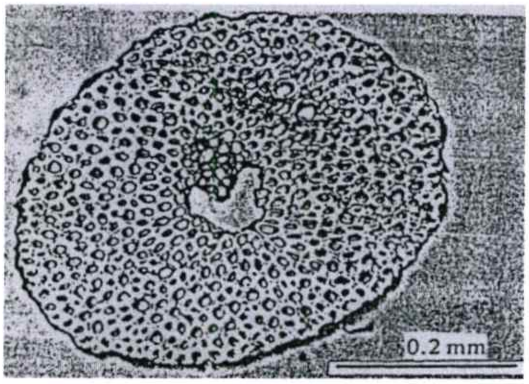
ผลผลิตจากมะพร้าวแต่ละปีสามารถสร้างมูลค่าไม่ต่ำกว่า 2,700 ล้านบาท ดังนั้นมะพร้าวจึงเป็นพืชที่มีความสำคัญ ควรแก่การส่งเสริมและพัฒนามะพร้าวให้มีศักยภาพในการผลิตและแปรรูปเพื่อการส่งออกต่อไป [12]

ปัจจุบันเส้นใยมะพร้าว (Coir fibers) ได้รับความสนใจในการนำมาทำวัสดุเสริมแรงโดยเฉพาะในคอมโพสิต ซึ่งเส้นใยมะพร้าวนี้ทำจากกาบมะพร้าว โดยทำการปลอกเปลือกชั้นนอกออก โดยเฉลี่ยแล้วมะพร้าวประมาณ 18 ลูก สามารถผลิตเส้นใยมะพร้าวแห้งได้ประมาณ 1 กิโลกรัม เส้นใยมะพร้าวที่ได้จากกาบมะพร้าวจะผ่านเครื่องตีแยกเส้นใย หรือขุยมะพร้าวออกแล้วตากแห้ง

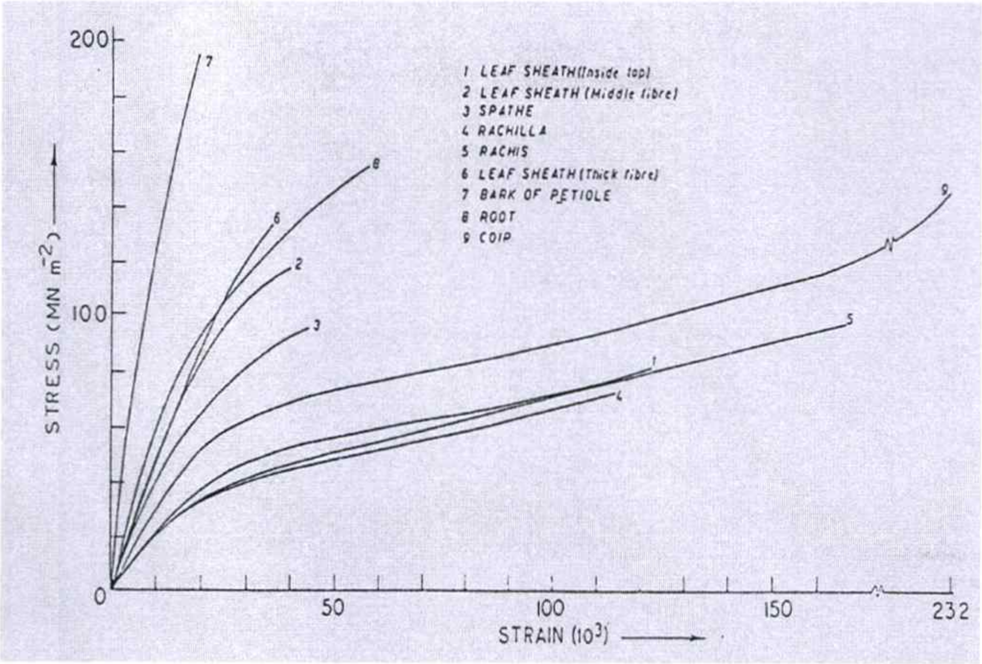
เส้นใยมะพร้าวสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตที่นอน เบาะรถยนต์ และเบาะนั่งโซฟา พรมเช็ดเท้า แผ่นฉนวนป้องกันเสียงและความร้อน เชือก ของใช้เบ็ดเตล็ดและเครื่องตกแต่งต่างๆ ทั้งนี้นอกจากมะพร้าวที่ให้ผลผลิตและบริโภคภายในประเทศแล้ว จากข้อมูลของกรมศุลกากรพบว่ามีปริมาณสินค้าส่งออกไปยังประเทศต่างๆ สร้างรายได้ให้ประเทศ รายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกเส้นใยมะพร้าวของประเทศไทย ปี 2544-2547 [13]

ปี	**ปริมาณ (กิโลกรัม)**	**มูลค่า (บาท)**
2544	3,388,612	12,534,822
2545	6,190,575	24,610,410
2546	12,948,379	54,302,533
2547	16,965,729	80,573,160



รูปที่ 2.11 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยมะพร้าว [14]



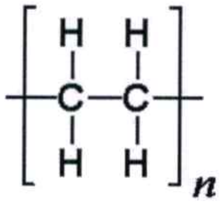
รูปที่ 2.12 สมบัติเชิงกลส่วนต่างๆ ของเส้นใยมะพร้าว [14]

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางชนิด [14]

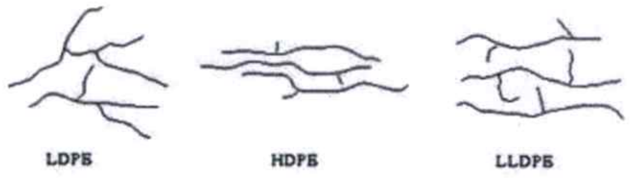
Fiber	**Fineness (Km/kg)**	**Tensile strength (MPa)**	**Elongation (%)**	**Modulus of elasticity (N/tex^d)**	**Modulus of rupture (mN/tex^d)**
Bast (soft) fibers					
Flax		24-70	2-3	18-20	8-9
Hemp	139	38-62	1-6	18-22	6-9
Jute	489	25-53	1.5	17-18	2.7-3
Kenaf	180	24	2.7		
Ramie		32-67	4.0	14-16	11
Urena	342	16	1.9		
Leaf (hard) fibers					
Abaca	32	32-69	2-4.5		6
Cantala	58	30			
Henequen	32	20-42	3.5-5		
Istle	34	22-27	4.8		
Phormium	38	26			
Sansevieria	118	43	4.0		7-8
Sisal	40	36-45	2-3	25-26	
Seed hair					
Kapok		16-30	1.2	13	10
Other					
Coir		18	16	4.3	16

2.5 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) [15]

LLDPE ผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบซิเกลอร์แนทฑา (Ziegler-Natta) หรือแบบฟิลลิปป์ (Phillips) โดยใช้ความดันต่ำ ผ่านกระบวนการ Gas phase process ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตของบริษัท BP Chemical ประเทศอังกฤษ โดยในกระบวนการผลิตมีการใส่ โคมอนอเมอร์จำพวก 1-alkene เช่น 1-butene (นิยมใช้มากกว่าและราคาถูก) 1-hexene 1-octene หรือ 4-methylpentene ลงไปประมาณร้อยละ 10 ทำให้มีสายโซ่คาร์บอนสั้นๆเกิดขึ้นที่พอลิเมอร์ หลัก ดังนั้นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจึงเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีจำนวนโซ่กิ่งน้อยกว่าและลักษณะของกิ่งจะสั้นกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ความสม่ำเสมอของโมเลกุลและความเป็นผลึกลดลง สมบัติโดยทั่วไปคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.915–0.925 g/cm^{3}แต่มีความแข็งแรงมากกว่าจึงนิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [15]



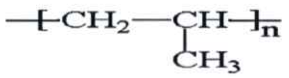
รูปที่ 2.14 แบบจำลองโครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ [15]

การผลิตเริ่มจากการผ่านกระบวนการควบคุมการผลิตที่มีประสิทธิภาพ และมีการเลือกใส่สามตัวเติมอย่างดี ทำให้เรซินที่ได้มีคุณภาพสูง มีสมบัติเชิงกลที่ดี เหมาะกับการผลิตฟิล์มคุณภาพสูงและผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมุนหล่อ นอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยสามารถใช้บรรจุผลิตภัณฑ์อาหารและยาได้

LLDPE จะมีคุณสมบัติจะอยู่ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene; LDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) แต่จะนิ่มและเหนียวมากกว่า LDPE และ HDPE ได้รับการแปรรูปเป็นฟิล์มถึง 65% เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการหีบห่อ เช่น ใช้ทำเป็นฟิล์มหดรัด (Shrink film) , ฟิล์ม , ฟิล์มยืดรัดรูป (Strech film), ถุงบรรจุเสื้อผ้า , ถุงบรรจุอาหารแช่แข็ง, ถุงบรรจุสิ่งของที่มีน้ำหนักสูง การแปรรูปนอกจากในรูปของฟิล์มแล้วก็ยังมีการนำ LLDPE มาทำท่อน้ำ, เคลือบสายไฟ และสายเคเบิ้ล และของเด็กเล่น ฯลฯ

2.6 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) [16]

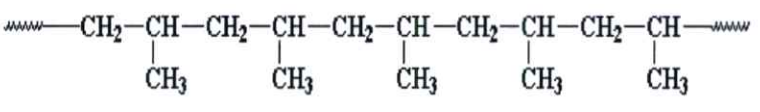
พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน จะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีนที่มีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีน แต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่า และแข็งแรงกว่า โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีนจะมีหมู่เมทิล (Methyl group) เกาะบนโซ่หลักของโมเลกุล (Main chain)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน

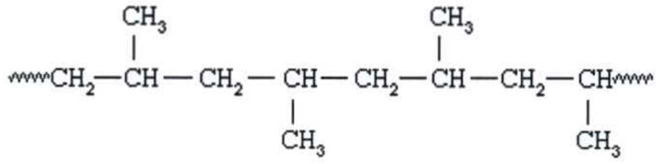
พอลิพรอพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ได้แก่

1. ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic polypropylene) มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูงส่งผลทำให้การเกิดผลึกเกิดได้ดีที่สุด



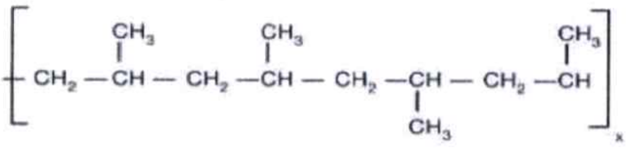
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน

2. ซินไดโอแทคติกพอลิพรอพิลีน (Syndiotactic polypropylene) มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิล (Methyl group) สลับกันบนโซ่โมเลกุลหลักอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลง มีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของซินไดโอแทคติกพอลิพรอพิลีน

3. อะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุด



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน

2.6.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน

1. ความหนาแน่นประมาณ 0.9 กรัม/ลบ.ซม และมีน้ำหนักเบา
2. จุดหลอมเหลวปานกลาง 130-170 ℃ มีความเป็นผลึกสูงทำให้สมบัติเชิงกลดี
3. ไม่ละลายในตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง แต่ละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส
4. มีความทนต่อกรด เบส และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี

พอลิพรอพิลีนที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมี 4 เกรด

1. โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer)

เกรดมาตรฐานทั่วไปมีองค์ประกอบง่ายๆคือ มอนอเมอร์ของพอลิพรอพิลีนมาต่อกันโดยหมู่เมทิลที่อยู่บนโครงสร้างหลักอยู่ข้างเดียวกันของระนาบ มักขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ใช้ทำฝาขวด เข็มฉีดยา อุปกรณ์ทางการแพทย์ ของเด็กเล่น บรรจุภัณฑ์ภายในบ้าน รถยนต์ขนาดเล็ก ฟิล์ม เส้นใย และตาข่าย ผลิตภัณฑ์จากพอลิพรอพิลีนเสื่อมสภาพได้เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์เป็นเวลานานจึงต้องเติมสารเติมแต่งเพื่อป้องกันการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ พอลิพรอพิลีนมีลักษณะขุ่น แต่สามารถปรับปรุงให้มีลักษณะใส และมีสมบัติดีขึ้นโดยเติมตัวเหนี่ยวนำให้เกิดผลึก ทำให้ปริมาณการตกผลึกดีขึ้นแต่ขนาดของสเฟียรูไลท์ลดลง

2. พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random copolymer)

พอลิเมอร์ชนิดนี้มีพอลิเอทิลีนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยเติมลงในสายโซ่ของพอลิพรอพิลีน การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มสามารถทำได้ง่ายคล้ายแบบโฮโมพอลิเมอร์

โดยนำมาผลิตเป็นฟิล์มบรรจุอาหาร และห่ออาหารได้ตามมาตรฐาน เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ ตัวเชื่อมความร้อน สามารถรับและดูดซับแรงได้ดีจึงใช้เป็นผลิตภัณฑ์กันชนรถยนต์

3. พอลิเมอร์ร่วมชนิดรับแรงกระแทก (High impact copolymer)

จะเติมมอนอเมอร์อื่นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมักจะเป็นเอทิลีน หรือยาง ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบในการสังเคราะห์ ต้องดูแลควบคุมสภาวะการทดลองให้เหมาะสมและคงที่ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ร่วมที่มีน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบตามต้องการ พอลิเมอร์ร่วมที่ได้จะมีความทนทานต่อแรงกระแทกดีแม้จะทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นกระเป๋าเดินทาง ที่นั่งในรถ อุปกรณ์หล่อเย็น และเครื่องใช้ภายในบ้าน

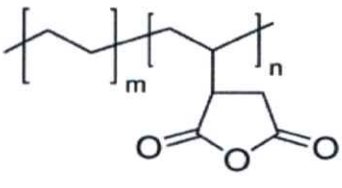
4. อะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene)

มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความสามารถในการยึดเกาะ ไม่นำไฟฟ้า นิยมใช้ทำเป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิ้ล

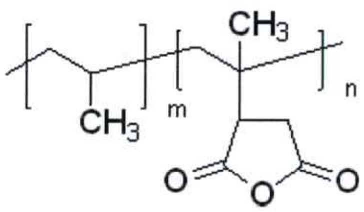
2.7 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted Polyethylene; MA-g-PE) และพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted Polypropylene ; MA-g-PP)

พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิพรอพิลีน (PP) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ส่งผลให้เมื่อทำการผสมรวมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติต้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดลงไป เพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ [16]

พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA-g-PE) และพอลิพรอพิลีต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA-g-PE) เป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีนโดยทำให้ความมีขั้ว (Hydrophilic) เพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮดรายด์เป็นส่วนที่เพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่น รวมทั้งสารตัวเติม (Fillers) ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ [18]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ [18]

2.8 เม็ดแก้ว (Glass Beads) [19]

เม็ดแก้วถูกใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดของแข็งและกลวง มีความหนาแน่นหลากหลาย ตั้งแต่ 0.1-2.5 g/cm^3 มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างปานกลางจึงสามารถใช้เป็นสารตัวเติมที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ ช่วยเพิ่มความสามารถในกระบวนการผลิต และเพิ่มเสถียรภาพของรูปร่าง นอกจากนี้ยังช่วยลดความหนาแน่นของคอมโพสิต

<u>กระบวนการผลิตและสมบัติ</u>

เม็ดแก้วผลิตมาจากการเผาแก้วหลังจากนั้นทำการหล่อเย็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ หรือได้มาจากการหลอมแก้วแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เพื่อทำให้เกิดการแตกออกเป็นหยดเล็กๆ เม็ดแก้วส่วนใหญ่ที่ผลิตได้มาจากแก้วประเภทเอ (A-Glass) แม้ว่าแก้วประเภทอี (E-Glass) จะหาได้ง่ายกว่าก็ตาม แต่การนำมาใช้งานกับพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะนิยมแก้วประเภทเอมากกว่า ยกเว้นพอลิเมอร์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับโลหะอัลคาไลน์จะต้องใช้แก้วประเภทอี เช่น พอลิคาร์บอเนต อะซิทัล และพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน การนำมาใช้งานโดยทั่วไปจะเลือกใช้ขนาดอนุภาค 35-200 μm และที่สำคัญจะต้องมีการเคลือบเม็ดแก้วด้วยสารคู่ควบที่เหมาะสม หรือเคลือบด้วยโลหะ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

เม็ดแก้วกลวงผลิตมาจากการใช้ความร้อนในการบดแก้ว โดยมีการใส่สารให้ฟองเข้าไปด้วย ในระหว่างกระบวนการผลิตแก้วจะอยู่ในสถานะของเหลวที่มีแรงตึงผิวสูง ทำให้เกิดเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างกลม ก๊าซในกระบวนผลิตเกิดจากการขยายตัวของสารให้ฟองทำให้เกิดเป็นเม็ดแก้วกลวง ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20-200 μm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีที่เลือกใช้ในการผลิตและการเคลือบด้วยสารคู่ควบชนิดต่างๆ

ความแข็งแรงต่อการบดของเม็ดแก้วกลวงขึ้นอยู่กับความหนาของผนังเซลล์และความหนาแน่น โดยเม็ดแก้วที่มีความหนาแน่นสูงก็จะทนต่อการบดได้ดี ค่าความหนาแน่นของเม็ดแก้วที่เหมาะสมจะนำมาใช้กับพอลิเมอร์มีค่าอยู่ในช่วง 0.15-0.8 g/cm^3 โดยที่ค่าความหนาแน่นดังกล่าวจะมีค่าความแข็งแรงต่อการบด 1->150 MPa เม็ดแก้วที่มีค่าความหนาแน่นต่ำจะทนแรงเฉือนได้น้อย

และแตกได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นในการผลิตจึงต้องใช้ความดันต่ำ หรือใช้กระบวนการผลิตที่เป็นของเหลว เช่น ใช้กระบวนการหล่อแบบ หรือการเสริมแรงในเทอร์โมเซตแบบแม่พิมพ์เปิด จึงมีการพัฒนาเม็ดแก้วกลวงให้ค่าความแข็งแรงสูงเพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้กับกระบวนการผลิตที่ใช้แรงเฉือนสูง หรือประยุกต์ใช้กับพลาสติกเทอร์โมเซตแบบแม่พิมพ์ปิดได้ และในที่สุดก็สามารถนำมาใช้กับกระบวนการอัดรีด และกระบวนการฉีดขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกได้ เม็ดแก้วกลวงที่มีความหนาแน่น 0.6 g/cm^3 มีค่าความแข็งแรงต่อการบดเพียงพอต่อการใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ค่าสมบัติเชิงกลบางประการของเม็ดแก้ว และเม็ดแก้วกลวง แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของเม็ดแก้วและเม็ดแก้วกลวง [19]

สมบัติ	เม็ดแก้ว	เม็ดแก้วกลวง
อุณหภูมิอ่อนตัว (°C)	700	700
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.3-2.5	0.1-1.1
ความแข็งกด (Mohr)	5.5-6	5
มอดุลัส (GPa)	60-70	200
การนำความร้อน ($W\ m^{-1}K^{-1}$)	0.7	0.0084
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (K^{-1})	$8.6x10^{-6}$	$8.8x10^{-6}$
ค่าคงที่การนำไฟฟ้า (10^4 Hz)	5	1.5

รูปที่ 2.21 ขนาดและลักษณะของเม็ดแก้วกลวง ที่มีขนาดอนุภาค 100 µm [19]

หน้าที่และสมบัติของสารตัวเติมเม็ดแก้ว แสดงได้ดังต่อไปนี้

- บางส่วนมีการอัดหรือจับตัวกันสูง ส่งผลต่อความหนืดเล็กน้อย สามารถใส่เป็นสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก (มากถึง 50 % โดยปริมาตร)
- มีสมบัติการไหลดีกว่าสารตัวเติมที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวสูง
- มีการกระจายตัวของความเครียดรอบทรงกลมเท่ากัน และมีเสถียรภาพทางรูปร่างที่ดี
- มีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง
- ช่วยลดการหดตัวและการโค้งงอของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

ผลของสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค ปริมาณที่เติม และการเคลือบผิว เนื่องจากเป็นของแข็งทรงกลม จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น มอดุลัส ความแข็งแรงกดอัด และความแข็งแรงดึง ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะตรงข้ามกับสมบัติความเหนียว โดยสังเกตได้จากค่าการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทก โดยสารตัวเติมนี้สามารถใช้ได้กับ พอลิสไตรีน ไนลอน สไตรีนอะคริโลไนไตรล์ พอลิคาร์บอเนต พอลิไวนิลคลอไรด์ โดยใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ โดยผลิตภัณฑ์สามารถต้านทานต่อการขีดข่วนและรอยถลอกได้ การประยุกต์ใช้งานกับเทอร์โมเซต สามารถใช้ได้กับพวกอีพอกไซด์ พอลิเอสเทอร์ พอลิยูริเทน และซิลิโคน

ในระหว่างกระบวนการผลิตอาจส่งผลต่อรูปร่างของสารตัวเติมทรงกลมที่ใส่ลงไปได้ ซึ่งเป็นหน้าที่หลักในการลดความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับปริมาณที่ใส่และความหนาของผนังเซลล์ ค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้นแต่ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกระแทก จะลดลง ลดค่าคงที่การนำไฟฟ้าทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเป็นฉนวนไฟฟ้ามากขึ้น และความกลวงของเม็ดทรงกลมทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นฉนวนความร้อนที่ดีด้วย

2.9 การตกผลึกในพอลิเมอร์

การตกผลึก (Crystallization) ในพอลิเมอร์เป็นกระบวนการจัดเรียงตัวของโครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered phase) โดยปกติจะอยู่ในรูปภาวะที่หลอมเหลว หรือสารละลายเจือจางให้เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Ordered structure) ขั้นตอนการตกผลึกในพอลิเมอร์โดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่

1. การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ขั้นตอนนี้เกิดเนื่องจากการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ซึ่งจะเกิดแนวโน้มที่ทำให้โมเลกุลที่พันกันอย่างอิสระในพอลิเมอร์หลอมเหลว เริ่มจัดตัวเป็นบริเวณที่มีความเป็นระเบียบเล็กๆขึ้น ซึ่งเรียกว่า นิวคลีไอ (Nuclei) สำหรับการเกิดนิวเคลียสสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

1.1 การเกิดนิวเคลียสจากโซ่โมเลกุลของตัวเอง (Homogeneous nucleation) เกิดจากการที่โซ่โมเลกุลมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา จนกระทั่งโซ่โมเลกุลเข้ามาใกล้กันระยะหนึ่งจะเกิดแรงดึงดูดกัน เกิดเป็นนิวเคลียสพร้อมกับคายพลังงานออกมา

1.2 การเกิดนิวเคลียสโดยอาศัยสารภายนอก (Heterogeneous nucleation) พบมากในพอลิเมอร์ทั่วไป ขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสจะใช้สารแปลกปลอม เช่น สารก่อนิว-เคลียส (Nucleating agent) สารปนเปื้อน (Impurity) เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้โซ่พอลิเมอร์มายึดเกาะ การเกิดนิวเคลียสแบบนี้เกิดได้ง่ายกว่า เนื่องจากการใช้ซุปเปอร์คูลลิ่ง (Supercooling) ที่ลดน้อยลง ซึ่งซุปเปอร์คูลลิ่ง หมายถึง ช่วงการให้ความเย็นของพอลิเมอร์หลอมเหลวให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว โดยปราศจากการเกิดผลึกและในบางครั้งจะเรียกว่าอันเดอร์คูลลิ่ง (Undercooling) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างจุดหลอมเหลวกับอุณหภูมิในการตกผลึก

2. การเติบโต (Growth) ขั้นนี้นิวคลีไอจะมีการขยายตัวเนื่องจากการรวมตัวของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งการขยายตัวจะทำใน 1,2,3 มิติก็ได้ ผลึกสามารถเกิดรูป Rods, Disc หรือ Sphere การขยายตัวเนื่องจากการรวมตัวของโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่มาจัดเรียงตัวในผลึก ซึ่งเรียกว่าลาเมลลาร์ (Lamellar) จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงรัศมีของสเฟียรูไลท์ (Spherulite) สัมพันธ์กับเวลาในเชิงเส้นตรง ดังสมการ

$$R = Vt$$

เมื่อ R = รัศมีของสเฟียรูไลท์

V = อัตราการเติบโต (Growth step)

t = เวลา

สำหรับอัตราการเติบโตขึ้นกับอุณหภูมิในการตกผลึก พบว่าอัตราการเติบโตจะมีค่าต่ำเมื่ออุณหภูมิการตกผลึกใกล้เคียงกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์นั้น เมื่อซุปเปอร์คูลลิ่งสูงขึ้นอัตราการเติบโตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุด จากนั้นก็ลดลงมาอีกครั้งทั้งๆ ที่อุณหภูมิการตกผลึกห่างจากอุณหภูมิการหลอมเหลวมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่มารวมตัวทำให้เกิดการขยายตัวของผลึกลดน้อยลง จึงส่งผลให้อัตราการเติบโตลดลง

การตรวจสอบสเฟียรูไลท์ของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ X-ray diffraction พบว่าในผลึกนั้นประกอบด้วย 2 หน่วยเซลล์ (Unit cells) ได้แก่ หน่วยเซลล์แบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal unit cell) และหน่วยเซลล์แบบโมโนคลีนิก (Monoclinic unit cell) ซึ่งสเฟียรูไลท์ที่สว่างจะเป็นหน่วยเซลล์แบบเฮกซะโกนอล ส่วนสเฟียรูไลท์ที่มืดมักจะเป็นหน่วยเซลล์แบบโมโนคลีนิก [4]

<u>ประเภทและลักษณะสารก่อนิวเคลียส</u>

สารก่อนิวเคลียสเป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่เติมลงไปเพื่อทำให้เกิดนิวเคลียสในการตกผลึกแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สารประเภทนี้เพิ่มอัตราการตกผลึกให้สูงขึ้น ส่งผลให้สเฟียรูไลท์มีขนาดเล็กลงแต่มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพอลิเมอร์จะเกิดการตกผลึกจากสภาวะการหลอมโดยมีหลักเกณฑ์ดังนี้ [4]

1. ต้องมีโครงสร้างโมเลกุลเอื้ออำนวยในการก่อให้เกิดบริเวณผลึก ถ้าโซ่โมเลกุลหลักมีการเคลื่อนที่ไม่เพียงพอ มีหมู่ข้างเคียงขนาดใหญ่ หรือมีกิ่งก้านสาขามาก จะเป็นการขัดขวางการตกผลึก
2. อุณหภูมิการตกผลึกต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลว แต่ต้องไม่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เพราะช่วงนี้โซ่โมเลกุลมีการเคลื่อนที่เพียงพอสำหรับการก่อให้เกิดผลึก
3. การตกผลึกจะต้องเริ่มจากการเกิดนิวเคลียส เพื่อทำให้เกิดบริเวณที่เป็นระเบียบ แล้วจึงขยายตัวให้เป็นสเฟียรูไลท์

สารก่อนิวเคลียสโดยทั่วไปจะต้องมีสมบัติต่างๆ ดังนี้

- ถูกดูดซับเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ได้
- ไม่ละลายโมโนพอลิเมอร์
- มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสม
- มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์หลอมเหลว

อย่างไรก็ตามสารก่อนิวเคลียสที่มีประโยชน์ต่อพอลิเมอร์ประเภทพอลิโอเลฟินส์ คือสารประเภท Organocarboxylic acid salt หรือสารที่มีโครงสร้างที่เรียกว่า Alternative layer ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

- กลุ่มสารมีขั้ว ทำหน้าที่เพิ่มแรงดึงดูด ทำให้สารก่อนิวเคลียสไม่ละลายในพอลิเมอร์หลอมเหลว
- กลุ่มไม่มีขั้ว ทำหน้าที่เป็นส่วนที่ละลายในพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยส่วนใหญ่สารกลุ่มนี้มักเป็นสารอินทรีย์

สารก่อนิวเคลียสแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. สารเติมแต่งอนินทรีย์ เช่น ดินสอพอง ซิลิกา เป็นต้น
2. สารประกอบอินทรีย์ เช่น เกลือของโมโน หรือพอลิของกรดคาร์บอกซิลิก (Mono, Poly carboxylic acid) รวมถึงสี (Pigment) ด้วย
3. สารพอลิเมอร์ เช่น เอทิลีน/อะคริลิก เอสเทอร์โคพอลิเมอร์ เป็นต้น

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธีรพัฒน์ อุณหโชค และพจนีย์ ศรธรรมลี [24] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเส้นใยผักตบชวา (Hyacinth fibers) ที่เตรียมจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณเส้นใยต่อพอลิเมอร์ ผลของสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA-g-PE) ต่อปริมาณเส้นใย และขนาดของเส้นใยผักตบชวา โดยผสมสูตรด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งกด เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และปริมาณความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยผักตบชวาเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง จากการศึกษาผลของสารช่วยผสม พบว่าคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อใส่สารช่วยผสม MA-g-PE เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อใส่สารช่วยผสม MA-g-PE ปริมาณสารช่วยผสม MA-g-PE ที่เหมาะสม คือ 3% โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักเส้นใย และขนาดของเส้นใยผักตบชวาที่เหมาะสม คือ 50-80 mesh ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด จาก SEM พบว่าสารช่วยผสม MA-g-PE ช่วยให้การยึดเกาะระหว่างพอลิเอทิลีนเมตริกซ์กับเส้นใยดีขึ้น

กนิษฐา อังกุรรัชต์ [25] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรง และใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ชนิด A-172 (Vinyl-tris-(2-methoxyethoxy) silane) และพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA-g-PP) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้และการยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์กับส่วนเสริมแรง พบว่าสารคู่ควบทั้ง 2 ชนิด ช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น และการใช้สารคู่ควบไซเลนให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ MA-g-PP สำหรับการใช้สารคู่ควบทั้ง 2 ชนิดร่วมกันช่วยปรับปรุงสมบัติด้านโค้งงอดีกว่าการใช้สารคู่ควบชนิดเดียว นอกจากนี้การใช้สารคู่ควบที่อัตราส่วน MA-g-PP : Silane เท่ากับ 1:1 เหมาะสมที่สุด ส่วนสัณฐานวิทยาของวัสดุที่ได้จากการใช้ SEM แสดงให้เห็นว่าการใช้สารคู่ควบสามารถปรับปรุงการยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคทั้งสองได้

ธารทิพย์ เขมะศิริ และคณะ [26] ได้ศึกษาพลาสติกคอมโพสิตจากเส้นใยหญ้าแฝกกับพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ทั้งชนิดใหม่และชนิดรีไซเคิล โดยใช้สารช่วยผสมพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA-g-PP) และพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA-g-PE) ที่ 3% โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของเส้นใย จากการทดลองพบว่า วัสดุ คอมโพสิตที่เตรียมได้จากเส้นใยที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเชิงกล (Thermo-mechanical pulp; TMP) มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่เตรียมจากเส้นใยเชิงกล (Mechanical pulp; MP) ส่วนสมบัติอื่นๆมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากเกินไปจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง การยึดติดของเส้นใยกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ดี ปริมาณการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดใหม่และชนิดรีไซเคิลจะให้สมบัติโดยรวมใกล้เคียงกัน

Premalal และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน (PP) กับผงแกลบ และคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนกับทัลคัม โดยใช้เครื่อง Brabender Plasticoder ที่มี Mixer ต่ออยู่ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 180 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 50 rpm ซึ่งทำการผสมสารตัวเติม 0 15 30 45 และ 60% โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic press) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และทำให้เย็นภายใต้ความดันเป็นเวลา 4 นาที จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองเพิ่มขึ้นในแต่ละคอมโพสิตทำให้มอดุลัส และความแข็งแรงโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง คอมโพสิตที่ใช้แกลบเป็นสารตัวเติมมีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และค่าความแข็งแรงโค้งงอต่ำกว่าคอมโพสิตที่ใช้ทัลคัมเป็นสารตัวเติม แต่คอมโพสิตที่ใช้แกลบเป็นสารตัวเติมมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงกว่า

Raj และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาคอมโพสิตจากชานอ้อย โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE), พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ซึ่งทำการผสมกับชานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ กัน ตั้งแต่ 0-20% โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที พบว่าที่ปริมาณชานอ้อย 15% โดยน้ำหนักจะให้ความแข็งแรงดึงดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด พบว่า LLDPE ให้ค่าความแข็งแรงดึงดีที่สุด เนื่องจาก LLDPE สามารถไหลได้ดีที่อุณหภูมิสูง จึงเปียกบนผิวเส้นใยได้ดี ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย ส่งผลให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่ดีด้วย

Fernanda และคณะ [29] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ที่ได้จากเยื่อไม้ของต้นสน (Aspen) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยไม้สนกับเมตริกซ์ที่เป็นพอลิพรอพิลีนด้วย MA-g-PP นอกจากนี้ยังศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมพลาสติก คอมโพสิต โดยทำการผสม PP กับเส้นใยสนที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 15 นาที ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน โดยใช้ชนิดของสารคู่ควบไซเลน ปริมาณ และกระบวนการเคลือบบนพื้นผิวเมตริกซ์ของ PP และใช้ปริมาณของ MA-g-PP ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาในการผสมที่เหมาะสม คือ 180 องศาเซลเซียสและ 10 นาที ตามลำดับ ในขณะที่การปรับปรุงสภาพพื้นผิวเส้นใยไม้ด้วยสาร คู่ควบไซเลนชนิด A-172 ในปริมาณ 4% โดยน้ำหนัก ที่เคลือบด้วย MA-g-PP 2% โดยน้ำหนัก และปริมาณเส้นใยไม้ที่ 10% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และค่าความทนทานต่อการโค้งงอสูงที่สุด

Rajeev และคณะ [30] ได้ศึกษาคอมโพสิตระหว่างไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (iPP) และเส้นใยปอกระเจา (Kenaf fiber) โดยใช้ MA-g-PP เป็นสารช่วยผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน นอกจากนี้ยังศึกษาคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลาย Amino-ethyl-amino-propyltrimethoxysilane ในน้ำ และทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ จากผลงานวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ M-g-APP 2-5% ทำให้ค่าสมบัติด้านแรงดึงแล้วสมบัติด้านโค้งงอเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงกระแทกและความเหนียวลดลง นอกจากนี้สมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากันเปรียบเทียบกับการใช้ MA-g-PP นั้น พบว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนให้สมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าการใช้ MA-g-PP

Chuai และคณะ [31] ได้ศึกษาการนำเส้นใยสนเป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน (PP) เพื่อเป็นวัสดุคอมโพสิต พบว่าการยึดติดกันหรือความเข้ากันได้ของพอลิพรอพิลีนและเส้นใยสนสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยใช้ MA-g-PP หรือทำการปรับปรุงบนพื้นผิวของเส้นใยก่อนทำการผสม ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นได้จาก SEM และเครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC) ส่วนค่าความทนทานต่อแรงกระแทกจะลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเสียสภาพของวัสดุคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยสน

Simpson และ Selke [32] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากขวดพอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้นที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled polypropylene; rPP) กับเส้นใยไม้ (Wood fiber) และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนใหม่ (Virgin polypropylene) กับ

เส้นใยไม้ โดยใช้ปริมาณเส้นใยไม้ 0 30 40 และ 50% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า คอมโพสิตที่เตรียมจากขวดพอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้นที่นำกลับมาใช้ใหม่กับเส้นใยไม้มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนใหม่กับเส้นใยไม้ แต่การเติมเส้นใยมากกว่า 30% โดยน้ำหนักทำให้ความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากสารเติมแต่งที่มีอยู่ในขวด พอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค

Balasuriya และคณะ [33] ได้ศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของคอมโพสิตระหว่าง HDPE และเศษไม้ (Wood flakes) ด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (MA) ผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และไซเลน (N-(4-vinylbenzyl)-N'-(3-trimethoxysilypropyl-ethyl)enediamine; CVBS) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC และ FTIR สามารถพบโครงสร้างที่เกิดจาก HDPE และสารคู่ควบไซเลนต่อกิ่งกับเส้นใยไม้ เกิดเป็นโครงสร้างของพอลิไซลอกเซน ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยไม้และ PE จากผลของสมบัติเชิงกลแสดงว่าคอมโพสิตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและ MA นั้นสามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึง ความเหนียว และความแข็งแรงกระแทก โดยพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย MA 1-2% โดยน้ำหนักขี้เลื่อย และสารคู่ควบไซเลน 1-3% โดยน้ำหนักขี้เลื่อย ให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด

Abu-Sharkh และ Hamid [34] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและความคงทนต่อสภาพอากาศของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปาล์มกับ PP โดยใช้มาเลอิกแอนไฮดรายด์เป็นสารช่วยผสม และใช้ Tinuvi® เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก การผสมทำโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยผสมเป็น 3 สูตร คือ สูตรที่ 1 ใช้ PP กับ Tinuvin® สูตรที่ 2 มีการเติมเส้นใยปาล์ม 29% โดยน้ำหนักเพิ่มเข้าไป และสูตรที่ 3 มีการเติมสารช่วยผสม 6% โดยน้ำหนักเพิ่มเข้าไปจากสูตรที่ 2 และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและความคงทนต่อสภาพอากาศ พบว่าสูตรที่ 2 ที่มีการเติมเส้นใยมีความคงทนต่อสภาพอากาศมากกว่าสูตรที่ 1 ที่ไม่มีการเติมเส้นใยและมากกว่าสูตรที่ 3 ที่มีการเติมสารช่วยผสม แต่ในสูตรที่ 3 ที่มีการเติมสารช่วยผสมให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเนื่องจากเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับ PP ได้ดีกว่า

Joseph และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางด้านความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึง ได้แก่ กระบวนการผสมเส้นใยกับพอลิเมอร์ ความยาวของเส้นใย ปริมาณเส้นใย และลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในพอลิเมอร์ โดยการผสมแบบสารละลาย (Solution mixing) เกิดความเสียหายของเส้นใยน้อยกว่าการผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ความแข็งแรงดึงของ

คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เมื่อนำคอมโพสิตมาฉีดขึ้นรูปใหม่ ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่ฉีด เนื่องจากผลของความร้อนระหว่างกระบวนการขึ้นรูปทำให้เกิดการสลายตัวที่พื้นผิวของเส้นใย จึงทำให้พอลิเอทิลีนเมตริกซ์ยึดติดกับเส้นใยดีขึ้น คอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยตามแนวแรงมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวทิศทางตั้งฉากกันแนวแรง เส้นใยที่มีความยาว 6 mm ทำให้คอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด

Li และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาความทนทานต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตระหว่าง PP ที่นำกลับมาใช้ใหม่และขี้เลื่อยจากต้นสน พบว่าความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด (Notched izod strength) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ MA-g-PP และปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต นอกจากนี้ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณ MA-g-PP ที่เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อทำการศึกษาลักษณะการแตกตัวเชิงกล (Linear fracture mechanics; LEFM) โดยการทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปี้ พบว่าพลังงานแตกร้าว (Fracture energy; G_c) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณ MA-g-PP และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อไม่ได้เติม MA-g-PP ส่วนความเหนียวขณะแตกร้าว (Fracture toughness; K_c) ของคอมโพสิตที่ไม่ได้เติม MA-g-PP เพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย MA-g-PP แต่ความเหนียวขณะแตกร้าวของคอมโพสิตที่ไม่ได้เติม MA-g-PP มีค่าต่ำกว่าคอมโพสิตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย MA-g-PP ที่ปริมาณเส้นใย 30% และ 40%

Avérous และคณะ [37] ได้ศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ลิกโนเซลลูโลซิกเป็นสารตัวเติม (Lignocellulosic fillers) โดยเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนและพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพที่ผลิตได้ วัสดุเหล่านี้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เมตริกซ์ คือ ส่วนที่เป็นอะโรมาติกโคพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีสมบัติเฉพาะที่สามารถตรวจสอบได้ด้วย NMR และ SEC ลิกโนเซลลูโลซิกที่ใช้เป็นสารตัวเติม ได้มาจากส่วนที่ไม่ต้องการของฟางข้าวสาลีจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำการแยกขนาดของสารตัวเติมโดยใช้ตะแกรงร่อนจากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์ขนาดและโครงสร้างทางเคมี เซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความแตกต่างของเทคนิคที่ใช้ พฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อน และเทคนิค DSC เพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และความเป็นผลึกของวัสดุ วัสดุเหล่านี้จะมีพฤติกรรมเชิงกลที่ดีถ้าสารตัวเติมและเมตริกซ์มีความสามารถในการเข้ากันได้สูง การอัดแน่นของปริมาณสารตัวเติม ขนาดของสารตัวเติม และธรรมชาติของแต่ละส่วนประกอบ จะถูกตรวจวิเคราะห์ การทำนาย

พฤติกรรมเชิงกลสามารถทำได้โดยใช้สมการของ Takayanagi ซึ่งจะให้คำตอบที่ถูกต้องในการประเมินค่ามอดุลัส โดยมีปริมาณสารตัวเติมอยู่ในช่วง 0-30 % โดยน้ำหนัก

Pickering และคณะ [38] ทำการศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ต่อคอมโพสิตเส้นใยต้นสนและพอลิเอทิลีน ชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ คือ แกมมาอะมิโน-โพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (γ-Aminopropyltrimethoxy silane) โดยเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ปรับปรุงผิวด้วย 2% โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไซเลน กับเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยไซเลนอย่างเดียว จากการทดสอบด้วย X-ray photoelectron spectroscopy และ NMR พบว่าไซเลนทำหน้าที่ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของคอมโพสิต โดยเป็นตัวช่วยทำให้เกิดพันธะเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ ในขณะที่ NaOH จะช่วยทำให้เกิดการประสานที่ดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

- เส้นใยที่ใช้ในวัสดุคอมโพสิตควรทำการปรับปรุงผิวของเส้นใยด้วยสารคู่ควบ หรือ สารช่วยผสม เพื่อช่วยให้การยึดติดระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์กับเส้นใยดีขึ้น ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้น
- เส้นใยที่เติมลงไปจะช่วยเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากเกินไปจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) บริษัทเอสซีจีพลาสติก จำกัด เกรด EL-Lene® M9001RW/RWP สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.1
2. Polypropylene (PP) จาก HMC Polymers Co.,Ltd เกรด Moplen® EP400L สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.2
3. เส้นใยมะพร้าว จาก MBJ Enterprise Co.,Ltd สมบัติบางประการและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวแสดงได้ดังตารางที่ 3.3
4. Antioxidant จาก Optimal tech Co.,Ltd.
   - Anox® 20 (Phenolic antioxidant)
   - Alkanox® 240 (Phosphite antioxidant)
5. สารช่วยผสม (Compatibilizer) สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.4
   5.1 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ จาก Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd. Compoline® CO/LL (Modified Polyethylene)
   5.2 พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ จาก Optimal Tech Co., Ltd. Polybond®3200 (Modified Homopolymer Polypropylene)
6. สารช่วยกระบวนการ (Processing aids) จาก Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd
   - EnHance® เกรด 1585
   - Ultra-Plast® เกรด WF107
7. สารก่อผลึก (Nucleating agent) จาก Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd NPCCA 601 S
8. เม็ดแก้วกลวง (Glass bubble bead) สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.5
   - เกรด K 15 จาก 3M (Thailand) Co.,Ltd
   - เกรด W300 จาก Behn Meyer Chemical (T) Co.,Ltd
9. แผ่นไม้สัก หนา 0.6 มิลลิเมตร จาก MBJ Enterprise Co.,Ltd

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE เกรด EL-Lene® M9001RW/RWP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สมบัติ	**LLDPE EL-Lene® M9001RW/RWP**	**มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ**
ดัชนีการหลอมไหล (190 ºC/2.16 kg) g/10 min	3.2	ASTM D1238
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.939	ASTM D1505
ความแข็งแรงดึง (MPa)	21	ASTM D638
การยืด ณ จุดขาด (%)	1100	ASTM D2117
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	750	ASTM D790
ความแข็งกด (Shore D)	60	ASTM D2240
อุณหภูมิอ่อนตัวทางความร้อน (ºC)	75	ASTM D648

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ PP เกรด Moplen® EP400L ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สมบัติ	**PP Moplen® EP400L**	**มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ**
ดัชนีการหลอมไหล (230 ºC/2.16 kg) (g/10min)	4.7	ASTM D1238
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.90	ASTM D792B
ความแข็งแรงดึง (MPa)	25	ASTM D638
การยืด ณ จุดคราก (%)	7	ASTM D638
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	1220	ASTM D790A
ความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด ที่ 23 ºC (J/m)	132	ASTM D256A
อุณหภูมิอ่อนตัวทางความร้อน ที่ 455 kPa (ºC)	88	ASTM D648

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (% น้ำหนักอบแห้ง)	มาตรฐาน
การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซิน	4.20	TPPI-T204-cm-97
การละลายในแอลกอฮอล์	1.32	TPPI-T264-cm-97
การละลายในน้ำร้อน	5.51	TPPI-T207-om-93
การละลายในสารละลายโดรอกไซด์	34.56	TPPI-T212-om-98
ปริมาณขี้เถ้า	3.80	TPPI-T211-om-93
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส	59.66	Acid chlorite Methode of Browing
ปริมาณลิกนิน	41.89	TPPI-T222-om-98
ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	49.20	TPPI-T203-om-93
ปริมาณแพนโตเซน	20.92	TPPI-T211-om-84

หมายเหตุ ข้อมูลการวิเคราะห์เส้นใยจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของสารช่วยผสม MA-g-PE (Compoline® CO/LL) และ MA-g-PP (Polybond® 3200)

สมบัติ	MA-g-PE (Compoline® CO/LL)	MA-g-PP (Polybond® 3200)
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.93	0.91
จุดหลอมเหลว (°C)	140	160
ปริมาณมาเลอิกแอนด์ไฮดรายด์ (%)	1.0	1.0
ดัชนีการหลอมไหล (190 °C/2.16 kg)	1.2	1.15

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของเม็ดแก้วกลวงเกรด K15 และ W300

สมบัติ	**K15**	**W300**
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.15	0.7
ค่าการนำไฟฟ้า (W/mK)	0.055	0.09
ขนาดอนุภาค (μm)	30-105	100-130
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	9.1-9.9	7.0-9.9

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

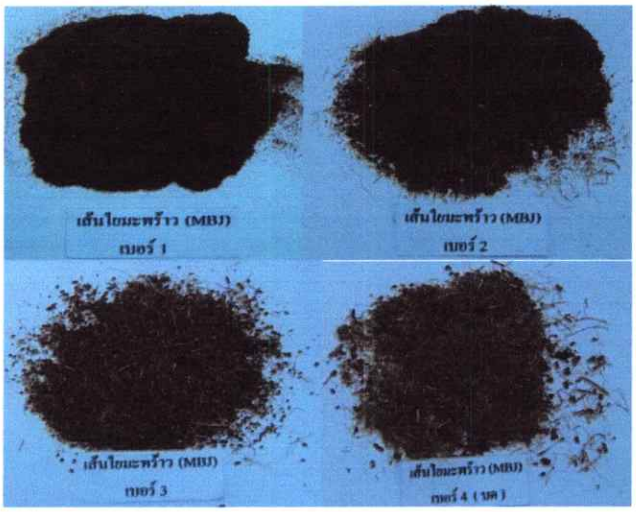
1. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) รุ่น 01409023 : Retsch Co.,Ltd. พร้อมกับตะแกรงมาตรฐานขนาด <20 20-50 50-80 และ >80 mesh
2. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 110 : Lab Tech Engineering Co.,Ltd.
3. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) : Bosco Engineering Co.,Ltd.
4. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น 419 : Erie Compression Molding Press
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ TESTOMETRIC AS รุ่น M500 50KN
6. เครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) รุ่น 258-PC : Yasuda Seiki Seisakusho Co.,Ltd.
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) รุ่น JEOL JSM 62
8. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนดีเอสซี (Differential Scanning Calorimeter ; DSC) : METTLER TOLEDO Co.,Ltd.
9. ตู้อบ รุ่น UM 400 : MEMERT Co.,Ltd.
10. เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
11. ถุงมือกันความร้อน
12. เวอร์เนียร์
13. ไมโครมิเตอร์

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยไม้

- เส้นใยมะพร้าวจากกระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp; MP)

เตรียมได้โดยนำชิ้นกาบมะพร้าวที่ล้างสะอาด อบให้แห้งแล้วนำมาบดด้วยเครื่องบด ทำการคัดแยกขนาดเส้นใยโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงร่อนขนาด 20 50 และ 80 mesh เพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย จะได้เส้นใยขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด คือ >80 mesh (เบอร์ 1) 50-80 mesh (เบอร์ 2) 20-50 (เบอร์ 3) <20 (เบอร์ 4) โดยก่อนการทดลองต้องนำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการทำให้ความชื้นในเส้นใยหมดไป โดยลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปถ่ายลักษณะของเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 1-4 ที่ได้จากกระบวนการบดเยื่อเชิงกล

3.3.2 ขั้นตอนการผสม

1. ชั่งสูตรผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.6
2. ทำการผสมส่วนผสมต่างๆ ดังตารางด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยใช้อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ PE) และ 190 °C (สำหรับ PP) เป็นเวลา 15 นาที
3. นำของผสมที่ได้ไปบดเป็นเม็ด
4. นำเม็ดของผสมที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยชั่งเม็ดของผสม 2 กิโลกรัม ใช้อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 30 นาที
5. นำแผ่นชิ้นงานไปเข้าเครื่องอัดเพื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงเป็นเวลา 10 นาที จะได้ชิ้นงานไม้คอมโพสิตพร้อมที่จะไปทดสอบ

6. การทดสอบไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตจะทำการศึกษาสมบัติดังต่อไปนี้

6.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล

- ทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 ได้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด
- ทดสอบความแข็งแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D 256
- ทดสอบความแข็งแรงโค้งงอด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน มอก.966-2547 ได้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ
- ทดสอบความแข็งกด ตามมาตรฐาน ASTM D 785
- ทดสอบความต้านทานการยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว ตามมาตรฐาน มอก. 966-2547

6.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

- การดูดซับน้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570

6.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน

- Differential scanning calorimeter (DSC)

6.4 ศึกษาสัณฐานวิทยา

- Scanning electron microscope (SEM)

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนผสมของสูตรต่างๆ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ
พลาสติก/เส้นใยพร้าว	100/0, 70/30, 60/40, 50/50
Processing aids - EnHance®	5 %*
Processing aids – WF107	1.5 %*
Antioxidant - Anox®20	0.05 %*
Antioxidant - Alkanox®240	0.05 %*
Compatibilizer - Compoline®CO/LL - Polybond®3200	0, 1, 2, 3 %**
Nucleating agent - NPCCA 601 S	0, 1 %*
Glass bubble beads - K15 - W300	0, 20 %***

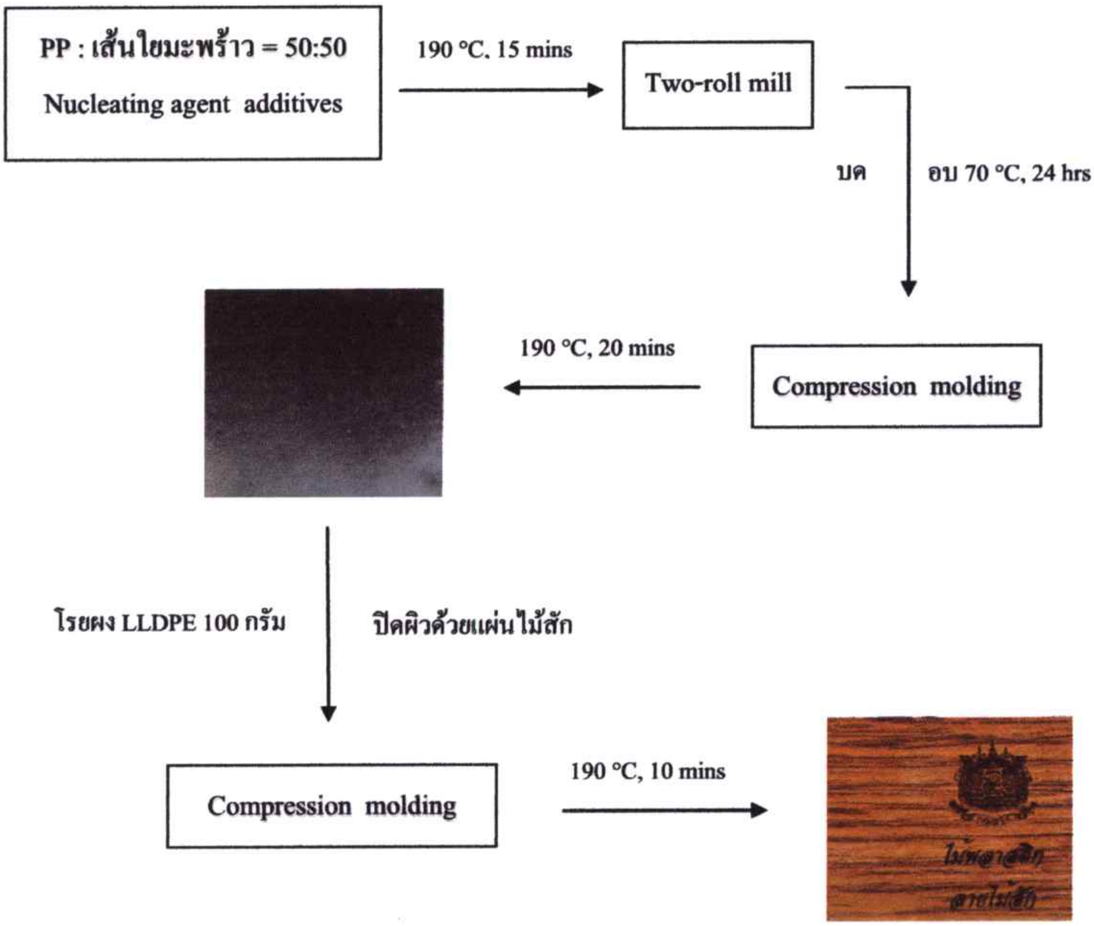
* เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณพอลิเมอร์

** เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณเส้นใยมะพร้าว

*** เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณของผสมทั้งหมด

3.3.3 การปรับปรุงไม้เทียมด้วยการปิดผิวหน้าด้วยแผ่นไม้จริง

การปิดผิว WPC ด้วยแผ่นไม้จริง (ไม้สัก) หนา 0.6 มม. โดยเพิ่มการยึดติดด้วยการโรยผง LLDPE ปริมาณ 100 กรัม เป็นความหนาประมาณ 0.5 มม. ก่อนการปิดผิว เมื่อทำการอัดและให้ความร้อน แสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การปิดผิวไม้เทียมด้วยแผ่นไม้สัก

3.4 การทดสอบ [39]

การทดสอบสมบัติต่างๆ ของ WPC ได้ทำการทดสอบมาตรฐานดังตารางที่ 3.7

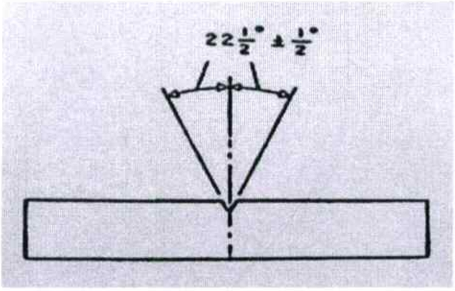
ตารางที่ 3.7 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบ WPC ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยรายงานผล
ความแข็งแรงกระแทก	ASTM D 256	kJ/m^2
ความแข็งแรงโค้งงอ	มอก.966-2547	MPa
มอดุลัสโค้งงอ	มอก.966-2547	MPa
ความแข็งกด	ASTM D 785	Shore D
เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ	ASTM D 570	%
ความหนาแน่น	ASTM D 1505-85	g/cm^3
ความต้านทานการยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว	มอก.966-2547	N

3.4.1 สมบัติเชิงกล

- **ความแข็งแรงกระแทก**

การหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 256 [40] โดยในการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) แบบมีรอยบาก (Notched sample) ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้น ในแต่ละครั้ง และลักษณะชิ้นงานตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก [40]

ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

ความแข็งแรงกระแทก (IS) = W / A

เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)

W คือ ค่าพลังงานกระแทก (kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่แตกหัก (m^2)

- **ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ**

การหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)ตามมาตรฐาน มอก.966-2547 [41] โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 50 mm x L mm จำนวน 12 ชิ้น ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ แสดงดังรูปที่ 3.4 โดย L = 15 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบ (ไม่น้อยกว่า 150) + 50 mm โดย

โหลดเซลล์ (Load cell)	5	kN
ความเร็วในการกด (Compression speed)	10	mm / min
ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับ	15	เท่าของความหนาชิ้นงาน

- สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงโค้งงอ} ; \sigma_f = \frac{1.5\ FL}{Bh^2}$$

$$\text{มอดุลัสโค้งงอ} ; E_b = \frac{L^3}{4Bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

เมื่อ F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างโค้งงอ (N)

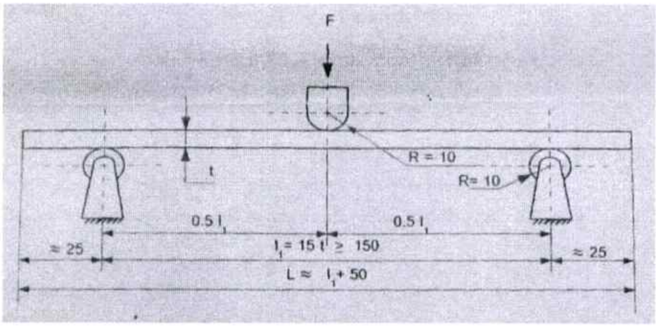
L คือ Span length

B คือ ความกว้างของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

h คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (N)

Δd คือ ระยะกดโค้งงอ (mm)



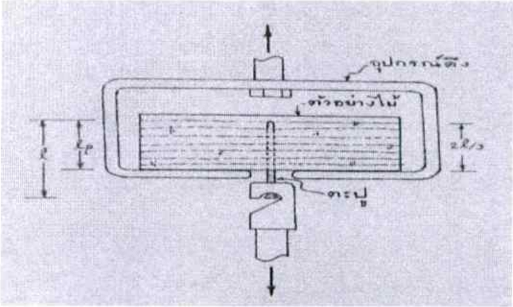
รูปที่ 3.4 ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ [41]

- ความแข็งกด

การหาค่าความแข็งกด (Hardness tester, Shore D) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 785 [42] โดยใช้มาตรฐานแบบ Shore D ในการทดสอบ ลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาทดสอบต้องเรียบ และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร กดเป็นเวลา 15 วินาที จึงอ่านค่า

- **การทดสอบความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว**

หาค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 [41] โดยขันตะปูเกลียวชนิดหัวจมแบบผ่าที่มีความยาว 40 mm หรือที่มีขนาดใกล้เคียงลงบนชิ้นงานที่มีขนาด 50 mm x 50 mm ขันจนกระทั่งส่วนเกลียวที่สมบูรณ์จมลึกลงไปถึง 15 mm ± 0.5 mm ไม่นับความยาวส่วนปลายเรียวของตะปูเกลียว จากนั้นทำการดึงให้ตะปูเกลียวถอนออกจากชิ้นทดสอบ โดยใช้ความเร็วในการดึง 2 mm/min

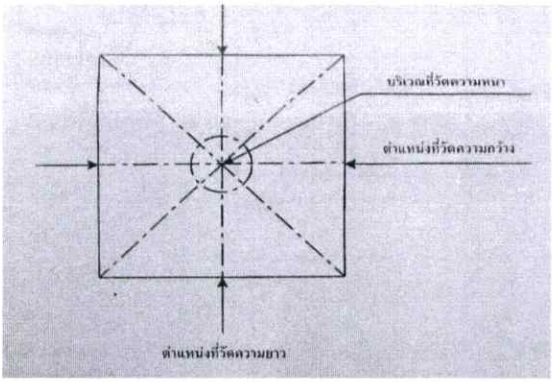


รูปที่ 3.5 ลักษณะการทดสอบความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว [41]

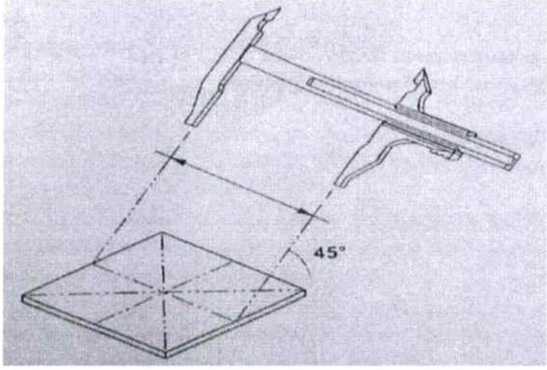
2.6.2 สมบัติทางกายภาพ

- **ความหนาแน่น (Density)**

หาความหนาแน่นตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 [41] สามารถหาได้โดยการเตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาด 50 mm x 50 mm จำนวน 6 ชิ้น ชั่งชิ้นทดสอบให้ได้มวลที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) จากนั้นทำการวัดความหนาตรงจุดกึ่งกลาง ความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบ ตามรูปที่ 3.6 โดยวางเครื่องมือให้ทำมุมกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ ประมาณ 45° ตามรูป ที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ [41]



รูปที่ 3.7 แสดงวิธีวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ [41]

- **ทดสอบการดูดซับน้ำ**

การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%Water absorption) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 570 [43] โดยนำชิ้นงานคอมโพสิตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า น้ำหนัก 2-5 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปไว้ในเดซิกเคเตอร์เป็นเวลา 30-45 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 45 วัน โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในทุกๆ 2 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

2.6.3 สมบัติทางความร้อน

- **Differential Scanning Calorimetry (DSC)**

DSC เป็นเทคนิคการตรวจวัดความแตกต่างของเอนทัลปี (Enthalpy; ΔH) ของสารตัวอย่าง และสารอ้างอิง โดย DSC สามารถใช้ตรวจวิเคราะห์หรือหาค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และสามารถใช้หาองศาความเป็นผลึกของ พอลิเมอร์ได้จากพื้นที่ใต้พีก (ค่าเอนทัลปี) ที่อุณหภูมิหลอมเหลว แล้วนำไปคำนวณองศาความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์ โดยสภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	=	10	°C / min
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ	=	25 – 250	°C

สามารถคำนวณค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity ; X_c) ได้ดังสมการนี้

$$X_c\,(\%) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\text{\% ของ PE หรือ PP ในวัสดุ}} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f คือ เอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม

ΔH_f^0 คือ ค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก 100 % โดยมีค่า 293 J/g สำหรับ PE และมีค่า 165 J/g สำหรับ PP [44]

2.6.4 สัณฐานวิทยา

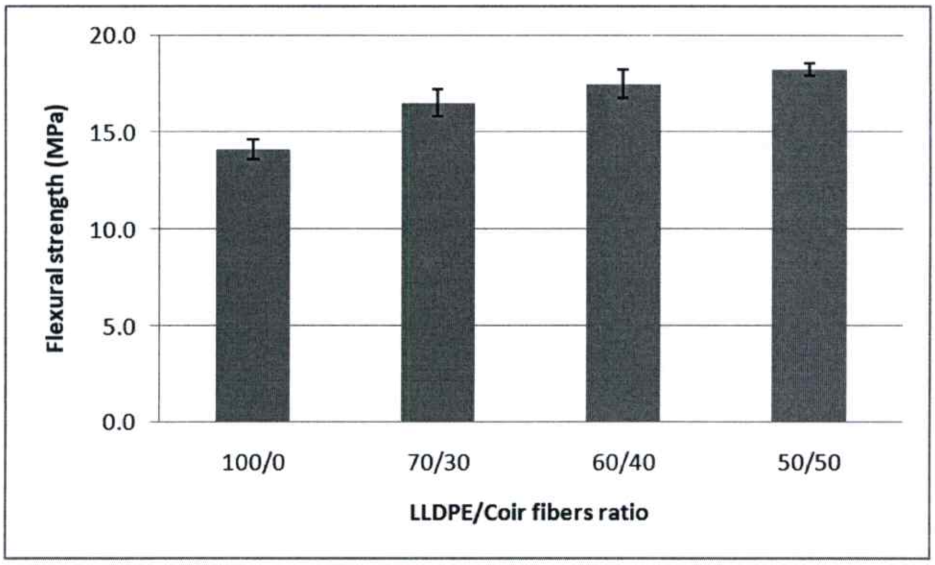
การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดเพื่อศึกษาการยึดติดระหว่างเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์ การเตรียมตัวอย่างทำได้โดย นำตัวอย่างมาแช่ที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการหักทันทีที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบทองและนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อศึกษาพื้นผิวของชิ้นงาน

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

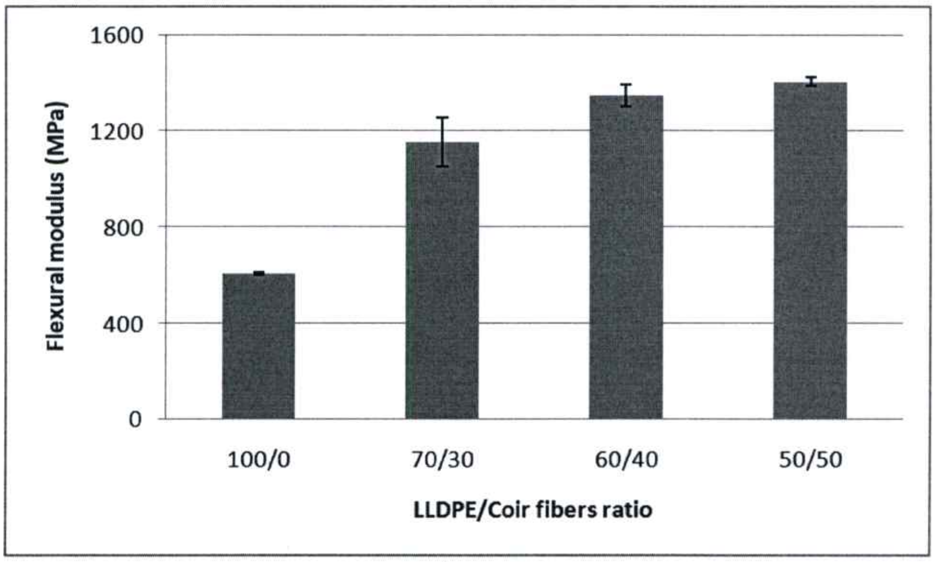
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites; WPC) จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) และเส้นใยมะพร้าว (Coir) ที่เหลือจากอุตสาหกรรมที่นอน ซึ่งเป็นส่วนของกาบมะพร้าว โดยเป็นการศึกษาเพื่อหาสูตรผสม WPC ที่เหมาะสม เช่น การหาอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนที่เหมาะสม ศึกษาผลของขนาดเส้นใย หาปริมาณสารช่วยผสม (Compatibilizer) ที่เหมาะสม ศึกษาผลของชนิดพอลิเมอร์เมตริกซ์ จากนั้นทำการปรับปรุงเพื่อการประยุกต์ใช้งาน และพัฒนาคุณภาพของ WPC เช่น การใช้สารก่อนิวเคลียส (Nucleating agent) เพื่อช่วยเพิ่มความเป็นผลึก และความแข็งแรงของไม้เทียม การใช้เม็ดแก้วกลวง (Glass bubble beads) เพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นฉนวน และลดความหนาแน่นของไม้เทียม การปิดผิวด้วยแผ่นไม้จริงเพื่อความสวยงาม ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าว

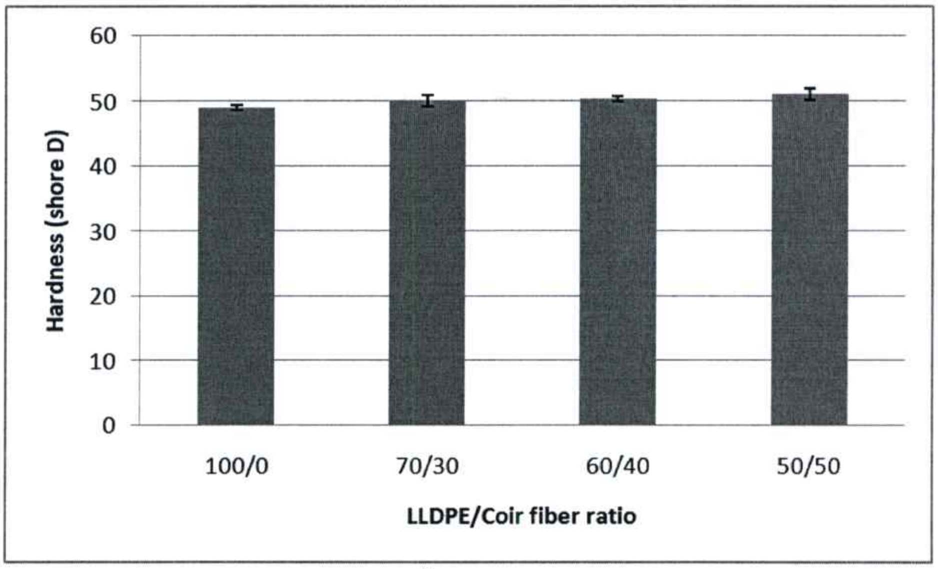
พลาสติกที่ใช้ในการทดลอง คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เกรด EL-Lene® M9001RW/RWP ในการวิจัยช่วงแรกเลือกใช้เส้นใยมะพร้าวชนิดเชิงกล (MP) ขนาด 50-80 mesh (เบอร์ 2) ที่เตรียมได้จากการบด เนื่องจากเป็นขนาดเส้นใยที่มีปริมาณมากที่สุดที่ได้จากการเตรียมเส้นใย โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนของพอลิเมอร์กับเส้นใยมะพร้าว 100:0 70:30 60:40 และ 50:50 (w/w) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ WPC ได้แก่ ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ความแข็งกด (Hardness) และความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (Screw holding) โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 – 4.5



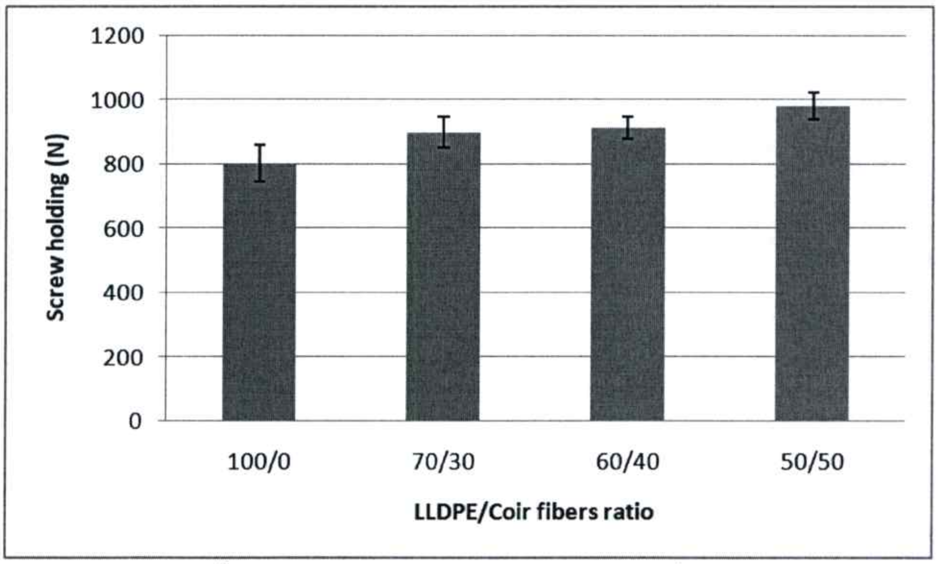
รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-LLDPE ที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.3 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-LLDPE ที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งกดของ WPC-LLDPE ที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.5 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวของ WPC-LLDPE ที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนต่างๆ

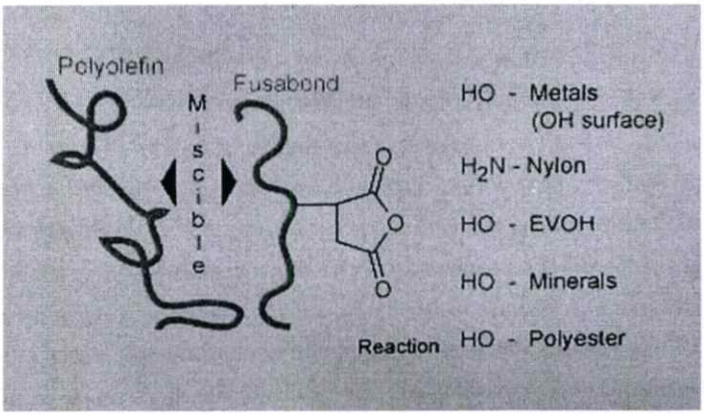
ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าว (รูปที่ 4.2 – 4.3) พบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวที่เติมลงไปมีค่าสัดส่วนความเพรียว (Aspect ratio) สูงจึงสามารถทำหน้าที่เสริมแรง (Reinforcement) ให้กับวัสดุคอมโพสิต ทำให้เส้นใยสามารถรับและกระจายแรงที่มากระทำได้ ทำให้วัสดุคอมโพสิตรับแรงโค้งงอได้มาก และมอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยสามารถเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุคอมโพสิต ค่าความ แข็งกดเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าว

(รูปที่ 4.4) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อวัสดุ WPC มีปริมาณเส้นใยมะพร้าวมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวเพิ่มขึ้นด้วย (รูปที่ 4.5) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้น จะไปลดปริมาณของพลาสติกใน WPC ซึ่งพลาสติกเป็นวัสดุที่มีสมบัติการยึดเกาะต่ำ เนื่องจากมีค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ต่ำ ทำให้เกิดยึดเกาะกับตะปูเกลียวได้ดีขึ้น

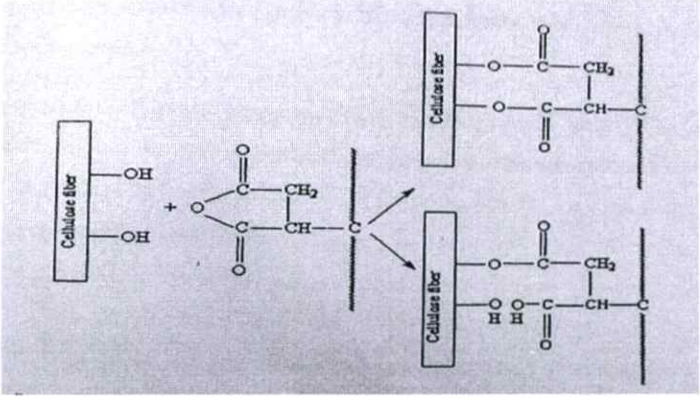
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ WPC เมื่อทำการเติมเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนของพลาสติกกับเส้นใยที่ 100:0 70:30 60:40 และ 50:50 พบว่า เส้นใยมะพร้าวสามารถเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตได้โดยส่งผลต่อสมบัติบางอย่างให้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ LLDPE ที่ไม่ได้ใส่เส้นใย เช่น ค่าความแข็งแรงโค้งงอ ค่ามอดุลัสโค้งงอ แต่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าวเพื่อใช้ในการทำการวิจัยในขั้นตอนต่อไป พบว่าอัตราส่วนของพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าวที่ 50:50 เหมาะสมที่จะนำไปใช้ เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดี และมีต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุด อย่างไรก็ดีจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าถ้าทำการใส่เส้นใยในปริมาณมากเกินไป (มากกว่า 50%) ทำให้มีปริมาณพลาสติกที่ทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์น้อย ยากต่อการผสมให้เกิดความเข้ากันระหว่าง LLDPE กับเส้นใย อาจทำให้เกิดการเปียกได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลให้ลดลง

4.2 การศึกษาปริมาณของสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์

พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิโอเลฟินส์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วและมีพลังงานพื้นผิวต่ำ เมื่อนำมาผสมกับเส้นใยธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุลิกนินเซลลูโลส (Lignocellulose) ที่มีขั้ว ทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างวัสดุทั้งสอง แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเติมสารที่เพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ คือ สารช่วยผสม (Compatibilizer) ลงไป ซึ่งสารช่วยผสมจะช่วยให้เกิดการยึดติดระหว่างกันดีขึ้น โดยสารช่วยผสมจะมีปลายด้านหนึ่งเป็นส่วนที่มีขั้ว สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของเส้นใยไม้ได้ และมีส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเป็นพลาสติกชนิดเดียวกันกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้ ทำให้มีความเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งลักษณะและกลไกของสารช่วยผสมที่ทำให้เกิดการยึดเกาะกันของเส้นใยและพลาสติก แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 – 4.7



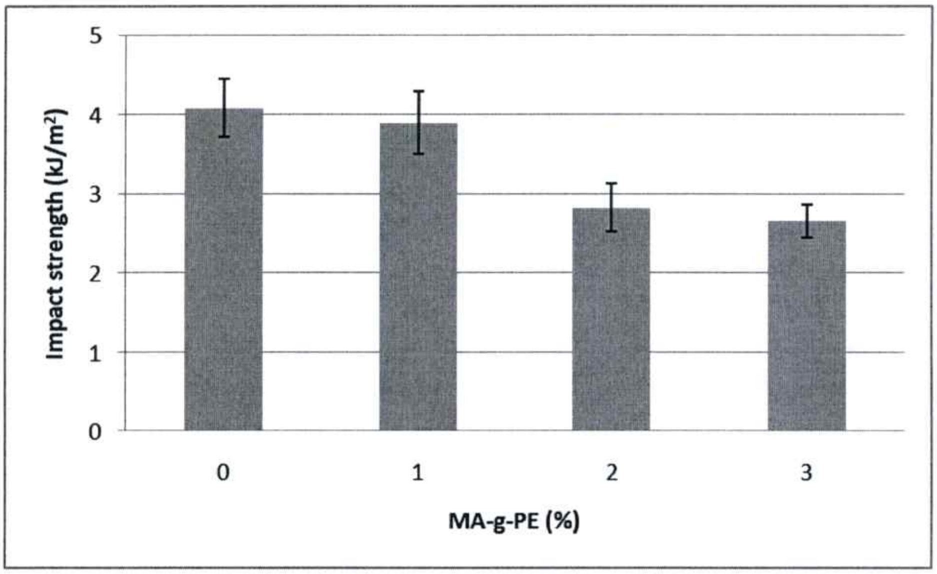
รูปที่ 4.6 ส่วนต่างๆ ของสารช่วยผสมที่ช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่าง พลาสติกและเส้นใย [45]



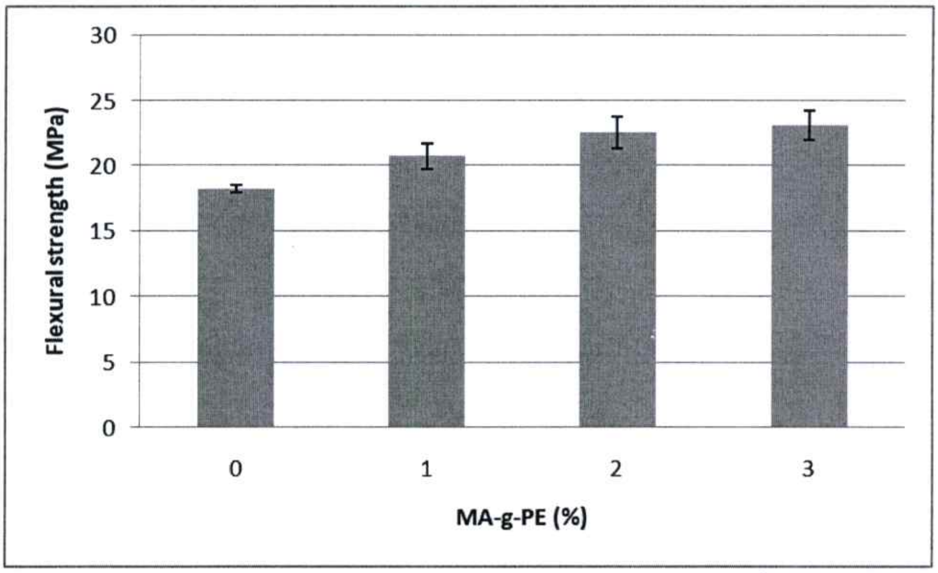
รูปที่ 4.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชัน ระหว่าง หมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของ เส้นใยไม้ กับหมู่แอนไฮดรายด์ ($C_4H_3O_3$) ของสารช่วยผสม MA-g-PE [45]

ในการทดลองนี้จะใช้พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted Polyethylene; MA-g-PE) เกรด Compoline® CO/LL เป็นสารช่วยผสม โดยศึกษาที่ปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว แล้วทำการเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม โดยศึกษาเปรียบเทียบสมบัติ WPC ที่เตรียมจาก LLDPE/Coir อัตราส่วน 50:50 ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 – 4.12 พบว่าเมื่อใส่สารช่วยผสม MA-g-PE สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากสารช่วยผสมสามารถช่วยทำให้เส้นใยและพลาสติกเข้ากันได้ดีขึ้น มีความต่อเนื่องมากขึ้น และลดช่องว่างระหว่างพื้นผิวของเส้นใยและเมตริกซ์ได้ ดังนั้นจึงทำให้สมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณ MA-g-PE เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุ WPC มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก MA-g-PE เป็นสารที่ช่วยให้เส้นใยมะพร้าวและ LLDPE สามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นจึงทำให้การยืดลดลง แต่จะแตกหักง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรงกระแทก

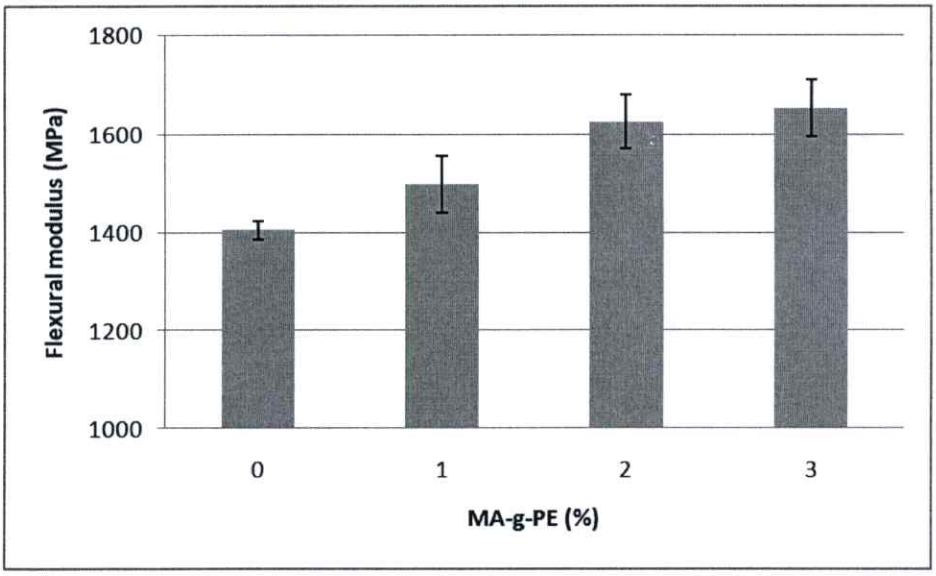
ในงานวิจัยนี้ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีความสำคัญต่อการนำ WPC ไปใช้งาน เพราะเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า WPC สามารถรับแรงได้ในระดับหนึ่งโดยไม่เกิดการแตกหัก



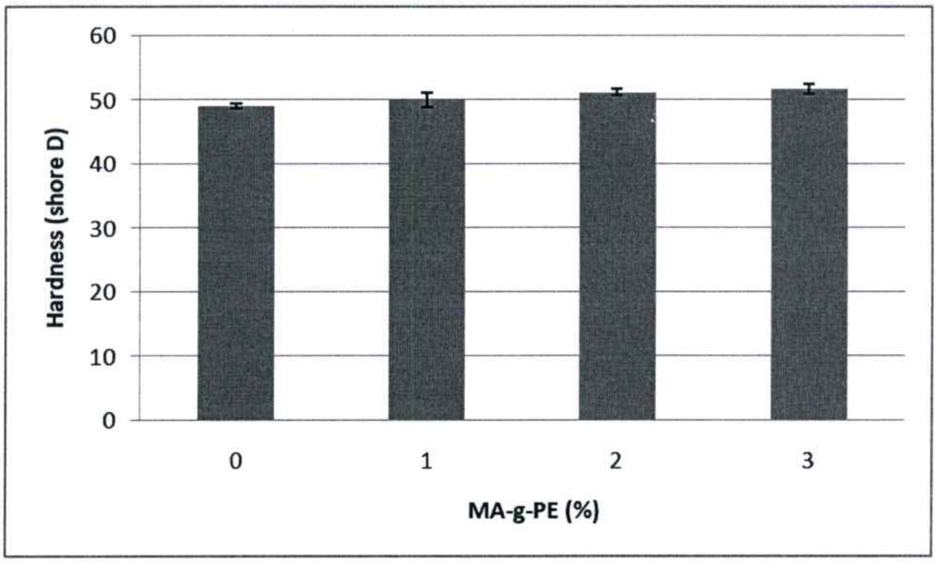
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว



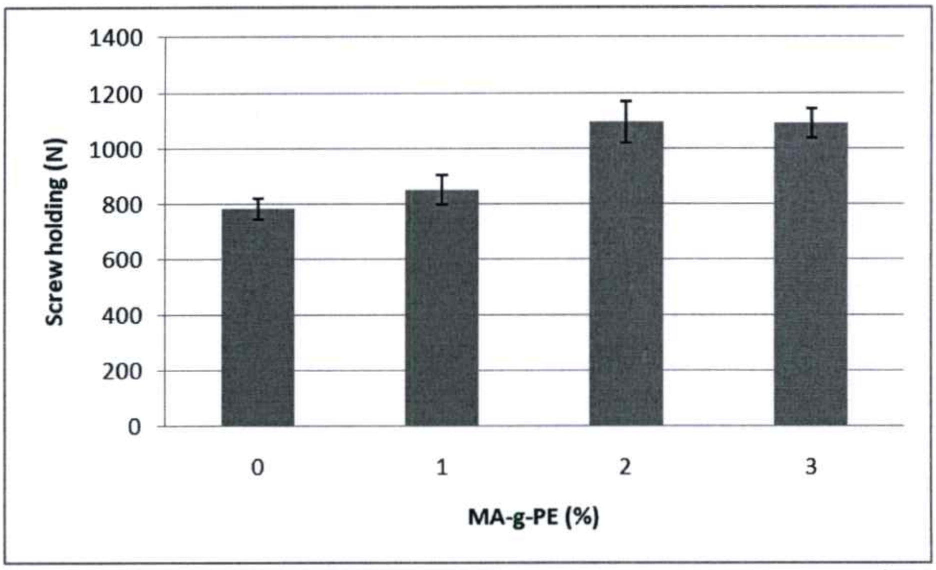
รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งกดของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 4.12 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) จะทำการศึกษาถึงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1และผนวก ก.

ตารางที่ 4.1 ค่าอุณภูมิหลอมเหลวผลึก และค่าองศาความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วยเทตนิค DSC ของ WPC ที่เตรียมจาก LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวเบอร์2 และสารช่วยผสม MA-g-PE

สูตร	Melting Temperature, Tm (ºC)	Degree of Crystallinity (%)
WPC	127.3	25.29
WPC + MA-g-PE 2%	127.5	23.64

อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ทำให้ผลึกเกิดการหลอมเหลว โดยจะสัมพันธ์กับขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น เช่น ผลึกที่มีขนาดเล็กจะมีค่า T_m ต่ำ เป็นต้น จากการทดลองสมบัติทางความร้อนสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเติมสารช่วยผสม MA-g-PE ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นั่นคือ สารช่วยผสม MA-g-PE ไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาจาก T_m อาจกล่าวได้ว่าขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกัน ค่าองศาความเป็นผลึกซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่อทำการเติมสารช่วยผสมใน WPC ไม่ส่งผลต่อค่าองศาความเป็นผลึกอย่างมีนัยสำคัญ

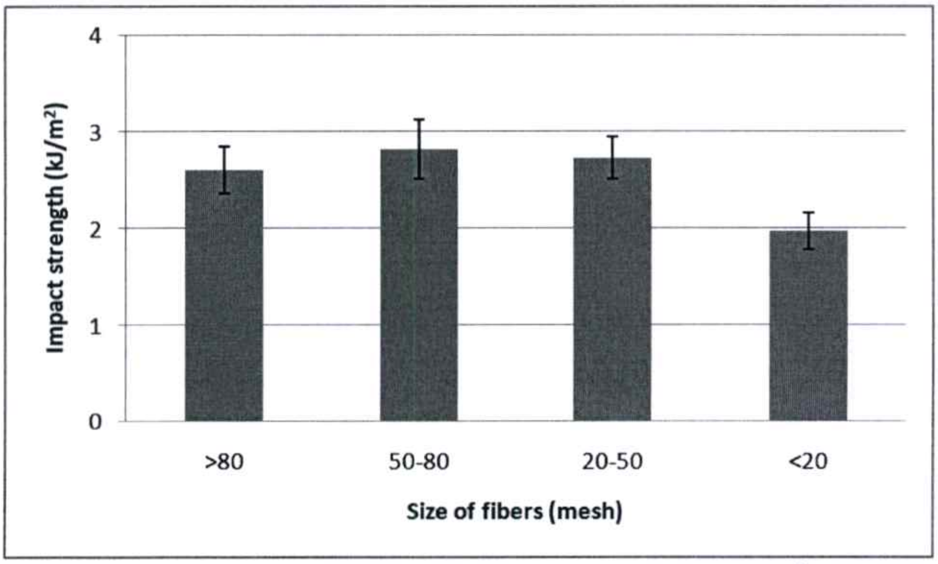
จากการศึกษาปริมาณสารช่วยผสม MA-g-PE ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการวิจัยขั้นต่อไป พบว่า PE-g-MA ที่ปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว เหมาะสมที่จะเลือกใช้ในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบปริมาณทั้ง 3 แล้วพบว่า สมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ MA-g-PE จาก 1% เป็น 2% มีค่ามากกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ MA-g-PE จาก 2% เป็น 3% หรือกล่าวได้ว่า ควรใส่สารช่วยผสมในปริมาณที่เหมาะสม คือ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย เพราะถ้าใส่ในปริมาณที่มากเกินไปแล้วไม่ได้ช่วยให้สมบัติดีขึ้นมากนัก ก็จะเป็นการเพิ่มต้นทุนวัตถุดิบ

4.3 การศึกษาผลของขนาดเส้นใย

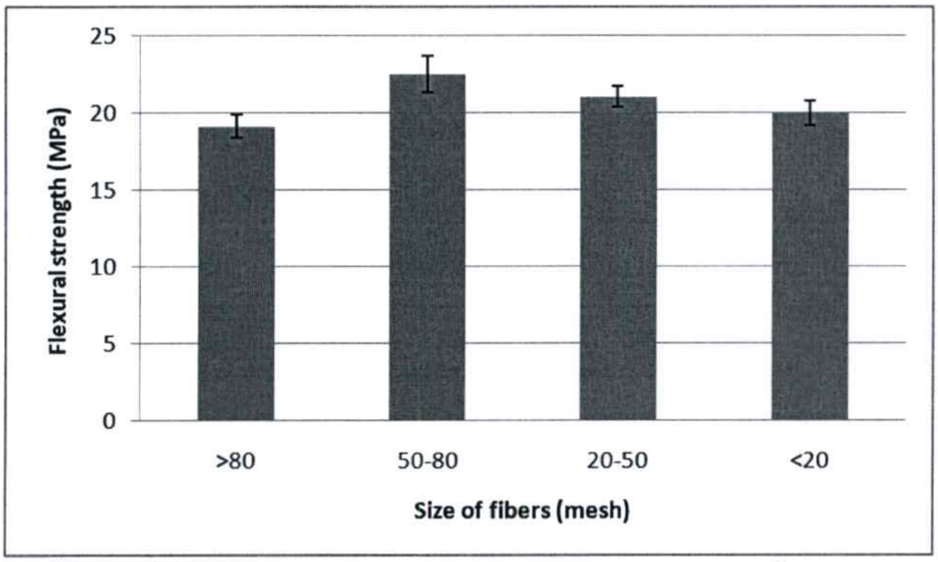
ศึกษาขนาดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ WPC เพื่อพิจารณาเลือกขนาดเส้นใยที่ทำให้วัสดุมีสมบัติดีที่สุด โดยนำเส้นใยมะพร้าวที่มีขนาด >80 mesh (เบอร์ 1) 50-80 mesh (เบอร์ 2) 20-50 mesh (เบอร์ 3) และ <20 mesh (เบอร์ 4) ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนของ LLDPE ต่อเส้นใยมะพร้าว เท่ากับ 50:50 และใช้สารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว เนื่องจากในการทดลองที่ผ่านมาพบว่าให้ผลดีที่สุด (ผลการทดลองตอนที่ 4.1 และ 4.2) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 – 4.17 นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดที่แท้จริงของเส้นใยในแต่ละขนาดเพื่อนำมาคำนวณหาค่าสัดส่วนความเพรียว (Aspect ratio; L/D) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.18 - 4.21 และ ผนวก ข.

จากรูปที่ 4.13 - 4.17 พบว่า วัสดุ WPC ที่เตรียมจากเส้นใยมะพร้าวขนาด 50-80 mesh ให้ค่าสมบัติเชิงกลดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยมีค่าสัดส่วนความเพรียวสูง (สัดส่วนความเพรียว 14.6 ปริมาณ 30.7%) เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ซึ่งจะช่วยเสริมแรงได้ดี ทำให้วัสดุ WPC สามารถรับและกระจายแรงที่ได้รับได้ดี ส่วนเส้นใยมะพร้าวขนาด >80 mesh (เบอร์ 1) จากการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยมะพร้าวเชิงกล (ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.18 – 4.21) พบว่า มีค่าสัดส่วนความเพรียวสูงที่สุด (สัดส่วนความเพรียว 18.8 มีปริมาณ 88.2%) แต่เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุ WPC กลับให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำกว่าวัสดุ WPC ที่เตรียมจากเส้นใยมะพร้าวขนาด 50-80 mesh (เบอร์ 2) ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่ามีสัดส่วนความเพรียวสูง จึงมีพื้นที่ผิวสูงกว่า เมื่อทำการผสมจึงทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ยากกว่า จึงอาจเกิดเป็นจุดบกพร่องของวัสดุ ส่งผลให้วัสดุไม่สามารถกระจายแรงกระทำที่ได้รับได้ดี จึงทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีค่าต่ำกว่าวัสดุที่เตรียมจากเส้นใยมะพร้าวขนาด 50-80 mesh (เบอร์ 2) ส่วนวัสดุ WPC ที่เตรียมจากเส้นใยมะพร้าวขนาด 20-50 mesh (เบอร์ 3) และ <20 mesh (เบอร์ 4) ให้ค่าสมบัติเชิงกลต่ำที่สุด เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวขนาดดังกล่าวมีค่าสัดส่วนความเพียวต่ำ คือ เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น จึงทำให้รับและกระจายแรงกระทำได้ไม่ดี และมีค่าสัดส่วนความเพรียวอยู่ในช่วงกว้าง นั่นคือมีขนาดเส้นใยที่หลากหลาย ทำให้เส้นใยส่งผ่านแรงกระทำที่ได้รับไม่ต่อเนื่องจึงรับแรงกระทำได้ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังมี

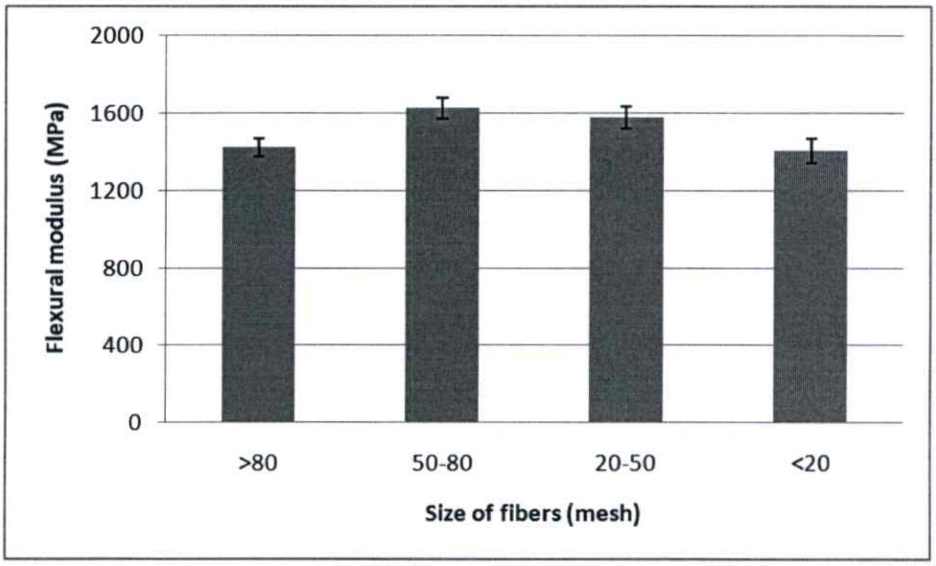
ส่วนประกอบของขุยมะพร้าวรวมอยู่ด้วย ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลม (ภาคผนวก ก.) โดยลักษณะรูปร่างก้อนกลมดังกล่าวไม่ช่วยในการเสริมแรงให้กับวัสดุ WPC จึงทำหน้าเป็นเพียงสารตัวเติมชนิดเพิ่มเนื้อไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) เท่านั้น



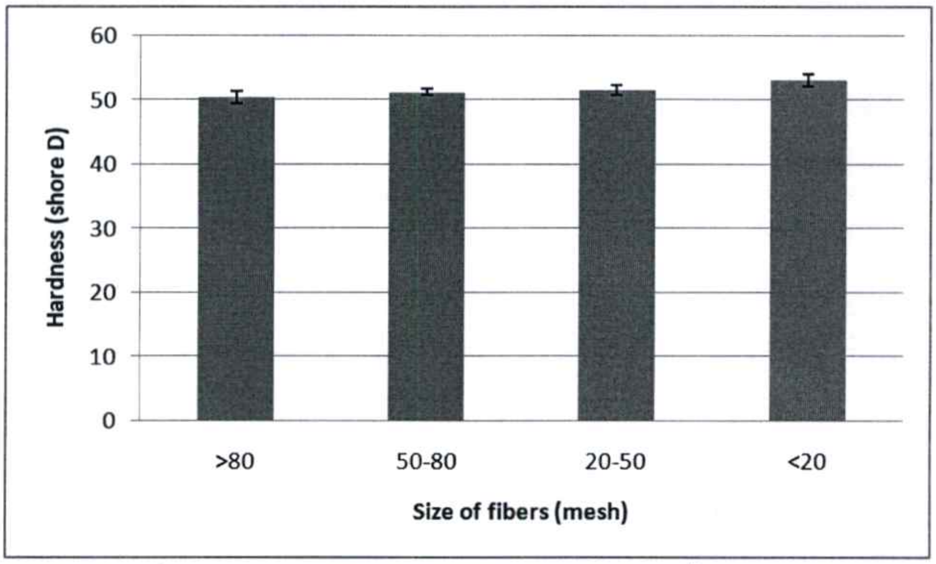
รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ



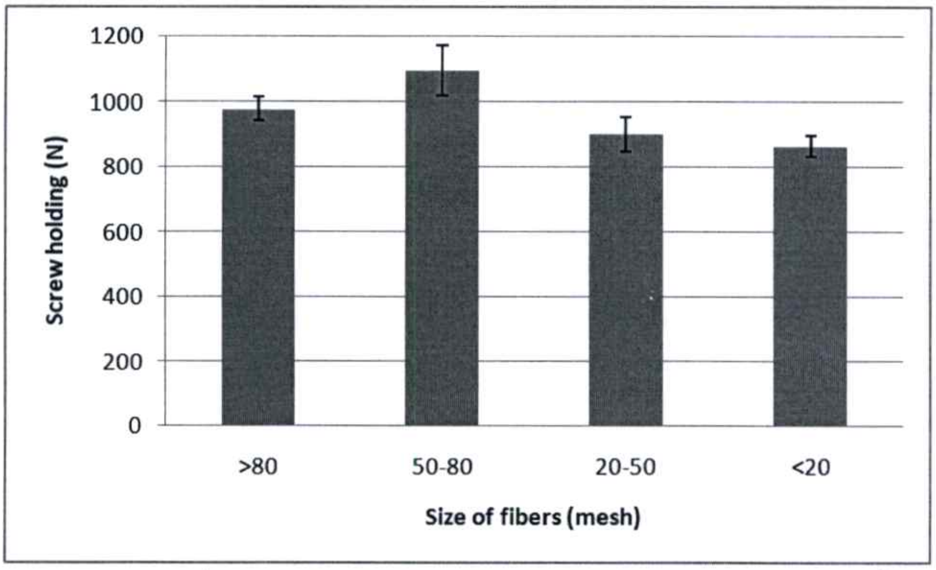
รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ



รูปที่ 4.15 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ



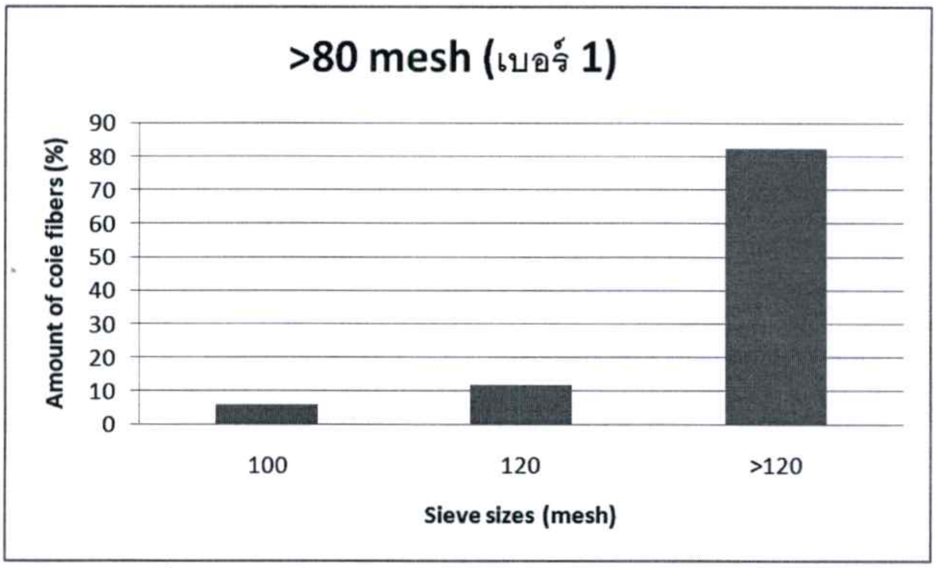
รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งกดของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ



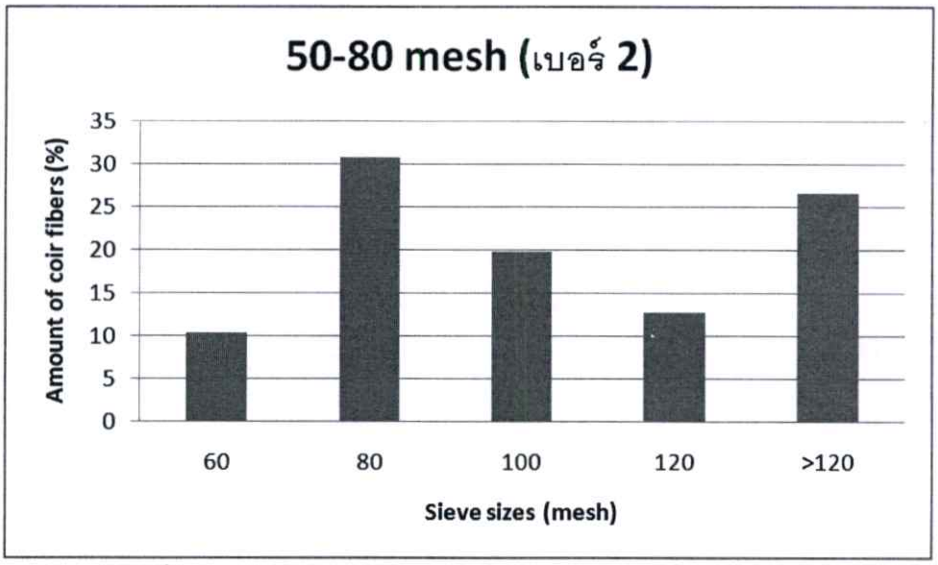
รูปที่ 4.17 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าวที่ขนาดเส้นใยต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้

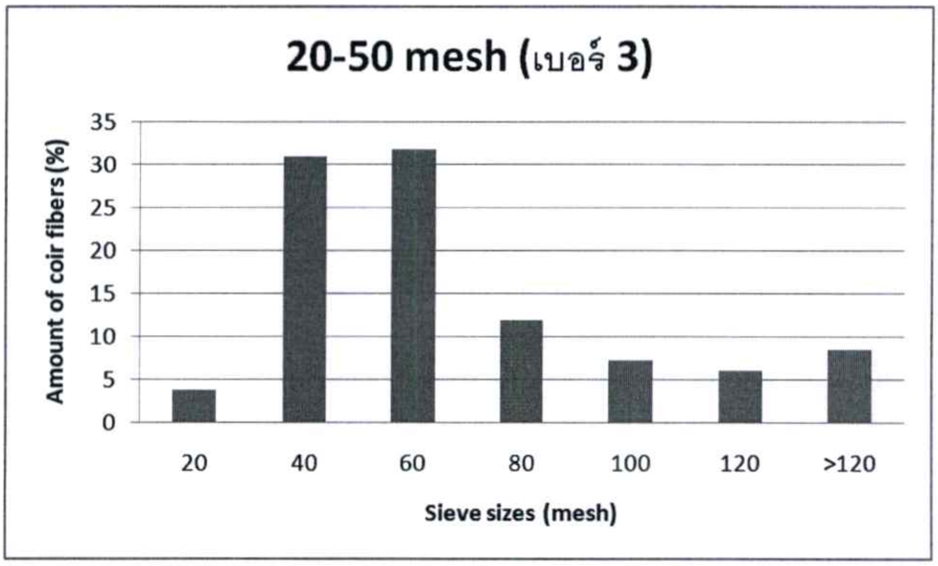
เส้นใยมะพร้าว	ตะแกรง (mesh)	ขนาดเส้นใย		สัดส่วนความเพรียว	ปริมาณเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (%)
		กว้าง (mm)	ยาว (mm)		
>80 mesh (เบอร์ 1)	-80+100	0.12	2.44	20.33	6.01
	-100+120	0.10	1.33	13.30	11.80
	-120	0.09	1.69	18.78	82.19
50-80 mesh (เบอร์ 2)	-40+60	0.25	2.51	10.04	10.24
	-60+80	0.20	2.91	14.55	30.68
	-80+100	0.14	2.28	16.29	19.80
	-100+120	0.12	1.99	16.58	12.75
	-120	0.09	1.61	17.89	26.53
20-50 mesh (เบอร์ 3)	-12+20	0.43	3.03	7.05	3.75
	-20+40	0.41	4.73	11.54	30.84
	-40+60	0.27	3.27	12.11	31.71
	-60+80	0.19	3.25	17.11	11.91
	-80+100	0.14	3.31	23.64	7.22
	-100+120	0.12	1.77	17.70	6.08
	-120	0.08	2.50	31.25	8.49
<20 mesh (เบอร์ 4)	-5+12	0.84	4.00	4.76	1.21
	-12+20	0.78	3.90	5.00	13.89
	-20+40	0.35	3.58	10.10	16.25
	-40+60	0.25	2.99	12.08	17.67
	-60+80	0.17	0.91	5.41	14.50
	-80+100	0.12	1.91	15.67	9.84
	-100+120	0.10	1.40	14.00	9.31
	-120	0.07	0.79	11.29	17.33



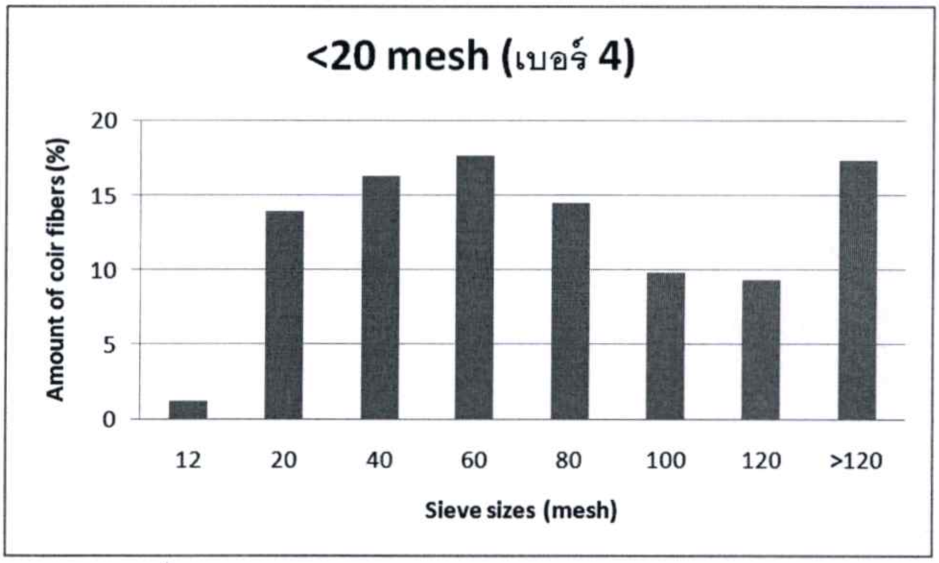
รูปที่ 4.18 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด >80 mesh (เบอร์ 1)



รูปที่ 4.19 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด 50 – 80 mesh (เบอร์ 2)



รูปที่ 4.20 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด 20 – 50 mesh (เบอร์ 3)



รูปที่ 4.21 ปริมาณเฉลี่ยของเส้นใยมะพร้าวขนาด <20 mesh (เบอร์ 4)

4.4 การศึกษาผลของชนิดพอลิเมอร์เมตริกซ์

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และพอลิพรอพิลีน (PP) สาเหตุที่เลือกใช้ LLDPE เนื่องจากมีการใช้ในการผลิตถุงบรรจุภัณฑ์ต่างๆ มากมาย จึงทำให้มีขยะจากพลาสติกจำพวกนี้อยู่มาก ซึ่งในอนาคตหวังจะนำขยะพลาสติกเหล่านี้มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะลดต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ ทั้งยังช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกด้วยการนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วน PP เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยเฉพาะความแข็ง (มอดุลัส) และมีราคาไม่แพง ปัจจุบันมีการเพิ่มปริมาณการใช้อย่างมาก ทำให้คาดการณ์ว่าจะมีราคาถูกและมีความเป็นไปได้ในการผลิต WPC เชิงพาณิชย์มากที่สุด (สมบัติแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2) เมื่อนำพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จะพบว่า PP มีความแข็งมากกว่า แต่จะเปราะกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก LLDPE ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาถึงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เพื่อเลือกนำไปใช้ในการทำวัสดุ WPC โดยการนำเส้นใยมะพร้าวมาผสมกับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ในอัตราส่วน 50:50 ใช้สารช่วยผสม MA-g-PE ปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของ WPC-LLDPE และ WPC-PP (อัตราส่วน 50:50, เส้นใยเบอร์ 2, MA-g-PE or MA-g-PP 2%)

สมบัติเชิงกล	LLDPE	WPC-LLDPE	PP	WPC-PP
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	18 ± 1	2.82 ± 0.4	16.2 ± 0.5	2.46 ± 0.1
ความแข็งกด (Shore D)	49 ± 0.32	51.7 ± 0.8	50.7 ± 0.8	55.9 ± 1.4
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	14.1 ± 0.5	22.5 ± 0.3	22.3 ± 1.4	28.7 ± 2.0
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	603 ± 5.3	1624.8 ± 18.2	997 ± 64	1983.2 ± 88
ความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (N)	800 ± 58	1094 ± 75	1030 ± 72	1665 ± 104

จากการทดลองพบว่า เมื่อผสมเส้นใยมะพร้าวกับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดแล้ว จะทำให้สมบัติบางประการมีค่าลดลงจากเดิม เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว แต่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีโครงสร้างเป็นสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งไม่มีขั้วจึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคระหว่างของวัสดุทั้ง 2 ชนิดไม่ดี กล่าวคือการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค (Interfacial bonding) มีค่าต่ำ นอกจากนี้เส้นใยมะพร้าวทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Fillers) ทำให้ความต่อเนื่องของพอลิเมอร์เมตริกซ์ (Matrix) ลดลงด้วย จึงเป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆลดลง โดยเฉพาะความแข็งแรงที่จุดเสียสภาพ เช่น ความแข็งแรงกระแทก

เมื่อพิจารณาสมบัติต่างๆ ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เมื่อผสมเส้นใยมะพร้าว ในอัตราส่วน 50:50 พบว่า PP ให้สมบัติต่างๆสูงกว่า LLDPE เช่น ความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ และการยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว คาดว่าเนื่องจากเส้นใยที่ใส่เป็นชนิดและปริมาณเดียวกัน ดังนั้นสมบัติโดยรวมของวัสดุจึงขึ้นกับสมบัติของเมตริกซ์เป็นหลัก และเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์เมตริกซ์พบว่า PP มีหมู่ห้อยเป็นหมู่เมทิล ($-CH_3$) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของไฮโดรเจน (H) ในโครงสร้างของ LLDPE จึงเป็นสาเหตุให้ PP ต้องใช้พลังงานในการหมุนเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่มากกว่า LLDPE ส่งผลให้ PP มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) สูงกว่า LLDPE ดังนั้น WPC-PP ที่ได้จึงมีความแข็งมากกว่า WPC-LLDPE นั่นเอง จากการทดลองนี้ทำให้สามารถเลือกใช้พอลิเมอร์เมตริกซ์ได้ถูกต้องเหมาะสมกับการใช้งานของวัสดุ WPC ในกรณีที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งที่มากกว่าก็เลือกใช้ PP ดังเช่นในการทดลองนี้ PP เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากมีความแข็งแรงมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ ซึ่งงานวิจัยนี้คาดว่าจะใช้งานวัสดุ WPC ในรูปไม้พื้น (Decking) จึงต้องการสมบัติเชิงกลในด้านการโค้งงอมากกว่าความแข็งแรงกระแทก

4.5 การศึกษาผลของสารก่อนิวเคลียส

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิโอเลฟินส์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) กล่าวคือมีความเป็นผลึกอยู่ด้วยไม่มากก็น้อย ซึ่งความเป็นผลึกจะมีอยู่มากน้อยเพียงใดเรียกว่า องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) โดยพอลิเมอร์จะมีองศาความเป็นผลึกสูงหรือต่ำขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของพอลิเมอร์ พันธะทุติยภูมิระหว่างโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราการทำให้พอลิเมอร์เย็นตัว (Cooling rate) โดยความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เป็นตัวกำหนดสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ กล่าวคือทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น ผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์บางประเภทต้องการให้มีองศาของความเป็นผลึกสูงและต้องมีผลึกขนาดเล็ก สามารถทำได้โดยการใช้สารเติมแต่งที่เรียกว่า สารก่อนิวเคลียส (Nucleation agent) โดยจะเพิ่มความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์ ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น และผลึกที่เกิดมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ

ในงานวิจัยนี้ใช้สารก่อนิเคลียสเชิงพาณิชย์สำหรับ PP คือ NPCCA 601 S เป็นผงแคลเซียมคาร์บอเนต (Calciumcarbonate; $CaCO_3$) ชนิดเคลือบผิว มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ (Cubic) มีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตร โดยจะทำการศึกษาองศาความเป็นผลึกของวัสดุ WPC ที่เป็นผลเนื่องมาจากการเติมสารก่อนิวเคลียส โดยจากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุ WPC ด้วยการใส่สารก่อนิวเคลียส ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ พบว่าวัสดุที่ได้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเทียบกับที่ไม่ใส่สารก่อนิวเคลียส ทั้งนี้อาจเนื่องจากใน WPC มีเนื้อพอลิเมอร์ 50% เป็นเส้นใย 50% การเพิ่มปริมาณผลึกในวัฏภาค PP ที่มีปริมาณน้อยจึงทำให้สมบัติที่ได้มีค่าไม่ต่างกันมาก แต่จากการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ดังตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อเติมสารก่อนิวเคลียสลงในวัสดุ WPC อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ที่ได้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ทำให้องศาความเป็นผลึก (%crystallinity) ของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสารก่อนิวเคลียสทำหน้าที่เป็นจุดริเริ่มในการเกิดผลึกแบบทุติยภูมิ (Secondary nucleation) ทำให้การเกิดผลึกเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว ส่งผลให้วัสดุ WPC มีค่าองศาความเป็นผลึกมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 การศึกษาผลของสารก่อนิวเคลียส

สมบัติเชิงกล	ปริมาณสารก่อนิวเคลียส (% โดยน้ำหนักของพลาสติก)	
	0	1
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.46 ± 0.1	2.34 ± 0.1
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	28.7 ± 2	30.2 ± 1.7
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	1983 ± 99	2074 ±98
ความแข็งกด (Shore D)	51.9 ± 1.4	56.1 ± 1.0
ความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (N)	1665 ± 94	1774 ± 98

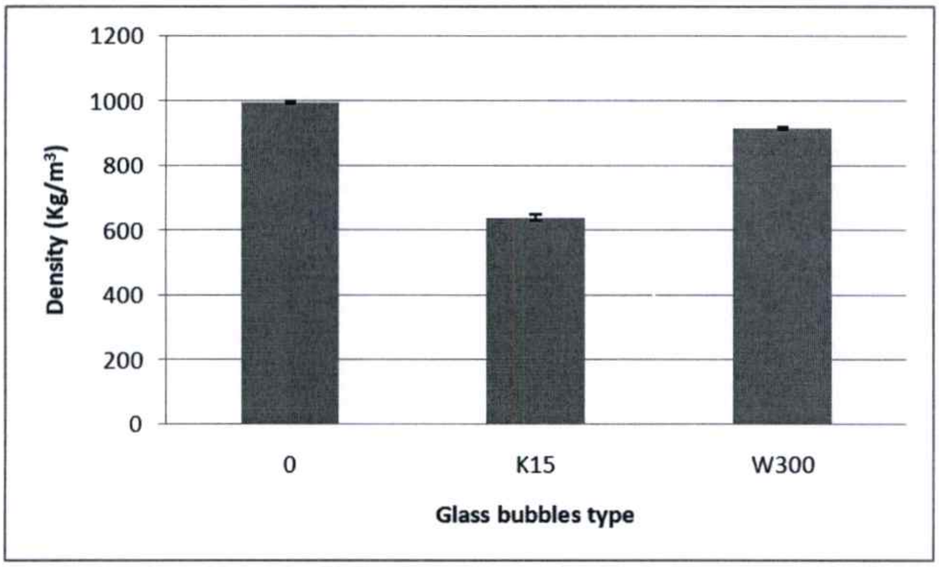
ตารางที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และค่าองศาความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วย DSC

สูตร	T_m (°C)	X_c (%)
WPC-PP + MA-g-PP 2%	167.5	31.45
WPC-PP + MA-g-PP 2% + Nucleating agent 1%	168.4	39.04

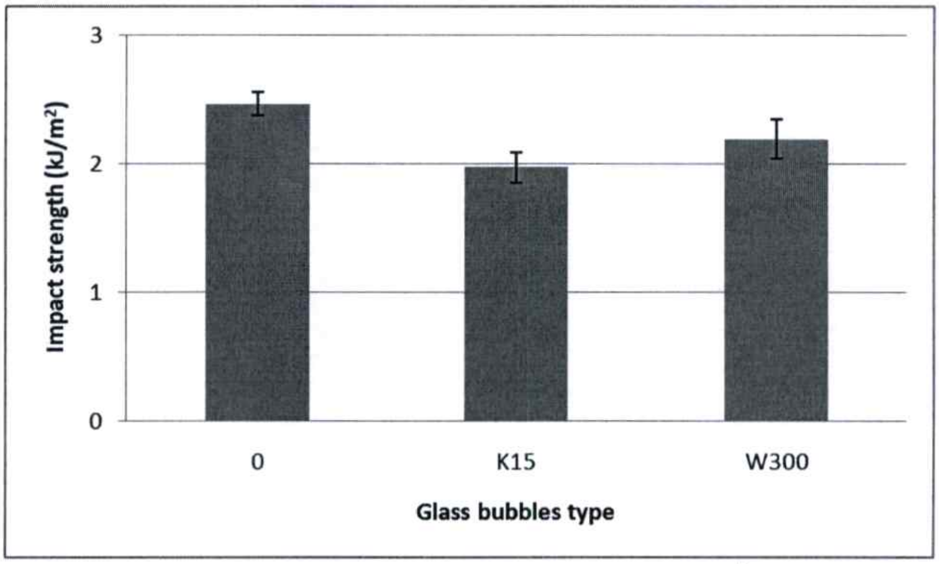
4.6 การศึกษาผลของเม็ดแก้วกลวง

เม็ดแก้วกลวง (Glass bubble beads) จัดเป็นสารตัวเติมชนิดเพิ่มเนื้อที่นิยมใช้ทั้งในเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ซึ่งข้อดีของเม็ดแก้วกลวง คือ มีความหนาแน่นต่ำ มีความเป็นฉนวนทางความร้อนสูง มีขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่เหมือนกัน มีความทนทานต่อแรงอัด มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง และมีความทนทานต่อสารเคมีดี และเนื่องจากการใช้เม็ดแก้วกลวงจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความหนาแน่นต่ำกว่าการใช้สารตัวเติมชนิดอื่นๆ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีน้ำหนักลดลง มีความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้น

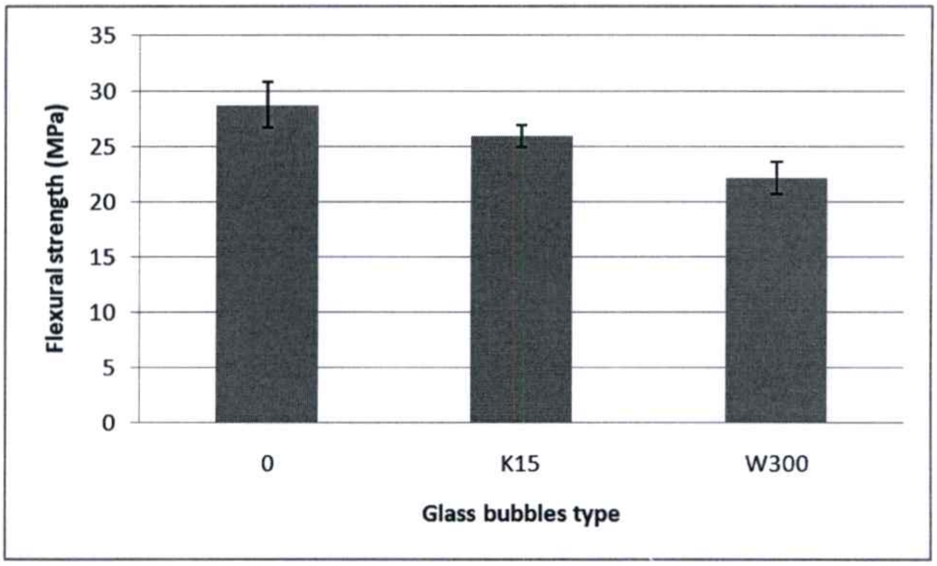
ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์เม็ดแก้วกลวงชนิด K15 จากบริษัท 3M (ประเทศไทย) จำกัด โดยมีความหนาแน่น 0.15 g/cm^3 และมีขนาดอนุภาค 30-105 ไมครอน และเม็ดแก้วกลวงชนิด W300 จากบริษัท Behn Meyer Chemical โดยมีความหนาแน่น 0.7 g/cm^3 มีขนาดอนุภาค 100-130 ไมครอน ในงานวิจัยส่วนนี้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นและสมบัติความเป็นฉนวนของชิ้นงาน จากการเติมเม็ดแก้วกลวงปริมาณ 20 % โดยน้ำหนักของของผสม ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.22 – 4.27 พบว่า การเติมเม็ดแก้วกลวงทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง โดยการเติมเม็ดแก้วกลวงชนิด K15 ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำที่สุด รองลงมาคือเม็ดแก้วกลวงชนิด W300 ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของเม็ดแก้วกลวง K15 มีค่าต่ำกว่า W300 (d_{K15} = 0.15 g/cm^3 เทียบกับ d_{w300} = 0.7 g/cm^3) จากการทดสอบความสามารถในการนำความร้อนด้วยเทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) ดังตารางที่ 4.6 พบว่า การเติมเม็ดแก้วกลวงทำให้วัสดุมีความเป็นฉนวนความร้อนมากขึ้น หรือความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุลดลง เนื่องมาจากภายในเม็ดแก้วกลวงมีอากาศหรือก๊าซที่เฉื่อยต่อการนำความร้อน และจากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า สมบัติส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เม็ดแก้วกลวงชนิด K15 มีแนวโน้มให้ค่าสมบัติต่างๆ สูงกว่าเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากความสามารถในการกระจายตัว และการยึดเกาะที่ดีกว่าชนิด W300 ดังนั้นเม็ดแก้วกลวงชนิด K15 จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการลดความหนาแน่นและเพิ่มสมบัติความเป็นฉนวนทางความร้อนของผลิตภัณฑ์



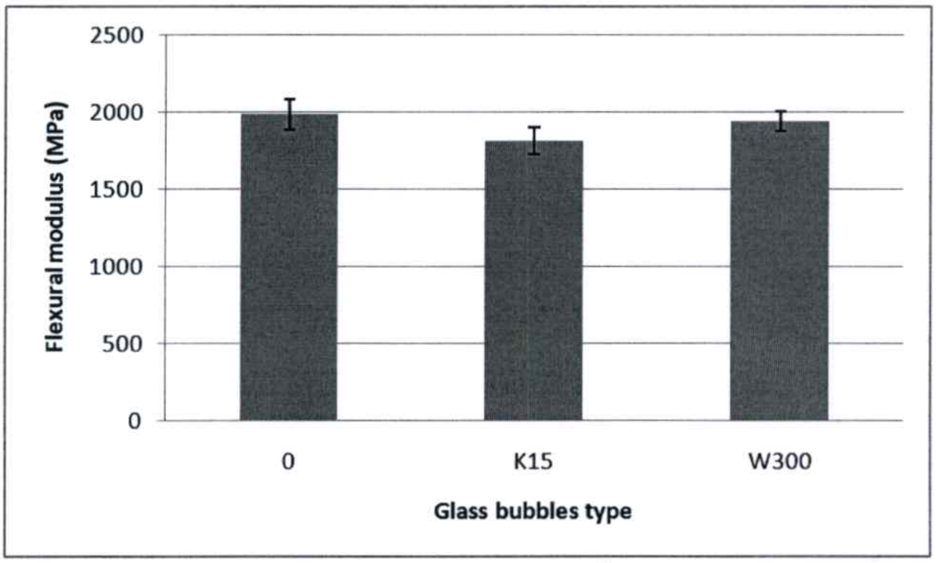
รูปที่ 4.22 ค่าความหนาแน่นของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง 20% โดยน้ำหนักของของผสม



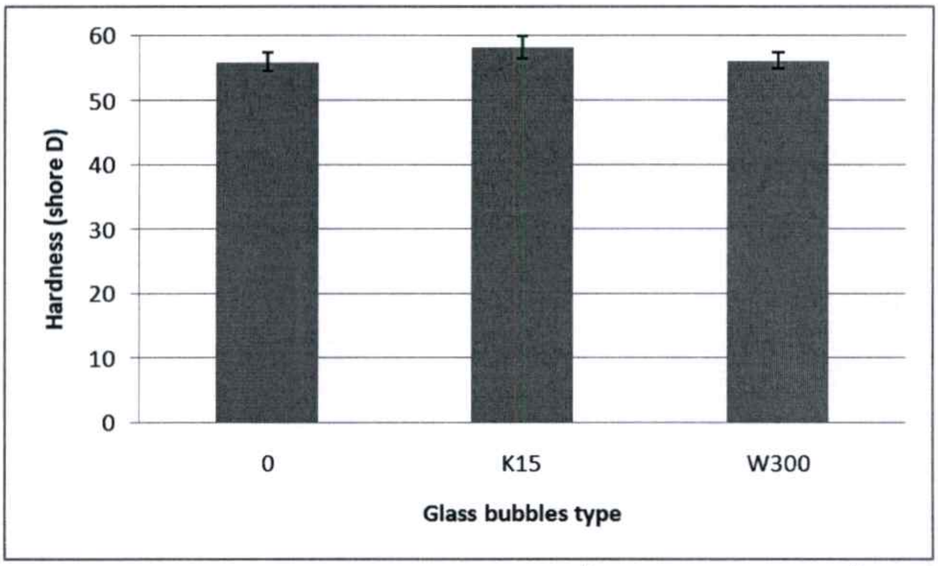
รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง 20% โดยน้ำหนักของของผสม



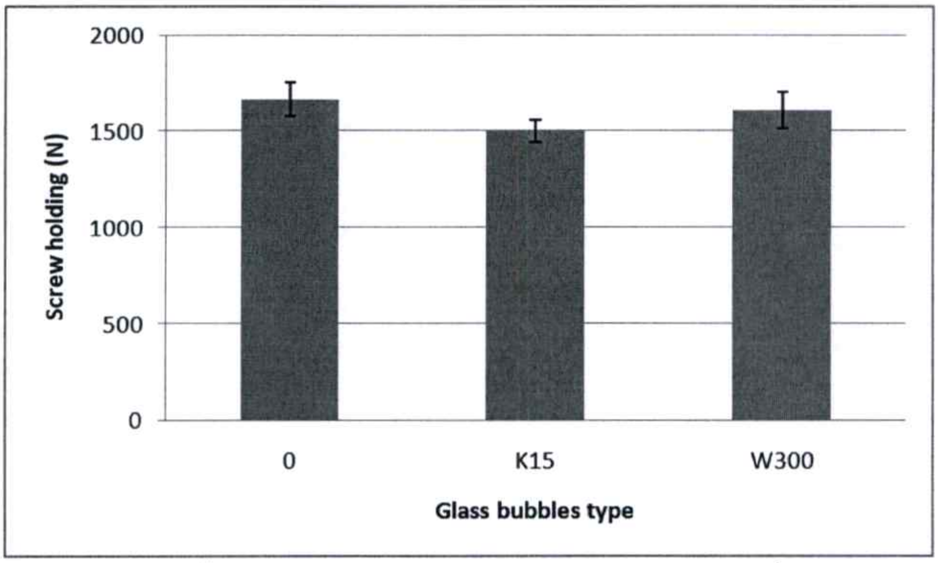
รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง 20% โดยน้ำหนักของของผสม



รูปที่ 4.25 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง 20% โดยน้ำหนักของของผสม



รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งกดของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง 20% โดยน้ำหนักของของผสม



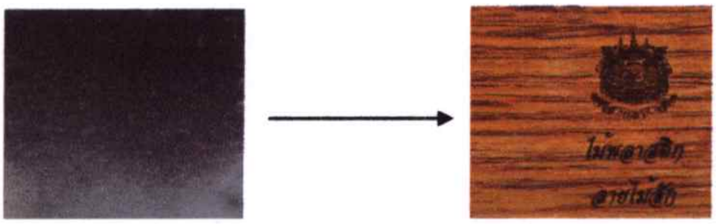
รูปที่ 4.27 ค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) ที่เติม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่เติมและไม่เติมเม็ดแก้วกลวง 20% โดยน้ำหนักของของผสม

ตารางที่ 4.6 ค่าความสามารถในการนำความร้อนของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50, MA-g-PP 2%) ที่ใส่เม็ดแก้วกลวง 20% โดยน้ำหนักของของผสม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) ณ อุณหภูมิห้อง

สมบัติทางความร้อน	WPC-PP	WPC-PP + K15 20%	WPC-PP + W300 20%
การนำความร้อน (W/mK)	0.255	0.178	0.221
การแพร่ความร้อน (mm^2/s)	0.172	0.144	0.163
ค่าจุความร้อนจำเพาะ (MJ/m^3K)	0.481	0.323	0.399

4.7 การปรับปรุงไม้เทียมด้วยการปิดผิวหน้าด้วยแผ่นไม้จริง

ในงานวิจัยตอนนี้ได้มีการนำแผ่นไม้จริงมาปิดลงบนผิวของชิ้นงาน WPC ทั้งนี้เพื่อต้องการปรับปรุงความสวยงามของผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะเหมือนไม้จริงให้มากที่สุด กล่าวคือ ทำการขึ้นรูปวัสดุ WPC-PP ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำแผ่น WPC-PP ที่ได้มาโรยด้วยผง LLDPE ปริมาณ 100 กรัม โดยให้มีความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นไม้สักมาปิดลงบนผิวหน้าของวัสดุ WPC-PP แล้วจึงนำไปอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนอีกครั้ง โดยใช้อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยทั้งก่อนและหลังการปิดผิวแสดงได้ดังรูปที่ 4.33

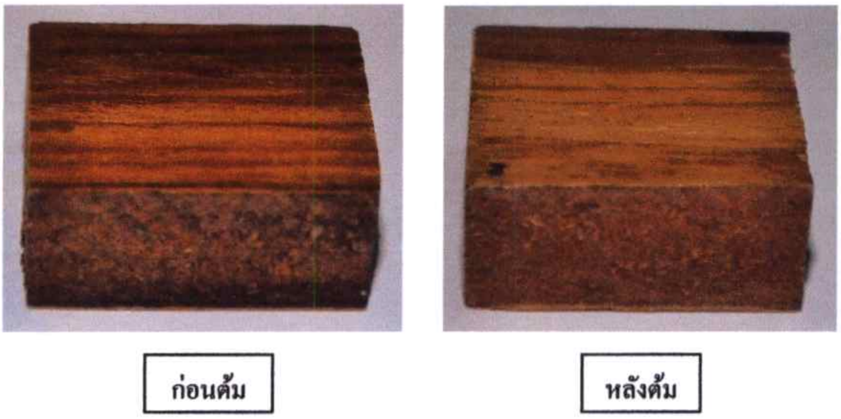


ก่อนปิดผิว หลังปิดผิวด้วยแผ่นไม้สัก

รูปที่ 4.28 ชิ้นงาน WPC ก่อนการปิดผิว และ WPC ที่ปิดผิวด้วยแผ่นไม้จริง

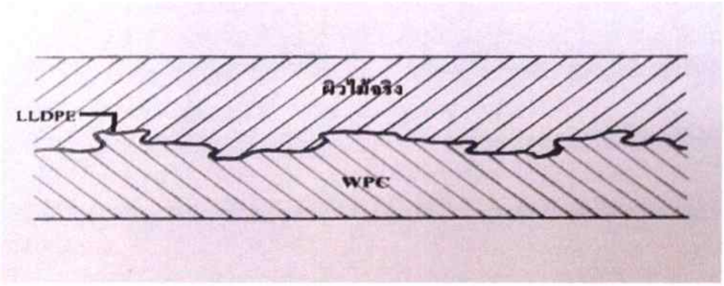
- <u>การทดสอบการยึดติดของแผ่นไม้ปิดผิว</u>

ทำการทดสอบได้โดยนำชิ้นทดสอบไปต้มในน้ำเดือด (มากกว่า 100 °C) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากการทดสอบ พบว่า ไม่มีการหลุดออกของแผ่นไม้ปิดผิว แต่สีของไม้จะซีดกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย WPC ปิดผิวด้วยแผ่นไม้จริงก่อนและหลังการต้มน้ำเดือด 4 ชั่วโมง

จากการทดลองปิดผิว WPC ด้วยแผ่นไม้จริง (ไม้สัก) หนา 0.6 มม. โดยเพิ่มการยึดติดด้วยการโรยผง LLDPE ก่อนการปิดผิว เมื่อทำการอัดและให้ความร้อน จะทำให้ผง LLDPE หลอมและแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของผิวไม้จริง พอเย็นตัวก็จะเกิดการแข็งล๊อคติดอยู่ในเนื้อไม้ เกิดกลไกการยึดติดแบบล๊อคเชิงกล (Mechanical interlocking) ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.30 การยึดติดแบบล๊อคเชิงกล (Mechanical interlocking) [46]

4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-LLDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น (%ดูดซับน้ำประมาณ 4-10%) และมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยมะพร้าวมีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ซึ่งมีความเป็นขั้ว หมู่ไฮดรอกซีสามารถดูดซับน้ำได้ดี โดยเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นเมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวในวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้เกิดการดูดซับน้ำได้มากขึ้นด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับน้ำจะมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากมีการดูดซับน้ำจนถึงจุดอิ่มตัวทำให้ไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก แสดงได้ดังรูปที่ 4.36

จากรูปที่ 4.37 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-LLDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 50% และสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณต่างๆ พบว่า MA-g-PE สามารถช่วยให้การดูดซับน้ำของวัสดุคอมโพสิตลดลง เนื่องจาก MA-g-PE เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์และเส้นใย โดยปลายด้านหนึ่งที่ไม่มีขั้วสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งที่มีขั้วจะเข้ากับหมู่ไฮดรอกซีของเส้นมะพร้าวได้ดีทำให้เกิดการยึดเกาะที่แข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ทำให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซีลดลง และช่วยลดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ซึ่งเป็นช่องทางหรือบริเวณที่น้ำเข้าสู่ WPC ทำให้การดูดซับน้ำของวัสดุคอมโพสิตลดลง

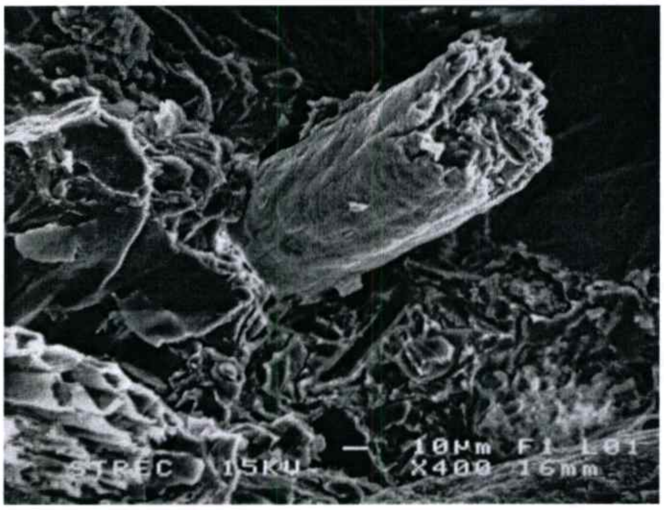
จากรูปที่ 4.38 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-LLDPE ที่ใส่เส้นใยมะพร้าว 50% และสารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว และเม็ดแก้วกลวงชนิดต่างๆที่ปริมาณ 20 % โดยน้ำหนักของของผสม พบว่าการดูดซับน้ำของวัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อใส่เม็ดแก้วกลวง เนื่องจากการใสเม็ดแก้วกลวงเพิ่มเข้าไปจะทำให้ปริมาณของเส้นใยมะพร้าวซึ่งเป็นส่วนที่ดูดซับน้ำในวัสดุมีสัดส่วนที่ลดลง จะเห็นได้ว่า WPC ที่เติมเม็ดแก้วกลวง K15 มี % การดูดซับน้ำที่ต่ำกว่า W300 เนื่องจาก K15 มีความหนาแน่นต่ำกว่า W300 (ความหนาแน่นของ K15 = 0.15 g/cm^3 ความหนาแน่นของ W300 = 0.7 g/cm^3) ในการผสมน้ำหนักที่เท่ากันจะมีปริมาตรมากกว่า ส่งผลให้อัตราส่วนของเส้นใยที่อยู่ใน WPC น้อยกว่า จึงมี % ดูดซับน้ำน้อยกว่า

จากรูปที่ 4.40 แสดงภาพ SEM ของ WPC-LLDPE ที่อัตราส่วนของ LLDPE ต่อเส้นใยมะพร้าวเท่ากับ 50:50 และสารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 400 เท่า (แสดงดังภาพ (ก) และภาพ (ข) ตามลำดับ) จากภาพ (ก) แสดงการกระจายตัวของเส้นใยที่ดี เมื่อเติมสารช่วยผสม MA-g-PE แต่ยังพบช่องว่างกระจายอยู่ทั่วไป คาดว่าเนื่องจากหมู่มาเลอิกของสารช่วยผสมไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซีของเส้นใยได้หมด แต่เมื่อเพิ่มกำลังขยายดังภาพ (ข) พบว่าช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์และเส้นใยมีขนาดเล็กลง ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นและการดูดซับน้ำลดลง

จากรูปที่ 4.41 แสดงภาพ SEM ของ WPC-LLDPE ที่ใส่เส้นใยขนาดต่างๆ โดยมีอัตราส่วน LLDPE ต่อเส้นใยมะพร้าว เท่ากับ 50:50 และสารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว ที่กำลังขยาย 100 เท่า ของเส้นใยเบอร์ 1 (ขนาด >80 mesh) เส้นใยเบอร์ 2 (ขนาด 50-80 mesh) เบอร์ 3 (ขนาด 20-50 mesh) และเบอร์ 4 (ขนาด <20 mesh) (แสดงดังภาพ (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ) จากภาพจะเห็นได้ว่าเส้นใยมีการกระจายตัวค่อนข้างดี ยกเว้นเส้นใยเบอร์ 1 (ขนาด >80 mesh) ซึ่งมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยอยู่บ้างเล็กน้อย ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็ก ซึ่งมีพื้นที่ผิวมาก จึงทำให้การผสมเข้ากันทำได้ยาก

จากรูปที่ 4.42 - 4.43 แสดงภาพ SEM ของ WPC-PP ที่อัตราส่วนของ PP ต่อเส้นใยมะพร้าวเท่ากับ 50:50 และสารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว แล้วสารตัวเติมเม็ดแก้วกลวงทั้งเกรด K15 และ W300 ที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของของผสม ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 500 เท่า พบว่าเม็ดแก้วกลวงทั้งสองเกรดมีการกระจายตัวที่ดี เม็ดแก้วกลวง K15 มีการยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีกว่า W300 ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

(ก)



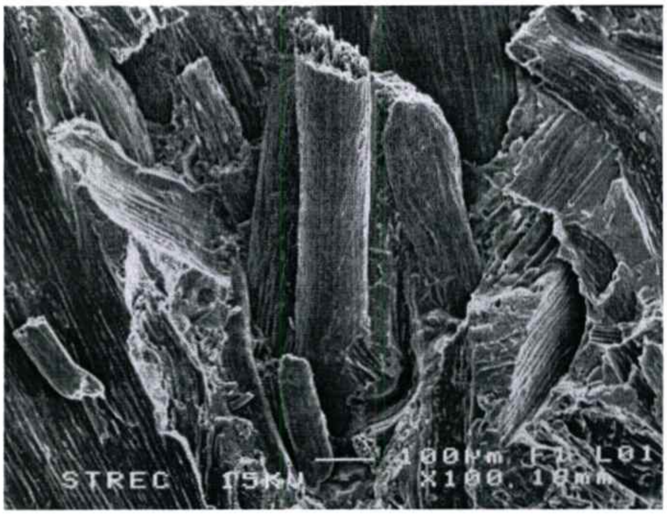
(ข)

รูปที่ 4.34 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50)
(ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 400 เท่า

(ก)

(ข)

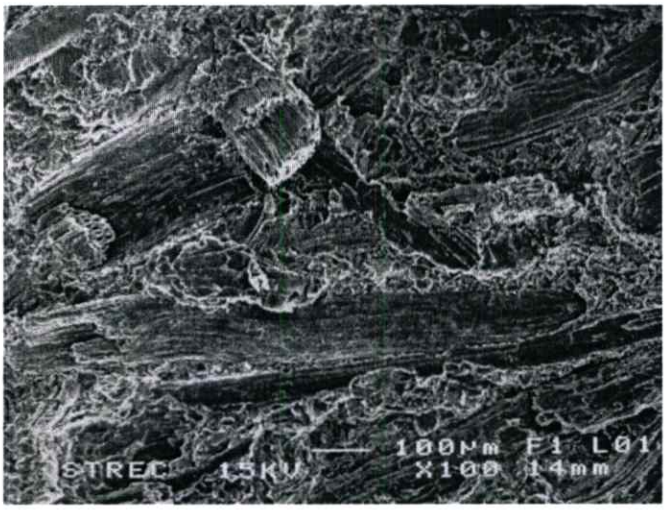
รูปที่ 4.35 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) และสารช่วยผสม MA-g-PE 2%โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 400 เท่า



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

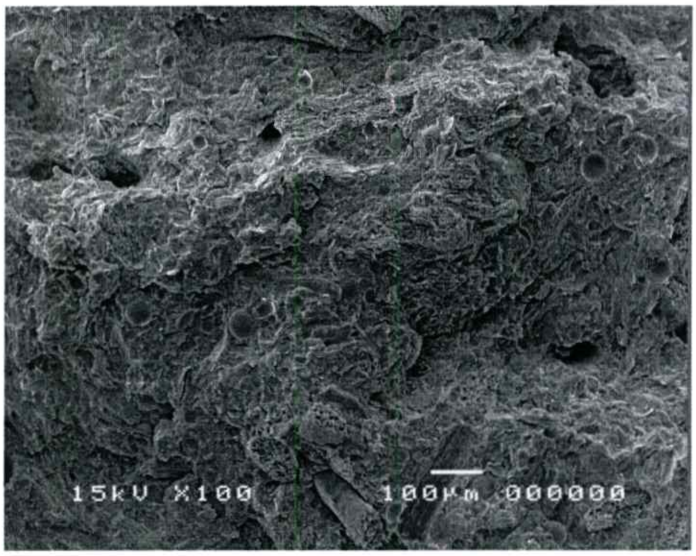
รูปที่ 4.36 แสดงภาพ SEM ของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่ใส่เส้นใยขนาดต่างๆและสารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย

(ก) เส้นใยมะพร้าวเบอร์ 1 (>80 mesh) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

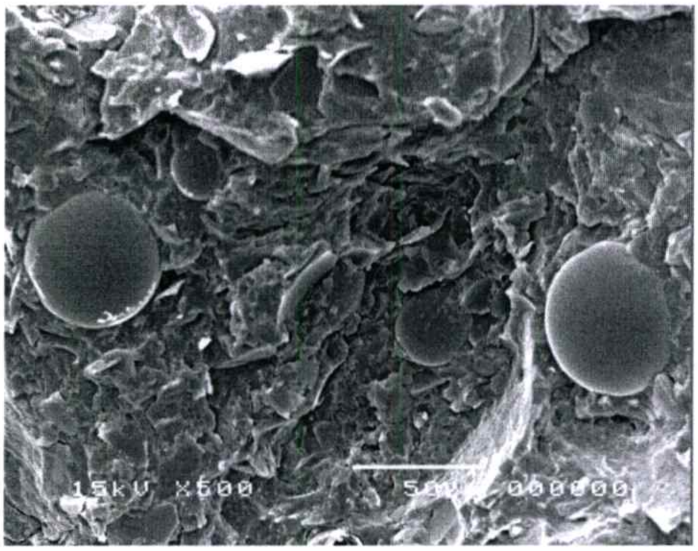
(ข) เส้นใยเบอร์ 2 (50-80 mesh) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ค) เส้นใยเบอร์ 3 (20-50 mesh) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ง) เส้นใยเบอร์ 4 (<20 mesh) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

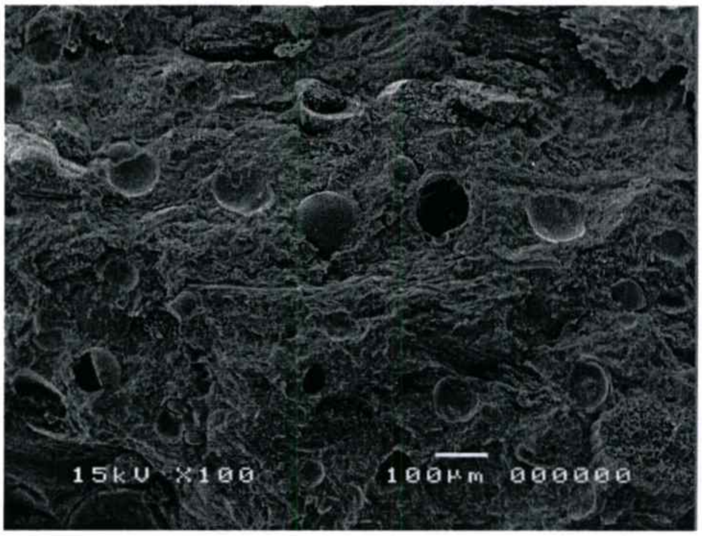


(ก)

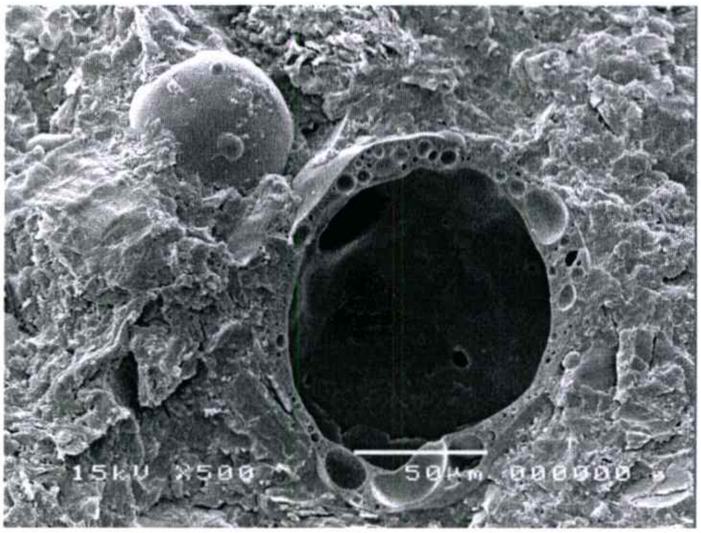


(ข)

รูปที่ 4.37 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) สารช่วยผสม MA-g-PE 2%โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว และสารตัวเติมเม็ดแก้วกลวง K15 20% โดยน้ำหนักของของผสม (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.38 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) สารช่วยผสม MA-g-PE 2%โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว และสารตัวเติมเม็ดแก้วกลวง W300 20% โดยน้ำหนักของของผสม (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

4.10 การเปรียบเทียบสมบัติของ WPC เทียบกับไม้จริงและวัสดุทดแทนไม้บางชนิดที่มีขายและใช้งานในท้องตลาด

ตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติของ WPC กับไม้จริง (ไม้ยางพารา) และวัสดุทดแทนไม้ที่มีขายและใช้งานในท้องตลาด และตารางที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุประเภทต่างๆ พบว่า สมบัติของ WPC ต่ำกว่าไม้จริง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการนำไปใช้งานแล้วอาจกล่าวได้ว่า WPC สามารถที่จะผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ต่างๆได้ หรืออาจผลิตเป็นกรอบหน้าต่าง กรอบประตู ไม้ระแนง ไม้พื้น แต่ไม่สามารถใช้ในส่วนของไม้โครงสร้างซึ่งต้องรับแรงสูง เช่น เสา คาน เป็นต้น สมบัติต่างๆของวัสดุทดแทนไม้ของแต่ละบริษัทมีความแตกต่างกัน เนื่องจากวัถุดิบที่ใช้มีความแตกต่างกัน เช่น พอลิเมอร์ที่ใช้ ชนิดของเส้นใย และสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่วัดได้ ทำให้วัสดุทดแทนไม้ของแต่ละบริษัทมีจุดเด่นในผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า WPC ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียง หรือสูงกว่า WPC หรือวัสดุทดแทนไม้ชนิดอื่นที่มีขายเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการผลิต WPC ในงานวิจัยนี้เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 4.7 สมบัติบางประการของ WPC ในงานวิจัยกับไม้จริงบางชนิด และวัสดุทดแทนไม้ที่มีจำหน่ายในประเทศ

สมบัติ	ไม้ยางพารา	WPC-LLDPE จากงานวิจัย	WPC-PP จากงานวิจัย	WPC-PVC บริษัท A	แผ่นไม้อัดซีเมนต์
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	187.1	22.5	30.2	9	ไม่น้อยกว่า 9
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	19663	1625	2074	2486	ไม่น้อยกว่า 3000
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.6 - 0.7	0.9	1.0	1.17	1.1-1.3
ความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (N)	-	1094	1774	1070	-

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของวัสดุประเภทต่างๆ

ชนิดวัสดุ	**ความหนา (มม.)**	**ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)**	**สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) (วัตต์/ เมตร เควิน)**
อิฐมอญเต็มแผ่น	140.00	1,650	0.473
คอนกรีตบล็อก	70.00	765	0.519
คอนกรีตมวลเบา	75.00	550-640	0.089-0.132
แผ่นไม้อัด	8.00	528	0.138
ไฟเบอร์ซีเมนต์	12.00	1,100-1,300	0.125
แผ่นยิปซัม	12.00	800	0.140-0.190
พอลิยูรีเทน	25.00	35-40	0.017-0.045
ใยแก้ว	25.00	16	0.035
WPC-PP (จากงานวิจัย)	120.00	994	0.255
WPC-PP + K15 (จากงานวิจัย)	120.00	638	0.178

ที่มา : กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2538.

กระทรวงพลังงาน, 2547.

4.11 การวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis)

การวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการแจกแจงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆในการผลิตวัสดุหนึ่งๆ เพื่อใช้ในการประมาณราคาสินค้าเพื่อขาย และใช้เปรียบเทียบราคากับวัสดุที่ต้องการแข่งขัน ซึ่งการวิเคราะห์ต้นทุนในการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ โดยวิเคราะห์เทียบที่น้ำหนักวัตถุดิบ 1 กิโลกรัม และการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต โดยวิเคราะห์เทียบกับการผลิตวัสดุไม้พลาสติกคอมโพสิตใน 1 รอบการผลิต

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าต้นทุนการผลิต WPC มีราคาประมาณ 54 บาทต่อกิโลกรัม โดยราคาที่ได้เป็นราคาที่คิดได้จากการทำวิจัยครั้งนี้ ซึ่งถ้ามีการผลิตจริงจะทำให้ราคาต้นทุนการผลิตลดต่ำลง เนื่องจากปริมาณที่ผลิตได้จะมีปริมาณมากกว่าที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม

สารเคมี	ราคาตลาด[a] (บาท/กิโลกรัม)	WPC-LLDPE (50:50)		WPC-PP (50:50)	
		ปริมาณที่ใช้ (%โดยน้ำหนัก)	ราคาตลาด (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (%โดยน้ำหนัก)	ราคาตลาด (บาท/กิโลกรัม)
LLDPE	54.00	50	27.00	-	-
PP	48.00	-	-	50	24.00
เส้นใยมะพร้าว (เบอร์ 2)	3.00	50	1.50	50	1.50
EnHance®	95.00	5	4.75	5	4.75
WF107	190.00	1.5	2.85	1.5	2.85
Anox®20	430.00	0.025	0.11	0.05	0.11
Alkanox®240	337.00	0.025	0.09	0.05	0.09
Compoline®CO/LL	200.00	1	2.00	-	-
Polybond®3200	200.00	-	-	1	2.00
NPCCA 601 S	150.00	-	-	1	1.50
รวม			38.30		36.80

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต WPC-PP

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย[a]	คิดเป็นเงิน
วัตถุดิบ	2 กิโลกรัม	36.80 บาท/กก.	73.60
ค่าแรง	1 ชั่วโมง	194 บาท/วัน[b]	24.25
ค่าไฟฟ้า	5 หน่วย	2 บาท/หน่วย	10.00
รวมราคาต้นทุนการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต ใน 1 รอบการผลิต (2 กิโลกรัม)[c]			107.85
ราคาต้นทุนการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม			53.92

หมายเหตุ : [a] เป็นราคาโดยประมาณเมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ.2553

[b] ค่าแรงขั้นต่ำในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

[c] ราคานี้ไม่รวมต้นทุนเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคา

เอกสารอ้างอิง

[1] neawna. [Online]. Available: http://www.ryt9.com/s/nnd/896397

[2] NFM welding engineers.2005.**Wood Composite**. [Online]. Available:
http://www.nfm.net/technologies/woodcomposite

[3] [Online]. Available: http://www.siamwoodmall.com

[4] อิทธิพล แจ้งชัด. **พอลิเมอร์คอมโพสิต.** กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการศึกษา:ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[5] [Online]. Available: http://www.siamplastwood.com

[6] Moisture shield professional grade decking. 2005. **Wood Composite**. [Online]. Available: http://www.moistureshield.com/images/productInfo

[7] [Online]. Available: http://www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html

[8] J.I. Kroschwitz. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. 2nd ed. John Wiley & Sons. Neww York. Vol6, 1990. pp. 655.

[9] W.B. Banks.: Lawther. J.M.**Derivatization of Wood in Composition**. in Cellulose Polymer. Blends and Composites.(Gillbert,R.D.ed). Hanser Publishers. New York. 1994. pp. 131-153.

[10] สุชาติ ไทยเพ็ชร. **ไม้: วัสดุจากธรรมชาติ.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้. 2541

[11] กฤษณพงศ์ กีรติกร. โครงการศึกษาแนวทางพัฒนามะพร้าวและผลิตภัณฑ์จากมะพร้าว. กรุงเทพฯ. 2548

[12] เอกสารเผยแพร่. กรมส่งเสริมการเกษตร. มะพร้าวและผลิตภัณฑ์จากมะพร้าว. 2547. [Online]. Available: http://www.doae.go.th

[13] เอกสารเผยแพร่. กรมศุลกากร. การส่งออกเส้นใยมะพร้าว. 2547. [Online]. Available: http://www.customs.go.th

[14] A.K. Bledzki and J. Gassan, **Composites Reinforced with Cellulose Based Fibers,** Prog.Polym.Sci.,24,1999, pp. 221-274.

[15] เอกสารบริษัท CCC CHEMICAL COMMERCE, LTD. 2547.

[16] ปรีชา พหลเทพ. **พอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2540.

[17] J.I Kim., S.H Ryu and Y.W Chang. **Journal of Applied Polymer Science.** Vol. 77, 2000. pp. 2595-2602.

[18] เอกสารบริษัท TOA UNI CHEMICAL MANUFACTURING, LTD. 2546.

[19] M. Xanthos. Functional Fillers for Plastics. Glass and Ceramic Spheres. USA. 2005. pp. 381-385.

[20] เจริญ นาคะสวรรค์. 2546. เทคโนโลยีเบื้องต้นพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. โฟร์เพซ.

[21] Chemicalland21.2546.Aluminiumtrihydrate. [Online]. Available: http://chemicalland21.com/industrialchem/inorganic/aloh3.htm

[22] Lacutid F. and A. Etal.2008. Handbook of Flame Retardant Additives. England.: Master Science.

[23] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ท.

[24] ธีรพัฒน์ อุณหโชค และพจนีย์ ศรธรรมลี. "การศึกษาไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเส้นใยผักตบชวา." โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

[25] กนิษฐา อังกุรรัชต์. "การศึกษาสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

[26] ธาราทิพย์ เขมะศิริ สุภาวดี ขาวนวล และอมรา ขวดบา. "วัสดุประกอบพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยหญ้าแฝกกับพอลิอเลฟินส์ : พีพีและเอชดีพีอี." โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

[27] H.G.B. Premalal, H. Ismail and A. Baharin. "Comparison of The Mechanical Properties of Rice Husk Power Filled Polypropylene Composites with Talc Filler Polypropylene Composites." **Polymer Testing.,** vol.21, 2002. pp. 833-839.

[28] K. Raj, P.J. Herrera-Franco. "Mechanical Properties of Continuous Natural Fiber Reinforced Polymer Composites." **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.** Vol. 35, 2003. pp. 339-345.

[29] M.B. Fermanda, A. Vadez-Gonz'alez. "The Effect of Fiber Improvement on Aspen Fiber for Use in Thermoplastic Composites." **Composites Part A : Applied Science and Manufacturing**.,2006. pp. 80 – 91.

[30] K. Rajeev, K. Mohanty. "Study of Isotactic Polypropylene and Kenaf Fiber." **Composites Science and Technology**.,2006.pp.1 – 12.

[31] C. Chuai, K. Almdal, Poulsen, L. David and D. Plackett, "Conifer Fiber as Reinforceing Materials for Polypropylene-Based Composites." **Journal of Applied Polymer Science.,** vol. 80, no. 14, 2001. pp. 2833-2840.

[32] J.R. Simpson and S.E. Selke. "Composite Materials from Recycle Multilayer Polypropylene Bottles and Wood Fibers." **American Chemical Society.,** 1992. pp. 232-240.

[33] P.W. Balasuriya, K. Pandey, Edwin Bodros. "Polymer Composites from HDPE and Wood Flakes" : A Comparative Study" **Composites Science and Technology**., 2007. pp. 102-110.

[34] B.F Abu-Sharkh, H. Hamid. "Degradation study of date palm fibre/polypropylene Composites in natural and artificial weathering : mechanical and thermal analysis" **Polymer Degradation and Stability**., 2004. pp. 967-973.

[35] K. Joseph, S. Thomas and C. Pavethran. "Tensile Properties of Short Sisal Fiber-Reinforced Polyethylene Composite." Applied Polymer Science., vol. 47, 1993. pp. 1731-1739.

[36] T.Q. Li and C.M. Chan. "Impact Strength of Composite : PP and Pine Fiber." Journal of Applied Polymer Science. Vol. 76, no. 7, 2000. pp. 100-1010.

[37] L. Avérous, F. Le Digabel."Properties of Biocomposites based on lignocellulosic fillers" **Carbohydrate Polymers**., 2006. pp. 480-493.

[38] K.L. Pickering, A. Abdalla, A.G. Mcdonald, and R.A. Franich. "The Effect of Silane Coupling Agents on Radiate Pine Fiber for Use in Thermal Plastic Matrix Composites." **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.** 2003.

[39] เอกสารประกอบการศึกษา. อิทธพล แจ้งชัด. ฟิสิกส์พอลิเมอร์. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

[40] ASTM D 256. "Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials." Philadelphia: **American Society for Testing and Materials.** 1993.

[41] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 966-2547. "แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง" สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

[42] ASTM D 785. "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastic and Electrical Insulation Material." Philadelphia: **American Society for Testing and Materials.** 1993.

[43] ASTM D 570. "Standard Test Methods for Water Absorption of Plastics." Philadelphia: **American Society for Testing and Materials.** 1993.

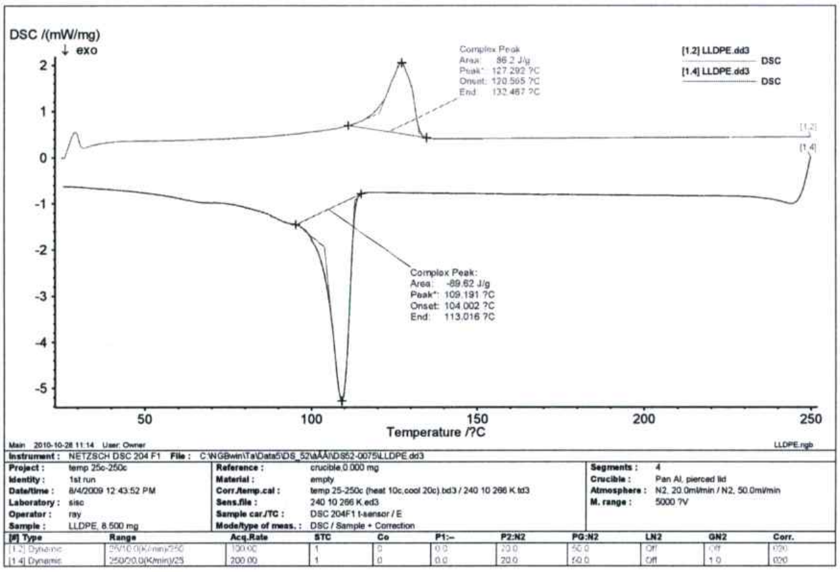
[44] L.A. Utracki. Polymer Blends Handbook. Netherlands. 2003.

[45] DuPont.2005. **Fusabond.** [Online]. Available: http://www.dupont.com/industrialpolymers/plastics/polymers/fusabond.html

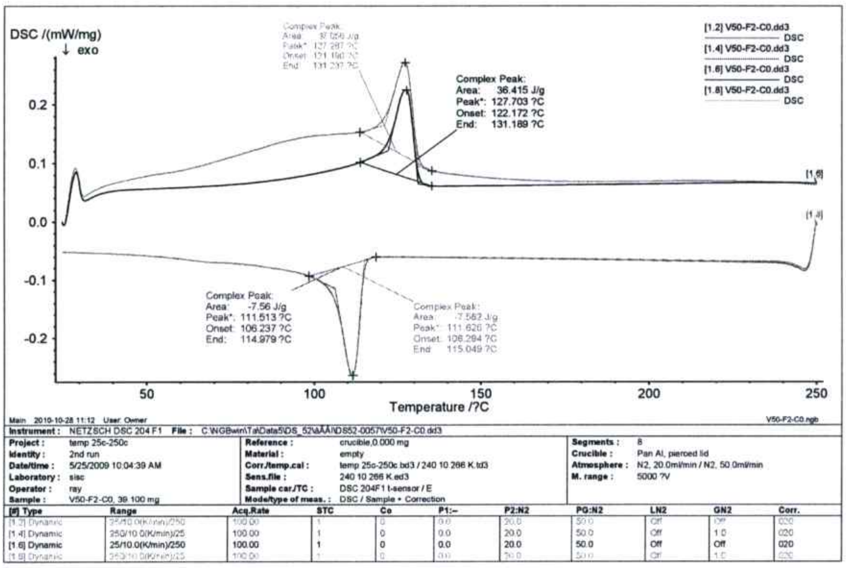
[46] H. Derek. "An Introduction to Composite Materials". New York. USA. 1981. pp. 41.

ภาคผนวก

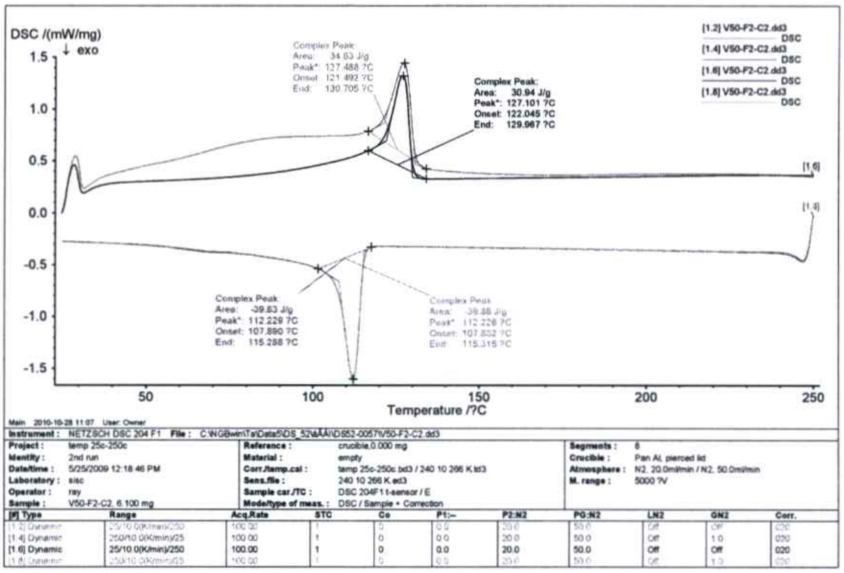
ภาคผนวก ก. กราฟที่ได้จากเครื่อง DSC ของไม้พลาสติกคอมโพสิต



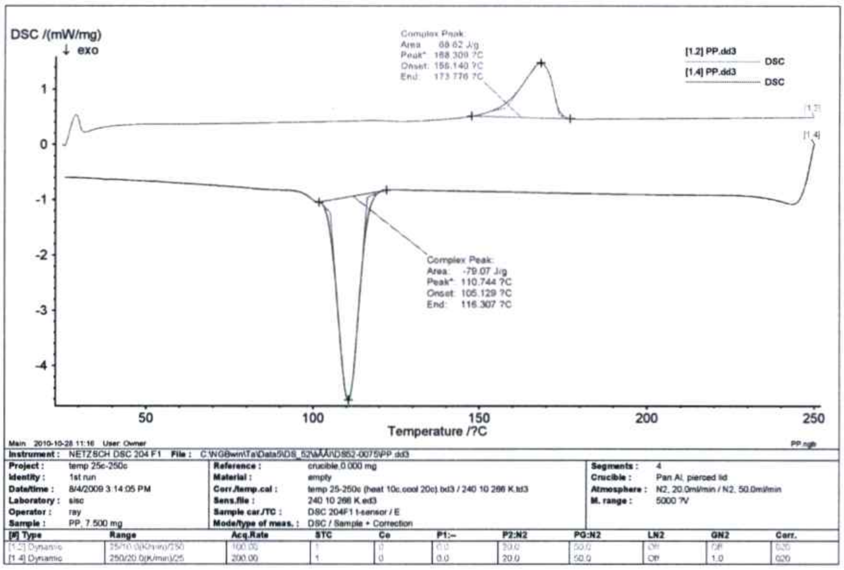
รูปที่ ก-1 กราฟจากเครื่อง DSC ของ LLDPE



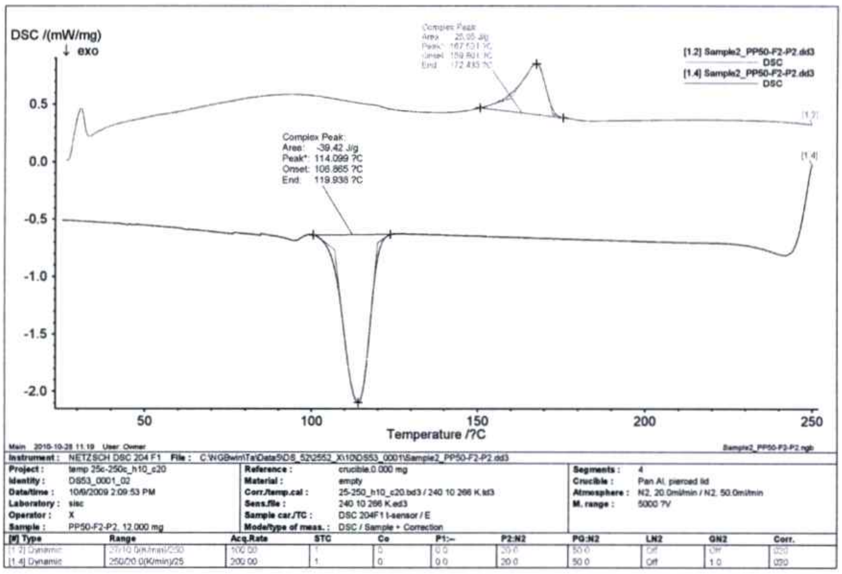
รูปที่ ก-2 กราฟจากเครื่อง DSC ของWPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50)



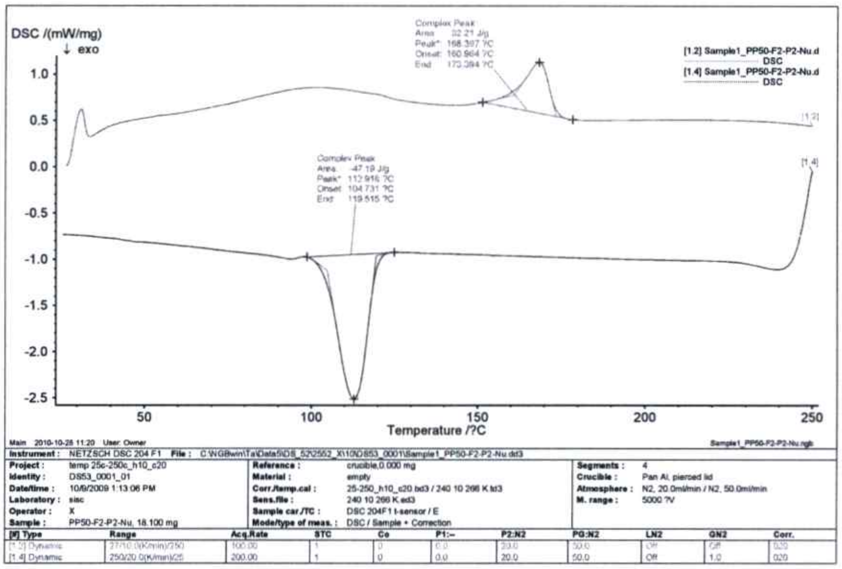
รูปที่ ก-3 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) และสารช่วยผสม MA-g-PE 2% ของเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ ก-4 กราฟจากเครื่อง DSC ของ PP



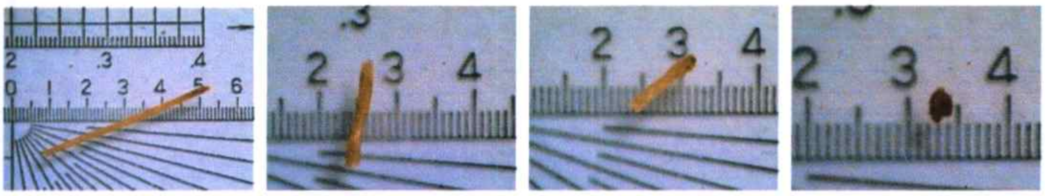
รูปที่ ก-5 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) และสารช่วยผสม MA-g-PP 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว



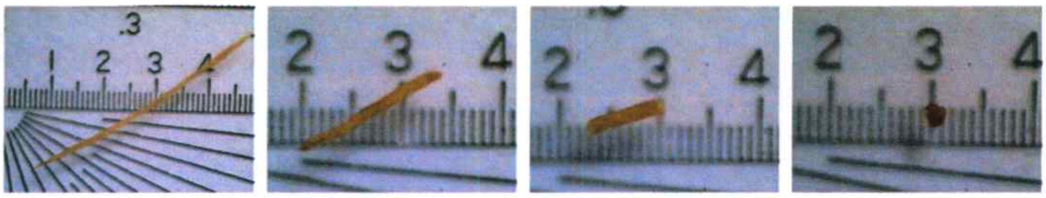
รูปที่ ก-6 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:Coir = 50:50) และสารช่วยผสม MA-g-PP 2% ของเส้นใยมะพร้าว ที่เติมสารก่อนิวเคลียส 1% โดยน้ำหนักของพลาสติก

ภาคผนวก ข. ภาพของเส้นใยมะพร้าว

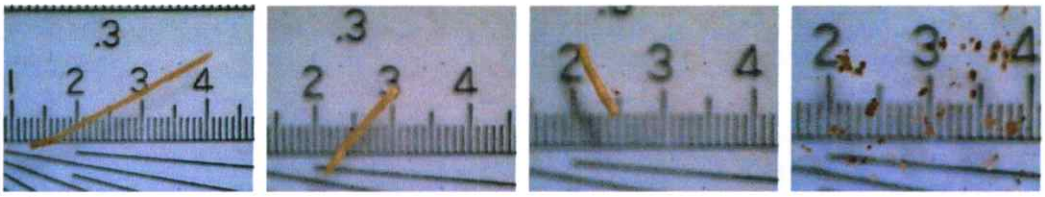
รูปที่ ข-1 ภาพถ่ายแสดงขนาดและความยาวของเส้นใยมะพร้าวขนาด >80 mesh (เบอร์ 1)



รูปที่ ข-1.1 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 100

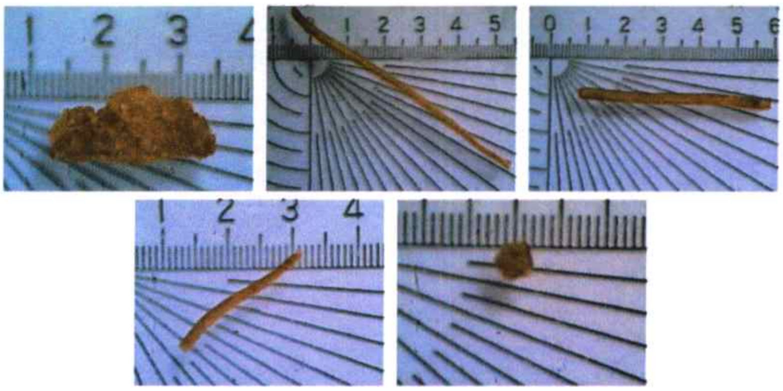


รูปที่ ข-1.2 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 120

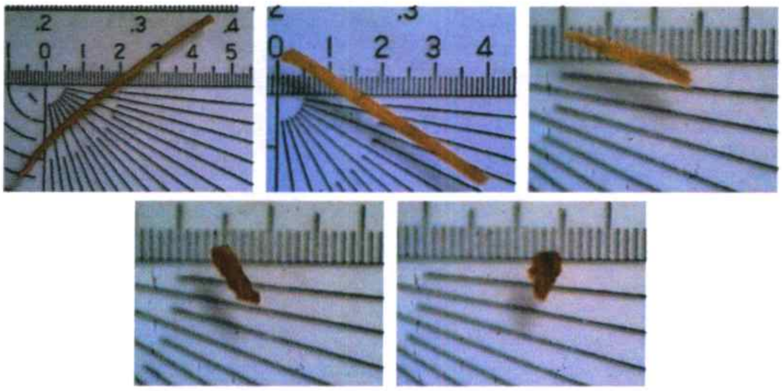


รูปที่ ข-1.3 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh มากกว่า 120

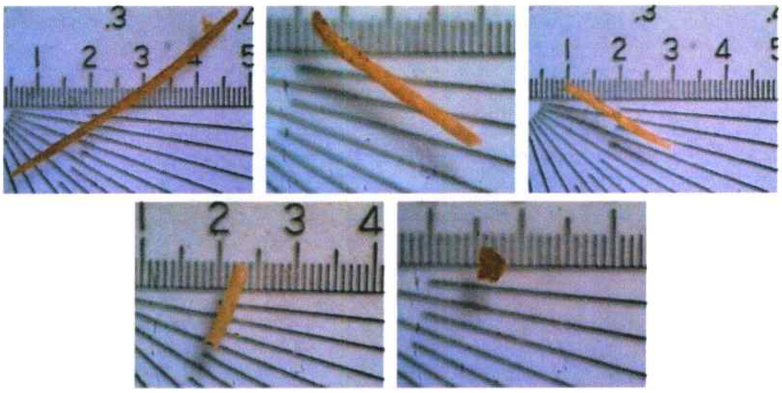
รูปที่ ข-2 ภาพถ่ายแสดงขนาดและความยาวของเส้นใยมะพร้าวขนาด 50 - 80 mesh (เบอร์ 2)



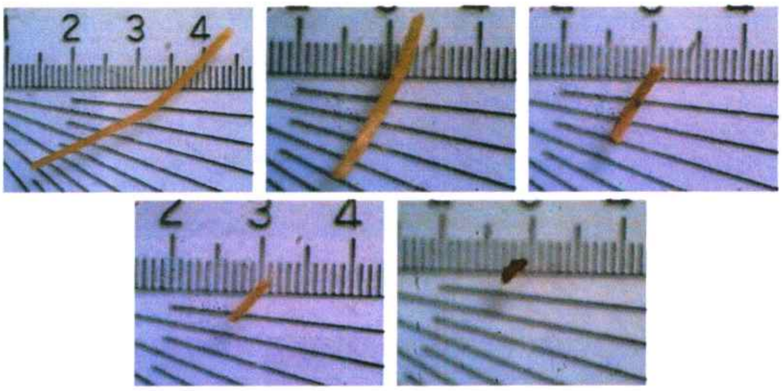
รูปที่ ข-2.1 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 60



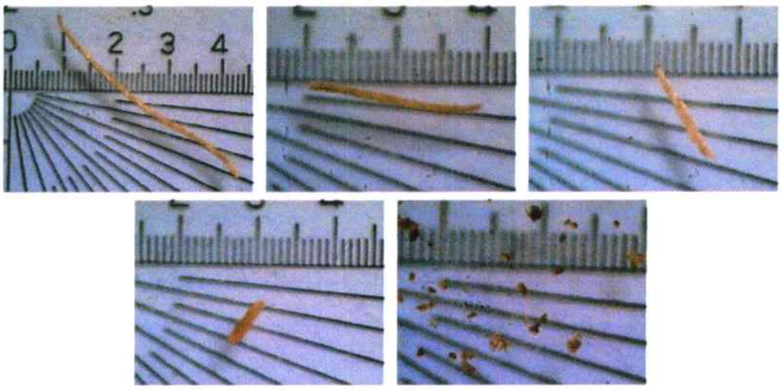
รูปที่ ข-2.2 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 80



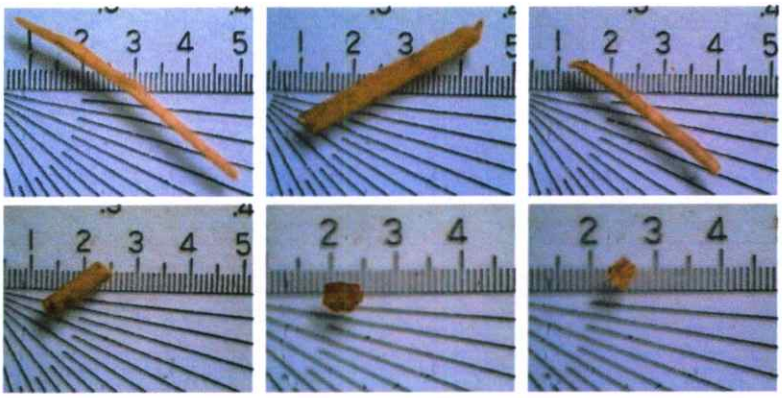
รูปที่ ข-2.3 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 100



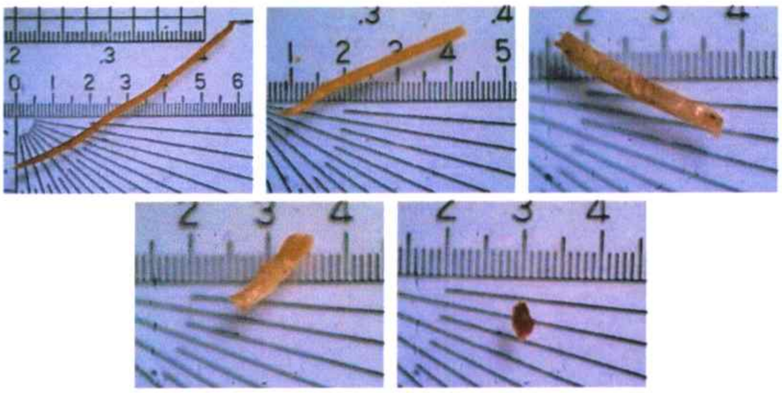
รูปที่ ข-2.4 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 120



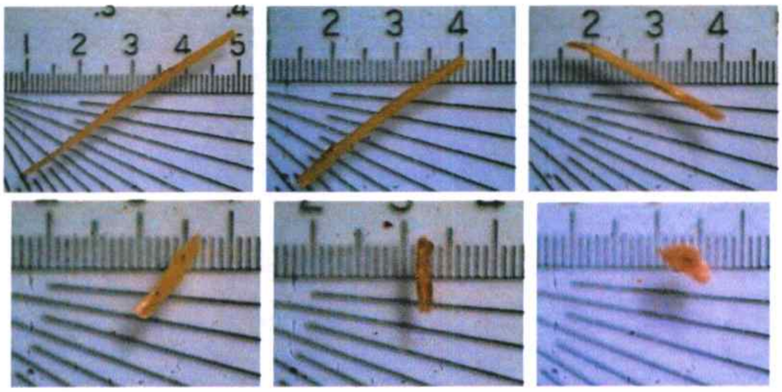
รูปที่ ข-2.5 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh มากกว่า 120



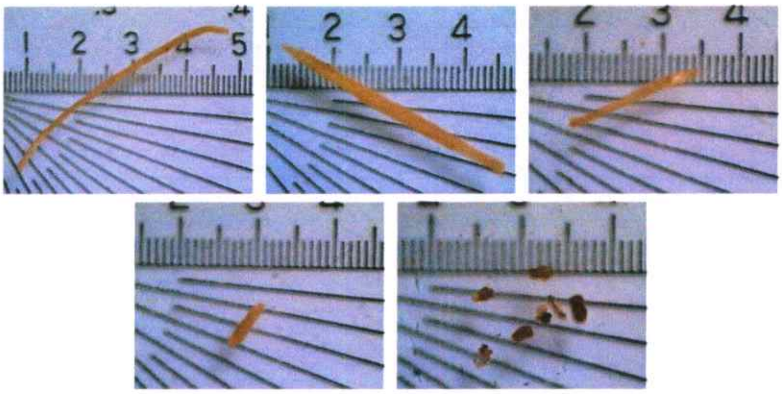
รูปที่ ข-3.3 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 60



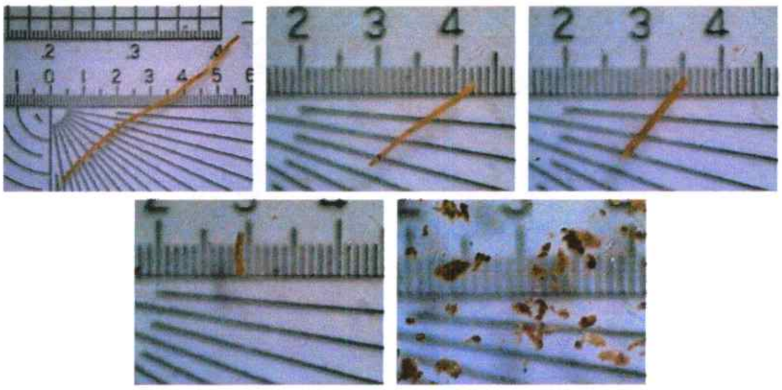
รูปที่ ข-3.4 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 80



รูปที่ ข-3.5 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 100



รูปที่ ข-3.6 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 120

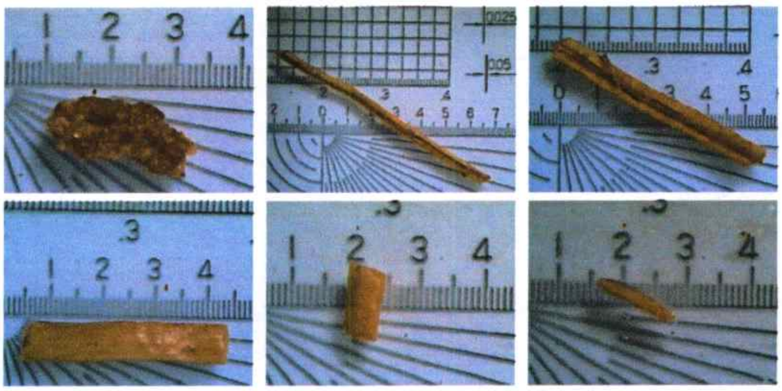


รูปที่ ข-3.7 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh มากกว่า 120

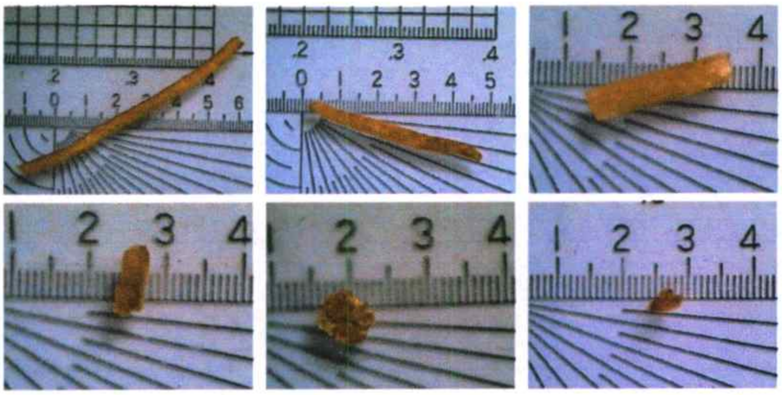
รูปที่ ข-4 ภาพถ่ายแสดงขนาดและความยาวของเส้นใยมะพร้าวขนาด <20 mesh (เบอร์ 4)

รูปที่ ข-4.1 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 12

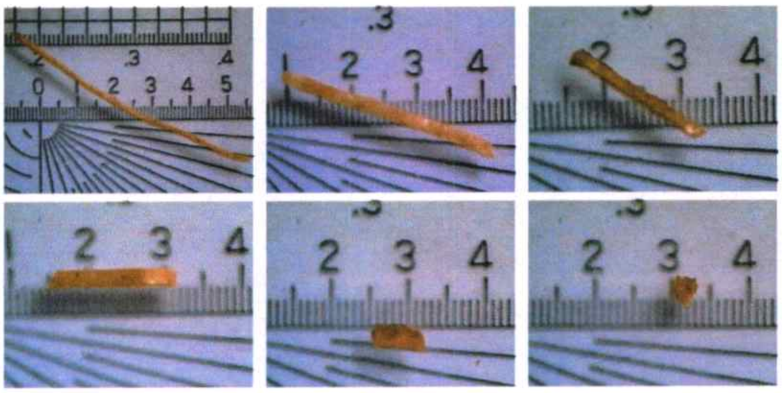
รูปที่ ข-4.2 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 20



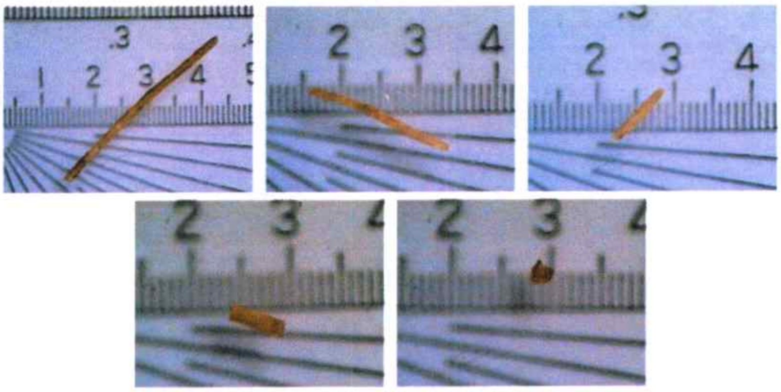
รูปที่ ข-4.3 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 40



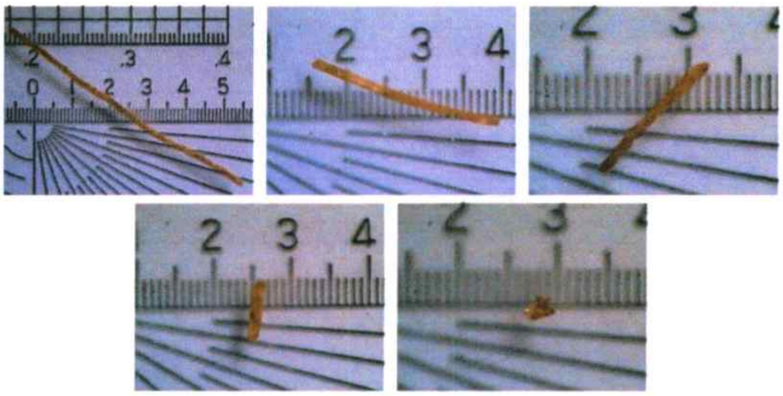
รูปที่ ข-4.4 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ค้างอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 60



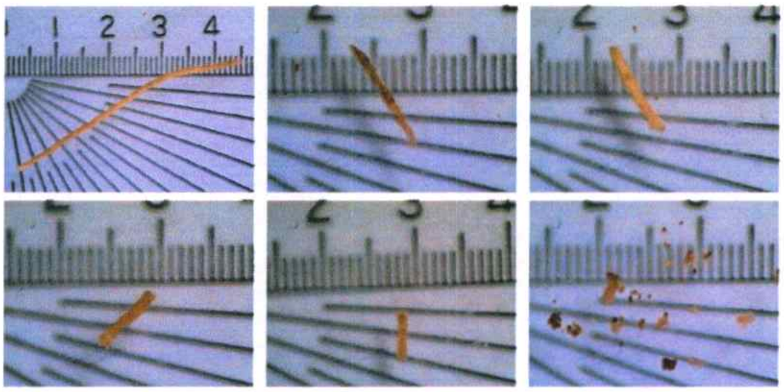
รูปที่ ข-4.5 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 80



รูปที่ ข-4.6 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 100



รูปที่ ข-4.7 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh เบอร์ 120



รูปที่ ข-4.8 ขนาดเส้นใยมะพร้าว ที่ลอดผ่านอยู่บนตะแกรง Mesh มากกว่า 120

ภาคผนวก ค. การทดสอบสมบัติเชิงกลของ WPC

ตารางที่ ค-1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าว

สมบัติเชิงกล	อัตราส่วนระหว่างพลาสติกกับเส้นใยมะพร้าว			
	100/0	70/30	60/40	50/50
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	18 ± 1	5.2 ± 0.28	5.3 ± 0.36	4.1 ± 0.37
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	14.1 ± 0.5	16.5 ± 0.7	15.7 ± 0.7	18.2 ± 0.3
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	603 ± 5.3	1153 ±102	1347 ± 46.3	1404 ± 18.2
ความแข็งกด (Shore D)	49 ± 0.3	50 ± 0.8	50.3 ± 0.9	51 ± 0.9
ความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (N)	800 ± 58	897 ± 47.9	912 ± 34	980 ± 40.5

ตารางที่ ค-2 การศึกษาผลของปริมาณสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์

สมบัติเชิงกล	ปริมาณสารช่วยผสม (% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว)			
	0	1	2	3
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	4.1 ± 0.37	3.89 ± 0.4	2.88 ± 0.3	2.66 ± 0.2
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	18.2 ± 0.3	20.7 ± 0.9	22.5 ± 1.2	23.1 ± 1.1
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	1404 ± 18.2	1497 ± 57	1625 ± 55	1652 ± 57
ความแข็งกด (Shore D)	51 ± 0.9	49.9 ± 1.1	51.1 ± 0.5	51.7 ± 0.8
ความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (N)	781 ± 36	850 ± 55	1094 ± 75	1088 ± 54

ตารางที่ ค-3 การศึกษาผลของขนาดเส้นใย

สมบัติเชิงกล	ขนาดเส้นใยมะพร้าวเชิงกล (mesh)			
	> 80	50 - 80	20 - 50	< 20
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.61 ± 0.3	2.88 ± 0.3	2.73 ± 0.2	1.97 ± 0.2
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	18.2 ± 0.3	22.5 ± 1.2	22.5 ± 1.2	23.1 ± 1.1
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	1420 ± 47.1	1625 ± 55	1576.5 ± 58	1404 ± 63
ความแข็งกด (Shore D)	50.3 ± 0.9	51.1 ± 0.5	51.4 ± 0.8	53 ± 1.0
ความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (N)	977 ± 35	1094 ± 75	900 ± 52	862.8 ± 32

ตารางที่ ค-4 การศึกษาผลของเม็ดแก้วกลวง

สมบัติเชิงกล	ชนิดของเม็ดแก้วกลวง (20% โดยน้ำหนักของของผสม)		
	0	K15	W300
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.46 ± 0.1	1.97 ± 0.1	2.19 ± 0.2
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	28.7 ± 2	25.9 ± 1.0	22.1 ± 1.5
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	1983 ± 99	1813 ± 88	1937 ± 65
ความแข็งกด (Shore D)	55.9 ± 1.4	58.2 ± 1.7	56.1 ± 1.2
ความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (N)	1665 ± 94	1499 ± 57	1609 ± 94

ตารางที่ ค-5 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-LLDPE ที่เติมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณต่างๆ

วันที่	อัตราส่วนระหว่าง LLDPE ต่อเส้นใยมะพร้าว		
	70/30	60/40	50/50
2	0.99	1.80	3.10
4	1.77	2.70	4.40
6	2.30	3.40	5.10
8	2.60	4.32	5.70
10	3.40	4.90	6.30
12	3.54	5.80	6.96
14	3.77	6.40	7.40
16	3.83	6.90	7.93
18	3.90	7.20	8.20
20	3.93	7.34	8.45
22	3.99	7.55	8.67
24	4.11	7.60	8.98
26	4.15	7.72	9.26
28	4.19	7.79	9.45
30	4.23	7.81	9.69
32	4.28	7.84	9.81
34	4.32	7.86	9.84
36	4.34	7.88	9.87
38	4.41	7.91	9.89
40	4.45	7.91	9.90
42	4.45	7.91	9.90
44	4.45	7.91	9.90
46	4.45	7.91	9.90

ตารางที่ ก-6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-LLDPE (LLDPE:Coir = 50:50) ที่ใส่สารช่วยผสม MA-g-PE ในปริมาณต่างๆ

วันที่	ปริมาณสารช่วยผสม (% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว)			
	0	1	2	3
2	3.10	3.00	3.10	2.70
4	4.40	4.20	4.40	3.65
6	5.10	4.89	5.10	4.70
8	5.70	5.40	5.00	4.91
10	6.30	6.00	5.30	5.13
12	6.96	6.70	5.70	5.31
14	7.40	70	5.70	5.65
16	7.93	7.44	6.31	6.00
18	8.20	7.61	6.47	6.25
20	8.45	7.79	6.79	6.42
22	8.67	8.00	7.40	6.89
24	8.98	8.13	7.62	7.02
26	9.26	8.59	7.82	7.49
28	9.45	8.87	7.93	7.71
30	9.69	9.19	7.99	7.89
32	9.81	9.45	8.25	8.09
34	9.84	9.51	8.39	8.15
36	9.87	9.56	8.40	8.16
38	9.89	9.57	8.40	8.16
40	9.90	9.57	8.40	8.17
42	9.90	9.57	8.40	8.17
44	9.90	9.57	8.40	8.17
46	9.90	9.57	8.40	8.17

ตารางที่ ค-7 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ WPC-PP (PP : Coir = 50:50) ที่ใส่สารช่วยผสม MA-g-PE 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยมะพร้าว และเม็ดแก้วกลวงชนิดต่างๆที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของของผสม

วันที่	ชนิดของเม็ดแก้วกลวง (20% โดนย้ำหนักของของผสม)		
	0	K15	W300
2	5.00	4.90	2.10
4	5.30	5.30	2.90
6	5.70	5.50	3.29
8	5.70	5.84	4.16
10	6.31	6.10	4.89
12	6.47	6.30	5.10
14	6.79	6.42	5.43
16	7.40	6.51	5.60
18	7.62	6.58	5.79
20	7.82	6.71	5.92
22	7.93	6.90	6.04
24	7.99	7.13	6.10
26	8.25	7.15	6.12
28	8.39	7.15	6.12
30	8.40	7.15	6.12
32	8.40	7.15	6.12
34	8.40	7.15	6.12
36	8.40	7.15	6.12
38	8.40	7.15	6.12
40	8.40	7.15	6.12
42	8.40	7.15	6.12
44	8.40	7.15	6.12
46	8.40	7.15	6.12

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	กนกอร แสงสุวรรณ
วันเกิด	12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2527
สถานที่เกิด	ปัตตานี ประเทศไทย
การศึกษา	ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง พ.ศ. 2547-2550
ผลงานวิจัย	การศึกษาพอลิเมอร์ไบโอคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยธรรมชาติ