

การศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมจากขยะบรรจุภัณฑ์ลามิเนต

STUDY OF WOOD PLASTIC COMPOSITES PREPARED FROM
LAMINATED PACKAGING WASTES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

KMITL-2023-SC-M-012-005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF WOOD PLASTIC COMPOSITES PREPARED FROM
LAMINATED PACKAGING WASTES



THITIKUL BOONSRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-SC-M-012-005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมจากขยะ บรรจุภัณฑ์ลามิเนต
ชื่อนักศึกษา	นางสาวฐิติกุล บุญศรี
รหัสประจำตัว	62605074
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

ปัญหาขยะพลาสติกกันเมืองเป็นปัญหาระดับโลก ก่อให้เกิดมลภาวะต่าง ๆ ตามมาอย่างมากมาย หนึ่งในมาตรการแก้ปัญหาขยะพลาสติกคือ ส่งเสริมการรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะเม็ดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาแปรรูปใหม่ (PCR) เพื่อตอบโจทย์แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน อย่างไรก็ตามก็ยังมีพลาสติกหลายชนิดที่ยังไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้ง่าย โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ลามิเนตจากพลาสติกหลายชนิด งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood plastic composites, WPC) ที่เตรียมจาก PCR พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดรีไซเคิล (rHDPE) และผงไม้ เพื่อประกอบเป็นคานบนของพาเลทไม้ โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของผงไม้/rHDPE/PCR ผลของชนิด PCR ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE), พลาสติกหลายชั้นจากพอลิเอไมด์ชนิดจัดเรียงโมเลกุล (OPA)/PE และพลาสติกหลายชั้นจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)/PE และผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) การผสมสูตรใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด จากนั้นทดสอบสมบัติของไม้ WPC จากการศึกษาผลของอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR(LLDPE) เป็น 55/rHDPE/5 พบว่าการเพิ่มปริมาณ rHDPE ทำให้ความหนาแน่น ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มากขึ้น สามารถห่อหุ้มอนุภาคของไม้และเส้นใยไม้ได้มากขึ้น จึงลดรอยตำหนิจากช่องว่างใน WPC จากการศึกษาผลของ PCR 3 ชนิด พบว่า PCR ชนิด LLDPE สามารถหลอมรวมกับเมทริกซ์ rHDPE ส่วน PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE ที่หลอมไม่สมบูรณ์เป็นวัฏภาคกระจายทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดแผ่นที่สามารถช่วยเสริมแรงให้กับไม้ WPC ได้ และการใช้ CaCO₃ ปริมาณ 10 ส่วน พบว่าค่าความหนาแน่น ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกและความแข็งกดของไม้ WPC ผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด และจากการทดสอบการใช้งานจริง โดยนำไปประกอบเป็นคานบนของพาเลท พบว่า WPC ที่ผลิตจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้งานได้จริงและให้ค่าสมบัติผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนดของการผลิตเป็นพาเลทไม้

คำสำคัญ : ผงไม้ พลาสติกที่ผ่านการใช้งานโดยผู้บริโภคมามากแล้ว พลาสติกรีไซเคิล ไม้คอมโพสิต พาเลทไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study of Wood Plastic Composites Prepared from Laminated Packaging Wastes Packaging Plastic Waste
Student	Miss Thitikul Boonsri
Student ID	62605074
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2023
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Suparat Rukchonlatee
Thesis Co-advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

Abstract

The problem of overflowing plastic wastes is a global problem, causing a lot of pollutions. One of the managements to solve the plastic waste problem is to promote recycling and reuse via the post-consumer recycled resin (PCR). This is to meet the circular economy concept. However, there are many types of plastics that cannot be easily recycled, especially the laminated packaging from various plastics. This research aimed to develop wood plastic composites (WPC) from PCR, high density polyethylene (recycled grade, rHDPE) and wood powder to assemble into the upper beam of the pallet wood. Some parameters affected the WPC's properties were studied including the ratios of wood powder/rHDPE/PCR, PCR types (linear low density polyethylene (LLDPE), multilayered oriented polyamide (OPA)/PE and multilayered polyethylene terephthalate (PET)/PE films) and CaCO_3 loadings. The WPC compounds were prepared using a two-roll mill and samples for testing were shaped using compression molding machine. From the study on the ratios of wood powder/rHDPE/PCR(LLDPE) were 55/rHDPE/5, it was found that density, flexural strength, flexural modulus and impact strength of WPC were increased with increasing rHDPE contents. This was because of greater amounts of polymer matrix to encapsulate the wood particles and fibers, resulting in less defects from voids in the WPC. The results from using 3 types of PCR revealed that LLDPE was completely molten with rHDPE, but OPA/PE and PET/PE were partially melted and become another dispersed phase (acted as a sheet filler) and consequentially promoted reinforcing effect in the WPC. The addition of 10 weight fractions of CaCO_3 in the WPC revealed that density, flexural strength, flexural modulus, impact strength and hardness of WPC were passed the property target values. Additionally, the WPC was assembled into the upper beam of the pallet wood and tested for actual uses. It was found that the developed WPC from this research

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

had promising properties, which passed the target values of wood pallet production, and so gave high potential to apply for industrial uses.

Keywords : Wood powder, Post-consumer recycled resin (PCR), Recycled plastic, Wood plastic composites (WPCs), Pallet wood



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาของ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความดูแลเอาใจใส่ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด ขอขอบคุณคณะกรรมการ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำถึงประเด็นต่าง ๆ ในการศึกษา และชี้แนวทางในการแก้ปัญหา การค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม อันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ และสรุปผลการศึกษา รวมทั้งการแก้ไขงานให้สมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง และขอขอบคุณพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนในการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิชาการ

ขอขอบคุณ บริษัท เอ็ม บี เจ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบคุณ กลุ่มบริษัท ดาว ประเทศไทย สำหรับทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ และให้การสนับสนุนสารช่วยผสมที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด สำหรับการสนับสนุน PCR ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบคุณ ครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจให้ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา ซึ่งผู้เขียนไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ได้ทั้งหมด หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ นับเป็นความปิติยินดีอย่างยิ่งที่ได้ทำงานวิจัยฉบับนี้ขึ้น และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ฐิติกุล บุญศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ (Packaging product).....	7
2.2 การจัดการขยะพลาสติกในประเทศไทย.....	11
2.3 นวัตกรรมพลาสติกกรีโซเคิล.....	12
2.4 เส้นใยธรรมชาติ.....	13
2.4.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ.....	13
2.4.2 การยึดติดระหว่างผิวเส้นใยและเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	15
2.4.2.1 การดูดซับและการเปียกผิว.....	15
2.4.2.2 การแพร่เข้าหากัน.....	17
2.4.2.3 แรงประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์.....	17
2.4.2.4 พันธะเคมี.....	17
2.4.2.5 การยึดเกาะเชิงกล.....	17
2.5 วัสดุคอมโพสิต.....	18
2.5.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต.....	18
2.5.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต.....	18
2.5.2.1 จำแนกตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง.....	18
2.5.2.2 จำแนกตามลักษณะการเกิดคอมโพสิต.....	19
2.5.2.3 จำแนกตามชนิดของวัสดุเมทริกซ์.....	19
2.5.3 วัสดุไม้คอมโพสิต (Wood plastic composites, WPCs).....	20
2.5.3.1 บทบาทของวัสดุไม้คอมโพสิต.....	21
2.5.3.2 สมบัติของไม้คอมโพสิต.....	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบวัสดุดิบ.....	28
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ PCR.....	28
3.3.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของ PCR.....	29
3.3.3 การวิเคราะห์ผงไม้.....	29
3.4 การเตรียมไม้คอมโพสิต.....	29
3.4.1 กระบวนการผสม.....	31
3.4.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป.....	31
3.5 การทดสอบความหนาแน่นของไม้ WPC.....	32
3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้ WPC.....	32
3.6.1 การทดสอบสมบัติการโค้งงอ.....	32
3.6.2 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก.....	32
3.6.3 การทดสอบความแข็งกดแบบดิวโรมิเตอร์.....	33
3.7 การศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้คอมโพสิต.....	33
3.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของไม้คอมโพสิต.....	33
3.9 การทดสอบการใช้งานจริง.....	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	36
4.1 การวิเคราะห์วัสดุดิบ.....	36
4.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ชนิด LLDPE ต่อสมบัติของ ไม้ WPC.....	38
4.3 การศึกษาผลของชนิดของ PCR และอัตราส่วน rHDPE/PCR ต่อสมบัติของ ไม้ WPC.....	43
4.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	43
4.3.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของไม้ WPC.....	45
4.3.3 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึกของ พอลิเมอร์.....	46
4.3.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลที่มีต่อไม้ WPC.....	47
4.4 การศึกษาผลของปริมาณ CaCO ₃ ต่อสมบัติของไม้ WPC.....	50
4.5 การทดสอบการใช้งานจริงของพาเลทไม้.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก	65
ภาคผนวก ข	67
ภาคผนวก ค	73
ภาคผนวก ง.....	76
ประวัติผู้เขียน	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมบัติบางประการของ rHDPE.....	26
3.2 สมบัติบางประการของผงไม้.....	27
3.3 สมบัติบางประการของ CaCO ₃	27
3.4 สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA และ LDPE-g-MA.....	27
3.5 สมบัติบางประการของ PE-Wax.....	28
3.6 สูตรการผลิตไม้ WPC : ศึกษาผลของอัตราส่วนของ ผงไม้:rHDPE:PCR ชนิด LLDPE.....	30
3.7 สูตรการผลิตไม้ WPC : ศึกษาผลของชนิดของ PCR ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน.....	30
3.8 สูตรการผลิตไม้ WPC : ศึกษาผลของปริมาณCaCO ₃	31
4.1 สมบัติบางประการของ PCR.....	36
4.2 ค่าความแข็งกดของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน.....	42
4.3 T _m , T _c และร้อยละความเป็นผลึกของ PE ในไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR แตกต่างกัน.....	47
4.4 ค่าความแข็งกดของไม้ WPC.....	50
4.5 T _m , T _c และร้อยละความเป็นผลึกของ PE ในไม้ WPC เมื่อปริมาณ CaCO ₃ แตกต่างกัน....	52
4.6 ค่าความแข็งกดของไม้ WPC เมื่อปริมาณ CaCO ₃ แตกต่างกัน.....	55
4.7 การเปรียบเทียบสมบัติการโค้งงอของไม้จริงและไม้ WPC.....	56
4.8 ผลการทดสอบการใช้งานจริงจากสูตร PAPEC10 และ PETPEC10.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม	1
1.2 วัฏจักรของเศรษฐกิจหมุนเวียน (ชาย) และวัฏจักรของเศรษฐกิจเส้นตรง (ขวา).....	2
1.3 พาเลทไม้ใช้ WPC ร่วมกับไม้จริง.....	4
2.1 แผนภูมิแสดงสัดส่วนการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ จากวัสดุพอลิเมอร์ในยุโรป ปี ค.ศ. 2015...7	7
2.2 จำนวนผู้แปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกและจำนวนแรงงานที่จำแนกตามประเภทของ อุตสาหกรรมการผลิตในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563.....	10
2.3 จำนวนผู้แปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจำแนกตามประเภทของอุตสาหกรรมการผลิตและพื้นที่ ที่ตั้งในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563.....	10
2.4 ตัวอย่าง Post Consumer Recycled Resin (PCR).....	12
2.5 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ	14
2.6 มุมสัมผัส และแรงดึงผิวของหยดของเหลวบนพื้นของแข็ง	16
2.7 ตัวอย่างลักษณะและการวางตัวของวัสดุเสริมแรง (ก) คอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงด้วยอนุภาค (ข) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นเรียงตัวทิศทางเดียว (ค) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย สั้นเรียงตัวแบบสุ่ม และ (ง) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวต่อเนื่อง	18
2.8 ผลิตภัณฑ์ไม้ WPC.....	21
3.1 การประกอบพาเลทไม้.....	34
3.2 ตำแหน่งแผ่นไม้จริงและแผ่นไม้ WPC ของพาเลทไม้.....	34
4.1 ลักษณะของ PCR ชนิด a) LLDPE, b) OPA/PE และ c) PET/PE	37
4.2 SEM micrograph ของผงไม้.....	37
4.3 SEM micrograph แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของผงไม้และเส้นใยไม้ในพอลิเมอร์ ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากสูตร HD35LLDPE10 ที่กำลัง ขยาย 1000 เท่า.....	38
4.4 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของผงไม้และเส้นใยไม้ในพอลิเมอร์ ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากสูตร (a) HD30LLDPE05 และ (b) HD40LLDPE05 ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	39
4.5 ความหนาแน่นของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน	40
4.6 ความแข็งแรงโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน	41
4.7 โมดูลัสโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน.....	41
4.8 ความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน	42
4.9 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากสูตร (a) HD35LLDPE10, (b) HD35PAPE10 และ (c) HD35PETPE10 ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 SEM micrographs ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากสูตร (a) HD35PAPE10 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า, (b-c) HD25PAPE20 ที่กำลังขยาย 1000 และ 150 เท่า ตามลำดับ และ (d-e) HD25PETPE20 ที่กำลังขยาย 1000 และ 150 เท่า ตามลำดับ.....	44
4.11 ชิ้นงานหลังการทดสอบความแข็งแรงกระแทก จากสูตร (a) HD30PAPE15 และ (b) HD30PETPE15.....	45
4.12 ความหนาแน่นของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน	46
4.13 ความแข็งแรงโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน	48
4.14 โมดูลัสโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน	49
4.15 ความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน	49
4.16 SEM micrographs ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานไม้ WPC สูตร (a-b) PETPEC0, (c-d) PETPEC10 และ (e-f) PETPEC15 ที่มีปริมาณ CaCO ₃ แตกต่างกัน.....	51
4.17 ความหนาแน่นของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/CaCO ₃ ต่างกัน	52
4.18 ความแข็งแรงโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/CaCO ₃ ต่างกัน	53
4.19 โมดูลัสโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/CaCO ₃ ต่างกัน.....	54
4.20 ความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/CaCO ₃ ต่างกัน	54
4.21 การทดสอบพาเลทไม้โดยวางซ้อนทับ (Stacking test)	55
ก.1 TGA เทอร์โมแกรมของ LLDPE	65
ก.2 TGA เทอร์โมแกรมของ OPA/PE.....	65
ก.3 TGA เทอร์โมแกรมของ PET/PE.....	66
ข.1 DSC เทอร์โมแกรมของ LLDPE	67
ข.2 DSC เทอร์โมแกรมของ OPA/PE.....	67
ข.3 DSC เทอร์โมแกรมของ PET/PE.....	68
ข.4 DSC เทอร์โมแกรมของ rHDPE.....	68
ข.5 DSC เทอร์โมแกรมของ HDPE-g-MA.....	68
ข.6 DSC เทอร์โมแกรมของ LDPE-g-MA	69
ข.7 DSC เทอร์โมแกรมของ PE-WAX	69
ข.8 DSC เทอร์โมแกรมของ HD45	69
ข.9 DSC เทอร์โมแกรมของ HD35LLDPE10	70
ข.10 DSC เทอร์โมแกรมของ HD25LLDPE20	70
ข.11 DSC เทอร์โมแกรมของ HD35PAPE10	70
ข.12 DSC เทอร์โมแกรมของ HD25PAPE20	71
ข.13 DSC เทอร์โมแกรมของ HD35PETPE10	71
ข.14 DSC เทอร์โมแกรมของ HD25PETPE20	71

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.15 DSC เทอร์โมแกรมของ PETPEC0.....	72
ข.16 DSC เทอร์โมแกรมของ PETPEC10.....	72
ข.17 DSC เทอร์โมแกรมของ PETPEC15.....	72
ง.1 กราฟ Stress (in MPa)/Deformation (in %) ของชิ้นงานทดสอบ	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ

Biaxially oriented polypropylene	BOPP
Biaxially oriented polyethylene terephthalate	BOPET
Ethylene vinyl alcohol	EVOH
High density polyethylene	HDPE
Linear low density polyethylene	LLDPE
Low density polyethylene	LDPE
Metalized polyethylene terephthalate	M-PET
Oriented polyamide	OPA
Polyamide	PA
Polyethylene terephthalate	PET
Polyolefin	PO
Polypropylene	PP
Polystyrene	PS
Polyvinyl chloride	PVC
Post consumer recycled resin	PCR
Recycled high density polyethylene	rHDPE
Wood plastic composite	WPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกมีหลายชนิด มีสมบัติที่หลากหลาย มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน อีกทั้งขึ้นรูปง่าย บางชนิดสามารถหลอมใช้ใหม่หรือรีไซเคิลได้ (Recycle) แต่ข้อเสียของพลาสติกคือ ส่วนใหญ่ย่อยสลายได้ยาก ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกตกค้างในสิ่งแวดล้อม [1] ก่อให้เกิดมลภาวะต่าง ๆ มากมาย

ปัจจุบันพลาสติกที่ใช้แล้วมักจะถูกทิ้งรวมกับขยะมูลฝอย ทำให้มีขยะปริมาณมากและมีสัดส่วนของขยะพลาสติกต่อขยะอื่นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากขยะพลาสติกส่วนใหญ่มาจากพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว (Single use plastics, SUP) ซึ่งจะถูกนำไปฝังกลบร่วมกับขยะมูลฝอยอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้วขยะพลาสติกมีความคงทนและสามารถทนต่อแรงอัดได้สูง จึงใช้พื้นที่ในการฝังกลบมากกว่าขยะประเภทอื่น อีกทั้งยังใช้เวลาในการย่อยสลายนับร้อยปี ทำให้ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณและพื้นที่ฝังกลบ นอกจากนี้การทิ้งขยะพลาสติกไม่ถูกทำให้เกิดการกระจายและสร้างปัญหา เช่น ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันตามท่อระบายน้ำในเมือง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมเมื่อฝนตกหนัก ปัญหาขยะลอยในแม่น้ำ บางส่วนลงสู่ท้องทะเล ก่อให้เกิดปัญหาเศษขยะพลาสติกและไมโครพลาสติก ซึ่งเป็นปัญหามลพิษทางทะเลที่พบการแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมทางทะเลทั่วโลก ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเล ห่วงโซ่อาหาร และการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศแสดงดังรูปที่ 1.1 อีกทั้งยังแพร่กระจายอยู่ในหลายส่วนของสิ่งแวดล้อม เช่น ชายหาด ตะกอนดินในปากแม่น้ำ ตลอดจนการเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารของมนุษย์



รูปที่ 1.1 ขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม [2]

โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาจากขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติก โลกผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกเฉลี่ย 141 ล้านตันต่อปี โดย 1 ใน 3 ของบรรจุภัณฑ์พลาสติกเกิดการรั่วไหลจากระบบการรวบรวมขยะของตลาดโลก ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งการผลิต การใช้ และการกำจัดพลาสติกก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) ประมาณ 1.8 พันล้านตันต่อปี [3] แต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรจุภัณฑ์พลาสติกกลับมาไปรีไซเคิลได้น้อย เนื่องจากการรีไซเคิลจำเป็นต้องแยกชนิดพลาสติกที่มีอยู่หลายชั้นออกจากกัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ยุ่งยาก ต้องใช้สารเคมีเพื่อแยกส่วนประกอบ ส่งผลให้สิ้นเปลืองวัสดุมาก [4] หากสามารถนำบรรจุภัณฑ์พลาสติกเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล โดยไม่แยกชนิดพลาสติกออกจากกัน จะสามารถลดปัญหาขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและสร้างมูลค่าให้กับพลาสติกเหล่านี้ได้ ปัจจุบันประเทศไทยมีการจัดการกับขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่เกิดขึ้นเฉลี่ยประมาณ 78 ล้านตันต่อปี ยังเป็นการจัดการแบบเส้นตรงคือ การผลิต ใช้ และทิ้ง ซึ่งมีเพียงแค่ 14% เท่านั้นที่ถูกรวบรวมแล้วนำไปรีไซเคิล อีก 14% ถูกนำไปเผาเพื่อการใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน ถัดมาคือวิธีการฝังกลบถึง 40% และอีก 32% ถูกทิ้งเป็นขยะมูลฝอยสู่สิ่งแวดล้อม [5]

จากปริมาณทรัพยากรธรรมชาติที่เหลือน้อยลง ปัญหามลภาวะ และปัญหาขยะพลาสติกที่มีปริมาณมากขึ้น จึงเริ่มมีการปรับแนวคิดโดยใช้หลักเศรษฐกิจหมุนเวียน ผลิต-ใช้-วนกลับ (Circular Economy) คือการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด เกิดของเสียน้อยที่สุดและเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการของเสียให้ถูกนำกลับไปเป็นทรัพยากรที่หมุนเวียนอยู่ในระบบด้วยกระบวนการที่เหมาะสม [6] นอกจากนี้ ยังมุ่งเน้นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสร้างความสมดุลในการดึงทรัพยากรธรรมชาติมาใช้งานใหม่ ควบคู่ไปกับการสร้างระบบและการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดผลกระทบต่อภายนอกเชิงลบ จึงมักเห็นเศรษฐกิจหมุนเวียนใช้พลังงานทดแทน หรือขจัดการใช้เคมีภัณฑ์ที่เป็นพิษ ซึ่งเป็นอุปสรรคของการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้อีกครั้ง รวมไปถึงการออกแบบวัสดุผลิตภัณฑ์ ระบบ และโมเดลทางธุรกิจในรูปแบบใหม่ที่ต้องแตกต่างไปจากเดิมเพื่อทำให้เกิดนวัตกรรม ในขณะที่เศรษฐกิจเส้นตรง (Linear Economy) จะมีการดึงทรัพยากรธรรมชาติออกมาใช้ในจำนวนมหาศาลก่อนจะนำทรัพยากรเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการผลิต ขายให้ลูกค้าได้นำไปใช้งาน ซึ่งเมื่อผลิตภัณฑ์หมดประโยชน์แล้วจะถูกทิ้งกลายเป็นขยะ แสดงดังรูปที่ 1.2 ดังนั้น ภาคเศรษฐกิจจึงต้องปฏิวัติโมเดลธุรกิจจากขับเคลื่อนเศรษฐกิจแบบเส้นตรงมาสู่รูปแบบเศรษฐกิจหมุนเวียนที่นำทรัพยากรใช้แล้วกลับมาผลิตใช้ใหม่ เพื่อแก้วิกฤตการณ์ขาดแคลนทรัพยากรที่กำลังเกิดขึ้นและรูปแบบเศรษฐกิจหมุนเวียนก่อให้เกิดการเติบโตอย่างยั่งยืน [7]



รูปที่ 1.2 วัฏจักรของเศรษฐกิจหมุนเวียน (ซ้าย) และวัฏจักรของเศรษฐกิจเส้นตรง (ขวา) [8]

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์พลาสติก (Plastic packaging) มีการใช้งานมากและมีการเติบโตมาก บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ในชีวิตประจำวันถูกแบ่งเป็น 7 ชนิดหลัก ได้แก่ Polyethylene terephthalate (PET), High density polyethylene (HDPE), Polyvinyl chloride (PVC), Low density polyethylene (LDPE), Polypropylene (PP), Polystyrene (PS) และพลาสติกชนิดอื่น ๆ โดยมีเลขกำกับ 1-7 ตามลำดับ เพื่อใช้ในการรีไซเคิล นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งพลาสติกตามลักษณะของบรรจุภัณฑ์ได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) พลาสติกเดี่ยว (Single-layered Plastic) เป็นผลิตภัณฑ์ 1 ชั้น เช่น ถุงพลาสติกมีหูหิ้ว หลอดพลาสติก และพลาสติกห่ออาหาร และ 2) พลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายชั้น (Multi-layered Plastic) เป็นพลาสติกตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป อาจผลิตจากกระบวนการลามิเนต หรือกระบวนการอัดรีดร่วม (Co-extrusion) โดยมีการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ความต้องการสมบัติการเก็บรักษากลิ่น การปกป้องรสชาติของอาหาร ป้องกันความชื้น ทนต่อแรงกระแทก ทนต่อการฉีกขาด ทนไขมัน ทนสารเคมี และทนต่อแสง ทำให้บรรจุสินค้าได้หลากหลาย เช่น อาหาร ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ นอกจากนี้งานพิมพ์ถุงลามิเนตมีความละเอียดมากกว่าถุงทั่วไป จึงเหมาะกับการพิมพ์โลโก้ รูปสินค้า หรือข้อมูลสินค้าต่าง ๆ เพื่อให้ดูน่าสนใจยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้พลาสติกลามิเนตจึงนิยมนำมาใช้งานในปริมาณมาก องค์ประกอบของพลาสติกลามิเนตที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่อาจประกอบด้วย PP หรือ PET ที่มีการจัดเรียงโมเลกุล 2 ทิศทาง (Biaxially oriented plastic, BOPP หรือ BOPET ตามลำดับ) ใช้ร่วมกับอลูมิเนียม (Aluminium) หรือพลาสติกอื่น ดังเช่น BOPET/Aluminum/LLDPE, BOPP/Aluminum/LLDPE, PA/LLDPE, PET/PE และ BOPP/Metalized PET (M-PET/ CPP) เป็นต้น [9] ซึ่งพลาสติกเหล่านี้เมื่อผ่านการใช้งานโดยผู้บริโภคแล้ว หากนำมาจัดการด้วยกระบวนการที่เหมาะสม สามารถนำกลับเข้าสู่ระบบไปสร้างมูลค่าให้ใช้งานได้หลายครั้ง เรียกพลาสติกเหล่านี้ว่า Post Consumer Recycled Resin (PCR) แต่ถ้าเศษพลาสติกที่เป็นของเสียระหว่างการขึ้นรูปในกระบวนการผลิตเรียกว่า Post Industrial Recycled (PIR)

ผงไม้หรือขี้เลื่อยเป็นเศษเหลือทิ้งจากการใช้ประโยชน์และการแปรรูปไม้ในอุตสาหกรรม เช่น งานเฟอร์นิเจอร์ ไม้ตกแต่งภายในและภายนอก งานประติมากรรมและไม้อัด เมื่อผงไม้ที่เหลือเหล่านี้เก็บไว้ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการควบคุมอาจเป็นแหล่งมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ [10] หนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดผงไม้ที่เหลือจากงานอุตสาหกรรมคือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล แต่กระบวนการนี้ถ้าไม่มีการจัดการที่ดีจะทำให้เกิดก๊าซมลภาวะทางอากาศ เช่น CO₂ และรวมทั้งเกิดเถ้าลอย (Fly ash) มากกว่า 80% ซึ่ง 40% ของเถ้าลอยมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 PM และ 20% สามารถสูดสูดพื้นดินได้และส่วนที่เหลือทั้งหมดจะถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเกิดเป็นปัญหาสุขภาพได้ [11] จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะลดปัญหาซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของไม้ ด้วยการนำผงไม้กลับมาหมุนเวียนใช้ในระบบ โดยการนำผงไม้ที่เหลือจากการแปรรูปไม้ในอุตสาหกรรมมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites, WPCs)

พาเลท (Pallet) คือแท่นรองสินค้า สำหรับวางสินค้าเพื่อขนย้ายหรือจัดส่งและวางสินค้าในสถานที่จัดเก็บสินค้า ลักษณะส่วนใหญ่ของพาเลทจะมีช่องไว้สำหรับให้แขนของรถยก (Fork lift) เสียบแท่นสินค้าขึ้นมา ช่วยให้สะดวกและรวดเร็วในการเคลื่อนย้าย ช่วยลดความเสียหายของสินค้าในระหว่างการขนส่งหรือระหว่างการเคลื่อนย้ายได้ดี ช่วยให้เกิดความสะดวกในการจัดเก็บและการตรวฉับสินค้าคงเหลือในคลังได้ง่ายขึ้น จึงช่วยประหยัดเวลา และยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง [12] พาเลทจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อภาคการผลิตอุตสาหกรรม โกดังสินค้า และธุรกิจนำเข้าและส่งออก นอกจากนี้ ในภาคอุตสาหกรรมพาเลทมีความสำคัญต่อการทำกำไร การสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจ และลดความเสี่ยงต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนย้ายในระบบ Supply chain ซึ่งระบบนี้มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทำงานร่วมกับพาเลทที่มีคุณภาพ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการแบบครบวงจรในการทำงานของพาเลทให้มีมาตรฐานและสามารถทำงานร่วมกับระบบ Supply chain ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันจะทำให้เกิดประโยชน์ทั้งผู้บริโภคและผู้ผลิต โดยพาเลทที่มีมาตรฐานสามารถลดความเสียหายของสินค้าได้ ดังนั้นธุรกิจภาคอุตสาหกรรมจึงตระหนักถึงและให้ความสำคัญกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตและการจัดการคุณภาพพาเลท โดยพาเลทควรได้รับการออกแบบและวิเคราะห์การใช้งานให้เหมาะสมกับทุกอุตสาหกรรม [13] พาเลทที่ทำจากไม้มีความแข็งแรงมาก แต่เนื่องจากผลผลิตมาจากวัสดุที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติ ทำให้เกิดการแพร่กระจายของแมลงและปลวกได้ง่าย ส่งผลให้ไม้ผุพังเร็ว จึงจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำให้ไม้ปราศจากปลวกและแมลง เช่น การปรับปรุงด้วยสารเคมี อีกทั้งไม้สามารถบวมน้ำได้ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของไม้และสามารถเกิดราได้ ถ้าสัมผัสกับความชื้น [14]

พาเลทไม้จากพลาสติกคอมโพสิต (WPC) ซึ่งเป็นวัสดุทดแทนไม้ ช่วยลดการใช้ไม้จริงจากธรรมชาติ และยังสามารถทำการตัด เลื่อย หรือเจาะสกรู เพื่อประกอบการใช้งานได้เหมือนไม้จริง สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ไม่มีปลวก มด และแมลงรบกวน ทนทานต่อความชื้นและไม้บวมน้ำ [15] ไม้คอมโพสิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการผสมพลาสติกกับเส้นใยหรือผงไม้ที่มาจากธรรมชาติ หากปรับปรุงสูตรไม้ WPC โดยการใช้ PCR ซึ่งเป็นขยะพลาสติกที่ยากต่อการย่อยสลาย มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพาเลทไม้โดยใช้ WPC ผสมกับผงไม้หรือขี้เลื่อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง สามารถตอบโจทย์ Circular Economy และ Upcycling ได้ จะเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่าที่สุด ตัวอย่างพาเลทไม้ใช้ WPC ร่วมกับไม้จริง แสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 พาเลทไม้ใช้ WPC ร่วมกับไม้จริง

ปัจจุบันจึงมีการศึกษาสมบัติของไม้ WPC เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายขึ้น ด้วยการใส่วัสดุรีไซเคิล ตัวอย่างเช่น การเตรียมไม้บอร์ด WPC จากพลาสติกพอลิโพรพิลีนเกรดรีไซเคิล (RPP) และผงไม้ โดยมีปัจจัยศึกษา 4 ประการ ได้แก่ (1) ขนาดอนุภาคผงไม้ (2) ปริมาณสารช่วยผสม (3) ปริมาณสารหล่อลื่น (Lubricant) และ (4) อัตราส่วนมวลของผงไม้ต่อ RPP ผลการวิจัยพบว่าการใช้ผงไม้ที่ละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 125 μm) สามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ของ WPC และลดการบวมตัว (Thickness swelling) เนื่องจากการดูดซับน้ำ (Water adsorption) ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของสารช่วยผสม (Maleic anhydride polypropylene, PP-g-MA) ใน WPC อยู่ที่ 3% ซึ่งเป็นปริมาณที่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้อย่างมีนัยสำคัญและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารหล่อลื่น (สังกะสีสเตียเรต) อยู่ที่ 3% โดยการใช้สารหล่อลื่นมากเกินไปจะเพิ่มการบวมตัวและลดสมบัติเชิงกลทั้งหมดของ WPC การใช้ปริมาณผงไม้ที่ 50% หรือน้อยกว่าทำให้ได้ WPC ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อศึกษาผลของไม้ WPC ที่ทำจากไม้รีไซเคิลและ rHDPE เปรียบเทียบกับ WPC ที่ทำจากพลาสติกและไม้ใหม่ พบว่าความหนาแน่นของ WPC มีค่าพอ ๆ กันทั้งในกรณีที่ใช้อนุภาคไม้ใหม่ (New wood particles) และเศษไม้ (Waste wood particles) เนื่องจากผนังเซลล์ไม้มีความหนาแน่นประมาณ 1.400 g/cm^3 ไม่พบความพุนอย่างมีนัยสำคัญในวัสดุ และค่าความหนาแน่นของ WPC ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคไม้ที่เลือกใช้ [17-18] ผลการวิจัยโดยรวมพบว่าอนุภาคไม้ทั้ง 2 ชนิด ทำให้ WPC มีสมบัติใกล้เคียงกันมาก เช่น การดูดซับน้ำและสมบัติเชิงกล WPC ที่ปริมาณไม้สูง (60%) สูตรที่ใช้วัสดุรีไซเคิลให้สมบัติที่ด้อยกว่าสูตรที่ใช้อนุภาคไม้ใหม่ อาจเป็นเพราะสิ่งเจือปนใน rHDPE และไม้รีไซเคิล อย่างไรก็ตาม สมบัติของ WPC เมื่อใช้อนุภาคไม้ต่ำกว่า 30% ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการใช้อนุภาคไม้ใหม่หรือการใช้เศษไม้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทดแทนการใช้อนุภาคไม้ใหม่ด้วยเศษไม้ [19]

นอกจากนี้มีการศึกษาผลการผลิตไม้บอร์ด WPC จากซีลี้อยชนิด *Cedrela odorata* และใช้ PCR ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นเม็ด PCR ผสม 3 ชนิด คือ PET, HDPE และ PP ผสมกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) พบว่าที่ปริมาณซีลี้อย 40-45% ต่อ PCR 50-55% และปริมาณ CaCO_3 ที่ 5% ให้สมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้ WPC ดีที่สุด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE) สูงที่สุด มีค่าความหนาแน่นสูงสุดระหว่าง $1.050\text{-}1.100 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งจัดอยู่ในประเภทไม้ WPC ความหนาแน่นสูง และการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นทำให้การดูดความชื้นของไม้ WPC ลดลง ผลของ PCR ทั้ง 3 ชนิด สามารถเพิ่มสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของไม้ WPC ได้ เมื่อการใช้ปริมาณ PCR ที่เพียงพอต่อการห่อหุ้มอนุภาคผงไม้ได้ [20]

ในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการใช้ PCR แต่เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีผู้ผลิต PCR เชิงพาณิชย์ที่สามารถควบคุมคุณภาพได้ (แหล่งที่มาของขยะพลาสติก ความสะอาด เกรด ฯลฯ) ในงานวิจัยนี้ใช้เศษพลาสติกที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตในโรงงาน (PIR) แทนการใช้ PCR เนื่องจาก PIR และ PCR ต่างก็เป็นของเสียขยะพลาสติกเหมือนกัน ต่างกันที่ความสะอาดและกลิ่น เพราะ PCR มีการใช้งานโดยผู้บริโภคแล้ว นำมาล้าง บด แล้วนำมาหลอมเป็นเม็ด PCR โดย PIR สามารถกำหนดแหล่งที่มาและควบคุมคุณภาพวัตถุดิบได้ดีกว่า เนื่องจากความสม่ำเสมอของคุณภาพมีความสำคัญอย่างมากในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงเปรียบเทียบ (Comparative study) จึงเสนอใช้ PIR เป็นตัวแทนของ PCR ในงานวิจัยนี้ พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด คือ LLDPE, OPA/PE และ PET/PE ซึ่ง PCR ทั้ง 3 ชนิด เป็นตัวอย่างพลาสติกที่มีการนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์เกี่ยวกับอาหาร เช่น ถุงข้าวสาร พลาสติกแรปอาหาร และถุงขนม เป็นพลาสติกกลุ่มที่มีการใช้ในปริมาณมาก ทำให้มีขยะพลาสติกจำพวกนี้อยู่มาก ซึ่งในอนาคตหวังจะนำพลาสติกเหล่านี้มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตทดแทนการใช้พลาสติกใหม่ทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกด้วยการนำกลับมาใช้ใหม่ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้อีกด้วย โดยนำมาผสมกับ rHDPE และผงไม้ที่มาจากซีลี้อย ทดแทนการใช้อนุภาคไม้ใหม่ เพื่อผลิตเป็นไม้ WPC ที่สามารถนำไปประกอบเป็นคานบนของพาเลท โดยตั้งเป้าหมายให้ได้สมบัติของไม้ WPC ที่ผลิตได้ผ่านเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด ซึ่งผ่านการวิจัยมาก่อนหน้า [Privacy and Confidentiality] ได้แก่ ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็งกด (Hardness, Shore D) และความหนาแน่น (Density) ไม่น้อยกว่า $46.9 \pm 3.2 \text{ MPa}$, $1814 \pm 160 \text{ MPa}$, $4.05 \pm 0.5 \text{ kJ/m}^2$, 68 ± 1 และ 1.200 g/cm^3 ตามลำดับ ทั้งนี้งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยร่วมกันระหว่างสถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กลุ่มบริษัทดาว ประเทศไทย และบริษัท เอ็ม บี เจ เอนเตอร์ไพรส์ จำกัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการใช้ PCR ชนิด LLDPE, OPA/PE และ PET/PE ผสมกับ rHDPE แทนการใช้พอลิเมอร์ใหม่ และการใช้ผงไม้ที่เหลือจากงานอุตสาหกรรมไม้ในการผลิตไม้คอมโพสิต (WPC) เพื่อประกอบเป็นคานบนของพาเลท ที่มีสมบัติผ่านเกณฑ์เป้าหมายที่โรงงานกำหนด โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติและการใช้งานไม้ WPC จาก PCR ได้แก่ ชนิดของ PCR อัตราส่วนของผงไม้/rHDPE/PCR และปริมาณ CaCO_3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาผลของอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR ชนิด LLDPE เท่ากับ 55/30/5, 55/35/5 และ 55/40/5
- 2) ศึกษาผลของชนิดของ PCR (LLDPE, OPA/PE และ PET/PE) ที่ อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/45/0, 55/40/5, 55/35/10, 55/30/15 และ 55/25/20
- 3) ศึกษาผลของการใช้ CaCO_3 ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR/ CaCO_3 เท่ากับ 55/35/10/0, 55/35/10/5, 55/35/10/10 และ 55/35/10/15
- 4) ทำการเตรียมสูตรผสมสำหรับผลิตไม้คอมโพสิตด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด
- 5) ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้คอมโพสิต ได้แก่ ความหนาแน่น (ASTM D792) สมบัติการโค้งงอ (ASTM D790) ความแข็งแรงกระแทก (ASTM D256) และความแข็งกด (Shore D) (ASTM D2240)
- 6) เลือกสูตร WPC มาทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนัก Static Load 3 ตัน เป็นเวลา 2 เดือน และ Dynamic Load 1.5 ตัน โดยไม่เกิดความเสียหายขณะเคลื่อนย้าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

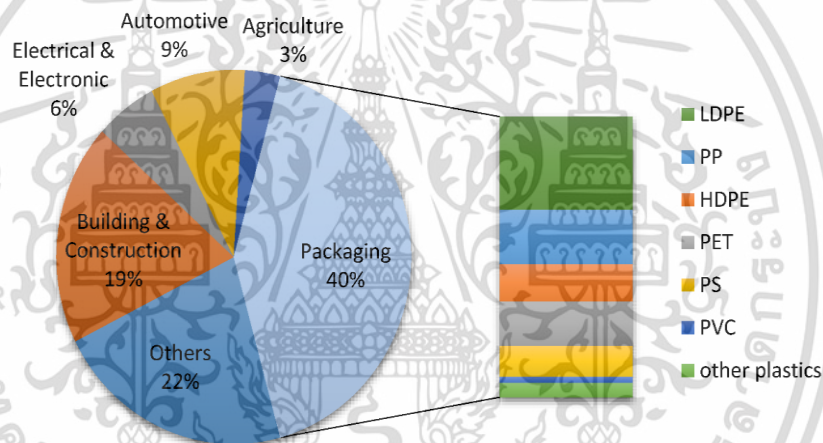
- 1) สามารถนำ PCR, rHDPE และผงไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากงานอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุได้ใช้งานได้อีกครั้ง และสามารถตอบโจทย์หลักเศรษฐกิจหมุนเวียนได้
- 2) ได้ไม้ WPC จาก PCR, rHDPE และผงไม้ ที่สามารถประกอบเป็นคานบนของพาเลทร่วมกับการใช้ไม้จริง และสามารถใช้งานได้ตามเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ (Packaging product) [6]

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้นทำให้มีขยะปริมาณมาก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 สหภาพยุโรปได้ผลักดันแนวคิดหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยเริ่มตั้งแต่การผลิต การบริโภค และการกำจัดของเสียหลังจากสินค้าหมดอายุการใช้งานอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากในยุโรปมีการใช้น้ำมันและก๊าซ 49 ล้านตันสำหรับการผลิตพลาสติกในปี ค.ศ. 2015 คิดเป็น 4 ถึง 6% ของจำนวนทั้งหมด ประมาณ 40% ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์ พอลิโอเลฟินส์ (PO) เป็นส่วนที่นำมาใช้ขนาดใหญ่ที่สุด ด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่นำมาผลิตมากที่สุด ตามด้วยพอลิพรอพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และส่วนน้อยมาจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอไมด์ (PA) และพลาสติกอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภูมิแสดงสัดส่วนการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ จากวัสดุพอลิเมอร์ในยุโรป ปี ค.ศ. 2015 [6]

ประเภทของพลาสติกที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ สามารถแบ่งเป็น 9 ประเภทหลัก ๆ ดังต่อไปนี้ [9]

1. พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)

PE เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดและราคาถูก เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงมีต้นทุนในการผลิตต่ำ พลาสติก PE แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- HDPE (High density polyethylene) : Density = 0.941 – 0.970 g/cm³ นิยมผลิตเป็นขวด ภาชนะ เครื่องใช้ในครัวเรือน เพราะเป็นพลาสติกที่มีความคงรูปได้ดี หรือใช้เคลือบกับวัสดุบรรจุภัณฑ์อื่น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและช่วยในการปิดผนึก และมีสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 2

- LDPE (Low density polyethylene) : Density = 0.917 – 0.940 g/cm³ มีความยืดตัวดี ทนต่อการที่มทะเลและการฉีกขาด สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดี ทนอุณหภูมิ -50 ถึง 80°C นิยมใช้ในการผลิตถุงเย็น ถุงน้ำแข็ง ฟิล์มหัด ฟิล์มยืด และถุงชั้นในของถุงกระดาษ และมีสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- LLDPE (Linear low density polyethylene) : Density = 0.915 – 0.950 g/cm³ มีความนิ่มและเหนียวกว่า LDPE และ HDPE ป้องกันความชื้นและใสมากกว่า LDPE และ HDPE สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดี นิยมใช้ประกบกับฟิล์มชนิดอื่นเพื่อเป็นชั้นปิดผนึก

2. พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)

PP เป็นพลาสติกที่มักนำมาใช้ในรูปของฟิล์ม เนื่องจากมีความใสและป้องกันความชื้นได้ดี และมีสมบัติใกล้เคียงกับ PE แต่มีความทนทานต่อความร้อนได้สูงถึง 120°C มีความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลาย PP ที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด CPP (Casted polypropylene) และ OPP (Oriented polypropylene) โดยพลาสติก PP ถูกนำมาใช้ในการผลิตถุงร้อนสำหรับบรรจุอาหารต่างๆ กล่องอาหาร ถาด ตะกร้า ถูกระสอบ และฟิล์มลามิเนต และมีสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 5

3. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET)

PET เป็นพลาสติกที่มีสมบัติเด่นในด้านความใส ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซและไขมันได้ดี และความเหนียวสูง คงรูป มีความทนทานต่อกรด และไม่ทนต่อด่าง นิยมใช้ในการผลิตขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำมันพืช ขวดน้ำอัดลม ถาด ฟิล์มลามิเนต และฉลากฟิล์มหัด มีสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 1

4. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly vinyl chloride, PVC)

PVC เป็นพลาสติกที่มีการใช้สารเติมแต่งชนิดพลาสติกไซเซออร์ เพื่อให้ปรับสมบัติได้ตามต้องการ มักใช้ในรูปของขวด ฟิล์ม PVC ทนทานต่อน้ำมันและกันกลิ่นได้ดี ใส แข็งแรงทนทานต่อการเสียดสี และต้านทานต่อความชื้นปานกลาง สัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 3

5. พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

PS เป็นพลาสติกที่มีสมบัติเด่นด้านความใส มันวาว มีความใส แข็งแรง มีความคงรูปดี แต่มีข้อเสียคือ มีความเปราะ จึงฉีกขาดง่าย ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและความชื้นได้ต่ำ นิยมใช้ในการผลิตถาด โฟม และแก้วน้ำ มีสัญลักษณ์รีไซเคิลหมายเลข 6

6. พอลิเอไมด์ (Polyamide, Nylon, PA)

Nylon (PA) มีหลายชนิด เช่น Nylon 6, Nylon 11 มีสมบัติที่แตกต่างกันไปในแต่ละชนิด มีความเหนียวสูง คงรูป ทนทานต่อการเสียดสีสูง นิยมใช้ Nylon 6 ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มลามิเนตและถุงประเภทต้ม (Boil in bag)

7. เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (Ethylene vinyl alcohol, EVOH)

EVOH เป็นพลาสติกที่มีสมบัติเด่นด้านการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและน้ำมันได้ดี ทนทานต่อสารเคมี กรดและตัวทำละลายได้ดี สามารถเก็บรักษากลิ่นและรสชาติได้ดี มีความเหนียวสูง คงรูป ทนทานต่อรังสี พิมพ์ได้ นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มลามิเนต ขวดและถาดหลายชั้น และถังน้ำมันพลาสติก

8. อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil)

อลูมิเนียมฟอยล์ ทำจากโลหะอลูมิเนียมซึ่งถูกนำมาหลอมและรีดให้เป็นแผ่นบาง โดยทั่วไปมีความหนาอยู่ระหว่าง 10-200 ไมครอน ตามประเภทการใช้งานที่ต่างกัน มีสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านความชื้น และออกซิเจนได้ดี ป้องกันรังสียูวีได้ดี มีความเงามัน นิยมใช้ร่วมกับฟิล์มพลาสติกในการผลิตฟิล์มลามิเนตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์และรักษาความสดของอาหาร จึงใช้บรรจุอาหาร ยา และเครื่องสำอางได้ดี

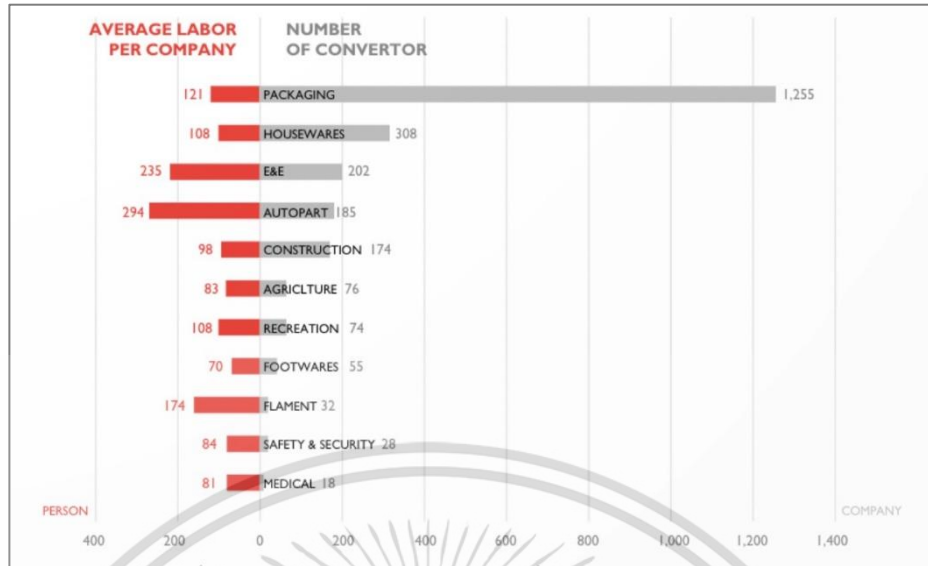
9. फिल्मเคลือบชั้นโลหะ (Metalized film)

ฟิล์มเคลือบชั้นโลหะ คือฟิล์มพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยชั้นบาง ๆ ของโลหะ โดยทั่วไปมักใช้เป็นโลหะอลูมิเนียม ฟิล์มที่นิยมนำมาเป็นชั้นหลัก (Substrate) คือ PET, OPP, CPP, Nylon และ PE โดยผิวหน้าฟิล์มมีความเงาใกล้เคียงกับ Aluminium foil มีสมบัติในการป้องกันดีกว่าฟิล์มที่ไม่มีโลหะเคลือบ น้ำหนักเบา แต่ไม่เหมาะสำหรับงานที่ต้องการป้องกันการซึมผ่านสูง ๆ สมบัติอาจจะไม่เทียบเท่ากับอลูมิเนียม นิยมใช้ในงานผลิตฟิล์มลามิเนต บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ซองขนมขบ ซองลูกอม ซองกาแฟ และบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการป้องกันที่ไม่มากนัก

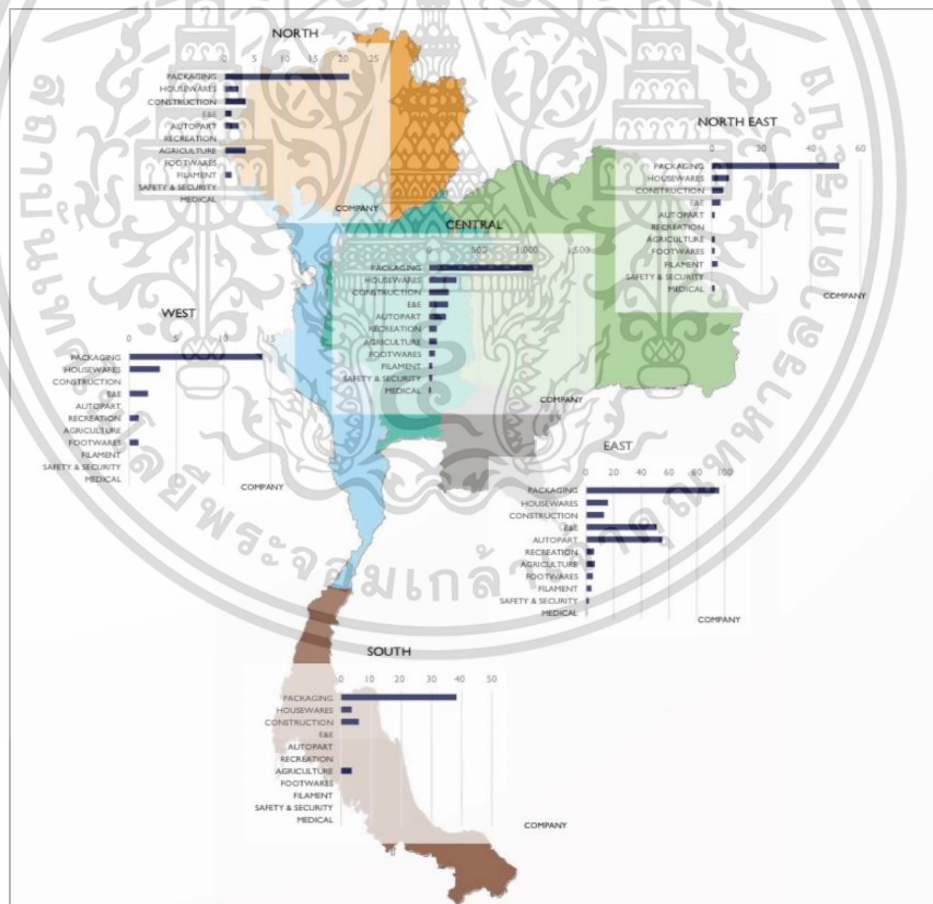
จากการประมวลผลข้อมูลในกลุ่มการแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกที่จำแนกตามประเภทอุตสาหกรรมการผลิต ผู้ประกอบการสมัครใจให้ข้อมูลจำนวน 2,399 บริษัท [21] พบว่า อุตสาหกรรมพลาสติกไทยมีผู้ประกอบการแปรรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกสูงที่สุดถึง 1,255 บริษัท แสดงดังรูปที่ 2.2-2.3 คิดเป็นสัดส่วน 52.3% รองลงมาคือผู้ประกอบการแปรรูปเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน จำนวน 308 บริษัท คิดเป็นสัดส่วน 12.8% ถัดมาคือผู้ประกอบการแปรรูปชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า 202 บริษัท คิดเป็นสัดส่วน 8.4% ผู้ประกอบการแปรรูปชิ้นส่วนยานยนต์ 185 บริษัท คิดเป็นสัดส่วน 7.7% ผู้ประกอบการแปรรูปวัสดุก่อสร้างที่ทำจากพลาสติกจำนวน 174 บริษัท คิดเป็นสัดส่วน 7.2% ถือได้ว่าทั้ง 5 กลุ่มเป็นกิจการการแปรรูปบรรจุภัณฑ์หลักของประเทศไทยที่มีสัดส่วนสูงสุด 88.5% ของจำนวนผู้ประกอบการแปรรูปทั้งหมด

ทางด้านการสำรวจข้อมูลจำนวนการจ้างงาน พบว่าอุตสาหกรรมพลาสติกไทยมีจำนวนแรงงาน 330,220 คน โดยกิจการการแปรรูปที่มีจำนวนแรงงานสูงที่สุด คือ การแปรรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีจำนวนแรงงานรวมสูงถึง 151,455 คน คิดเป็นสัดส่วนถึง 45.9% ของแรงงานรวมในกิจการแปรรูปผลิตภัณฑ์ รองลงมาคือ การแปรรูปชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีจำนวนแรงงานเท่ากับ 54,366 คน คิดเป็นสัดส่วน 16.5% ถัดมาคือการแปรรูปเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีจำนวนแรงงานเท่ากับ 48,968 คน คิดเป็นสัดส่วน 15.1%

จากที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการแปรรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมพลาสติกและการบริโภคในประเทศไทย และบรรจุภัณฑ์หลายชั้นมีความนิยมมากขึ้นโดยส่วนมากใช้พอลิเมอร์ทั่วไปที่ระบุไว้ใน รูปที่ 2.1 ตลอดจนพอลิเมอร์พิเศษอื่น ๆ ที่มีสมบัติตามต้องการ ซึ่งจำนวนชั้นของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบเพื่อการใช้งาน การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์หลายชั้นสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ โดยการเพิ่มจำนวนชั้นของพลาสติกและทำให้ปริมาณวัสดุลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุที่จำเป็นในการทำพลาสติกชั้นเดียวที่ทำหน้าที่เหมือนกัน



รูปที่ 2.2 จำนวนผู้แปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกและจำนวนแรงงานที่จำแนกตามประเภทของอุตสาหกรรมการผลิตในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563 [21]



รูปที่ 2.3 จำนวนผู้แปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจำแนกตามประเภทของอุตสาหกรรมการผลิตและพื้นที่ตั้งในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563 [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การจัดการขยะพลาสติกในประเทศไทย [22]

ประเทศไทยและกลุ่มประเทศอาเซียนได้ถูกจัดว่าเป็นประเทศลำดับต้น ๆ ของโลกที่เป็นแหล่งสำคัญของขยะพลาสติกในทะเล และหลายประเทศทั่วโลกกำลังประสบกับวิกฤตขยะพลาสติกที่มีจำนวนมหาศาล สืบเนื่องจากการนำพลาสติกมาใช้แทนแทนผลิตภัณฑ์อื่นมากขึ้น จากความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายรูปแบบ

การจัดการขยะพลาสติกในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยมีการจัดการขยะพลาสติกดังนี้

1) การฝังกลบ (Land fill) ส่วนใหญ่เป็นเศษขยะถุงพลาสติกที่ปนเปื้อน ไม่คุ้มกับต้นทุนในการจัดเก็บและการล้างทำความสะอาดของผู้เก็บของใช้แล้วมาขายเป็นอาชีพ ได้แก่ ถุงพลาสติกที่ทำจากพลาสติกประเภท PP, HDPE และ LDPE ตัวอย่างเช่น ถุงร้อน ถุงเย็นที่ใช้บรรจุอาหาร ถุงหูหิ้ว ขยะเหล่านี้ถูกนำไปทิ้งในสถานที่ฝังกลบ หรือเทกองกลางแจ้ง ตามสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยขององค์กรปกครองท้องถิ่น ซึ่งเป็นปัญหาต่อระบบการจัดการขยะมูลฝอยเนื่องจากขยะดังกล่าวมีความคงทนย่อยสลายตามธรรมชาติน้อย ทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่ฝังกลบและงบประมาณในการจัดการขยะมูลฝอย

2) การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิลและการใช้ซ้ำ (Reuse) เป็นทางเลือกที่ให้ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดทางหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะพลาสติก แต่การรีไซเคิลผลิตภัณฑ์พลาสติกมีขั้นตอนที่ยุ้งยากและต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง เนื่องด้วยส่วนใหญ่มีการปนเปื้อน ทั้งนี้พลาสติกมีหลากหลายชนิด การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่จะต้องแยกพลาสติกแต่ละชนิดออกจากกันก่อน สำหรับขยะพลาสติกในปัจจุบันมีการนำกลับเข้าสู่โรงงานเพื่อรีไซเคิลเพียงบางส่วนเท่านั้น ส่งผลให้มีถุงพลาสติกที่ถูกทิ้งเป็นขยะมูลฝอยในรูปแบบต่าง ๆ คงอยู่ในสภาพแวดล้อมเป็นจำนวนมาก

3) การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF) การนำขยะพลาสติกมาผลิตเป็น RDF ซึ่งเป็นการจัดการที่ดีวิธีหนึ่ง เนื่องจากขยะพลาสติกเป็นขยะที่ให้ค่าความร้อนสูง (Heating value) เหมาะในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง RDF โดยการปรับปรุงและแปลงสภาพขยะพลาสติกให้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ ในประเทศไทยมีการนำ RDF มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์รายใหญ่ อาทิ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง และบริษัทปูนซีเมนต์ที่พีไอ

4) การเผา โดยปกติขยะพลาสติกที่ไม่ได้รับการคัดแยกจะถูกนำไปกำจัดรวมกับขยะมูลฝอยทั่วไป ประเทศไทยมีระบบเตาเผา 2 รูปแบบ คือ เตาเผาผลิตพลังงาน (Waste to Energy, WTE) และเตาเผาทิ้ง โดยเตาเผาผลิตพลังงาน มีเพียง 6 แห่ง เตาเผาทิ้งแบบถูกต้อง จำนวน 77 แห่ง และเตาเผาทิ้งแบบไม่ถูกต้องจำนวน 57 แห่ง รวมทั้งมีการเผากลางแจ้ง 93 แห่ง (ข้อมูลปี 2560 กรมควบคุมมลพิษ) [10] การเผาแบบไม่ถูกต้องจะส่งผลให้เกิดสารพิษในชั้นบรรยากาศจากส่วนประกอบของพลาสติก อาจนำไปสู่การปนเปื้อนของแหล่งน้ำ แหล่งดิน รวมไปถึงระบบห่วงโซ่อาหาร เช่น การเผาพลาสติก PVC จะส่งผลให้เกิดสาร Dioxin ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

5) การแปรรูปเป็นน้ำมัน ขยะพลาสติกสามารถนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis) ได้ เนื่องจากพลาสติกมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ปัจจุบันประเทศไทยมีการศึกษาทดลองแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันไพโรไลซิสในหลายพื้นที่ แต่ยังไม่เกิดเป็นรูปธรรมที่ชัดเจน หากมีการนำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นน้ำมันไพโรไลซิสได้ จะช่วยแก้ปัญหาขยะพลาสติกได้ดี

2.3 นวัตกรรมพลาสติกรีไซเคิล

การปรับแนวคิดโดยใช้หลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ผลิต-ใช้-วนกลับ (Make-Use-Return) คือ การใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด เกิดของเสียน้อยที่สุดและเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการของเสียให้ถูกนำกลับไปเป็นทรัพยากรที่หมุนเวียนอยู่ในระบบด้วยกระบวนการที่เหมาะสม โดยผลิตภัณฑ์พลาสติกเมื่อผ่านการใช้งานแล้วหากนำมาผ่านการจัดการที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำกลับเข้าสู่ระบบไปสร้างมูลค่าให้ใช้งานได้อีกครั้ง

Post Consumer Recycled Resin (PCR) คือ วัสดุพลาสติกที่ผ่านการใช้งานจากผู้บริโภคมาแล้ว ถูกจัดเก็บ รวบรวมนำมาผ่านกระบวนการคัดแยก บด ล้าง แสดงลักษณะดังรูปที่ 2.4 และนำ PCR ไปขึ้นรูปเป็นสินค้าใหม่อีกครั้ง ปัจจุบันการใช้พลาสติก PCR เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความนิยมในกลุ่มผู้ใช้งานบรรจุภัณฑ์พลาสติก ซึ่ง PCR เป็นเทรนด์โลก (Global trend) ที่เจ้าของแบรนด์ (Brand owners) ระดับโลกมีนโยบายใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีส่วนผสมพลาสติก PCR ในสัดส่วนเพิ่มขึ้นทุกปี [23] เพื่อส่งเสริมผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากวัสดุรีไซเคิลได้ประโยชน์ในด้านการลด Carbon Footprint หรือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ ที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกใหม่ (Virgin plastics) รวมทั้งกิจกรรมทั้งหมดของกระบวนการผลิตสินค้าและกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต อีกทั้งลดปริมาณขยะพลาสติกในบ่อขยะ ทำให้เกิดเศรษฐกิจหมุนเวียนอย่างยั่งยืน



รูปที่ 2.4 ตัวอย่าง Post Consumer Recycled resin (PCR) [24]

ปัจจุบันจะเห็นได้ว่าบรรดาเจ้าของแบรนด์สินค้ายักษ์ใหญ่เกือบทุกรายต่างออกนโยบาย และประกาศเป้าหมายการปรับเปลี่ยนบรรจุภัณฑ์ของตนเองให้ผลิตจาก PCR มากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคทั่วโลกที่ให้ความสำคัญปัญหาสิ่งแวดล้อม และมองหาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น อาทิเช่น [24]

- บริษัท เนสท์เล่ (ไทย) จำกัด ตั้งเป้าหมายเพิ่มปริมาณพลาสติก PCR ที่ใช้ผลิตขวดน้ำดื่มที่ขายทั่วโลกเป็น 35% (และ 50% ในบางประเทศ) ภายในปี ค.ศ. 2025
- บริษัท เอส ซี ยอห์นสัน จำกัด วางแผนเพิ่มพลาสติก PCR ที่ใช้ในขวดที่ผลิตในอเมริกาเหนือและยุโรปจาก 20% เป็น 40% ภายในปี ค.ศ. 2025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย เทคดิง จำกัด ตั้งเป้าหมายใช้ PCR อย่างน้อย 25% สำหรับบรรจุภัณฑ์พลาสติก ภายในปี ค.ศ. 2025 ทางบริษัทจะลดการใช้พลาสติกชนิดบริสุทธิ์ลงครึ่งหนึ่งหรือกว่า 100,000 ตัน และจะเพิ่มการใช้เม็ดพลาสติกใหม่ซึ่งโดยรวมแล้วจะทำให้ใช้พลาสติกใหม่ไม่เกิน 350,000 ตันต่อปี นอกจากนี้ทางบริษัทจะยังช่วยเก็บรวบรวมและแปรรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกกลับคืนมาให้ได้มากกว่าที่จำหน่ายออกไป รวมทั้งในปัจจุบันมีบางสินค้าที่ใช้ PCR 100% แล้ว

- บริษัท โคลา-โคลา (ประเทศไทย) จำกัด ได้มีการเปิดตัวขวดตัวอย่างที่ผลิตจากพลาสติกที่ได้จากการรีไซเคิลขยะพลาสติกในทะเล และประกาศใช้บรรจุภัณฑ์ซึ่งผลิตจากวัสดุรีไซเคิลในสัดส่วนไม่น้อยกว่า 50% ของบรรจุภัณฑ์ทั้งหมดภายในปี ค.ศ. 2033

พลาสติก PCR นับเป็นส่วนหนึ่งของแนวคิดการนำเศรษฐกิจหมุนเวียนมาปรับใช้ในธุรกิจ เป็นการลดการใช้ทรัพยากรใหม่ โดยการหมุนเวียนให้วัสดุพลาสติกสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อย่างคุ้มค่าที่สุด ขณะที่ผู้ผลิตไทยในปัจจุบันเริ่มต้นตัวกับกระแสนำพลาสติก PCR มาใช้ในภาคการผลิตมากขึ้นเช่นกัน

2.4 เส้นใยธรรมชาติ [25-26]

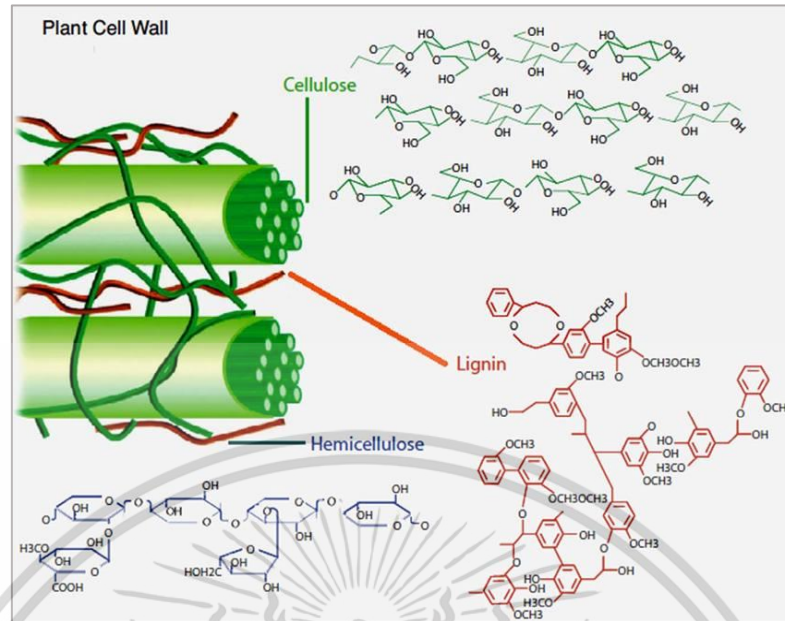
เส้นใยธรรมชาติ เป็นเส้นใยที่ได้จากพืชและสัตว์ จากรายงานวิจัย พบว่ามีการนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้เสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก เช่น เส้นใยมะพร้าว เส้นใยกล้วย เส้นใยสับปะรด เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 50-55% เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ประมาณ 15-25% และลิกนิน (Lignin) ประมาณ 20-30% และที่เหลือเป็น เพคติน (Pectin) ไขมัน (Wax) และน้ำ

ขี้เลื่อยไม้ (Wood sawdust) เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากการแปรรูปไม้ โดยทั่วไปจะได้ผงขี้เลื่อยไม้ 10-16% ของเนื้อไม้ก่อนที่แปรรูป ขี้เลื่อยไม้มีองค์ประกอบเหมือนกับเส้นใยธรรมชาติแต่มีขนาดเล็กกว่า โดยมีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 40-80 เมช (Mesh) ขี้เลื่อยไม้สามารถนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ (Extender) หรือสารเสริมแรง (Reinforcement) ในพลาสติกได้ โดยมีข้อดีคือ ช่วยลดการหดตัว (Shrinkage) ของพอลิเมอร์ เพิ่มค่ามอดุลัส (Modulus) เพิ่มความแข็งแรง (Strength) และช่วยลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้กระบวนการผลิตขึ้นรูปได้ยากขึ้น ลดเสถียรภาพทางความร้อน ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมไม่ดี ลดความสามารถในการรับแรงกระแทก และไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ เนื่องจากขี้เลื่อยไม้มีอุณหภูมิเริ่มเสถียรภาพ (Degradation temperature) ประมาณ 200-300°C

2.4.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ [27]

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ มีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ชนิดหลัก คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สูตรโครงสร้างทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.5

1. เซลลูโลส เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ที่โครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงยาว มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ $(C_2H_{12}O_5)_n$



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ [28]

ในแต่ละหน่วยซ้ำ (Repeating unit) ของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล ถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ได้ ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงมีความเป็นผลึกสูง อุณหภูมิหลอมสูง ทำให้เกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด การจัดเรียงตัวของผลึกและออสซิลฐานในโครงสร้างของเซลลูโลส

เซลลูโลสมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 g/cm^3 ความหนาแน่นของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งจะแปรไปตามแหล่งที่มาและการปรับปรุงทางเคมี เซลลูโลสเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีการดูดและคายไอน้ำและของเหลวอื่น ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบ ๆ จนกระทั่งถึงสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น ความแข็งแรงดึง เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 40% และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 78% เซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำ ๆ สารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์เข้มข้น 72% จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ ละลายได้

2. เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส อย่างไรก็ตามเฮมิเซลลูโลสมีข้อแตกต่างจากเซลลูโลส 3 ประการด้วยกัน คือ 1) เฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) แมนโนส (Mannose) ไซโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) และกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสชนิดเดียวเป็นส่วนใหญ่ 2) สายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสายโซ่กิ่ง (Branch chain) ในขณะที่สายโซ่พอลิเมอร์ของเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง (Linear chain) 3) องค์ประกอบสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ของเซลลูโลสจะมีค่าสูงกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10-100 เท่า เฮมิเซลลูโลสมีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ โดย n คือ จำนวนหน่วยซ้ำของเฮมิเซลลูโลส

3. ลิกนิน เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารอะลิฟาติก (Aliphatic) และอะโรมาติก (Aromatic) อยู่ร่วมกัน สารอะโรมาติกในโครงสร้างของลิกนินจะทำให้ลิกนินมีเสถียรภาพสูง ไม่ละลายน้ำ ลิกนินเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ยึดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้พืชที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากมีความแข็งแรง ทนทานต่อดินฟ้าอากาศสูง เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างหน่วยซ้ำกันในโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.5

2.4.2 การยึดติดระหว่างผิวเส้นใยและเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต [29]

การยึดติดระหว่างผิวของเส้นใยกับเมทริกซ์จัดได้ว่าเป็นปัจจัยที่มีบทบาทอย่างมากต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกเหนือจากการเลือกใช้เส้นใยและพอลิเมอร์ที่เหมาะสมร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ การยึดติดระหว่างผิวของเส้นใยกับพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่ใช้ควบคุมความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตในวัสดุคอมโพสิต อินเทอร์เฟซ (Interphases) คือเส้นรอยต่อ (Boundary) ที่แยกเห็นเด่นชัดระหว่างวัฏภาค (Phase) ที่แตกต่างกัน เช่น เส้นใยกับเมทริกซ์ ลักษณะและสมบัติของอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์มีความสำคัญต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เนื่องจากในการใช้งานเมื่อวัสดุคอมโพสิตได้รับแรง เมทริกซ์ทำหน้าที่ส่งผ่านแรง (Stress transfer) ที่ได้รับไปยังเส้นใยที่ทำหน้าที่รับแรง (Loading bearing) ข้ามผ่านอินเทอร์เฟซ เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยในบริเวณระหว่างเฟส (Interphases) ได้หลายวิธีด้วยกัน โดยมีกลไกการยึดเกาะหลัก ๆ 5 กลไกด้วยกัน ซึ่งอาจเกิดแบบใดแบบหนึ่งหรือเกิดร่วมกันดังต่อไปนี้

2.4.2.1 การดูดซับและการเปียกผิว

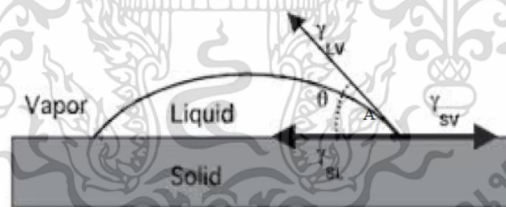
การดูดซับและการเปียกผิว (Absorption and wetting) เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิว 2 ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเข้าใกล้กันมากพอจนสามารถเกิดแรงดึงดูดทางกลได้ (Physical attraction) การเปียกผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการยึดเกาะของเส้นใยที่เกิดขึ้นกับเมทริกซ์ โดยถ้าระดับการเปียกผิวสูงจะแสดงว่ามีการยึดติดสูงระหว่างผิวทั้งสองวัฏภาค ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดที่อยู่ใกล้กันมากพอในระดับจุลภาค หรือระดับอะตอม ความขรุขระของพื้นผิวจะขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะกันได้ ในกรณีนี้จึงเกิดการยึดเกาะแบบดูดซับและการเปียกผิวได้ยาก ซึ่งการยึดเกาะแบบดูดซับและการเปียกผิวนี้อาจเกิดการกระจายตัวของแรงระหว่างโมเลกุลที่สัมผัสกัน ในกรณีของเหลวบนพื้นผิวของแข็งสามารถเกิดการเปียกได้ง่าย การเปียกจะเกิดได้มากหรือน้อยแสดงได้โดยใช้ “มุมสัมผัส” (Contact angle, θ) ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียกบนพื้นผิวของแข็งดีของเหลวชอบที่สัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีมุมสัมผัสน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกต่ำ ของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับของแข็งเป็นผลให้มีมุมสัมผัสมาก สมบัติการเปียกของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สามารถแสดงได้ในรูปสมการง่าย ๆ ของดูปรี (Dupre equation) แสดงการยึดเกาะ (Work of adhesive, W_a) ของเหลวบนผิวของแข็งดังนี้

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_{12} \quad (2.1)$$

เมื่อ γ_1 และ γ_2 คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) ของของเหลวและของแข็ง ตามลำดับ γ_{12} คือ พลังงานพื้นผิวอิสระของอินเทอร์เฟซระหว่างของเหลวและของแข็ง สมการนี้สามารถโยนให้สัมพันธ์กับกรณีของหยดของเหลวบนผิวของแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยใช้สมการของยัง (Young equation) ทำสมดุลกระทำที่จุด “A” ตามแนวระนาบ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2.2)$$

เมื่อ γ_{sv} , γ_{sl} และ γ_{lv} คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ หรือแรงตึงผิว (Surface tension) ของอินเทอร์เฟซระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ตามลำดับ และ θ คือ มุมสัมผัส พื้นผิวของแข็งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวได้ยาก ในขณะที่สามารถทำการทดลองวัดค่าแรงตึงผิวของเหลวง่าย การหาค่าแรงตึงพื้นผิวของของแข็งสามารถทำได้โดยใช้ของเหลวที่ทราบค่าแรงตึงผิวเทียบกับผิวของแข็ง โดยมีนิยามค่า “แรงตึงผิววิกฤต” (Critical surface tension, γ_c) กล่าวคือ ของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิววิกฤตของของแข็ง ($\gamma_{lv} < \gamma_c$) เท่านั้นที่สามารถเกิดการเปียกทันทีทันใด (Spontaneous wetting) ทำให้ค่า $\theta = 0$ ค่าแรงตึงผิววิกฤตนี้จึงเป็นค่าที่สำคัญที่สามารถใช้ในการพิจารณาการเปียกของเรซินบนเส้นใยเสริมแรง



รูปที่ 2.6 มุมสัมผัส และแรงตึงผิวของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง [29]

ค่าการยึดเกาะ (W_a) บ่งบอกถึงพันธะทางกายภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระจายตัวระหว่างโมเลกุล (Intermolecular dispersion forces) ที่สัมพันธ์และเกิดการเปียกหรือยึดเกาะกันตามทฤษฎีแรงยึดเกาะนี้มีความแข็งแรงสูงแต่ในทางปฏิบัติจะมีแรงเชิงกลนี้ต่ำเนื่องจาก

- พื้นผิวเส้นใยมีความสกปรก เกิดเป็นชั้นของสิ่งสกปรกที่มีค่าพลังงานพื้นผิวอิสระหรือแรงตึงผิวดำ
- ในขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตเกิดฟองอากาศของฟองก๊าซถูกขังอยู่บนพื้นผิวเส้นใยทำให้พื้นผิวสัมผัสลดลง

- เกิดการหดตัวของเรซินเมทริกซ์หลังการเชื่อมโยง ทำให้เกิดแรงเค้น (Stresses) และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 การแพร่เข้าหากัน

การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุล พอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion) ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับชนิดและปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นการยึดเกาะกันแบบ Interdiffusion สามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำละลาย (Solvent) ทาที่พื้นผิวหรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดขึ้นกับเส้นใยที่มีการเคลือบ พอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมทริกซ์ แต่ไม่เกิดกับคอมโพสิตที่มีพื้นผิวเส้นใยแข็ง ไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว ฯลฯ

2.4.2.3 แรงประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์

แรงประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) จะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้ามีพื้นผิวหนึ่งมีประจุบวก (Net positive charge) และอีกพื้นผิวเป็นประจุลบ (Net negative charge) ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยากรด-เบส และพันธะไอออนิก ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ (Charge density) แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์จะไม่ใช้แรงยึดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิต แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น เช่น การยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent) ที่มีหมู่ฟังก์ชันประจุบวก (Cationic function groups) มีการยึดติดที่ดีกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) บนพื้นผิว เป็นต้น

2.4.2.4 พันธะเคมี

พันธะเคมี (Chemical bonding) เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญชนิดหนึ่งเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิว และเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นพันธะเคมี ได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไก การยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสียสภาพของคอมโพสิตที่อินเทอร์เฟสจะเกี่ยวข้องกับการแตกหักของพันธะเคมีนี้ ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะเคมี ได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใยและเมทริกซ์ เป็นต้น

2.4.2.5 การยึดเกาะเชิงกล

การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking) เกิดเมื่อในกระบวนการผลิตขึ้นรูปคอมโพสิต เรซินเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวเส้นใยในขณะที่เป็นของไหลสามารถที่จะแทรกตัวไปตามพื้นผิวขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอก ร่อง รู และช่องว่างอื่น ๆ บนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงหรือเกิดการเย็นตัวทำให้เกิดการแข็งตัวของเมทริกซ์ เป็นเหตุให้เมทริกซ์ถูกล็อกแข็งติดอยู่กับพื้นผิวเส้นใย ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เกิดการแทรกตัวของเรซินรวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสามารถของเรซินในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวเส้นใย เช่น ความหนืดเรซิน พื้นผิวเส้นใยที่เรียบจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือไม่เกิดเลย

2.5 วัสดุคอมโพสิต [30]

วัสดุคอมโพสิต (Composites) หรือที่เรียกว่าวัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ

2.5.1 องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตประกอบไปด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

เมทริกซ์ (Matrix) คือองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงกระทำภายนอก (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงและทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น

ส่วนเสริมแรง (Reinforcements) คือองค์ประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต ซึ่งเป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูงกว่าเมทริกซ์ ตัวอย่างของส่วนเสริมแรง ได้แก่ เส้นใย (Fibers) เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคพลาร์ (Kevlar fiber) อาจเป็นเส้นใยาว หรือเส้นใยสั้น นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ

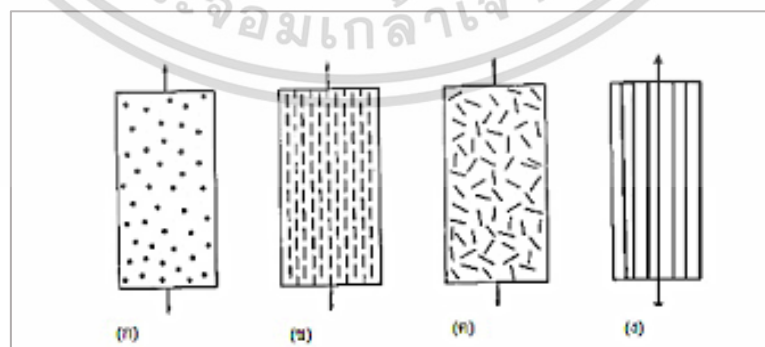
2.5.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตสามารถจำแนกได้หลายประเภท ดังนี้

2.5.2.1 จำแนกตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง

1. วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คือ ส่วนเสริมแรงเป็นวัตถุที่ส่วนมากมีขนาดเล็ก มีรูปร่างได้หลากหลาย อาทิเช่น เม็ด (Beads), ผง (Powder) หรือรูปทรงที่เป็นระเบียบหรือไม่เป็นระเบียบ (รูปที่ 2.7 ก) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการเรียงตัวของอนุภาคมักเป็นแบบสุ่ม (Random orientation) คือไม่มีการจัดเรียงตัวเฉพาะทิศทาง

2. วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย ซึ่งอาจเป็นเส้นใยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) การวางตัวของเส้นใยนี้อาจเป็นแบบสุ่มหรือแบบมีทิศทาง (Preferred orientation) (รูปที่ 2.7 ข-ง) เส้นใยที่ใช้มีความแข็งแรงและ มอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างลักษณะและการวางตัวของวัสดุเสริมแรง (ก) คอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงด้วยอนุภาค (ข) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นเรียงตัวทิศทางเดียว (ค) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นเรียงตัวแบบสุ่ม และ (ง) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยาวต่อเนื่อง [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 จำแนกตามลักษณะการเกิดคอมโพสิต

1. คอมโพสิตธรรมชาติ (Natural composites) คือคอมโพสิตที่สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตที่มีเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรงและมีพวกลิกนิน (Lignin) ทำหน้าที่ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน เป็นต้น

2. คอมโพสิตสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือคอมโพสิตที่ได้จากการใช้วัสดุสังเคราะห์ เช่น คอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงชนิดสังเคราะห์ เป็นต้น

2.5.2.3 จำแนกตามชนิดของวัสดุเมทริกซ์

1. วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) คือคอมโพสิตที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์ สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนความร้อนสูง เนื่องจาก การขึ้นรูปโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูง และสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้สารเสริมแรงอนินทรีย์ และเส้นใยแก้วในการใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิก หรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น

2. วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) คือคอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์ ด้วยข้อจำกัดในการใช้งานของเซรามิก คือ เปราะและแตกง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกจึงเป็นการปรับสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานและใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมโพสิตเหล่านี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

3. วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) คือคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ซึ่งอาจเป็นยางหรือพลาสติก โดยวัสดุเสริมแรงเป็นได้ทั้งพอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก โดยปกติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ ซึ่งมีความแข็งแรงปานกลางจึงนิยมทำการเสริมแรงให้พอลิเมอร์ได้โดยการเติมวัสดุเสริมแรง เช่น อนุภาคของแข็ง และที่นิยมที่สุดคือ การเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง

สมบัติของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ

- การยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- สมบัติของเมทริกซ์และสารเสริมแรง
- ปริมาณสารเสริมแรง
- ขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรง
- กระบวนการผลิต
- การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง
- ตำหนิ (Flaws) หรือช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 วัสดุไม้คอมโพสิต [32]

วัสดุไม้คอมโพสิต (Wood plastic composites, WPCs) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากทั่วโลก ทั้งในยุโรป อเมริกา หรือแม้แต่ในเอเชีย รู้จักในชื่อทั่วไปว่า “ไม้เทียม” แสดงดังรูปที่ 2.8 วัสดุชนิดนี้สามารถทนต่อแสงแดดและฝน มีสีสันทนและลวดลายสวยงาม หรือสามารถทาสีได้ตามต้องการ และปลอดภัยจากการรุกรานของปลวก ส่วนวัสดุไม้คอมโพสิตนี้ครอบคลุมการใช้วัสดุเชิงประกอบในช่วงกว้าง นับตั้งแต่การใช้พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ PP PE PVC และ PS เป็นต้น พลาสติกเหล่านี้เป็นเทอร์โมพลาสติก เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมตัวเป็นของเหลวหนืดและกลายเป็นของแข็งเมื่อปล่อยให้เย็นลง สมบัติดังกล่าวทำให้สามารถเติมวัสดุอื่น ๆ ลงไปผสมกับพลาสติกก่อนการขึ้นรูปเป็นวัสดุไม้คอมโพสิตได้ สารดังกล่าวเราเรียกโดยรวมว่า “สารเติมแต่ง (Additives)” ด้วยเหตุนี้วัสดุไม้คอมโพสิตจึงเป็นวัสดุที่ผลิตง่าย สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากมาย และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

โดยปกติวัสดุไม้คอมโพสิตจะมีไม้ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง อยู่ในปริมาณ 30-60% ของส่วนผสมทั้งหมด ไม้ดังกล่าวจะอยู่ในรูปอนุภาคและ/หรือเส้นใย นอกจากไม้แล้ว ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่นซึ่งเติมลงในวัสดุไม้คอมโพสิตเพื่อเพิ่มสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะกับการใช้งาน ตัวอย่างเช่น สารหล่อลื่น (Lubricants) ซึ่งช่วยให้ผิวของผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอและง่ายต่อการขึ้นรูป สารช่วยผสม (Compatibilizer) สารประสาน (Binders) ช่วยในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างองค์ประกอบของพลาสติกและไม้ สีทำหน้าที่เพิ่มความสวยงามแก่ผลิตภัณฑ์ สารเพิ่มเสถียรทางแสง (Light stabilizers) เป็นต้น วัสดุไม้คอมโพสิตนี้ได้จากการอัดขึ้นรูปผงไม้กับสารช่วยผสมด้วยความดันสูง เพื่อใช้ทดแทนไม้จริงซึ่งมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างของวัสดุไม้คอมโพสิตซึ่งพบในท้องตลาด เช่น พาติเคิลบอร์ด (Particle-board) ไฟเบอร์บอร์ดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density fiberboard, MDF)

ผลิตภัณฑ์ไม้คอมโพสิตแนวใหม่ได้จากการผสมระหว่างเศษขี้เลื่อยหรือผงไม้ สารช่วยผสมและพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุซึ่งสามารถขึ้นรูปได้เหมือนกับการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป แต่รวมลักษณะเด่นของทั้งไม้และพลาสติกเข้าไว้ด้วยกัน ในส่วนที่เป็นไม้นั้นมักได้จากเศษขี้เลื่อยหรือชิ้นไม้ตัดขอบ ไม้ส่วนที่เหลือใช้ และไม่สามารถนำไปใช้งานอื่น ๆ ได้ นำมาผ่านกระบวนการบด (Grinding) เป็นผงขนาดเล็กก่อนเติมลงในเนื้อพลาสติก หมายความว่า การผลิตวัสดุไม้คอมโพสิตไม่จำเป็นต้องสูญเสียทรัพยากรไม้เพิ่มขึ้นจากเดิม ส่วนของพลาสติกนั้นสามารถใช้พลาสติกซึ่งเคยผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาขึ้นรูปและใช้ใหม่ได้อีก เช่น ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ ถังพลาสติกเก่า ก่อแบบเตอะรีเก่า เป็นต้น การใช้ผลิตภัณฑ์ไม้และพลาสติกเหลือใช้หรือเศษวัสดุเป็นวัตถุดิบในการผลิตนี้ สามารถช่วยให้วัสดุไม้คอมโพสิตมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ให้ผลกำไรสูง และรักษาสิ่งแวดล้อม และทำให้ได้วัสดุไม้คอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลดี เหนียวและแข็งแรง มีความคงรูปสูง ตลอดจนสามารถใช้ในการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนได้



รูปที่ 2.8 ผลิตภัณฑ์ไม้ WPC [33]

2.5.3.1 บทบาทของวัสดุไม้คอมโพสิต

ในปัจจุบันมีการศึกษาเพื่อที่จะพัฒนาวัสดุทดแทนไม้อย่างจริงจัง จึงได้มีการศึกษาและเก็บข้อมูลต่าง ๆ และจากการศึกษาพบว่าปริมาณเนื้อไม้ที่ตัดจากป่าไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพียงแค้อยู่ละ 50-60 ของต้นไม้ทั้งต้นเท่านั้น จึงได้มีการศึกษาหาแนวทางที่จะนำวัสดุไม้ที่เหลืออีกร้อยละ 40-50 มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นการเพิ่มคุณค่าของเศษวัสดุไม้ อีกทางเลือกหนึ่งคือเป็นการพัฒนาวัสดุทดแทนไม้ โดยสมบัติของวัสดุทดแทนไม้สามารถพัฒนาให้มีสมบัติที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม มีอายุการใช้งานนานขึ้นเมื่อเทียบกับไม้ธรรมชาติ สามารถใช้งานได้ทั้งในน้ำและบนบก โดยไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถสร้างประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้อีก [34] ดังเช่น

1. การสร้างวัสดุชนิดใหม่เพื่อใช้ในงานวิศวกรรม
การนำไม้มาผสมกับพลาสติกนั้นเป็นการดึงเอาสมบัติทั้งข้อดีและข้อเสียของวัสดุทั้งสองชนิดเข้ามาไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงเป็นการสร้างวัสดุที่มีสมบัติใหม่ขึ้นมารองรับความต้องการทางด้านวิศวกรรมและสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ
2. การใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด
จากที่กล่าวว่ามันุษย์ได้ใช้ไม้โดยรวมไม่ถึงร้อยละ 60 ของไม้ที่ตัดมา เพราะไม้ส่วนใหญ่ได้สูญเสียไปในกระบวนการแปรรูปไม้มากกว่าจะกลายมาเป็นเครื่องเรือน ไม้ท่อนหรือไม้แผ่นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างได้ แต่ในการผลิตวัสดุทดแทนไม้จะนำส่วนที่สูญเสียจากการแปรรูปมาผลิตเป็นวัสดุทดแทนไม้ที่อยู่ในรูปของวัสดุไม้คอมโพสิต หรืออื่น ๆ ที่สามารถนำมารวมได้
3. การลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม
จากปัญหาการใช้ไม้โดยรวมไม่ถึงร้อยละ 60 ของไม้ที่ตัดมาและการก่อให้เกิดขยะขึ้นในกระบวนการผลิต คือ เศษไม้ หรือขี้เลื่อย ที่หากไม่สามารถนำเศษไม้หรือขี้เลื่อยที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปไม้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างอื่นได้ เศษไม้และขี้เลื่อยเหล่านี้จะกลายเป็นขยะที่อาจเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อราที่สามารถส่งกลิ่นเหม็นและปล่อยสารพิษทำลายสิ่งแวดล้อมได้ แต่ถ้านำเศษไม้หรือขี้เลื่อยเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยทำเป็นวัสดุไม้คอมโพสิตได้ นอกจากไม่ต้องเสียงบประมาณในการกำจัดของเสียแล้วยังเป็นการเพิ่มรายได้ให้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.2 สมบัติของไม้คอมโพสิต [35]

เนื่องจากไม้คอมโพสิตเป็นวัสดุที่เอาทั้งไม้และพลาสติกมารวมกัน โดยสัดส่วนของไม้และพลาสติกมีอิทธิพลต่อสมบัติของไม้คอมโพสิต โดยส่วนใหญ่แล้วถ้าปริมาณของวัตถุดิบตัวใดตัวหนึ่งมาก สมบัติโดยรวมของไม้คอมโพสิตจะมีแนวโน้มเอียงไปทางวัสดุที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปดังนี้ ข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับไม้คอมโพสิตกับไม้

1. ทนทานต่อความชื้นได้ดีกว่า เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว ไม้จะชอบน้ำ และดูดน้ำ ทำให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา เช่น ไม้บวมน้ำ แต่เนื่องจากไม้คอมโพสิตมีส่วนผสมของพลาสติกอยู่ด้วย จึงทำให้ลดปริมาณการดูดซับน้ำลงไปได้มาก
2. ต้านทานต่อเชื้อราและแมลงที่เป็นศัตรูของไม้ต่าง ๆ ได้ดีกว่าไม้ เพราะพลาสติกทำให้แมลงและเชื้อราไม่สามารถเข้าไปถึงตัวเนื้อไม้ได้
3. ทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้นานกว่า เพราะพลาสติกที่เลือกใช้ทำไม้คอมโพสิตส่วนใหญ่เกิดการเน่าเปื่อยผุพังช้ากว่าไม้ตามธรรมชาติ
4. สามารถผลิตให้มีรูปร่างต่าง ๆ ได้โดยไม่ทำให้เกิดเศษเหลือใช้ เพราะไม้คอมโพสิตเป็นการขึ้นรูปขึ้นงาน
5. สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Leu, S.Y. และคณะ [16] ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของวัสดุที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของไม้ WPC โดยมีปัจจัยศึกษา 4 ประการ ได้แก่ (1) ขนาดอนุภาคและเส้นใยไม้ (2) ปริมาณสารช่วยผสม (Compatibilizer) (3) ปริมาณสารหล่อลื่น และ (4) อัตราส่วนของอนุภาคไม้และเส้นใยไม้ต่อพลาสติกกรีไซเคิลพอลิพรอพิลีน (RPP) ผลการวิจัยพบว่าการใช้อนุภาคไม้และเส้นใยไม้ที่ขนาดเล็กกว่า $125\ \mu\text{m}$ สามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงโค้งงอของไม้ WPC และลดการบวมตัวเนื่องจากการดูดความชื้น เนื่องจากการใช้เส้นใยไม้ที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยไม้อาจไม่พันกันยุ่งเหยิง ทำให้เส้นใยยึดติดกับเมทริกซ์หรืออนุภาคอื่น ๆ ได้ดีขึ้น เพราะ RPP สามารถครอบคลุมบนเส้นใยไม้ได้ดีกว่า ทำให้แสดงสมบัติเชิงกลดีขึ้น ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของสารช่วยผสม (Maleic Anhydride Polypropylene, PP-g-MA) ใน WPC อยู่ที่ 3% ทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอของ WPC มีค่าสูงที่สุด ผลของปริมาณสารหล่อลื่น พบว่าที่ปริมาณสารหล่อลื่น 3% ทำให้ WPC มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด อย่างไรก็ตามการเติมสารหล่อลื่นมากกว่า 3% ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอลดลง การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ WPC ที่ประกอบด้วยอนุภาคไม้และเส้นใยไม้ต่อ RPP ที่แตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มปริมาณอนุภาคไม้และเส้นใยไม้ส่งผลให้การบวมตัว การดูดความชื้น โมดูลัสโค้งงอ และโมดูลัสแรงดึงของ WPC เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงโค้งงอและความแข็งแรงดึงลดลง โดยทั่วไปการเพิ่มเส้นใยไม้ในเมทริกซ์พลาสติก จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ของไม้ WPC แต่ในกระบวนการผสมหรือการอัดขึ้นรูปที่มีปริมาณ RPP ไม่เพียงพอในการครอบคลุมอนุภาคไม้และเส้นใยไม้ได้ทั้งหมด ส่งผลให้เกิดช่องว่างในชิ้นงาน WPC จึงทำให้ WPC ดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้นและสมบัติเชิงกลลดลง

สมชาย เหลืองสด และคณะ [36] ศึกษาการใช้เส้นใยปาล์มสำหรับพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ไม้อัดเทียม (WPC) จาก PE โดยกำหนดอัตราส่วน เส้นใยปาล์ม/PE เท่ากับ 50/50, 55/45, 60/40, 65/35 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปไม้อัดเทียมขนาด $30 \times 30 \times 1.5\ \text{cm}^3$ การผสมใช้เครื่องผสมแบบ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการผิด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกกลิ้ง และอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อน พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน เส้นใยพอลัม/PE ทำให้ค่าความหนาแน่น ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึงตึงฉาก และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ WPC ลดลง ในขณะที่ปริมาณการดูดความชื้นและการบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้น การใช้อัตราส่วนเส้นใยพอลัม/PE ที่ 65/35 ได้ WPC ที่มีสมบัติผ่านตามาที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไม่อัดความหนาแน่นปานกลาง (มอก. 966-2547)

ฉกาจ จบนุช และคณะ [32] ศึกษาการผลิตและทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตจากยูคาลิปตัสและ HDPE ที่ได้มาจากขบวนการน้ำสีขาวขุ่นที่ใช้แล้ว ผสมสารช่วยผสมชนิด HDPE-g-MA โดยเตรียมจากอัตราส่วน HDPE/ไม้ยูคาลิปตัส ที่ 50/50, 60/40, 70/30, 80/20, 90/10 และ 100/0 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดร้อน พร้อมกับศึกษาผลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 160, 180 และ 200°C พบว่าการใช้อัตราส่วน HDPE/ไม้ยูคาลิปตัส ที่มีปริมาณ HDPE มากส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ผนวดยืด และค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง ในทางกลับกันค่าโมดูลัสแรงดึง และโมดูลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สูตรที่มีปริมาณไม้ยูคาลิปตัสมาก โดยที่อัตราส่วน HDPE/ไม้ยูคาลิปตัส 50/50 มีค่าโมดูลัสแรงดึง โมดูลัสโค้งงอ และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และพบว่าการเติมสารช่วยผสม ทำให้ช่องว่างระหว่างภูมิภาค HDPE และไม้ยูคาลิปตัสน้อยลง เนื่องจากสารช่วยผสมช่วยเสริมให้ HDPE กับไม้ยูคาลิปตัสเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส ทำให้ไม้ยูคาลิปตัสกระจายตัวในเฟส HDPE ดีขึ้น ส่งผลให้ WPC มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการขึ้นรูป พบว่าที่ 180°C มีค่าสมบัติเชิงกลสูงสุด

Martins, G. และคณะ [37] ศึกษาผลของการผลิตไม้ WPC สำหรับประยุกต์ใช้งานทางด้านสถาปัตยกรรมและการก่อสร้าง โดยเฉพาะการผลิตระบบบังแดดที่เป็นนวัตกรรมใหม่ เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมกับความทนทานต่อสภาพอากาศพร้อมกับประสิทธิภาพเชิงกลและการทำงานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำวัสดุ WPC จากขี้เลื่อยไม้สน HDPE และสารช่วยผสม PE-g-MA ผลการวิจัยพบว่า WPC ที่มี อัตราส่วน HDPE/ขี้เลื่อยไม้สน/PE-g-MA เป็น 55/35/10 สามารถประกอบเป็นไม้ WPC ที่อัดขึ้นรูปและมีความแข็งแรงเชิงกลเพียงพอที่จะใช้ในระบบบังแดด จากการเติมสารช่วยผสม ทำให้อนุภาคไม้ที่ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงเกิดการยึดเกาะที่ดีกับเมทริกซ์ HDPE ส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้น อีกทั้ง WPC ยังเพิ่มความสามารถการต้านทานต่อการดูดซับน้ำ ดังที่แสดงพฤติกรรมที่ไม่ชอบน้ำที่พื้นผิววัสดุและการดูดซับน้ำต่ำในการทดสอบหลังการแช่น้ำ

กนกอร แสงสุวรรณ และคณะ [15] ศึกษาการผลิตไม้ WPC จาก LLDPE และ PP ผสมกับเส้นใยมะพร้าว (Coir fibers) ด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปอัตราส่วนของพลาสติก/เส้นใยมะพร้าว ได้แก่ 100/0, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยน้ำหนักศึกษาปริมาณสารช่วยผสมชนิด PE-g-MA และ PP-g-MA ที่ปริมาณ 0-3% โดยน้ำหนักของเส้นใย และศึกษาขนาดของเส้นใย >80, 50-80, 20-50 และ <20 เมช ผลการศึกษาอัตราส่วนของพลาสติก/เส้นใยมะพร้าว พบว่าสมบัติเชิงกลบางประการดีขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เช่น ความแข็งแรงโค้งงอ และโมดูลัสโค้งงอ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 50/50 จากการศึกษาปริมาณของสารช่วยผสม พบว่าสมบัติเชิงกลดีขึ้น และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง ปริมาณ PE-g-MA ที่เหมาะสมคือ 2% และเส้นใยมะพร้าวขนาด 50-80 เมช ให้ค่าสมบัติเชิงกลของไม้ WPC สูงที่สุด

Rodeney, J. และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากขบวนการพลาสติก PP ชนิดหลายชั้นและเส้นใยไม้ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเม็ดพลาสติก PP ใหม่ และทำการผสมด้วยเครื่องรีดเกลียวทวนคู่ (Twin-screw extruder) ด้วยการใช้น้ำหนักของเส้นใยที่ 0, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกัน พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเม็ด PP ที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ได้จากขวดพลาสติก ให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเม็ดพลาสติก PP ใหม่ เนื่องจากสารเติมแต่งที่มีอยู่ในขวด PP ชนิดหลายชั้นจะไปช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างส่วนที่เป็นเมทริกซ์กับเส้นใยไม่มากนัก และผลของปริมาณเส้นใยไม่มากกว่า 30% จะทำให้ความแข็งแรงดิ่งลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยส่งผลให้การถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) เกิดยากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้คอมโพสิตเหนียว (Stiffness) ขึ้น ค่าการดิ่งยึด ณ จุดขาดจึงลดลง

อาชาไนย บัวศรี และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงซีลี้อยที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต โดยใช้พลาสติก HDPE และ LLDPE ผสมกับผงซีลี้อยในปริมาณ 2.5, 5.0 และ 10.0 % โดยน้ำหนักพลาสติก และศึกษาอิทธิพลของการเติมสารช่วยผสมชนิด PE-g-MA ที่ปริมาณ 2.0% โดยน้ำหนัก โดยทำการผสมด้วยเครื่องรีดเกลียวทวนคู่และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และทางด้านความร้อนของวัสดุคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณของผงซีลี้อยมากขึ้น สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้นและสารช่วยผสมช่วยปรับปรุงสมบัติการยึดเหนี่ยวกันของวัสดุคอมโพสิต ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำและอุณหภูมิในการสลายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณของผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น

อิทธิพล แจ่มชัด และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาสมบัติของ WPC ระหว่าง LDPE กับเส้นใยผักตบชวา (Hyacinth fibers) ที่เตรียมจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณเส้นใยต่อพอลิเมอร์ ผลของสารช่วยผสม PE-g-MA ต่อปริมาณเส้นใยและขนาดของเส้นใยผักตบชวา โดยผสมสูตรด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนเดี่ยว (Single-screw extruder) และทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรงดิ่ง โมดูลัส ความแข็งกด อาจกล่าวได้ว่า เส้นใยทำหน้าที่เสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม สมบัติเชิงกลบางประการของวัสดุลดลง เช่น เปอร์เซ็นต์การดิ่งยึด ณ จุดขาดและความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นปรากฏการณ์ปกติที่พบทั่วไปกับวัสดุคอมโพสิตหรือพอลิเมอร์ที่ผสมสารตัวเติมของแข็ง (Filled polymer) เนื่องจากเส้นใยหรือสารตัวเติมมีความแข็งหรือค่าโมดูลัสสูงกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อวัสดุได้รับแรง จะมีการเปลี่ยนขนาดหรือความเครียดในส่วนของเส้นใยหรือสารตัวเติมน้อยกว่าเมทริกซ์ ทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักหรือเสียหาย นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยหรือสารตัวเติม จะทำให้มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่ไม่แข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เกิดความไม่ต่อเนื่องของวัฏภาคเมทริกซ์กับวัฏภาคกระจายมากขึ้น เป็นผลให้เปอร์เซ็นต์การดิ่งยึด ณ จุดขาดและความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง จากการศึกษาผลของสารช่วยผสม พบว่า WPC มีสมบัติที่ดีขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของคอมโพสิตมีค่าลดลง และปริมาณ PE-g-MA ที่เหมาะสมคือ 3% ช่วยให้พอลิเอทิลีนเมทริกซ์กับเส้นใยเข้ากันได้มากขึ้น โดยขนาดของเส้นใยผักตบชวาที่ 50-80 เมช ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

Kamal, B. และคณะ [41] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ WPC ที่ผลิตจาก rHDPE/ผงไม้ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 50/50, 60/40 และ 70/30 พบว่าความแข็งแรงดิ่งและความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงไม้ในปริมาณที่สูงจะทำให้เกิดการกระจายตัวไม่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ทำให้การถ่ายเทความเค้นเกิดยากขึ้น เมื่อให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงกระทำจึงไม่สามารถรับแรงได้ดีเท่าที่ควร อีกทั้งปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นเหตุให้การเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง

ณัฐชญาภา ธนวัฒนาศิริกุล และคณะ [42] ทำการศึกษาไม้ WPC จากไม้ปาล์ม และ HDPE ซึ่งได้มาจากขูดน้ำต้มขาวขุ่นใช้แล้วและใช้สารช่วยผสม PE-g-MA ที่อัตราส่วน ไม้/HDPE/PE-g-MA ที่ 50/47/3, 50/57/3 และ 50/67/3 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดร้อน ที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170°C ความดัน 2500 psi แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าความแข็งแรงโค้งงอ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และความแข็งกดของ WPC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ HDPE เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน 50/67/3 อุณหภูมิ 170°C ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับไม้ WPC ทางการค้า พบว่าไม้ WPC มีความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าไม้ WPC ทางการค้า แต่ความแข็งกดย่นกว่า

จากหลากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการผลิตไม้ WPC ด้วยผงไม้และพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ศึกษามีทั้งเม็ดพอลิเมอร์ใหม่และเม็ดพลาสติกรีไซเคิล และมีการใช้สารช่วยผสม เช่น PP-g-MA และ PE-g-MA ในการปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์และผงไม้ และศึกษาปริมาณองค์ประกอบของ ผงไม้/พอลิเมอร์ ของ WPC พบว่าที่ปริมาณผงไม้ 50-65% โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์ 35-50% โดยน้ำหนัก สามารถให้ไม้ WPC ที่มีความแข็งแรงเชิงกล (เช่น โมดูลัสโค้งงอ ความแข็งแรงโค้งงอ และความแข็งแรงแรง) เพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้เตรียมไม้ WPC โดยใช้ PCR ชนิด LLDPE, OPA/PE และ PET/PE ที่มาจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกและเป็นเศษของเสียจากการผลิตในโรงงาน ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานโดยผู้บริโภคมา ทำคอมโพสิตร่วมกับ rHDPE และผงไม้ ศึกษาอัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ที่เหมาะสมและสามารถใช้ปริมาณ PCR ได้มากที่สุดและสมบัติเชิงกลผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด ในการเพิ่มความสามรถในการเข้ากันได้ระหว่าง PCR rHDPE และผงไม้ ของไม้ WPC เลือกใช้ HDPE-g-MA และ LDPE-g-MA ซึ่งผ่านการศึกษางานวิจัยก่อนหน้า [Privacy and Confidentiality] เพื่อลดปัญหาปริมาณขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติก อีกทั้งไม่ต้องเสี่ยงปริมาณในการกำจัดขยะและยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้คุ้มค่าต่อประโยชน์หลักเศรษฐกิจหมุนเวียน นอกจากนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังพบว่า วัสดุไม้ WPC มีความสามารถในการใช้งานทางด้านวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้สมบัติทางกายภาพและทางกลมีแนวโน้มไปในทางที่ดี ให้สมบัติเฉพาะ และเหมาะที่จะศึกษาหรือพัฒนาสมบัติและความสามรถของไม้ WPC ในงานด้านใหม่ ๆ ได้ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุติบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เกรดรีไซเคิล (rHDPE) บริษัท ไอแอมพลาสติก จำกัด สมบัติบางประการของ rHDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1
2. Post Consumer Recycled Resin (PCR) ชนิด LLDPE, OPA/PE และ PET/PE บริษัท ยูนิลีเวอร์ ประเทศไทย จำกัด
3. ผงไม้ (Wood powder) บริษัท บีบีเจ กรู๊ป จำกัด แสดงดังตารางที่ 3.2
4. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) บริษัท ซินชนะ อินดัสตรีส์ (ไทยแลนด์) จำกัด สมบัติบางประการของ CaCO_3 แสดงดังตารางที่ 3.3
5. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) บริษัท ดาวเคมีคอล ประเทศไทย จำกัด สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.4
6. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (LDPE-g-MA) บริษัท ดาวเคมีคอล ประเทศไทย จำกัด สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.4
7. พีอี แวกซ์ (PE Wax) บริษัท คินเวลล์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด สมบัติบางประการของ พีอี แวกซ์ แสดงดังตารางที่ 3.5
8. สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) บริษัท บีเอเอสเอฟ (ไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ rHDPE

สมบัติ	rHDPE	หน่วย	วิธีการทดสอบ
ดัชนีการไหล (Melt flow index) (2.16 kg/190°C)	0.8±0.0	g/10 min	ASTM D1238
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	26.0±0.3	MPa	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	187±41	%	ASTM D638
มอดูลัสของยัง (Young's modulus)	220±14	MPa	ASTM D638
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	18.8±0.3	MPa	ASTM D790
มอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	472±10	MPa	ASTM D790
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	19.0±0.9	kJ/m ²	ASTM D256
ความหนาแน่น (Density)	0.949±0.007	g/cm ³	ASTM D792
ความแข็งกด (Hardness, Shore D)	62±1	-	ASTM D2240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของผงไม้

สมบัติ	ผงไม้	หน่วย	วิธีทดสอบ
ลักษณะ (Appearance)	อนุภาคผงไม้และเส้นใยไม้	-	-
ขนาด (Mesh sieve)	80	mesh	Sieve analysis
ปริมาณความชื้น (Moisture content)	3-4	%	Moisture analyzer

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต (ซีเลื่อยไม้ยางพาราผ่านกระบวนการบดและร่อนผ่านตะแกรง)

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ CaCO₃

สมบัติ	CaCO ₃	หน่วย	วิธีทดสอบ
ความสว่าง (Brightness), 457 nm	90.6		Kett C-100 JIS Z8722
ปริมาณความชื้น (Moisture content)	0.1	%	AS1289.1.1-1992
pH (10% Dispersion)	7.6	-	pH meter
ขนาด (Size)	200	mesh	ISO 2591-1: 1998

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ HDPE-g-MA และ LDPE-g-MA

สมบัติ	HDPE-g-MA	LDPE-g-MA	วิธีการทดสอบ
ความหนาแน่น (Density), g/cm ³	0.960	0.930	ASTM D792
ดัชนีการไหล (Melt flow index) (2.16 kg/190°C), g/10 min	2.0	1.75	ASTM D1238 ISO 1133
MAH Graft Level, wt%	>1.0	-	Dow Method
Tensile strength (51 mm/min), MPa	15.9	-	ASTM D638
Tensile Elongation (51 mm/min), %	300	-	ASTM D638
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus), 2% Secant, MPa	924	-	ASTM D790A
ความแข็งกด (Hardness, Shore A)	98	-	ASTM D2240
ความแข็งกด (Hardness, Shore D)	67	-	ASTM D2240

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของ PE-Wax

สมบัติ	PE-Wax	หน่วย
ลักษณะ (Appearance)	แผ่นสีขาว	-
จุดอ่อนตัว (Softening point)	113	°C
ความหนืด (Viscosity, at 140°C)	22.1	cps
ความหนาแน่น (Density)	0.930	g/cm ³
สารระเหย (Volatile matter)	1.5	%wt

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill, รุ่น LRM-S-150/T3F; LabTech Engineering Co., Ltd.)
2. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding machine, รุ่น LP-S-30; LabTech Engineering Co., Ltd.)
3. เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Universal testing machine, UTM, รุ่น Proline series; ZwickRoell Co., Ltd.)
4. เครื่องวัดความแข็งชอร์ดี (Shore D Hardness, รุ่น GS-20N; Teslock Co., Ltd.)
5. เครื่องวัดความหนาแน่น (Electronic densimeter, รุ่น MH-200A; Merit Tech Co., Ltd.)
6. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC, รุ่น DSC 3+ ; Mettler-Toledo Co., Ltd.)
7. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermal gravimetric analyzer, TGA รุ่น TG209 F3; Netzsch Co., Ltd.)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM รุ่น LEO 1455 VP; Carl Zeiss Co., Ltd.)
9. เครื่องชั่งละเอียด (Balance, รุ่น PA-Series; Mettler-Toledo Co., Ltd.)
10. เวอร์เนียร์คาลิปเตอร์
11. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

3.3 การวิเคราะห์และตรวจสอบวัตถุดิบ

3.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของ PCR

การวิเคราะห์ PCR วัตถุดิบ โดยนำ PCR ที่ผ่านการบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ใช้เครื่อง TGA โดยกำหนดสภาวะการทดสอบดังนี้

- น้ำหนักของสารตัวอย่าง 5-10 mg
- อุณหภูมิ 50-650 °C
- อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min
- บรรยากาศ Air zero

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลที่ได้จาก TGA Thermogram มาหาปริมาณ LLDPE, OPA และ PET ที่แน่นอนที่มีอยู่ใน PCR

3.3.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของ PCR

การศึกษาสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของ PCR โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC กำหนดสภาวะในการทดสอบ ดังนี้

- น้ำหนักสารตัวอย่าง 5-10 mg
- อุณหภูมิ 25-250 °C
- อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min
- อัตราการให้ความเย็น 10 °C/min
- บรรยากาศ N₂

สารตัวอย่างถูกให้ความร้อน จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุด 250°C จากนั้นทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง และให้ความร้อนอีกครั้งจนถึงอุณหภูมิสูงสุด 250°C นำข้อมูลที่ได้จาก DSC Thermogram มาหาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และร้อยละความเป็นผลึก (X_c) นำค่าความร้อนในการหลอมผลึก (Heat of fusion, ΔH_f) มาคำนวณหาร้อยละความเป็นผลึกได้จากสมการดังนี้

$$\text{Heat of fusion, } \Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง}} \quad (3.1)$$

$$\text{ร้อยละความเป็นผลึก (X}_c\text{)} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\% \text{ โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีอยู่จริง}} \quad (3.2)$$

เมื่อ ΔH_f = พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f⁰ = พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์กิ่งผลึก (100% ของ PE, PA และ PET มีค่าเท่ากับ 293, 230 และ 140 J/g ตามลำดับ [43])

3.3.3 การวิเคราะห์ผงไม้

นำผงไม้ที่ผ่านการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 hr มาทำการเคลือบด้วยทองคำ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ขนาดและลักษณะของผงไม้ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 400 เท่า

3.4 การเตรียมไม้คอมโพสิต

การเตรียมไม้ WPC ใช้ปริมาณวัตถุดิบตามตารางที่ 3.6-3.8 แยกตามปัจจัยศึกษา โดยในสูตรผสมมีผงไม้เท่ากับ 55 ส่วน (ใน 100 ส่วนขององค์ประกอบเฉพาะผงไม้รวมกับพอลิเมอร์) สารช่วยผสมชนิด HDPE-g-MA:LDPE-g-MA เท่ากับ 6:1 ส่วน การใช้ทั้ง HDPE-g-MA และ LDPE-g-MA เนื่องจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ในไม้คอมโพสิตมี 2 ชนิด คือ rHDPE และ LLDPE (ซึ่งเป็นองค์ประกอบใน PCR 3 ชนิด (LLDPE, OPA/PE และ PET/PE)) ทั้งนี้ได้มีการพิสูจน์มาจากงานวิจัยก่อนหน้า [Privacy

and Confidentiality] ว่าการมีผงไม้ 55 ส่วน ให้ WPC มีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยตัวช่วยในการออกสูตร มีความหมายต่อไปนี้

- HD แทน rHDPE
- LLDPE แทน PCR ชนิด LLDPE
- PAPE แทน PCR ชนิด OPA/PE
- PETPE แทน PCR ชนิด PET/PE
- C แทน CaCO_3

ตารางที่ 3.6 สูตรการผลิตไม้ WPC : ศึกษาผลของอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR ชนิด LLDPE

สูตร	ปริมาณสาร (กรัม)		
	HD30LLDPE05	HD35LLDPE05	HD40LLDPE05
Wood	55.00	55.00	55.00
rHDPE	30.00	35.00	40.00
PCR	5.00	5.00	5.00
CaCO_3	5.00	5.00	5.00
Lubricant	2.50	2.50	2.50
HDPE-g-MA	6.00	6.00	6.00
LDPE-g-MA	1.00	1.00	1.00
Anti-oxidant 1	0.06	0.06	0.06
Anti-oxidant 2	0.06	0.06	0.06

ตารางที่ 3.7 สูตรการผลิตไม้ WPC : ศึกษาผลของชนิดของ PCR ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน

สูตร	ปริมาณสาร (กรัม)				
	HD45	HD40 PCR05	HD35 PCR10	HD30 PCR15	HD25 PCR20
Wood	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
rHDPE	45.00	40.00	35.00	30.00	25.00
PCR*	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00
CaCO_3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Lubricant	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
HDPE-g-MA	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
LDPE-g-MA	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Anti-oxidant 1	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Anti-oxidant 2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

หมายเหตุ: * มีการใช้ PCR 3 ชนิด คือ LLDPE, OPA/PE และ PET/PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 สูตรการผลิตไม้ WPC : ศึกษาผลของปริมาณ CaCO_3

สูตร	ปริมาณสาร (กรัม)			
	PAPEC00	PAPEC05	PAPEC10	PAPEC15
Wood	55.00	55.00	55.00	55.00
rHDPE	35.00			
PCR	10.00			
CaCO_3	0.00	5.00	10.00	15.00
Lubricant	2.50	2.50	2.50	2.50
HDPE-g-MA	6.00	6.00	6.00	6.00
LDPE-g-MA	1.00	1.00	1.00	1.00
Anti-oxidant 1	0.06	0.06	0.06	0.06
Anti-oxidant 2	0.06	0.06	0.06	0.06

3.4.1 กระบวนการผสม

การผสมไม้ WPC ทุกสูตรด้วยเครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิการผสม 190°C (หากใช้อุณหภูมิมากกว่านี้จะทำให้เกิดการไหม้ของผงไม้) ด้วยความเร็วรอบ 12 รอบต่อนาที ดังนี้

1. ชั่งวัตถุดิบ ตามตารางที่ 3.6-3.8
2. ทำการคลุกเคล้าผงไม้ CaCO_3 สารหล่อลื่นพีอี แวกซ์ และสารป้องกันออกซิเดชันให้เข้ากันในกระป๋องผสม
3. ทำการผสมสูตรโดยใส่ rHDPE ตามด้วย PCR ลงเครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง (ใช้เวลาประมาณ 4 นาที)
4. เติมของผสมตามข้อ 2 ใส่สลับกับสารช่วยผสมลงเครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง (ใช้เวลาประมาณ 8 นาที)
5. ทำการกรีดและพับ เพื่อให้ของผสมเข้ากัน (ใช้เวลาประมาณ 4 นาที) และรีดเป็นแผ่นให้มีความหนาประมาณ 2 mm

3.4.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป

การขึ้นรูปชิ้นงาน ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยใช้แม่แบบ 2 รูปแบบ คือ ขนาด $12.7 \times 125 \times 3.2 \text{ mm}^3$ เพื่อนำไปทดสอบสมบัติการโค้งงอและ $12.7 \times 125 \times 3.2 \text{ mm}^3$ ที่มีรอยบากตรงกลาง เพื่อนำไปทดสอบสมบัติความแข็งแรงกระแทก โดยใช้สภาวะการกดอัด ดังนี้

- อุณหภูมิในการกดอัด 190 $^\circ\text{C}$
- อุณหภูมิในการหล่อเย็น 20-25 $^\circ\text{C}$
- ความดันในการกดอัด 1700 psi
- เวลาในการอุ่นแม่พิมพ์ 2 min
- เวลาในการกดอัด 4.5 min
- เวลาในการหล่อเย็น 4 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบความหนาแน่นของไม้ WPC

การทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D792 [44] การเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยนำตัวอย่างจากการอัดขึ้นรูปมาตัดให้มีขนาด $12.7 \times 20 \times 3.2 \text{ mm}^3$ ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter) จำนวน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่น

3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้ WPC

3.6.1 การทดสอบสมบัติการโค้งงอ

นำตัวอย่างจากการอัดขึ้นรูปขนาด $12.7 \times 125 \times 3.2 \text{ mm}^3$ มาทำการทดสอบค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ ตามมาตรฐาน ASTM 790 [45] ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ใช้สภาวะทดสอบ ดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 10 kN
- ความเร็วในการกด (Compression speed) 10 mm/min
- ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length) 60 mm

ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ชนิดมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$\text{ความแข็งแรงโค้งงอ } (\sigma_F) = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ σ_f = ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)

F = แรงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ (N)

L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (mm)

b = ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (mm)

h = ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

$$\text{มอดูลัสโค้งงอ } (E_F) = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d} \quad (3.4)$$

เมื่อ M_B = ค่ามอดูลัสโค้งงอ (MPa)

$\frac{\Delta F}{\Delta d}$ = ความชันในช่วงเริ่มต้นของกราฟแรงต่อระยะทาง ณ จุดที่ระยะทางเท่ากับ

0.3 และ 0.5 mm

3.6.2 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D256 [46] ใช้มาตรฐานแบบไอซอด โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีรอยบากมาตัดให้มีขนาด $12.7 \times 63.5 \times 3.2 \text{ mm}^3$ โดยมีรัศมีร่องบาก (Root radius) เท่ากับ 0.254 และมีความลึก 2.54 mm

ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่าง

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก } (W_k) = \frac{W}{A_k} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	W_k	=	ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (kJ/m^2)
	W	=	ค่าพลังงานกระแทกที่วัดได้ (kJ)
	A_k	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

3.6.3 การทดสอบความแข็งกดแบบดิวโรมิเตอร์

การทดสอบความแข็งกดของไม้คอมโพสิต ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [47] โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการอัดขึ้นรูป ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D (ความหนาไม้น้อยกว่า 6 mm) ที่อุณหภูมิห้อง กดตัวอย่างเป็นเวลา 5 วินาที ทั้งหมด 10 ตำแหน่ง จากนั้นอ่านค่าที่วัดได้ โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยความแข็งกด

3.7 การศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้คอมโพสิต

การเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแบบมีรอยบาก แซ่ไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 20 นาที หักชิ้นงานทดสอบบริเวณรอยบากที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) วิเคราะห์พื้นผิวบริเวณที่แตกหักของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ

3.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของไม้คอมโพสิต

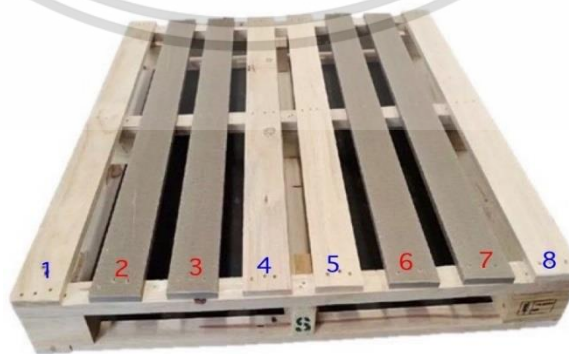
การศึกษาสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของไม้คอมโพสิต โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC กำหนดสถานะในการทดสอบตามข้อ 3.3.2

3.9 การทดสอบการใช้งานจริง

ตัวอย่างการประกอบพาเลทไม้ โดยทำการยึดไม้ให้เป็นส่วนรองรับเรียกว่า สตริงเกอร์ (Stringers) (ตำแหน่งดังลูกศรในรูปที่ 3.1) จากนั้นประกอบคานบนของพาเลทด้วยแผ่นไม้ จากตำแหน่งขอบด้านซ้ายและขอบด้านขวาตามแนวยาวของสตริงเกอร์ ต่อด้วยตำแหน่งกลางและตำแหน่งอื่น ๆ ที่เหลือ โดยการใช้สกรูในการยึดเพื่อประกอบเป็นพาเลทไม้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แต่ในกรณีที่ประกอบพาเลทไม้ WPC ทำการยึดไม้จริงเพื่อใช้เป็นสตริงเกอร์ จากนั้นประกอบคานบนของพาเลทที่ตำแหน่ง 1, 8, 4 และ 5 ตามลำดับด้วยแผ่นไม้จริงก่อน และสุดท้ายประกอบคานบนด้วยแผ่นไม้ WPC ที่ตำแหน่ง 2, 3, 6 และ 7 ตามลำดับ โดยใช้สกรูในการยึดเพื่อประกอบเป็นพาเลทไม้ WPC แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การประกอบพาเลทไม้ [48]



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งแผ่นไม้จริงและแผ่นไม้ WPC ของพาเลทไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบการใช้งานจริงของพาเลทไม้ ด้วยมาตรฐาน JIS Z 0602-1988 [49] ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 23 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 % ด้วยการประกอบเป็นคานบนของพาเลทจากไม้จริง 4 แผ่น (ตำแหน่ง 1, 4, 5 และ 8) และไม้ WPC 4 แผ่น ในตำแหน่งที่ 2, 3, 6 และ 7 แสดงดังรูปที่ 3.2 น้ำหนักพาเลท 23 kg และขนาดของพาเลทเท่ากับ $1100 \times 1250 \times 150$ mm³ ทำการทดสอบสมบัติและใช้สภาวะการทดสอบดังนี้

1) Bending testing

ทดสอบการแอ่นตัวและแตกร้าว โดยใช้แผ่นเหล็กกดบนตัวพาเลท

- แรงการดัด (Bending load) 1875 kgf
- จำนวนชิ้นงาน (Number of specimen) 2

2) Drop test

ทดสอบการต้านทานแรงตกกระแทกจากที่สูง โดยยกพาเลทในที่สูงแล้วปล่อยให้มุมพาเลทกระแทกกับพื้น

- ระดับความสูงที่ปล่อยให้ตก (Drop height) 0.5 m
- Drop orientation 1 corner
- จำนวนครั้งที่ทดสอบ (Number of drop/corner) 3
- จำนวนชิ้นงาน 1

3) Compression strength

ทดสอบการแตกร้าว โดยใช้แผ่นเหล็กกดบนตัวพาเลท

- ความเร็วที่ใช้กดอัด (Compression speed) 12.7 mm/min
- จำนวนชิ้นงาน 1
- ใช้แรงอัดทั้งหมดบนพื้นผิวด้านบนของพาเลท

4) ทดสอบการรับน้ำหนักขณะเคลื่อนย้ายพาเลท (Dynamic load) 1500 kg

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เตรียมไม้คอมโพสิต (WPC) จาก PCR, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเกรดรีไซเคิล (rHDPE) และผงไม้ เพื่อประกอบเป็นคานบนของพาเลท โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR ชนิด LLDPE เท่ากับ 55/30/5, 55/35/5 และ 55/40/5

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของชนิดของ PCR (LLDPE, OPA/PE และ PET/PE) ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR (55/45/0, 55/40/5, 55/35/10, 55/30/15 และ 55/25/20)

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR/CaCO₃ เท่ากับ 55/35/10/0, 55/35/10/5, 55/35/10/10 และ 55/35/10/15

การทดสอบสมบัติของไม้คอมโพสิต ได้แก่ สัมฐานวิทยา ความหนาแน่น สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน โดยผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

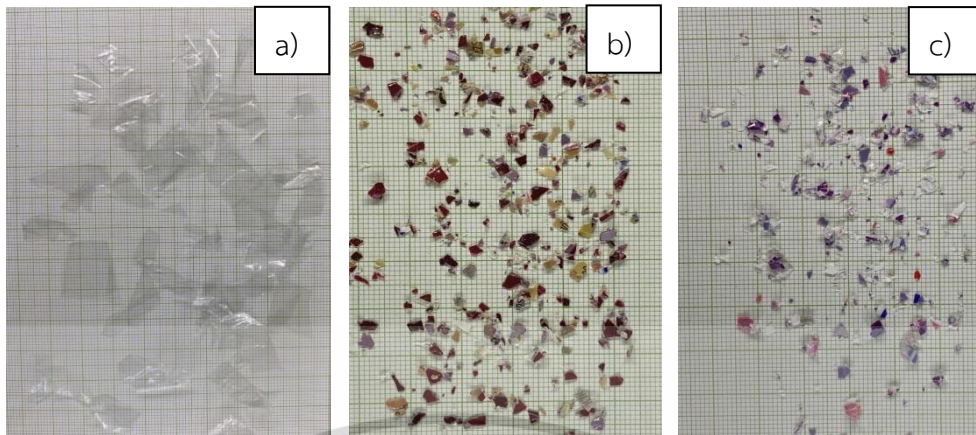
4.1 การวิเคราะห์วัสดุดิบ

งานวิจัยนี้มีการนำ PCR มาใช้ในการผลิตไม้ WPC โดย PCR ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ LLDPE, OPA/PE และ PET/PE แสดงสมบัติดังตารางที่ 4.1 (TGA Thermogram ภาคผนวก ก) และมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 โดยวิเคราะห์ได้ความหนาแน่นแต่ละชั้นของพอลิเมอร์ จาก PCR ชนิด OPA/PE เท่ากับ 25/55 μm และ PCR ชนิด PET/PE เท่ากับ 35/85 μm

ตารางที่ 4.1 สมบัติบางประการของ PCR

PCR	ขนาด		ปริมาณ (%wt)			ความแข็งกด (Shore D)	
	ยาว (mm)	หนา (μm)	LLDPE	OPA	PET	ด้านล่าง	ด้านบน
LLDPE	10-30	50-70	100	-	-	38.6 \pm 1.8	
OPA/PE	1-5	80	78	22	-	47.9 \pm 0.7	44.3 \pm 1.3
PET/PE	1-5	120	74	-	26	46.9 \pm 1.2	46.0 \pm 0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ลักษณะของ PCR ชนิด a) LLDPE, b) OPA/PE และ c) PET/PE

จากการวิเคราะห์ลักษณะของผงไม้ด้วยเทคนิค SEM แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วงน้อยกว่า 177 ไมครอน สามารถผ่านตะแกรงได้ ผงไม้มีลักษณะเป็นอนุภาคและเส้นใยปนกัน โดยอนุภาคไม้มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่รูปร่างหลากหลาย ความยาวเส้นใยไม้มีทั้งขนาดสั้นและยาวซึ่งสามารถผ่านตะแกรงร่อนลงมาในแนวตั้งทำให้มีขนาดหลากหลาย โดยมีขนาดสูงสุดไม่เกิน 500 μm

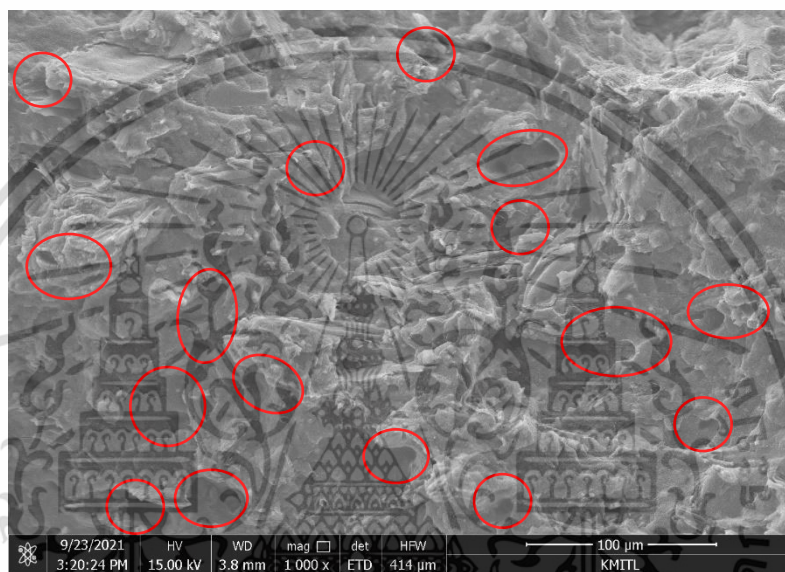


รูปที่ 4.2 SEM micrograph ของผงไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR ชนิด LLDPE ต่อสมบัติของ ไม้ WPC

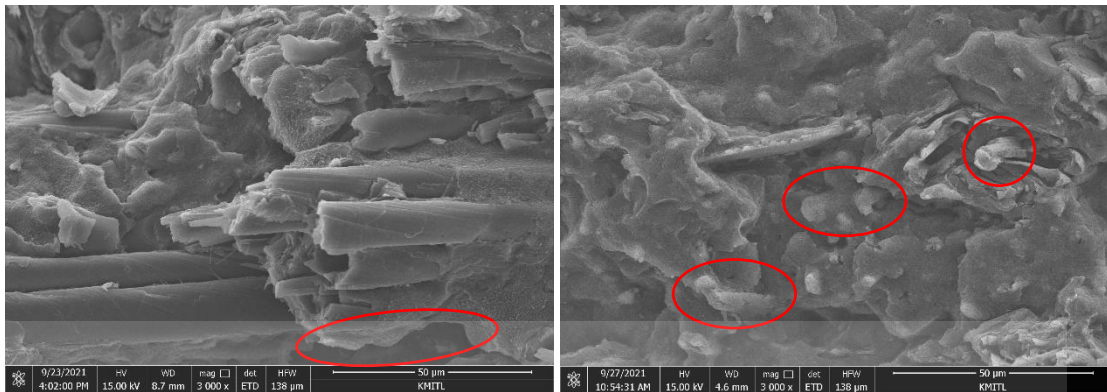
สูตร WPC ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นสูตรที่พัฒนามาจากสูตรเชิงพาณิชย์จากงานวิจัยก่อนหน้า [Privacy and Confidentiality] มีการใช้ปริมาณผงไม้ 55 ส่วน ผสมกับพลาสติกกรีไฮเซล แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการใช้ PCR เข้ามาแทนพลาสติกกรีไฮเซลบางส่วน จึงได้มีการศึกษาอัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ชนิด LLDPE อย่างไรก็ตามจากการผสมด้วยเครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง ซึ่งเกิดแรงเฉือน น้อย ทำให้อนุภาคผงไม้และเส้นใยไม้กระจายตัวไม่ดี ผงไม้จับตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ส่งผลให้สูตรไม้ WPC เกิดช่องว่างจำนวนมากที่เป็นรอยตำหนิในชิ้นงาน (ดังแสดงในวงกลมรูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 SEM micrograph แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของผงไม้และเส้นใยไม้ในพอลิเมอร์ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากสูตร HD35LLDPE10 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

การศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้ WPC จากสูตร HD30LLDPE05 ดังรูปที่ 4.4 (a) แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยไม้อย่างชัดเจน สาเหตุอาจมาจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเส้นใยไม้กับเส้นใยไม้มีมากกว่าเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามส่วนของเมทริกซ์จาก rHDPE และ PCR ชนิด LLDPE มีปริมาณไม่มากพอที่สามารถล้อมรอบผงไม้ได้ทั้งหมด ทำให้มีโอกาสเกิดช่องว่าง (Void) เป็นรอยตำหนิ (Defect) ในไม้ WPC (บริเวณวงกลมในรูปที่ 4.4 (a))

ผลจากสูตร HD40LLDPE05 แสดงดังรูปที่ 4.4 (b) พบว่าส่วนของเมทริกซ์ที่มีปริมาณมากกว่าสูตร HD30LLDPE05 สามารถห่อหุ้มอนุภาคของไม้และเส้นใยไม้ได้ดีกว่า ทำให้สามารถลดช่องว่างที่เกิดขึ้นในไม้ WPC ดังที่พบในงานวิจัยก่อนหน้า [17] ทั้งนี้สังเกตได้ว่าอนุภาคของไม้และเส้นใยไม้เกิดการฝังตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง PE (ดังแสดงในวงกลมรูปที่ 4.4 (b)) ส่งผลให้มีโอกาสที่เนื้อเมทริกซ์ที่ทำหน้าที่ในการถ่ายเทแรงสามารถรับและกระจายแรงได้มากขึ้น



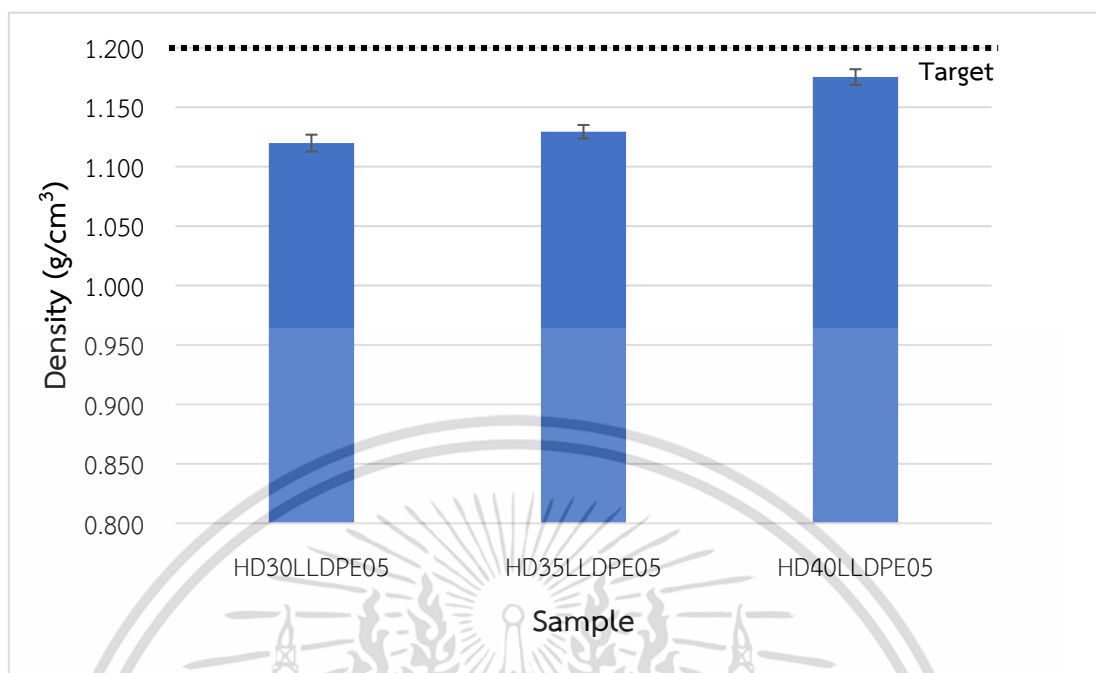
(a) HD30LLDPE05

(b) HD40LLDPE05

รูปที่ 4.4 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของผงไม้และเส้นใยไม้ในพอลิเมอร์ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากสูตร (a) HD30LLDPE05 และ (b) HD40LLDPE05 ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

การศึกษาผลของอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR(LLDPE) เท่ากับ 55/30/5, 55/35/5 และ 55/40/5 เป็นอัตราส่วนที่ปริมาณผงไม้และ PCR (LLDPE) คงที่ และมีการปรับเปลี่ยนเฉพาะ rHDPE ในไม้ WPC แสดงผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของไม้ WPC ดังรูปที่ 4.5 พบว่าปริมาณ rHDPE เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของไม้ WPC มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณผงไม้ 55 ส่วน (ใน 100 ส่วนขององค์ประกอบเฉพาะผงไม้ร่วมกับพอลิเมอร์) หากพอลิเมอร์เมทริกซ์มีปริมาณไม่มากพอที่สามารถล้อมรอบผงไม้ได้ทั้งหมด ทำให้มีโอกาสเกิดช่องว่างในไม้เพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวข้างต้นในหัวข้อที่ 4.2 การเพิ่ม rHDPE ส่งผลให้มีพอลิเมอร์เมทริกซ์ไปห่อหุ้มอนุภาคผงไม้และเส้นใยไม้ได้มากขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงไม้และเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์ในระบบน้อยลง ตามผลการทดลอง SEM ในรูปที่ 4.4 ดังนั้นความหนาแน่นของไม้ WPC จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ rHDPE ที่เพิ่มขึ้น จากการลดช่องว่างในไม้ WPC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

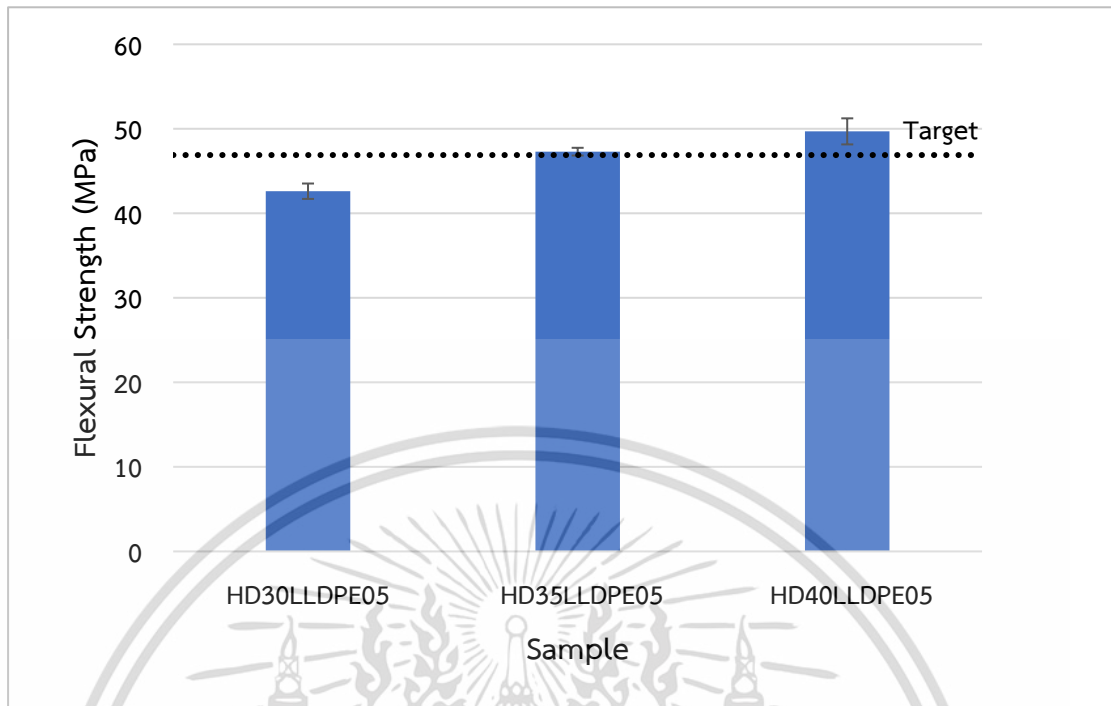


* เส้นประแสดงถึงค่าเป้าหมายที่โรงงานกำหนด (Target)

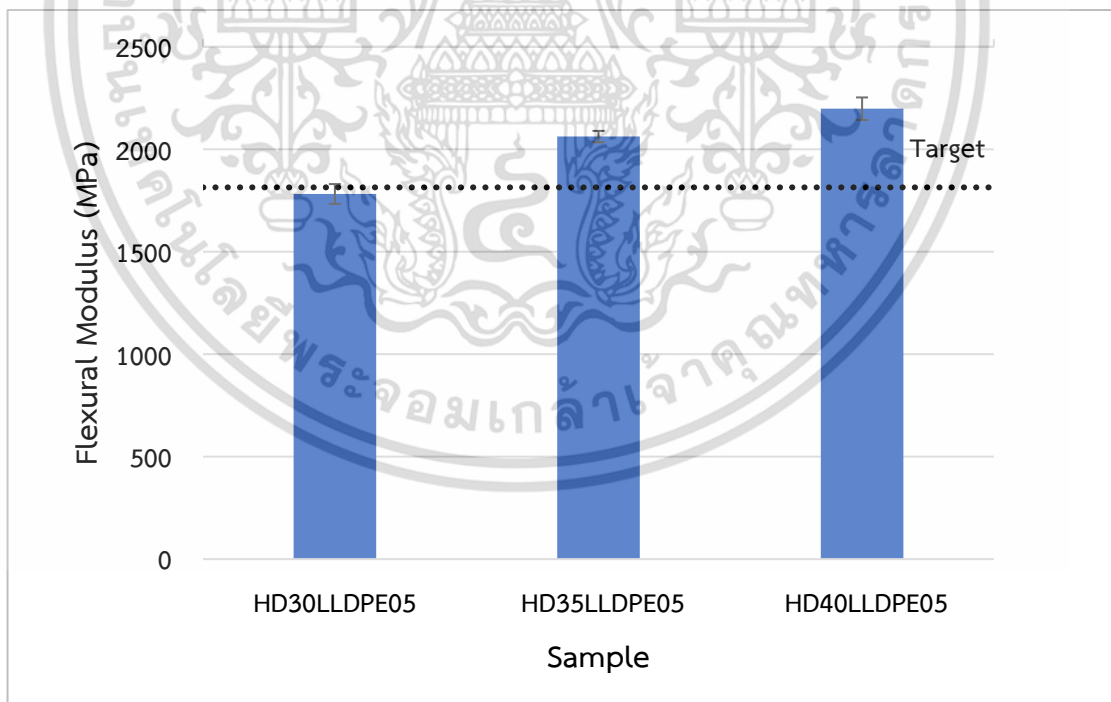
รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ฝงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน

การศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ WPC แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงโค้ง มอดุลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทก แสดงดังรูปที่ 4.6-4.8 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มปริมาณ rHDPE ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากสูตร HD40LLDPE05 ที่ให้สมบัติเชิงกลผ่านเป้าหมายที่กำหนดในทุกสมบัติ (เส้นประ) เป็นผลเนื่องจาก พอลิเมอร์เมทริกซ์มีปริมาณมากในการล้อมรอบอนุภาคฝงไม้และเส้นใยไม้ได้ ส่งผลให้คอมโพสิตสามารถส่งถ่ายแรงและกระจายแรงไปสู่บริเวณอื่น ๆ ภายในวัสดุไม้ WPC ได้ ดังนั้นเมื่อให้แรงจึงสามารถรับแรงได้ดีกว่าสูตร HD30LLDPE05 และ HD35LLDPE05 ที่มีปริมาณพอลิเมอร์เมทริกซ์น้อยกว่าในการห่อหุ้มอนุภาคของฝงไม้และเส้นใยไม้ (แสดงดังรูปที่ 4.4) เช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้าของ สันสนีย์ เหมาคม และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ [50-51] ที่พบว่าเมื่อสัดส่วนของพอลิเมอร์ต่อเส้นใยธรรมชาติในวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมทริกซ์มีปริมาณมากพอในการล้อมรอบเส้นใยได้ทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

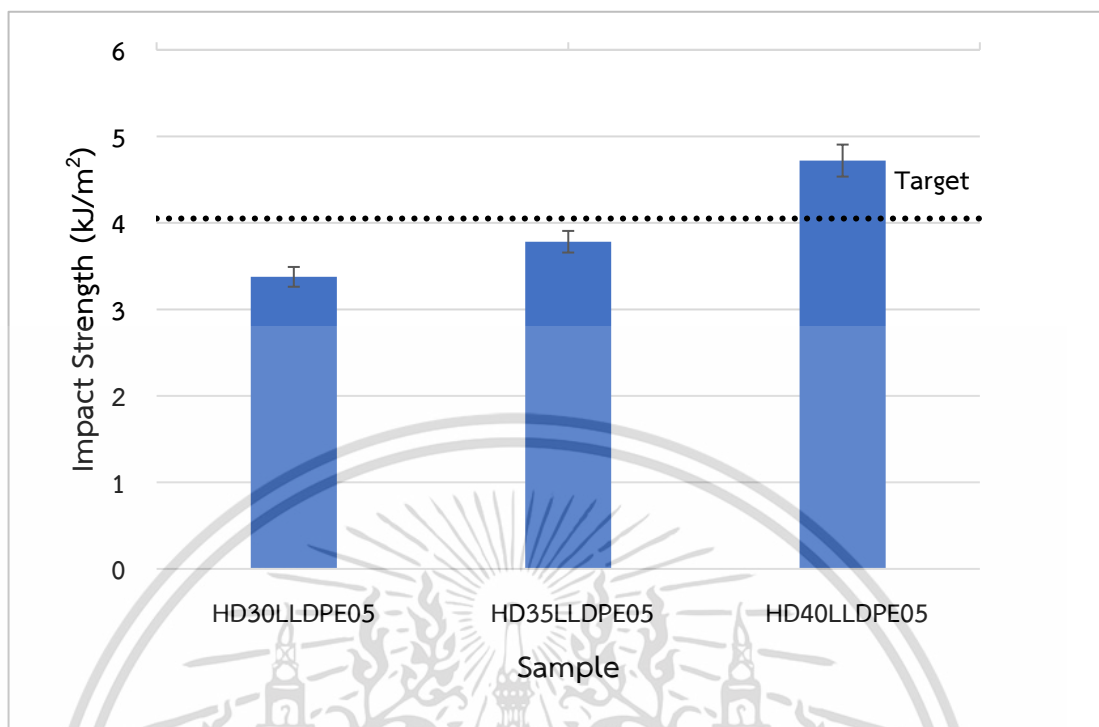


รูปที่ 4.6 ความแข็งแรงโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ฝงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน



รูปที่ 4.7 โมดูลัสโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ฝงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน

จากการศึกษาผลของความแข็งกด แสดงค่าในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความแข็งกดของไม้ WPC อยู่ในช่วง 71-72 เนื่องจากผงไม้เป็นองค์ประกอบที่มีความแข็ง ซึ่งมีค่าความแข็งกดอยู่ในช่วง 68.5-77.2 [52] และเป็นองค์ประกอบหลักมากถึง 55 ส่วน (ใน 100 ส่วนขององค์ประกอบเฉพาะผงไม้รวมกับพอลิเมอร์) ในขณะที่ rHDPE มีค่าความแข็งกดเท่ากับ 61.5 ± 0.9 ซึ่งน้อยกว่าผงไม้ เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ rHDPE อยู่ในช่วง 10 ส่วน (30-40) พบว่าค่าความแข็งที่พื้นผิวไม้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งกดของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/LLDPE ต่างกัน

สูตร	อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/LLDPE (โดยน้ำหนัก)	ความแข็งกด (Shore D)	ค่า เป้าหมาย
HD30LLDPE05	55/30/5	71.3 ± 0.5	68.0 ± 0.5
HD35LLDPE05	55/35/5	72.4 ± 0.6	
HD40LLDPE05	55/40/5	72.3 ± 0.5	

จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/LLDPE เท่ากับ 55/40/5 คือมีพอลิเมอร์ไม่น้อยกว่า 45 ส่วน (ใน 100 ส่วนขององค์ประกอบเฉพาะผงไม้รวมกับพอลิเมอร์) เพราะได้ชิ้นงานที่มีความต่อเนื่องของเมทริกซ์มาก สมบัติความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกและความแข็งกดผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด (ค่าไม่น้อยกว่า 46.9 ± 3.2 MPa, 1814 ± 160 MPa, 4.05 ± 0.5 kJ/m² และ 68 ± 1 ตามลำดับ) เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่นในขั้นตอนต่อไป

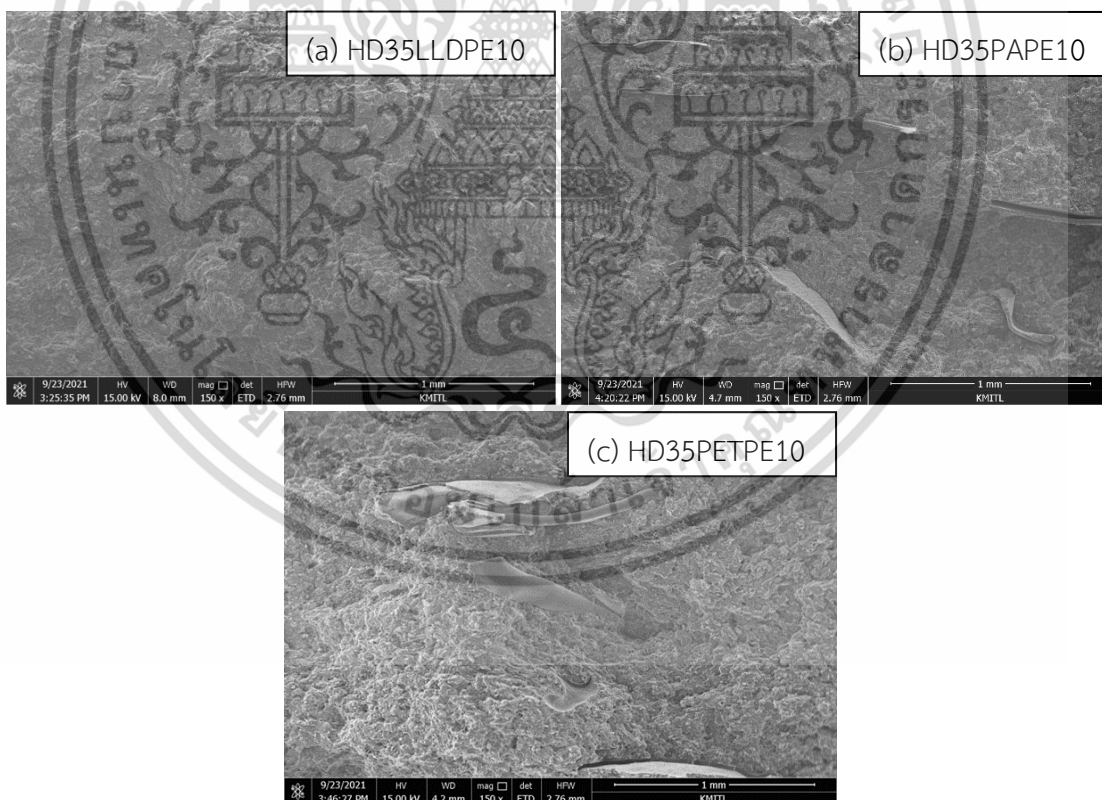
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาผลของชนิดของ PCR และอัตราส่วน rHDPE/PCR ต่อสมบัติของไม้ WPC

การศึกษาผลของ PCR 3 ชนิด ได้แก่ LLDPE, OPA/PE และ PET/PE โดยทำการศึกษาจากสูตรที่มีการใช้พอลิเมอร์ 45 ส่วน (ใน 100 ส่วนขององค์ประกอบเฉพาะผงไม้ร่วมกับพอลิเมอร์) และปรับเปลี่ยนอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/45/0, 55/40/5, 55/35/10, 55/30/15 และ 55/25/20 เพื่อศึกษาผลจากอัตราส่วน rHDPE/PCR

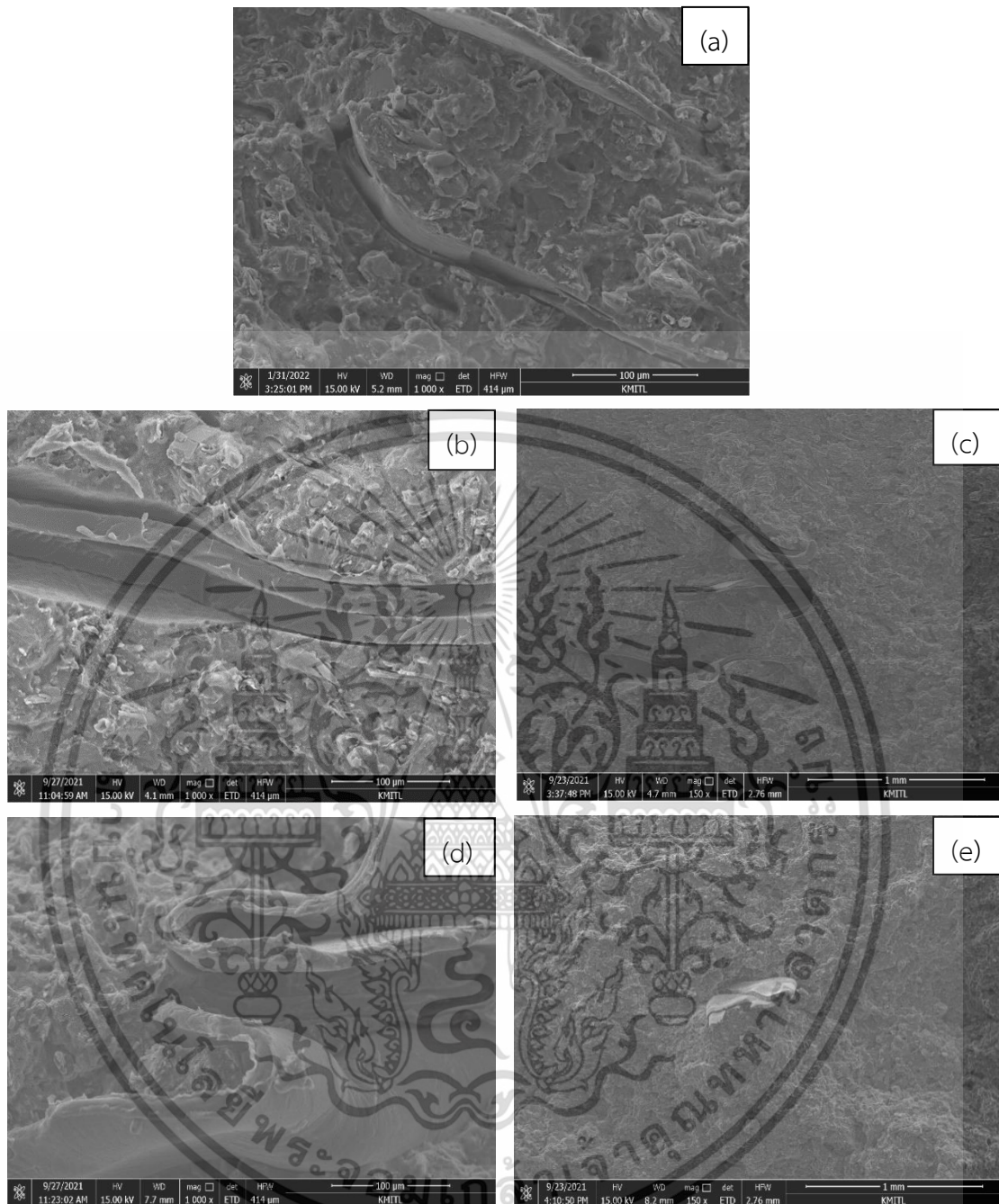
4.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้ WPC ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/35/10 ของ PCR ทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าในสูตร HD35LLDPE10 พอลิเมอร์ rHDPE และ LLDPE หลอมรวมกันได้ดี เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ LLDPE (130°C) มีค่าต่ำกว่า อุณหภูมิการผลิตและขึ้นรูปไม้ WPC (190°C) อย่างไรก็ตามในรูปที่ 4.9(b) และ (c) แสดงให้เห็นถึงการหลอมของ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE จากสูตร HD35PAPE10 และ HD35PETPE10 ตามลำดับ ไม่สมบูรณ์ โดยพบชั้นฟิล์มที่ไม่หลอมของ OPA และ PET สาเหตุมาจากอุณหภูมิของกระบวนการผลิตและขึ้นรูปไม้ WPC ต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกของ OPA (221°C) และ PET (250°C) ทำให้ส่วนของชั้นฟิล์มที่ไม่หลอมของ OPA และ PET ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจายในวัฏภาคต่อเนื่อง rHDPE



รูปที่ 4.9 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานจากสูตร (a) HD35LLDPE10, (b) HD35PAPE10 และ (c) HD35PETPE10 ที่กำลังขยาย 150 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

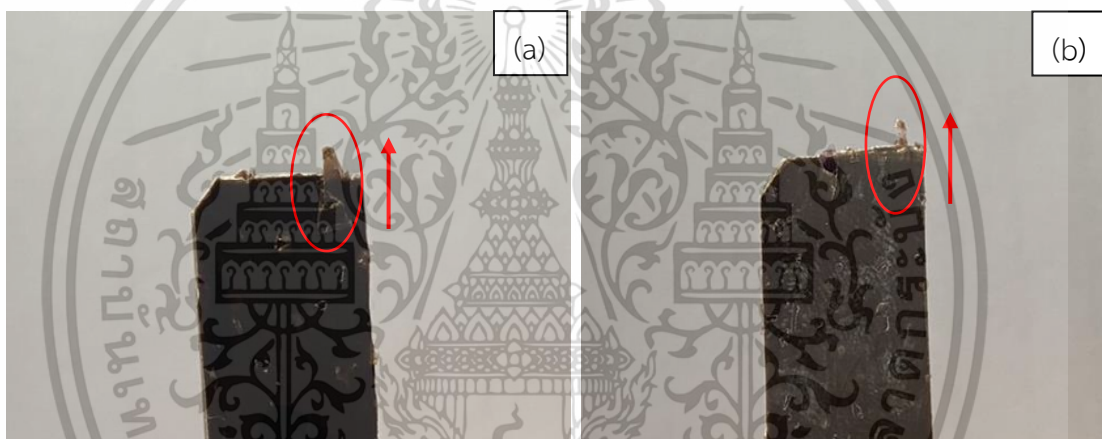


รูปที่ 4.10 SEM micrographs ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน จากสูตร (a) HD35PAPE10 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า, (b-c) HD25PAPE20 ที่กำลังขยาย 1000 และ 150 เท่า ตามลำดับ และ (d-e) HD25PETPE20 ที่กำลังขยาย 1000 และ 150 เท่า ตามลำดับ

การศึกษาสัมพันธวิทยาของไม้ WPC ที่อัตราส่วน ผนัง/พอลิเมอร์ คือ 55/45 จากสูตร HD35PAPE10 (แสดงดังรูปที่ 4.10(a)) พบชั้นฟิล์มที่ไม่หลอมของ OPA และเกิดเป็นช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มกับเมทริกซ์ เพราะชั้นฟิล์มของ OPA และเมทริกซ์ PE มีสภาพขี้ที่ต่างกัน จึงยึดติดกันไม่ดี ซึ่งเป็นการเสียสภาพแบบยึดเกาะระหว่างวัสดุภาค (Adhesive failure) สาเหตุจากความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคต่ำเมื่อเทียบกับความแข็งแรงภายในแต่ละวัฏภาคของชั้นฟิล์มและเมทริกซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร HD25PAPE20 ที่มี PCR ชนิด OPA/PE เพิ่มขึ้นเป็น 20 ส่วน (แสดงดังรูปที่ 4.10(b)) พบว่าชั้นฟิล์มที่ไม่หลอมของ OPA เกิดการพัวพันกันของชั้นฟิล์มมากกว่า 1 ชั้น เกิดเป็นช่องว่างที่ค่อนข้างใหญ่ และยังมีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มกับเมทริกซ์ ซึ่งช่องว่างทั้งหมดเป็นตำหนิใน WPC ที่ส่งผลให้ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของไม้ WPC ลดลง นอกจากนี้ รูปที่ 4.10(c) ของสูตร HD25PAPE20 ที่กำลังขยาย 150 เท่า พบชั้นฟิล์ม OPA บางบริเวณ แสดงว่าชั้นฟิล์ม OPA กระจายตัวไม่ทั่วในพอลิเมอร์เมทริกซ์ rHDPE เนื่องจากกระบวนการผสมที่มีแรงเฉือนต่ำ โดยใน WPC สูตรที่ใช้ PCR ชนิด PET/PE เกิดการกระจายตัวเช่นเดียวกันกับ PCR ชนิด OPA/PE แสดงดังรูปที่ 4.10(d-e)

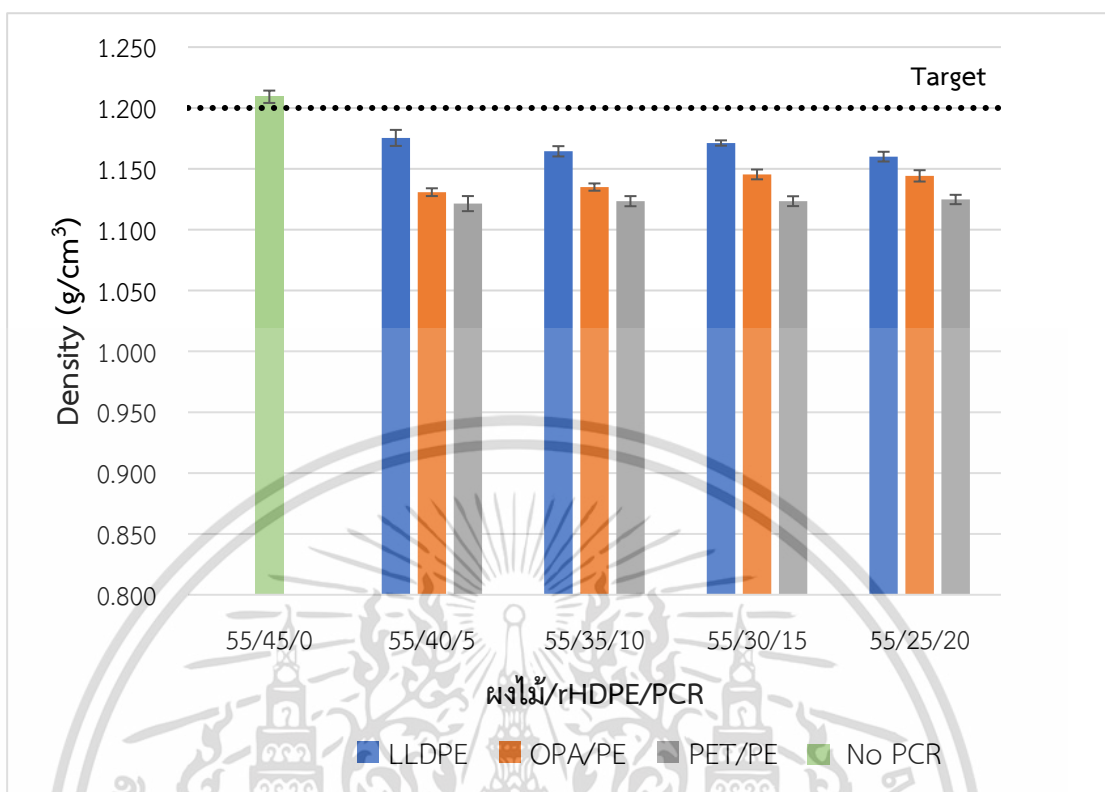
การขึ้นรูปชิ้นงาน WPC ในงานวิจัยนี้ ผลิตจากกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด รูปที่ 4.11 แสดงชิ้นงานหลังจากทดสอบความแข็งแรงกระแทกของสูตร HD30PAPE15 และ HD30PETPE15 พบชั้นฟิล์มของ OPA และ PET ที่ไม่หลอมอยู่ในลักษณะตั้งตรง (ดังแสดงในวงกลม) แสดงว่าฟิล์มของ OPA และ PET จัดเรียงตัวตามแนวการกดอัดในการขึ้นรูปชิ้นงาน WPC



รูปที่ 4.11 ชิ้นงานหลังการทดสอบความแข็งแรงกระแทก จากสูตร (a) HD30PAPE15 และ (b) HD30PETPE15

4.3.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของไม้ WPC

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของไม้ WPC แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าการใช้ PCR ทั้ง 3 ชนิด มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าสูตรที่ไม่ใส่ PCR เป็นผลมาจากช่องว่างในระบบ เนื่องจากกระบวนการผสมที่มีแรงเฉือนต่ำ ดังที่กล่าวข้างต้นในหัวข้อที่ 4.2 อีกทั้งชั้นฟิล์มของ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE ที่หลอมไม่สมบูรณ์ (แสดงดังรูปที่ 4.9(b) และ (c)) ทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มของ OPA และ PET ที่มีขั้วกับเมทริกซ์ PE ซึ่งไม่มีขั้ว และช่องว่างจากเมทริกซ์ PE กับผงไม้ที่มีขั้ว นอกจากนี้ยังมีช่องว่างจากการพัวพันกันของชั้นฟิล์ม OPA และ PET ดังนั้นจากการมีช่องว่างในระบบทั้งหมด ส่งผลให้ความหนาแน่นของไม้ WPC ลดลง ทั้งนี้ความหนาแน่นของไม้ WPC จาก PCR ทั้ง 3 ชนิด มีค่าต่ำกว่าค่าเป้าหมายที่โรงงานกำหนด



รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ฝงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน

4.3.3 การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์

การศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ในไม้ WPC ด้วยเทคนิค DSC ตารางที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบ พบว่า ค่า T_m ของ PE อยู่ในช่วง 128-131°C แสดงว่าขนาดและความสมบูรณ์ของผลึก PE ใน WPC ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน และค่า T_c ของ PE อยู่ในช่วง 116-117°C แสดงว่า PE สามารถเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิพอ ๆ กัน อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสูตร HD45 (ไม่มี PCR) เท่ากับ 58 การลดปริมาณ rHDPE และเพิ่มปริมาณ PCR ใน WPC ส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึกของ PE มีแนวโน้มลดลงไม่ขึ้นกับชนิด PCR

เมื่อพิจารณาไม้ WPC จากสูตร HD35PAPE10 (มี PCR ชนิด OPA/PE 10 ส่วน) ไม่พบค่า T_m ของพอลิเมอร์ PA แม้ว่า PA เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก แต่เนื่องจาก PA ไม่หลอมและอยู่ในลักษณะเป็นแผ่นจึงทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย และการมีปริมาณน้อย ทำให้ไม่พบ T_m ของ PA และนอกจากนี้ยังไม่แสดงค่า T_c นั่นคือ ไม่พบการเกิดผลึกใหม่ของ PA อย่างไรก็ตามในสูตร HD25PAPE20 (มี PCR ชนิด OPA/PE 20 ส่วน) ตรวจสอบพบค่า T_m , T_c และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ของ PA เท่ากับ 221, 190°C และ 20% ตามลำดับ แสดงว่า PA ที่กระจายอยู่มีผลึกและสามารถเกิดผลึกใหม่ได้ สามารถตรวจพบได้เมื่อมีปริมาณใน WPC มากพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ไม้ WPC จากสูตร HD35PETPE10 และ HD25PETPE20 (ใช้ PCR ชนิด PET/PE) ไม่พบค่า T_m ของ PET แม้ว่า PET เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก แต่เมื่อ PET กลายเป็นวัฏภาคกระจายชนิดแผ่น ที่ไม่หลอม มีขนาดเล็กและปริมาณน้อย ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบพบ T_m ของ PET และไม่พบการเกิดผลึกใหม่ของ PET

ตารางที่ 4.3 T_m , T_c และร้อยละความเป็นผลึกของ PE ในไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ฝงไม้/rHDPE/PCR แตกต่างกัน

สูตร	T_c (°C)	T_m (°C)	X_c (%)
HD45	117	130	58
HD35LLDPE10	117	131	54
HD25LLDPE20	117	129	47
HD35PAPE10	117	130	54
HD25PAPE20	116	129	45
HD35PETPE10	117	129	55
HD25PETPE20	116	128	50

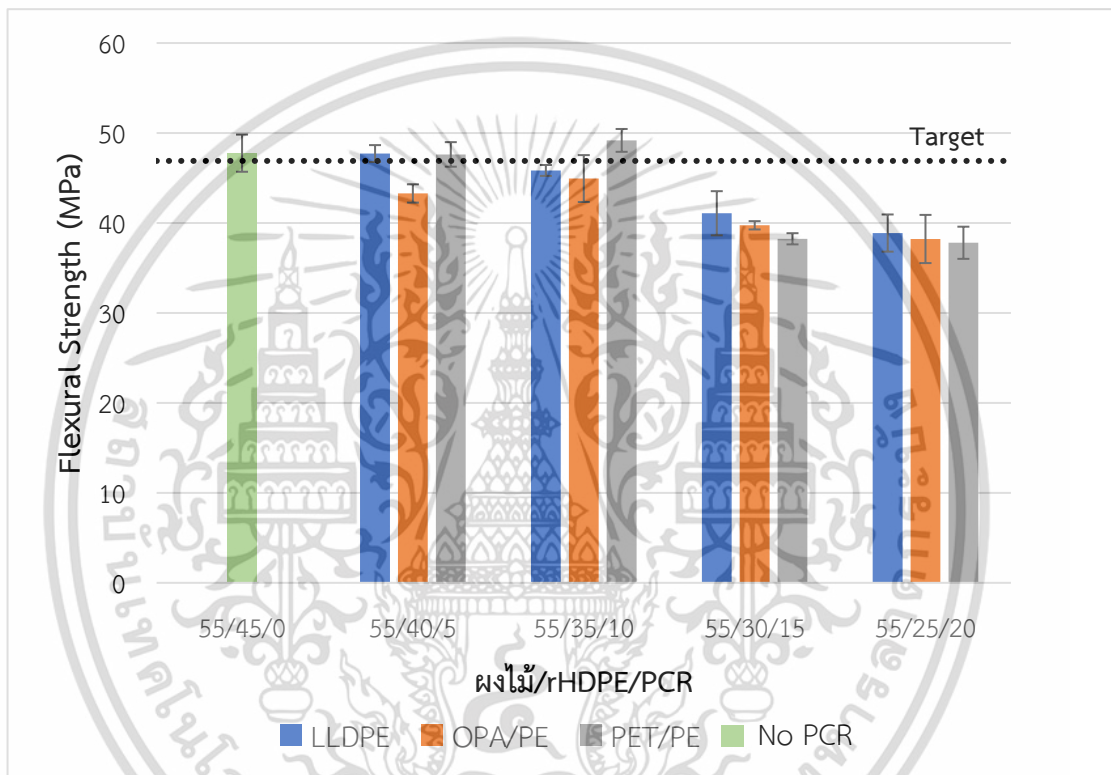
4.3.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ WPC

การศึกษาค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของไม้ WPC แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ พบว่าผลของ PCR ทั้ง 3 ชนิดและผลของอัตราส่วน ฝงไม้/rHDPE/PCR มีลักษณะเป็นแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่ออัตราส่วน ฝงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/40/5 และ 55/35/10 ไม้ WPC มีค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอใกล้เคียงหรือมากกว่าสูตรที่ไม่มี PCR (HD45) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้ PCR ชนิด PET/PE ที่อัตราส่วน 55/35/10 (สูตร HD35PETPE10) เห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 23% เมื่อเทียบกับสูตร HD45 เนื่องจาก PET ที่ไม่หลอมและทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดแผ่นที่สามารถช่วยเสริมแรงให้กับไม้ WPC ได้ ซึ่งค่าสมบัติดังกล่าวผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด

อย่างไรก็ตามพบว่า การใช้ PCR ทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราส่วน ฝงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/30/15 และ 55/25/20 ให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอต่ำกว่าสูตรที่ไม่มี PCR เนื่องจากเมื่อมีปริมาณ rHDPE ลดลง (25-30 ส่วน) และปริมาณ PCR มากขึ้น (15-20 ส่วน) การใช้ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE ทำให้เกิดเป็นรอยตำหนิจากรูหรือช่องว่างระหว่างชั้นฟิล์มที่ไม่หลอมกับเมทริกซ์ rHDPE (แสดงดังรูปที่ 4.10(d) และ (f) ตามลำดับ) การเกิดจุดบกพร่องมาก ทำให้คอมโพสิตไม่สามารถส่งถ่ายแรงและกระจายแรงได้ดี ส่วนการใช้ PCR ชนิด LLDPE แม้ว่า LLDPE จะหลอมรวมกับเมทริกซ์ rHDPE ได้ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ LLDPE และลดปริมาณ rHDPE ทำให้ปริมาณร้อยละความเป็นผลึกของ PE ในไม้ WPC ลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงและมอดุลัสมีค่าต่ำลง ซึ่งค่าสมบัติดังกล่าวไม่ผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด

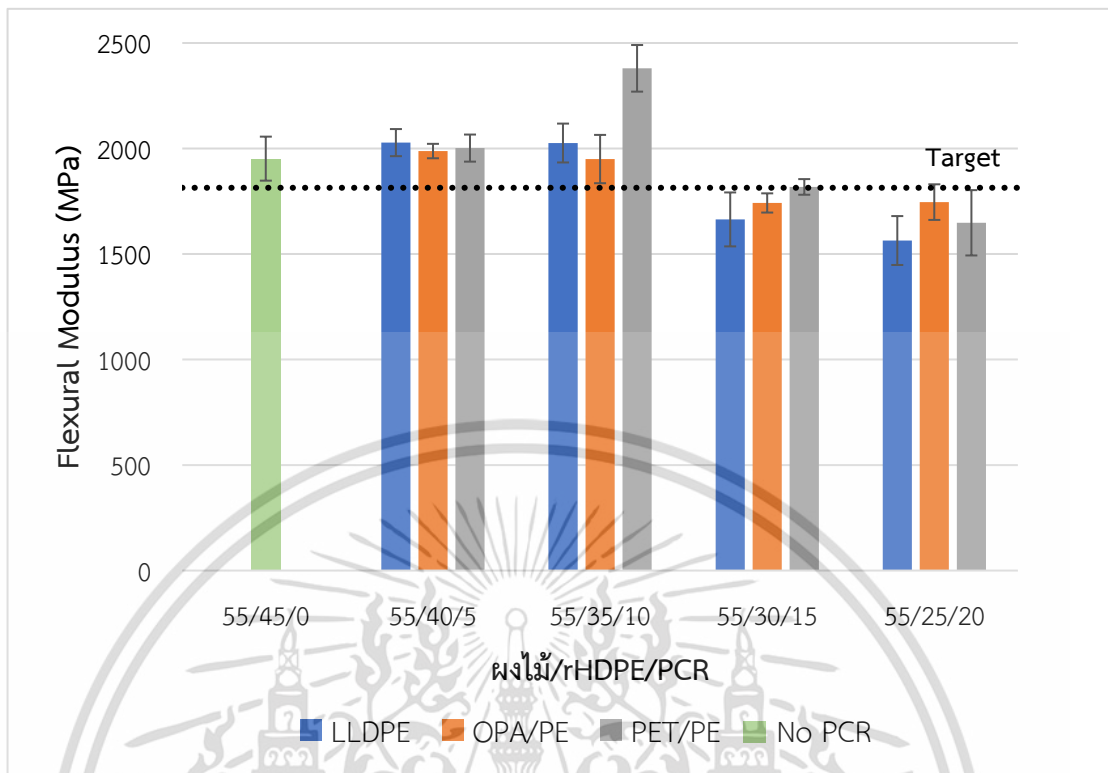
จากการทดสอบค่าความแข็งแรงกระแทก แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกของ WPC จากการใช้ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ ฝงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/35/10 และ 55/30/15 เมื่อเทียบกับสูตร HD45 ซึ่งค่าสมบัติดังกล่าวผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด อย่างไรก็ตาม การใช้ PCR ชนิด LLDPE ไม่พบการเกิดผลึกใหม่ของ PET และไม่พบการเกิดผลึกใหม่ของ PET

PCR เพิ่มขึ้น โดยที่ PCR ชนิด OPA/PE จะเห็นแนวโน้มอย่างชัดเจนเมื่อมีปริมาณ PCR มากพอเมื่อใช้อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/30/15 และ 55/25/20 เนื่องจากการเตรียมชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด ทำให้ส่วนของ PCR ที่ไม่หลอมกลายเป็นสารตัวเติมชนิดแผ่นจัดเรียงตัวตามแนวการกดอัด (แสดงดังรูปที่ 4.9(b) และ (c) และรูปที่ 4.11) จึงส่งผลให้ PCR อยู่ในลักษณะที่ขวางต่อการให้แรงกระทำ เมื่อทำการทดสอบค่าความแข็งแรงกระแทก ชั้นฟิล์มที่หลอมไม่สมบูรณ์ของ OPA และ PET ช่วยต้านทานแรงกระทำเพิ่มขึ้น มีการถ่ายโอนแรงที่สูงขึ้นและการดูดซับพลังงานที่มากขึ้น ส่วนผลของ PCR ชนิด LLDPE ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ใส่ PCR

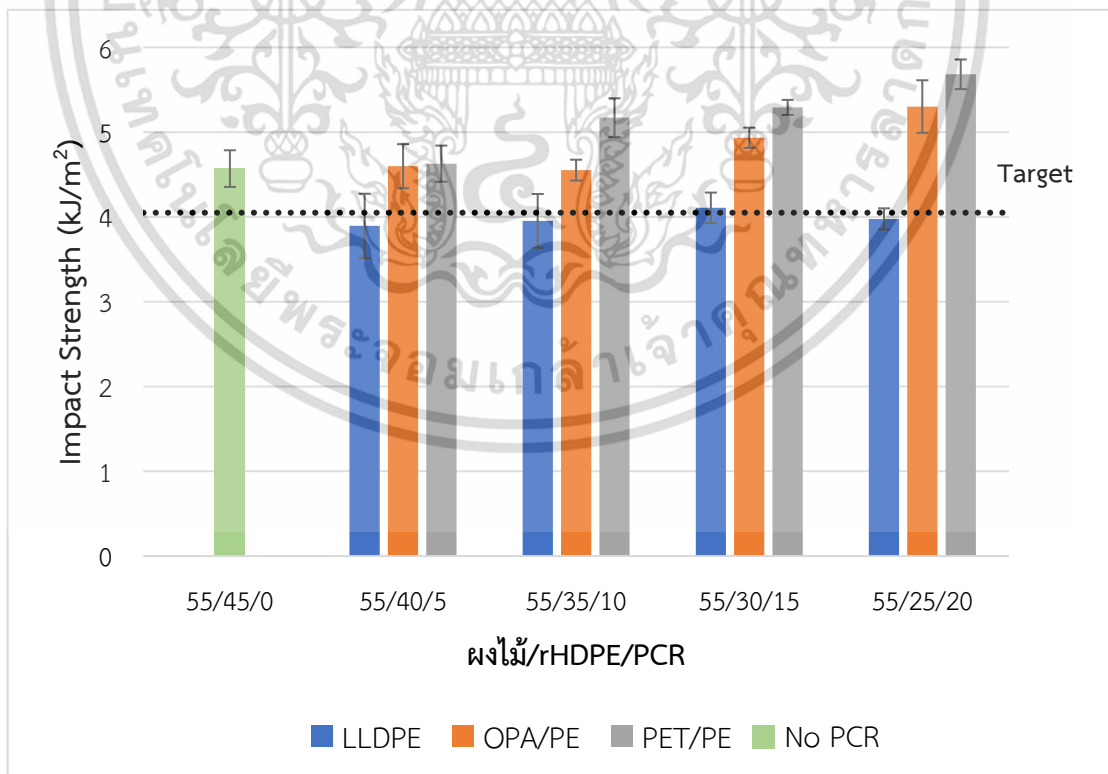


รูปที่ 4.13 ความแข็งแรงโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 โมดูลัสโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผนังไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน



รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ ผนังไม้/rHDPE/PCR ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของความแข็งกต แสดงค่าดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าความแข็งกตในไม้ WPC อยู่ในช่วง 70-72 (Shore D) เนื่องมาจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีความแข็ง และเป็นองค์ประกอบหลัก 55 ส่วน ในขณะที่ rHDPE ค่าความแข็งกต 61.5 ± 0.9 PCR ชนิด LLDPE มีค่าความแข็งกตเท่ากับ 38.6 ± 1.8 ค่าความแข็งกตด้านบนและด้านล่างของ OPA/PE เท่ากับ 44.3 ± 1.3 และ 47.9 ± 0.7 และ PET/PE มีค่าเท่ากับ 46.0 ± 0.8 และ 46.9 ± 1.2 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ซึ่งน้อยกว่าผงไม้ เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ rHDPE/PCR (เฉพาะในส่วนของพอลิเมอร์) ทั้ง 3 ชนิด อยู่ในช่วง 45 ส่วน จึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญบนความแข็งที่พื้นผิว และค่าสมบัติดังกล่าวผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด (68.0 ± 0.5)

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งกตของไม้ WPC

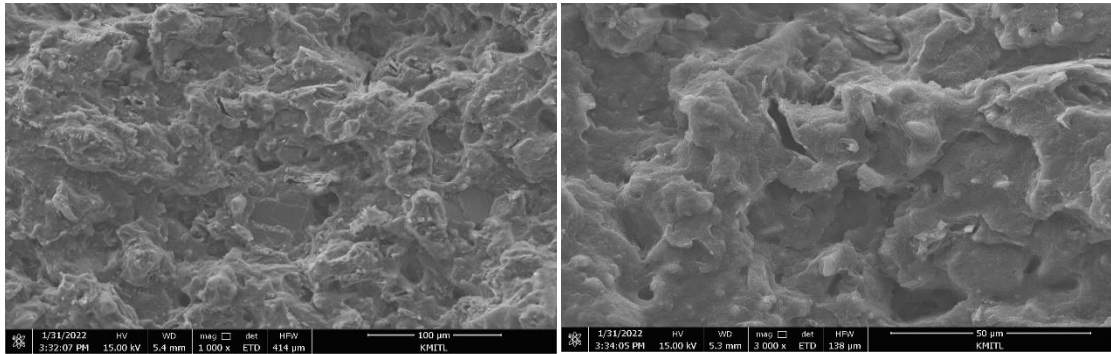
HD45	HD40LLDPE05	HD35LLDPE10	HD30LLDPE15	HD25LLDPE20
72.3±0.5	72.3±0.5	71.9±0.4	70.7±0.5	70.6±0.6
	HD40PAPE05	HD35PAPE10	HD30PAPE15	HD25PAPE20
	71.7±0.5	72.4±0.5	70.6±0.5	71.0±0.6
	HD40PETPE05	HD35PETPE10	HD30PETPE15	HD25PETPE20
	71.6±0.5	72.3±0.5	72.3±0.5	71.7±0.6

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การใช้ PCR 3 ชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ PCR ชนิด LLDPE ที่สามารถหลอมรวมกับเมทริกซ์ rHDPE และ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE ที่หลอมไม่สมบูรณ์กลายเป็นวิฤภาคกระจายทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดแผ่นที่สามารถช่วยเสริมแรงให้กับไม้ WPC ได้ จึงเลือกไม้ WPC ที่อัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/35/10 เพราะมีปริมาณ PCR มากที่สุด (จาก PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE) ที่สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงโค้งงอ มอดุลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกและความแข็งกต) ผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด (ค่าไม่น้อยกว่า 46.9 ± 3.2 MPa, 1814 ± 160 MPa, 4.05 ± 0.5 kJ/m² และ 68 ± 1 ตามลำดับ) ในการศึกษาปัจจัยอื่นในขั้นตอนต่อไป

4.4 การศึกษาผลของปริมาณ CaCO₃ ต่อสมบัติของไม้ WPC

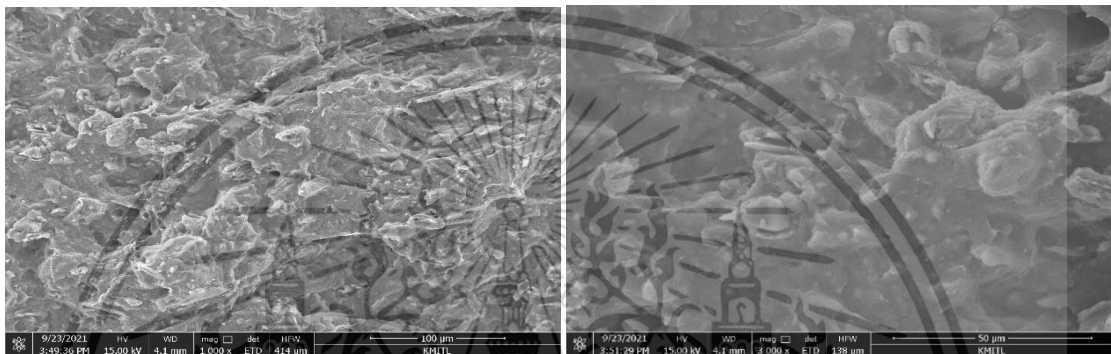
การศึกษาผลของปริมาณ CaCO₃ เนื่องจาก CaCO₃ เป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้ในการลดต้นทุนการผลิต เพราะนอกจากมีราคาถูกและยังมีค่ามอดุลัสที่สูง ด้วยสูตรที่ควบคุมอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/35/10 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณ CaCO₃ เป็น 0-15 ส่วน ใช้อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR/CaCO₃ เท่ากับ 55/35/10/0, 55/35/10/5, 55/35/10/10 และ 55/35/10/15 และเลือกใช้ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE

การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของไม้ WPC จากสูตร PETPEC0 PETPEC10 และ PETPEC15 แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าผงไม้ที่อยู่ในรูปของอนุภาคไม้และเส้นใยไม้ CaCO₃ มีการกระจายตัวค่อนข้างดีทั่วทุกบริเวณ



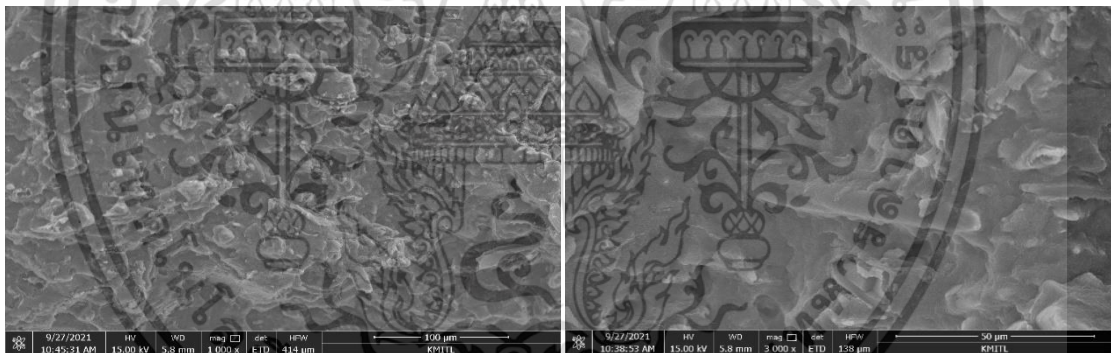
(a) PETPECO กำลังขยาย 1000 เท่า

(b) PETPECO กำลังขยาย 3000 เท่า



(c) PETPEC10 กำลังขยาย 1000 เท่า

(d) PETPEC10 กำลังขยาย 3000 เท่า



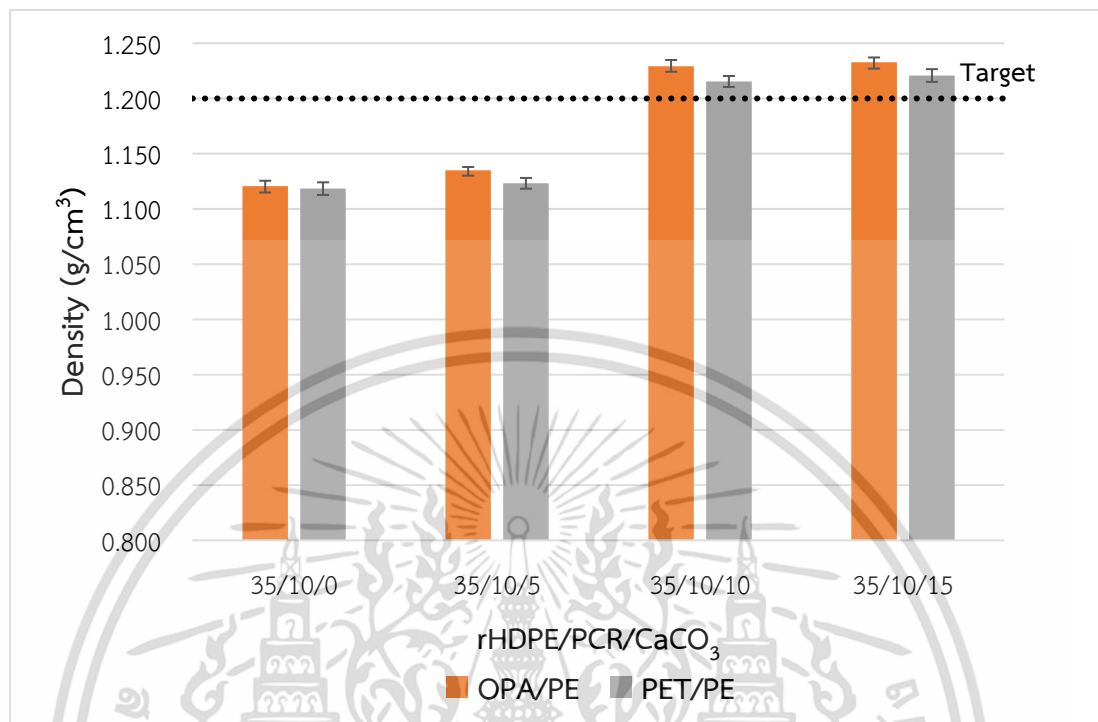
(e) PETPEC15 กำลังขยาย 1000 เท่า

(f) PETPEC15 กำลังขยาย 3000 เท่า

รูปที่ 4.16 SEM micrographs ของพื้นผิวที่แตกหักบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานไม้ WPC สูตร (a-b) PETPECO, (c-d) PETPEC10 และ (e-f) PETPEC15 ที่มีปริมาณ CaCO_3 แตกต่างกัน

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของไม้ WPC แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าการใช้ CaCO_3 ที่ 5 ส่วน ไม้ส่งผลต่อความหนาแน่นของไม้ WPC ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ CaCO_3 10-15 ส่วน ส่งผลทำให้ ความหนาแน่นของไม้ WPC มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการผสมที่มีแรงเฉือนต่ำ ทำให้เกิดการ แตกกระจายตัวของผงไม้ไม่เกิดเป็นช่องว่าง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อที่ 4.2 อีกทั้งผลจาก ช่องว่างที่เพิ่มขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคของ CaCO_3 เอง ที่อาจมีโอกาסקะกันเป็นกลุ่มก้อน จากความมีขี้ของ CaCO_3 ทำให้อันตรกิริยาระหว่าง CaCO_3 กับ CaCO_3 มีมากกว่า CaCO_3 กับ เมทริกซ์ PE ซึ่งไม่มีขี้ ซึ่งผลของรอยตำหนิยังเป็นปัจจัยหลักให้ผลไม่เป็นไปตามทฤษฎี อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 10-15 ส่วน ค่าความหนาแน่นของไม้ WPC เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของ CaCO_3 มีค่าเท่ากับ 2.710 g/cm^3 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณที่มีความหนาแน่นสูงเข้าไปในระบบ ส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของไม้ WPC มีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าสมบัติดังกล่าวผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ rHDPE/PCR/CaCO₃ ต่างกัน

การศึกษา T_m , T_c และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ในไม้ WPC จาก PCR ชนิด PET/PE แสดงค่าดังตารางที่ 4.5 พบว่า PE ใน WPC มีค่า T_m อยู่ในช่วง $129-130^\circ\text{C}$ และค่า T_c อยู่ที่ 117°C ค่าร้อยละความเป็นผลึกของไม้ WPC ทุกสูตรอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 54-55 แสดงให้เห็นว่า CaCO_3 (ปริมาณ 5-15 ส่วน) ไม่รบกวนการเกิดผลึกของ PE จึงไม่ส่งผลต่อ T_m , T_c และปริมาณผลึกของ PE

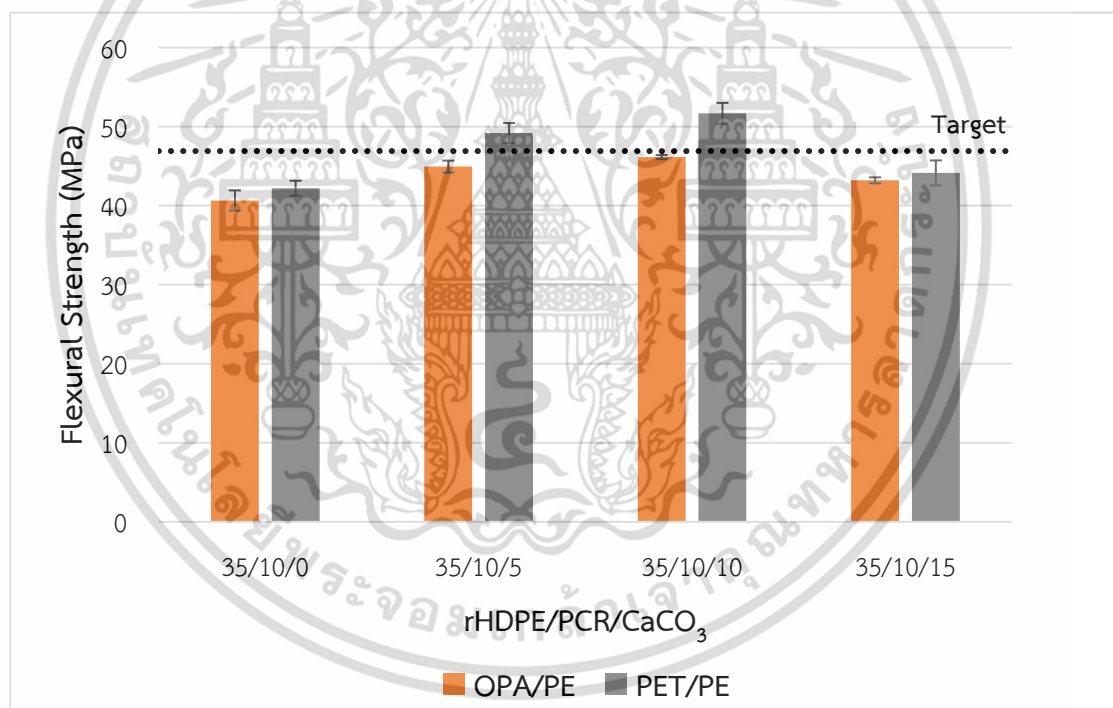
ตารางที่ 4.5 T_m , T_c และร้อยละความเป็นผลึกของ PE ในไม้ WPC เมื่อปริมาณ CaCO_3 แตกต่างกัน

สูตร	T_c ($^\circ\text{C}$)	T_m ($^\circ\text{C}$)	X_c (%)
PETPEC00	117	130	54
PETPEC05	117	129	55
PETPEC10	117	130	54
PETPEC15	117	130	55

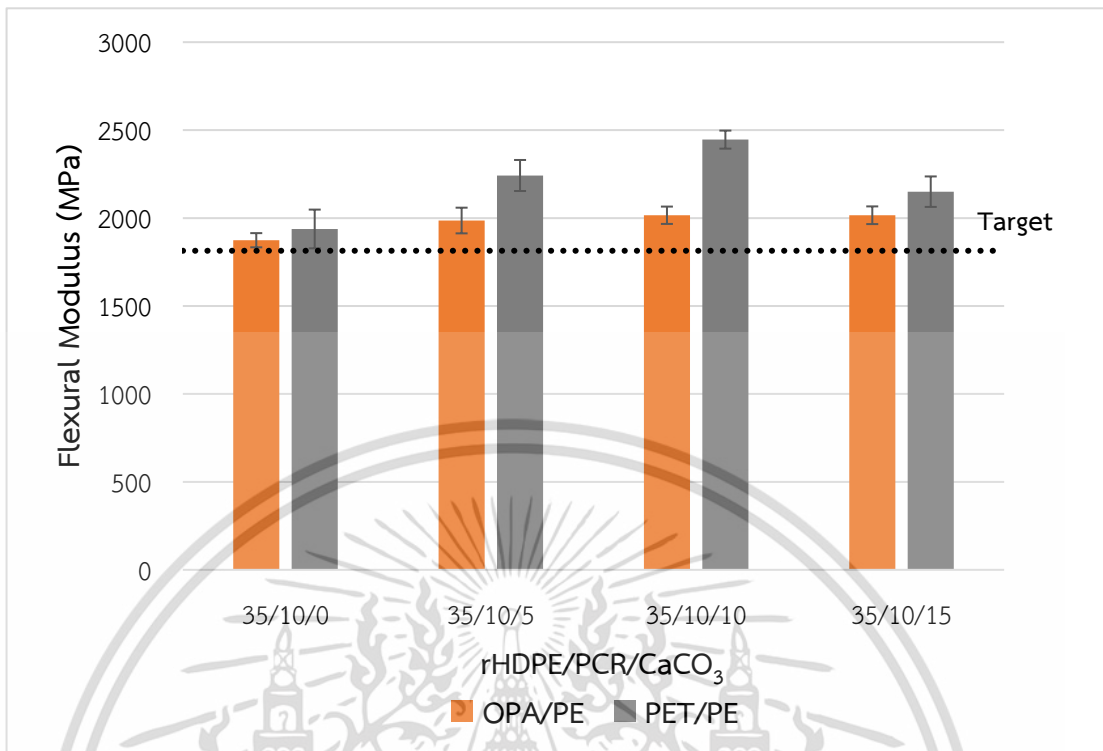
การศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ WPC ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR/CaCO₃ เท่ากับ 55/35/10/0, 55/35/10/5, 55/35/10/10 และ 55/35/10/15 ของ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE ผลการทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทก แสดงดังรูปที่ 4.18-4.20 ตามลำดับ พบว่าความแข็งแรงโค้งงอและโมดูลัสโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ที่ 5-10 ส่วน เนื่องจาก CaCO_3 เป็นอนุภาคของแข็งที่มีค่าโมดูลัส (70 GPa) สูงกว่าผงไม้ (9.07 GPa) และ rHDPE (0.22 GPa) ได้เข้าไปแทรกตัวระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ และขัดขวางเอกสารถึงเป็นเอกสารถึงสว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างมากขึ้น อีกทั้งมีส่วนช่วยให้การถ่ายโอนพลังงานจากเมทริกซ์ไปยังไม้ได้ ซึ่งเกิดขึ้นกับ PCR ทั้ง 2 ชนิด (OPA/PE และ PET/PE) และค่าสมบัติดังกล่าวผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่ม CaCO_3 มากถึง 15 ส่วน ส่งผลให้ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอลดลง เนื่องจากมีโอกาสเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เพิ่มขึ้น จากช่องว่างที่เพิ่มขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ CaCO_3 เอง ที่อาจมีโอกาสเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนจากความชื้นของ CaCO_3 ทำให้อันตรกิริยาระหว่าง CaCO_3 กับ CaCO_3 มีมากกว่า CaCO_3 กับเมทริกซ์ PE ซึ่งไม่มีขี้ ทำให้ CaCO_3 กระจายตัวไม่ดี จึงมีโอกาสเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ CaCO_3 กับเมทริกซ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การกระจายแรงไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นรอยตำหนิที่ส่งผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของ WPC [54-57] อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของ CaCO_3 15 ส่วน จาก PCR ทั้ง 2 ชนิด ไม่แตกต่างจากสูตรที่ไม่เติม CaCO_3

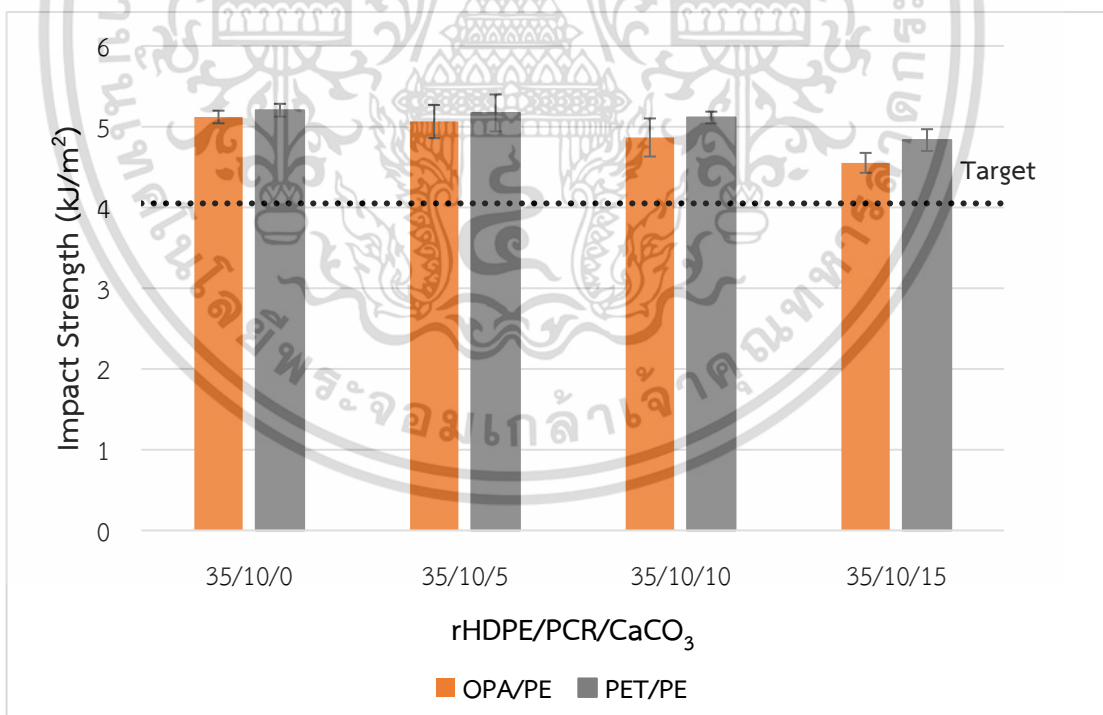
จากการทดสอบค่าความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ที่ 5-15 ส่วน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกอยู่ในช่วงเดียวกันคือ 4.6-5.2 kJ/m^2 ของ PCR ทั้ง 2 ชนิด เนื่องจาก WPC มีปริมาณร้อยละความเป็นผลึกของ PE ใกล้เคียงกันในทุกสูตร จึงส่งผลให้พอลิเมอร์สามารถรับและส่งผ่านแรงกระแทกได้ดีพอ ๆ กัน



รูปที่ 4.18 ความแข็งแรงโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ rHDPE/PCR/ CaCO_3 ต่างกัน



รูปที่ 4.19 มอดุลัสโค้งงอของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ rHDPE/PCR/CaCO₃ ต่างกัน



รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC เมื่ออัตราส่วนของ rHDPE/PCR/CaCO₃ ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของความแข็งกด แสดงค่าดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งกดในไม้ WPC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของไม้ WPC เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 มีมอดูลัสและความแข็งมากกว่าผงไม้และ rHDPE ซึ่งค่าสมบัติดังกล่าวผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด (68.0 ± 0.5)

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งกดของไม้ WPC เมื่อปริมาณ CaCO_3 แตกต่างกัน

	PAPEC0	PAPEC5	PAPEC10	PAPEC15
ความแข็งกด (Shore D)	70.6 \pm 0.5	72.4 \pm 0.5	73.3 \pm 0.5	73.4 \pm 0.5
	PETPEC0	PETPEC5	PETPEC10	PETPEC15
	70.7 \pm 0.5	72.3 \pm 0.5	73.1 \pm 0.4	73.3 \pm 0.5

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การใส่ CaCO_3 ที่ 10 ส่วน ส่งผลให้ความแข็งแรงของ WPC ดีขึ้น จึงเลือกสูตร PAPEC10 และ PETPEC10 ที่มีอัตราส่วนของ ผงไม้/rHDPE/PCR/ CaCO_3 เท่ากับ 55/35/10/10 ที่สมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น) และสมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงโค้งงอ มอดูลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกและความแข็งกด) ผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด (ค่าไม้ไม่น้อยกว่า 1.200 g/cm^3 , $46.9 \pm 3.2 \text{ MPa}$, $1814 \pm 160 \text{ MPa}$, $4.05 \pm 0.5 \text{ kJ/m}^2$ และ 68 ± 1 ตามลำดับ) ในการนำไปผลิตเพื่อประกอบเป็นคานบนของพาเลทและทดสอบผลของการใช้งานจริงต่อไป

4.5 การทดสอบการใช้งานจริงของพาเลทไม้

การทดสอบการใช้งานจริงของพาเลทไม้ โดยเลือกสูตร PAPEC10 และ PETPEC10 มาขึ้นรูปให้มีขนาด $100 \times 1250 \times 15 \text{ mm}^3$ และประกอบเป็นคานบนของพาเลท ขนาด $1100 \times 1250 \times 150 \text{ mm}^3$ แล้วทำการทดสอบความแข็งแรงกดอัด (Compression strength) การทดสอบการตกกระแทก (Drop test) การทดสอบการดัดโค้ง (Bending test) และการทดสอบการวางซ้อนทับ (Stacking test) ที่ 1 และ 2 ชั้น เป็นเวลา 2 เดือน (แสดงดังรูปที่ 4.21)



รูปที่ 4.21 การทดสอบพาเลทไม้โดยวางซ้อนทับ (Stacking test)

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเปรียบเทียบสมบัติการโค้งงอของไม้จริงและไม้ WPC (ที่มี PCR เป็นองค์ประกอบ) โดยค่ามอดูลัสโค้งงอของไม้ WPC อยู่ในช่วงน้อยกว่าไม้จริงอย่างมาก อย่างไรก็ตามค่าไม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงโค้งงออยู่ในเกณฑ์ที่ดี จากค่าสมบัติดังกล่าวจึงทำการผลิตพาเลทไม้ WPC โดยใช้ไม้ WPC เพียง 4 แผ่น เพื่อคงความแข็งแรงของพาเลทที่ผลิตจากไม้จริงที่มีมากกว่าใช้ไม้ WPC เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักผ่านเกณฑ์กำหนดของการผลิตพาเลทไม้ได้ ซึ่งการใช้ไม้ WPC 4 แผ่น คือจำนวนแผ่นที่มากที่สุดที่สามารถใช้แล้วให้ค่าสมบัติการรับน้ำหนักผ่านเกณฑ์กำหนด โดยโครงสร้างพาเลทมีตำแหน่งของการวางไม้ WPC ที่ 2, 3, 6 และ 7 เป็นตำแหน่งที่ผ่านการทดสอบว่าเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ส่งผลต่อความเสียหายจากแรงกดน้อยในโครงสร้างของพาเลทเมื่อรับน้ำหนัก เมื่อเทียบกับตำแหน่งขอบและตำแหน่งกลางสุด ซึ่งสมบัติผ่านเกณฑ์การรับน้ำหนักของพาเลทไม้

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบสมบัติการโค้งงอของไม้จริงและไม้ WPC

สมบัติ	ไม้จริง*	ไม้ WPC (มี PCR เป็นองค์ประกอบ)	หน่วย
ความแข็งแรงโค้งงอ	49-53	47-52	MPa
มอดุลัสโค้งงอ	8000-11600	1814-2446	MPa

หมายเหตุ: * ข้อมูลที่โรงงานทำการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า พาเลทไม้ WPC ทั้ง 2 สูตร สามารถนำไปใช้งานได้จริงและสมบัติผ่านเกณฑ์กำหนดของการผลิตเป็นพาเลทไม้ และจากไม้จริง 1 แผ่นหนัก 1 kg, ไม้ WPC 1 แผ่นหนัก 2.2 kg (เป็น PCR 0.190 kg), น้ำหนักไม้จริงจากส่วนของสตริงเกอร์ 10 kg และน้ำหนักรวมของพาเลทไม้ WPC 1 อันเท่ากับ 23 kg เมื่อใช้ไม้ WPC 4 แผ่นหนัก 8.8 kg สามารถใช้ PCR 0.760 kg ดังนั้นสามารถใช้ PCR 8.64% ต่อการผลิตไม้ WPC 1 แผ่น และสามารถใช้ PCR 3.30% ต่อการผลิตพาเลทไม้ WPC 1 อัน

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการใช้งานจริงจากสูตร PAPEC10 และ PETPEC10

สูตร	Compression strength	Drop test	Bending test	Stacking test
ค่าเป้าหมายที่โรงงานกำหนด	>8500 kgf	ไม่พบความเสียหายทางสายตา	ไม่พบความเสียหายทางสายตาบนตัวอย่างที่ใช้แรง 1875 kgf	การซ้อนทับ 1 และ 2 ชั้น โกงตัวไม่เกิน 10 mm
PAPEC10	>8500 kgf	ไม่พบความเสียหายทางสายตา	ไม่พบความเสียหายทางสายตาบนตัวอย่างที่ใช้แรง 1875 kgf	การซ้อนทับ 1 และ 2 ชั้น โกงตัว 7-10 mm
PETPEC10	>8500 kgf	ไม่พบความเสียหายทางสายตา	ไม่พบความเสียหายทางสายตาบนตัวอย่างที่ใช้แรง 1875 kgf	การซ้อนทับ 1 และ 2 ชั้น โกงตัว 7-10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมไม้ WPC จาก PCR 3 ชนิด ได้แก่ LLDPE, OPA/PE และ PET/PE ซึ่งเป็นเศษของเสียจากโรงงานที่ยังไม่ผ่านการใช้งานโดยผู้บริโภค เพื่อใช้เป็นแบบจำลองในการศึกษา ผสมกับ rHDPE และผงไม้ที่มาจากขี้เลื่อย เพื่อผลิตเป็นไม้ WPC ที่สามารถนำไปประกอบเป็นคานบนของพาเลท โดยตั้งเป้าหมายให้ได้สมบัติของไม้ WPC ผ่านเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/30/5, 55/35/5 และ 55/40/5 ของ PCR ชนิด LLDPE ต่อสมบัติของไม้ WPC พบว่าการเพิ่มปริมาณ rHDPE ทำให้ความหนาแน่น ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ และความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้นที่สามารถห่อหุ้มอนุภาคของไม้และเส้นใยไม้ได้ ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงไม้และเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์ในระบบน้อยลง ส่งผลให้คอมโพสิตสามารถส่งถ่ายแรงและกระจายแรงได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ rHDPE 30-40 ส่วน (ใน 100 ส่วนขององค์ประกอบเฉพาะผงไม้รวมกับพอลิเมอร์) ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญบนความแข็งที่พื้นผิวของ WPC ซึ่งไม้ WPC สูตร HD40LLDPE05 (มีอัตราส่วนของ ผงไม้/พอลิเมอร์ เท่ากับ 55/45 ส่วน) ให้ค่าสมบัติผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด

2. การศึกษาผลของ PCR 3 ชนิด ได้แก่ LLDPE, OPA/PE และ PET/PE โดยทำการศึกษาจากสูตรที่มีการใช้พอลิเมอร์ 45 ส่วน (ใน 100 ส่วนขององค์ประกอบเฉพาะผงไม้รวมกับพอลิเมอร์) และปรับเปลี่ยนอัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/45/0, 55/40/5, 55/35/10, 55/30/15 และ 55/25/20 เพื่อศึกษาผลจากอัตราส่วน rHDPE/PCR ต่อสมบัติของไม้ WPC พบว่า การใช้ PCR 3 ชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ PCR ชนิด LLDPE ที่สามารถหลอมรวมกับเมทริกซ์ rHDPE และ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE ที่หลอมไม่สมบูรณ์กลายเป็นวิฎาภาคระกายทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดแผ่นที่สามารถช่วยเสริมแรงให้กับไม้ WPC ได้ ที่อัตราส่วน ผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/40/5 และ 55/35/10 ของ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE ให้ค่าสมบัติเชิงกลผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด จึงเลือกไม้ WPC ที่อัตราส่วนของผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/35/10 เพราะมีปริมาณ PCR มากที่สุด (จาก PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE) ที่สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอ ความแข็งแรงกระแทกและความแข็งกด) ผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนดในการศึกษาปัจจัยอื่นในขั้นตอนต่อไป

3. การศึกษาผลของปริมาณ CaCO_3 ที่ 0-15 ส่วน ที่อัตราส่วนของผงไม้/rHDPE/PCR เท่ากับ 55/35/10 โดยใช้ PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 10-15 ส่วน ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของไม้ WPC มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณ CaCO_3 ไม่รบกวนการเกิดผลึกของ PE ความแข็งแรงโค้งงอและโมดูลัสโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 5-10 ส่วน เนื่องจาก CaCO_3 เป็นอนุภาคของแข็งและค่าโมดูลัสสูง ที่มีส่วนช่วยการปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระทำเชิงกล แต่การใช้ CaCO_3 15 ส่วน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและโมดูลัสโค้งงอลดลงเล็กน้อย เนื่องจากรอยตำหนิใน WPC ค่าความแข็งแรงกระแทกของไม้ WPC ทุกสูตรอยู่ในช่วงเดียวกัน และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงในไม้ WPC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มมากขึ้น จึงเลือกสูตร PAPEC10 (PCR ชนิด OPA/PE) และ PETPEC10 (PCR ชนิด PET/PE) ที่มีอัตราส่วนของ ผงไม้/ rHDPE/PCR/ CaCO_3 เท่ากับ 55/35/10/10 ที่สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลผ่านเป้าหมายที่โรงงานกำหนด ในการนำไปผลิตเพื่อประกอบเป็นคานบนของพาเลทและทดสอบผลของการใช้งานจริงต่อไป

4. การทดสอบการใช้งานจริงจากสูตร PAPEC10 และ PETPEC10 ด้วยการนำมาประกอบเป็นคานบนของพาเลท ขนาด $1100 \times 1250 \times 150 \text{ mm}^3$ พบว่าทั้ง 2 สูตร สามารถนำไปใช้งานได้จริง และให้สมบัติผ่านค่าเป้าหมายของการผลิตเป็นพาเลทไม้ โดยสามารถใช้ PCR 3.30% ต่อการผลิตพาเลทไม้ WPC 1 อัน

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมไม้ WPC ในการประกอบเป็นคานบนของพาเลท โดยการใช้ผงไม้ที่เหลือจากงานอุตสาหกรรมไม้ rHDPE และ PCR ที่เป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกหลายชั้น โดยไม่ต้องแยกชนิดพลาสติกที่มีอยู่หลายชั้นออกจากกัน ทั้งยังให้สมบัติที่ดีในการผลิตเป็นพาเลทไม้ WPC ซึ่งสามารถลดขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและสามารถสร้างมูลค่าให้กับพลาสติกเหล่านี้ได้ ตอบโจทย์หลักเศรษฐกิจหมุนเวียน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้ PCR ที่มาจากการใช้งานจริงโดยผู้บริโภคในการผลิตพาเลทไม้ WPC
2. ศึกษาการใช้ PCR ชนิดที่มีส่วนประกอบของ อลูมิเนียมฟอยล์/พลาสติก เพราะจากประโยชน์ของการใช้ PCR พบว่า PCR ชนิด OPA/PE และ PET/PE เป็นวิฤภาคกระจายชนิดแผ่น ส่งผลให้ความแข็งแรงของไม้ WPC ดีขึ้น จึงอนุมานได้ว่า PCR ที่มีส่วนประกอบเป็น อลูมิเนียมฟอยล์/พลาสติก มีโอกาสที่จะสามารถนำมาใช้งานในลักษณะเดียวกัน เพื่อใช้ขยะพลาสติกจากบรรจุภัณฑ์ที่มีความหลากหลายมากขึ้นและเพิ่มมูลค่าขยะพลาสติก
3. ศึกษาการปรับเปลี่ยนกระบวนการผสมให้มีแรงกระทำมากขึ้น เพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่าง ๆ ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] อธิพิล แจ้งชัด. 2553. “เอกสารประกอบการสอนวิชาความสัมพันธ์ โครงสร้าง สมบัติ และการใช้งานพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [2] NSM Thailand. 2564. ภัยล่องหนจากไมโครพลาสติก. [Online]. Available : <https://www.nsm.or.th/nsm/index.php/th/node/6114>.
- [3] Wrap. 2018. Redesigning the plastic system. [Online]. Available : <https://wrap.org.uk/taking-action/plastic-packaging>.
- [4] Katharina, K. Markus, S. and Martin, S. 2018. “Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging A Review.” *Recycling*. 3(1) : 1-26.
- [5] Wrap. 2018. Redesigning the plastic system. [Online]. Available : <https://wrap.org.uk/taking-action/plastic-packaging>.
- [6] Katharina, K. Markus, S. and Martin, S. 2018. “Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging A Review.” *Recycling*. 3(1) : 1-26.
- [7] กุลธิดา บรรจงศิริ. 2564. การพัฒนาอย่างยั่งยืน. [Online]. Available : <https://www.ohswa.or.th/17757315/การพัฒนาที่ยั่งยืน-สิ่ง-จับ-ควร-รู้-ep9>.
- [8] A and a packaging. 2015. Circular economy. [Online]. Available : <https://www.aandapackaging.co.uk/how-is-a-circular-economy-different-from-a-linear-economy/>.
- [9] ยุทธนา เจียมตระการ. 2554. ซองลามิเนต. [Online]. Available : <http://www.ftiplastic.com/images/download/86/%E0%B8%89%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%2033%2030%20%E0%B8%81%E0%B8%A2%2054.pdf>.
- [10] Soccalingame, L. Bourmaud, A. Perrin, D. Benezet, J. C. and Bergeret, A. 2015. “Reprocessing of wood flour reinforced polypropylene composites: Impact of particle size and coupling agent on composite and particle properties.” *Polymer Degradation and Stability*. 113(1) : 72-85.
- [11] Teodora, D. Lucian, F. T. and Ferenc, G. 2016. “Environmental impact of sawdust briquettes use – experimental approach.” *Energy Procedia*. 85(1) : 178-183.
- [12] บริษัท สลิส (ประเทศไทย) จำกัด. 2564. พาเลทไม้. [Online]. Available : <http://slistthailand.com/th/%E0%B8%9E%E0%B8%B2%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B8%97%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89>.
- [13] รักชิณา ที่หมาย. 2556. “การศึกษาเพื่อกำหนดกลยุทธ์ในการเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของธุรกิจไม้พาเลท กรณีศึกษา บริษัท PackSys Enterprise Co., Ltd จ.ระยอง.” วิทยานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขงกันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นาเบเซประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] ปิยรัตน์ ศุภสมุทธร. 2563. **เปรียบเทียบคุณสมบัติข้อดี-ข้อเสียของพลาเลทไม้ให้เหมาะแก่การใช้งาน.** [Online]. Available : https://www.vserve.logistics.com/media/vserve2017/file_pdf/20082535034_NA-AUG-Piyarat.pdf.
- [15] กนกอร แสงสุวรรณ. 2553. “ไม้พลาสติกคอมโพสิตจากพอลิโอเลฟินส์และเส้นใยมะพร้าว” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] Leu, S. Y. Tsu, H. Y. Sheng, F. L. and Te, H. Y. 2012. “Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood-plastic composites (WPCs).” *Construction and Building Materials*. 29(1) : 120-127.
- [17] Anatole A. 2007. “Wood-Plastic Composites.” *Library of Congress-in-Publication Data*. 620 : 12-22.
- [18] Miganesult, A. Kouna, P. 2014. “Effect of fiber origin, proportion, and chemical composition on the mechanical and physical properties of wood-plastic composites.” *Wood Chemical Technology*. 34(4) : 241-261.
- [19] Philipp, F. S. Johannes, W. and Andreas, K. 2015. “Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood-Plastic Composites.” *Waste Management*. 46(1) : 76-85.
- [20] Yonny, M. L. Juarez, B. P. Donatian, G. Fabricio, G. G. Fermin, C. M. and Anna, C. T. 2020. “Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products – A sustainable approach for cleaner production in Cuba.” *Journal of Cleaner Production*. 244(1) : 1-10.
- [21] สถาบันพลาสติก (ประเทศไทย). 2564. **Thailand plastics facts and figures 2021.** [Online]. Available : <https://pic.thaiplastics.org/?p=2321>.
- [22] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2561. **การจัดการขยะพลาสติก.** [Online]. Available : https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-05-27_06-47-53_174751.pdf.
- [23] All around plastic. 2562. **PCR ทางเลือกของธุรกิจด้วยวิถีคิดแบบ Circular economy.** [Online]. Available : <https://www.allaroundplastics.com/article/business-tips/2580>.
- [24] SME social planet. 2563. **PCR พลาสติกตอบโจทย์ Circular economy.** [Online]. Available : <https://www.bangkokbanksme.com/en/what-kind-of-plastic-is-good-for-bio-recycling>.

- [25] Amar, K. Mohanty, M. Manjusri, L. T. and Drzal L. T. 2005. **Natural fiber, biopolymers and composites**. 1st ed. Boca Raton : CRC Press.
- [26] Bledzki, A. K. Gassan, J. and Theis S. 1999. “Composites reinforced with cellulose based fiber.” *Polymer Science*. 24(1) : 221-274.
- [27] นงศ์นูล กลิ่นพิกุล. 2557. “การศึกษาแผ่นใยไม้อัดจากเศษซีลี้อยโดยใช้ผลผลิตจากครั้งเป็นตัวอย่าง” วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [28] กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ. 2562. **เอกสารการสอนวิชา Polymer Nanocomposite** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] อธิพิล แจ้งซัด. 2545. “เอกสารประกอบการเรียนการสอนคอมโพสิต.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] ณัฐรณเนตร ชีรฤทธิ์เฉลิม. 2562. “การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตทนแรงกระแทกจาก PP/BaSO₄ สำหรับงานด้านเอกซเรย์” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย. 2559. **คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย**. กรุงเทพฯ : ไอดี ออล. ดิจิตอลพรีนท์.
- [32] ฉกาจ จบนุช. 2556. “การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบจากยูคาลิปตัสและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [33] ไม้เทียม (WPC). 2563. **Wood plasticfloor**. [Online]. Available : <https://www.anqwood.com/wpc>.
- [34] วรวิทย์ พลทัตสะ, วรธรรม อุ่นจิตติชัย, ประเสริฐ วาณิชย์เจริญ และวริญญา โลมรัตน์. 2560. “วัสดุทดแทนไม้จากเศษวัสดุรีไซเคิล” สำนักวิจัยและพัฒนาป่าไม้ กรมป่าไม้.
- [35] พิษญา กิมเฉียง. 2555. “อิทธิพลของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของอะครีโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [36] สมชาย เหลืองสด. 2560. “การผลิตไม้อัดเทียมจากโพลิเอทิลีนผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันสำหรับวิสาหกิจชุมชน.” วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [37] Martins, G. Antunes, F. Mateus, A. and Malca C. 2017. “Optimization of a wood plastic composite for architectural applications.” *Construction and Building Materials*. 12(1) : 203-220.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [38] Rodney, J. and Susan, E. 1992. "Composite Materials from Recycled Multilayer Polypropylene Bottles and Wood Fibers." *Emerging Technologies in Plastics Recycling*. 18(1) : 232-240.
- [39] อาชาไนย บัวศรี. 2559. "การเตรียมวัสดุองค์ประกอบของพอลิโอเลฟินกับผงซีลี้อย." มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำนักหอสมุด.
- [40] อธิพิล แจ้งซัด, อธิพัฒน์ อุณหโชค, พจนีย์ ศรธรรมลี และ วรธรรม อุ๋นจิตติชัย. 2545. "การศึกษาไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยผักตบชวาและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้พอลิเอทิลีน-กราฟท์-มาเลอิกแอนไฮดราตเป็นสารช่วยผสม." หน้า 108-121. ใน **รายงานการประชุมการป่าไม้ ประจำปี 2545**. กรุงเทพฯ ฯ : กลุ่มงานพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้.
- [41] Kamal, B. A. Shusheng, P. and Mark, P. S. 2008. "Dimensional stability and mechanical behavior of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)." *Composites*. 39(1) : 807-815.
- [42] ญัฎฐ์ชญาภา ธนวัฒนาศิริกุล. 2554. "การปรับปรุงความแข็งแรงของไม้พลาสติกจากไม้ปาล์ม" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [43] Blaine, R. L. 2015. **Heat of Fusion of 100% Crystalline Polymer**. [Online]. Available : <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TN048.pdf>.
- [44] American Standard for Testing and Materials. 2007. "Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement : ASTM D792-08." *Annual Book of ASTM standards*. 8(1).
- [45] American Standard for Testing and Materials. 1998. "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials." *Annual Book of ASTM standards*. 8(1) : 145-152.
- [46] American Standard for Testing and Materials. 1992. "Standard Test Method for Impact Resistance for Plastics and Electrical Insulating Material : ASTM D256." *Annual Book of ASTM standards*. 8(3) : 201-210.
- [47] American Standard for Testing and Materials. 1992. "Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness: ASTM D2240." *Annual Book of ASTM standards*. 8(2) : 226-229.
- [48] Autodesk Instructables. 2015. **Make Your Own Pallet**. [Online]. Available : <https://www.instructables.com/Make-your-own-pallet/>.
- [49] Tistr, Report testing and analysis. 2022. JIS 0602-1988 Test Method for Flat Pallets.
- [50] สันสนีย์ เหมาคม และโชคชัย แจ่มอำพร. 2563. "การศึกษาการใช้วัสดุผสมของพอลิพรพิลีนและเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุทดแทนไม้." *วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า*. 18 : 58-69.
- [51] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2543. "ซีลี้อยไม้ผสมกับพีวีซี." *คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [52] Esteves, B. Şahin, S. Ayata, U. Domingos, I. Ferreira, J. and Gürleyen, L. 2021. "Effect of heat treatment on shore-D hardness of some wood species." *BioResources*. 16(1) : 1482-1495.
- [53] Lisperguer, J. Bustos, X. Saravia, Y. Escobar, C. and Venegas, H. 2013. "Efecto de las características de harina de madera en las propiedades físico-mecánicas de termoplasticas de polipropileno reciclado." *Maderas-Cienc Tecnol*. 15(3) : 321-336.
- [54] ชำนาญวิทย์ เป็นวงศ์, วัชรระ ชีวงษ์, สิงห์โต สกุลเขมฤทัย และฉันททิพ สกุลเขมฤทัย. 2559. "ผลของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติยางธรรมชาติ." *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*. 32(2) : 62-75.
- [55] Salama, K. K. Mona, F. A. and Said, M. E. S. 2019. "A comparison between nano calcium carbonate, natural calcium carbonate and converted calcium hydroxide for consolidation." *Scientific Culture*. 5(3) : 35-40.
- [56] บวรกิตต์ เนคมานุรักษ์, ปิยนุช ม่วงทอง และนุอร ชูทอง. 2560. "ผลกระทบของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบชีวภาพพีแอลเอ/พีบีเอทีที่ผ่านการขึ้นรูปซ้ำ." *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร*. 25(2) : 67-79.
- [57] Budiyanoro, C. Sosiati, H. Kamil, B. P. and Fikri, M. L. S. 2018. "The effect of CaCO₃ filler component on mechanical properties of polypropylene." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 432(1) : 012043.

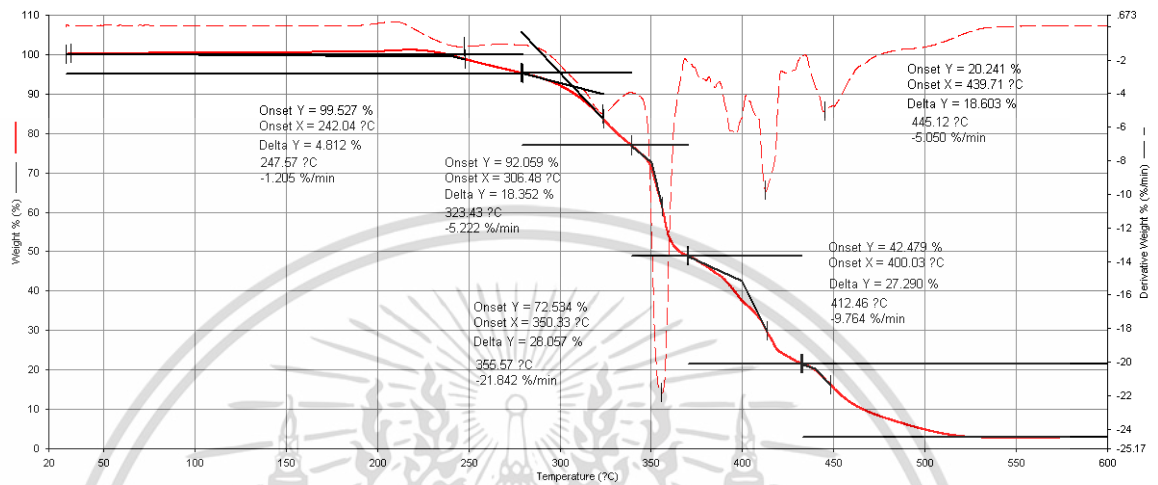


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

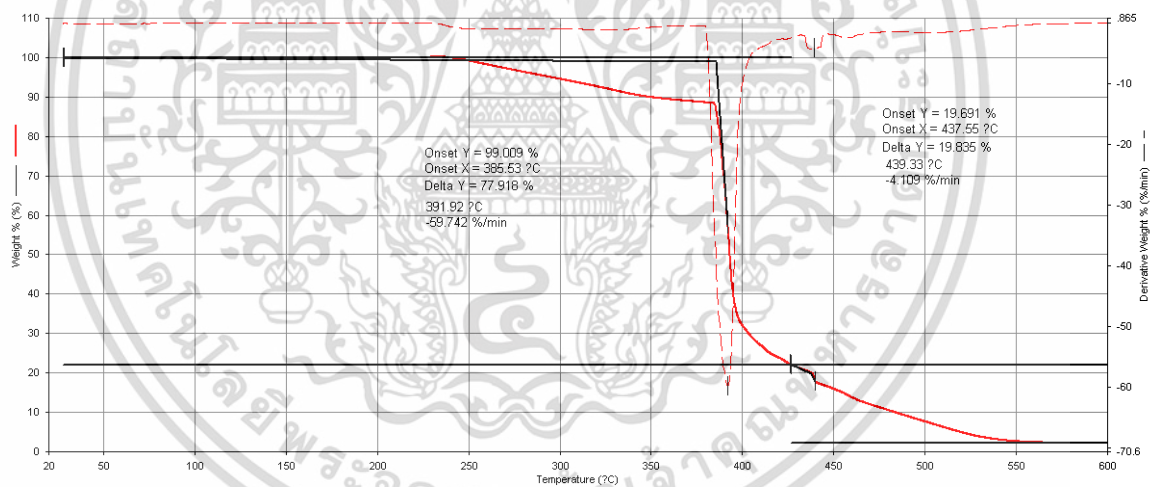
ภาคผนวก ก

TGA เทอร์โมแกรม

ก.1 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุดิบ

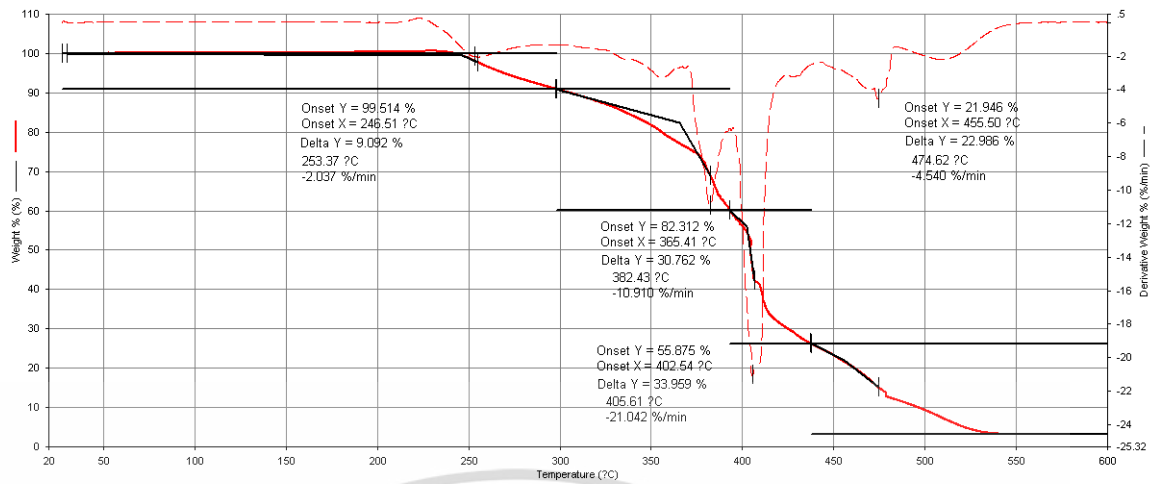


รูปที่ ก.1 TGA เทอร์โมแกรมของ LLDPE



รูปที่ ก.2 TGA เทอร์โมแกรมของ OPA/PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 TGA เทอร์โมแกรมของ PET/PE

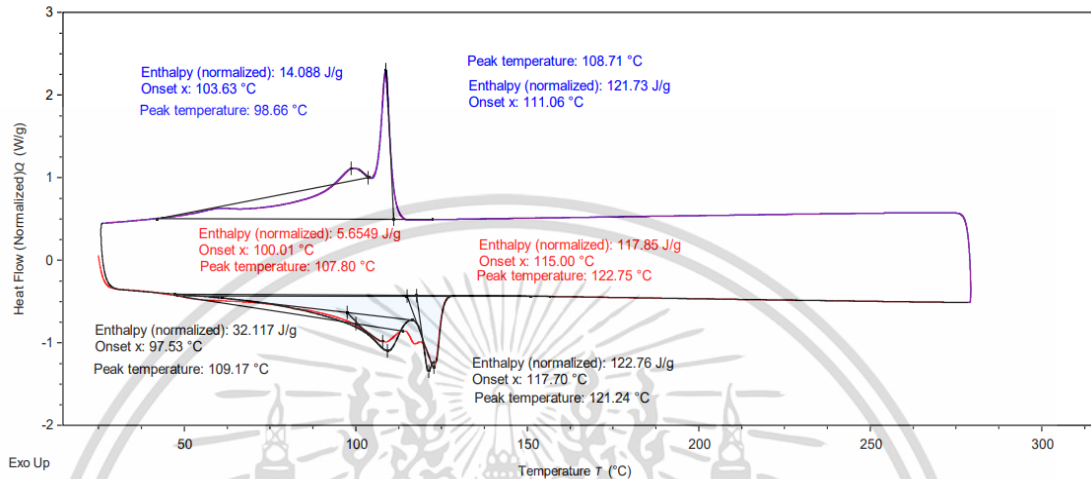


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

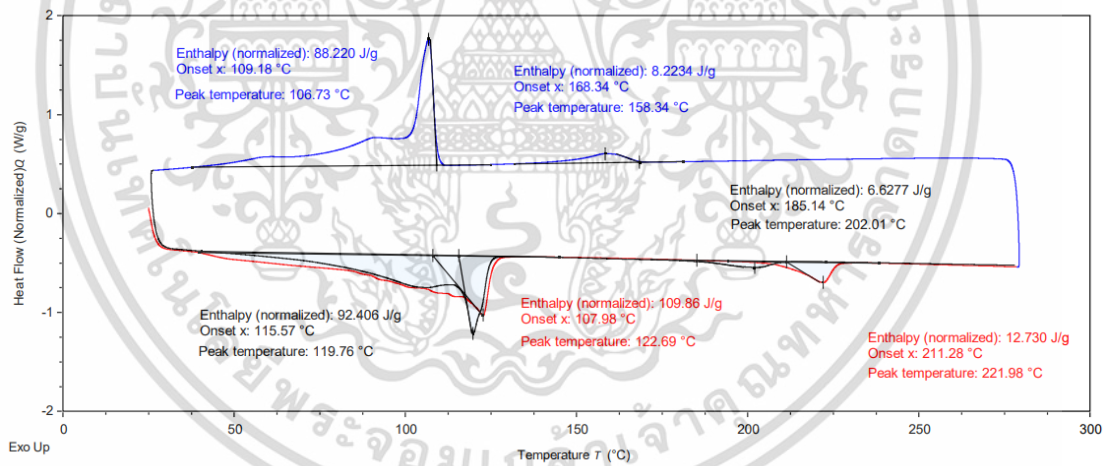
ภาคผนวก ข

DSC เทอร์โมแกรม

ข.1 DSC เทอร์โมแกรมของวัตถุดิบและไม้ WPC

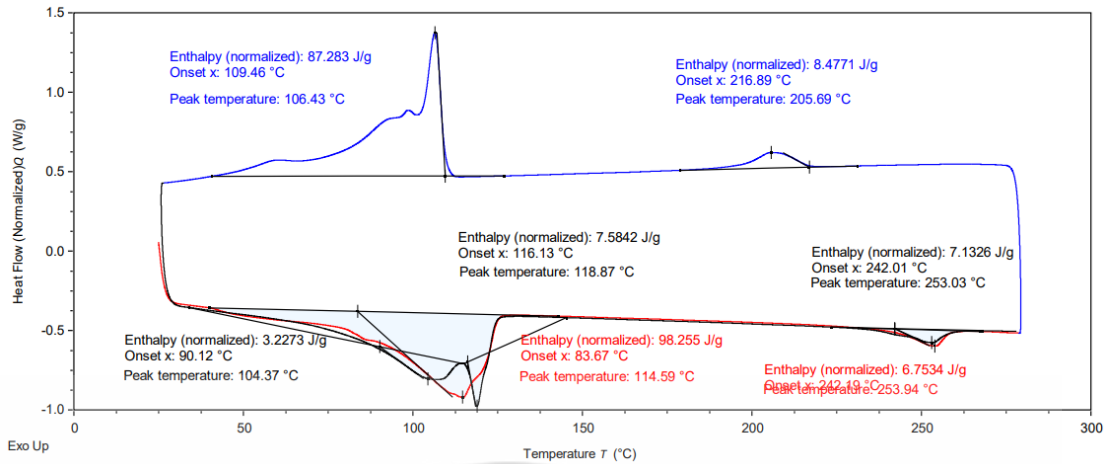


รูปที่ ข.1 DSC เทอร์โมแกรมของ LLDPE

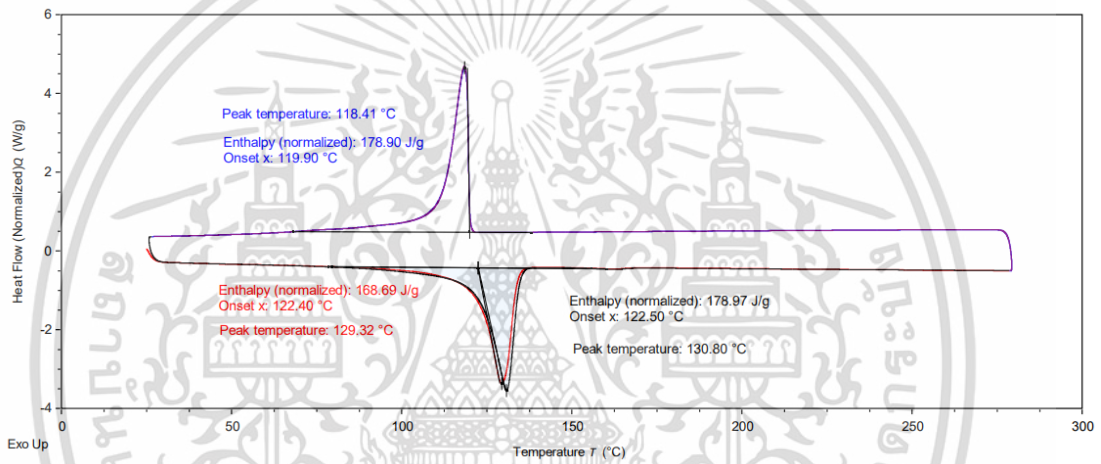


รูปที่ ข.2 DSC เทอร์โมแกรมของ OPA/PE

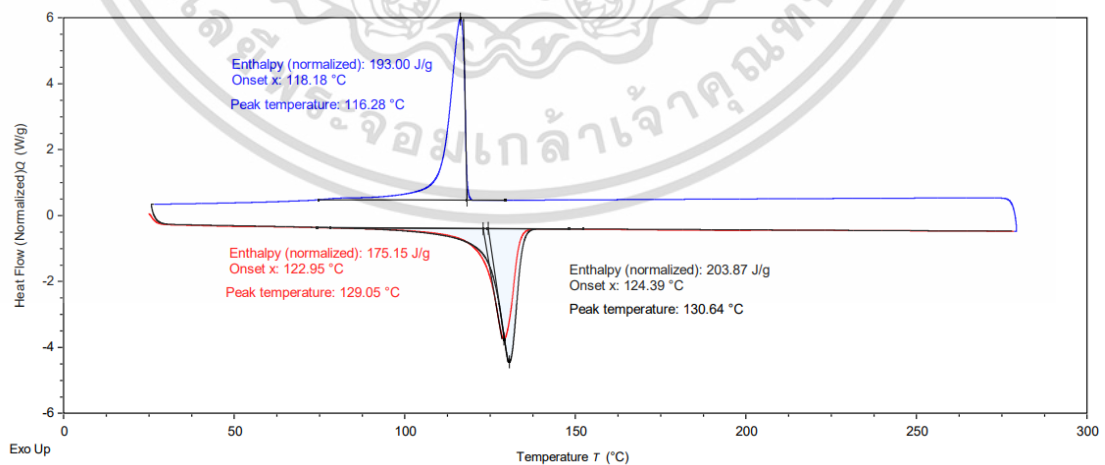
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 DSC เทอร์โมแกรมของ PET/PE

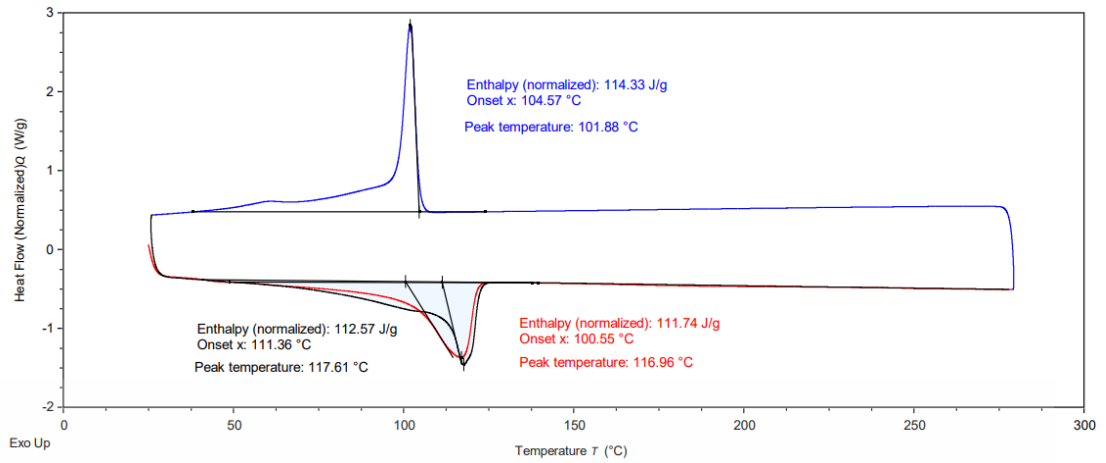


รูปที่ ข.4 DSC เทอร์โมแกรมของ rHDPE

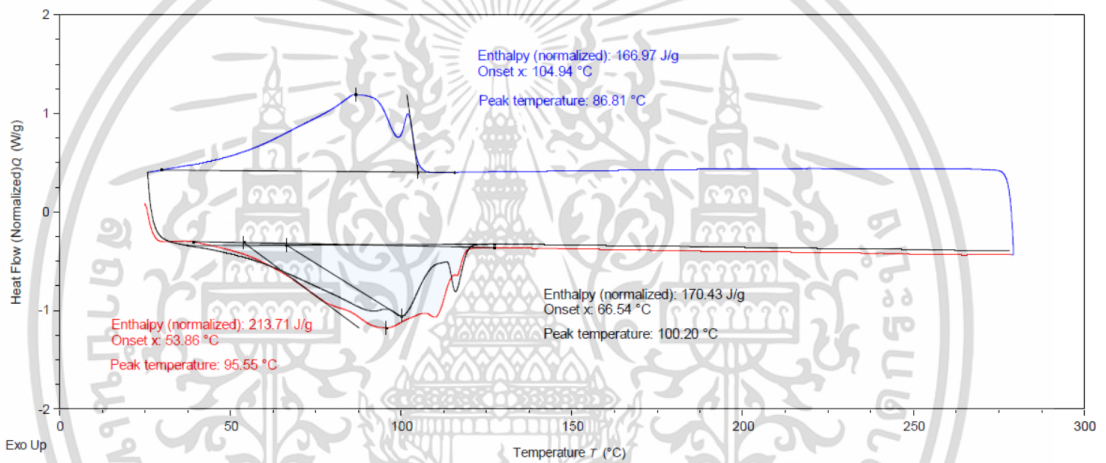


รูปที่ ข.5 DSC เทอร์โมแกรมของ HDPE-g-MA

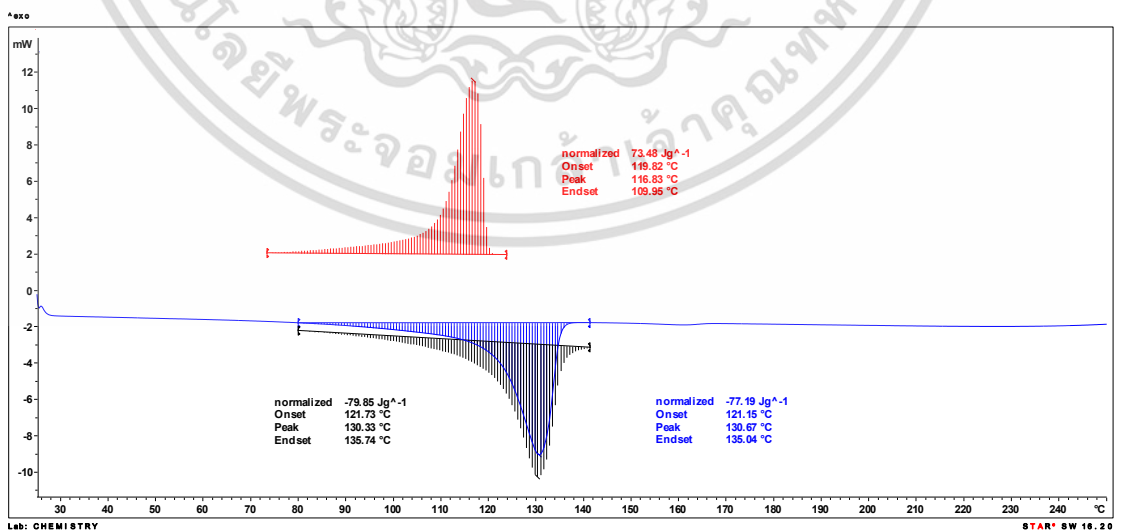
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 DSC เทอร์โมแกรมของ LDPE-g-MA

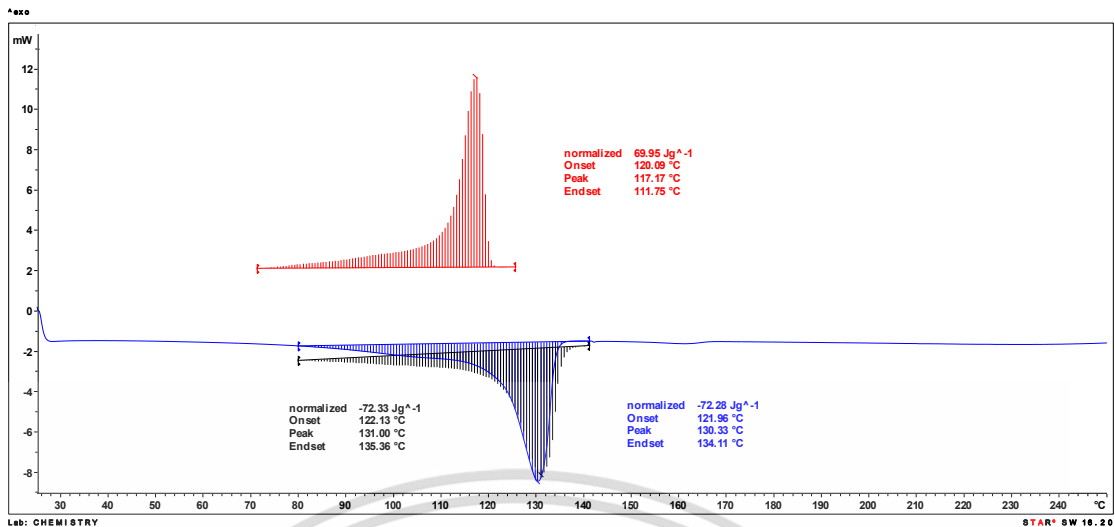


รูปที่ ข.7 DSC เทอร์โมแกรมของ PE-WAX

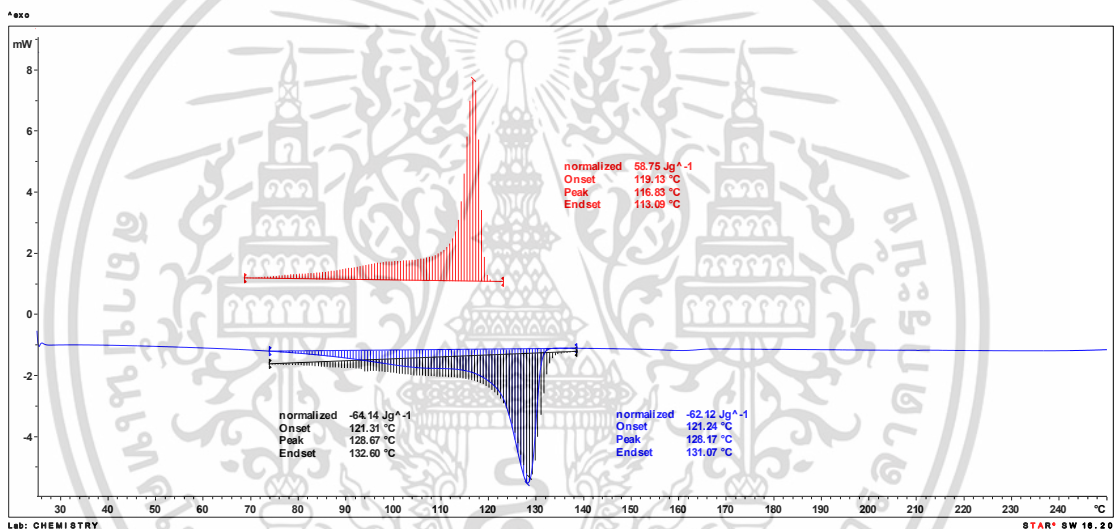


รูปที่ ข.8 DSC เทอร์โมแกรมของ HD45

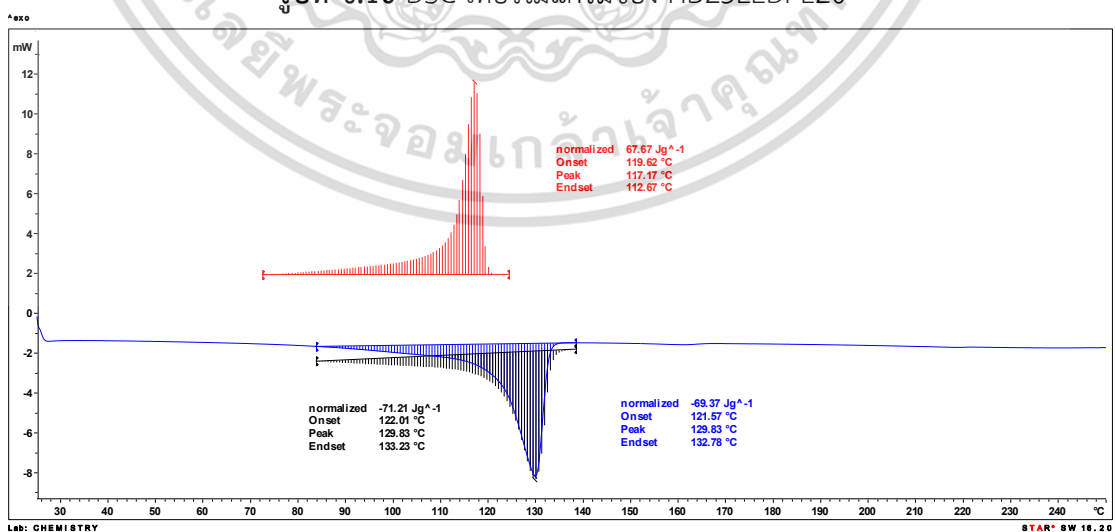
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 DSC เทอร์โมแกรมของ HD35LLDPE10

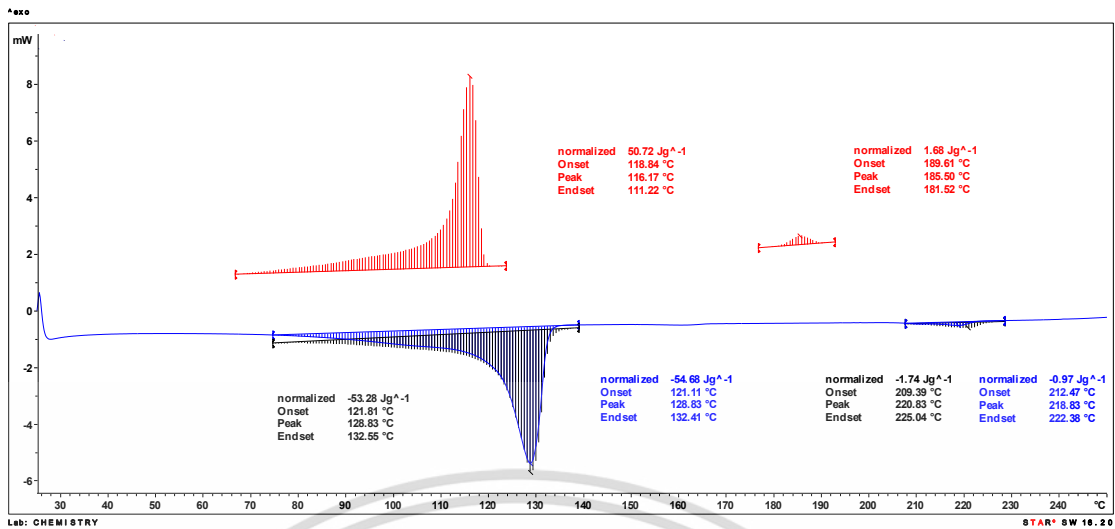


รูปที่ ข.10 DSC เทอร์โมแกรมของ HD25LLDPE20

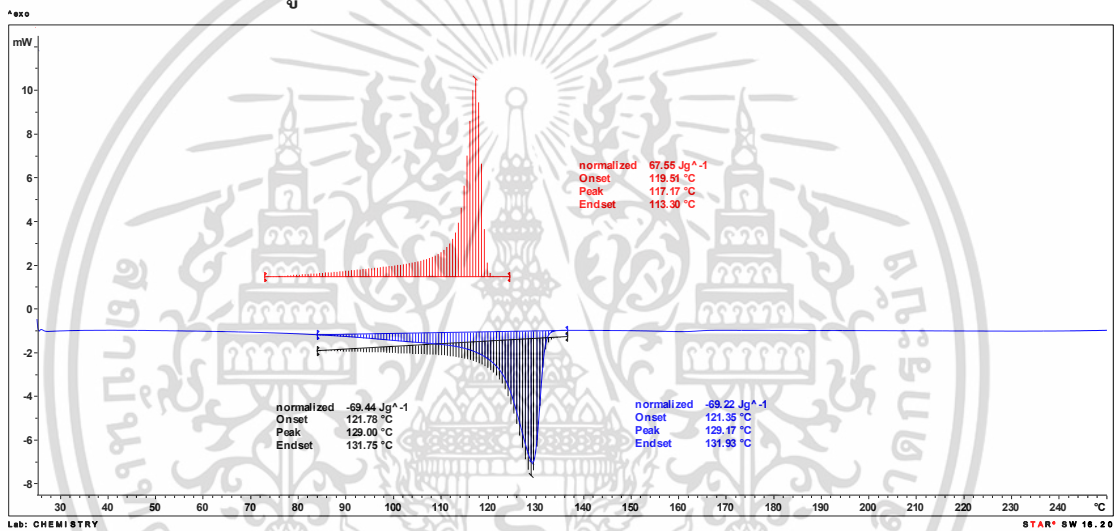


รูปที่ ข.11 DSC เทอร์โมแกรมของ HD35PAPE10

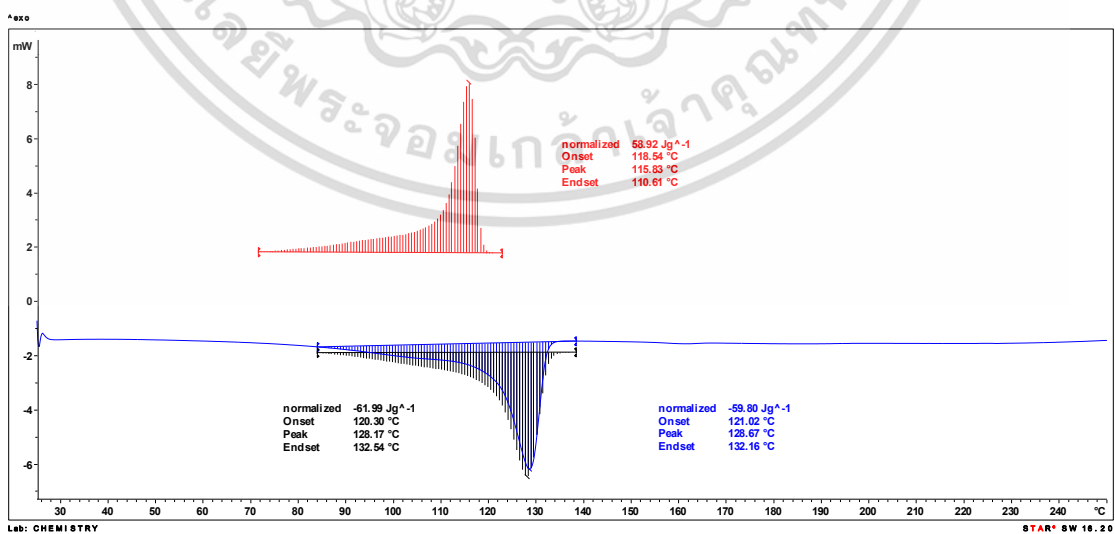
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.12 DSC เทอร์โมแกรมของ HD25PAPE20

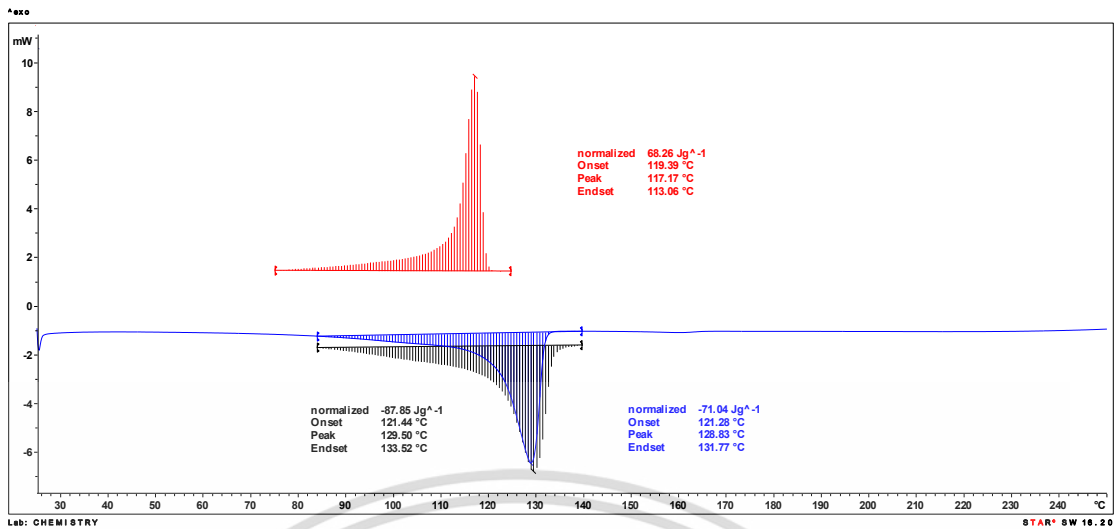


รูปที่ ข.13 DSC เทอร์โมแกรมของ HD35PETPE10

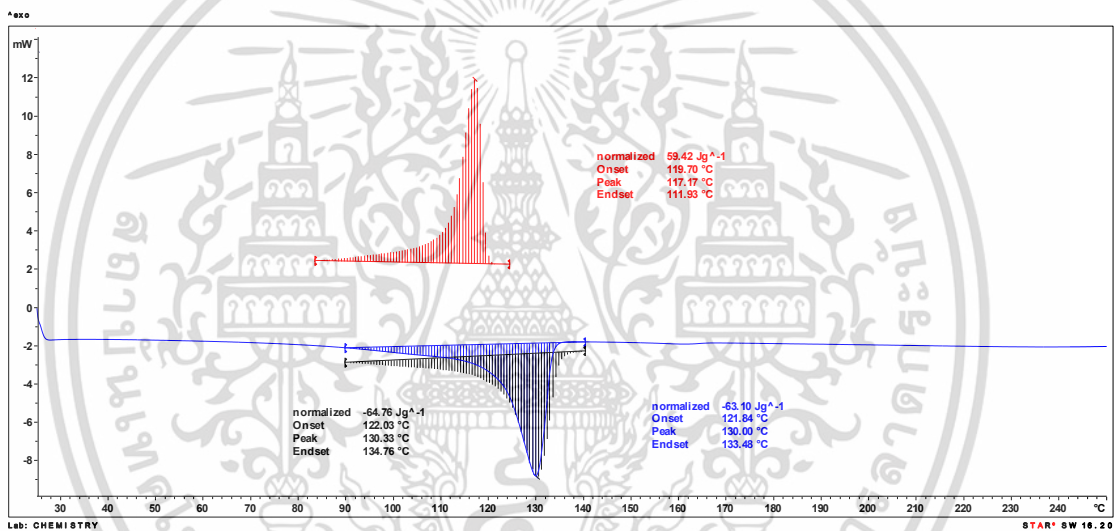


รูปที่ ข.14 DSC เทอร์โมแกรมของ HD25PETPE20

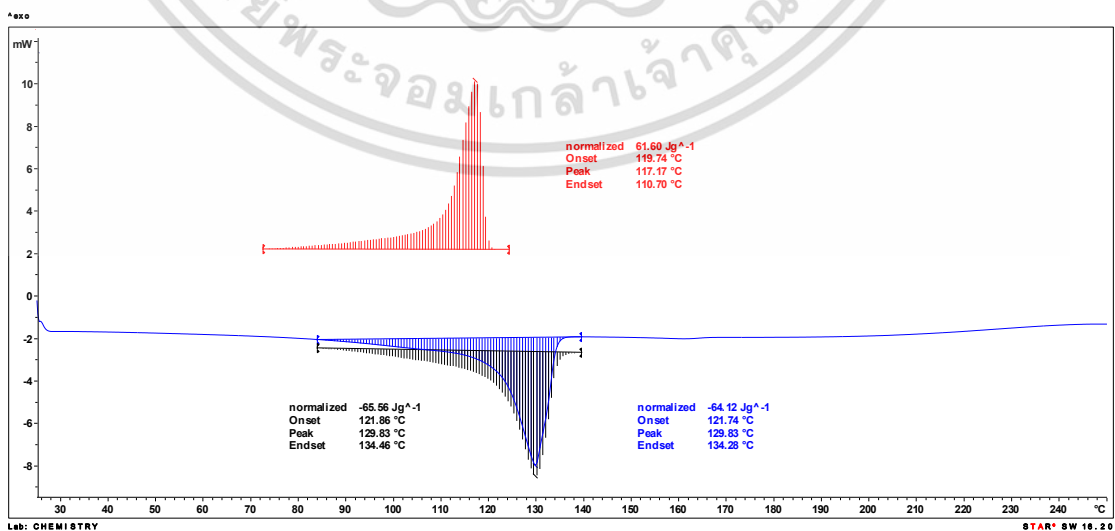
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.15 DSC เทอร์โมแกรมของ PETPECO



รูปที่ ข.16 DSC เทอร์โมแกรมของ PETPEC10



รูปที่ ข.17 DSC เทอร์โมแกรมของ PETPEC15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์

ตัวอย่างการคำนวณ

1) HD35LLDPE10

องค์ประกอบ	ปริมาณ (g)
rHDPE	35
PCR (LLDPE)	10
Wood	55
CaCO ₃	5
HDPE-g-MA	6
LDPE-g-MA	1
PE-Wax	2.5
Antioxidant 1	0.06
Antioxidant 2	0.06
ปริมาณรวม (g)	114.62

- จากทฤษฎี ค่า Enthalpy ของ PE ผลึก 100% = 293 J/g
- จากกราฟ DSC ค่า Enthalpy ของ PE = 72.28 J/g
- จาก ปริมาณรวม 114.62 g มีปริมาณ PE 35+10+6+1 = 52 g
คิดเป็น 100% มีปริมาณ PE = $\frac{100 \times 52}{114.62} = 45.37\%$
- PE 45.37 % มี Enthalpy = 72.28 J/g
PE 100 % มี Enthalpy = $\frac{100 \times 72.28}{45.37} = 159.32 \text{ J/g}$
- % ผลึก = $\frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100$
= $\frac{159.32}{293} \times 100$
ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PE = 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) HD35PAPE10

องค์ประกอบ	ปริมาณ (g)
rHDPE	35
PCR (OPA/PE)	10
Wood	55
CaCO ₃	5
E205 (HDPE-g-MA)	6
E588 (LDPE-g-MA)	1
PE-Wax	2.5
Antioxidant 1	0.06
Antioxidant 2	0.06
ปริมาณรวม (g)	114.62

- จาก TGA : สัดส่วน OPA/PE = 22/78
- จากการใช้ OPAPE 10 g คิดเป็น OPA = $(10 \times 22)/100 = 2.2$ g และ PE = $(10 \times 78)/100 = 7.8$ g
- จากทฤษฎี ค่า Enthalpy ของ PE ผลึก 100 % = 293 J/g
ค่า Enthalpy ของ PA ผลึก 100 % = 230 J/g
- จากกราฟ DSC ค่า Enthalpy ของ PE = 69.37 J/g
- จาก ปริมาณรวม 114.62 g มีปริมาณ PE $35 + 7.8 + 6 + 1 = 49.80$ g
คิดเป็น 100 % มีปริมาณ PE = $\frac{100 \times 49.80}{114.62} = 43.45$ %
- PE 43.45 % มี Enthalpy = 69.37 J/g
PE 100 % มี Enthalpy = $\frac{100 \times 69.37}{43.45} = 159.66$ J/g
- % ผลึก = $\frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100$
 $= \frac{159.66}{293} \times 100$
ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PE = 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) HD35PETPE10

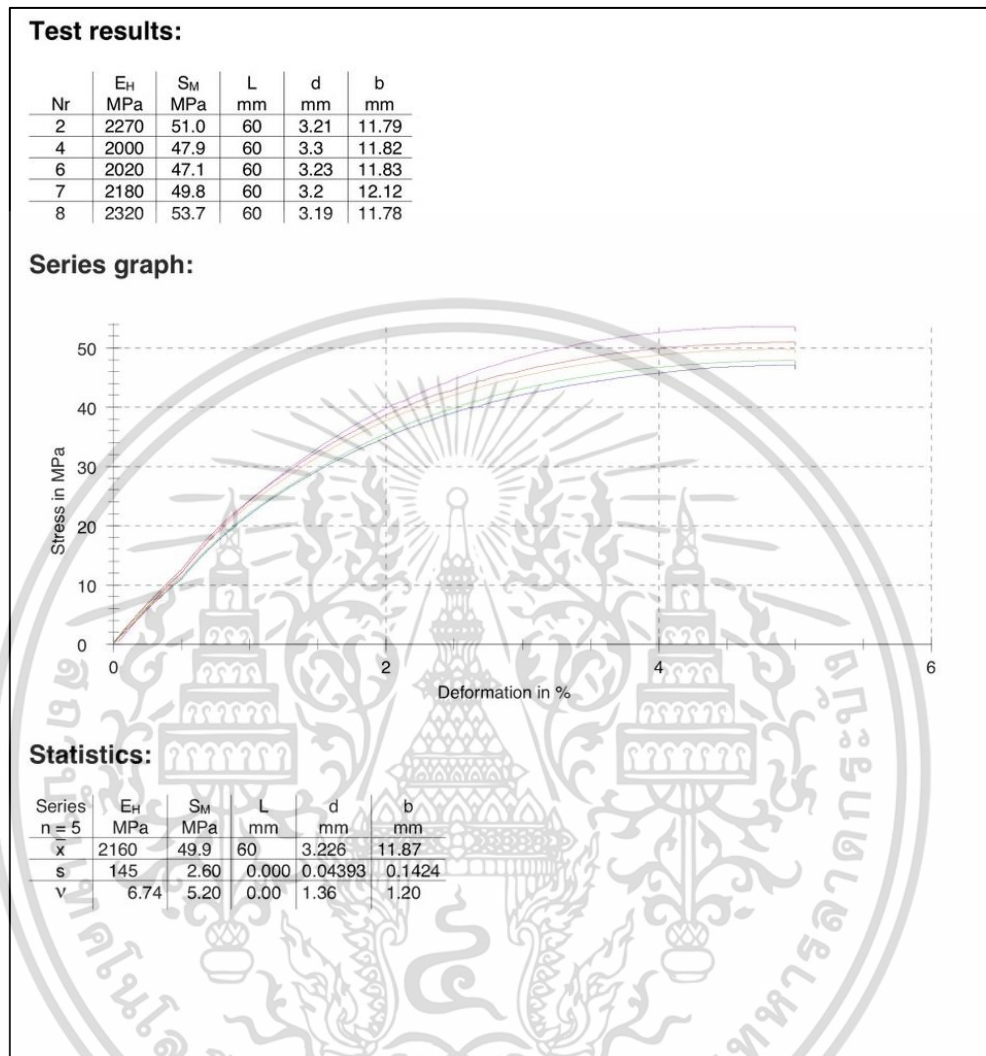
องค์ประกอบ	ปริมาณ (g)
rHDPE	35
PCR (PET/PE)	10
Wood	55
CaCO ₃	5
E205 (HDPE-g-MA)	6
E588 (LDPE-g-MA)	1
PE-Wax	2.5
Antioxidant 1	0.06
Antioxidant 2	0.06
ปริมาณรวม (g)	114.62

- จาก TGA : สัดส่วน PET/PE = 26/74
- จากการใช้ PETPE 10 g จึงคิดเป็น PET = $(10 \times 26)/100 = 2.6$ g และ PE = $(10 \times 74)/100 = 7.4$ g
- จากทฤษฎี ค่า Enthalpy ของ PE ผลึก 100% = 293 J/g
- จากกราฟ DSC ค่า Enthalpy ของ PE = 69.22 J/g
- จาก ปริมาณรวม 114.62 g มีปริมาณ PE $35 + 7.4 + 6 + 1 = 49.40$
คิดเป็น 100 % มีปริมาณ PE = $\frac{100 \times 49.40}{114.62} = 43.10$ %
- PE 43.10 % มี Enthalpy = 69.22 J/g
PE 100 % มี Enthalpy = $\frac{100 \times 69.22}{43.10} = 160.61$ J/g
- % ผลึก = $\frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100$
= $\frac{160.61}{293} \times 100$
ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PE = 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตัวแทนกราฟเพื่อใช้คำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ



รูปที่ ง.1 กราฟ Stress (in MPa)/Deformation (in %) ของชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวฐิติกุล บุญศรี
วัน เดือน ปีเกิด	23 ธันวาคม พ.ศ.2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	88/61 หมู่ 7 แขวงลำด้อยตึง เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
ประวัติการศึกษา	2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.15 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร 2566 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ เกรดเฉลี่ย 3.31 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา
ผลงานทางวิชาการ	Boonsri, T. Rukchonlatee S. and Jangchud I. 2022. “Wood plastic composites (WPCs) from multilayer packaging wastes and rHDPE as pallets for green industry.” <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> . 1234 : 012022.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้