

ไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยปาล์มน้ำมัน:  
เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า, เส้นใยทางใบ และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม

**WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPCS) FROM POLYPROPYLENE  
AND OIL PALM FIBERS: EMPTY FRUIT BUNCH FIBERS,  
FROND FIBERS AND MESOCARP FIBERS**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2557

**KMITL-2014-SC-M-014-028**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**WOOD PLASTIC COMPOSITES (WPCS) FROM POLYPROPYLENE  
AND OIL PALM FIBERS: EMPTY FRUIT BUNCH FIBERS,  
FROND FIBERS AND MESOCARP FIBERS**



**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**

**2014**

**KMITL-2014-SC-M-014-028**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2014**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิทยาศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

**หัวข้อวิทยานิพนธ์**

ไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยปาล์มน้ำมัน:  
 เส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า, เส้นใยทางใบ และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม  
 Wood Plastic Composites (WPCS) from Polypropylene and  
 Oil Palm Fibers: Empty Fruit Bunch Fibers, Frond Fibers and  
 Mesocarp Fibers

**นักศึกษา**

นางสาวจินตนา สุขสวัสดิ์

**รหัสประจำตัว**

52651213

**ปริญญา**

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา**

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์**

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

นายวรรณ อุ่นจิตติชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรัชญาวรากร	
ผศ.ดร.สุภารัตน์	รักชลธิ์	
รศ.ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	
นายวรรณ	อุ่นจิตติชัย	
รศ.ดร.อิทธิพล	แจ่มชัด	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 09.30 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 301 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภนิ ธีระบริพัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีน (PP) และ  
เส้นใยปาล์มน้ำมัน: เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า,  
เส้นใยทางใบและเส้นใยเปลือกผลปาล์ม

นักศึกษา

นางสาวจินตนา สุขสวัสดิ์

รหัสประจำตัว

52651213

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

พ.ศ.

2557

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

นายวรธรรม อุ่นจิตติชัย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites; WPCs) จากพอลิพรอพิลีน (Polypropylene; PP) และเส้นใยธรรมชาติจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch Fibers; EFBF) เส้นใยทางใบ (Frond Fibers; FF) เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF) เพื่อนำมาเป็นวัสดุทดแทนไม้ โดยควบคุมอัตราส่วนพลาสติกต่อเส้นใยที่ 50:50 ทำการผสมสูตรด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill) นำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของ WPCs ได้แก่ ชนิดเส้นใย ขนาดเส้นใย องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย การเติมสารช่วยผสม (PP-g-MA) ผลของการเตรียมเส้นใยเปลือกผลปาล์มด้วยกระบวนการเชิงกล (MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil; CPO) ออกจากเส้นใย และผลของปริมาณ CPO ที่เพิ่มในเส้นใย จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยพบว่า เส้นใย EFBF มีความยาวมากที่สุด และเส้นใย FF สั้นที่สุด ส่วนเส้นใย MF-TMP มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า MF-MP พบว่าเส้นใย MF มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมากที่สุด ซึ่งบอกถึงความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใย จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเส้นใย EFBF มีทั้งผิวเรียบและขรุขระ ต่างจากเส้นใย FF และเส้นใย MF ที่มีพื้นผิวขรุขระ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC) พบว่า องศาความเป็นผลึกของ WPC-MF มีมากกว่า WPC-EFBF และ WPC-FF จากผลการศึกษาปริมาณของสารช่วยผสม PP-g-MA พบว่า สมบัติเชิงกลของ WPCS สูงขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสม และ WPC-MF ที่เติมสารช่วยผสม 2 % ให้ผลเชิงกลดีที่สุด จากผลของการเปรียบเทียบการเตรียมเส้นใยจากกระบวนการ MP และ TMP พบว่า สมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อไ้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงกลของ WPC-MF-TMP สูงกว่า WPC-MF-MP เล็กน้อย จากผลการสกัดน้ำมันออกจากเส้นใย MF-MP WPCs ที่ใช้เส้นใย MF ที่ถูกสกัดน้ำมันออกมามีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า WPCs ที่เส้นใยมีน้ำมันเหลืออยู่ อย่างไรก็ตามน้ำมันตกค้างเหลืออยู่เกินความต้องการ อาจทำให้เกิดการลื่นไถล เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการผสมเส้นใยและพลาสติกต่ำ จากการทดลองขึ้นรูปเชิงพาณิชย์ด้วย เทคนิคอัดรีด (Extrusion) พบว่าได้ไม้เทียม WPC ที่มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าไม้อัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547



**คำสำคัญ :** ไม้พลาสติกคอมโพสิต, วัสดุทดแทนไม้, พอลิพรอพิลีน, เส้นใยทะเลสาบปาล์มเปลา,

**เส้นใยทางใบ, เส้นใยเปลือกผลปาล์ม, น้ำมันปาล์มดิบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Wood Plastic Composites (WPCS) made from Polypropylene (PP) and Oil Palm Fibers : Empty Fruit Bunch Fibers (EFBF), Frond Fibers (FF) and Mesocarp Fibers (MF)
<b>Student</b>	Miss Jintana Suksawat
<b>Student ID</b>	52651213
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2014
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud
<b>Thesis Co-advisor</b>	Mr. Woratham Oonjittichai

### ABSTRACT

This research work was focused on Wood Plastic Composites (WPCs) made from polypropylene (PP) and natural fibers from oil palm industries, i.e., Empty Fruit Bunch Fibers (EFBF), Frond Fibers (FF), and Mesocarp Fibers (MF) as artificial woods. Ratio of PP and fibers was fixed at 50:50 by weight. PP, fibers and other additives were mixed and compounded by a two-roll mill and then shaped by a compression molding machine. Parameters affecting WPC properties were studied including types of palm fibers, fiber sizes, chemical composition of fibers, and %compatibilizer (maleic anhydride grafted polypropylene; PP-g-MA) loading. Comparative study of WPCs made from mechanical pulp (MP) and thermo-mechanical pulp (TMP) was also studied. Effects of oil extraction and crude palm oil (CPO) adding were investigated. From size analysis of palm fibers, it was found that EFBF was the longest than other while FF was the shortest fibers. MF-TMP had smaller diameter than MF-MP. MF had the highest amount of  $\alpha$ -cellulose resulting in better mechanical properties. Morphology of fractured WPCs was studied by scanning electron microscope (SEM). It was revealed that EFBF had both smooth and rough surfaces whereas FF and MF had only rough surfaces. Differential scanning calorimeter (DSC) results revealed that crystallinity of WPC-MF was higher than those of WPC-EFBF and WPC-FF. It was found that mechanical properties of WPCs were increased as PP-g-MA was added. WPC-MF with 2% PP-g-MA yielded the highest mechanical properties compared to

others. By comparing WPCs made from MP and TMP, it seemed that mechanical properties of WPC-TMP were slightly higher than those of WPC-MP. It was found that WPCs made from oil-extracted MF had deteriorated mechanical properties compared to that made from non-extracted one. However, fibers with high amount of CPO might cause slippage yielding poor mixing efficiency. Finally, optimum formula of WPCs from this work was tested for processability in commercialized extrusion production line. It was found that WPCs extrudates from this work possessed better mechanical properties compared to commercial particle board according to Thai Industrial Standards Institute (TISI 966 – 2547).



**Keywords :** Wood Plastic Composites (WPCs), Artificial wood, Polypropylene (PP), Empty Fruit Bunch (EFBF), Frond Fibers (FF), Mesocarp Fibers (MF), Crude oil palm (CPO).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยการได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการทำงานวิจัยในวิจัยครั้งนี้จาก รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วรรณธรรม อุ๋นจิตติชัย นักวิชาการป่าไม้ และเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม และเป็นผู้เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการเตรียมเส้นใยปาล์มในงานวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนคำแนะนำงาน ไม้และข้อชี้แนะ ทำให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และรศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สจล. และเจ้าหน้าที่กรมป่าไม้ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้และช่วยเหลือในการทำงานวิจัยมาตั้งแต่ต้นจนจบ

ขอขอบพระคุณ บริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด ในความอนุเคราะห์เส้นใยปาล์มและน้ำมันปาล์มดิบสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท เบ็น ไมเยอร์ (ที) จำกัด ในความอนุเคราะห์ให้สารช่วยกระบวนการสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท ออฟติมอล เทค จำกัด ในความอนุเคราะห์ให้สารป้องกันการเกิดแอนติออกซิเดชัน และพอลิพรอพิลีนตอกกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดไรด์เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท บริษัท เอ็ม บี เจ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ในความอนุเคราะห์ขึ้นรูป WPC จากเส้นใยปาล์มในเชิงพาณิชย์เพื่อนำไปทดสอบสำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัยที่คอยให้กำลังใจที่ดีและสนับสนุนช่วยเหลือตลอดในงานวิจัย ขอขอบคุณแรงบันดาลใจ พลังใจที่ได้มาจากพี่อ๊อฟ ปานเจริญทุกครั้งที่ได้เจอจนทำให้งานวิจัยสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จินตนา สุขสวัสดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>6</b>
2.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers).....	6
2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose) .....	6
2.1.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส .....	8
2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses).....	8
2.1.3 ลิกนิน (Lignin).....	9
2.2 ไม้และเส้นใยไม้ (Wood and Fibers).....	11
2.2.1 ชนิดของไม้.....	11
2.3 ปลายน้ำมัน .....	12
2.3.1 ความสำคัญและศักยภาพของปลายน้ำมัน .....	12
2.3.2 สมบัติของเส้นใยไม้.....	13
2.3.2.1 โครงสร้างทางกายภาพ .....	13
2.3.2.2 องค์ประกอบทางเคมีและการเรียงตัวของ โมเลกุล .....	13
2.3.3 เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF).....	13
2.3.4 เส้นใยใบหรือทางใบ (Frond Fibers; FF).....	15
2.3.5 เส้นใยทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า (Empty Fruit Bunch Fibers; EFBF).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.6 น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil; CPO).....	18
2.4 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene).....	19
2.4.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน.....	20
2.4.2 การประยุกต์ใช้งาน.....	21
2.4.3 โคพอลิเมอร์ (Copolymer).....	22
2.4.3.1 พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random Copolymer).....	22
2.4.3.2 พอลิเมอร์ร่วมชนิดรับแรงกระแทก (High Impact Copolymer).....	22
2.4.3.3 อะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic Polypropylene).....	23
2.5 พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene Grafted Maleic Anhydride; PP-g-MA).....	23
2.6 การตกผลึกในพอลิเมอร์.....	24
2.7 วัสดุคอมโพสิต (Composites).....	25
2.7.1 เมทริกซ์.....	26
2.7.1.1 เทอร์โมเซต (Thermoset).....	26
2.7.1.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic).....	27
2.7.2 สารเสริมแรง.....	27
2.7.3 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites).....	28
2.7.4 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต.....	29
2.8 ไม้พลาสติก (Wood Plastic Composites; WPC).....	30
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>39</b>
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.4 วิธีการทดลอง.....	43
3.4.1 การเตรียมเส้นใยปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการเชิงกล (Mechanical Pulp; MP).....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ VII ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2 การเตรียมเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) ด้วยกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermo Mechanical Pulp; TMP).....	43
3.4.3 วิเคราะห์ผลของขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	43
3.4.4 ขั้นตอนการผสม.....	44
● ..... ศึกษาผลของชนิดของเส้นใยปาล์มที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) กระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) และปริมาณการเติมสารช่วยผสม.....	44
ศึกษาผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม.....	45
● ผลของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่เพิ่มในเส้นใยปาล์ม.....	46
3.4.5 การทดสอบ.....	46
3.4.5.1 สมบัติเชิงกล.....	46
3.4.5.2 สมบัติกายภาพ.....	48
3.4.5.3 สมบัติทางความร้อนด้วย (Differential Scanning Calorimeter; DSC).....	50
3.4.5.4 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	51
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>52</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยปาล์ม.....	52
4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	60
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มน้ำมัน.....	63
4.4 สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimetry; DSC).....	64
4.5 ผลการศึกษาชนิดของเส้นใยปาล์มและปริมาณการเติมสารช่วยผสม ที่มีผลต่อสมบัติ WPC.....	66
4.6 WPC ของเส้นใยเปลือกผลปาล์ม MF-MP และ MF-TMP.....	69
4.7 ผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม.....	72
4.8 ผลของน้ำมันปาล์มดิบที่ตกค้างในเส้นใยปาล์มหลังจากการบีบ.....	75

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.9 ผลการทดลองขึ้นรูป WPC ของเส้นใยเปลือกผลปาล์มในเชิงพาณิชย์และเปรียบเทียบสมบัติของ WPC เทียบกับไม้จริงและวัสดุทดแทนไม้บางชนิด.....	79
4.10 ผลการวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis).....	81
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>84</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>87</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>92</b>
ภาคผนวก ก. กราฟที่ได้จากเครื่อง DSC ของไม้พลาสติกคอมโพสิต.....	92
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>99</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ศึกษาภาพการผลิตน้ำมันของพืชน้ำมันชนิดต่างๆ ..... 12
2.2	สมบัติของไฮโมพอลิเมอร์พอลิพรอพิลีน ..... 21
2.3	สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มของพอลิพรอพิลีน ..... 22
2.4	สมบัติของพอลิพรอพิลีนชนิดรับแรงกระแทก ..... 23
3.1	สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีน โคพอลิเมอร์ที่ใช้ในการวิจัย ..... 40
3.2	สมบัติบางประการของสารช่วยผสม PP-g-MA (Polybond 3200) ที่ใช้ในงานวิจัย ..... 40
3.3	สมบัติบางประการของน้ำมันปาล์มดิบ ..... 41
3.4	อัตราส่วนผสมของสูตรต่างๆ ..... 44
3.5	มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต ..... 50
4.1	การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่าที่ผ่านกระบวนการเชิงกล ..... 53
4.2	การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยทางใบที่ผ่านกระบวนการเชิงกล ..... 54
4.3	การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการเชิงกล ..... 55
4.4	การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล ..... 56
4.5	สรุปผลการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีสัดส่วนมากที่สุดในแต่ละเส้นใย ..... 57
4.6	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์ม ..... 63
4.7	ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และค่าองศาความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วย DSC ..... 64
4.8	สมบัติบางประการของ WPC เทียบกับไม้จริงบางชนิด ..... 79
4.9	การเปรียบเทียบผลกับค่าตามเป้าหมายของงานวิจัย ..... 80
4.10	การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม ..... 81
4.11	การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต WPC-PP ..... 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ปริมาณการรอกซ์ประกอบของต้นปาล์มน้ำมันและผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ไทยผลิตได้ (สิ้นสุดเดือนธันวาคม พ.ศ.2550) .....	3
1.2 ปริมาณน้ำมันดิบ ช่วงปี 2551-2555.....	4
2.1 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส .....	6
2.2 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส.....	7
2.3 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส.....	7
2.4 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส .....	9
2.5 หน่วยที่ซ้ำกันในโครงสร้างของลิกนิน .....	9
2.6 ตัวอย่างโมเลกุลของลิกนิน .....	10
2.7 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในไม้.....	11
2.8 ผลปาล์มน้ำมัน.....	14
2.9 เส้นใยเปลือกผลปาล์มที่บีบน้ำมันแล้วที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดเล็กกว่า 80 mesh.....	14
2.10 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม.....	15
2.11 เส้นใยทางใบปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดเล็กกว่า 80 mesh.....	16
2.12 ทะลายปาล์มเปล่าที่เหลือจากการบีบน้ำมันปาล์มออก บริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด .....	17
2.13 เส้นใยทะลายปาล์มเปล่าที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดน้อยกว่า 80 mesh.....	18
2.14 น้ำมันปาล์มดิบ (CPO) จากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม .....	18
2.15 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน .....	19
2.16 โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน .....	20
2.17 โครงสร้างของซินไดโอแทกติกพอลิพรอพิลีน.....	20
2.18 โครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน .....	20
2.19 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	24
2.20 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน .....	28
2.21 ประเภทของคอมโพสิต .....	28
3.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดเส้นใย (Screen Analysis Instrument).....	44
3.2 การต่ออุปกรณ์ soxhlet extraction และภาพการสกัดเส้นใยเปลือกผลปาล์ม .....	45
3.3 ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ .....	47
3.4 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ลักษณะการทดสอบความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว .....	48
3.6 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ.....	49
3.7 วิธีวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ .....	49
4.1 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย EFBF .....	53
4.2 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย FF .....	54
4.3 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย MF .....	55
4.4 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย MF-TMP .....	56
4.5 ภาพถ่ายแสดงการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มแต่ละชนิด.....	58
4.6 ภาพ SEM ของ WPC ของเส้นใยปาล์มแต่ละชนิด ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	59
4.7 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม.....	65
4.8 ค่าความมอดูลัสโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม.....	66
4.9 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม.....	66
4.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันระหว่าง หมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของเส้นใยไม้ กับหมู่ แอนไฮดรายด์ (C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> ) ของสารช่วยผสม PP-g-MA .....	68
4.11 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใย MF-MP และเส้นใย MF-TMP ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA 0- 3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	69
4.12 ค่ามอดูลัสโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใย MF-MP และเส้นใย MF-TMP ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	69
4.13 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใย MF-MP และ เส้นใย MF-TMP ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	70
4.14 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใยเปลือกผลปาล์ม ที่สกัดน้ำมันปาล์มดิบออกเทียบกับเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออก โดยเติม PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ค่ามอดุลัสโค้งงอ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่สกัดน้ำมันปาล์มดิบออกเทียบกับเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออก โดยเติม PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	72
4.16 ค่าความแข็งแรงกระแทก WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่สกัดน้ำมันปาล์มดิบออกเทียบกับเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออก โดยเติม PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	72
4.17 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบในปริมาณ 0%, 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม.....	74
4.18 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบในปริมาณ 0%, 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	75
4.19 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบในปริมาณ 0%, 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม .....	75
4.20 ภาพ SEM ของ WPC ผสมเส้นใยปาล์มแต่ละชนิด ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย และ CPO 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	77
4.21 การขึ้นรูปไม้ WPC เซิงพาณิชย์ บริษัท เอ็ม บี เจ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด .....	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm) เป็นพืชเศรษฐกิจที่เป็นที่สนใจและเพิ่มปริมาณการปลูกอย่างมากในประเทศไทยและทั่วโลก เหตุผลเนื่องจากกระแสน้ำมันโลกมีแนวโน้มราคาเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณสต็อกน้ำมันโลกลดน้อยลงและคาดการณ์ว่าอาจจะหมดภายใน 50-80 ปี ทำให้ความต้องการเชื้อเพลิงและพลังงานทดแทนสูงขึ้น เช่น น้ำมันไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังมีความต้องการน้ำมันพืชเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymers) ที่จะทดแทนพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ปาล์มน้ำมันเป็นที่สนใจเนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่ปลูกสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น กล่าวคือ ปาล์มน้ำมันยังเป็นพืชน้ำมันที่ให้ผลผลิตสูงสุดเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันตัวอื่น เช่น ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ฯลฯ ได้ผลผลิตแค่ 700-800 กิโลกรัมต่อไร่ ขณะที่ปาล์มของไทยนั้นได้ผลผลิตมากถึง 3,000 กิโลกรัมต่อไร่ [1]

นอกจากนี้ต้นทุนในการผลิตน้ำมันต่อน้ำหนักยังถูกกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นอีกด้วย ประเทศไทยมีภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมกับการปลูกปาล์มน้ำมัน โดยเฉพาะภาคใต้และภาคตะวันออก ที่มีอากาศแบบร้อนชื้น มีปริมาณฝนพอเหมาะ (ปริมาณฝนไม่น้อยกว่า 1,800 มม.ต่อปี) ปัจจุบันรัฐบาลและกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ส่งเสริมและพัฒนาปาล์มน้ำมันทั้งระบบมาอย่างต่อเนื่อง ภายใต้การบริหารจัดการเชิงนโยบาย ของคณะกรรมการนโยบายปาล์มน้ำมันแห่งชาติ ซึ่งดำเนินงานผ่านแผนพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม ปี 2551-2555 ที่มุ่งสู่การพัฒนาและสร้างมูลค่าปาล์มน้ำมันและผลิตภัณฑ์น้ำมันปาล์มทั้งระบบอย่างยั่งยืน โดยมี 5 ยุทธศาสตร์รองรับ คือ ยุทธศาสตร์เพิ่มผลิตภาพคุณค่าผลปาล์มน้ำมันและผลิตภัณฑ์ ยุทธศาสตร์การเพิ่มประสิทธิภาพการตลาด ยุทธศาสตร์การใช้พลังงานทดแทน ยุทธศาสตร์การวิจัยและพัฒนาบุคลากร และยุทธศาสตร์การบริหารและการจัดการ การส่งออกปาล์มน้ำมันในปี 2552 อยู่ที่ 200,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 4,900 ล้านบาท ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน 2 ล้านไร่ ซึ่งกระทรวงเกษตรฯ ได้วางเป้าหมายไว้ว่าจะเพิ่มพื้นที่การผลิตให้ได้ 6 ล้านไร่ ภายใน 5 ปี ปริมาณน้ำมันปาล์มที่ผลิตได้มาจาก 2 ส่วน คือ ส่วนเปลือกนอกประมาณ 16-25% ของน้ำหนักทะลายและส่วนเนื้อในประมาณ 3-5% ของน้ำหนักทะลาย โดยทะลายปาล์มมีน้ำมันเฉลี่ยอยู่ที่ 15 กิโลกรัมต่อทะลาย ปัจจุบันทะลายปาล์มน้ำมันหลังการบีบน้ำมันใช้เป็นเชื้อเพลิงและใช้ในการเพาะเห็ดฟาง เป็นต้น ปริมาณการทะลายสดปาล์มน้ำมันของประเทศไทยประมาณ 7.2 ล้านตันต่อปี หลังบีบ

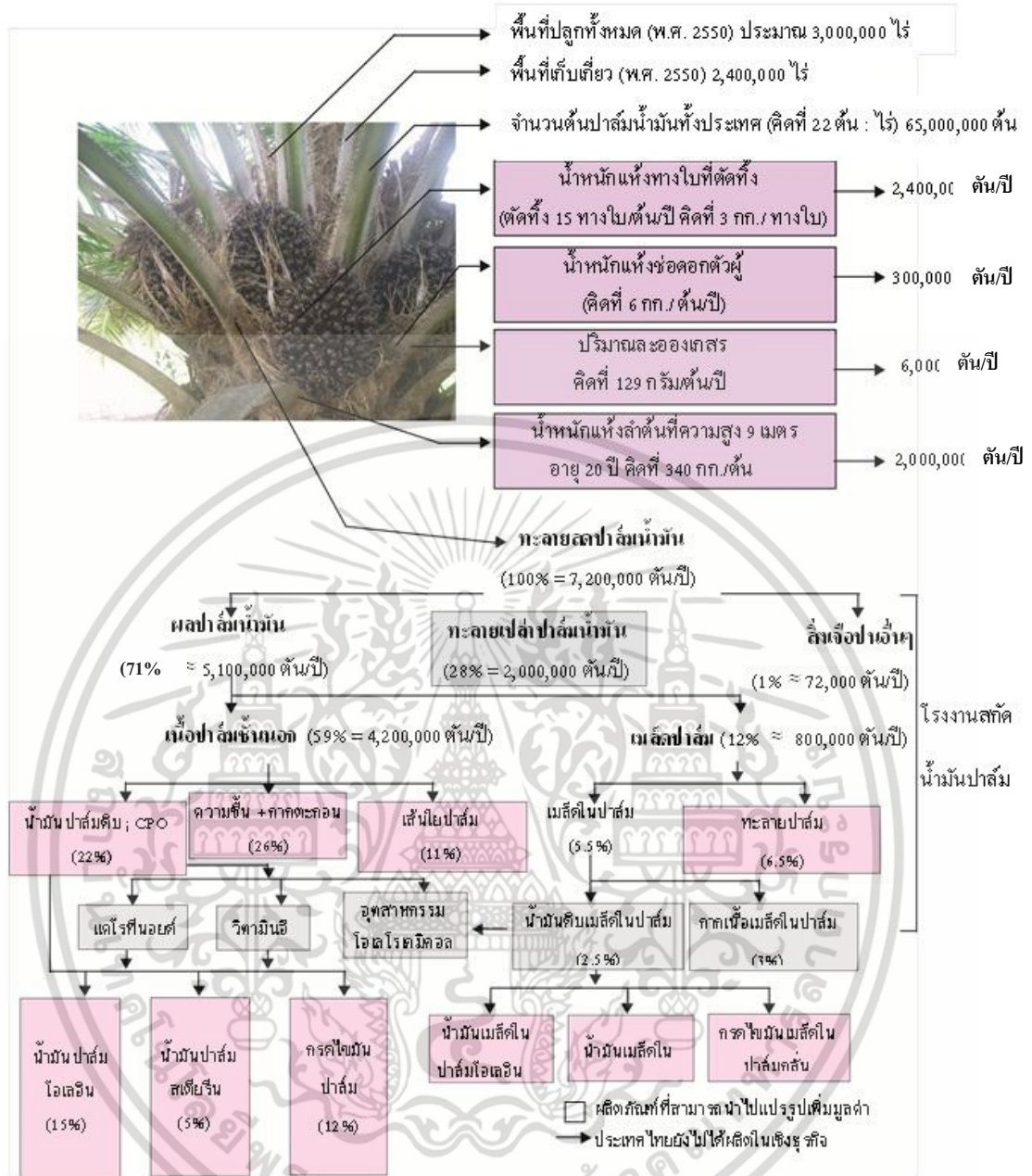
น้ำมันแล้วจะเหลือทะลายเปล่าปาล์มน้ำมันประมาณ 28% คิดเป็นประมาณ 2 ล้านตันต่อปี ซึ่งเป็นปริมาณมหาศาลสามารถใช้ทำประโยชน์เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นได้มากมาย [2]

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นว่าปริมาณผลผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศส่วนใหญ่มีปริมาณการใช้ น้ำมันปาล์มดิบสูงขึ้นทุกปี เป็นผลให้ปริมาณส่วนที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมจึงมีปริมาณมากขึ้น ด้วยเช่นกัน ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้เทียมที่ได้จากส่วนเหลือทิ้งของอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ซึ่งอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันจะได้น้ำมันปาล์มดิบประมาณ 18-22 % แล้วจะถูกนำไปแปรรูปเป็น น้ำมันบริโภคหรืออุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ และส่วนที่เหลือจะเป็นขยะ 78-82 % การนำของเสียเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ราคาปาล์มน้ำมันมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย ขยะที่ได้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีดังนี้

- (1) ส่วนของเหลว (Condensate)
- (2) ทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch Fibers; EFBF)
- (3) เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF)
- (4) ถากสลัดจ์ (Decantor Cake)
- (5) กะลา (Shell) ในปัจจุบันใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อผลิตไอน้ำ (Boiler) กะลาสามารถแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ (Activate Carbon) ได้ [4]

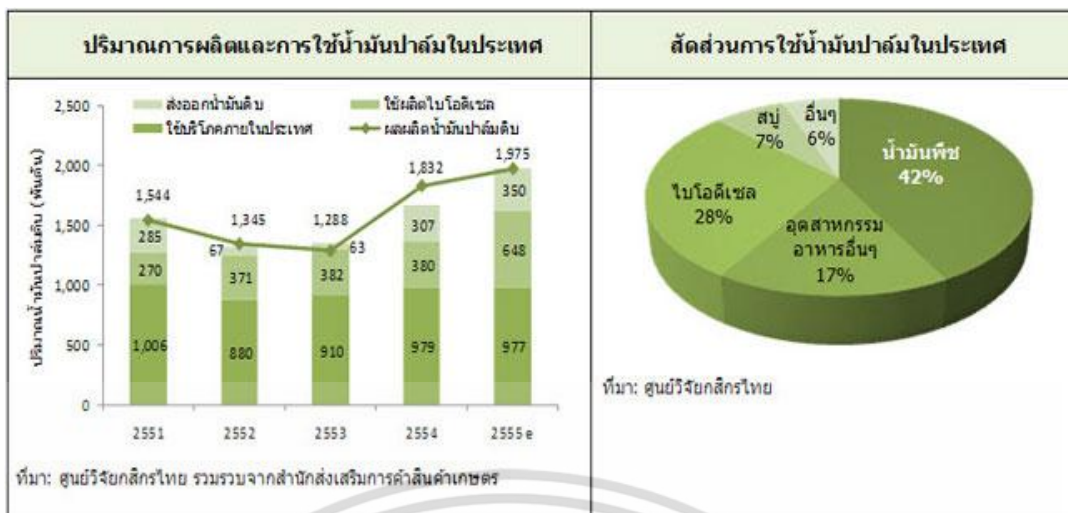
WPC (Wood Plastic Composites) หรือ ไม้พลาสติกคือ วัสดุทดแทนไม้ที่คล้ายไม้ธรรมชาติเกิดจากการนำผงไม้, ไม้เลื่อยไม้ หรือเส้นใยไม้ผสมกับพลาสติก แล้วผ่านกระบวนการผลิตและขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปของพลาสติกออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติก สามารถใช้งานได้เหมือนไม้จริง เช่น เลื่อย เจาะ ตอกตะปู ฯลฯ สมบัติเด่นของ WPC เมื่อเทียบกับไม้จริง ทนปลวก และแมลงที่เป็นศัตรูของไม้ บวมน้ำน้อย ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อใช้เวลานาน อายุการใช้งานยาวนานกว่า ขึ้นรูปง่าย ราคาไม่แพง [5]

เนื่องจากปริมาณส่วนที่เหลือทิ้งมีปริมาณมาก ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเส้นใยที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาใช้ เพื่อพัฒนาและเพิ่มมูลค่าให้กับประเทศ ส่วนของเส้นใยที่เลือกนำมาใช้คือ เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch Fibers; EFBF) เส้นใยทางใบ (FronD Fibers; FF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF) นำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรง



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของต้นปาล์มน้ำมันและผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ไทยผลิตได้ (ธันวาคม พ.ศ.2554) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ ช่วงปี 2551-2555 [3]

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาไม้เทียม WPC ที่ผลิตจากพอลิพรอพิลีน (Polypropylene; PP) ผสมเส้นใยที่เตรียมจากเศษไม้ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เส้นใยทะเลสาบปาล์มเปล่า (EFBF) เส้นใยทางใบ (FF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของ WPC เช่น วิเคราะห์เส้นใยและองค์ประกอบเคมีของเส้นใย, ผลของชนิดเส้นใยและปริมาณการเติมสารช่วยผสม, ผลของการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการเชิงกล (MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) และผลของน้ำมันปาล์มที่ตกค้างอยู่ในเส้นใย

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมเส้นใยโดยผ่านกระบวนการเชิงกล (Mechanical Pulp; MP) โดยเลือกใช้เส้นใยทะเลสาบปาล์มเปล่า (EFBF) เส้นใยทางใบ (FF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) โดยเลือกเส้นใยเปลือกผลปาล์มอีกส่วนมาเตรียมด้วยกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermo-Mechanical Pulp; TMP) โดยการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการเตรียมเส้นใยที่ต่างกัน
3. การวิเคราะห์เส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชนิดต่างๆ
4. ศึกษาชนิดของเส้นใยปาล์มและปริมาณการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer)
5. ศึกษาผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม
6. ศึกษาผลของน้ำมันปาล์มดิบที่ตกค้างอยู่ในเส้นใยปาล์มหลังจากการบีบ
7. ศึกษาสมบัติของไม้พลาสติกที่เตรียมได้ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ, สมบัติเชิงกล,

สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM, สมบัติความร้อนด้วยเทคนิค DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เลือกสูตรผสมที่มีสมบัติเชิงกลดี ทำการผลิต WPC เชิงพาณิชย์ด้วยเทคนิค Extrusion แล้วเปรียบเทียบกับไม้จริงบางชนิด

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตคอมโพสิต (WPC) ที่เตรียมได้จากเส้นใยปาล์มน้ำมันให้มีสมบัติที่ดี เพื่อทดแทนการใช้ไม้จริง และเหมาะแก่การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไม้ได้ เช่น ไม้พื้น (Decking) พาเลทรองรับน้ำหนัก

2. สามารถลดต้นทุนในการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ สามารถเพิ่มมูลค่าของอุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมันและช่วยลดปริมาณขยะจากภาคเกษตรกรรม

3 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปเป็นพื้นฐานในการวิจัยและประยุกต์ใช้งานกับพอลิเมอร์คอมโพสิตอื่นๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

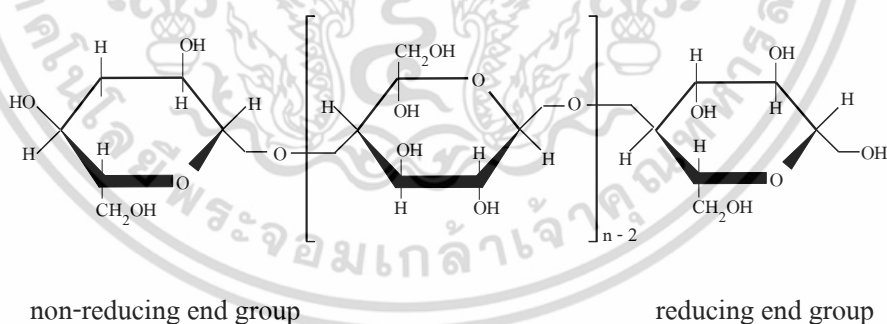
#### 2.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) [6]

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงสามารถใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรง ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้

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

##### 2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose) [7-9]

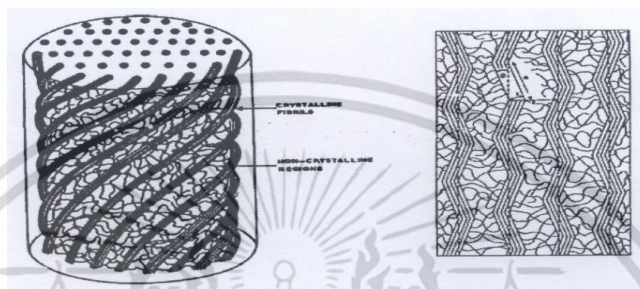
เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆกัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบร่วมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไบมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีหน่วยโมเลกุลยาวและแข็ง โดยเซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส [7]

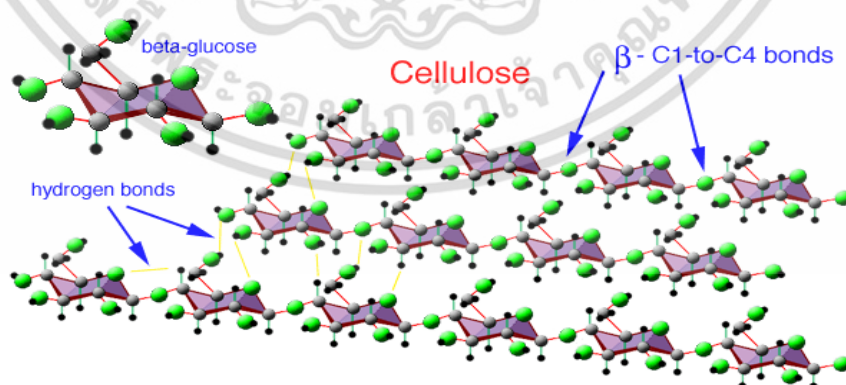
ในแต่ละหน่วยซ้ำ (Repeating Unit) เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล ถึง 3 หมู่ จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิหลอมตัวสูงจึงเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายต่ำแต่สามารถเอกซสารถึงเป็นเอกซสารถึงที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายได้ในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก เป็นต้น เซลลูโลสธรรมชาติมี น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำส่งผลให้สมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด การจัดเรียงตัวของผลึกและอสัณฐานในโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส [7]

การจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลสจะอยู่เป็น โครงรูปแบบเก้าอี้ โมเลกุลของกลูโคสทุกหน่วยจะจัดเรียงตัวซ้ำๆ กัน ในทิศทางที่กลับกัน 180 องศา ดังรูปที่ 2.3 และพบว่าโมเลกุลของกลูโคสในแป้งจะเชื่อมต่อกัน โดย Alpha Linkages แต่โมเลกุลของกลูโคสในเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วย Beta Linkages



รูปที่ 2.3 ลักษณะการจัดเรียงตัวของ โมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

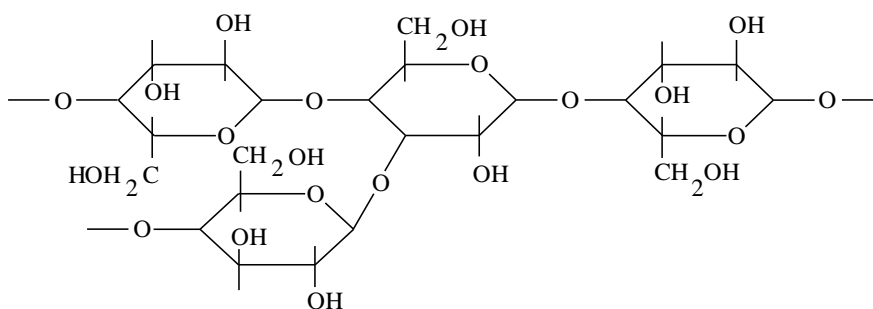
### 2.1.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

ความหนาแน่นของเซลลูโลสประมาณ 1.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งจะแปรไปตามแหล่งที่มาและการปรับปรุงทางเคมี เซลลูโลสเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีการดูดและคายไอน้ำและของเหลวอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆจนกระทั่งถึงสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น 72% ของกรดซัลฟูริก 40% ของกรดไฮโดรคลอริก และ 78% ของกรดฟอสฟอริก เซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำๆ สารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น 72% ของซิงค์ออกไซด์ จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ละลายได้

### 2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส อย่างไรก็ตาม เฮมิเซลลูโลสยังมีข้อแตกต่างจากเซลลูโลส 3 ประการด้วยกัน คือ

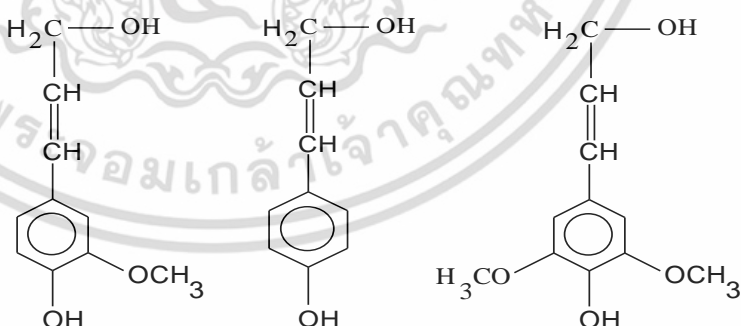
- เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) แมนโนส (Mannose) ไซโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic Acid) และกาแลกทูโรนิก (Galacturonic Acid) ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่
- สายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสายโซ่กิ่ง (Branch Chain) ในขณะที่สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง (Linear Chain)
- องศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization) ของเซลลูโลสจะมีค่าสูงกว่า เฮมิเซลลูโลสประมาณ 10-100 เท่า เฮมิเซลลูโลสมีสูตรทางเคมีคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  โดย n คือ จำนวนหน่วยซ้ำของเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [8]

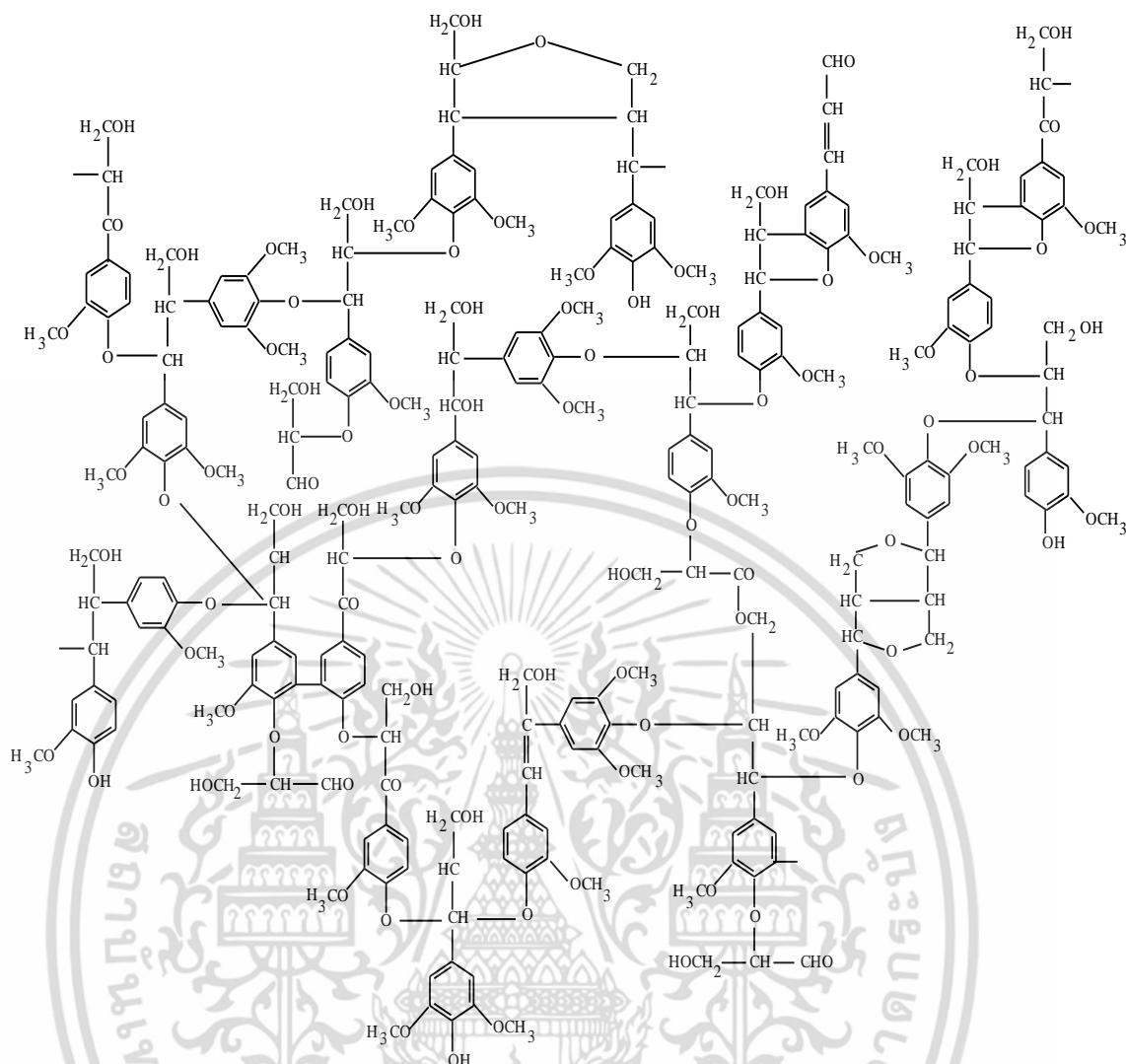
### 2.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารอะลิฟาติก (Aliphatic) และอะโรมาติก (Aromatic) อยู่ร่วมกัน สารอะโรมาติกในโครงสร้างของลิกนินจะทำให้ลิกนินมีเสถียรภาพสูง ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ยึดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้พืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากมีความแข็งแรง ทนทานต่อดินฟ้าอากาศสูงมากด้วย เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือ ลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างหน่วยที่ซ้ำกันในโครงสร้างของลิกนินแสดง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หน่วยที่ซ้ำกันใน โครงสร้างของลิกนิน [9]

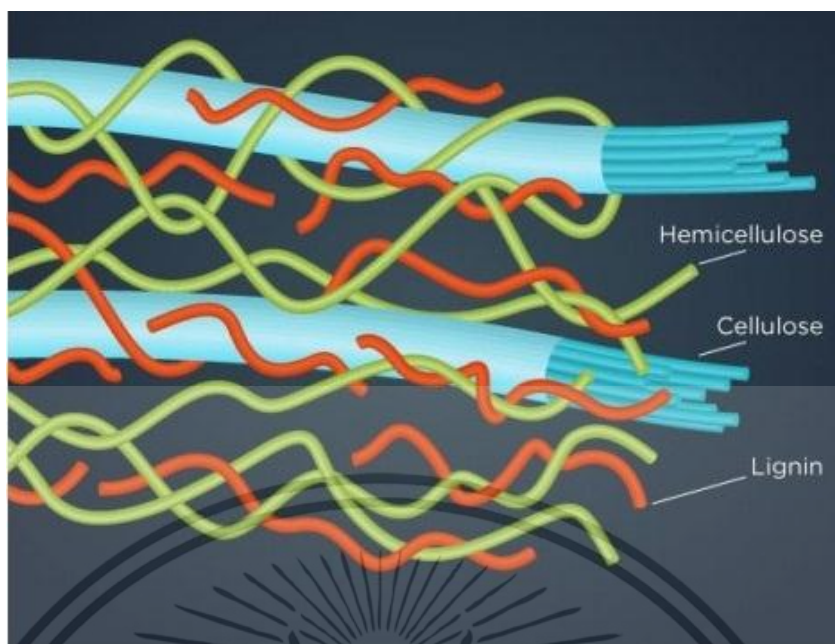
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโมเลกุลของลิกนิน [9]

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งสูง และในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน โดยการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ แสดงดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ [10]

## 2.2 ไม้และเส้นใยไม้ (Wood and Fibers) [11]

ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำอาหาร ให้ความร้อน และผลิตไอน้ำ ซึ่งอาจใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ด้วย นอกจากนี้ยังนำไม้มาใช้เป็นเฟอร์นิเจอร์ เครื่องประดับตกแต่ง ได้อีกมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ก่อให้เกิดเศษไม้ (Wood Flake) หรือ ขี้เลื่อย (Sawdust) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเส้นใยไม้ (Wood Fibers)

### 2.2.1 ชนิดของไม้ [12]

โดยทั่วไปไม้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) และ ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) แต่สำหรับงานก่อสร้างแล้ว ไม้จะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งกำหนดตามมาตรฐานกรมป่าไม้ คือ

1. ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static Bending) ต่ำกว่า  $600 \text{ kg/cm}^2$  และมีค่าความทนทานตามธรรมชาติต่ำกว่า 2 ปี
2. ไม้เนื้อแข็งปานกลาง (Medium Hardwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์ (Static Bending) ระหว่าง  $600\text{-}1000 \text{ kg/cm}^2$  และมีค่าความทนทานตามธรรมชาติระหว่าง 2-6 ปี
3. ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) มีค่าแรงดัดสถิตย์สูงกว่า  $1000 \text{ kg/cm}^2$  และมีค่าความทนทานตามธรรมชาติสูงกว่า 6 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ปาล์มน้ำมัน [12]

### 2.3.1 ความสำคัญและศักยภาพของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีศักยภาพในการผลิตน้ำมันต่อพื้นที่สูงสุด เมื่อเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น เมื่อเทียบราคาต้นทุนการผลิตน้ำมันในกลุ่มพืชที่ให้น้ำมันที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ปาล์มน้ำมัน ถั่วเหลือง Rapeseed และทานตะวัน พบว่าน้ำมันปาล์ม (Crude Palm Oil) มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือ กิโลกรัมละ 10 – 11.50 บาท ในขณะที่น้ำมันถั่วเหลืองมีต้นทุนการผลิตกิโลกรัมละ 18 บาท ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพการผลิตน้ำมันของพืชน้ำมันชนิดต่างๆ [12]

ชนิดของพืช	ปริมาณการผลิตน้ำมัน (กก./ไร่)
ปาล์มน้ำมัน (น้ำมันปาล์มดิบ)	512
ปาล์มน้ำมัน (น้ำมันเมล็ดใน)	73
เรพซีด (Rapeseed)	89
ทานตะวัน	81
มะพร้าว	54
ถั่วเหลือง	52
ถั่วลิสง	51

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นที่ทนทานต่อผลกระทบจากภัยธรรมชาติมากกว่าพืชอายุสั้นอื่นๆ ลงทุนเพียงครั้งเดียวก็สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นาน 20 ปี และที่น่าสนใจคือพื้นที่ปลูกที่เหมาะสมในโลกจะอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 20 องศาเหนือ-ใต้ ส่วนใหญ่พืชที่ปลูกปาล์มน้ำมันเป็นพื้นที่ประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คือ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย สองประเทศนี้รวมกันมีพื้นที่ปลูกที่ให้ผลผลิตแล้วจำนวน 37.04 ล้านไร่ และมีผลผลิตน้ำมันปาล์มร้อยละ 83 ส่งออกน้ำมันปาล์มร้อยละ 90 และน้ำมันปาล์มมีส่วนแบ่งการตลาดน้ำมันร้อยละ 48 ของตลาดน้ำมันโลก

## 2.3.2 สมบัติของเส้นใยไม้

### 2.3.2.1 โครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างทางกายภาพหรือโครงสร้างทางสัณฐาน (Morphology) ของเส้นใยสามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ที่มีกำลังขยาย 250-1000 เท่า โครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึง ความยาว ขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง รูปร่างภาคตัดขวาง (Cross-Sectional Shape) รูปร่างของผิวเส้นใย และความหยักของเส้นใย

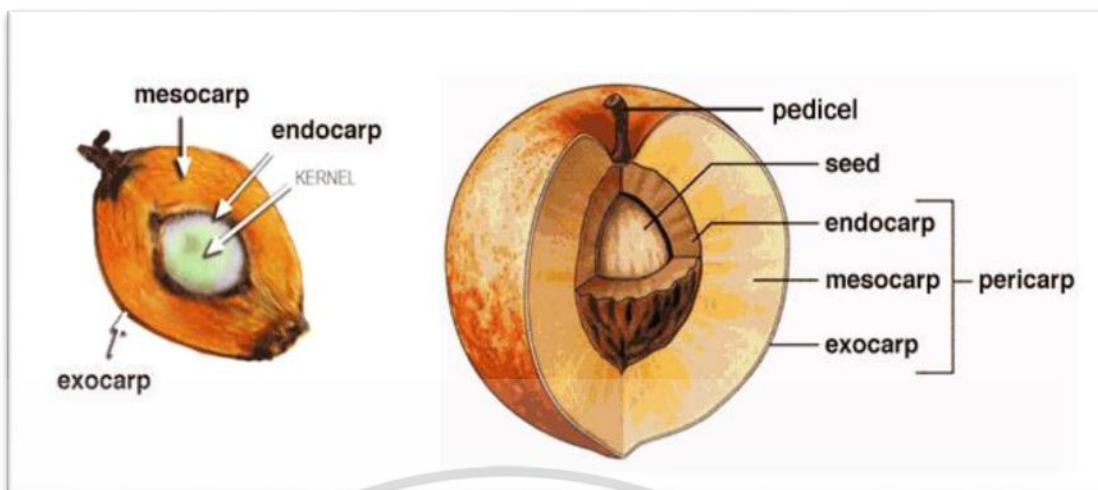
### 2.3.2.2 องค์ประกอบทางเคมีและการเรียงตัวของโมเลกุล

เส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมาก โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเป็นเส้นยาว เรียกว่า พอลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดจากการเรียงตัวของหน่วยโมเลกุลเล็กๆ มอนอเมอร์ (Monomer) และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีด้วยกระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่า พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ขนาดของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับขนาดความยาวของโมเลกุล ซึ่งบอกได้จากจำนวนมอนอเมอร์ที่มีเส้นโมเลกุลสั้น เนื่องจากจำนวนมอนอเมอร์ที่มากกว่านั่นเอง ซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยที่พอลิเมอร์นั้นเป็นองค์ประกอบอยู่

โมเลกุลหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในเส้นใยจะมีการเรียงตัวแตกต่างกัน เมื่อแต่ละโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไรทิศทาง (Random) จะทำให้เส้นใยบริเวณนั้นมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนในบริเวณที่โมเลกุลมีการเรียงซ้อนขนานอย่างเป็นระเบียบจะมีความเป็นผลึก (Crystalline) เกิดขึ้น เส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากก็จะมี ความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อย การจัดเรียงตัวโมเลกุลที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับแกนตามความยาวของเส้นใย จะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย

## 2.3.3 เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF)

เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF) เป็นผลปาล์มที่อยู่ภายในทะเลาะปาล์ม ส่วนของเปลือกนอกของผลปาล์มเป็นส่วนหนึ่งของเพอริคาร์บ (Pericarp) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อชั้นกลางของเปลือกถัดจากเปลือกนอก (Exocarp) เนื้อเยื่อชั้นนอกนี้อาจจะบางหรือหนาได้ เส้นใยเปลือกผลปาล์มของน้ำมันปาล์มมีน้ำมันในปริมาณที่สูง ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันปาล์ม



รูปที่ 2.8 ผลปาล์มน้ำมัน [13]

โดยปกติในโรงงานสกัดปาล์มจะใช้เส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ถูกบีบน้ำมันออกแล้วเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อผลิตไอน้ำ (Boiler) เพื่อนำไอน้ำไปนึ่งทะลายปาล์ม และผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในโรงงาน เส้นใยเปลือกผลปาล์มมีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกับทะลายปาล์ม แต่มีปริมาณโพแทสเซียมน้อยกว่า (โพแทสเซียมประมาณ 0.5 %) จึงสามารถนำไปเป็นวัสดุในการผลิตปุ๋ยหมักได้เช่นกัน ดังรูปที่ 2.9

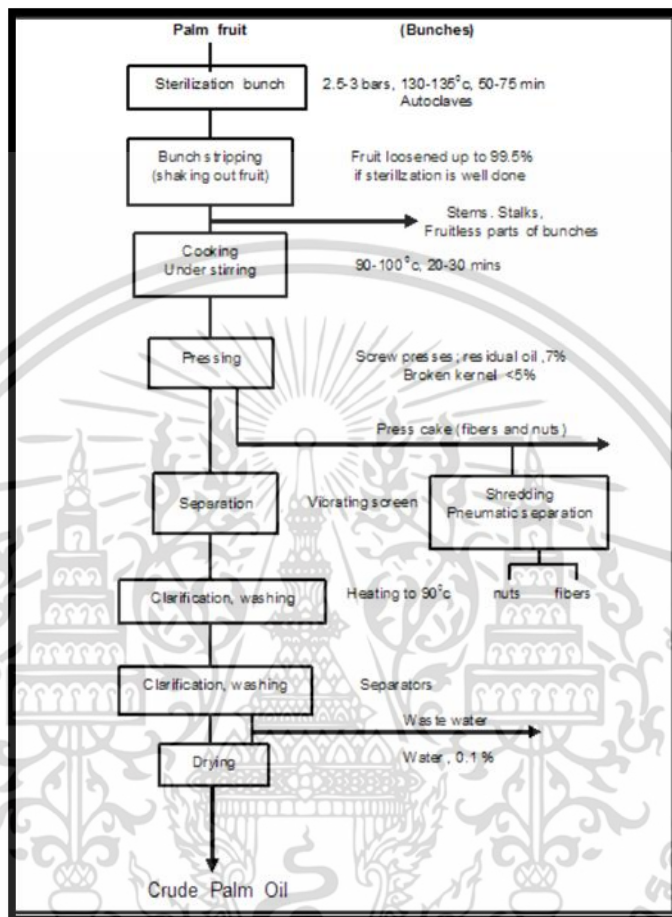


รูปที่ 2.9 เส้นใยเปลือกผลปาล์มที่บีบน้ำมันแล้วที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดเล็กกว่า 80 mesh

หลังเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมันจะมีการขนส่งผลผลิตเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีกระบวนการสกัดน้ำมัน 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และหีบน้ำมันผสม โดยโรงงานแบบมาตรฐานเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูงประมาณ 30-80 ตัน/ชม. และน้ำมันที่ได้จัดเป็นน้ำมันเกรดเอ เนื่องจากมีการแยกชนิดน้ำมันปาล์ม กระบวนการผลิตดังรูปที่ 2.10 สำหรับโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบหีบน้ำมันผสมเป็นโรงงานที่กำลังการผลิตค่อนข้างต่ำ และน้ำมันที่สกัดได้เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันปาล์มจากเปลือกและน้ำมันเมล็ดใน [14]



รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม [14]

#### 2.3.4 เส้นใยใบหรือทางใบ (FronD Fibers; FF)

ใบหรือทางใบประกอบด้วย แกนทางใบ ก้านใบ หรือใบย่อย ซึ่งเกิดจากการพัฒนาของเนื้อเยื่อเจริญบริเวณปลายยอดของลำต้น บริเวณดังกล่าวจะมีจุดกำเนิดตาใบอยู่มากกว่า 50 ตาใบในปาล์มที่มีอายุ 5-6 ปี จำนวนใบหรือทางใบในปาล์มน้ำมันที่ผลิตแต่ละปีจะอยู่ระหว่าง 30-40 ทางใบ หลังจากนั้นจะลดลงเป็น 20-25 ทางใบต่อปี ทางใบจะเกิดในลักษณะเป็นเกลียวรอบลำต้น โดยลักษณะการเวียนของทางใบปาล์มน้ำมันมี 2 แบบ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรอยแผลที่ฐานใบติดกับลำต้นหลังจากการตัดแต่งทางใบของต้นปาล์มแล้ว แบบแรกคือ การเกิดทางใบแบบเวียนซ้าย แบบที่ 2 คือ การเกิดทางใบแบบเวียนขวา การสังเกตการเวียนของทางใบจะมีประโยชน์สำหรับการนับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางใบที่เกิดขึ้น โดยทางใบล่างหนึ่งๆ จะรองรับทางใบบนจำนวน 2 ทางใบ ทางใบบนหนึ่งที่มีลักษณะการเวียนของทางใบชัดเจนจะนับจำนวนทางใบล่างที่รองรับจำนวน 8 ทางใบ ส่วนทางใบบนอีกด้านหนึ่งที่รองรับด้วยทางใบล่าง จะนับจำนวนทางใบล่างจำนวน 5 ทางใบการประมาณอายุปาล์มน้ำมันหลังปลูกสามารถสังเกตได้จากจำนวนรอยแผลที่ฐานใบติดกับลำต้นหลังการตัดแต่งนี้ โดยประมาณว่าชั้นทางใบ 3-4 ชั้น ใช้เวลาประมาณหนึ่งปี [15] โดยทางใบปาล์มเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากสวนปาล์มน้ำมันที่มีอยู่มากมาย นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาบดย่อยเพื่อนำมาเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ สำหรับเลี้ยงสัตว์ เช่น โคและแพะได้ ซึ่งโดยทั่วไปเกษตรกรจะเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มทุก 15 วัน ดังนั้นทุกเดือนจะมีการตัดทางใบออกอย่างน้อย 2 ใบต่อต้น หรือคิดเป็น 44 ทางใบต่อไร่ [16]



รูปที่ 2.11 เส้นใยทางใบปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดเล็กกว่า 80 mesh

### 2.3.5 เส้นใยทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า (Empty Fruit Bunch Fibers; EFBF)

ทะลายปาล์มเปล่าเป็นส่วนที่ได้จากการตีสับแยกผลปาล์มสด เพื่อนำไปใช้ในการสกัดปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่าประกอบด้วยช่อทะลายย่อย และก้านทะลายปาล์ม มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 17.3 กิโลกรัมของทะลายปาล์ม (สด) โรงงานไม่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากติดไฟยาก จะต้องทำให้แห้งก่อน ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น จึงทำการขนไปทิ้งเพื่อใช้คลุมดินในสวนปาล์มให้เกิดการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยเพิ่มธาตุอาหารในดิน และควบคุมรักษาความชุ่มชื้นของดิน โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง ตลอดจนใช้ถมที่ในสวนปาล์ม ช่อทะลายย่อยบางส่วนสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ทะลายปาล์มเปล่าที่เหลือจากการบีบน้ำมันปาล์มออก บริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด

ในขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มสด 1 ตัน จะมีทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งประมาณ 0.28 ตัน เส้นใย 0.12 ตัน และกะลาปาล์ม 0.08 ตัน ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว จะมีทะลายปาล์มเปล่าเหลือทิ้งมากที่สุด ทะลายปาล์มเปล่าสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น อย่างไรก็ตามยังมีทะลายปาล์มเปล่าเหลือทิ้งอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนที่เหลือจากการใช้ประโยชน์จะนำไปปลูกเห็ด เฝ้าและฝังกลบหรือทิ้งที่ดิน โรงงานหรือสวนปาล์ม ตลอดจนสถานที่กำจัดขยะเทศบาล [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า

รูปที่ 2.13 เส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่าที่ใช้ในงานวิจัย ขนาดน้อยกว่า 80 mesh

### 2.3.6 น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil; CPO) [18]

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สามารถนำมาใช้เพื่อการบริโภคและเพื่อเป็นพลังงานทดแทน โดยที่กระบวนการดำเนินอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันในขั้นต้นจะประกอบด้วย ส่วนการดำเนินการหลักสองส่วน ได้แก่ ส่วนของการปลูกต้นปาล์มน้ำมัน ได้ผลผลิตหลักคือ ผลปาล์มสดและส่วนที่เหลือจากการผลิตหลักและของเสีย ได้แก่ ทางใบปาล์มและลำต้นปาล์ม อีกส่วนหนึ่งคือส่วนการสกัดน้ำมันปาล์ม ได้ผลผลิตหลักคือ น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil; CPO) และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม (Palm Kernel Oil, PKO) และส่วนที่เหลือจากการผลิตหลักและของเสีย ได้แก่ ทะลายเปล่า กะลาปาล์ม เส้นใย กากตะกอน และน้ำเสีย



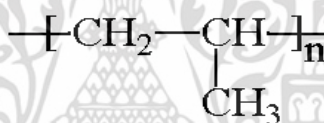
รูปที่ 2.14 น้ำมันปาล์มดิบ (CPO) จากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงประมาณ 80% ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารหลายประเภท เช่น น้ำมันทอด น้ำมันปรุงอาหาร มาการีน ครีมเทียม นมเทียม เนยขาว ฯลฯ รวมถึงผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อสุขภาพ เช่น วิตามินอี และวิตามินเอ ส่วน 20% ที่เหลือสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนในรูปของไบโอดีเซลหรือนำไป ผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อนำไปผลิตเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตภัณฑ์เพื่ออุปโภคประเภทอื่น เช่น สารหล่อลื่น เครื่องสำอาง สบู่ และผงซักฟอก เป็นต้น

## 2.4 พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) [20]

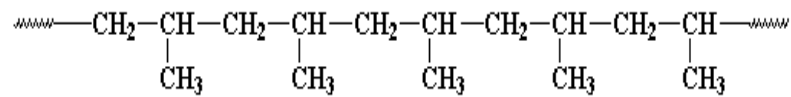
ในปี ค.ศ.1954 แนพตาได้นำตัวเร่งที่ซีเกอร์ค้นพบมาใช้ในการเตรียมพอลิพรอพิลีน โดยปรับปรุงรูปแบบของตัวเร่ง และได้พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป ซึ่งมีผลทำให้สมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีนที่มีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีน แต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่า และแข็งแรงกว่า โครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ของพอลิพรอพิลีนจะมีหมู่เมทิล (Methyl Group) เกาะบนโซ่หลักของโมเลกุล (Main Chain)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน [21]

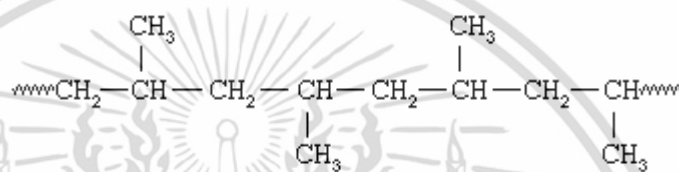
พอลิพรอพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ได้แก่

1. ไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic Polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูงส่งผลทำให้การเกิดผลึกเกิดได้ดีที่สุด สังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Heterogenous ของ Titanium (III) chloride กับตัวเร่งร่วมกับสารประกอบ Organoaluminium เช่น Diethylaluminium Chloride



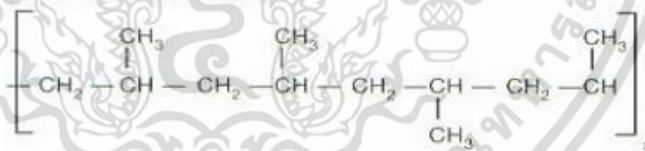
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของไอโซแทคติกพอลิพรอพิลีน [21]

2. ซินไดโอแทคติกพอลิพรอพิลีน (Syndiotactic Polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิล (Methyl Group) สลับกันบนโซ่โมเลกุลหลักอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลง มีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของซินไดโอแทคติกพอลิพรอพิลีน [21]

3. อะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic Polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุด ตั้งแต่แรกจากกรดลิวิส และสารประกอบ Organometallic เกิดเป็นโครงสร้างของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของอะแทคติกพอลิพรอพิลีน [21]

#### 2.4.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีน

ความหนาแน่นประมาณ  $0.9\text{g/cm}^3$

มีน้ำหนักเบา

จุดหลอมเหลวปานกลาง  $130\text{-}170^\circ\text{C}$

ไม่ละลายในตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง

มีความทนต่อกรด และเบส

เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี

มีความเป็นผลึกสูงทำให้สมบัติเชิงกลดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C

#### 2.4.2 การประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์ภายในบ้าน

ชิ้นส่วนต่างๆภายในรถยนต์

ใช้ในรูปเส้นใย หรือฟิล์ม

พอลิพรอพิลีนที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมี 4 เกรด

โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) เป็นเกรดมาตรฐานทั่วไปมีองค์ประกอบง่ายๆ คือ มอนอเมอร์ของพอลิพรอพิลีนมาต่อกันโดยหมู่เมทิลที่อยู่บนโครงสร้างหลักอยู่ข้างเดียวกันของ ะนาบมีสมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของ โฮโมพอลิเมอร์พอลิพรอพิลีน [20]

ชนิด	อัตราการ หลอมไหล ASTM D-1238 (g/10 min)	ความแข็งแรง โค้งงอ ASTM D-790 (MPa)	ความทนทาน ต่อแรงกระแทก ASTM D-265 (J/m)	ความแข็ง ASTM D-785 (Rockwell R)
ขึ้นรูปแบบอัด	0.5	1585	160	95
ขึ้นรูปแบบแผ่นบาง	1.5	1480	70	-
ขึ้นรูปแบบฉีดทั่วไป	4	1720	43	99
ขึ้นรูปแบบฉีดผนังบาง	20	1720	32	104
ขึ้นรูปแบบอัดฉีด	40	1895	32	100
ขึ้นรูปแบบเส้นใย	100	1585	-	-

โฮโมพอลิพรอพิลีนมักขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ใช้ทำฝาขวด เข็มฉีดยา อุปกรณ์ทางการแพทย์ ของเด็กเล่น บรรจุก๊าซภายในบ้าน รถยนต์ขนาดเล็ก ฟิล์ม เส้นใย และตาข่าย ผลิตภัณฑ์จากพอลิพรอพิลีนเสื่อมสภาพได้เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์เป็นเวลานานจึงต้องเติมสารเติมแต่งเพื่อป้องกันการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ พอลิพรอพิลีนมีลักษณะขุ่น แต่สามารถปรับปรุงให้มีลักษณะใส และมีสมบัติดีขึ้น โดยเติมตัวหนึ่ยวนาให้เกิดผลึก ทำให้ปริมาณการตกผลึกดีขึ้นแต่ขนาดของสเฟียรูไลต์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3. โคพอลิเมอร์ (Copolymer)

โคพอลิเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ของมอนอเมอร์ต่างชนิดกันอย่างน้อย 2 ชนิด

#### 2.4.3.1 พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (Random Copolymer)

มอนอเมอร์ 2 ชนิด เรียงสลับตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ พอลิเมอร์ชนิดนี้มีพอลิเอทิลีนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยเติมลงในสายโซ่ของพอลิพรอพิลีน สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มแสดงดังตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มของพอลิพรอพิลีน [20]

ชนิด	อัตราการ หลอมไหล ASTM D-1238 (g/10 min)	ความแข็งแรง โค้งงอ ASTM D-790 (MPa)	ความทนทานต่อ แรงกระแทก ASTM D-256 (J/m)	ความแข็ง ASTM D-785 (Rockwell R)
อครีคเป็นแผ่น	1	965	80	80
อครีคเป็นแผ่น	3	1515	37	95
อครีคเป็นฟิล์ม	3	260	-	-
อครีคเป็นฟิล์ม	7	585	65	65
เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม	10	860	85	80
เป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม	25	1135	-	94

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มสามารถทำได้ง่ายคล้ายแบบโฮโมพอลิเมอร์ โดยนำมาผลิตเป็นฟิล์มบรรจุอาหาร และห่ออาหารได้ตามมาตรฐาน เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ ตัวเชื่อมความร้อน สามารถรับและดูดซับแรงได้ดีจึงใช้เป็นผลิตภัณฑ์กันชนรถยนต์

#### 2.4.3.2. พอลิเมอร์ร่วมชนิดรับแรงกระแทก (High Impact Copolymer)

จะเติมมอนอเมอร์อื่นประมาณ 20% ซึ่งมักจะเป็นเอทิลีน หรือยาง ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบในการสังเคราะห์ ต้องดูแลควบคุมสภาวะการทดลองให้เหมาะสมและคงที่ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ร่วมที่มีน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบตามต้องการ พอลิเมอร์ร่วมที่ได้จะมีความทนทานต่อแรงกระแทกดีแม้จะทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นกระเป๋าเดินทาง ที่นั่งในรถ อุปกรณ์หล่อเย็น และเครื่องใช้ภายในบ้าน สมบัติแสดงดังตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติของพอลิพรอพิลีนชนิดรับแรงกระแทก [20]

ชนิด	อัตราการ หลอมไหล ASTM D-1238 (g/10 min)	ความแข็งแรง โค้งงอ ASTM D-790 (MPa)	ความทนทานต่อ แรงกระแทก ASTM D-256 (J/m)	ความแข็ง ASTM D-785 (Rockwell R)
ขึ้นรูปแบบอัด	0.5	1240	540	75
ขึ้นรูปแบบอัดรีด	1	860	650	55
ขึ้นรูปแบบฉีดทั่วไป (1)	4	1035	540	65
ขึ้นรูปแบบฉีดทั่วไป (2)	6	930	650	70
ขึ้นรูปแบบฉีดทั่วไป (3)	11	1000	135	72

#### 2.4.3.3. อะแทคติกพอลิพรอพิลีน (Atactic Polypropylene)

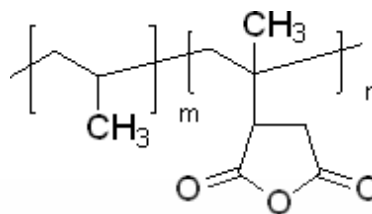
อะแทคติกพอลิพรอพิลีน คือ พอลิเมอร์ที่มีหมู่เมทิลกระจายตัวแบบสุ่มตลอดความยาวสายโซ่ จึงมีความเหนียวมาก มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความสามารถในการยึดเกาะ ไม่นำไฟฟ้า นิยมใช้ทำเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก แม้ที่อุณหภูมิสูง เช่น หุ้มสายเคเบิล ทนทานต่อสารเคมี ได้แก่ กรด ด่าง แอลกอฮอล์ ตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะเกิดการพองตัว อ่อนนิ่ม หรือพื้นผิวเป็นรอยได้ในสารเคมีที่มีองค์ประกอบเป็นคลอรีน หรือไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดอะโรมาติกและอะลิฟาติก

#### 2.5 พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene Grafted Maleic Anhydride; PP-g-MA) [22]

พอลิพรอพิลีน (PP) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ส่งผลให้เมื่อทำการผสมรวมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดลงไป เพื่อเพิ่มสมบัติการกันน้ำได้ [23] พอลิพรอพิลีนต่อกิ่งมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) เป็นการต่อกิ่งพอลิพรอพิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical Properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความขั้วของพอลิพรอพิลีน โดยทำให้ความเป็นบวกเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อน และเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่นรวมทั้งสารตัวเติม (Fillers) ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [22]

## 2.6 การตกผลึกในพอลิเมอร์ [24]

การตกผลึก (Crystallization) ในพอลิเมอร์เป็นกระบวนการจัดเรียงตัวของโครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered Phase) โดยปกติจะอยู่ในรูปสถานะที่หลอมเหลว หรือสารละลายเจือจางให้เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ขั้นตอนการตกผลึกในพอลิเมอร์โดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ ได้แก่

1. การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ขั้นตอนนี้เกิดเนื่องจากการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ซึ่งจะเกิดแนวโน้มที่ทำให้โมเลกุลที่พันกันอย่างอิสระในพอลิเมอร์หลอมเหลว เริ่มจัดตัวเป็นบริเวณที่มีความเป็นระเบียบเล็กๆ ขึ้น ซึ่งเรียกว่า นิวคลีโอ (Nuclei) สำหรับการเกิดนิวเคลียสสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

1.1 การเกิดนิวเคลียสจากโซ่โมเลกุลของตัวเอง (Homogeneous Nucleation) เกิดจากการที่โซ่โมเลกุลมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา จนกระทั่งโซ่โมเลกุลเข้ามาใกล้กันระยะหนึ่ง จะเกิดแรงดึงดูดกัน เกิดเป็นนิวเคลียสพร้อมกับคายพลังงานออกมา

1.2 การเกิดนิวเคลียสโดยอาศัยสารภายนอก (Heterogeneous Nucleation) พบมากในพอลิเมอร์ทั่วไป ขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสจะใช้สารแปลกปลอม เช่น สารก่อนิวเคลียส (Nucleating Agent) และสารปนเปื้อน (Impurity) เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้โซ่พอลิเมอร์มายึดเกาะ การเกิดนิวเคลียสแบบนี้เกิดได้ง่ายกว่า เนื่องจากการใช้ซูเปอร์คูลิ่ง (Supercooling) ที่ลดน้อยลง ซึ่งซูเปอร์คูลิ่ง หมายถึง ช่วงการให้ความเย็นของพอลิเมอร์หลอมเหลวให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว โดยปราศจากการเกิดผลึกและในบางครั้งจะเรียกว่า อันเดอร์คูลิ่ง (Undercooling) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างจุดหลอมเหลวกับอุณหภูมิในการตกผลึก

2. การเติบโต (Growth) ขั้นตอนนี้นิวคลีโอจะมีการขยายตัวเนื่องจากการรวมตัวของสายโซ่

โมเลกุล ซึ่งการขยายตัวจะทำใน 1,2 หรือ 3 มิติก็ได้ ผลึกสามารถเกิดรูป Rods, Disc หรือ Sphere การขยายตัวเนื่องจากการรวมตัวของโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่มาจัดเรียงตัวในผลึก ซึ่งเรียกว่าลามลาร์ (Lamellar)

สำหรับอัตราการเติบโตขึ้นกับอุณหภูมิในการตกผลึก พบว่าอัตราการเติบโตจะมีค่าต่ำเมื่ออุณหภูมิการตกผลึกใกล้เคียงกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์นั้น เมื่อซูเปอร์คูลิ่งสูงขึ้น อัตราการเติบโตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุด จากนั้นลดลงมาอีกครั้งทุกๆ ที่อุณหภูมิการตกผลึกห่างจากอุณหภูมิการหลอมเหลวมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่มารวมตัวทำให้เกิดการขยายตัวของผลึกลดน้อยลง จึงส่งผลให้อัตราการเติบโตลดลง

## 2.7 วัสดุคอมโพสิต (Composites) [26]

วัสดุคอมโพสิต หรือ “วัสดุประกอบ” เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างมาก ในปัจจุบันมีการใช้ผลิตภัณฑ์วัสดุคอมโพสิตมากกว่า 10 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นทุกปีประมาณ 5-10% วัสดุคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering Materials) ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุดคือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ ดังนั้นคอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength,  $\sigma/\rho$ ) สูง ดังนั้นเมื่อใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง เช่น ยานพาหนะ จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น มีประสิทธิภาพในการขนส่งมากขึ้น และประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่อยู่ในช่วงกว้าง เนื่องจากคอมโพสิตมีหลายชนิดหลายรูปแบบ สามารถเลือกใช้ออกแบบ และสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ ทำให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตอย่างกว้างขวางมากมาย หลากหลายการใช้งาน

ในการใช้งานในปัจจุบันมีการเรียกวัสดุคอมโพสิตหลากหลายชื่อ เช่น พลาสติกเสริมแรง (Reinforced plastics, RP) พลาสติกเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Fiberglass Reinforced Plastics, FRP) แผ่นลามิเนตเสริมแรง (Reinforced Plastics Laminates) หรือไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) เป็นต้น

คอมโพสิต เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุอย่างน้อย 2 อย่างร่วมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง การทนต่ออุณหภูมิสูง, การทนต่อการกัดกร่อนความแข็ง, การนำไฟฟ้า และวัสดุทั้ง 2 นั้นต้องไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นเนื้อหลัก ซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) หรือเมตริกซ์ (Matrix) และอีกชนิดเป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcing Materials)

วัสดุผสมทำจากวัสดุหลัก คือ เซรามิก โลหะ และพอลิเมอร์ ได้แก่ วัสดุผสมเมตริกซ์เซรามิก

(Ceramic Matrix Composites, CMC) วัสดุผสมเมตริกซ์โลหะ (Metal Matrix Composites, MMC) และวัสดุผสมพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites, PMC) เป็นต้น

พอลิเมอร์คอมโพสิตประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเมตริกซ์ ซึ่งจะเป็นสารพอลิเมอร์ และส่วนเสริมแรง ซึ่งสารเสริมแรงจะมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรือ อนุภาคที่มีขนาดเล็ก สารเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย โดยเส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมตริกซ์ หรืออาจจะเป็นเส้นใยขนาดสั้นกระจายตัวอยู่ในเมตริกซ์

### 2.7.1 เมตริกซ์ [25]

เมตริกซ์เป็นส่วนที่ต่อเนื่อง (Continuous Phase) ซึ่งเป็นตัวกลางให้เส้นใย หรืออนุภาคเกิดการกระจายตัว และช่วยถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมมายังเส้นใยหรืออนุภาคหน้าทีของเมตริกซ์ มีดังนี้

- ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
- ป้องกันไม่ให้เส้นใยเกิดความเสียหายอันเนื่องจากสิ่งแวดล้อม
- ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใย
- กำหนดรูปร่างของวัสดุ
- เชื่อมต่อกับตัวเสริมแรง

สำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมตริกซ์โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

#### 2.7.1.1 เทอร์โมเซต (Thermoset)

เทอร์โมเซตจะมีความแข็งแรงและเหนียว ในขั้นตอนการผลิตจึงอาศัยเฉพาะความร้อนและรอให้เกิดการแข็งตัว ซึ่งต่างจากเทอร์โมพลาสติกที่ต้องทำให้เย็นตัวลงเพื่อให้เกิดผลึก (Crystallization) แต่ข้อเสียของเทอร์โมเซตคือ ต้องใช้เวลาแข็งตัวนานและมักจะเปราะ พลาสติกในกลุ่มนี้จะมีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีผลิต โดยให้ความร้อนและความดันเข้าไป จะเกิดการหลอมตัวและเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinked) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห และไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างกลับไปกลับมาใหม่โดยการให้ความร้อน เหมือนกับพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก แต่จะใหม่และเสื่อมสภาพไป มีสมบัติที่เปลี่ยนไปจากเดิม ข้อดีของพลาสติกกลุ่มนี้คือ มีความแข็งแรงสูง และทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ตัวอย่างเทอร์โมเซตติงพลาสติก ได้แก่ ฟีนอล - ฟอรั่มัลดีไฮด์ เมลามีนฟอรั่มัลดีไฮด์ ยูเรียฟอรั่มัลดีไฮด์ อีพอกซี พอลิยูรีเทน และซิลิโคน

### 2.7.1.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นอิสระต่อกัน เมื่อให้ความร้อนสามารถหลอมเหลวได้ และแข็งตัวเมื่อเย็นลง สามารถหลอมและแข็งตัวได้หลายๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับสมบัติของมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุล ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ เช่น พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น

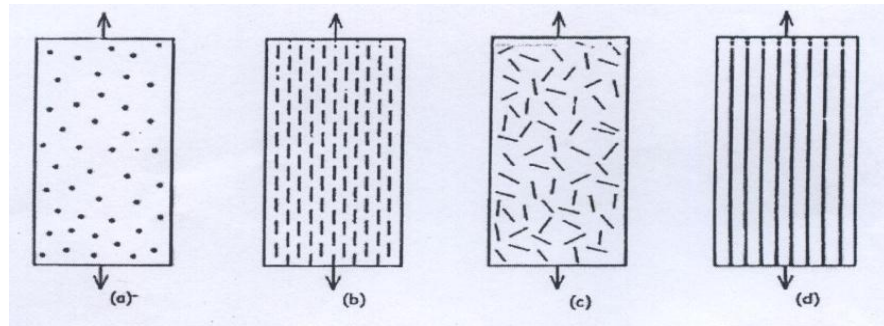
### 2.7.2 สารเสริมแรง [25]

สารเสริมแรงจะอยู่ในสภาพของแข็ง ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากพอลิเมอร์ มีความถี่ของการเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ การเติมสารเสริมแรงจะมีผลต่อพอลิเมอร์โดยจะทำให้สมบัติกายภาพของวัสดุพอลิเมอร์ต่างไปจากเมื่อไม่มีสารเสริมแรง

สารเสริมแรงเป็นสารที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ มีรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใยหรืออนุภาค ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้สารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิตได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber) และเส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber) หน้าที่ของสารเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่

- เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสม
- สามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมได้ ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการผิดรูปภายใต้แรงกระทำนั้นๆ โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตาม

เส้นใย



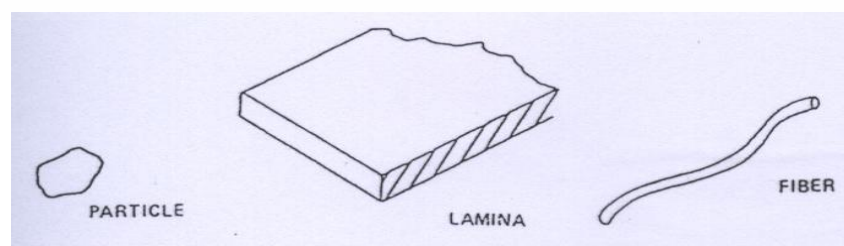
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน [25]

- (a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาค จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน
- (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
- (d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

### 2.7.3 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต (Classification of Composites) [25]

การแบ่งชนิดวัสดุคอมโพสิตมีหลายแบบ อาจแบ่งชนิดคอมโพสิตตามลักษณะส่วนเสริมแรง สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous Composites) คือคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fiber) 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 2.21 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ตามลักษณะการเกิดของคอมโพสิต คือ

- คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural Composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้ (Wood) ฟัน (Teeth) และกระดูก (Bone) ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจำพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมทริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแข็งอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxy Apatite) อยู่ในเมทริกซ์ของสารอินทรีย์คอลลาเจน (Collagen) ที่เหนียว เป็นต้น
- คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic Composites) คือวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการใช้วัสดุสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง และวัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับ

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

#### 2.7.4 ข้อดีและข้อเสียของวัสดุคอมโพสิต

##### ข้อดีของคอมโพสิต

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to Weight/Density Ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific Modulus) และความแข็งเปราะจำเพาะ (Specific Stiffness) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบาช่วยลดน้ำหนักของวัสดุมีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี มีสมบัติการรับแรงและมีการหน่วง (Damping) ที่ดี

- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) ดี มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional Stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of Thermal Expansion, CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ

##### ข้อเสียของคอมโพสิต

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูปคอมโพสิตมักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่กัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Orientation) ของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse Direction) การต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่นทำได้ยาก

การตรวจวิเคราะห์สมบัติคอมโพสิตทำได้ยาก การทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ทำได้ยาก

## 2.8 ไม้พลาสติก (Wood Plastic Composites; WPC) [26]

ไม้พลาสติก เป็นวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบขึ้นจากวัสดุหลักคือ ไม้และพลาสติก ซึ่งไม้พลาสติกเป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในวงการอุตสาหกรรมไม้และพลาสติกในต่างประเทศมานานแล้วแต่ค่อนข้างที่จะใหม่ในประเทศไทย โดยไม้พลาสติกเป็นการนำเอาความรู้ของวงการไม้และวงการพลาสติกมารวมกันทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้อีกชนิดหนึ่ง เมื่อพิจารณาในด้านวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ

(1) โครงสร้าง (Structure) โครงสร้างของไม้เป็นส่วนที่ไม่สามารถควบคุมสมบัติให้เป็นไปตามต้องการได้ เนื่องจากเนื้อเยื่อของต้นไม้แต่ละชั้นมีความหนาแน่นและการกระจายตัวของเซลล์รูปร่างต่างๆ ไม่เหมือนกัน จึงทำให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไป ด้วย การควบคุมให้เนื้อไม้ของต้นไม้มีสมบัติเหมือนกันทุกประการจึงไม่สามารถเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ แต่สามารถควบคุมสมบัติต่างๆ กับไม้พลาสติกได้ เนื่องจากพลาสติกแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน ในการเลือกใช้ต้องคำนึงถึงสมบัติที่ต้องการ ความเป็นไปได้ในการผลิตและความเข้ากันได้กับไม้

(2) กระบวนการผลิต (Processing) รายละเอียดและขั้นตอนในการผลิตไม้พลาสติก ตลอดจนการเตรียมวัตถุดิบและชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวิธีการขึ้นรูปที่เลือกใช้ เนื่องจากในการขึ้นรูปแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดแตกต่างกันไป เช่น บางวิธีอาจสามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีขนาดไม้ไม่ต้องละเอียดมาก แต่บางวิธีจำเป็นต้องเตรียมวัตถุดิบให้มีความละเอียดสูง เป็นผลทำให้มีขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบแตกต่างกัน

(3) สมบัติ (Properties) เนื่องจากไม้พลาสติกเป็นวัสดุที่นำไม้และพลาสติกมารวมกันเป็นผลทำให้สมบัติของไม้และพลาสติกเปลี่ยนไป สัดส่วนของไม้และพลาสติกต่างมีผลกระทบต่อสมบัติของไม้พลาสติก ถ้าปริมาณของวัตถุดิบตัวใดตัวหนึ่งมาก สมบัติโดยรวมของไม้พลาสติกจะมีแนวโน้มเอียงไปทางวัสดุที่มีปริมาณมากกว่า

(4) สมรรถนะ (Performance) เนื่องจากประเภทของวัตถุดิบที่หลากหลายทำให้มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันส่งผลให้มีสมบัติแตกต่างกัน ทำให้การกล่าวถึงสมรรถนะการใช้งาน หากมองในภาพรวมแล้วการเพิ่มไม้ลงไปพลาสติกเป็นการเพิ่มความแข็งให้กับตัวพลาสติก แต่ทำให้มีความเปราะเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สมบัติด้านอื่นๆ จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบ ปฏิกริยาเคมี กระบวนการผลิต และสารเติมแต่งที่เลือกใช้ ทั้งนี้จึงควรทำให้สอดคล้องกับการนำไปใช้งานจริง [27] ซึ่งไม้พลาสติกนั้นสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการได้ เช่น มีการต้านทานการดูดซับน้ำมากขึ้น ไม่มีปัญหาเรื่องการผุกร่อนจากปลวกและแมลง ทนทานต่อการแตกหักเมื่อตอกตะปู เป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น และมีน้ำหนักเบาขึ้น เป็นต้น [28] นอกจากนี้ ยังสามารถปรับปรุงสมบัติได้ง่าย โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น พลาสติกไซเซเซอร์ (Plasticizer) สารเพิ่มเนื้อ (Filler) สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น [29]

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งของโลกที่มีศักยภาพในการผลิตปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม ซึ่งไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 2 ล้านไร่ จึงนับได้ว่า ปาล์มน้ำมันเป็นพืชอุตสาหกรรมที่สามารถทำรายได้ให้แก่ ประเทศปีหนึ่งๆ นับหมื่นล้านบาท นอกจากนี้ผลการสำรวจพบว่า ประเทศไทยยังมีพื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกปาล์มน้ำมันอีกนับสิบล้านไร่ ซึ่งหากประเทศไทยมีการพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มอย่างจริงจัง และถูกต้องตามความเหมาะสมจะทำให้ไทยมีรายได้เพิ่มขึ้นนับแสนล้านบาท โดยเกือบทุกส่วนของปาล์มน้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ทะลายปาล์มน้ำมันที่เอาผลออกแล้วเกษตรกรนำไปเพาะเห็ดฟางทางปาล์มนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตพาร์ติเคิลบอร์ด ผลปาล์มใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช โดยปาล์มน้ำมันจะให้ผลผลิตได้จนถึงอายุ 25 ปี หลังจากนั้นจะโค่นทิ้งหรือขายเพื่อนำไปตกแต่งสนามกอล์ฟ หรือตกแต่งบริเวณรอบบ้าน [30] จะเห็นว่า ส่วนของไม้ปาล์มนั้นไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควร อีกทั้งเมื่อเทียบกับพืชเศรษฐกิจ เช่น ไม้ยางพารา พบว่า ไม้ยางพาราสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากและมีความต้องการใช้สูงจนปริมาณไม้ยางพาราไม่เพียงพอสำหรับผู้ผลิต/ส่งออก และใช้ภายในประเทศ ดังนั้นจึงเห็นควรที่จะนำไม้ปาล์มมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น และยังช่วยเพิ่มทางเลือกการใช้ไม้ปาล์ม นอกเหนือจากไม้ยางพาราอีกด้วย ประกอบกับในปัจจุบันมีการใช้พลาสติกอย่างแพร่หลาย เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำมันพืช ถุงพลาสติก เป็นต้น ซึ่งขยะ

พลาสติกส่วนใหญ่มาจากขยะชุมชน โดยรวมขยะจากบ้านเรือน และธุรกิจขนาดย่อม ส่งผลให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกดังกล่าวหลังจากเลิกใช้งานแล้วจะกลายเป็นขยะจำนวนมาก จากการสำรวจพบว่า เมื่อปี 2542 ประเทศไทยมีปริมาณขยะพลาสติกร้อยละ 14 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด หรือคิดเป็น 1.9 ล้านตันต่อปี และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 16 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด หรือคิดเป็น 2.3 ล้านตันต่อปี เมื่อปี 2544 และปี 2546 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 17.6 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด หรือคิดเป็น 2.5 ล้านตันต่อปี [31] จะเห็นได้ว่า ปริมาณขยะพลาสติกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปี ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ตามมาด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาและผลิตวัสดุไม้พลาสติกจากไม้ปาล์มและเศษพลาสติกเหลือใช้ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้ ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติก เพิ่มการใช้ประโยชน์จากไม้ปาล์มให้มากขึ้น และเป็นการเพิ่มทางเลือกอีกทางหนึ่งของการใช้ไม้พลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนไม้ได้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธารทิพย์ เขมะศิริ และคณะ [32] ได้ศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยหญ้าแฝกกับพอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ทั้งชนิดใหม่และชนิดรีไซเคิล โดยใช้สารช่วยผสมพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (PP-g-MA) และพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (PE-g-MA) ที่ 3% โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของเส้นใย จากการทดลองพบว่า วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้จากเส้นใยที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเชิงกล (TMP) มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่เตรียมจากเส้นใยเชิงกล (MP) ส่วนสมบัติอื่นๆ มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากเกินไปจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง การยึดติดของเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ดี ปริมาณการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาชนิดของพอลิเมอร์ชนิดใหม่และชนิดรีไซเคิลจะให้สมบัติโดยรวมใกล้เคียงกัน

กนิษฐา อังกรรัตน์ [33] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ซีลีเนียมจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรง และใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด A-172 (Vinyl-tris-(2-methoxyethoxy)silane) และพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (PP-g-MA) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้และการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์กับส่วนเสริมแรง พบว่าสารคู่ควบทั้ง 2 ชนิด ช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น และการใช้สารคู่ควบไซเลนให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ PP-g-MA สำหรับการใส่สารคู่ควบทั้ง 2 ชนิดร่วมกันช่วยปรับปรุงสมบัติด้านโค้งงอดีกว่าการใช้สารคู่ควบชนิดเดียว นอกจากนี้การใช้สารคู่ควบที่อัตราส่วน PP-g-MA : Silane เท่ากับ

1:1 เหมาะสมที่สุด ส่วนฐานฐานวิทยาของวัสดุที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ เมื่อผู้เขียนได้เห็นใบขอรับระเบียนดำเนินการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารคู่ควบสามารถปรับปรุงการยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคทั้งสองได้

Abu-Sharkh และ Hamid [34] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและความคงทนต่อสภาพอากาศของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปาล์มกับพอลิพรอพิลีน (PP) โดยใช้มาเลอิกแอนไฮดริดรายด์เป็นสารช่วยผสม 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 ที่มีการเติมสารช่วยผสมให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเนื่องจากเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพลาสติก PP ได้ดีกว่า

Khalid และคณะ [35] ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยจากทะเลสาบปาล์มเปล่า (EFBF) ที่ไม่ได้กำจัดลิกนิน (PP-EFBF) และพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยทะเลสาบปาล์มเปล่าที่ผ่านการกำจัดลิกนินแล้ว (PP-cellulose) งานวิจัยนี้เส้นใยปาล์มเตรียมมาจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้มาตรฐาน ASTM D1104 จากนั้นนำเส้นใย EFBF-Cellulose และEFBF ผ่านกระบวนการผสมในปริมาณต่างๆ กันมากกว่า 50 wt% ผสมกับพลาสติกพอลิพรอพิลีน (PP) โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ในการทดสอบสมบัติเชิงกลและต้นฐานวิทยาพบว่า PP-Cellulose ให้สมบัติที่ดีกว่า PP-EFBF และงานวิจัยนี้ยังบอกอีกว่าเซลล์โลสให้ผลในทางบวกในการเป็นสารตัวเติมในเทอร์โมพลาสติก ค่าความแข็งแรงดึงและค่า โมดูลัสโค้งงอของคอมโพสิต PP-cellulose มีค่าสูงกว่า PP-EFBF สมบัติเชิงกลนี้สามารถนำไปปรับปรุงโดยใช้เป็นสารคู่ควบ (Coupling Agent) หลายๆ ชนิดอย่างเช่น PP-g-MA และ Multifunction Acrylates ในการเชื่อมโยงระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์

Rozman และคณะ [36] ได้ศึกษาความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทกของคอมโพสิตเส้นใยทะเลสาบปาล์มเปล่า (EFBF)-พอลิพรอพิลีน (PP) โดยศึกษาผลของมาเลอิกแอนไฮดริด (MAH) งานวิจัยนี้เน้นไปที่ผลของการปรับปรุงทางเคมีโดยการเติมเส้นใย EFBF พบว่าสมบัติความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงกระแทกของ EFBF-PP ที่มี EFBF เป็นสารตัว

เติมปรับปรุงทางเคมีร่วมกับ MAH มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี (ละลายใน Dimethylformamide) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 90°C คอมโพลีเมอร์เคลือบด้วย MAH ลงบนเส้นใย EFBF มีความแข็งแรงยืดหยุ่นและความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าคอมโพลีเมอร์ที่ไม่ได้เคลือบ การปรับปรุงนี้สามารถปรับปรุงค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และความเหนียวของคอมโพลีเมอร์ได้ ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเกาะติดระหว่าง EFBF และ PP เมตริกซ์ได้ ซึ่งจะเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หมู่ที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของพันธะ C=C และ C=O ของ MAH จากเครื่อง FT-IR Spectrometer ที่ช่วง  $1630\text{ cm}^{-1}$  และ  $1730\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ การวิเคราะห์นี้ยังแสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่ลดลงของ MAH ที่เคลือบบน EFBF-PP คอมโพลีเมอร์

Bouafif และคณะ [37] ศึกษาผลของลักษณะเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของ WPC โดยศึกษาผลของการเปลี่ยนชนิดเส้นใย 5 ชนิด (Cedar sapwood, Cedar Sapwood, Jack Pine Bark, Jack Pine และ Black Spruce) ขนาดของเส้นใย (24, 42 และ 65 mesh) และปริมาณการเติมเส้นใย (25, 35 และ 45 %wt) แล้วนำไปศึกษาผลที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของไม้เทียม WPC โดยพลาสติก HDPE และเส้นใยถูกผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-Screw Extrusion) และทำการขึ้นรูปโดยการฉีด (Injection Molding) ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลพบว่า เส้นใยที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของคอมโพลีเมอร์สูงกว่าคอมโพลีเมอร์ที่ใช้เส้นใยที่มีขนาดเล็ก แต่ค่าการดึงยึด ณ จุดขาดต่ำ ผลการดูดซับน้ำของขนาดเส้นใยมีผลน้อยมาก การเพิ่มขึ้นของเส้นใยจะช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรง (Tensile Strength และ Flexural Modulus) และค่าความต้านทานต่อการเสียรูป (Stiffness) แต่ค่าความยืดหยุ่นและการดึงยึด ณ จุดขาดจะต่ำ การดูดซับน้ำจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย

Suradi และคณะ [38] ศึกษาการใช้เส้นใยทะเลสาบปาล์มเปล่าในการเสริมแรงพลาสติกคอมโพลีเมอร์ โดยศึกษาผลเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยทะเลสาบปาล์มเปล่า (Oil Palm Empty Fruit Bunch) ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์ เปอร์ออกไซด์ (Alkaline peroxide) เพื่อที่จะกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออก คอมโพลีเมอร์ในงานวิจัยนี้จะมีทั้งปรับปรุงพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์ เปอร์ออกไซด์ และไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวโดยควบคุมอัตราส่วนพลาสติก PP ต่อเส้นใย 50:50 (wt/wt) โดยใส่สารคู่ควบ อัตราส่วนเส้นใยต่อ PP-g-MA 10 : 1 แล้วผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก ผลการทดสอบพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสโค้งงอที่ถูกปรับปรุงด้วยอัลคาไลน์ เปอร์ออกไซด์มีค่าสูงกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุง การเติมสารคู่ควบ MAPP ทำให้พันธะระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ดูได้จากค่าความแข็งแรง

ดึงและค่ามอดุลัสโค้งงอที่สูงขึ้น ผลทางความร้อน TGA พบว่า เส้นใยที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย อัลคาไลน์เปอร์ออกไซด์ มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว

Karmarkar และคณะ [39] ศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใยไม้ที่เสริมแรงในพลาสติก พอลิพรอพิลีน คอมโพสิต (PP Composites) โดยศึกษาผลของสารช่วยผสมหมู่ฟังก์ชันของ ไอโซไซยานาต (Isocyanate Functional Group) ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเส้นใยไม้ยูคาลิปตัสมาเสริมแรงในพลาสติกพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต โดยการผสมสารช่วยผสมชนิดใหม่ M-TMI (M-Isopropenyl- $\infty$ ,  $\infty$ -Dimethylbenzyl-Isocyanate และ PP ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ อัตราส่วนพลาสติก PP/M-TMI/DCP 100/10/10 (wt/wt) พบว่าการเติมสารช่วยผสมช่วยให้การเสริมแรงของคอมโพสิตดีขึ้น และยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลอีกด้วย ดูได้จากค่าความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นจาก 45% เป็น 85% และความแข็งแรงโค้งงอก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนค่าการยึดฉีก จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง ผลจากการวิเคราะห์ FT-IR Spectrometer พบว่า หมู่ฟังก์ชันของ  $-NCO$  ( $2260\text{ cm}^{-1}$ ) ของ M-TMI-g-PP เกิดพันธะโคเวเลนต์กับหมู่  $-OH$  ของเส้นใยไม้ โดยดูได้จากเกิด  $C=O$  ที่  $1720\text{ cm}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่า เส้นใยนี้สามารถเสริมแรงให้กับพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตได้

ณัฐชญาภา ธนวัตนาศิริกุล และคณะ [26] ทำการศึกษาและผลิตวัสดุไม้พลาสติกจาก ไม้ปาเล็มและพลาสติกเหลือใช้ ซึ่งไม้ปาเล็มเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น โดยนำผงไม้ปาเล็มมาผสมกับเศษพลาสติก HDPE ซึ่งได้มาจากขวดน้ำดื่มขวดใช้แล้วและมีการใช้สารเติมแต่งคือ มาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (MAH) ซึ่งมีสมบัติเป็นสารช่วยผสม โดยวัตถุดิบทั้งหมดจะถูกผสมกันในอัตราส่วนระหว่างผงไม้กับ HDPE และ MAH ที่ 50:47:3, 40:57:3 และ 30:67:3 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดร้อนที่อุณหภูมิ 130 150 และ 170 °C ความดัน 2500 psi แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานของ ASTM โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งการทดสอบ ซึ่งผลการทดลองพบว่า มอดุลัสโค้งงอ ความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกด และความแข็งแรงกระแทกของไม้พลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วน การเพิ่มขึ้นของเศษพลาสติกและอุณหภูมิในการขึ้นรูป โดยที่สัดส่วน 30:67:3 อุณหภูมิ 170 °C มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับไม้เทียมทางการค้าพบว่า ไม้พลาสติกมีความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าไม้เทียมทางการค้า แต่ความแข็งแรงและความแข็งแรงกดน้อยกว่าไม้เทียมทางการค้า ส่วนความแข็งแรงโค้งงอมีค่าใกล้เคียงกับไม้เทียมทางการค้า โดยมี

ต้นทุนรวมเท่ากับ 52.02 บาทต่อชิ้น สำหรับสัดส่วน 30:67:3 ต้นทุนรวมเท่ากับ 51.60 บาทต่อชิ้น สำหรับสัดส่วน 40:57:3 และสัดส่วน 50:47:3 มีต้นทุนรวมเท่ากับ 51.18 บาทต่อชิ้น

กฤษิต เลิศวัฒนารักษ์ และอัญชิสา สันติจิตโต [40] ศึกษาสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์ม (กาก) เพื่อผลิตวัสดุก่อสร้าง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรภายในประเทศ ขนาดความยาวเส้นใยที่ใช้คือ 5-10 มิลลิเมตร ปรับสภาพผิวของเส้นใยโดยล้างด้วยน้ำประปาจน pH เท่ากับ 7 แล้วต้มให้เดือดเป็นเวลา 2 ชม.และอบให้แห้ง เปรียบเทียบสมบัติองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยพบว่า ปริมาณเถ้า, การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน, การละลายในน้ำร้อน และการละลายในสารละลาย มีปริมาณลดลง โดยเฉพาะการลดลงของสิ่งเจือปน เช่น เถ้า ส่งผลให้เส้นใยมีความคงตัวมากขึ้น ลิกนิน, อัลฟาเซลลูโลส และแพนโตซานมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการต้มทำให้ลิกนินหลุดออกได้ เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของลิกนินอยู่ที่ 120-140°C ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าเส้นทั้งสองก่อนการปรับสภาพมีผิวขรุขระไม่สม่ำเสมอ หลังจากปรับสภาพผิวเส้นใยเรียบขึ้น สิ่งเจือปนลดลงทำให้เกิดช่องว่างภายในอนุภาคเพิ่มมากขึ้น เส้นใยมีความหนาแน่นลดลง จากนั้นผสมเส้นใยตามสูตรซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเส้นใยทั้ง 2 ชนิด มีค่าความพรุน (Apparent Porosity) และความสามารถในการดูดน้ำ (Water Uptake) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นใยโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดและค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลง

กนกอร แสงสุวรรณ [41] ศึกษาไม้พลาสติกจากพอลิโอฟีนส์และเส้นใยมะพร้าว โดยใช้พลาสติก LLDPE และ PP ผสมกับเส้นใยมะพร้าวที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) โดยทำการผสมวัตถุดิบต่างๆ ให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll Mill) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ศึกษาอัตราส่วนของพอลิเมอร์และเส้นใย (100:0, 70:30, 60:40 และ 50:50) พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 50:50 เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลบางประการลดลง เช่น ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ จากการศึกษ ปริมาณสารช่วยผสม พบว่า สมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้น และ%การดูดน้ำลดลง และปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสม คือ 2%

วิทยา ปั้นสุวรรณ และคณะ [42] ศึกษาการแยกองค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยใช้ปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายกรดเจือจาง แล้วตามด้วยปฏิกิริยากำจัดลิกนินด้วยสารละลายเบสปฏิกิริยา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรไลซิสเกิดขึ้น โดยกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ โดยนำชานอ้อยที่แช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางเป็นเวลา 1 คืน ไประเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลานาน 4 นาที ชานอ้อยที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำ ถูกนำไปล้างในน้ำร้อน เพื่อให้ได้สารละลายเฮมิเซลลูโลส เยื่อชานอ้อยที่ล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว ถูกนำไปกำจัดเอาลิกนินออกโดยต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 120 นาที ผลการทดลอง พบว่า ผลการคืนกลับของไซโลสและเยื่อแอลฟาเซลลูโลสสูงมีค่าเท่ากับ 83% และ 30% เทียบกับชานอ้อยวัตถุดิบ เยื่อชานอ้อยที่ได้ภายหลังการกำจัดลิกนินถูกนำไปฟอกขาว 2 ครั้งด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อผลิตเยื่อที่มีแอลฟาเซลลูโลสสูง

วิทยา ปันสุวรรณ [43] ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ พืชที่ไม่ใช่ไม้ 10 ชนิด ถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐานของ TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) คือ วิเคราะห์หาปริมาณไฮโลเซลลูโลส ลิกนิน เถ้า สารแทรกที่ละลายได้ในเอทานอลและเบนซีนและแอลฟาเซลลูโลส ผลการวิเคราะห์ พบว่า เปลือกในของปอทุกชนิด คือ ปอสา ปอแก้ว ปอกระเจา ปอควบาเหมาะสมที่จะใช้ทำเยื่อกระดาษ กาบกล้วยไม่เหมาะสม ส่วนเปลือกในของหม่อน ใบสับปะรด กาบปาล์มน้ำมันมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำเยื่อกระดาษได้ เพราะมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับชานอ้อยและชังข้าว ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษในปัจจุบัน

กษมา จารุกัจจร และวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ [44] ศึกษาผลของการตัดแปรทางความร้อนและสารช่วยผสมให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิพรอพิลีน (PP) และเส้นใยป่านสรนารายณ์ ผลของการตัดแปรทางความร้อนและสารช่วยผสมให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านสรนารายณ์ชนิดสั้นกับ PP พอลิเมอร์ถูกเตรียมโดยเครื่องบดผสม และชิ้นงานทดสอบถูกขึ้นรูปโดยเครื่องฉีดขึ้นรูป จากการศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการตัดแปรทางความร้อน พบว่าค่าความแรงดึงของเส้นใยป่านสรนารายณ์เพิ่มขึ้น ที่การตัดแปรที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C พบว่าค่าความแรงดึงของเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรที่เวลาการตัดแปรต่างๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การตัดแปรทางความร้อนที่อุณหภูมิ 200°C ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดได้ที่เวลาในการตัดแปรเท่ากับ 5 นาที นอกจากนี้การตัดแปรทางความร้อนยังสามารถกำจัดองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จีซี และบางส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งมีความเสถียรต่อความร้อนต่ำออกจากผิวของเส้นใยได้ ส่งผลให้เพิ่มความเสถียรต่อความร้อนของเส้นใยได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการตัดแปร ส่งผลให้ความเสถียรต่อความร้อนของเส้นใยป่านสรนารายณ์สูงขึ้น ภาพถ่ายจาก SEM แสดงให้เห็นแล้วว่า พื้นผิวของเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการตัดแปรทางความร้อนมีความขรุขระมากกว่าพื้นผิวของเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรความร้อน

ซึ่งส่งผลต่อการยึดติดที่วัฏภาคระหว่างเส้นใยและพอลิพรอพิลีนให้ดีขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสม PP-g-MA

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า WPC จากเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อใส่สารช่วยผสมพอลิพรอพิลีนต่อกึ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ทำให้ WPC มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยใช้อัตราส่วนพอลิเมอร์ต่อเส้นใยที่เหมาะสม คือ 50:50 โดยน้ำหนักเส้นใย งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เส้นใยปาล์มน้ำมัน (เส้นใยทะเลปาล์มเปล่า, เส้นใยทางใบ และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม) ที่เหลือทิ้งจากภาคการเกษตรมาทำ WPC โดยใช้พอลิพรอพิลีนเป็นเมทริกซ์ และปรับปรุงเส้นใยด้วยกระบวนการความร้อนเชิงกลเพื่อพัฒนา WPC ในเชิงพาณิชย์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

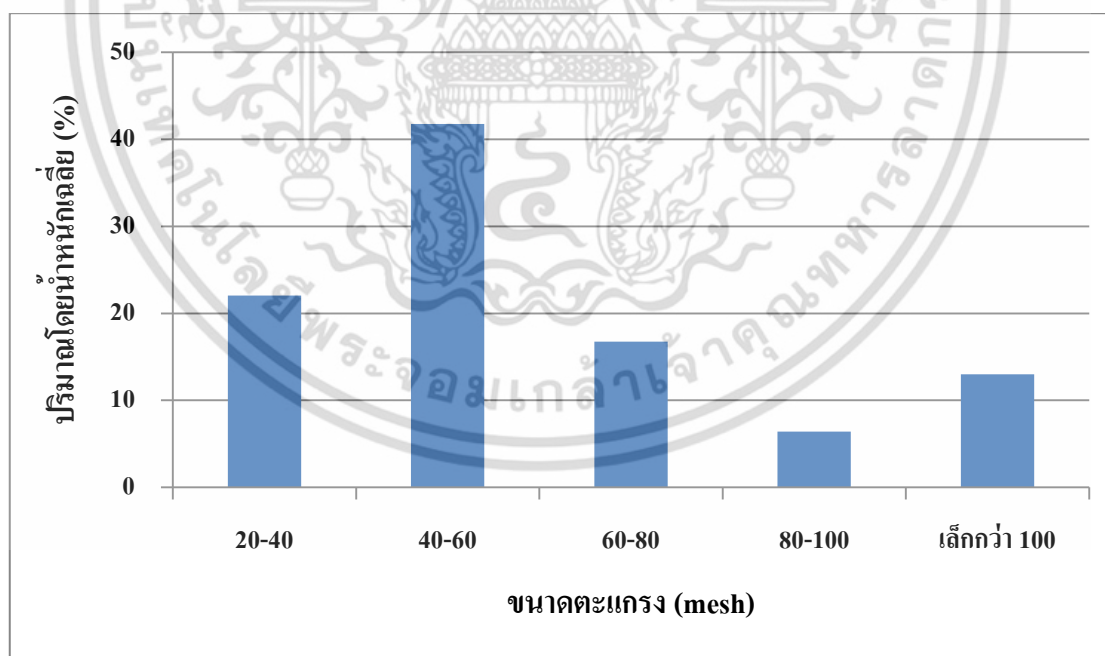
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites; WPC) จากพอลิพรอพิลีน (PP) และเส้นใยปาล์มน้ำมันที่เป็นขยะเหลือจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิดได้แก่ เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch Fibers; EFBF) เส้นใยทางใบ (Frond Fibers; FF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF) โดยเลือกใช้เส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า 80 mesh และสัดส่วนที่ใช้พลาสติกต่อเส้นใยเป็น 50:50 (wt/wt) โดยทำการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ได้แก่การวิเคราะห์เส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ผลของชนิดเส้นใยและปริมาณสารช่วยผสม (Compatibilizer) เปรียบเทียบเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการเชิงกล (MF-MP) และ ความร้อนเชิงกล (MF-TMP) ผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) ออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม ผลของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่เพิ่มเข้าไปในเส้นใยปาล์ม ฯลฯ แล้วเลือกสูตรผสมที่มีสมบัติเชิงกลดีไปขึ้นรูป WPC ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยปาล์ม

ตอนนี้เป็นการศึกษาลักษณะของเส้นใยปาล์มที่มาจากแต่ละส่วนของต้นปาล์ม ได้แก่ เส้นใย EFBF (Empty Fruit Bunch Fibers), เส้นใยทางใบ (Frond Fibers; FF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF) เพื่อดูว่าการเตรียมเส้นใยด้วยกระบวนการเชิงกล (MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ลักษณะแต่ละส่วนต่างกันอย่างไร โดยการนำเส้นใยขนาดเล็กกว่า 80 mesh มาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20-40 mesh, 40-60 mesh, 60-80 mesh, 80-100 mesh และเล็กกว่า 100 mesh แล้วหาปริมาณน้ำหนักโดยเฉลี่ย (%) ของแต่ละขนาด โดยสุ่มตัวอย่างขนาดละ 100 ชิ้น เพื่อนำไปส่องหาขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) เฉลี่ยจากการวัดขนาดหาค่าสัดส่วนความเพริว (Aspect Ratio) ของแต่ละขนาด ผลการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยปาล์มที่ร่อนแล้วและการกระจายตัวของเส้นใยแสดงได้ดังตารางที่ 4.1-4.4

ตารางที่ 4.1. การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยทะเลสาบปลาที่ผ่านกระบวนการเชิงกล EFBF

ตัวอย่าง	ตะแกรง (mesh)	ขนาดรู ตะแกรง เฉลี่ย (mm)	ขนาดเส้นใย			สัดส่วน ความ เฟรียว	ปริมาณโดย น้ำหนัก (%) เฉลี่ย
			กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)		
EFBF	-20 +40	0.638	0.51	7.13	0.25	28.21	22.06
	- 40+60	0.337	0.39	4.73	0.18	26.98	41.76
	- 60+80	0.215	0.23	2.61	0.14	18.77	16.76
	-80 +100	0.165	0.20	2.51	0.10	25.49	6.42
	-100	0.135	0.15	2.44	0.08	29.00	13.00

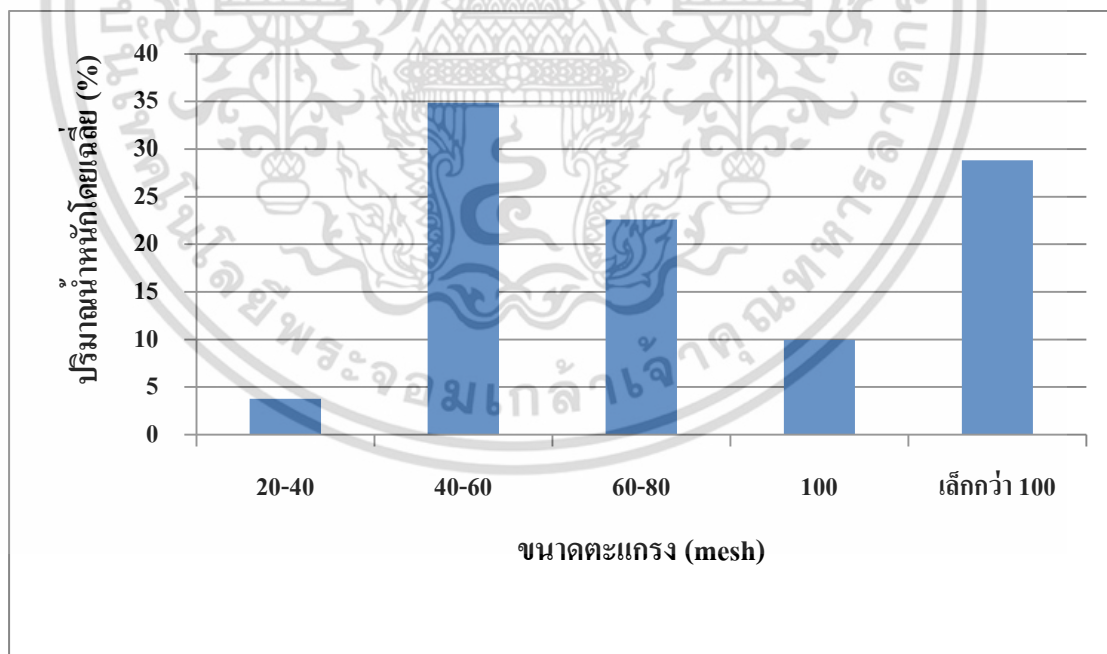


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย EFBF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยทางใบที่ผ่านกระบวนการเชิงกล FF

ตัวอย่าง	ตะแกรง (mesh)	ขนาดรู ตะแกรง เฉลี่ย (mm)	ขนาดเส้นใย			สัดส่วน ความเพรียว	ปริมาณโดย น้ำหนัก (%) เฉลี่ย
			กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)		
FF	-20 +40	0.638	0.49	2.30	0.19	11.86	3.77
	- 40+60	0.337	0.41	1.74	0.15	11.63	34.86
	- 60+80	0.215	0.25	1.37	0.14	10.10	22.60
	-80 +100	0.165	0.21	1.29	0.13	9.93	9.94
	-100	0.135	0.17	1.13	0.12	9.68	28.83

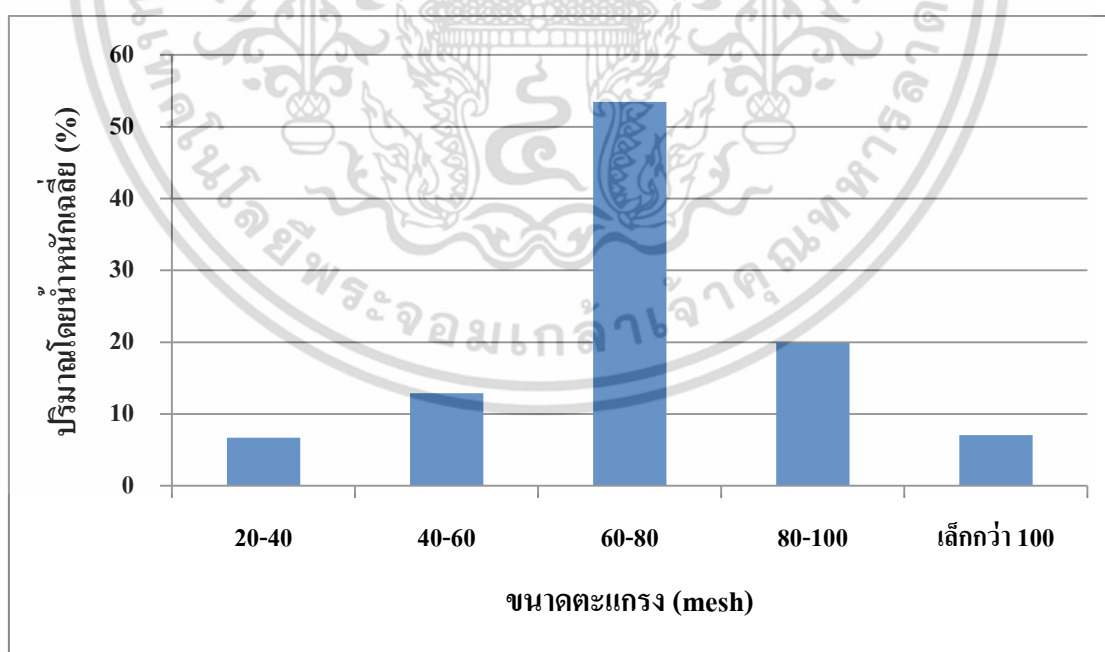


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย FF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการเชิงกล MF

ตัวอย่าง	ตะแกรง (mesh)	ขนาดรู ตะแกรง เฉลี่ย (mm)	ขนาดเส้นใย			สัดส่วน ความเพริยว	ปริมาณโดย น้ำหนัก (%) เฉลี่ย
			กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)		
MF	-20 +40	0.638	0.17	4.95	0.13	39.24	6.70
	-40+60	0.337	0.16	5.06	0.14	34.92	12.88
	-60+80	0.215	0.23	3.36	0.17	20.16	53.48
	-80 +100	0.165	0.18	3.76	0.15	24.63	19.88
	-100	0.135	0.15	2.97	0.12	25.26	7.06

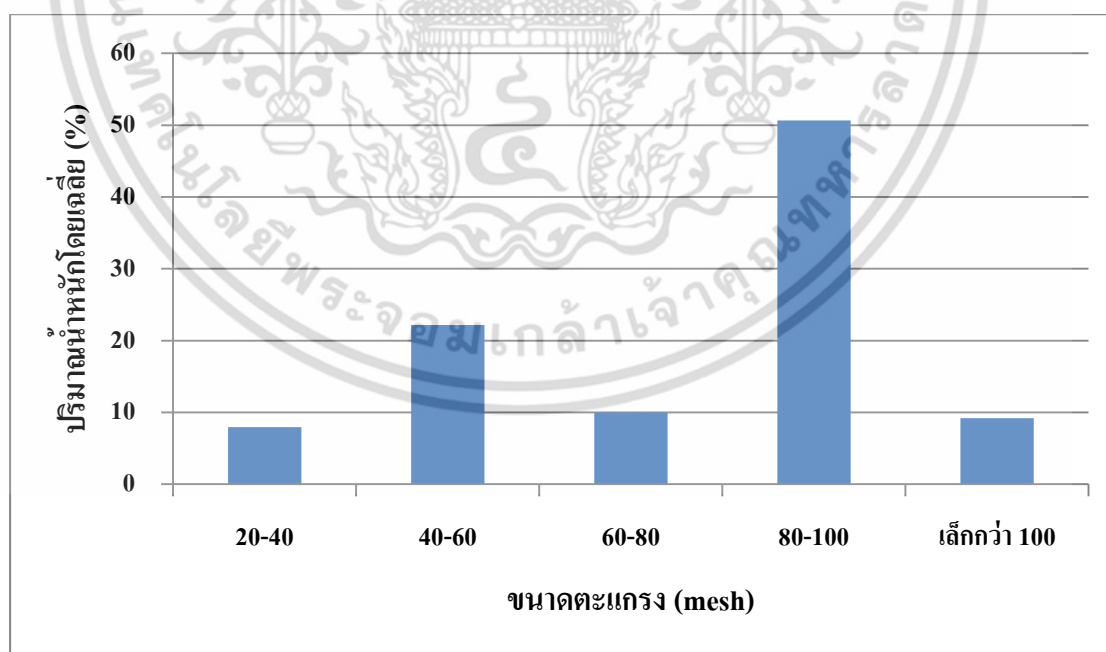


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย MF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล MF-TMP

ตัวอย่าง	ตะแกรง (mesh)	ขนาดรู ตะแกรง เฉลี่ย (mm)	ขนาดเส้นใย			สัดส่วน ความเพรีชว	ปริมาณโดย น้ำหนัก (%) เฉลี่ย
			กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)		
MF-TMP	-20 +40	0.638	0.58	7.82	0.32	24.12	7.95
	- 40+60	0.337	0.35	5.58	0.22	25.1	22.18
	- 60+80	0.215	0.24	5.25	0.17	34.48	10.02
	-80 +100	0.165	0.18	2.56	0.13	19.01	50.67
	-100	0.135	0.15	1.78	0.11	15.55	9.18



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการกระจายตัวของเส้นใย MF-TMP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีสัดส่วนมากที่สุดในแต่ละเส้นใย

ชนิดเส้นใยปาล์ม	ขนาด (mesh)	ปริมาณโดยน้ำหนักเฉลี่ย (%)	สัดส่วนความเพรียว
EFBF	40-60	41.76	26.98
FF	40-60	34.86	11.63
MF	60-80	53.48	24.63
MF-TMP	80-100	50.67	19.01

จากตารางที่ 4.1-4.5 และรูปที่ 4.1-4.4 พบว่า เส้นใยขนาดเล็กกว่า 80 mesh ของเส้นใยปาล์มทั้ง 4 ชนิดมีการกระจายตัวของเส้นใยทุกขนาด โดยที่เส้นใย EFBF และเส้นใย FF มีขนาด 40-60 mesh เป็นปริมาณมากที่สุด เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเฉลี่ย 41.76 และ 34.86 สัดส่วนความเพรียว 26.98 และ 11.63 ตามลำดับ เส้นใย MF และเส้นใย MF-TMP ขนาดที่มีปริมาณเส้นใยมากที่สุดคือ 60-80 mesh 80-100 mesh โดยมากที่สุดที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเฉลี่ย 53.48 และ 50.67 สัดส่วนความเพรียว 24.63 และ 19.01 ตามลำดับ

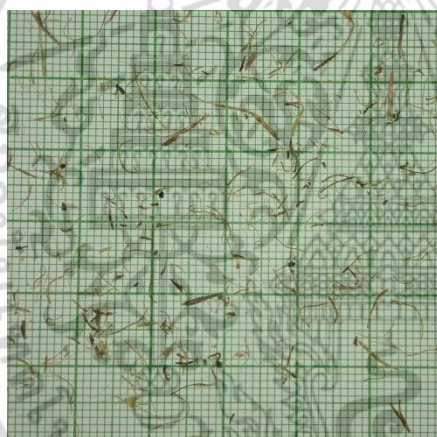
เส้นใย EFBF, FF และ MF เป็นเส้นใยที่ผ่านกระบวนการเชิงกล (MP) ลักษณะของเส้นใยทั้ง 3 มีลักษณะที่ต่างกัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใยจะเห็นว่า เส้นใย FF เป็นเส้นใยที่สั้นกว่าเส้นใย EFBF และเส้นใย MF และสัดส่วนความเพรียวของเส้นใย FF มีค่าน้อยกว่าเส้นใยอีกสองชนิด อาจทำให้ไม่เสริมแรงดีเท่ากับเส้นใยชนิดอื่น ซึ่งจะอภิปรายผลการวิจัยในหัวข้อต่อไป

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 พบว่า เส้นใย MF-TMP ที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล โดยการเตรียมเส้นใยผ่านเครื่องบดเยื่อไม้ (Defibrator) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิสูง 170 °C และความร้อนสูง นอกจากนี้ยังมีการใช้แรงเฉือนเชิงกลจากเครื่องบดเยื่อไม้โดยทั่วไป เส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการนี้ จะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง และมีสัดส่วนความเพรียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากลิกนิน (Lignin) ที่เป็นสารเชื่อม (Binder) หรือเมทริกซ์ ยึดส่วนเสริมแรงได้แก่ เส้นใยเซลลูโลสเข้าด้วยกันในเนื้อไม้ ลิกนินเป็นวัสดุประกอบลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature;  $T_g$ ) ที่ 140 °C การใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันและแรงเฉือน ทำให้ได้เป็นเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง และมีความสะอาดมากขึ้น เกิดการหลุดออกของสารที่ละลายน้ำได้ (Extractives) เช่น แป้ง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำตาล อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้พบว่า จากผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นใย MF-TMP มีการกระจายตัวอยู่ทุกขนาด โดยมีขนาด 80-100 mesh มีปริมาณมากที่สุด (50.67%) สัดส่วนความเพียว 19.01 ซึ่งเมื่อเทียบกับเส้นใย MF-MP แล้วไม่ได้เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ในเบื้องต้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากเส้นใยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเส้นใยที่มีลักษณะเป็นมัดเส้นใย (Bundle) การกระจายของเส้นใยจึงมีหลายขนาดไม่เหมือนกับเส้นใยทั่วไป เส้นใยบางส่วนอาจเกิดการพันกัน และเกิดการหักของเส้นใย ทำให้เส้นใยที่ได้มีความยาวสั้นลง ดังตารางที่ 4.5 เป็นผลให้สัดส่วนความเพียวลดลง

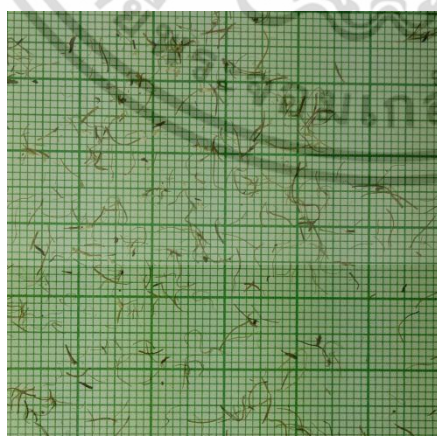
จากรูปที่ 4.5 เป็นภาพถ่ายการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มแต่ละชนิดบนกระดาษกราฟ โดยความยาวของ 1 ช่องเล็กเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จะเห็นว่าเส้นใยปาล์มขนาดเล็กกว่า 80 mesh แต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์ยังคงมีการกระจายตัวอยู่หลากหลาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค OM ดังที่แสดงผลการวิจัยก่อนหน้า



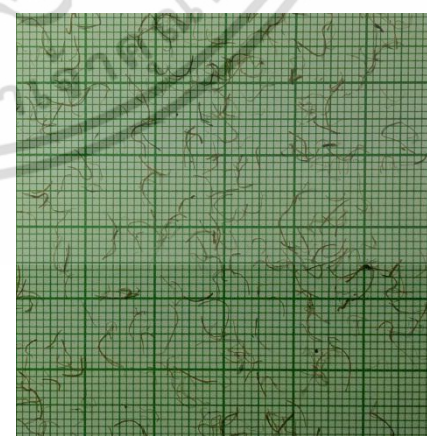
(ก) เส้นใย EFBF



(ข) เส้นใย FF



(ค) เส้นใย MF-MP



(ง) เส้นใย MF-TMP

**รูปที่ 4.5** ภาพถ่ายแสดงการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

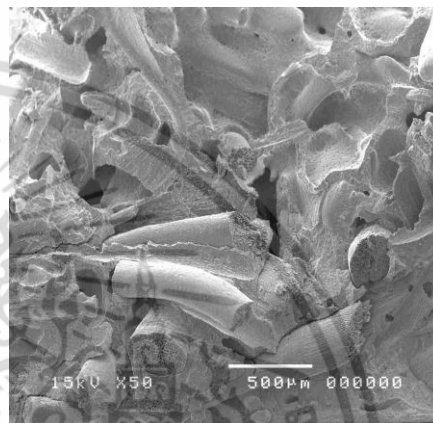
## 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### (Scanning Electron Microscope; SEM)

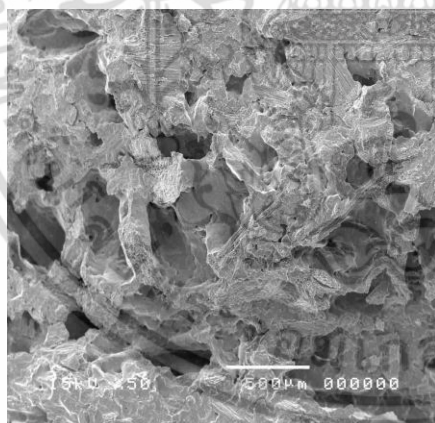
สัณฐานวิทยาของคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มและลักษณะพื้นผิวของคอมโพสิต โดยเตรียมตัวอย่างคอมโพสิตด้วยวิธีการแช่ในไนโตรเจนเหลว และหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Cracking)



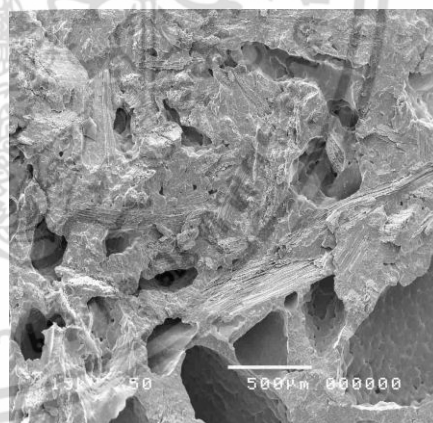
(ก) WPC-EFBBF-MA 0%



(ข) WPC-EFBBF-MA 2%

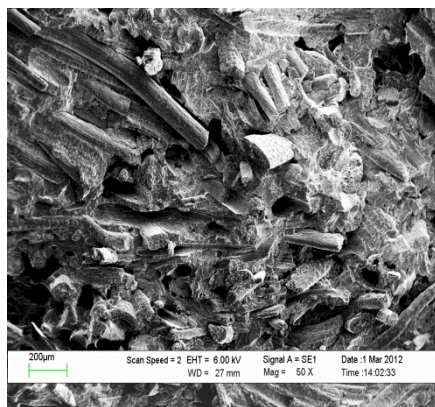


(ค) WPC-FF-MA 0%

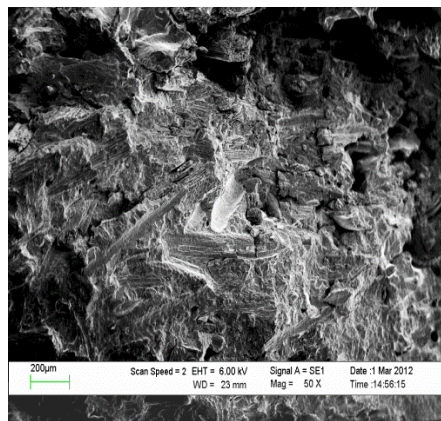


(ง) WPC-FF-MA 2%

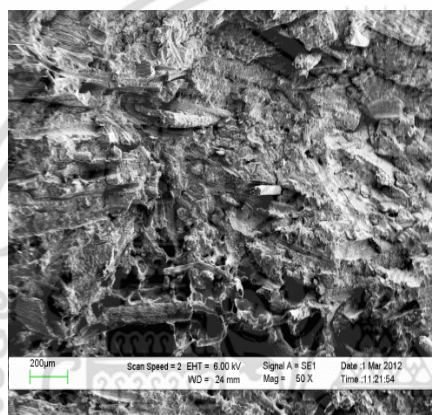
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



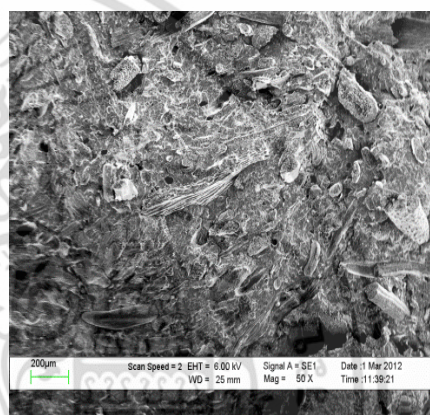
(จ) WPC-MF-MA 0%



(ฉ) WPC-MF-MA 2%



(ค) WPC-MF-TMP-MA 0%



(ช) WPC-MF-TMP-MA 2%

รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของ WPC ของเส้นใยปาล์มแต่ละชนิด ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จากรูปที่ 4.6 (ค)-(ง) แสดงภาพไม้เทียมที่เตรียมได้จากเส้นใยทางใบ (WPC-FF) ก่อนเติมสารช่วยผสมและหลังเติมสารช่วยผสม ตามลำดับ พบว่า การกระจายตัวของเส้นใยทางใบมีการกระจายตัวทั่วชิ้นงาน ลักษณะสัณฐานของเส้นใยทางใบปาล์มมีพื้นผิวขรุขระ เส้นใยค่อนข้างเล็กและสั้น เส้นใยและพอลิเมอร์ยึดติดกันดี ไม่เห็นรอยต่อของวัฏภาค แต่เนื่องจากเส้นใยชนิดนี้มีขนาดสั้นและเล็กมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้ยากต่อการผสม เป็นผลให้เกิดช่องว่างรอยตำหนิ (Voids) อันเนื่องจากเส้นใยจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerate) เป็นผลให้พอลิเมอร์ไม่สามารถเข้าไปล้อมรอบเส้นใยได้ทั้งหมด นอกจากนี้เส้นใยสั้นอาจให้การเสริมแรงของเส้นใยมีค่าสมบัติเชิงกลด้อยกว่าเส้นใยอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 (จ) แสดงภาพไม้มัดที่เตรียมได้จากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (WPC-MF) ที่ยังไม่ได้เติมสารช่วยผสม พบว่า การกระจายตัวของเส้นใยเปลือกผลปาล์มมีการกระจายทั่วชิ้นงาน ลักษณะพื้นฐานของเส้นใยมีผิวขรุขระ เมื่อเติมสารช่วยผสมตามรูปที่ 4.5 (ฉ) พบว่า เส้นใยและพอลิเมอร์ยึดกันได้ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.5 (ซ) แสดงภาพไม้มัดที่เตรียมได้จากเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล (WPC-MF-TMP) เส้นใยผ่านการล้างและใช้ความร้อนในการต้มเป็นการกำจัดสารประกอบที่มีโมเลกุลต่ำบางส่วนออกจากเส้นใย ทำให้เส้นใยที่ได้มีความสะอาดมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของเส้นใยกับพอลิเมอร์มีมากขึ้น เมื่อเติมสารช่วยผสมดังรูปที่ 4.5 (ซ) พบว่า เส้นใยและพอลิเมอร์ยึดกันได้ดี

ช่องว่างสีดำในรูปที่ 4.5 (ก)-(ซ) เป็นรอยตำหนิเนื่องจาก ลักษณะพื้นฐานของเส้นใย เส้นใยที่มีพื้นผิวเรียบ จะทำให้เกิดการหลุดออกของเส้นใย (Fiber-Pull Out) ได้ง่ายกว่าเส้นใยที่ผิวขรุขระเห็นได้จาก WPC-EFBE รูปที่ 4.5 (ก)-(ข), การจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) ในระหว่างการผสมเห็นได้จาก WPC-FF รูปที่ 4.5 (ค)-(ง) เนื่องจากเส้นใย FF มีขนาดค่อนข้างเล็ก พื้นที่ผิวจึงมีมาก และงานวิจัยนี้ใช้เส้นใย : พอลิเมอร์เท่ากับ 50:50 wt/wt เส้นใยมีปริมาณมาก ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในรูช่องว่างของเส้นใยได้ทั้งหมด เป็นผลให้เกิดรูช่องว่างขนาดใหญ่ขึ้นในคอมโพสิต

ผลจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า WPC ของเส้นใย MF ทั้งที่เตรียมจากกระบวนการ MP และ TMP เกิดจุดบกพร่องและช่องว่างน้อยกว่า WPC ของเส้นใย EFBE และเส้นใย FF อาจเนื่องจากลักษณะพื้นผิวของเส้นใย MF ที่สามารถยึดติดกันได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เป็นผลให้เกิดรอยตำหนิในคอมโพสิตน้อยกว่าเส้นใยอื่น

### 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มน้ำมัน

หัวข้อนี้เป็นการหาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มชนิดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งทำการวิเคราะห์ที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร (Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute.; KAPI) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการทดลองในตอนนี้ต้องการจะเปรียบเทียบเส้นใยธรรมชาติปาล์มจากแต่ละส่วนของปาล์มน้ำมันว่ามีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันอย่างไร

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มที่เตรียมด้วยกระบวนการเชิงกล (MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) พบว่า เส้นใยของแต่ละส่วนที่ได้จากต้นปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้สามารถบอกถึงพฤติกรรมความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใยได้จาก ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณลิกนิน จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเส้นใย MF มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสทั้งที่เตรียมด้วยกระบวนการ MP และกระบวนการ TMP มากที่สุด กล่าวคือ เส้นใย MF จะมีโครงสร้างความแข็งแรงมากที่สุด รองเส้นใย EFBF และเส้นใย FF ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่เส้นใย MF โดยการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP และ TMP จะเห็นว่า เส้นใย MF-TMP มีการลดลงของสิ่งเจือปน เช่น การละลายในน้ำร้อน และปริมาณเถ้า ในปริมาณที่ลดลง สามารถบอกถึงความสะอาดที่มากขึ้น เนื่องจากสารโมเลกุลต่างๆ หลุดออกไป (Extractives) โดยเฉพาะกลุ่มของแว็กซ์ (Wax/Impurity) ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงและมีความคงตัวมากขึ้น ส่วนองค์ประกอบหลักที่ทำหน้าที่เชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกัน เช่น ลิกนิน ไฮโดรเซลลูโลส พบว่า ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสของ MF-TMP ลดลง เนื่องมาจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) เป็นกระบวนการที่ใช้ไอน้ำล้างเส้นใย ความดันและความร้อนประมาณ 170°C ไอน้ำจะทำให้ลิกนินนึ่งตัว โดยลิกนินมี  $T_g$  ประมาณ 140°C [40] และไอน้ำยังสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสละลายบางส่วนของเฮมิเซลลูโลสออกมา [42] จึงส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสมีปริมาณลดลง

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์ม

องค์ประกอบทางเคมี	EFBF	FF	MF-MP	MF-TMP	มาตรฐาน TAPPI
1. การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน	5.15	4.31	7.04	4.62	T204-om-97
2. การละลายในแอลกอฮอล์	2.07	2.31	1.39	1.03	T264-om-97
3. การละลายในน้ำร้อน	8.46	2.31	5.55	1.92	T207-om-93
4. ปริมาณลิกนิน	18.04	14.27	32.85	35.74	T222-om-98
5. ปริมาณ ไฮโดรคลอไรต์	66.19	77.81	65.29	60.27	Acid chlorite Method of Browning
6. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	43.43	39.48	53.51	52.17	T203-om-93
7. ปริมาณเพนโตแซน	17.57	17.71	26.52	24.70	T223-om-84
8. ปริมาณเถ้า	5.85	2.60	4.99	1.81	T211-om-93
9. ปริมาณความชื้นในวัตถุดิบ	8.95	7.53	7.52	7.19	-
10. ปริมาณละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	30.01	32.52	32.40	31.93	T212-om-98

#### 4.4 สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimetry; DSC)

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ พอลิพรอพิลีน (PP) จัดเป็นพอลิโอเลฟินส์ที่เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-Crystalline Polymer) จะมีทั้งส่วนที่เป็นผลึก และส่วนที่เป็นอสัณฐาน ความเป็นผลึกจึงมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มาก ซึ่งการศึกษาในตอนนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของ WPC ของเส้นใยทั้ง 3 ชนิดและสารช่วยผสม PP-g-MA 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม ศึกษาว่ามีขนาดและองศาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับ WPC

จากการตารางที่ 4.7 เมื่อเติมสารช่วยผสมและพิจารณาที่เส้นใยชนิดเดียวกัน พบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) และอุณหภูมิการตกผลึก ( $T_c$ ) ของ PP ไม่ต่างกัน และบางเส้นใยมีแนวโน้มองศาความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเส้นใยต่างชนิดกัน พบว่า ค่า  $T_m$  และ  $T_c$  ไม่ต่างกัน แต่องศาความเป็นผลึกของ PP ใน WPC-MF และ WPC-MF-TMP มากกว่าใน WPC-EFBF และ WPC-PP เนื่องจากเส้นใย MF เป็นส่วนที่มีน้ำมันปาล์มดิบมากที่สุดและได้ผ่านกระบวนการ

ให้ความร้อนจากการต้ม นึ่ง ในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาแล้ว เส้นใยจึงมีความขรุขระและมีความเอกลักษณะเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะอาดกว่าเส้นใยอื่น เนื่องจากสิ่งเจือปนและสารโมเลกุลต่ำๆ หลุดออกไป ตามที่กล่าวในหัวข้อ 4.3 ทำให้เส้นใยชนิดนี้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น สามารถยึดติดกันกับพอลิเมอร์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และค่าองศาความเป็นผลึกจากการวิเคราะห์ด้วย DSC

สูตร	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	% Crystallinity
WPC-EFBBF-MA 0%	169.3	118.1	35.8	34.7
WPC-EFBBF-MA 1%	168.5	117.3	33.1	32.1
WPC-EFBBF-MA 2%	168.1	117.2	33.4	32.4
WPC-EFBBF-MA 3%	168.2	118.6	33.9	38.6
WPC-FF-MA 0%	166.6	116.8	33.8	32.7
WPC-FF-MA 1%	166.8	115.1	29.3	28.3
WPC-FF-MA 2%	169.9	117.1	37.8	36.6
WPC-FF-MA 3%	168.7	115.1	38.8	37.5
WPC-MF-MA 0%	169.8	115.3	44.5	43.1
WPC-MF-MA 1%	167.8	116.8	51.1	49.5
WPC-MF-MA 2%	168.1	116.6	44.8	43.4
WPC-MF-MA 3%	168.1	117.8	51.4	49.7
WPC-MF-TMP-MA 0%	169.3	115.8	50.8	49.2
WPC-MF-TMP-MA 1%	168.2	115.8	45.2	43.8
WPC-MF-TMP-MA 2%	168.4	115.0	52.1	50.5
WPC-MF-TMP-MA 3%	169.5	115.0	51.6	50.0

#### 4.5 ผลการศึกษาชนิดของเส้นใยปาล์มและปริมาณการเติมสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติ

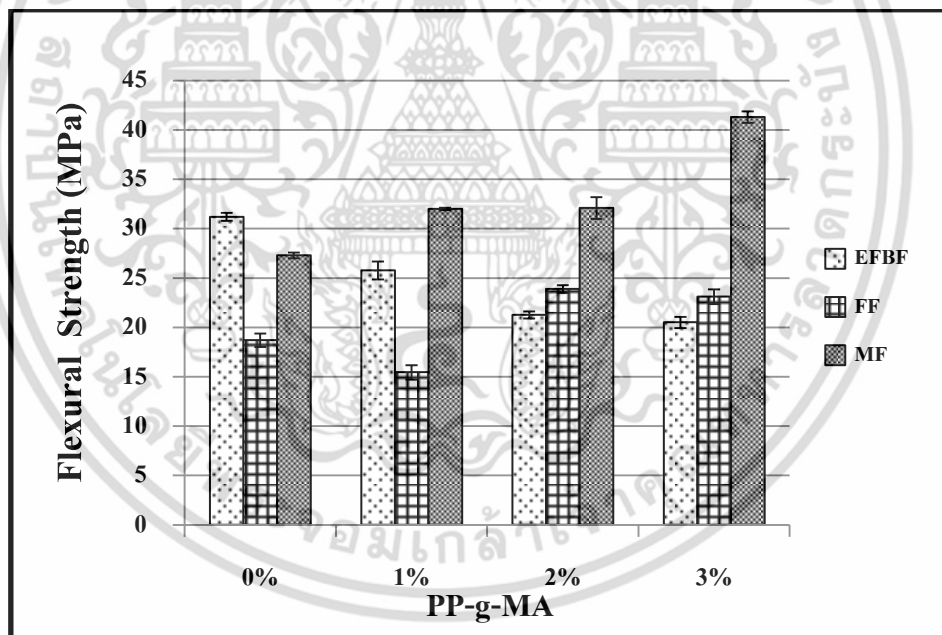
##### WPC

ในงานวิจัยตอนนี้ต้องการเปรียบเทียบชนิดเส้นใยปาล์มและปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปทดลองใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิพรอพิลีน (PP) ซึ่งเป็นพอลิโอเลฟินส์พอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว มีสมบัติที่เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก และมีพลังงานพื้นผิวดำ เมื่อนำมาผสมกับเส้นใยปาล์ม ซึ่งภายในเส้นใยมีลิกโนเซลลูโลส

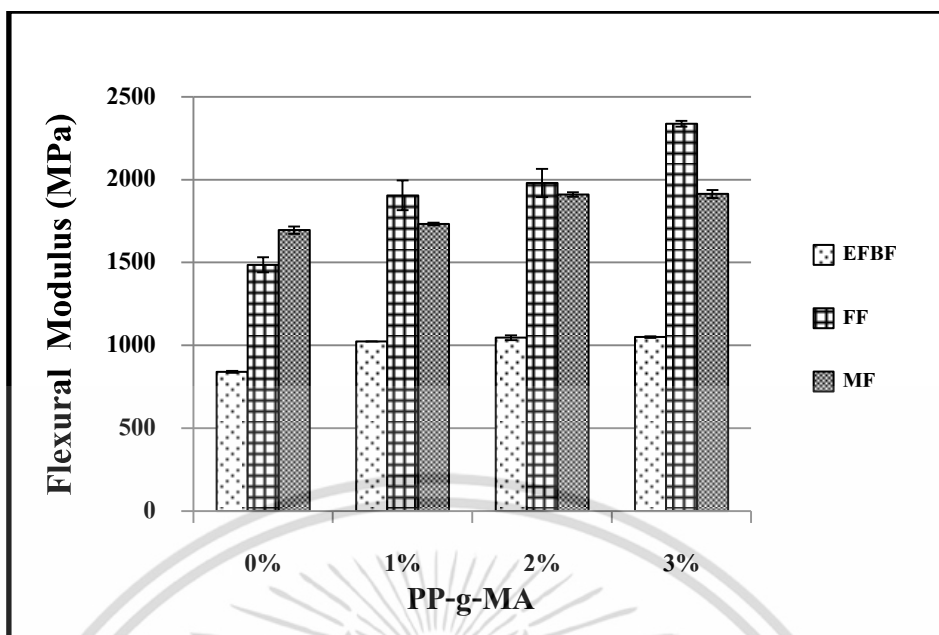
(Lignocellulose) ที่มีขั้ว มีสมบัติที่เรียกว่าไฮโดรฟิลิก สามารถดูดน้ำได้ ทำให้พลาสติกและเส้นใยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลวมน้ำได้ ซึ่งการวิจัยนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์นี้เห็นว่าการคัดลอกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากต้องการนำเนื้อหาไปใช้ กรุณาติดต่อเจ้าของลิขสิทธิ์เอกสารทุกครั้ง

ไม้ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดี ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) เพื่อเพิ่มความเข้ากันให้ดี ปลายด้านหนึ่งของสารช่วยผสมนี้จะเป็นส่วนที่มีขี้ สามารถเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยไม้ที่มีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นพลาสติกเดียวกันกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้ ทำให้คอมโพสิตที่ได้มีความเข้ากันมากขึ้น

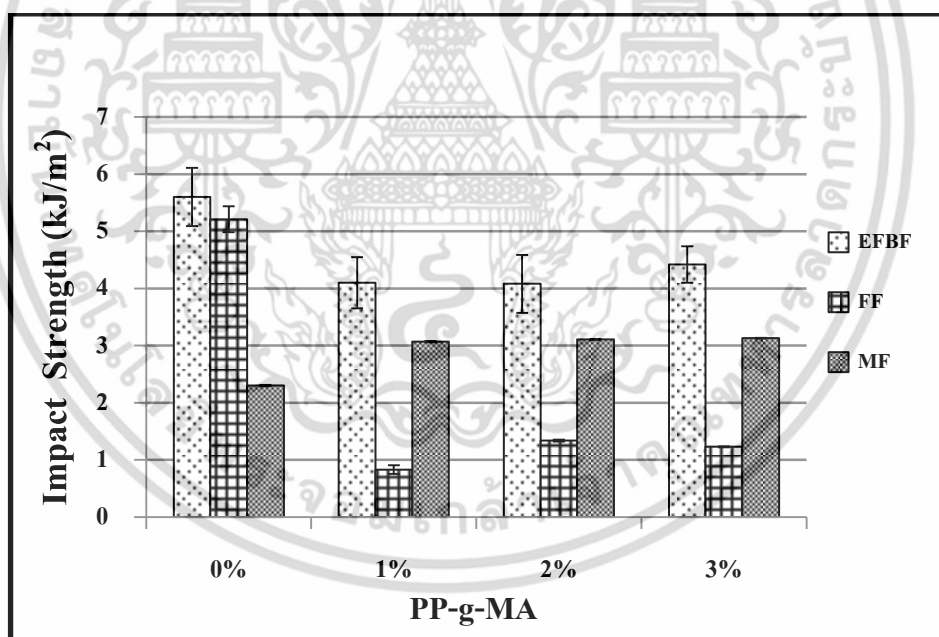
ในการทดลองนี้ใช้สารช่วยผสมพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) โดยควบคุมอัตราส่วนพลาสติกพอลิพรอพิลีนต่อเส้นใยปาล์มที่ 50:50 โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์มศึกษาสารช่วยผสมที่ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม ซึ่งเส้นใยปาล์มที่ใช้ในการทดลองในตอนนี้ได้ผ่านการเตรียมเส้นใยโดยกระบวนการเชิงกล (Mechanical Pulp, MP) ใช้เส้นใยขนาดเล็กลงกว่า 80 mesh ทั้ง 3 ชนิด คือ EFBF, FF และ MF ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ WPC โดยทั่วไปจะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณลิกนิน รูปร่างลักษณะของเส้นใย เช่น สัดส่วนความเพริยว, ความขรุขระของพื้นที่ผิว และองศาความเป็นผลึก



รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรง โค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม



รูปที่ 4.8 ค่ามอดุลัส โค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม

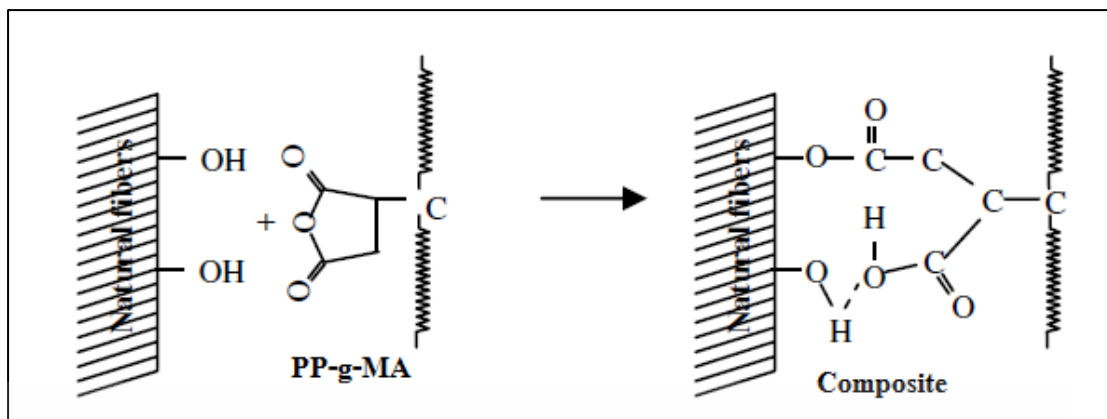


รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลของไม้เทียมที่เตรียมจากเส้นใยแต่ละชนิด มีแนวโน้มสอดคล้องกันในบางชนิดของเส้นใย จากรูปที่ 4.8 ค่ามอดูลัสโค้งงอ พบว่า เมื่อเติมสารช่วยผสม ค่ามอดูลัสโค้งงอเพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้ง 3 เส้นใย ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC-FF และ WPC-MF จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อเติมสารช่วยผสม 1-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ WPC-EFBF มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากลักษณะทางสัณฐานของเส้นใย EFBF ที่มีลักษณะพื้นผิวทั้งผิวที่เรียบและผิวขรุขระ ทำให้การยึดเกาะระหว่างพลาสติกกับเส้นใยที่มีผิวเรียบไม่ดี สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีเรื่อง การล็อกเชิงกล (Mechanical Interlocking) พื้นผิวที่ขรุขระจะมีพื้นที่สัมผัสมากกว่าพื้นผิวที่เรียบ พอลิเมอร์หลอมเหลวจึงสามารถเข้าไปแทรกพื้นผิวขรุขระได้ดีกว่าพื้นผิวเรียบ ส่งผลให้ความต่อเนื่องของวัฏภาคไม้ดีบางส่วน รวมทั้งผลจากองค์ประกอบทางเคมีของ EFBF มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสและปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใย MF จึงเป็นผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ EFBF น้อยกว่า ส่วน WPC-FF ที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอน้อยกว่า WPC-MF อาจเป็นผลมาจากเส้นใย FF เป็นเส้นใยที่สั้นและมีขนาดเล็ก พื้นผิวผิวมาก ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปทั่วเส้นใย เกิดเป็นจุดบกพร่อง จะเห็นว่า WPC-MF มีค่าความแข็งแรงโค้งงอมากที่สุดและมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเติมสารช่วยผสม ซึ่งสารช่วยผสมมีผลทำให้เส้นใย MF ยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดีกว่าเส้นใย EFBF และ FF

จากรูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงกระแทก WPC ของเส้นใยที่ 0% พบว่า WPC-EFBF และ WPC-FF มีค่าสูงกว่า WPC-MF อาจเนื่องมาจากผลของ DSC องศาความเป็นผลึกมากกว่าของ PP ที่อยู่ใน WPC-MF และเมื่อเติมสารช่วยผสม 1-3% ของเส้นใยปาล์ม พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC ทั้ง 3 เส้นใยไม่สามารถอธิบายได้ อาจเป็นผลเนื่องจาก ปริมาณเส้นใยปาล์มต่อพอลิเมอร์สูง (50:50) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดช่องว่างในชิ้นงานค่อนข้างมาก เช่น WPC-FF ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ค) และ (ง) ที่เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในคอมโพสิต และปัจจัยเรื่องสัดส่วนความเปรี้ยวของเส้นใย EFBF ที่มีค่ามาก แต่ไม่สามารถรับแรงได้ดีใน WPC-EFBF อย่างที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากเส้นใย EFBF ที่ใช้เป็นมัดเส้นใย (Bundle) มีเส้นใยหลายขนาด



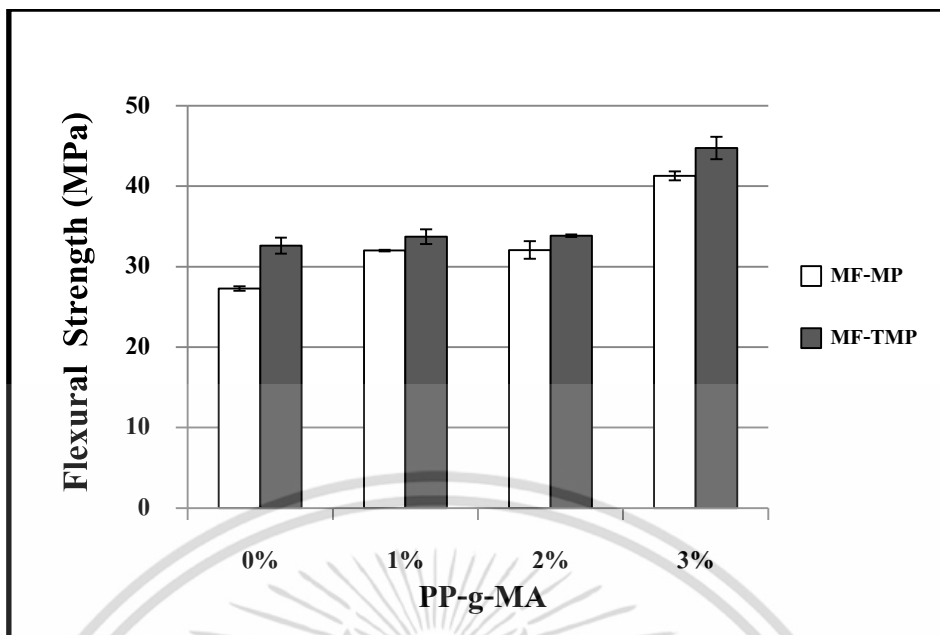
รูปที่ 4.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันระหว่าง หมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของเส้นใยไม้ กับ หมู่แอนไฮไดรด์ ( $C_4H_3O_3$ ) ของสารช่วยผสม PP-g-MA [49]

#### 4.6 WPC ของเส้นใยเปลือกผลปาล์ม MF-MP และ MF-TMP

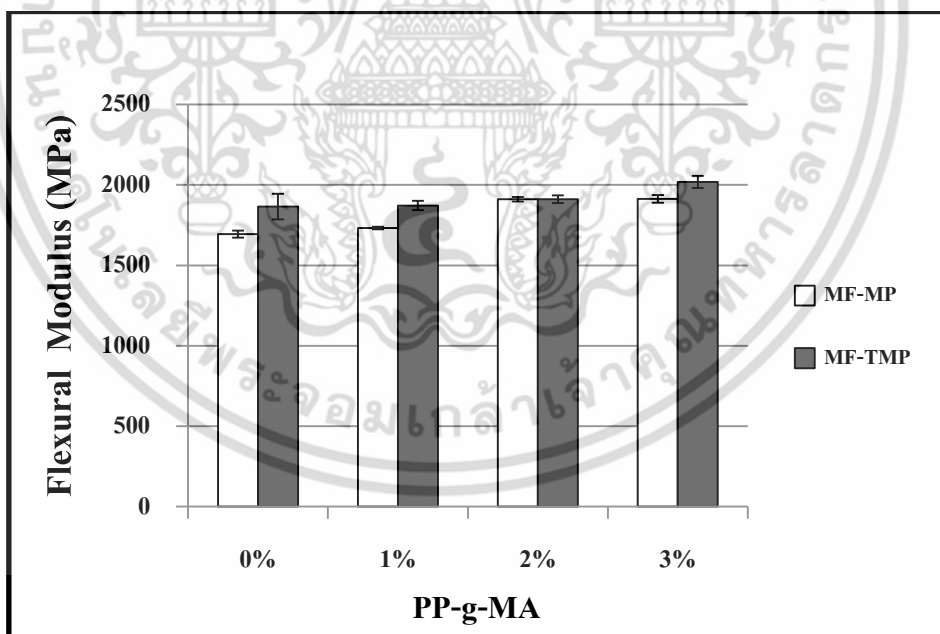
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเปลือกผลปาล์มมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ผลการวิจัยในตอนนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบการเตรียมเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) ที่ต่างกัน คือ เส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) และเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ให้ผลอย่างไรกับ WPC ในงานวิจัย ซึ่งผลการวิจัยแสดงดังนี้

จากรูปที่ 4.11-4.12 พบว่า ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการ TMP มีค่าสูงกว่าที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) เล็กน้อยเมื่อเติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 1-3% โดยน้ำหนักเส้นใยปาล์ม และความแข็งแรงกระแทกมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากกระบวนการ TMP เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  และที่อุณหภูมิ  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นอุณหภูมิ  $T_g$  ของลิกนิน [40] แรงดันและความร้อน ทำให้เกิดแรงเนื่องจากการหมุนจนลิกนินนี้ เส้นใยหลุดออกจากกันจนเป็นเส้นได้ ทำให้เส้นใยที่ผ่านกระบวนการนี้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่ากระบวนการ MP ดูจากหัวข้อ 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เส้นใย TMP ที่ได้จะสะอาดขึ้น เนื่องจากแรงดันที่สามารถทำให้สารโมเลกุลต่ำๆ หลุดง่าย (Extractives) หลุดออกไปด้วย โดยเฉพาะกลุ่มของแว็กซ์ (Wax/Impurity) สารพวกนี้จะไม่เสถียร และถูกออกซิไดส์ง่าย มีความสามารถในการทนความร้อนต่ำ สารพวกนี้ที่มีอยู่ในเส้นใย MF ทำให้เส้นใยใหม่่ง่ายกว่า จึงเป็นสาเหตุให้เส้นใยที่ผ่านกระบวนการ MP มีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยที่ผ่านกระบวนการ TMP และพบว่า การละลายในน้ำร้อน ปริมาณ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณเถ้าของเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการ TMP น้อยกว่า MP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

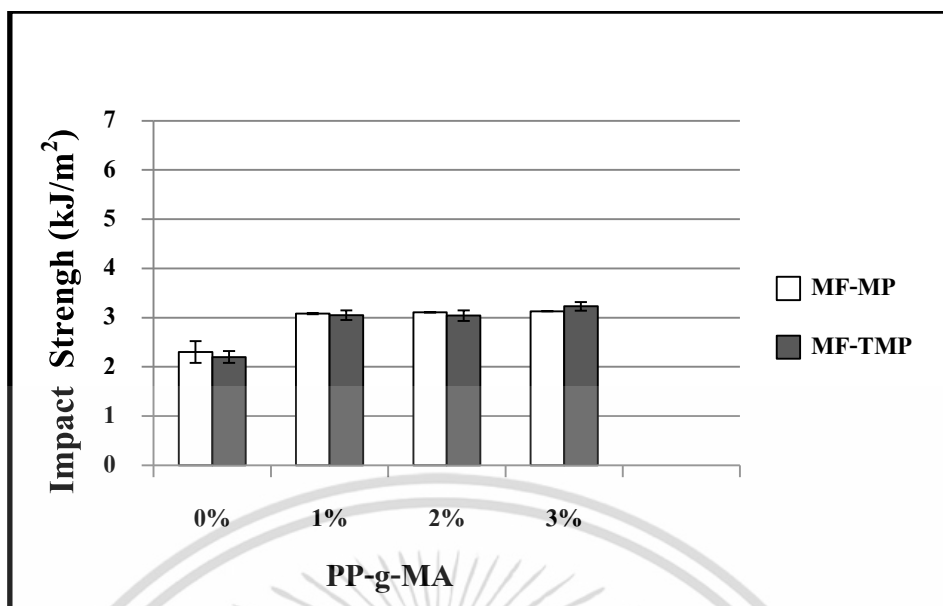


รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใย MF-MP และเส้นใย MF-TMP ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม



รูปที่ 4.12 ค่ามอดุลัสโค้งงอ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใย MF-MP และเส้นใย MF-TMP ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงกระแทก WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใย MF-MP และเส้นใย MF-TMP ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม

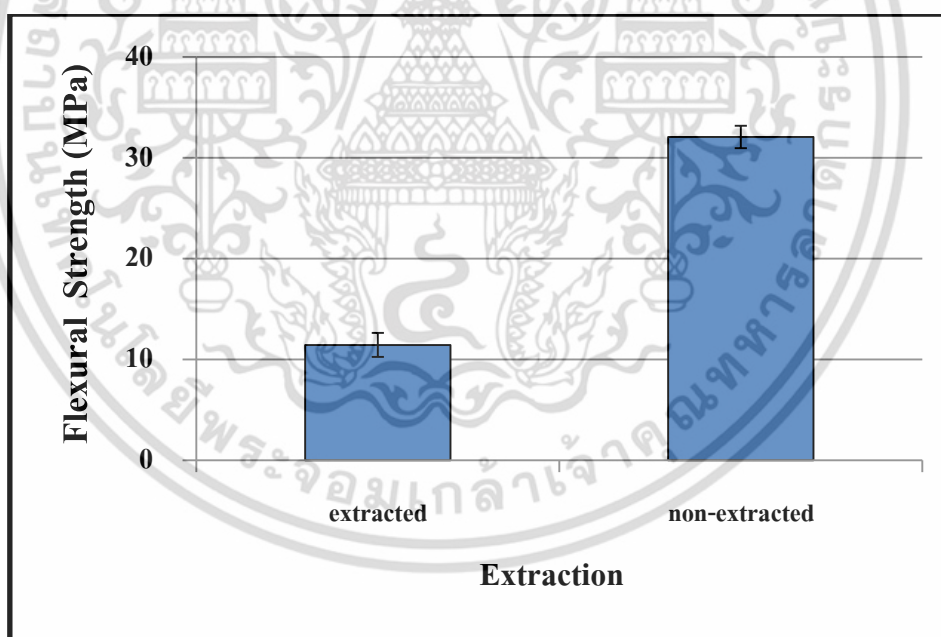
จากรูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC เส้นใยเปลือกผลปาล์ม เมื่อเทียบระหว่างกระบวนการ MP และ TMP มีค่าใกล้เคียงกันทั้งเติมและไม่เติมสารช่วยและในงานวิจัยนี้เมื่อเติมสารช่วยผสม 1-3% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม พบว่า ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกของเส้นใย MF-TMP และเส้นใย MF-MP มีค่าไม่ได้แตกต่างกันทั้งๆ ที่เส้นใย MF-TMP สะอาดมากกว่า MF-MP อาจเนื่องจากสภาวะที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ อ้างอิงมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [41] คือใช้อุณหภูมิ 170°C ความดัน 10 Bar ทำให้ลิกนินที่อยู่ในเส้นใยนิ่มตัวเท่านั้น แต่ไม่สามารถกำจัดลิกนินออกได้ รวมถึงสิ่งสกปรกที่อยู่ในเส้นใยอาจออกไม่หมด การเปลี่ยนสถานะในกระบวนการ TMP โดยการใช้อุณหภูมิที่มากขึ้น คาดว่าจะทำให้เส้นใย MF-TMP ที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

#### 4.7 ผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม

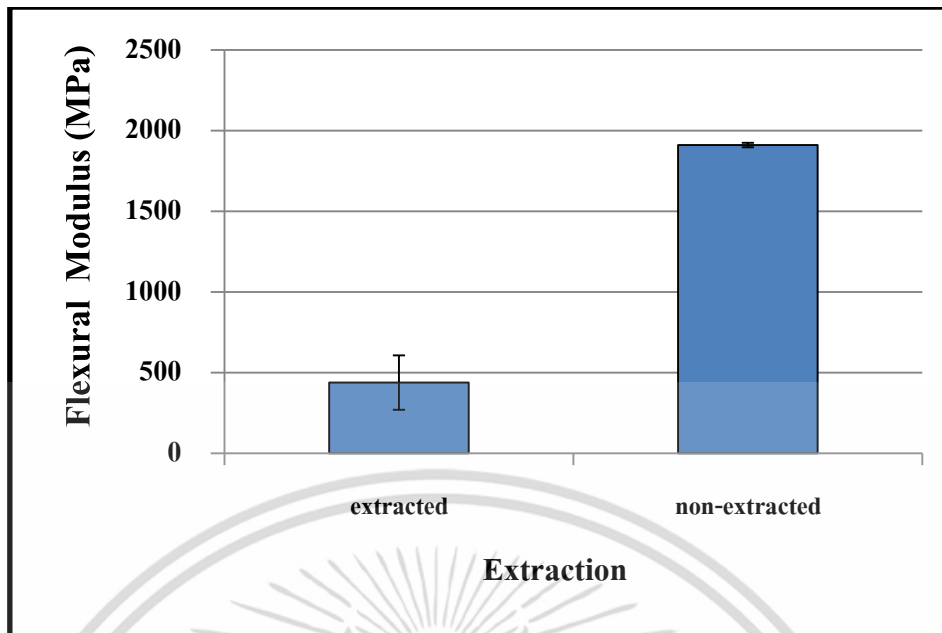
เนื่องจากในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์ม อาจมีการบีบน้ำมันออกจากเส้นใยด้วยแรงที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดน้ำมันตกค้างในเส้นใยในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ซึ่งน้ำมันที่ตกค้างอยู่นี้อาจจะเป็นประโยชน์ต่อ WPC กล่าวคือ เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing Aids) ทำให้ผสมง่ายขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยตอนนี้จึงทำการศึกษาผลของน้ำมันปาล์มดิบที่ตกค้างในเส้นใยปาล์มหลังจากการ

บีบน้ำมันออกแล้ว นำเส้นใยมาสกัดเอาน้ำมันออกหมดแล้วเทียบกับเส้นใยที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออก

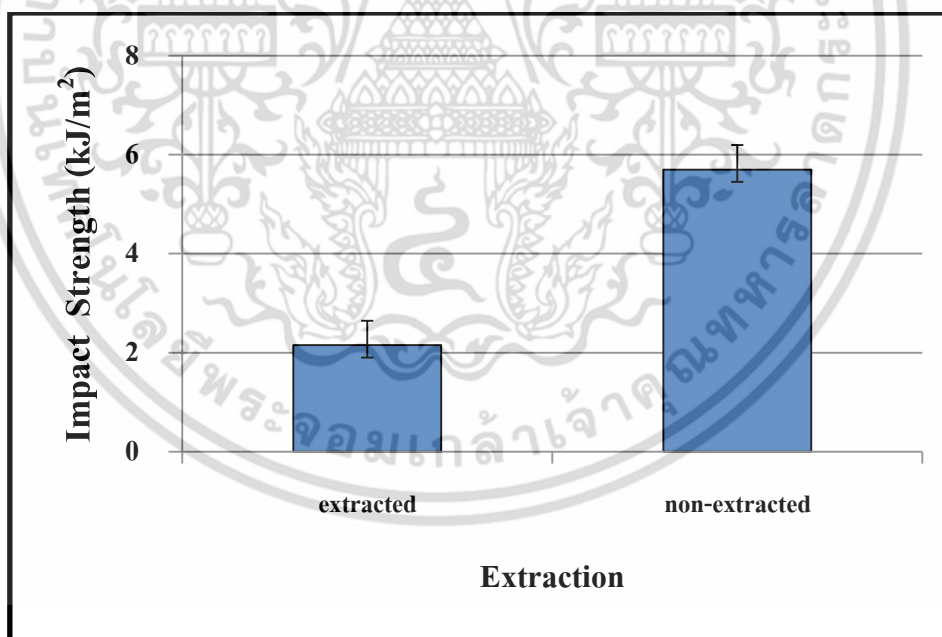
จากผลการทดลองในตอนๆ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่า เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) เป็น WPC ที่น่าจะเป็นประโยชน์ที่ดีที่สุดในเรื่องของความแข็งแรงที่ต้องการตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัย คือ สามารถรับแรงกระแทก แรงโค้งงอได้ดี และยังเป็นเส้นใยที่มีตัวเลขของขยะที่ได้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมากที่สุดอีกด้วย ในงานวิจัยตอนนี้ทำการทดลองโดยการสกัดน้ำมันที่อยู่ในเส้นใยออกตามมาตรฐานของ TAPPI T 204 om-88 [45] เพื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่สกัดน้ำมันออกหมด และเส้นใยที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออกเลย โดยใช้ PP-g-MA ที่ 2 % โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม ซึ่งจากผลในหัวข้อ 4.5 และ 4.6 พบว่าที่ 2% PP-g-MA เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปทำการผลิต WPC เชิงพาณิชย์ ผลการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม แสดงดังรูปที่ 4.14-4.16



**รูปที่ 4.14** ค่าความแข็งแรงโค้งงอ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่สกัดน้ำมันปาล์มดิบออกเทียบกับเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออก โดยเติม PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม



รูปที่ 4.15 ค่ามอดูลัสโค้งงอ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่สกัดน้ำมันปาล์มดิบออกเทียบกับเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออก โดยเติม PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม



รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งแรงกระแทก WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ของเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่สกัดน้ำมันปาล์มดิบออกเทียบกับเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ไม่ได้สกัดน้ำมันออก โดยเติม PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตอนนี้อใช้ PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม มาใช้วิเคราะห์จากการสกัดน้ำมันตามมาตรฐาน TAPPI T 204 om-88 ได้เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการสกัดเท่ากับ 2 (Extractables = 2%) สามารถอธิบายได้อีกอย่างว่า เส้นใยที่ไม่ได้ถูกสกัด (Non-Extracted) มีน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ตกค้างอยู่แล้ว 2% จากผลการทดลอง พบว่า สมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ยังคงมีน้ำมันอยู่ให้ผลดีกว่าเส้นใยที่ถูกสกัดน้ำมันออกหมด ทั้งเรื่องของความแข็งแรง โค้งงอ โมดูลัส โค้งงอและความแข็งแรงกระแทก เนื่องจากน้ำมันที่มีน้อยเกินไปหรือไม่มีน้ำมันเหลืออยู่เลย เกิดแรงเสียดทานในระหว่างผสม เป็นผลให้เส้นใยไม่กระจายตัวและจับกันเป็นก้อน เกิดความผิดปกติในขณะผสมมากขึ้นและไหลได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับการผสมเส้นใยที่ยังคงมีน้ำมันอยู่กับพอลิเมอร์

#### 4.8 ผลของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่เพิ่มเข้าไปในเส้นใยปาล์ม

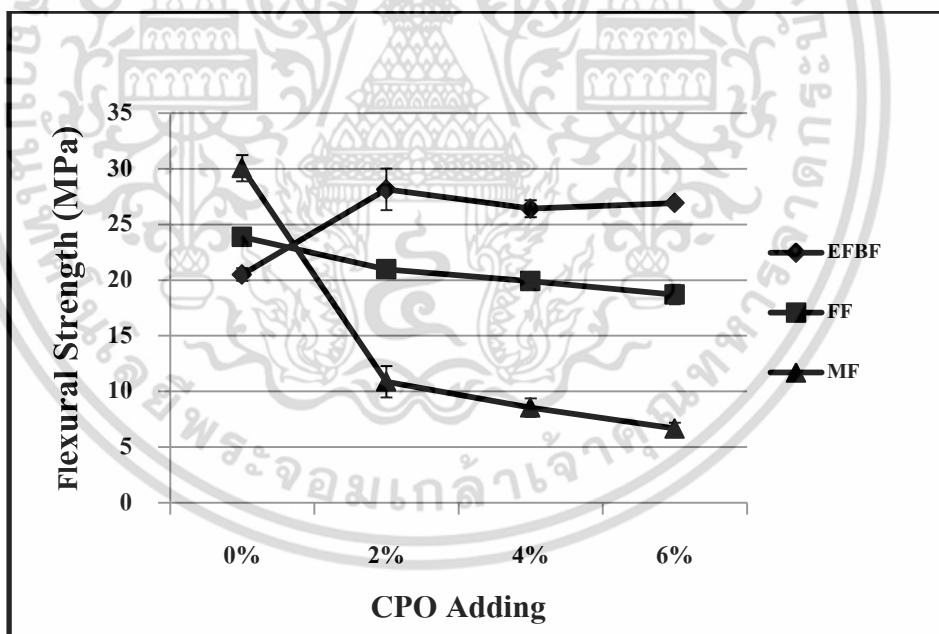
จากผลการทดลองหัวข้อที่ 4.7 เส้นใยที่มีน้ำมันตกค้างอยู่จะให้ผล WPC ที่ดีกว่าเส้นใยที่ไม่มีน้ำมันตกค้างเหลืออยู่เลย อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันที่ตกค้างในเส้นใยควบคุมได้ยาก แต่ครั้งในการบิบน้ำมันอาจมีปริมาณน้ำมันตกค้างในเส้นใยไม่เท่ากัน และน้ำมันในเส้นใยปาล์มแต่ละส่วนจากต้นปาล์มก็มีปริมาณน้ำมันที่ไม่เท่ากันด้วย ผลการวิจัยในตอนนี้อจึงใช้วิธีการเติมน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil; CPO) เข้าไป ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ WPC ที่ได้แตกต่างกัน จากหัวข้อที่ 4.7 ทราบแล้วว่ามีน้ำมันปาล์มดิบตกค้างอยู่ในเส้นใยเปลือกผลปาล์มอยู่แล้ว 2% CPO และเมื่อเติมน้ำมันปาล์มดิบเพิ่มในปริมาณ 0% (มีปริมาณน้ำมันดิบตกค้างอยู่แล้ว 2% CPO), 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ทำให้มีน้ำมันปาล์มดิบอยู่ในปริมาณ 2%, 4%, 6% และ 8% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ในการทดลองในตอนนี้อพบว่า จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งแรง โค้งงอ และค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC (PP : Palm Fiber = 50:50) ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมัน CPO 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม พบว่า ค่าความแข็งแรง โค้งงอ ของ WPC-FF และ WPC-MF มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในการคอมพาวด์พลาสติกกับเส้นใยปาล์มที่มีปริมาณน้ำมันที่มากเกินไป โดยเฉพาะเส้นใย MF ที่มีปริมาณน้ำมันในเส้นใยมากอยู่แล้ว อาจทำให้เกิดการลื่นไถล (Slip) และไอความร้อนในระหว่างการผสม อาจเป็นผลให้เส้นใยบางส่วนเกิดการไหม้ ส่วนเส้นใย FF ที่มีลักษณะเป็นผงเนื่องจากเป็นเส้นใยขนาดเล็ก ไม่เสริมแรงในคอมพอลสิต ทำให้ค่าความแข็งแรง โค้งงอและความแข็งแรงกระแทกลดต่ำลง ขณะที่ WPC-EFBF มี

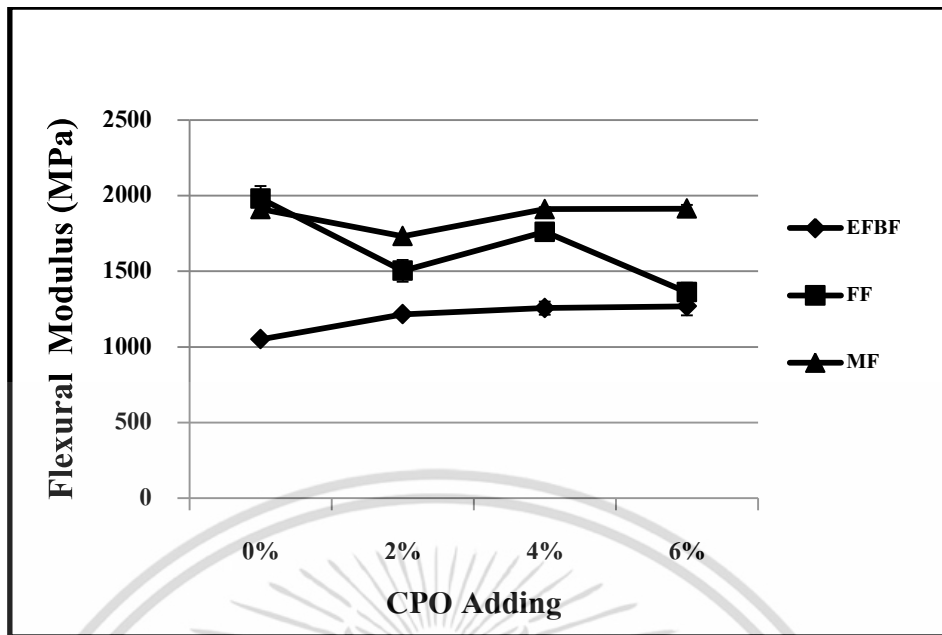
แนวโน้มค่าความแข็งแรง โค้งงอเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในเส้นใย EFBF มีไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงพอ และเมื่อเติมปริมาณน้ำมันปาล์มดิบเพิ่ม ส่งผลให้น้ำมันที่เติมเพิ่มเป็นสารช่วยในกระบวนการที่ดี (Processing Aids) ทำให้เส้นใยของ EFBF เกิดการพันกันระหว่างเส้นใยน้อยลง เป็นผลให้ความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ 0% และ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม พบว่า น้ำมันที่ตกค้างอยู่ในปริมาณเท่านี้ (0-2% CPO Adding) กล่าวคือ ปริมาณที่ตกค้างอยู่ในเส้นใยอยู่แล้ว 2% และเติมเพิ่มอีก 2 % เป็นปริมาณน้ำมันที่เหมาะสมสำหรับเส้นใย EFBF และ 0% CPO สำหรับเส้นใย FF และ MF น่าจะมีประโยชน์เป็นสารหล่อลื่นที่ช่วยผสมในกระบวนการผลิต ทำให้ผสมง่ายและพอลิเมอร์กับเส้นใยเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

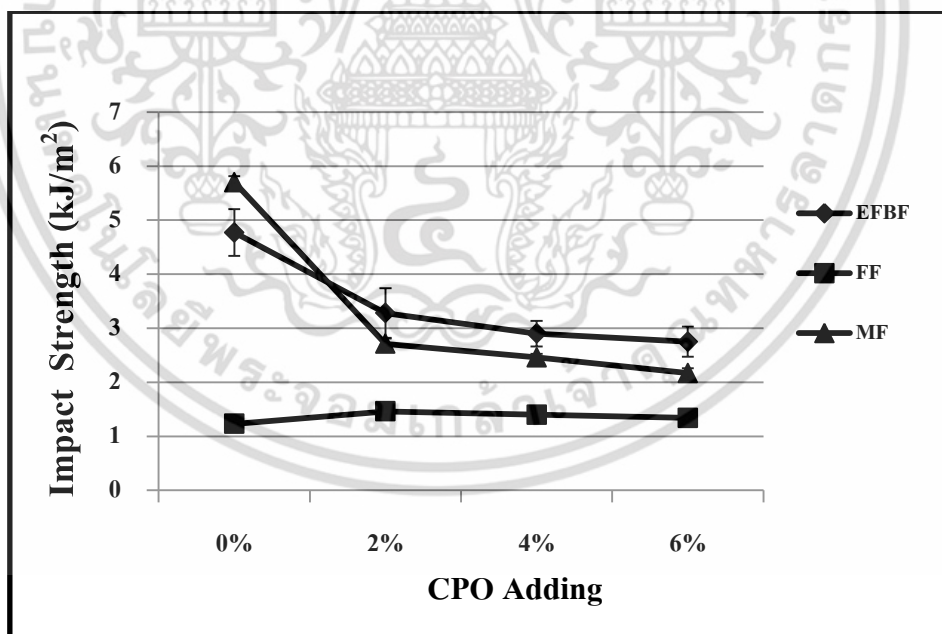
จากรูปที่ 4.18 แสดงค่ามอดูลัสโค้งงอของ WPC ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบ (CPO Adding) พบว่า ค่ามอดูลัสโค้งงอไม่ได้ส่งผลแบบมีนัยสำคัญ เพราะน้ำมันที่ใส่มากเกินไปจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น ยิ่งใส่น้ำมันมากขึ้น น้ำมันจะแพร่ออกมาข้างนอก ทำให้เกิดการลื่นไถล เส้นใยจับกันเป็นก้อน ไม่มีผลกับค่าความแข็งของ WPC



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบในปริมาณ 0%, 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม



รูปที่ 4.18 ค่ามอดุลัสโค้งงอของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบในปริมาณ 0%, 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม



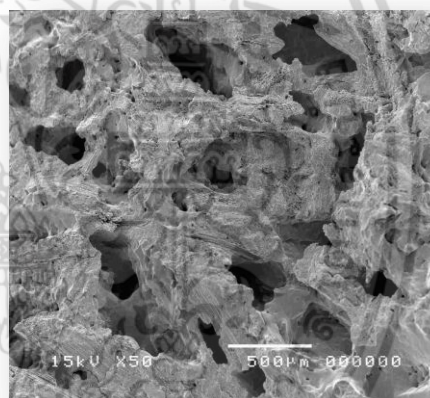
รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC (PP : Palm fiber = 50:50) ที่เติมน้ำมันปาล์มดิบในปริมาณ 0%, 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

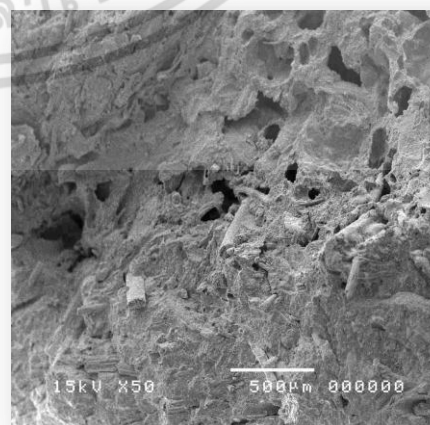
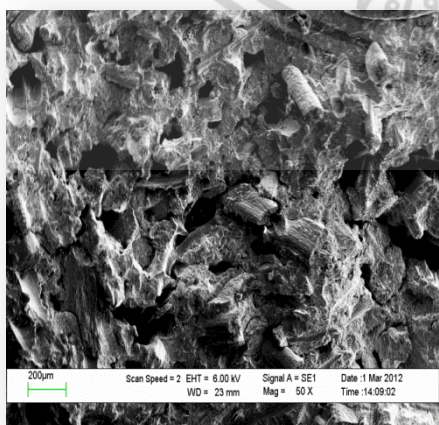
จากรูปที่ 4.20 (ก)-(ง) แสดงภาพ SEM ของ WPC ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม และน้ำมันปาล์มดิบ CPO 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม พบว่า การกระจายตัวของเส้นใยปาล์มทั้ง 4 แบบยังกระจายตัวได้ทั่วชิ้นงาน แต่ช่องว่างสีดำมีขนาดกว้างขึ้น จะเห็นช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคพอลิเมอร์และเส้นใยมีขนาดกว้างขึ้น เป็นผลให้เส้นใยบางส่วนหลุดง่าย ซึ่งจากงานวิจัยนี้ปริมาณ CPO 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไปสำหรับ WPC-FF, WPC-MF และ WPC-MF-TMP ซึ่งในระหว่างการผสมสังเกตได้ว่า เมื่อเติมน้ำมัน CPO เส้นใยเกิดการลื่นไถล เส้นใยจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้ผสมกันได้ไม่ดีในเวลาที่มีจำกัด เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานได้



(ก) WPC-EFBB



(ข) WPC-FF



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) WPC-MF

(ง) WPC-MF-TMP

**รูปที่ 4.20** ภาพ SEM ของ WPC ผสมเส้นใยปาล์มแต่ละชนิด ที่เติมสารช่วยผสม PP-g-MA 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย และ CPO 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย ที่กำลังขยาย 50 เท่า

#### 4.9 ผลการทดลองขึ้นรูป WPC ของเส้นใยเปลือกผลปาล์มในเชิงพาณิชย์และเปรียบเทียบสมบัติของ WPC เทียบกับไม้จริงและวัสดุทดแทนไม้บางชนิด

จากผลการทดลองที่ผ่านมา ทำให้สามารถเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดมาทดลองขึ้นรูป WPC ในเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้และไม้จริง ซึ่งสูตรที่เลือกในงานวิจัยนี้คือ อัตราส่วนพอลิเมอร์พอลิพรอพิลีนกับเส้นใย 50 : 50 (wt/wt) โดยเลือกใช้เส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการเชิงกล MF-MP ขนาดเส้นใยเล็กกว่า 80 mesh และใช้สารช่วยผสม PP-g-MA 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย และไม่เติมน้ำมันปาล์มดิบ (CPO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 การขึ้นรูปไม้ WPC เซิงพาณิชย์ บริษัท M.B.J. Enterprise จำกัด

ตารางที่ 4.8 สมบัติบางประการของ WPC เทียบกับ ไม้จริงบางชนิด

สมบัติ	WPC-PP เส้นใยปาล์ม	เส้นใยมะพร้าว [42]		แผ่นไม้อัด	ไม้ ยางพารา
		WPC-PP	WPC-LLDPE		
ความแข็งแรงโค้งงอ (MOR)(MPa)	25.8	30.2	22.5	ไม่น้อยกว่า 9	187.1
มอดุลัสโค้งงอ (MOE)(MPa)	1848	2074	1625	ไม่น้อยกว่า 3000	1966.3
ความหนาแน่น	1.1	1.0	0.9	1.1-1.3	0.6-0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(g/cm <sup>3</sup> )					
การดูดน้ำ (%)	7.0	n/a	8.30	n/a	n/a
ความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว (N)	2660	1774	1094	n/a	n/a

จากตารางที่ 4.8 เป็นตารางเปรียบเทียบสมบัติบางประการของ WPC เทียบกับไม้จริงบางชนิดและวัสดุทดแทนไม้ที่ใช้เส้นใยมะพร้าวพบว่า WPC จากเส้นใยปาล์มในงานวิจัยมีสมบัติที่ต่ำกว่าไม้จริงอยู่มาก แต่มีผลที่ดีกว่า WPC จากเส้นใยมะพร้าวและดีกว่าแผ่นไม้อัดซีเมนต์ ถ้าพิจารณาในงานวิจัยนี้คือ ศึกษา WPC ที่มีสมบัติเชิงกลสูงสำหรับงานเชิงวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อนำไปใช้เป็นพาเลทไม้, พื้นไม้หน้าบ้าน (Decking) แล้วจะเห็นว่า WPC จากงานวิจัยมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลกับค่าตามเป้าหมายของงานวิจัย

สมบัติ	เป้าหมายของงานวิจัย	WPC จากงานวิจัยนี้
ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m <sup>3</sup> )	1,000-1,800	1,100
ความแข็งแรงโค้งงอ (MOR)(MPa)	20	25.8
มอดุลัสโค้งงอ (MOE)(MPa)	2,000	1,848

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นเหนียวของตะปูเกลียว (N)	1,500	2,660
การดูดน้ำ (%)	<20	7

หมายเหตุ : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547 แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiberboards, MDF) [46]

#### 4.10 การวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis)

การวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการแจกแจงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการผลิตวัสดุหนึ่งๆ เพื่อใช้ในการประมาณราคาสินค้าเพื่อขายและใช้เปรียบเทียบราคากับวัสดุที่ต้องการแข่งขัน

ในงานวิจัยนี้แบ่งการวิเคราะห์ต้นทุนเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ โดยเทียบที่น้ำหนักวัตถุดิบ 1 กิโลกรัม และวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต โดยเทียบกับการผลิตวัสดุไม้พลาสติกคอมโพสิตใน 1 รอบการผลิต

จากตารางที่ 4.10-4.11 พบว่า ต้นทุนการผลิต WPC มีราคาประมาณ 57 บาทต่อกิโลกรัม จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการนำขยะจากภาคการเกษตรมาใช้ประโยชน์ และจากการศึกษา พบว่าส่วนของเส้นใยมีปริมาณขยะมากที่สุด คือ เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) และในงานวิจัยนี้เลือกใช้เส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ผ่านกระบวนการเชิงกล MF-MP ที่ปริมาณพอลิพรอพิลีนต่อเส้นใยเป็น 50:50 โดยน้ำหนักเส้นใย โดยเติมสารช่วยผสม PP-g-MA ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใย ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยมะพร้าวจะมีต้นทุนอยู่ที่ 61 บาท/กิโลกรัม แต่สำหรับเส้นใยเปลือกผลปาล์มจะมีต้นทุนเพียง 57 บาท/กิโลกรัมเท่านั้น

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม

สารเคมี	ราคาตลาด* (บาท/ กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (%โดยน้ำหนัก)		
		เส้นใยมะพร้าว [42]		เส้นใยปาล์ม
		WPC-LLDPE (50:50)	WPC-PP (50:50)	WPC-PP (50:50)
LLDPE	54.00	50	-	-
PP	48.00	-	50	50
เส้นใย MF	0.25	-	-	50
เส้นใยมะพร้าว (เบอร์ 2)	3.00	50	50	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EnHance <sup>®</sup>	95.00	5	5	5
WF107	190.00	1.5	1.5	1.5
Anox <sup>®</sup> 20	430.00	0.05	0.05	0.05
Alkanox <sup>®</sup> 240	337.00	0.05	0.05	0.05
Compoline <sup>®</sup> COL/L	200.00	1	-	-
Polybond <sup>®</sup> 3200	200.00	-	1	2
<b>ต้นทุนการผลิต (บาท/กิโลกรัม)</b>		<b>38.48</b>	<b>35.48</b>	<b>36.11</b>

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต WPC-PP

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>a</sup>	คิดเป็นเงิน
วัตถุดิบ	2 กิโลกรัม	36.11 บาท	72.22
ค่าแรง	1 ชั่วโมง	300 บาท/วัน <sup>b</sup>	37.50
ค่าไฟฟ้า	5 หน่วย	2 บาท/หน่วย	10.00
รวมราคาต้นทุนการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต ใน 1 รอบการผลิต (2 กิโลกรัม) <sup>c</sup>			119.72
ราคาต้นทุนการผลิตไม้พลาสติกคอมโพสิต 1 กิโลกรัม			59.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : <sup>1</sup>เป็นราคาโดยประมาณเมื่อเดือนมกราคม พ.ศ.2557

<sup>2</sup>ค่าแรงขั้นต่ำในเขตกรุงเทพและปริมณฑล

<sup>3</sup>ราคานี้ไม่รวมต้นทุนเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้พลาสติก WPC จากพอลิพรอพิลีน (PP) และเส้นใยธรรมชาติ จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เส้นใยทะเลายปาล์มเปล้า (EFBF), เส้นใยทางใบ (FF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) โดยวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีก่อนทำการผสมสูตร แล้วศึกษาหาสูตรที่ผลเชิงกลดี เพื่อนำไปพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนไม้ (WPC) ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งทำการผสมสูตรด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง บดแล้วทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเทคนิคอัดขึ้นรูป ทดสอบสมบัติต่างๆในระดับห้องปฏิบัติการ สมบัติที่ทดสอบได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดูดน้ำ ล้วนฐานวิทยา จากนั้นนำไปขึ้นรูป WPC ในเชิงพาณิชย์ที่บริษัท เอ็มบีเจ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด แล้วทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547 เพื่อเทียบกับไม้จริงบางชนิดและวัสดุทดแทนไม้บางชนิด

จากงานวิจัยพบว่าสูตรผสม WPC จากเส้นใยปาล์มที่เลือกมาสามารถขึ้นรูปได้จริงและมีสมบัติโดยรวมที่ดีเมื่อเทียบกับเป้าหมายของงานวิจัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อสมบัติของ WPC โดยสามารถสรุปผลวิจัยได้ดังนี้

- ผลของการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใย

เส้นใย EFBF ค่าความเพริชว 26.98, เส้นใย FF ค่าความเพริชว 11.63, เส้นใย MF ค่าความเพริชว 24.63 และเส้นใย MF-TMP ค่าความเพริชวเพริชว 19.01 โดยปกติเส้นใยที่ผ่านกระบวนการ TMP ควรมีค่าความเพริชวที่มากกว่ากระบวนการ MP แต่เนื่องจากเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ใช้ในการวิจัยเป็นมัดเส้นใย (Bundle) ไม่เหมือนเส้นใยทั่วไป

- ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

เส้นใย EFBF เป็นเส้นใยค่อนข้างยาว และมีลักษณะพื้นผิว 2 แบบ คือ เส้นใยบางขรุขระ และเส้นใยหนาผิวมันเรียบ เส้นใย FF เป็นเส้นใยสั้น ผิวขรุขระ เส้นใย

MF-MP มีผิวขรุขระ เส้นใย MF-TMP มีผิวขรุขระ และมีความสะอาดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสารโมเลกุลต่ำๆ หลุดออกไป (Extractive) โดยเฉพาะกลุ่มของแว็กซ์ (Wax/Impurity)

- ผลของสารช่วยผสม (MA-g-PP)

สารช่วยผสมช่วยให้สมบัติเชิงกลของ WPC เพิ่มขึ้นเนื่องจากการยึดติดระหว่างเส้นใยปาล์มกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มดีขึ้น โดยเฉพาะเส้นใย MF มีผลเชิงกลดีที่สุด

สมบัติทางความร้อน DSC เมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดเดียวกัน พบว่า โดยค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและองศาความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบเส้นใยต่างชนิดพบว่า เส้นใย MF-MP และเส้นใย MF-TMP ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) และอุณหภูมิตกผลึก ( $T_c$ ) คงที่ แต่องศาความเป็นผลึกมีค่ามากกว่าเส้นใยอื่น เนื่องจากเส้นใยมีความสะอาดมากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสของเส้นใยมีมากขึ้น อธิบายได้จากกลไกการยึดติดแบบเชิงกล (Mechanical Interlocking) เป็นผลให้ยึดกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ทำให้ WPC มีสมบัติดีขึ้น ปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมคือ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยปาล์ม

- ผลของเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่เตรียมด้วยกระบวนการเชิงกล (MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) เส้นใยที่เตรียมด้วยกระบวนการความร้อนเชิงกล มีผลเชิงกลดีกว่าเล็กน้อย
- ผลการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม เส้นใยที่ถูกสกัดเอาน้ำมันออกหมดมีผลเชิงกลดีกว่าเส้นใยที่ยังคงมีน้ำมันเหลืออยู่ การเพิ่มน้ำมันปาล์มดิบเข้าไปในเส้นใยปาล์มบางประเภท เช่น FF และ MF ทำให้เกิดการลื่นไถล (Slip) เป็นผลให้สมบัติเชิงกลลดลง
- WPC จากเส้นใยปาล์ม สามารถขึ้นรูปได้ เลื่อย เจาะ ใส่สกรูได้ สมบัติเชิงกลดีกว่าไม้จริงบางประเภท แต่มีผลดีกว่า WPC จากเส้นใยมะพร้าวและแผ่นไม้อัด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยวิธีอื่น เช่น อัลคาไลน์ เปอร์ออกไซด์, ไดมethylฟอร์มอดีไฮด์ เป็นต้น
- สกัดปริมาณน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า และเส้นใยทางใบ เพื่อปริมาณน้ำมันที่ตกค้างอยู่ในเส้นใย
- ทดสอบการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ เช่น ต่อชิ้นงานเป็นพาลาท โดยศึกษาผลของความหนา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไม้เทียม WPC จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โดยนำเส้นใยที่เหลือจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน เพื่อใช้ในงานเชิงวิศวกรรมศาสตร์ในเรื่องการรับแรง เช่น พาเลทรับน้ำหนัก และพื้นไม้ระเบียงนอกบ้าน (Decking) เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch Fibers; EFBF), เส้นใยทางใบ (Frond Fibers; FF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fibers; MF) ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน

**ตอนที่ 1** ศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมเพื่อนำไปพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนไม้ (WPC) ในเชิงพาณิชย์

- การวิเคราะห์ขนาดเส้นใยปาล์ม
- การศึกษาชนิดของเส้นใยปาล์มและปริมาณการเติมสารช่วยผสมที่มีผลต่อสมบัติ WPC
- องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์ม
- WPC ของเส้นใยเปลือกผลปาล์ม MF-MP และ MF-TMP
- ผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม
- ผลของน้ำมันปาล์มดิบที่ตกค้างในเส้นใยปาล์มหลังจากการบีบ
- สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimetry; DSC)
- ผลองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

**ตอนที่ 2** เลือกสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมขึ้นรูป WPC จากเส้นใยปาล์มในเชิงพาณิชย์

- ทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้ WPC ได้แก่ ความแข็งแรงโค้งงอ, โมดูลัสโค้งงอ
- สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น (Density), ทดสอบการดูดน้ำ (%Water Uptake)
- ทดสอบการยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. Polypropylene (PP) ชนิดโคพอลิเมอร์ (Copolymer) บริษัท เอช เอ็ม ซี โพลีเมอร์ จำกัด เกรดชนิด J715M MFI 9.0 g/min สมบัติบางประการของ PP ในงานวิจัยแสดงตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีน โคพอลิเมอร์ที่ใช้ในการวิจัย

Properties	Unit	Test Method		Test Condition	J715M	
		JIS	ISO			
General Properties	Melt Flow Rate	g/10min	K 7210	1133	230 °C	9.0
	Density	kg/m <sup>3</sup>	K 7112	1183		910
Mechanical Properties	Tensile Strength at Yield	MPa	K 7161	527		27.0
	Tensile Elongation at Break	%	K 7161	527		100
	Tensile Modulus	MPa	K 7161	527		1,300
	Charpy Impact Strength	kJ/m <sup>2</sup>	K 7111	179	23 °C	9
					-20 °C	4.0
Rockwell Hardness	-	K 7202	2039-2	R scale	90	

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. สารช่วยผสม (Compatibilizer) บริษัท ออฟติมอล เทคโนโลยี จำกัด สมบัติบางประการของสารช่วยผสม แสดงสมบัติบางประการของสารช่วยผสมตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของสารช่วยผสม PP-g-MA (Polybond<sup>®</sup> 3200) ที่ใช้ในการวิจัย

Appearance	Pellets
Melt Flow Rate	115 g/10 min. (ASTM D-1238)
Density @ 23°C	0.91 g/cc (ASTM D-792)
Melting Point	157 °C (DSC)
Maleic Anhydride Level	1.0 %wt

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. น้ำมันปาล์มดิบ CPO (Crude Palm Oil) จากบริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของน้ำมันปาล์มดิบ [19]

DATA	PROPERTIES
IDENTIFICATION	Trade name : Crude Palm Oil
	Chemical type : Mixed triglycerides
	Classification : Vegetable Oil
PHYSICAL PROPERTIES	Melting point (C) : 33 - 39
	Density : 0.880 - 0.940
	Appearance : Reddish-yellow liquid
	Solubility : Insoluble in water, soluble in hydrocarbons
FIRE & EXPLOSION	Flammability : Not flammable
REACTIVITY	Stability : Biodegradable

4. เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า (EFBF) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) บริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด

5. เส้นใยทางใบ (FF) บริษัท เอ็มบีเจ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด

6. Antioxidant บริษัท ออฟติมอล เทคโนโลยี จำกัด

- Anox<sup>®</sup> 20 (Phenolic Antioxidant)
- Alkanox<sup>®</sup> 240 (Phosphite Antioxidant)

7. สารช่วยกระบวนการ (Processing Aids) บริษัท เบ็นไมเยอร์ (ที) จำกัด

- EnHance<sup>®</sup>
- WF107<sup>®</sup>

8. สารละลายเอทานอล 95% เบนซีนบริสุทธิ์ (Benzene Purified) บริษัท ไบโอสเทค แอนด์ ไชแอนติฟิค จำกัด

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve Shaker) รุ่น 01409023 บริษัท ไชแอนติฟิค โพรโมชัน จำกัด ตะแกรงมาตรฐานขนาด <20, 20-50, 50-80 และเล็กกว่า 80 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องร่อนวิเคราะห์ขนาดเส้นใย (Screen Analysis Instrument) รุ่น AS 200 บริษัท ไชแอนดีฟิค โปร์โมชัน จำกัด ตะแกรงขนาด 20-40 mesh, 40-60 mesh, 60-80 mesh, 80-100 mesh และเล็กกว่า 100 mesh
3. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) รุ่น Optika B-130 บริษัท วิโรฒวิทยภัณฑ์ จำกัด
4. เครื่องบดเยื่อไม้ (Defibrator) สำหรับทำเส้นใย TMP กลุ่มพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักงานวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้
5. เครื่องบดเส้นใยหยาบและละเอียด กลุ่มพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักงานวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้
6. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) รุ่น LRM 110:บริษัท แล็บเทค เอนจิเนียริ่ง จำกัด
7. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Plastic Grinder): รุ่น A600 บริษัท บอสโก เอนจิเนียริ่ง จำกัด
8. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โรงงานชัยเจริญการช่าง
9. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) รุ่น LR5K บริษัท อินโทร เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด
10. เครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Tester) รุ่น 258-PC: บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho จำกัด
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-5410LV บริษัท จีไอโอแอล เอเชีย จำกัด
12. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC) รุ่น DSC 7 บริษัท เพอร์กินเอลเมอร์ จำกัด
13. ตู้อบ รุ่น UM 400 บริษัท เมมเมิร์ธ จำกัด
14. เครื่องละเอียดคิติดอล รุ่น ML 3002/01 บริษัท เมทเลอร์ โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด
15. ไมโครมิเตอร์และเวอร์เนีย
16. ชุด Soxhlet Extraction
17. กล้องโทรศัพท์มือถือ ไอโฟน 4s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมเส้นใยปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp; MP)

เส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า (EFBF) เตรียมโดยการตากให้แห้ง ผ่าทะเลลายปาล์มเปล่าเพื่อนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบและละเอียด ตากและอบให้แห้งอีกครั้ง

เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) เตรียมได้โดยนำเส้นใยเปลือกผลปาล์มที่ล้างสะอาด ตากและอบให้แห้ง

เส้นใยทางใบ (FF) เป็นเส้นใยที่เตรียมมาเสร็จมาแล้ว สามารถทำการคัดแยกขนาดเส้นใยได้เลย ทำการคัดแยกขนาดเส้นใยแต่ละชนิดโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดเพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย และนำเส้นใยขนาดเล็กลงกว่า 80 mesh ของแต่ละชนิดทดลองในงานวิจัย

#### 3.4.2 การเตรียมเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF) ด้วยกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermo Mechanical Pulp; TMP)

จาก 3.4.1 นำเส้นใยเปลือกผลปาล์มมาล้างสะอาด แช่น้ำเพื่อให้เส้นใยนิ่ม เตรียมเส้นใย TMP โดยใช้เครื่องบดเยื่อไม้ (Defibrator) ที่อุณหภูมิ 170°C ความดัน 10 Bar จากนั้นตากและอบเส้นใยให้แห้ง ทำการคัดแยกขนาดเส้นใยโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดเพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย และนำเส้นใยขนาดเล็กลงกว่า 80 mesh ทดลองในงานวิจัย

#### 3.4.3 วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

ชั่งเส้นใยปาล์ม 100 กรัม เบอร์ 4 มาร่อนผ่านเครื่องร่อนวิเคราะห์ขนาดเส้นใยตะแกรง โดยใช้ตะแกรงขนาด 20-40 mesh, 40-60 mesh, 60-80 mesh, 80-100 mesh และขนาดเล็กลงกว่า 100 mesh เวลาในการร่อนครั้งละ 20 นาที ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้งที่ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ หาปริมาณน้ำหนักโดยเฉลี่ย (%) ของแต่ละขนาด

นำเส้นใยที่ได้ในแต่ละขนาด สุ่มตัวอย่างละ 100 ชิ้น ไปส่องหาความกว้าง ความยาว ความหนาเฉลี่ย ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) คำนวณหาค่าสัดส่วนความเพรียว (L/D Ratio) ในแต่ละขนาด

ถ่ายรูปการกระจายตัวของเส้นใยแต่ละชนิดด้วยกล้องโทรศัพท์ โรยเส้นใยบนกระดาษกราฟ โดย 1 ช่องเล็กของกระดาษกราฟ เท่ากับ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดเส้นใย (Screen Analysis Instrument)

#### 3.4.4 ขั้นตอนการผสม

- ศึกษาผลของชนิดของเส้นใยปาล์มที่เตรียมจากระบวนการเชิงกล (MP) กระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) และปริมาณการเติมสารช่วยผสม
  - ผสมสูตรระหว่างเส้นใยปาล์ม และพอลิพรอพิลีน โดยควบคุมอัตราส่วน PP ต่อเส้นใย 50:50 (โดยน้ำหนัก) ดังตารางที่ 3.4 ผสมส่วนผสมต่างๆ ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยใช้ อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 15 นาที
  - นำของผสมที่ได้ไปบด แล้วอัดขึ้นรูปเป็นเวลา 15 นาที เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของสูตรต่างๆ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (php)
PP	100
ชนิดของเส้นใยปาล์ม (EFBF-MP, FF-MP, MF-MP, MF-TMP)	100
Processing Aids – Enhance <sup>®</sup>	5
Processing Aids – WF 107	1.5
Antioxidant Anox <sup>®</sup> 20	0.05
Antioxidant Alkanox <sup>®</sup> 240	0.05
Crude Palm Oil (CPO)	0, 2, 4, 6%wt*
Compatibilizer –Polybond <sup>®</sup> 3200	0, 1, 2, 3%wt*

\* เทียบกับปริมาณเส้นใยปาล์ม

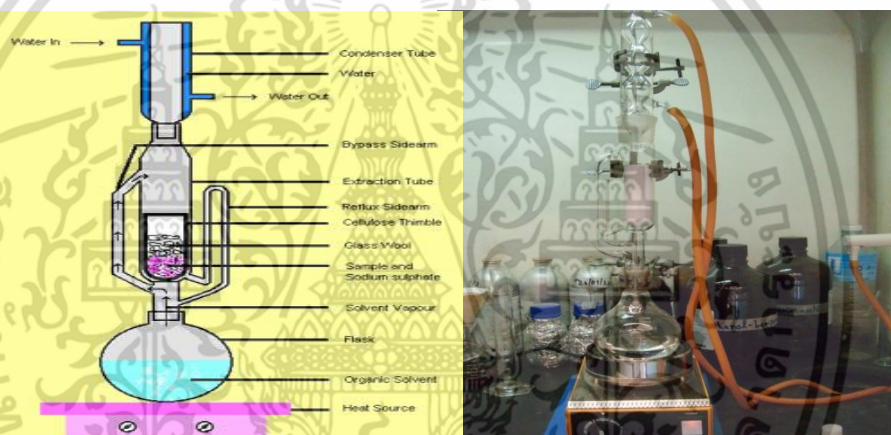
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ศึกษาผลของการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากเส้นใยเปลือกผลปาล์ม**

- สกัดน้ำมันออกจากเส้นใยปาล์ม โดยใช้มาตรฐาน TAPPI T 204 [45] เลือกใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอล-เบนซีน (Ethanol-Benzene) โดยใช้อัตราส่วน Ethanol 95% : Benzene Purified เป็น 1:2 ซึ่งใช้ตัวทำละลายในการสกัด 150 ml เตรียมโดยการตวงเอทานอล 95% 50 ml และตวงเบนซีน (Purified) 100 ml ลงในขวดกั่นกลม (ใส่ Glass Beads ลงในขวดเพื่อช่วยในการเดือดของตัวทำละลาย)

- ชั่งเส้นใยปาล์มน้ำมัน (น้ำหนักแห้ง) 10 กรัม ใส่ในทิมเบิล แล้วนำทิมเบิลใส่ใน Soxhlet Extraction Flask

- ต่ออุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การต่ออุปกรณ์ Soxhlet Extraction [45] และภาพการสกัดเส้นใยเปลือกผลปาล์ม

- เปิดน้ำเข้า Condenser และเปิดเตาหลุมปรับอุณหภูมิให้ตัวทำละลายเดือดเป็นไอ และเกิดการควบแน่นกลับลงมา (Reflux) ให้ได้อย่างน้อย 6 ครั้งต่อชั่วโมง เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง (อย่างน้อย 24 ครั้ง)

- เมื่อครบกำหนดให้ปิดเตาแล้วนำสารสกัดในขวดกั่นกลมไประเหย โดยนำสารสกัดที่ได้ไปใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มล. และนำบีกเกอร์ขนาด 2000 มล. ใส่น้ำ 1/4 ของบีกเกอร์อันบนน้ำร้อน 70 °C จากนั้นนำบีกเกอร์ที่มีสารสกัดใส่ลงบีกเกอร์ที่มีน้ำ เปิดไฟระเหยจนสารสกัดเหลือ 20-25 มล.

- นำสารที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (การล้างสารให้ใช้น้ำกลั่น)

- นำกระดาษกรองที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใส่ใน

เคชเชเตอร์ รอให้เย็นแล้วนำไปชั่ง (เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง และทำแบบลวกอีกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาปริมาณสารที่สกัดได้

$$\text{Extractables (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งสารที่สกัดได้จากเส้นใย} - \text{น้ำหนักสารที่ได้จาก Blank}}{\text{น้ำหนักแห้งของเส้นใยก่อนการสกัด}} \times 100$$

● ผลของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่เพิ่มในเส้นใยปาล์ม

- เลือกสูตรผสมของผลการศึกษานิตและปริมาณการเติมสารช่วยผสมที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดมาใช้ในการทดลองตอนนี้ โดยใช้เส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า (EFBF-MP), เส้นใยทางใบ (FF-MP) และเส้นใยเปลือกผลปาล์ม (MF-MP)
- ผสมสูตรระหว่างเส้นใยปาล์มและ PP โดยควบคุมอัตราส่วน PP ต่อเส้นใย 50:50 %wt ดังตารางที่ 3.4 ผสมส่วนผสมต่างๆ ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยใช้อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 15 นาที
- นำของผสมที่ได้ไปบด แล้วอัดขึ้นรูป เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล และตั้งฐานวิทยา

### 3.4.5 การทดสอบ

#### 3.4.5.1 สมบัติเชิงกล

ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ

การหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) มอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus) ตามมาตรฐาน มอก.966-2547 [46] โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาด 50 mm x 15 mm (ความหนา) + 50 mm จำนวน 12 ชิ้น ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ แสดงดังรูปที่ 3.2 โดย L = 15 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบไม่ต่ำกว่า 150) + 50 mm สภาวะในการทดสอบ เป็นดังนี้

โหลดเซลล์ (Load Cell)	5	kN
ความเร็วในการกด (Compression Speed)	10	mm/min
ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับ ชิ้นงาน	15	เท่าของความหนา

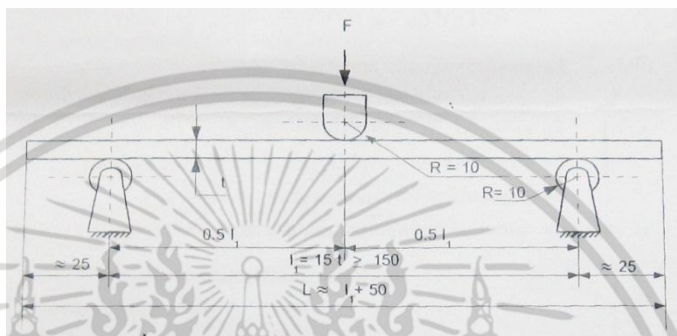
สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

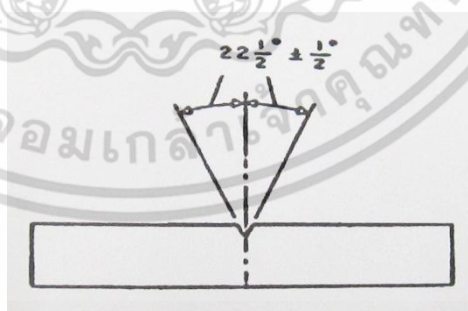
- เมื่อ  $F$  คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างโค้งงอ (N)  
 $L$  คือ Span Length  
 $B$  คือ ความกว้างของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)  
 $h$  คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)  
 $\Delta F$  คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (N)  
 $\Delta d$  คือ ระยะกดโค้งงอในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (mm)



รูปที่ 3.3 ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ [46]

#### ความแข็งแรงกระแทก

การหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 256 [46] โดยชิ้นงานได้จากการกดอัด (Compression Molding Machine) ในการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod Type) ทำรอยบากเป็นรูปตัววี (V Notch) ชิ้นงานตัวอย่างขนาดประมาณ  $12 \times 125 \times 3$  mm จำนวน 10 ชิ้น ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก [46]

ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

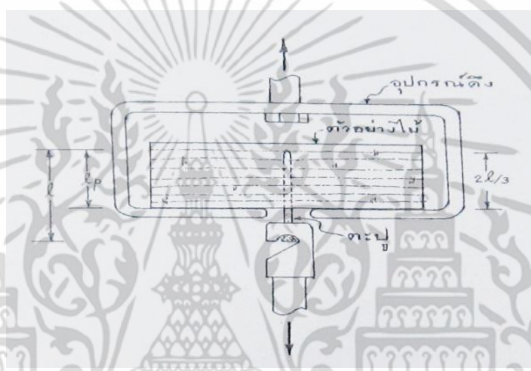
$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (IS)} = W/A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก ( $\text{kJ/m}^2$ )  
 W คือ ค่าพลังงานกระแทก (kJ)  
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่แตกหัก ( $\text{m}^2$ )

การทดสอบความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว

หาค่าความยืดหยุ่นของตะปูเกลียวตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 [46] โดยขันตะปูเกลียวชนิดหัวจมแบบผ่าที่มีความยาว 40 mm หรือที่มีขนาดใกล้เคียงลงบนชิ้นงานที่มีขนาด 50 mm x 50 mm ชิ้นงานกระทั้งส่วนเกลียวที่สมบูรณ์จมลึกลงไปถึง  $15 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$  ไม่นับความยาวส่วนปลายเรียวของตะปูเกลียว จากนั้นทำการดึงให้ตะปูเกลียวถอนออกจากชิ้นทดสอบโดยใช้ความเร็วในการดึง  $2 \text{ mm/min}$

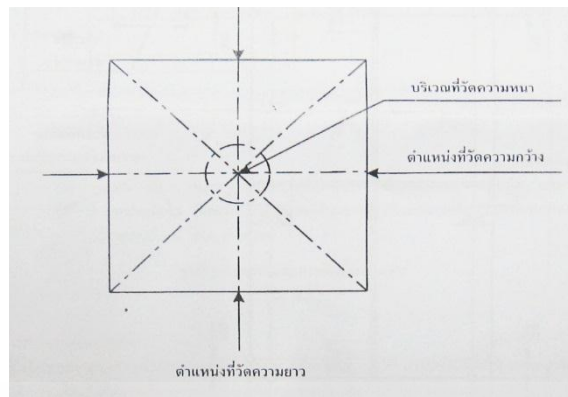


รูปที่ 3.5 ลักษณะการทดสอบความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว [46]

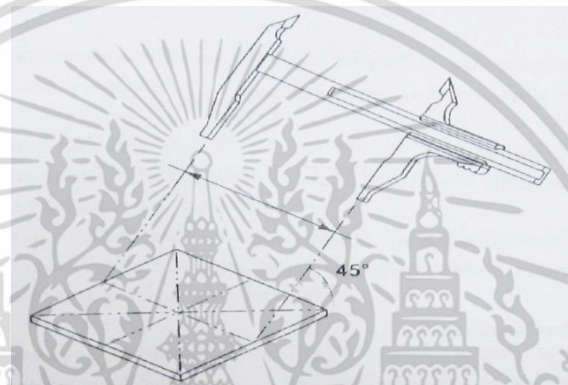
#### 3.4.5.2 สมบัติกายภาพ

ความหนาแน่น (Density)

หาความหนาแน่นตามมาตรฐาน มอก. 966-2547 [46] สามารถหาได้โดยการเตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาด 50 mm x 50 mm จำนวน 6 ชิ้น ชั่งชิ้นทดสอบให้ได้มวลที่แน่นอน จากนั้นทำการวัดความหนาตรงจุดกึ่งกลาง ความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบตามรูปที่ 3.6 โดยวางเครื่องมือให้ทำมุมกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบประมาณ  $45^\circ$  ตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ [46]



รูปที่ 3.7 วิธีวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ [46]

#### ทดสอบการดูดน้ำ (Water Uptake)

การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ (%Water Uptake) ตามมาตรฐาน ASTM D 570 [47] โดยนำชิ้นงานคอมโพสิตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า น้ำหนัก 2.00 – 5.0 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 30-45 นาที ซึ่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง (ทดสอบ 4 ตำแหน่ง) จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 45 วัน โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในทุกๆ 2 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้ทำการทดสอบมาตรฐานดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยรายงานผล
ความแข็งแรงกระแทก	ASTM D 256	kJ/m <sup>2</sup>
ความแข็งแรงโค้งงอ	มอก.966-2547	MPa
มอดุลัสโค้งงอ	มอก.966-2547	MPa
การดูดน้ำ	ASTM D 570	%
ความหนาแน่น	ASTM D 1505-85	g/cm <sup>3</sup>
ความต้านทานการขีดเห็นียวของ ตะปูเกลียว	มอก.966-2547	N

### 3.4.5.3 สมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC)

DSC เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flow) ชั่งน้ำหนักสาร 5-10 กรัม โดยหาอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (Enthalpy; H) ซึ่งใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 10 °C/min ทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 250 °C ในบรรยากาศไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) สามารถคำนวณค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity ; X<sub>c</sub>) ได้ดังสมการนี้

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f / \% \text{ ของ PP ในคอมโพสิต}}{\Delta H_f^0} \times 100$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ เอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์คอมโพสิต

$\Delta H_f^0$  คือ ค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลวของ PP ที่มีความเป็นผลึก 100 %

$$= 206.7 \text{ J/g [48]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 3.4.5.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดเพื่อศึกษาการยึดติระหว่างเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์ การกระจายตัวของเส้นใยปาล์มในพลาสติกพอลิพรอพิลีน การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำตัวอย่างขนาด  $12 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$  มาแช่ที่อุณหภูมิต่ำ 20 นาที โดยใช้ไนโตรเจนเหลว และทำการหักทันทีที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างขนาดประมาณ 3 cm มาเคลือบทองและนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อศึกษาพื้นผิวภาคตัดขวางของชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นิตยสารผู้จัดการ. “แผนรัฐกัญญ์วิกฤตภาคเกษตร หนุนปลูกปาล์ม – ป้อนแปรรูปสินค้า 600 ชนิด.” [Online]. Available : <http://www.info.gotomanager.com/news/printnews.aspx?id=38034.2548>.
- [2] บริษัทสุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม. “องค์ประกอบของต้นปาล์มน้ำมัน.” [Online]. Available : <http://www.suksomboon.com>. 2550.
- [3] ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. “ธุรกิจปาล์มน้ำมันหลังก้าวเข้าสู่ AEC.” [Online]. Available : <http://www.ksmcare.com>. 2555.
- [4] ชีระพงศ์ จันทรมิข. “กระบวนการไร้ของเสียในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม (Zero - waste Process in Oil Palm Extraction Industries)” วารสารเทคโนโลยีวิชาการ. ปีที่6, ฉบับที่ 2. กรกฎาคม-ธันวาคม 2551. หน้า 159-164.
- [5] ไม้เทียม. “วัสดุทดแทนไม้ในปัจจุบัน.” [Online]. Available : <http://www.artowood.com/ebrochure-th.pdf>. 2551.
- [6] แหล่งรวมข้อมูลวัสดุก่อสร้างครบวงจร . “Wood plastic Composite.” [Online]. : Available : [http://www.ebuild.co.th/info.php?info\\_id=8](http://www.ebuild.co.th/info.php?info_id=8). 2551.
- [7] Moistureshield professional grade decking. “Wood Composite.” [Online]. Available : <http://www.moistureshield.com/images/productInfo>. 2005.
- [8] Cellulose. “Structural unit.” [Online]. Available : <http://www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html>. 2010.
- [9] H.F. Mark and J.I. Kroschwitz. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. 2<sup>nd</sup> ed.: John Wiley & Sons. New York. Vol.6. 1990. pp 655.
- [10] HLE overview. “Woody Biomass.” [Online]. Available : <http://www.tethysresearch.com/enzymes-in-development/hle-overview>. 2012.
- [11] บางรักษ์ เศรษฐสิงห์. ไม้เนื้อแข็งของประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร : กรมป่าไม้ 2517.
- [12] ชาย โนมรวิศ และสุรภิตติ ศรีกุล. “เอกสารวิชาการปาล์มน้ำมัน.” กรุงเทพมหานคร : เอกสารวิชาการ ลำดับที่ 16 กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2553.
- [13] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. “มีโซคาร์ป (Mesocarp).” [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com>. 2556.
- [14] อังศุมา บุญไชยสุริยา. “การผลิตโพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] น้ำอ้อย ศรีประสม. “ลักษณะทางลำต้นและอัตราพันธุกรรมในระยะกล้าของปาล์มน้ำมัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2552.
- [16] เกษตรพอเพียงดอทคอม “ทางใบหมัก.” [Online]. Available : <http://www.kasetporpeang.com>. 2553.
- [17] อรวรรณ รัตนวงษ์. “การปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยจากทะเลลายปาล์มเปล่าเพื่อเพิ่มการดูดซับสารไม่มีขั้ว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2549.
- [18] บริษัท สยามไบโอเอนเอช. “น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil).” [Online]. Available : <http://www.siambioenergy.com>. 2555.
- [19] Biztrademark Corporation. “Crude Palm Oil.” [Online]. Available : <http://www.biztrademark.com>. 2014.
- [20] ปรีชา พหลเทพ. พอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2540.
- [21] Wikipedia. “Polypropylene.” [Online].: Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>. 2014.
- [22] Sigma-Aldrich.Co.LLC. “polypropylene graft maleic anhydride.” [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich>. 2014.
- [23] อธิพิศ แจ่มชัด. ฟิสิกส์พอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร. เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [24] อธิพิศ แจ่มชัด. พอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพมหานคร. เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [25] นัยนา ดวงบาน. “การเตรียมฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คอมโพสิตนำไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน” วิทยาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยเชียงใหม่. 2552.
- [26] ญัฐชญาภา ธนวัฒนาศิริกุล ธเนศ รัตนวิไล และกลางเดือน โพชนา. “วัสดุไม้พลาสติกจากไม้ปาล์มและ HDPE” วิศวกรรมสาร มช. ปีที่38, ฉบับที่ 3. กรกฎาคม-กันยายน 2554. หน้า 285 -296.
- [27] T. Sattabongkoch. “Wood Composites and Wood Plastic Composites” **Journal of Engineering**. Vol. 49. 2011. pp 1-10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] J. Makarian. "Wood Composites: Current Trends in Materials and Process." **Plastics Additives and Compounding**. Vol.10. 2008. pp 20-25.
- [29] อนันท์ มีมนต์. "การผลิตไม้เทียมจากเศษโฟมพีวีซีกับผงไม้." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2548.
- [30] T. Jantaraniyo., P. Tongkum., C. Nilnon. and T. Eaksomtrameth. "Efficiently Management of Oil Palm Garden." **Research and Development Center of Oil Palm Production**. Vol.3. 2005. pp 1-125.
- [31] Pollution Control Department. "The Project Reduction of Using Plastic and Foam." **Ministry of Nature Resource and Environment**. 2005. pp12-20.
- [32] ชารทิพย์ เขมะศิริ, สุภาวดี ขาวนวล และอมรา ขวดบา. "วัสดุประกอบพอลิเมอร์คอมโพสิตของเส้นใยหญ้าแฝกกับพอลิโอสตีเร็น : พีพีและเอชดีพีอี." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์ บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [33] กนิษฐา อังกรรัตน์. "การศึกษาสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [34] B.F. Abu-Sharkh. and H. Hamid. "Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis" **Polymer Degradation and Stability**. Vol.85. 2003. pp 967-973.
- [35] M. Khalid, C.T. Ratnam, T.G. Chuah, A. Salmiaton and S.Y. Thomas. "Comparative study of polypropylene composites reinforced with oil palm empty fruit bunch fiber and oil palm derived cellulose" **Materials and Design**. Vol.29. 2008. pp 173-178.
- [36] H.D. Rozman, M.J. Saad. and Z.A.M. Ishak. "Flexural and impact properties of oil palm empty fruit bunch (EFB) - polypropylene composites the effect of maleic anhydride chemical modification of EFB" **Polymer Testing**. Vol.22. 2002. pp 335-341.
- [37] H. Bouafif, A. Koubaa, P. Perr. and A. Cloutier. "Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites" **Composites Part A**. Vol.40. 2008. pp 1975-1981.

- [38] S.S. Suradi, R.M. Yunus, M.D.H.Beg, M. Rivai. and Z.A.M.Yusof. “Oil Palm Bio-Fiber reinforced thermoplastic composites – Effects of matrix modification on mechanical and thermal properties ” **Journal of applied science**. Vol.10. 2010. pp 3271–3276.
- [39] A. Karmarkar, S.S. Chauhan, J. M. Modak. and M. C. Karmarkar. “Mechanical properties of wood–fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group” **Composites**. Vol.38. 2007. pp 227–233.
- [40] ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และอัญชิสา สันติจิตโต. 2555. “สมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์ม เพื่อผลิตวัสดุก่อสร้าง.” **วารสารวิจัยและสารสถาปัตยกรรมผังเมือง**. ปีที่ 9, ฉบับที่ 1 ธันวาคม 2555. หน้า 113-124.
- [41] กนกกร แสงสุวรรณ. 2553. “ไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิเอเลฟินส์และเส้นใยมะพร้าว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [42] วิทยา ปั่นสุวรรณ, ศิริพร เสนียุทธ, เสาวภาคย์ สาริमान และกุลธิดา อินทร์. “การผลิตเยื่อที่มีแอลฟาเซลลูโลสสูง และไซโลสจากขานอ้อย โดยวิธีระเบิดด้วยไอน้ำ” **การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39**. กุมภาพันธ์ 2544. หน้า 79-86.
- [43] วิทยา ปั่นสุวรรณ. “การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.” **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36**. กุมภาพันธ์ 2541. หน้า 271-279.
- [44] กษมา จารุกัจจร และวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. “ผลของการดัดแปรทางความร้อนและสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนและเส้นใยป่านครนารายณ์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2552.
- [45] B.L. Browing. **Method in wood chemistry**. Interscience. New York. 1963. pp 389-407.
- [46] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. **แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง**. 121. 63ง กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม 2547.
- [47] Society for Testing and Materials. **Standard Test Methods for Water Absorption of Plastics**. Philadelphia America. 1993.
- [48] J. Brandrup, E.H. Immergut and E.A. Grulke. **Polymer Handbook** . 3<sup>rd</sup> ED. John Wiley : New York. 1989.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

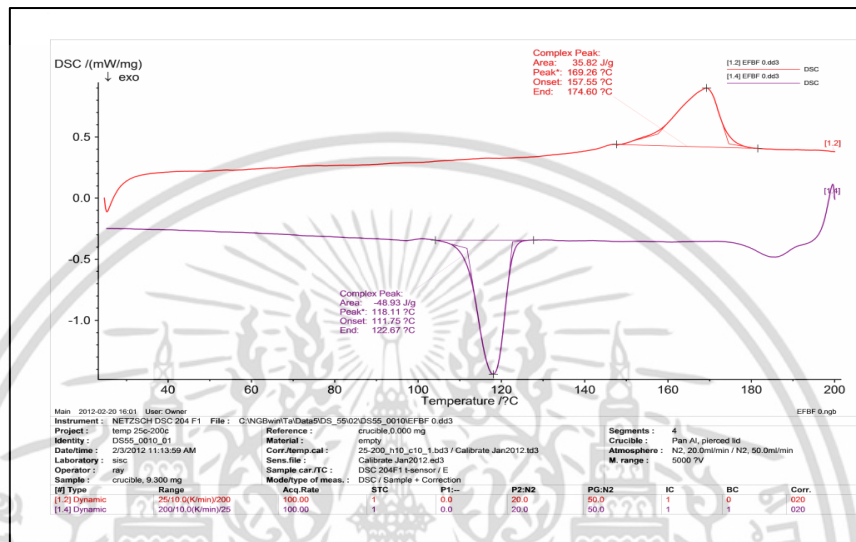
- [49] J.M. Park, S. T. Quang, B.S. Hwang and K. L. DeVries. “Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibers/polypropylene (PP)-maleic anhydride polypropylene copolymers (PP-MAPP) composites using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission.” **Composites Science and Technology**. n.d. 2006. pp 2686-2699.



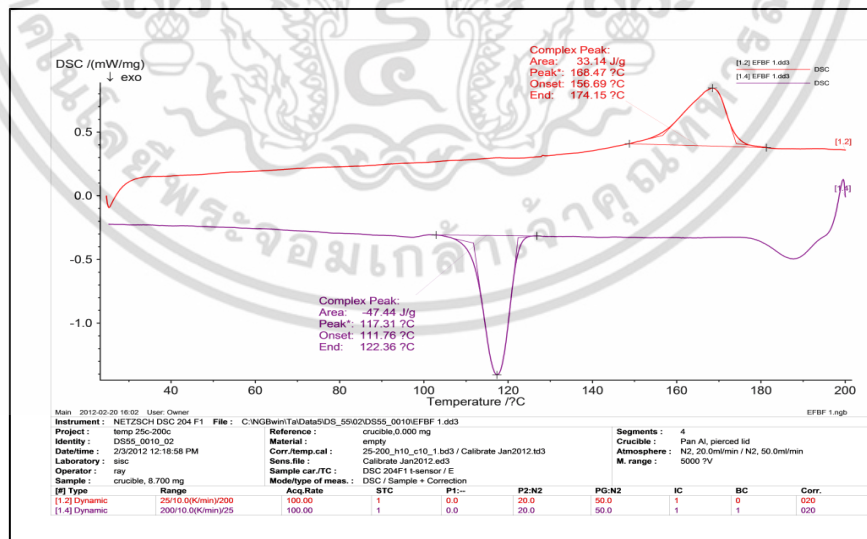
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก. กราฟที่ได้จากเครื่อง DSC ของไม้พลาสติกคอมโพสิต

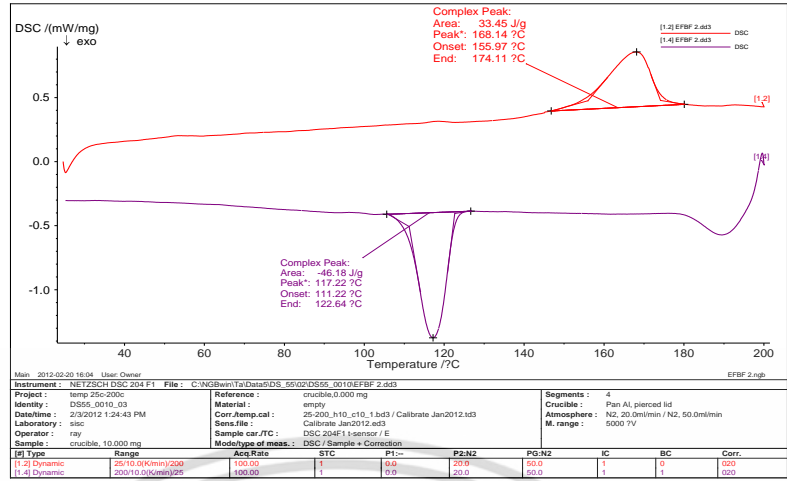


รูปที่ ก-1 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:EFBF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 0% ของเส้นใยปาล์ม

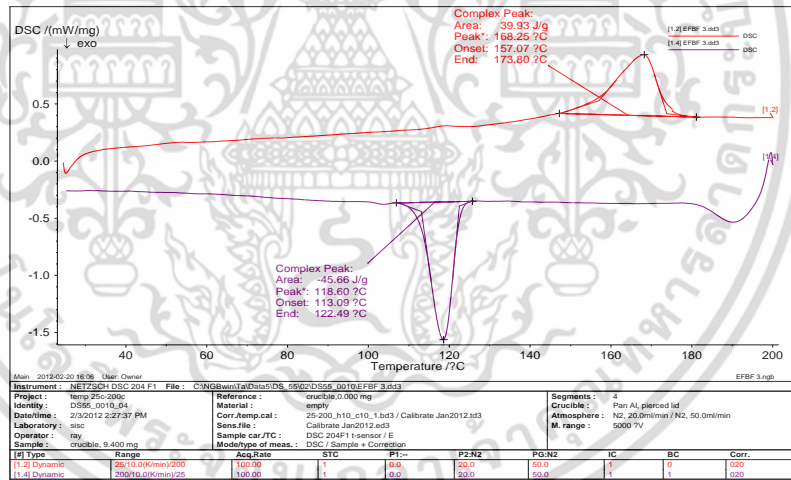


รูปที่ ก-2 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:EFBF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 1% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

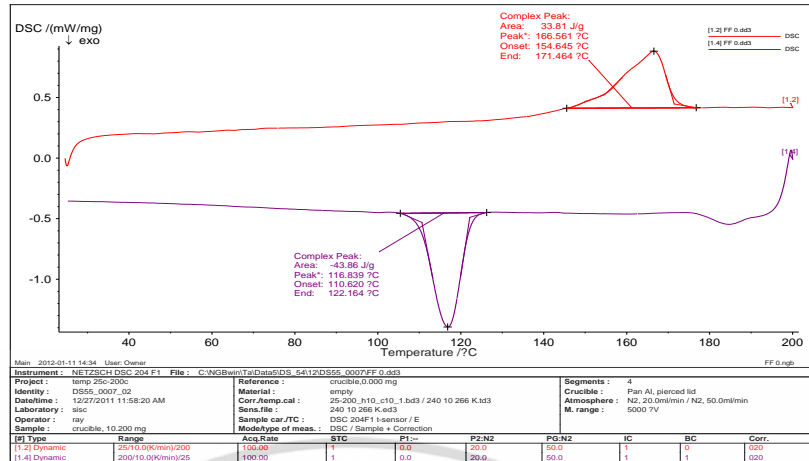


รูปที่ ก-3 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:EFBF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 2% ของเส้นใยปาล์ม

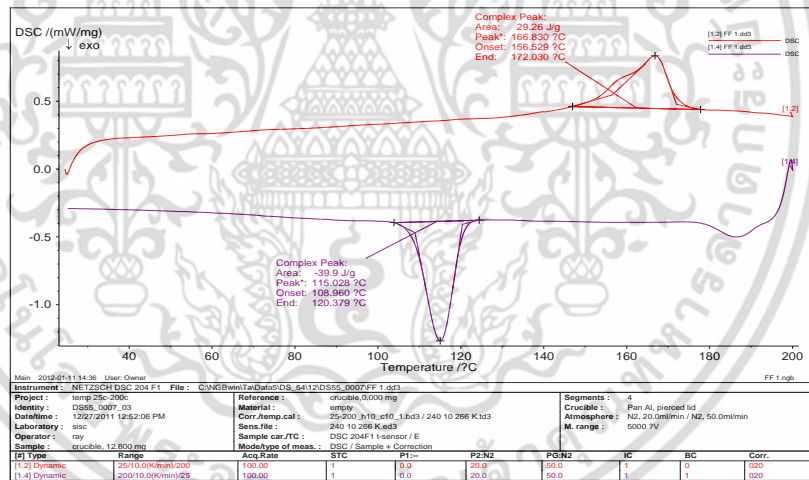


รูปที่ ก-4 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:EFBF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 3% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

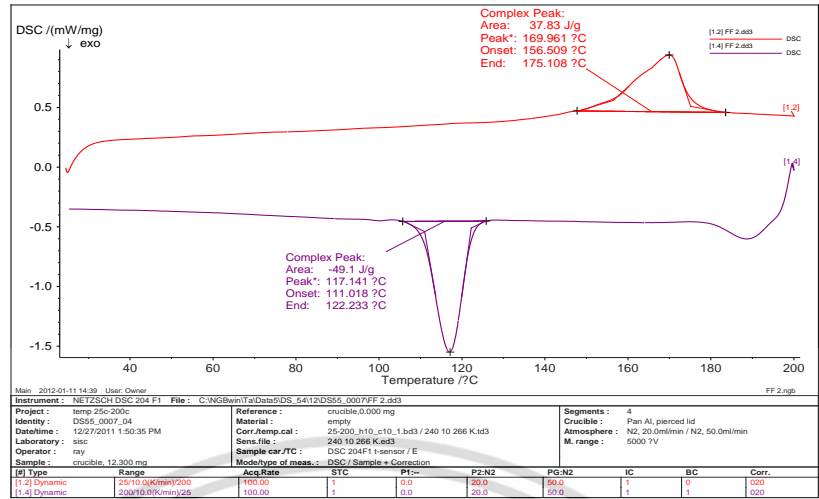


รูปที่ ก-5 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:FF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 0% ของเส้นใยปาล์ม

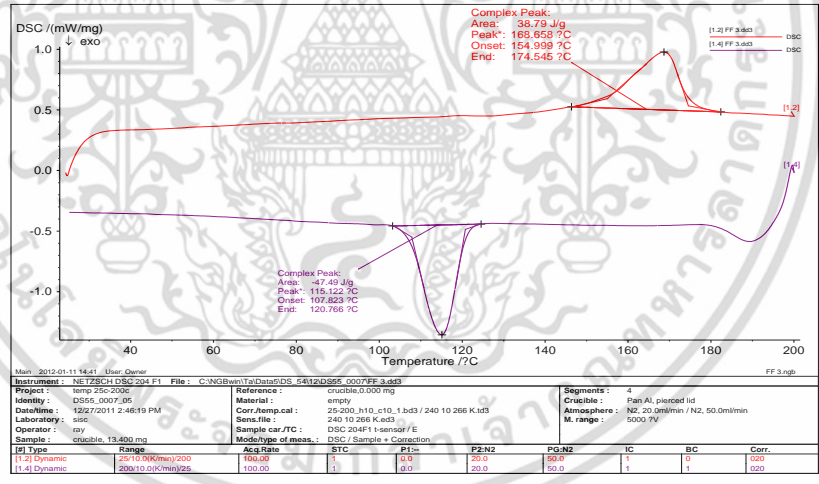


รูปที่ ก-6 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:FF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 1% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

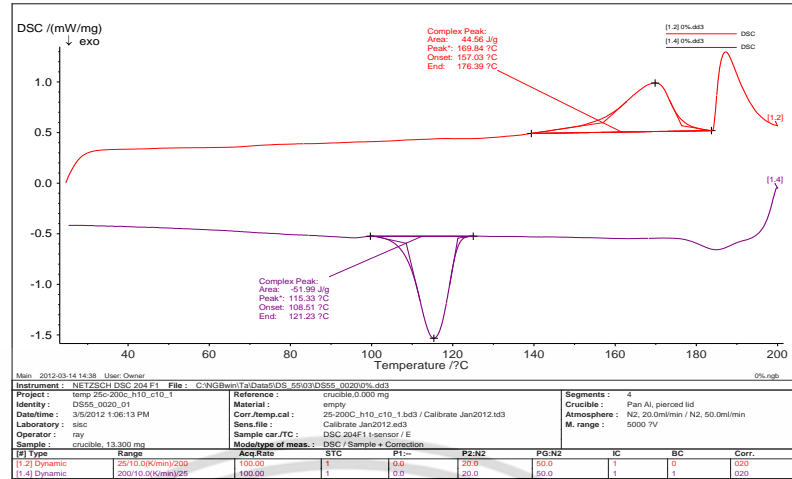


รูปที่ ก-7 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:FF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 2% ของเส้นใยปาล์ม

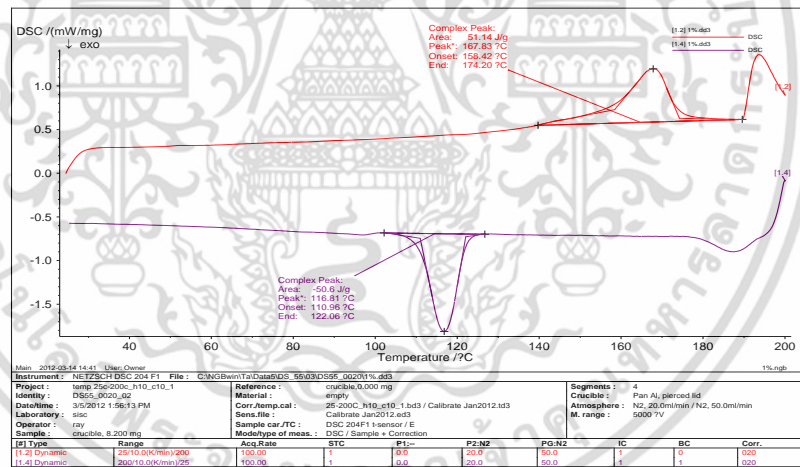


รูปที่ ก-8 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:FF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 3% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

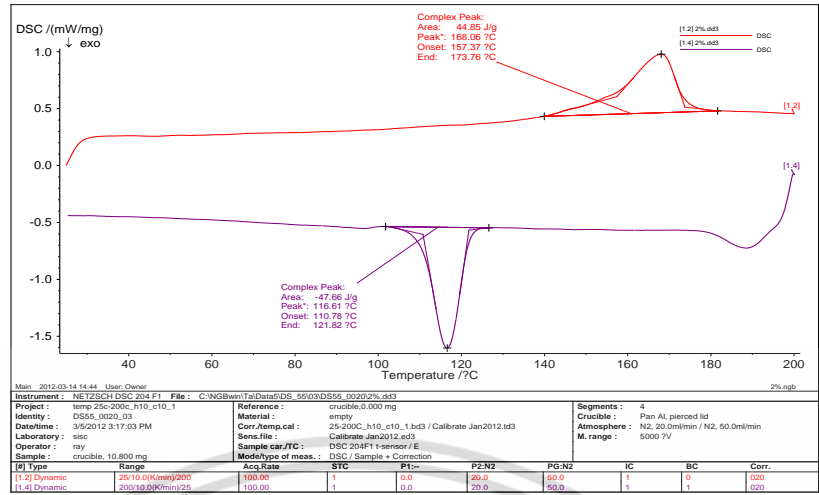


รูปที่ ก-9 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 0% ของเส้นใยปาล์ม

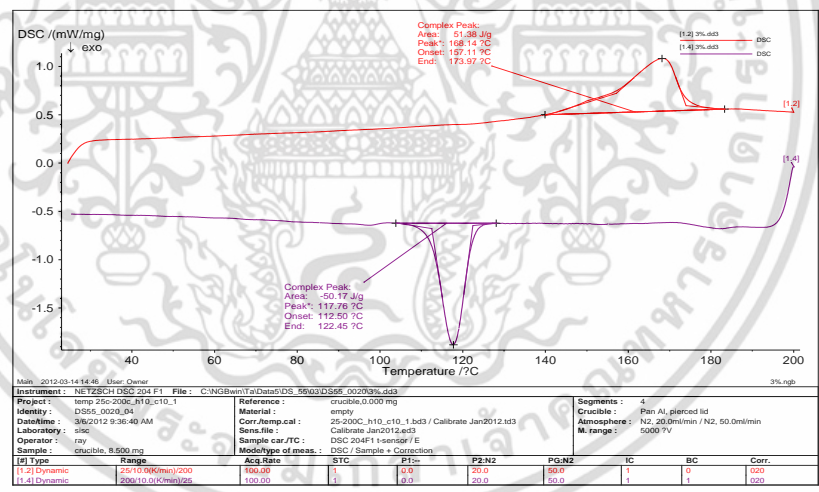


รูปที่ ก-10 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 1% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

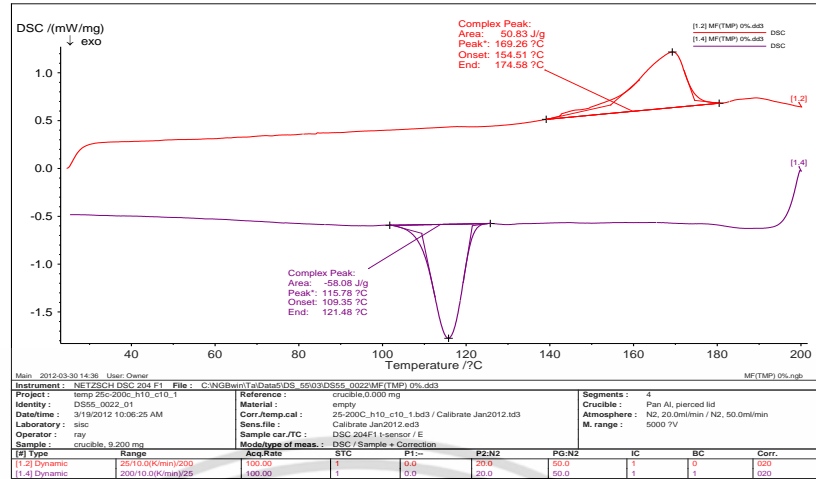


รูปที่ ก-11 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 2% ของเส้นใยปาล์ม

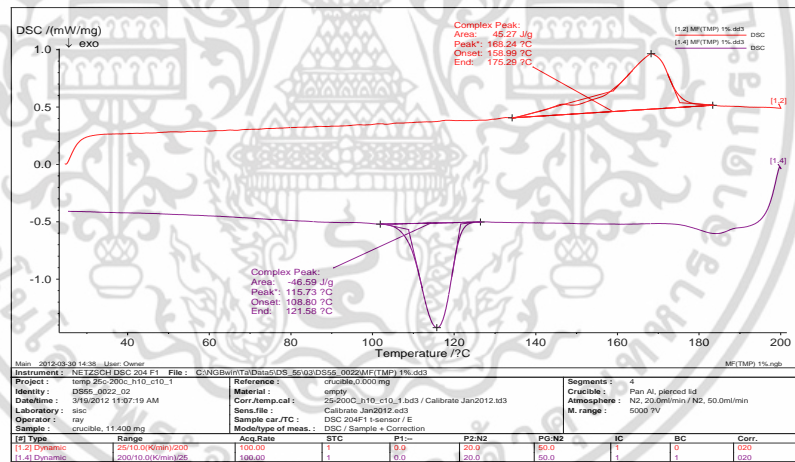


รูปที่ ก-12 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 3% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

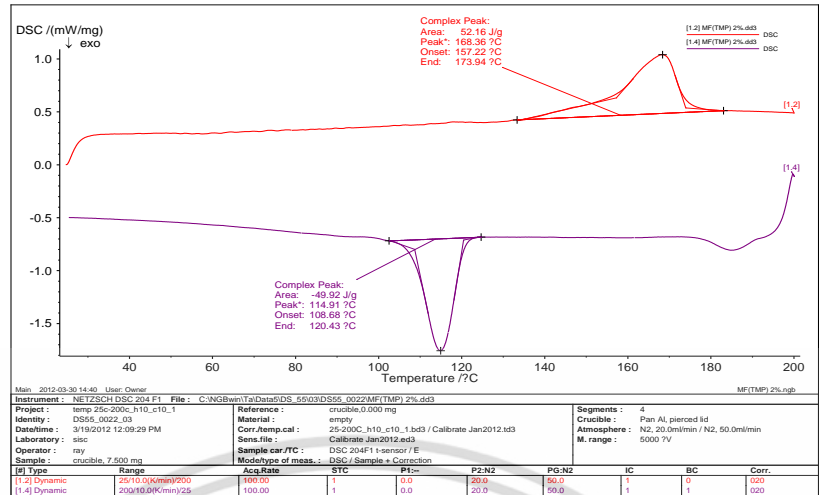


รูปที่ ก-13 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF-TMP = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 0% ของเส้นใยปาล์ม

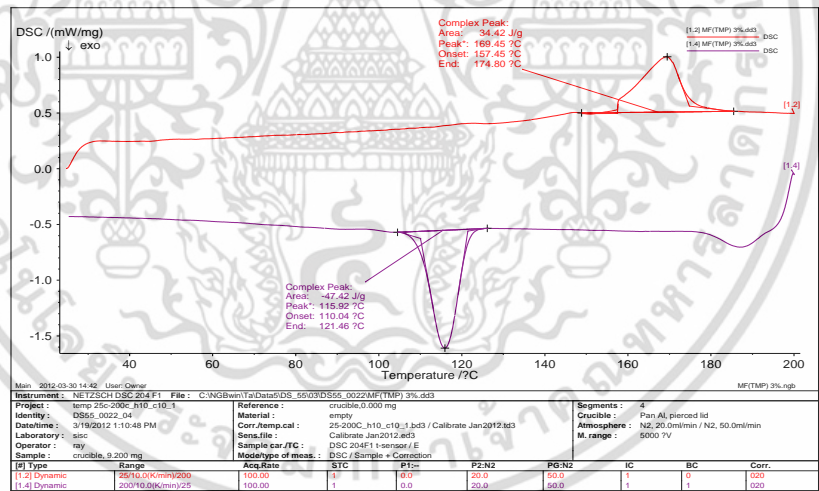


รูปที่ ก-14 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF-TMP = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 1% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-15 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF-TMP = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 2% ของเส้นใยปาล์ม



รูปที่ ก-16 กราฟจากเครื่อง DSC ของ WPC-PP (PP:MF-TMP = 50:50) และสารช่วยผสม PP-g-MA 3% ของเส้นใยปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ จินตนา สุขสวัสดิ์  
วันเกิด 10 ม.ค. 2525  
สถานที่เกิด กรุงเทพ ประเทศไทย  
การศึกษา ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) จากภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2548-2551

ผลงานวิชาการ

พ.ศ. 2554

การศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้พลาสติกจากพอลิพรอพิลีนและ  
เศษ ไม้จากปาล์มน้ำมัน; เส้นใยละลายปาล์มเปล่า, เส้นใยทางใบ  
การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต  
กำแพงแสน ครั้งที่ 8 ระหว่างวันที่ 8-9 ธันวาคม 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้