

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพอลิเมอร์ไบโอคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้
จากพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยธรรมชาติ



นางสาวกนกอร แสงสุวรรณ
นางสาวกมลวรรณ ยงค์มัลย์วงศ์
นางสาวกัญชลา ใจสมุทร

เลข:
ก125ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107859
วัน,เดือน,ปี..... 8 ส.ค. 2553

b. 1221Δ1A x
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study of Degradable All-biocomposites made from
Poly(lactic acid) (PLA) and Natural Fibers**



Miss Kanok-orn Saengsuwan

Miss Kamonwan Yongmalwong

Miss Kanchala Jaisamoot

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาพอลิเมอร์ไบโอคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จาก
พอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยธรรมชาติ

นักศึกษา นางสาวกนกอร แสงสุวรรณ
นางสาวกมลวรรณ ยงค์มาลัยวงศ์
นางสาวกัญชลา ใจสมุทร

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นายวรรณม อุ่ณจิตติชัย (กรมป่าไม้)
นายพิชัย ชูเอกวงศ์ (บริษัท วัลย์ดีพาณิชย์อุตสาหกรรม จำกัด)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน
กรรมการ	ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ
กรรมการ	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

.....


(ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ	การศึกษาพอลิเมอร์ไบโอคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยธรรมชาติ
นักศึกษา	นางสาวกนกอร แสงสุวรรณ นางสาวกมลวรรณ ยงค์มัลย์วงศ์ นางสาวกัญชลา ใจสมุทร
ปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นายวรรณธรรม อุ่นจิตติชัย (กรมป่าไม้) นายพิชัย ชูเอกวงศ์ (บริษัท วัลย์ดีพาณิชยอุตสาหกรรม จำกัด)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ โดยสามารถเตรียมได้จากพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) ผสมเส้นใยธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเส้นใยจากไม้ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยหญ้าแฝก (VM และ VT) ยูคาลิปตัส (EUT) และ กระถินคราสชิคาริป้า (CT) ที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp ; MP) และ กระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp ; TMP) โดยนำ PLA และเส้นใยธรรมชาติมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) เพื่อนำชิ้นงานไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย โดยการฝังดิน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใย (15 30 และ 45 php) ผลของขนาดเส้นใย (<20 20-50 50-80 และ >80 mesh) ผลของประเภทเส้นใย (MP และ TMP) และผลของชนิดเส้นใยทั้ง 3 ชนิดที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

จากการศึกษาผลของปริมาณเส้นใย เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยหญ้าแฝก MP พบว่าสมบัติเชิงกลบางประการดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง โมดูลัส และโมดูลัสโค้งงอ แต่ค่าความแข็งแรงกระแทก ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง เมื่อทำการศึกษาผลของขนาดเส้นใย พบว่าขนาดไม้มีผลมากต่อสมบัติเชิงกล เมื่อทำการศึกษาผลของประเภทเส้นใย พบว่าสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น ความแข็งแรงโค้งงอ และโมดูลัสโค้งงอของคอมโพสิตผสมเส้นใย TMP สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MP เมื่อทำการศึกษามลของชนิดเส้นใย พบว่าคอมโพสิตเส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถิน คราสติคาร์บ่าให้สมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน แต่เส้นใยยูคาลิปตัสจะให้สมบัติเชิงกลบางประการ ดีกว่า โดยเฉพาะความแข็งแรงกระแทก และค่าความแข็งแรงดึง เมื่อทำการศึกษสมบัติทางความร้อน พบว่าการผสมเส้นใยธรรมชาติลงใน PLA ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิ HDT ส่วน การทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่าการเติมเส้นใยชนิดต่างๆ ใน PLA ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองค์ความเป็นผลึก

จากการศึกษาฐานฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าเส้นใย TMP มีการกระจายตัวที่ดี และมีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ได้ดีกว่า เส้นใย MP นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยกระถินคราสติคาร์บ่าและเส้นใยยูคาลิปตัส มีการกระจายตัวที่ดี และมีการยึดเกาะกับ PLA ได้ดีเช่นกัน ส่วนการดูดซับน้ำ พบว่าเส้นใย TMP มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำกว่าเส้นใย MP โดยที่เส้นใยหญ้าแฝกมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมากกว่าเส้นใยกระถิน คราสติคาร์บ่า และเส้นใยยูคาลิปตัส ตามลำดับ ส่วนการศึกษาศามารถในการย่อยสลาย โดยการฝังดิน พบว่า เส้นใย MP สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าเส้นใย TMP และเมื่อเพิ่มปริมาณ เส้นใยจะทำให้การย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า เส้นใยยูคาลิปตัส ประเภท TMP ที่ปริมาณ 30 php เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอบคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้

Special Project Title	Study of Degradable All-biocomposites made from Poly(lactic acid) (PLA) and Natural Fibers
Student Names	Miss Kanok-orn Saengsuwan Miss Kamonwan Yongmalwong Miss Kanchala Jaisamoot
Degree	Bachelor of Science
Program	Industrial Chemistry Department of Chemistry, Faculty of Science, KMITL
Academic Year	2007
Special Project advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud
Special Project Co-advisor	Mr. Woratham Oonjittichai Mr. Pichai Chuaekwong

ABSTRACT

This research work was focused on degradable all-biocomposites made from poly (lactic acid) (PLA) and natural fibers. Three types of natural fibers were selected to study in this work, i.e., vetiver grass (VM and VT), eucalyptus (EUT), acacia crassicarpa (CT) fibers. Two forms of the fibers were also studied, including mechanical pulp (MP) and thermomechanical pulp (TMP). The all-biocomposites can be prepared by mixing PLA and the natural fibers by using a two-roll mill and shaping into samples by injection molding technique. Several properties of the biocomposites were characterized including mechanical, physical, thermal, and morphological properties. Degradability of the samples was also tested simply by burial test. Some factors affecting the composite properties were studied, such as, amount of the fiber loading (15, 30, and 45 php), size of the fibers (<20, 20-50, 50-80, and >80 mesh), forms of the fibers (MP and TMP) and types of the fibers (VM, VT, EUT, and CT fibers).

It was found that some mechanical properties of the biocomposites were improved when the amount of the fiber loading was increased, such as, hardness, modulus, and flexural modulus. However, some properties of the composites were deteriorated, such as impact strength, tensile strength, % elongation at break, and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

flexural strength. It was found that the sizes of the MP fibers played a minor role in the mechanical properties of the composites. However, bending properties of the TMP composites were enhanced by incorporating the TMP fibers, i.e., flexural strength and flexural modulus. By studying three types of the fibers, it was revealed that EUT fibers yielded better mechanical properties of the composites compared to the others. In the thermal property study, HDT % crystallinity and T_m of PLA were unaffected by adding the fibers.

From SEM micrographs, they revealed that TMP could disperse better in PLA matrix with good interfacial adhesion compared to MP. Acacia crassicarpa and eucalyptus fibers seemed to disperse well and had good adhesion with the PLA. It was found that TMP composites had less % water uptake than the MP composites. % water uptake of the vetiver grass fiber composites was higher than that of the others. In burial test for degradability, it was confirmed that degradability of the materials was increased by adding the natural fibers. MP composites seemed to have a better degradability than the TMP ones. In this work, it can be concluded that TMP and eucalyptus fibers at 30 php fiber loading are good choices to produce degradable all-biocomposites.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ โดยได้รับความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำ ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำ จากบุคคลากรและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คอยให้ คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ สำนักนวัตกรรมแห่งชาติ (NIA) สำหรับเงินทุนสนับสนุนโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ คุณวรรณม อุ่นจิตติชัย นักวิชาการกรมป่าไม้ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษา โครงการพิเศษร่วม คอยให้คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์ในการเตรียมเส้นใยธรรมชาติชนิด ต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ คุณพิชัย ชูเอกวงศ์ จากบริษัท วัลย์ดีพาณิชย์อุตสาหกรรม จำกัด ที่กรุณา รับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษร่วม คอยให้คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) ตลอดจนคำแนะนำในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน และ ผศ.ดร.ภัทรธาดู มนต์วิเศษ อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ และ ตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณณฤชณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำ อาคารฝึกงานอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำ โครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมี ที่มอบความรู้ ตลอดจนคำปรึกษา และ ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการวิจัยนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและเป็น กำลังใจ จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวกนกอร แสงสุวรรณ

นางสาวกมลวรรณ ยงค์มาลัยวงศ์

นางสาวกัญชลา ใจสมุทร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
คำย่อและสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต	8
2.1.1 เมตริกซ์	9
2.1.1.1 พอลิเมอร์เมตริกซ์	10
2.1.2 ส่วนเสริมแรง	12
2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต	13
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้	14
2.3 สารตัวเติม	17
2.3.1 ความหมายของสารตัวเติม	17
2.3.2 ประเภทของสารตัวเติม	17
2.3.3 พฤติกรรมของสารตัวเติม	18
2.3.4 รูปแบบการทำงานของสารตัวเติม	19
2.4 พอลิแลคติกแอซิด	19
2.4.1 ลักษณะและสมบัติโดยทั่วไป	19
2.4.2 กระบวนการผลิต PLA	20
2.4.3 การนำไปใช้	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1.2 ความแข็งแรงกระแทก	49
3.4.1.3 ความแข็งกด	50
3.4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ	50
3.4.2 สมบัติทางกายภาพ	51
3.4.2.1 ทดสอบการดูดซับน้ำ	51
3.4.2.2 ทดสอบการฝังดิน	51
3.4.3 สมบัติทางความร้อน	52
3.4.3.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)	52
3.4.3.2 Heat Deflection Temperature (HDT)	53
3.4.4 สัณฐานวิทยา	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต	54
4.1.1 สมบัติเชิงกล	55
4.1.2 Heat Deflection Temperature (HDT)	60
4.2 การศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต	61
4.2.1 สมบัติเชิงกล	62
4.2.2 Heat Deflection Temperature (HDT)	66
4.3 การศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต	67
4.3.1 สมบัติเชิงกล	67
4.4 การศึกษาผลของประเภทเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต	71
4.4.1 สมบัติเชิงกล	72
4.4.2 Heat Deflection Temperature (HDT)	76
4.5 การศึกษาผลของชนิดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต	77
4.5.1 สมบัติเชิงกล	77
4.5.2 Heat Deflection Temperature (HDT)	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)	83
4.7 สมบัติทางกายภาพ	84
4.7.1 ทดสอบการดูดซับน้ำ	84
4.7.2 ทดสอบการฝังดิน	86
4.8 สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)	91
4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	98
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก ก	104
ภาคผนวก ข	107
ภาคผนวก ค	109
ภาคผนวก ง	110
ภาคผนวก จ	116
ภาคผนวก ฉ	117

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบความแตกต่างของหญ้าแฝกหอมและหญ้าแฝกดอน	33
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของสูตรต่างๆ	47
ตารางที่ 3.2 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต	48
ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองค์ความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยธรรมชาติ (70:30)	83
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ	97



สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงผลิตภัณฑ์ต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต	7
รูปที่ 2.1 ประเภทของคอมโพสิต	8
รูปที่ 2.2 แสดงการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์	10
รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการจัดโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมเซต	11
รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการจัดโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติก	11
รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน	12
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ PLA	20
รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส	23
รูปที่ 2.8 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส	24
รูปที่ 2.9 ภาคตัดขวางของเส้นใยเซลลูโลส	24
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส	26
รูปที่ 2.11 แสดงสูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	28
รูปที่ 2.12 แสดงหน่วยที่ซ้ำกันของลิกนิน	29
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโมเลกุลของลิกนิน	30
รูปที่ 2.14 แสดงการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้	30
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะหน้าแผ่น	32
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ศิลปะหัตถกรรมจากหน้าแผ่น	34
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของต้นยูคาลิปตัส	36
รูปที่ 2.18 ต้นกระถินคราสชิคารีป่า	37
รูปที่ 2.19 ต้นกระถินคราสชิคารีป่า (โตเต็มวัย)	38
รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	49
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหน้าแผ่น (MP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก	56
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหน้าแผ่น (MP) กับค่าความแข็งแรงดึง	56

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด	57
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงกด	58
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่ามอดุลัส	58
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ	59
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ	60
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่า HDT	61
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก	62
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงดึง	63
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด	63
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงกด	64
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่ามอดุลัส	64
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ	65
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ	65
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่า HDT	66
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) ขนาดต่างๆ ที่กำลังขยาย 2.5 เท่า	67
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยยูคาลิปตัส (TMP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก	68
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยยูคาลิปตัส (TMP) กับค่าความแข็งแรงดึง	68

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	69
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่าความแข็งแกร่ง	69
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่ามอดุลัส	70
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ	70
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ	71
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝก กับค่าความแข็งแรงกระแทก	72
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝก กับค่าความแข็งแรงดึง	73
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝก กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	73
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่าความแข็งแกร่ง	74
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่ามอดุลัส	74
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝก กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ	75
รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่ามอดุลัสโค้งงอ	75
รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่า HDT	76
รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการต่างๆ ที่กำลังขยาย 2.5 เท่า	76
รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก	78
รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรงดึง	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	79
รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรง	79
รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่ามอดุลัส	80
รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ	80
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ	81
รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่า HDT	81
รูปที่ 4.42 แสดงลักษณะของเส้นใยชนิดต่างๆ ที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ที่กำลังขยาย 2.5 เท่า	82
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำกับเวลาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยธรรมชาติ (70:30)	85
รูปที่ 4.44 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยหญ้าแฝก ในสัปดาห์ที่ 1	86
รูปที่ 4.45 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของ PLA	88
รูปที่ 4.46 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 45%เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (MP)	88
รูปที่ 4.47 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 30%เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (MP)	89
รูปที่ 4.48 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 30%เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP)	89
รูปที่ 4.49 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยหญ้าแฝก ในสัปดาห์ที่ 14	90
รูปที่ 4.50 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยหญ้าแฝกประเภท MP 30 php	92
รูปที่ 4.51 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยหญ้าแฝกประเภท TMP 30 php	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.52 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยยูคาลิปตัสประเภท TMP 30 php	94
รูปที่ 4.53 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้าประเภท TMP 30 php	95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

ASTM	วิธีการทดสอบตามมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials)
CT	เส้นใยกระดิ่งคราสซิคาร์บ๊าที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP)
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EUT	เส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP)
HDT	อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน (Heat Deflection Temperature)
MP	กระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp)
php	part hundred of polymer
PLA	พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid))
SEM	การศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
T_g	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
T_m	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก
TMP	กระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp)
VM	เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP)
VT	เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP)
X_c	องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก มนุษย์ได้ตัดแปลงแล้วนำมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ ไม่ว่าจะเป็นวัสดุในการก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ เครื่องมือและเครื่องใช้ต่างๆ เช่น บานประตู หน้าต่าง โตะ เก้าอี้ โครงสร้างของบ้าน ทำให้ไม้เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากชนิดหนึ่ง ปัจจุบันจำนวนป่าไม้ในประเทศไทยมีจำนวนลดน้อยลงทุกวันแต่ความต้องการในการใช้ไม้กลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนประชากรของประเทศที่เพิ่มขึ้นและความต้องการผลิตภัณฑ์ไม้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณไม้ที่มีในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการ ก่อให้เกิดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่า ปัญหาการแย่งชิงทรัพยากรไม้และผลผลิตจากป่าไม้ระหว่างประชาชนและเจ้าหน้าที่ของรัฐผู้ปกป้องป่าไม้ และปัญหาอื่นๆ ที่เป็นสาเหตุจากการตัดต้นไม้ทำลายป่า เช่น ปัญหาการขาดแคลนน้ำ ฝนไม่ตกตามฤดูกาล และปัญหาน้ำท่วม วิธีการแก้ปัญหาวิธีหนึ่งคือ การผลิตไม้เทียม (Artificial woods) จากวัสดุอื่นเพื่อใช้ทดแทนไม้ ไม้เทียม คือ วัสดุใดๆ ที่มีลักษณะภายนอกเหมือนหรือคล้ายกับวัสดุไม้ ไม้เทียมที่ดีควรมีสมบัติคล้ายวัสดุไม้ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง เหนียว ความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี สามารถดกด้วยตะปู ตัดด้วยเลื่อย และอายุการใช้งานยาวนาน ฯลฯ สามารถใช้วัสดุไม้เทียมประกอบสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ได้ เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากไม้ในด้านต่างๆ เช่น ปริมาณไม้ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ลดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่า การเก็บรักษาเนื่องจากไม้สามารถผุร่อนได้ ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเนื่องจากไม้มีน้ำหนักมาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิต จากเส้นใยของต้นไม้ชนิดต่างๆ เพื่อนำมาใช้งานเป็นวัสดุขึ้นรูปแบบพลาสติก

ในปัจจุบันมีวัสดุหลายชนิดที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ พลาสติกจัดเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น สามารถทำให้มีความแข็งแรงเทียบเท่าโลหะ หรืออาจทำให้อ่อนนุ่มเหนียว หรือใสเหมือนแก้วได้ นอกจากนี้พลาสติกส่วนใหญ่ยังทนการกัดกร่อนสารเคมี และน้ำมันได้ ซึ่งนับว่าเป็นสมบัติที่มีประโยชน์มาก และยังคงมีการพัฒนาปรับปรุงสมบัติอยู่เสมอ เพื่อให้ได้พลาสติกที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น และต้นทุนการผลิตต่ำ จากการศึกษาพบว่าแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติก และต้นทุนการผลิต คือ การทำพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) ซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุสองชนิด คือ เมตริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้อาจเป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมเซต (Thermosets) โดยคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering materials) ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ในปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ

จากปริมาณความต้องการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกตามมา เนื่องจากพลาสติกทนทานต่อการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ และเป็นวัสดุที่ทำลายได้ยากในธรรมชาติ โดยทั่วไปขยะพลาสติกส่วนใหญ่ จะมีวิธีกำจัดดังนี้

1. การกำจัดโดยการฝังกลบ
2. การนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle)
3. การทำให้พลาสติกสลายตัว

วิธีการทำให้พลาสติกสลายตัว หมายถึง วิธีการทำให้พลาสติกสลายตัวได้เองในธรรมชาติ เหมือนขยะประเภทอื่นๆ ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ สิ่งที่ช่วยให้พลาสติกย่อยสลายได้คือ แสง น้ำ และจุลินทรีย์ ดังนั้นพลาสติกสลายตัวได้เองในธรรมชาติ อาจทำได้โดยการทำให้เป็นดังนี้

1. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยแสง (Photodegradable plastic)
2. พลาสติกที่สลายตัวโดยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)
3. พลาสติกที่สลายตัวโดยวิธีการอื่นๆ เช่น พลาสติกละลายน้ำ เป็นต้น

ปัญหาการจัดการขยะโดยเฉพาะขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ถือเป็นปัจจัยสำคัญโดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ชนิดที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง เนื่องจากมีสัดส่วนปริมาณการใช้สูง แนวทางการจัดการเพื่อปกป้องสภาวะแวดล้อมจากขยะบรรจุภัณฑ์เหล่านี้สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น จัดให้มีระบบเรียกคืนบรรจุภัณฑ์ การใช้ซ้ำ และการรีไซเคิล การมีข้อกำหนดทางสิ่งแวดล้อม รวมถึงการที่ประชาชนเริ่มตื่นตัวและรับรู้ในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะเพิ่มมากขึ้น สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งกระตุ้นให้เกิดการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตใหม่ๆ ที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม พลาสติกยุคใหม่จึงถูกออกแบบมาให้มีสมบัติที่ดีเหมาะสมต่อการใช้งานด้านต่างๆ โดยคงสมบัติที่ดีไว้ตลอดการใช้งาน แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี และย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมภายหลังการใช้งาน จึงทำให้พลาสติกมีสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว น้ำหนักโมเลกุลหรือมวลลดลง และสลายตัวไปในที่สุด

ในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีการค้นพบและพัฒนาการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาต่ำลง และมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น การมีกฎข้อบังคับรวมถึงค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ ได้ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) เพิ่มขึ้น มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่งหมายถึงพลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลมหรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึมและย่อยสลายต่อไปได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้อาจเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และยังมีการใช้คำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental friendly plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green plastics) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดเก็บขยะลดลงและส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพหลายชนิดที่ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายทั้งทางด้านบรรจุภัณฑ์ การเกษตร และสิ่งทอ แต่ตลาดของพลาสติกย่อยสลายได้ยังเล็กอยู่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ในปี พ.ศ. 2546 [1] มีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อใช้งานในปริมาณ 43,000 ตัน โดยประมาณ 85 - 90 % ใช้วัตถุดิบที่ผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ (Renewable resources) ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ คือ โฟมกันกระแทกจากแป้ง ประมาณ 10,000 - 15,000 ตัน พลาสติกฟิล์มสำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ ถุงใส่ขยะ และการเกษตร ประมาณ 20,000 - 25,000 ตัน และผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกประมาณ 5,000 - 10,000 ตัน แต่เมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป พบว่า พลาสติกย่อยสลายได้ยังมีการเติบโตทางการตลาดช้า มีส่วนแบ่งทางการตลาดน้อยกว่า 0.1 % ของตลาดพลาสติกทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากมีบริษัทจำนวนไม่มากนักทั่วโลกที่ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อการค้า ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตและการใช้งานคือ ราคา กระบวนการผลิต สมบัติในการใช้งาน และอัตราการย่อยสลาย โดยพอลิเมอร์หรือพลาสติกย่อยสลายได้ที่ได้รับการผลิตเพื่อการการค้าแล้ว ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Biodegradable starch based plastics) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทเอสเทอร์ เช่น พอลิไฮดรอกซิลแอลคาโนเอต (PHA) พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิคาโพรแลคโตน (PCL) นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ชนิดอื่นๆ เช่น พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photo-biodegradable polymers) และพลาสติกทั่วไปที่มีสารเติมแต่งที่มีสมบัติควบคุมการย่อยสลาย (Controlled degradation additive) เพื่อเร่งให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น โดยมีบริษัท Cargill เป็นบริษัทที่ผลิต PLA กำลังจะขยายการผลิตให้ได้ 5 แสนตันต่อปี แนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากการใช้วัตถุดิบที่สามารถผลิตหรือปลูกทดแทนใหม่ได้ เพื่อแทนการใช้วัตถุดิบจากปิโตรเคมีมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในรอบหลายปีที่ผ่านมา

ดังนั้น ในปัจจุบันวิธีการแก้ไขปัญหามลพิษพลาสติกที่ดีที่สุดคือ การส่งเสริมให้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านการใช้งานพอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid); PLA) มีสมบัติทางความร้อนและทางกลสูงกว่าพอลิไฮดรอกซีลิวทีเรต (Polyhydroxybutyrate; PHB) และพอลิคาโปรแลคโตน (Polycaprolactone; PCL) โดยมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) PLA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาใช้ทำประโยชน์ได้หลากหลาย เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่ายคล้ายพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) โดยกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกต่างๆ เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดเป็นแผ่น การเป่าเป็นฟิล์ม การเทอร์โมฟอร์ม และการปั่นหลอมเส้นใย ซึ่ง PLA สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ทางชีวภาพ (Biodegradable) แต่เป็นพอลิเมอร์ที่เปราะ (Brittleness) และมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ต่ำ เพื่อเป็นการพัฒนาสมบัติของพลาสติกนี้ จึงได้มีผู้ให้ความสนใจศึกษาการหาสารตัวเติมที่เหมาะสมและมีราคาถูก พบว่าเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมาก จึงนำมาเป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต แต่เส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) มีราคาแพง และเนื่องจากประเทศไทยมีเส้นใยธรรมชาติอยู่มาก จึงเลือกใช้เป็นตัวเติม ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติมีดังนี้ [2]

- หาง่าย มีหลายชนิดให้เลือกใช้ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีใช้ไม่หมดสิ้น
- ราคาถูก เส้นใยบางชนิดเป็นของเหลือทิ้งหรือเป็นวัชพืช จึงช่วยลดต้นทุนการผลิตได้
- สมบัติเชิงกลดี
- น้ำหนักเบา
- ความหนาแน่นต่ำ
- สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่เป็นปัญหาในการกำจัด
- ใช้พลังงานในการผลิตต่ำ
- ลดกากของเสียจากเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม

ทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำเส้นใยธรรมชาติมาผสมกับพลาสติก เพื่อทำเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) เนื่องจากมีสมบัติที่ดีกว่าไม้หรือพลาสติก [2] คือ

- มีน้ำหนักเบา
- ความหนาแน่นต่ำ
- มีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) และ ค่ามอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) สูง
- มีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า
- ขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย และง่ายต่อการใส่ประกอบกับวัสดุอื่น (Insertion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพอลิเมอร์คอมโพสิตจาก PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ผลของปริมาณเส้นใย ผลของขนาดเส้นใย ผลของประเภทเส้นใย และผลของชนิดเส้นใย
2. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จากเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสซิคาร์ป้า เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่เติมใน PLA คอมโพสิต โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp ; MP) ปริมาณ 15% 30% และ 45% ของ PLA
2. ศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่เติมใน PLA คอมโพสิต โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ขนาด <20 20-50 50-80 และ >80 mesh
3. ศึกษาผลของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP และกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp ; TMP) เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมใน PLA คอมโพสิต
4. ศึกษาผลของชนิดเส้นใยที่เติมใน PLA คอมโพสิต โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสซิคาร์ป้า ที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยเลือกใช้ปริมาณและขนาดของเส้นใยที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด
5. ศึกษาสมบัติของ PLA คอมโพสิต ที่เตรียมจากเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสซิคาร์ป้า เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถผลิตคอมโพสิตที่เตรียมได้จากเส้นใยธรรมชาติให้มีสมบัติที่ดี เพื่อทดแทนการใช้พลาสติก และนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับไม้ เฟอร์นิเจอร์ กระจาด ต้นไม้ ส่วนประกอบของรถยนต์ อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ
- สามารถปรับปรุงพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี ช่วยลดปัญหามลภาวะจากขยะที่เกิดขึ้น และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งาน เช่น กระจาดต้นไม้ที่ย่อยสลายได้
- สามารถทราบสูตรและกระบวนการผลิตที่เหมาะสม สำหรับการผลิตคอมโพสิตจาก PLA
- ผสมเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้า เพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการได้
- สามารถเพิ่มประโยชน์การใช้สอยจากหญ้าแฝก ยูคาลิปตัส และกระถินคราสชิคาร์ป้าได้
- สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์



รูปที่ 1.1 แสดงผลิตภัณฑ์ต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต [4]

พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีสมบัติต่างกัน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย

วัสดุประกอบหรือคอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก ในปัจจุบันนี้เป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรงและค่ามอดุลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ และเซรามิกซ์

คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบอนุภาค (Particulate composites)

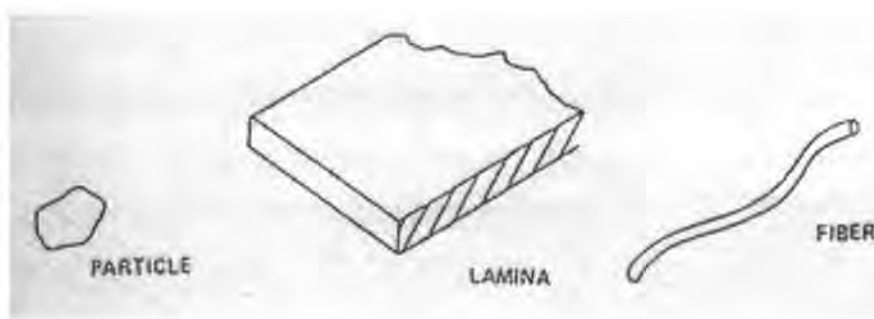
เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมตริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัวและขนาดต่างๆ กัน อาจเป็นผง เม็ด หรือผลึก

2. คอมโพสิตแบบลามินาร์ (Laminar composites)

เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมตริกซ์ มีลักษณะคล้ายแซนวิช ทำการอัดด้วยความดันสูง ก็จะได้เป็นชั้นๆ

3. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites)

เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมตริกซ์ ซึ่งเส้นใยอาจเป็นเส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยอินทรีย์ (Organic fibers) เส้นใยอารามิด (Aramid fibers) เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) ดังรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **รูปที่ 2.1 ประเภทของคอมโพสิต [4]** ตีหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับ

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

คอมโพสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

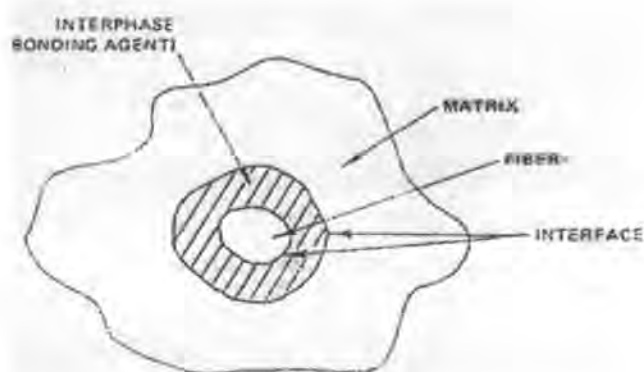
1. ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase) ส่วนนี้เป็นองค์ประกอบหลักของคอมโพสิต ซึ่งจัดเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เมตริกซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ
2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) เป็นวัสดุที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นแผ่น อนุภาค เล็กๆ หรือเส้นใย วัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้ ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น

2.1.1 เมตริกซ์

เมตริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนที่ช่วยหล่อหุ้ม และยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปเมตริกซ์มักจะมี ความเหนียวสูง ความแข็งแรง และมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง หน้าที่ของเมตริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้แก่

- รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุคอมโพสิต
- รักษาการกระจายตัวของส่วนเสริมแรงไม่ให้มารวมกันหรือจับตัวเป็นก้อน
- ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียดสภาพภายใต้อุณหภูมิหรือแรงกระทำที่ระดับหนึ่งๆ
- สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
- ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์

เมตริกซ์มีหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอน (Carbon Matrix) เซรามิกส์ (Ceramic matrix) แก้ว (Glass matrix) และพอลิเมอร์ (Polymer matrix) งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงพอลิเมอร์เมตริกซ์เท่านั้น

2.1.1.1 พอลิเมอร์เมตริกซ์

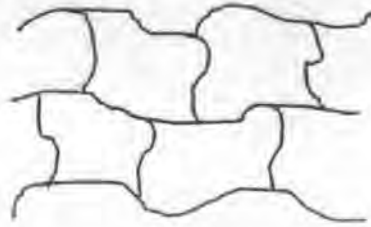
พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลผลิตที่ได้จะนำไปหลอมอีกไม่ได้และไม่ละลายในตัวทำละลายคือ ไม่เกิดการระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยการให้ความร้อนหรือความดัน จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้าง เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทน ไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้ และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม

เทอร์โมเซตที่ใช้เป็นเมตริกซ์ส่วนใหญ่ ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเทอร์ และไวนิลเอสเทอร์ เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นอนของโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อน และด้านการเกิดออกซิเดชันได้ดี สมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยง และน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมตริกซ์มีความแข็งแรงมาก หรือมี modulus ยึดหยุ่นสูง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมาก ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำ มีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อย และไม่เหนียว



รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการจัดโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมเซต

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลายๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง และไนพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมี การจัดเรียงตัวที่ดี ทำให้เมตริกซ์มีความแข็งแรง โดยที่สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับองค์ประกอบเป็นผลึก สัณฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวของผลึก ที่ขึ้นกับสถานะในการผลิต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน

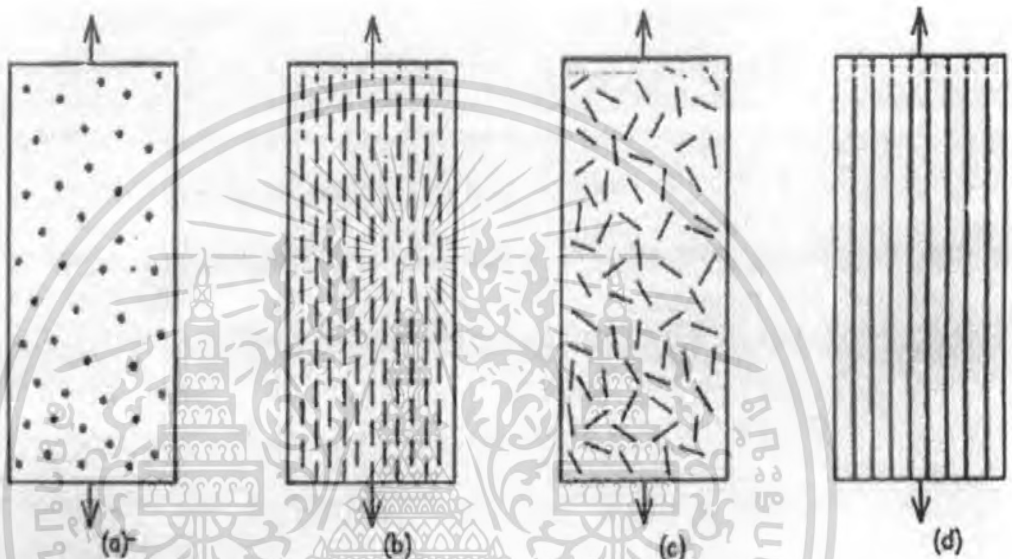


รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการจัดโครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) มีลักษณะรูปร่างหลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆก็ได้ ตัวเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) อาจจะเป็นเส้นใยต่อเนื่องหรือเส้นใยสั้น เส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน [4]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง ควรมีลักษณะดังนี้

- เส้นใยควรมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง เพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
- เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
- ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
- เส้นใยควรจะเสถียร สามารถรับความแข็งแรงขณะจัดเก็บและขึ้นรูปได้
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

- เส้นผ่านศูนย์กลาง
- ความยาวของเส้นใย
- ปริมาณของเส้นใย
- ลักษณะรูปร่างของเส้นใย
- การจัดเรียงตัวของเส้นใยคอมโพสิต

โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในคอมโพสิต สามารถแบ่งเป็น

1. เส้นใยสังเคราะห์ (Synthesis fibers) เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) , เส้นใยแก้ว (Glass fiber) ฯลฯ
2. เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

การผสมเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติด้านต่างๆ ให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ เช่น

- ความแข็งแรง
- ความเหนียว
- ความเสถียรภาพของรูปร่าง
- การคืบ
- ความทนทานต่อการใช้งาน

2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิด และมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะกับการใช้งานต่างๆ

ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) ฯลฯ
- เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การจัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง
- มีอายุการใช้งานยืนยาว มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติรับแรง และแดมปีง (Damping) ดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Coefficients of Thermal Expansion ; CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปสูง
- คอมโพสิตจะมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรง จึงเป็นสาเหตุทำให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับการจัดเรียงตัว
- ยากในการต่อหรือเชื่อมกับวัสดุอื่น
- ยากในการตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต
- ยากในการทำลาย และนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle)

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) [5,6]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือ พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพลาสติกทั่วไป โดยถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้ โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ระบุชนิดและประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ เช่นเดียวกับ American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการ [6] แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. พลาสติกที่สลายตัวได้ด้วยแสง (Photodegradable plastics)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกหักของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบ กองปุ๋ยอินทรีย์หรือคอมโพสท์หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีดี หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวีหรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide ; ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความชื้นจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิ-แอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต พอลิเอไมด์ และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีความชื้นจากสภาพแวดล้อมและสารเคมีหรือเอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และประเภทที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic hydrolysis) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic hydrolysis) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอก มี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ เช่น Depolymerase Lipase Esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลด์ (Alkalide metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายใต้เซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความหมายหรือคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ระบุว่า การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกที่ได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ สามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภท คือ

1. Biodegradation หรือการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นกระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ สิ่งสำคัญคือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพควรเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ สะอาด ไม่เป็นพิษ ในเวลาและสภาวะที่กำหนด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบขนาดเล็กที่มีความเสถียร และพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และน้ำ

2. Composting หรือการคอมโพสท์ เป็นกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม พลาสติกจะเกิดการย่อยสลายและเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายฮิวมัส (Humus) หรือดินดำ นอกจากนี้ยังมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแร่ธาตุต่างๆ เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ไม่เหลือเศษวัสดุขนาดใหญ่ ตกค้างและไม่เป็นพิษ สามารถนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช พลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกย่อยสลายได้โดยการคอมโพสท์ (Compostable plastic) ต้องมีอัตราการย่อยสลายในคอมโพสท์ไม่ช้ากว่าเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ

3. Hydro-biodegradation เป็นการย่อยสลาย 2 ขั้นตอน โดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ

4. Photo-biodegradation เป็นการย่อยสลาย 2 ขั้นตอน โดยผ่านปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยแสงก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สารตัวเติม (Fillers) [4,5]

2.3.1 ความหมายของสารตัวเติม

สารตัวเติม (Fillers) คือ สารจำพวกอนุภาคละเอียดหรือจำพวกเส้นใย ที่ใช้เติมใส่พอลิเมอร์เพื่อทำให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ดีขึ้น เหมาะสำหรับการใช้งาน สารตัวเติมที่ใช้กันทั่วไปเป็นสารราคาถูกเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์จึงช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมมีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยในการเติมสารตัวเติมมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

1. ลดต้นทุนการผลิต
2. ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเชิงกล เช่น เพิ่มค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึง การยึดตัว ความต้านทานแรงกระแทก ความแข็ง เป็นต้น

นอกจากนี้โดยทั่วไปในการผลิตพอลิเมอร์จะมีสารตัวเติมบางชนิด สารเสริมแรง (Reinforcements) และสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น

- ปรับปรุงสมบัติการไหล ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตัวเติมและการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์
- ปรับปรุงสมบัติทางเคมี เช่น เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ลดการซึมผ่าน เป็นต้น
- ปรับปรุงสมบัติทางความร้อน เช่น ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัว เป็นต้น
- ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
- ปรับปรุงสมบัติทางแสง เช่น ค่าดัชนีหักเหแสง เป็นต้น
- เพิ่มอายุการใช้งาน

2.3.2 ประเภทของสารตัวเติม

สารตัวเติมโดยทั่วไปจะแบ่งตามประเภทของสารได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. สารตัวเติมประเภทสารอินทรีย์ (Organic fillers) เป็นสารตัวเติมที่ใช้เพิ่มเนื้อและเพื่อทำให้พอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น ผงไม้ที่ได้จากการป่นไม้ เส้นใยจำพวกเซลลูโลส สำลี ปอ เป็นต้น
2. สารตัวเติมประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic fillers) สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนมากใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความทนต่อการขีดข่วนและสารเคมี และสามารถเพิ่มสมบัติเฉพาะ

บางประการ สารตัวเติมจำพวกนี้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซิลิกา (Silica) ดินขาว (Clay) ไมก้า (Mica) และซิลิกอน คาร์ไบด์ (Silicon carbide) เป็นต้น

2.3.3 พฤติกรรมของสารตัวเติม

พฤติกรรมของสารตัวเติมแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เมื่อผสมสารตัวเติมประเภทนี้จะทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะทางเคมีหรือการยึดเกาะอื่นๆ กับวัสดุที่จะทำการเสริมแรง โดยสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ที่ใส่สารตัวเติมชนิดเสริมแรง เช่น

- การหดตัวลดลง
- ลดต้นทุนการผลิต
- ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
- ลดอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกายภาพ
- ปรับปรุงสมบัติการคืบ (Creep behavior) และ Apparent modulus
- ลด Viscoelastic yield เมื่อให้แรง
- มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ความแข็งแรงกดอัด (Compressive strength) และความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) เพิ่มขึ้น

2. สารตัวเติมชนิดเฉื่อยหรือไม่เสริมแรง (Inert or Non-reinforcing fillers) สารตัวเติมมีราคาถูก ทำให้ปริมาณเพิ่มขึ้น โดยสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ที่ใส่สารตัวเติมชนิดเฉื่อยเทียบกับที่ไม่ใส่สารตัวเติม

- การหดตัวลดลง
- ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
- ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
- ลดอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และเชิงกายภาพ
- ลดต้นทุนการผลิต
- เพิ่มอุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน (Heat Deflection Temperature)
- มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic) ความแข็งแรงกดอัด (Compressive strength) และความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้สารตัวเติมเป็นการลดต้นทุนในการผลิต แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องไม่ทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดลงจนเสียคุณภาพ สารเคมีที่ใช้เป็นสารตัวเติมอาจมีความสามารถเป็นสารเสริมแรงหรือกึ่งเสริมแรงก็ได้ และสารตัวเติมชนิดเดียวกันที่มีสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้ต่างกัน จึงต้องเลือกสารตัวเติมที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติที่ต้องการ

2.3.4 รูปแบบการทำงานของสารตัวเติม

เมื่อใส่สารตัวเติมลงไปผสมกับพอลิเมอร์ สารตัวเติมมีรูปแบบการทำงานหลายรูปแบบ สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

1. สารตัวเติมบางชนิดสามารถเกิดพันธะเคมีหรือการยึดเกาะที่ดีกับวัสดุ เปรียบได้ว่าสารตัวเติมทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง เช่น เขม่าดำ (Carbon black) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (Reinforcing fillers) ในยาง
2. สารตัวเติมทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อ อยู่ในรูปของอนุภาคในพอลิเมอร์ ซึ่งทิศทางการจัดเรียงตัวและการกระจายของอนุภาค จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ
3. สารตัวเติมอยู่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ ทำหน้าที่ช่วยกระจายแรงกระแทก ช่วยปรับปรุงความสามารถในการทนแรงกระแทกได้ดีขึ้น แต่อาจมีค่าทนแรงกระแทกลดลงบริเวณที่เป็นจุดต่อระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม

แต่อย่างไรก็ตามสมบัติของวัสดุขึ้นกับสมบัติของสารประกอบ สารตัวเติมที่มีสมบัติทางกายภาพต่างกันสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้ต่างกัน ในการทดลองนี้สารตัวเติมที่สนใจเป็นจำพวกวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติ เมื่อเติมสารตัวเติมลงไปผสมกับพอลิเมอร์ จึงทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมที่สามารถทำให้พอลิเมอร์เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้

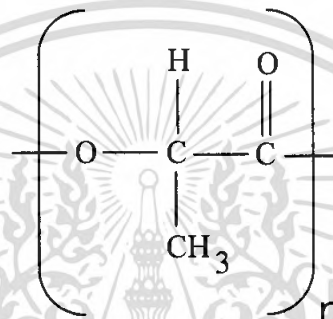
2.4 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) [6]

2.4.1 ลักษณะและสมบัติโดยทั่วไป

พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastic) ที่มีโครงสร้างแบบอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ทางชีวภาพ (Biodegradable) มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ $50-80^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ประมาณ $173-178^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่ายคล้ายพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) ส่วนใหญ่ เช่น กระบวนการหลอมปั่นเส้นใย (Melt spinning) กระบวนการอัดรีด (Extrusion) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection) เป็นต้น มีสมบัติเชิงกลที่ดี กล่าวคือ มีค่ามอดุลัส (Modulus) ความแข็ง (Stiffness) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูง อย่างไรก็ตาม PLA ยังคงมีข้อจำกัดในบางการใช้งาน เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่เปราะ (Brittleness) และมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ต่ำ ในกระบวนการผลิตจึงนิยมปรับปรุงสมบัติโดยผสมสารเสริมแรง และพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เพื่อเพิ่มสมบัติการดึงยืด (Elongation) และการรับแรงกระแทก (Impact) ให้ดีขึ้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ PLA

2.4.2 กระบวนการผลิต Poly(lactic acid) ; PLA

พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid); PLA) ถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดยนักวิจัยชื่อ W.H. Carothers จากบริษัทดูปองท์ (Dupont) สหรัฐอเมริกา ในปีคริสต์ศักราช 1932 จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันมีบริษัทที่ผลิตพอลิเมอร์ชนิดนี้ทางการค้าหลายบริษัท เช่น บริษัทเนเจอร์เวิร์ค (Nature work) บริษัทมิตซูชิ เคมีคอล (Mitsui chemical) เป็นต้น

การผลิต PLA เริ่มต้นจากการสังเคราะห์สารตั้งต้นเพื่อใช้ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ได้แก่ กรดแลคติก (Lactic acid ; LA) ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) จึงมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามาก สามารถละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอื่นๆ โดย LA สามารถสังเคราะห์ได้จากทั้งกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis) และกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ (Microbial fermentation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการสังเคราะห์ Lactic acid ; LA

ในกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี จะใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ได้แก่ อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) โดยนำไปผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส จะได้แลคโตไนไตรล์ (Lactonitrile) ออกมา จากนั้นไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในสภาวะกรด จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติก ในรูปของผสมราซีมิก (Racemic mixture) กรดดีแอลแลคติก (DL-lactic acid) หรือ DLLA เนื่องจากในโครงสร้างของ DLLA จะมีคาร์บอนอะตอมชนิดไม่สมมาตร (Asymmetric carbon หรือ Chiral carbon atom) หมู่ทุกหมู่ที่จับคาร์บอนอะตอมนี้แตกต่างกัน อะตอมไฮโดรเจนที่ติดอยู่สามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบอินอล (Enol) นำไปสู่กระบวนการราซีไมเซชันด้วยตัวเอง (Autoracemization) เกิดเป็นของผสมราซีมิก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ติดกับคาร์บอนอะตอมดังกล่าวสามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้ทั้งทางขวา (D-form) และทางซ้าย (L-form)

ส่วนในกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ จะใช้วัตถุดิบทางเกษตรกรรมที่เป็นสารจำพวกแป้ง เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวสาลี ข้าวโพด ฯลฯ การเจริญเติบโตของพืชจะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) ในกระบวนการสังเคราะห์แสง จากนั้นทำการบดย่อยวัตถุดิบเหล่านี้ให้เป็นแป้ง แล้วทำการย่อยโมเลกุลของแป้งด้วยเอนไซม์อะไมเลสในสภาวะกรด (Amylase) จนได้น้ำตาลกลูโคส (Glucose) แล้วทำการหมักกลูโคสที่ได้ด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นกรองแยก LA ออกจากของผสมที่ได้จากหมัก จะได้ผลิตภัณฑ์ LA ในรูปของกรดแอลแลคติก (LLA) หรือกรดดีแอลแลคติก (DLA) ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่เลือกใช้ ซึ่งมีหลากหลายชนิด เช่น แลคโตบาซิลลัส อะไมโลไวรัส (*Lactobacillus amylovirus*) เอนเทอโรคอคคัส เฟคาลิส อาร์เควายวัน (*Enterococcus faecalis RKY1*) เป็นต้น

2. กระบวนการสังเคราะห์ Poly(lactic acid) ; PLA

PLA สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของ LA ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) และกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-opening polymerization)

กระบวนการควบแน่นใช้วิธีพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization) และพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) วิธีพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์จะเกิดการควบแน่นของวงแลคไทด์ (Lactide) แข่งขันกับ PLA และเกิดการสลายตัวของ PLA ได้ง่าย จึงผลิต

PLA ได้ในปริมาณน้อย ส่วนวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลายจะได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากเกิดการถ่ายโอนสายโซ่โดยตัวทำละลาย

ในอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้วิธีพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงโดยใช้แคตตาลิซิส ออกโตเอต (Stannous octoate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ในท้องปฏิบัติการทั่วไปจะนิยมใช้แคตตาลิซิส คลอไรด์ (Stannous chloride) หรืออีกชื่อหนึ่งคือ ทิน ทู คลอไรด์ (Tin (II) chloride) ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ SnCl_2 วิธีการเปิดวงนี้จะช่วยให้ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี

3. กระบวนการย่อยสลาย Poly (lactic acid); PLA

กระบวนการย่อยสลาย PLA เกิดจากการไฮโดรไลซิสสายโซ่พอลิเมอร์กลับไปเป็น LA แล้วถูกสันดาปด้วยจุลินทรีย์กลายเป็นน้ำ (H_2O) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือก๊าซมีเทน (CH_4) ในกรณีที่จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anarobic bacteria) ซึ่งสำหรับกระบวนการผลิต PLA โดยวิธีการหมัก ปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับที่พืชใช้ไปในกระบวนการสังเคราะห์แสง จึงไม่เป็นการเพิ่มก๊าซ CO_2 แก่ชั้นบรรยากาศเหมือน PLA ที่สังเคราะห์จากวิธีทางเคมี โดยทั่วไปแล้ว PLA จะใช้เวลา 4 เดือนถึง 2 ปี ในการสลายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างของวัสดุ น้ำหนักโมเลกุล ความเป็นผลึก ความบริสุทธิ์ สภาพที่ใช้ในการขึ้นรูป ขนาดและรูปร่างของวัสดุ

2.4.3 การนำไปใช้

PLA มีศักยภาพในการนำมาใช้งานด้านเส้นใย สิ่งทอ และผ้าชนิดไม่ถักทอ (Non-woven) มีสมบัติการจับจีบและคงรูปได้ดี เชื่อมติดกันด้วยความร้อน มีความทนทานต่อแสงยูวีทำให้สีของเส้นใยซีดช้า มีสมบัติติดไฟและการเกิดควันต่ำ เหมาะสำหรับใช้ทำเสื้อผ้าและงานตกแต่งผ้าคลุมพื้นผ้าใบ

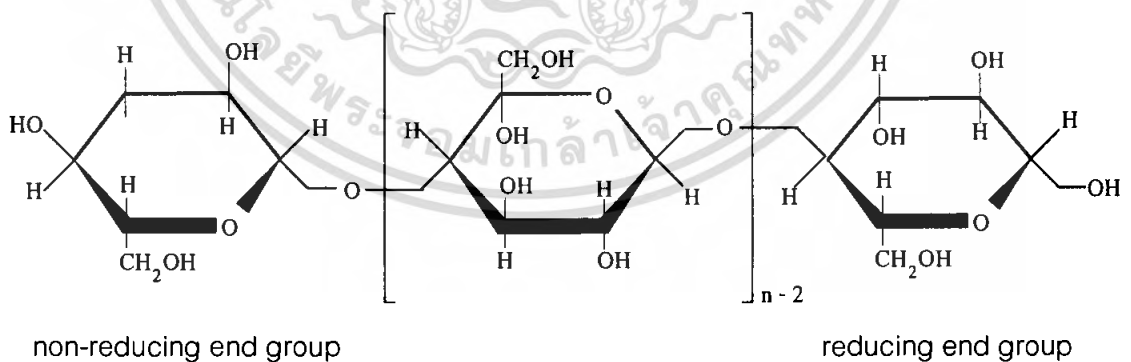
นอกจากนี้ PLA ยังเป็นวัสดุที่เข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี เหมาะสำหรับงานทางการแพทย์ โดยใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยตัวยาหรือสารสำคัญ และชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์สำหรับฝังลงในกระดูกหรือเนื้อเยื่อของผู้ป่วย รวมถึงไหมละลาย โดยสามารถควบคุมสมบัติเชิงกล สมบัติทางเภสัชกรรมและการสลายตัวโดยปรับส่วนผสมทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งระยะเวลาการย่อยสลายอาจใช้เวลาตั้งแต่ 2-3 สัปดาห์ ไปจนถึง 2-3 ปี ด้านบรรจุภัณฑ์ PLA ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุหีบในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับของใช้และอาหาร รวมถึงขวดสำหรับบรรจุน้ำดื่ม

2.5 เส้นใยธรรมชาติ [4,7]

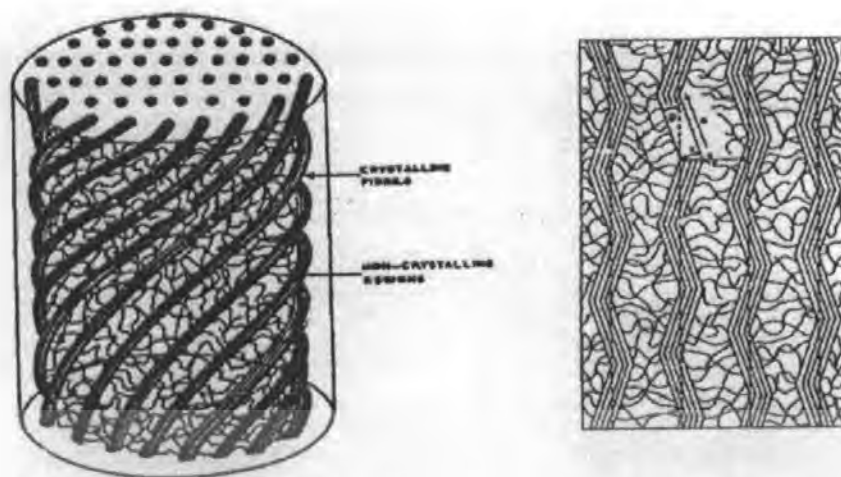
เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญ ได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ฝ้าย (Cotton) ป่าน (Flax) ปอกระเจา (Jute) และป่านศรนารายณ์ (Sisal) เป็นต้น หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ จึงนิยมใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติม และสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน ช่วยเพิ่มปริมาณการผลิต ช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น และเสริมแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ มีองค์ประกอบคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ เช่น ส่วนที่ละลายน้ำได้ และไข (Wax) เป็นต้น

2.5.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากที่สุดในโลก และพบโดยทั่วไปในธรรมชาติ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด ส่วนปริมาณของเซลลูโลสในพืชต่างชนิดกันก็จะมีปริมาณที่ไม่เท่ากันด้วย เซลลูโลสเป็นสารประกอบของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยกลูโคส (Glucose) เป็นหน่วยซ้ำๆกัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ โดยสูตรโครงสร้างของเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.7 และลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส แสดงดังรูปที่ 2.8



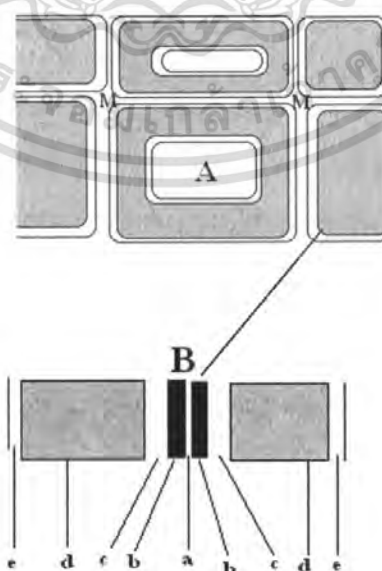
รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส



รูปที่ 2.8 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส [7]

2.5.1.1 โครงสร้างทางกายภาพของเซลลูโลส

ผนังเซลล์พืชมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ซึ่งเป็นหน่วยเล็กๆ ที่ประกอบรวมเป็นเนื้อเยื่อพืช ในเซลล์พืชมีโปรโตพลาสซึม (Protoplasm) และสารหล่อเลี้ยงในเซลล์ (Cell sap) โดยมีผนังบางๆ ที่ไม่มีสีเรียกว่า เซลล์เมมเบรน (Cell membrane) ห่อหุ้มอยู่ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงภาคตัดขวางของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) และลักษณะของเซลล์



รูปที่ 2.9 ภาคตัดขวางของเส้นใยเซลลูโลส [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- A แสดงเซลล์ที่ถูกล้อมรอบด้วยเซลล์อื่นๆ ซึ่งแยกออกจากกันโดยมีสารระหว่างเซลล์ (Intercellular substance) ที่เรียกว่า มิติเดิลลาเมลลา (Middle lamella) คั่นอยู่
- M มิติเดิลลาเมลลา
- a เป็นส่วนผนังเซลล์ที่อยู่ติดกัน
- b เป็นส่วนที่ติดกับผนังมิติเดิลลาเมลลา ซึ่งก็คือผนังเซลล์ชั้นแรก (Primary cell wall) เรียกว่า P
- c เป็นส่วนนอกสุดของผนังเซลล์ชั้นที่สอง (External layer of secondary cell wall) เรียกว่า S₁
- d เป็นส่วนกลางของผนังเซลล์ชั้นที่สอง (Middle layer of secondary cell wall) เรียกว่า S₂
- e เป็นส่วนในสุดของผนังเซลล์ชั้นที่สอง (Inner layer of secondary cell wall) เรียกว่า S₃ ซึ่งส่วนนี้จะล้อมรอบช่องว่างภายในเซลล์เรียกว่าลูเมน (Lumen)

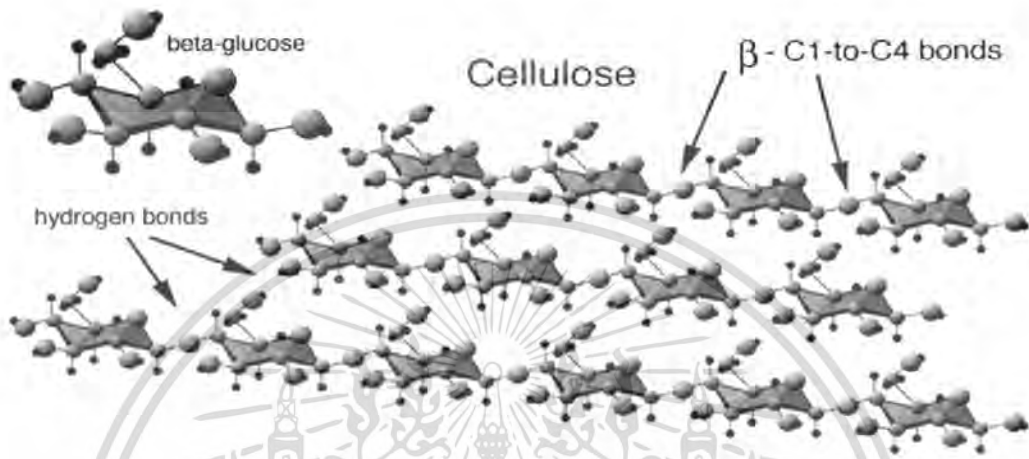
ในการพิจารณาว่าเซลลูโลสจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้ดีหรือไม่ จะพิจารณาจากการที่สารเคมีสามารถกระจายเข้าไปในส่วนต่างๆ ของผนังเซลล์ได้ดีเพียงใด ซึ่งจะสัมพันธ์กับโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์

2.5.1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเซลลูโลส

โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสคือ Poly(β-1,4-D-anhydroglucopyranose) โดยแต่ละหน่วยของเซลลูโลสเรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose ; C₆H₁₂O₅) เพราะเกิดการขจัดน้ำออกจากกลูโคส เซลลูโลสธรรมชาตินี้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณจากการวัดความหนืด เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของกลูโคสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เซลลูโลสมีองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) สูง คือ มีค่าประมาณร้อยละ 60-80 ส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมตัวสูงมาก จึงเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ ทนต่อตัวทำละลายและสารเคมี โดยสารเคมีที่มีความสามารถละลายเซลลูโลสได้ไม่กี่ชนิด เช่น กรดกำมะถัน (เข้มข้นมากกว่า 68%) กรดเกลือ (เข้มข้นมากกว่า 41%) สารประกอบแอมโมเนียมควอเตอร์นารี (Quaternary ammonium compound) ถ้าเซลลูโลสอยู่ในตัวทำละลายที่มีขั้วสูงรวมทั้งน้ำจะเกิดการบวมตัวเล็กน้อยเท่านั้นในบริเวณของโมเลกุลที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous region)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลสจะอยู่เป็นโครงรูปแบบเก้าอี้ โมเลกุลของกลูโคสทุกหน่วยจะจัดเรียงตัวซ้ำๆ กัน ในทิศทางที่กลับกัน 180 องศา ดังรูปที่ 2.10 และพบว่าโมเลกุลของกลูโคส ในแป้งจะเชื่อมต่อกันโดย Alpha linkages แต่โมเลกุลของกลูโคสในเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วย Beta linkages



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส [8]

2.5.1.3 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

1. การละลาย

เซลลูโลสไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น 40% ของกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) 72% ของกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่หยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เซลลูโลสสามารถบวมตัวในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) บางครั้งทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

2. ความเหนียว

ความเหนียวเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส ถ้ามีการเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความเหนียวก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

3. การดูดซับความชื้น

เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับและมีการคายไอน้ำหรือของเหลวอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศ จนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ

เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความหนาแน่น

เซลลูโลสเป็นเส้นใยเดี่ยวจะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน โดยค่าความหนาแน่นนั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มา หรืออาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

2.5.1.4 ประโยชน์ของเซลลูโลส

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรประเภทฟาง ข้าว แกลบ ชี้อ้อย ชานอ้อย และต้นมันสำปะหลังเป็นจำนวนมาก วัสดุเหล่านี้หาได้ง่ายนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ และยังสามารถนำมาแปรรูปโดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ เช่น เซลลูโลส เมื่อถูกย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสจะได้กลูโคสเป็นส่วนใหญ่ ต้นข้าวโพดมีเซลลูโลสประมาณ 45% เมื่อย่อยสลายแล้วพบว่าได้น้ำตาลกลูโคสประมาณ 50% ของเซลลูโลส ซึ่งน้ำตาลกลูโคสเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตเอทานอล ไวตามิน กรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด กรดอินทรีย์ และเคมีภัณฑ์อีกหลายอย่าง

นอกจากนี้เซลลูโลสยังถูกนำไปเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตภัณฑ์หลายประเภท ดังนี้

1. เส้นใย (Fiber) เซลลูโลสจากฝ้ายและจากเยื่อไม้ที่มีแอลฟาเซลลูโลสมากกว่า 90% ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยเตรียมสารละลายเซลลูโลสในตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วทำให้เกิดเส้นใยเซลลูโลสขึ้นมาใหม่ ซึ่งเรียกว่า เซลลูโลสคืนสภาพ (Regenerated cellulose) ใช้ทำไหมเทียม ผ้าผาน พรม ผ้าห่มขนสัตว์ ถุงเท้า ชุดชั้นใน สายพาน และสายเทป เป็นต้น เส้นใยที่ได้จากเซลลูโลสนี้ เรียกว่า "เรยอน" (Rayon)

2. พิล์ม (Film) แผ่นฟิล์มที่ทำมาจากเซลลูโลส ใช้ห่ออาหาร ใ้กรอก เป็นเมมเบรน (Membrane) ในกระบวนการไดอะลิซิส (Dialysis) และกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) ทั้งนี้เพราะมีสมบัติเหมาะสมหลายอย่าง เช่น คงทน ใส ยอมให้อากาศและตัวถูกละลายซึมผ่านได้บ้าง เมื่อต้นแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากเซลลูโลส เรียกว่า เซลโลเฟน (Cellophane) หรือกระดาษแก้ว

3. ไตเทียม (Artificial kidneys) ไตเป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่กรองของเสียและน้ำออกจากเลือดโดยอาศัยกระบวนการไดอะลิซิส (Dialysis) เมื่อไตพิการสมบัติดังกล่าวจะสูญเสียไป อาจทำให้ถึงกับเสียชีวิต ดังนั้นหน่วยที่ทำหน้าที่กรองของไตจึงสำคัญ หน่วยกรองของไตเทียมเป็นหลอดที่ทำมาจากรีเจเนอเรตเซลลูโลส มีผนังหนาประมาณ 12.7 – 17.8 ไมโครเมตร ซึ่งนิยมใช้คิวพรัมโมเนียเพราะกรองได้เร็วกว่า

4. อาหาร (Foods) แม้ว่าเซลลูโลสจะไม่ใช่เป็นอาหารของคน เพราะย่อยไม่ได้ก็ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารหลายชนิด เช่น ขนมปัง อาจมีเซลลูโลสผสมอยู่ถึง 25% เซลลูโลสช่วยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

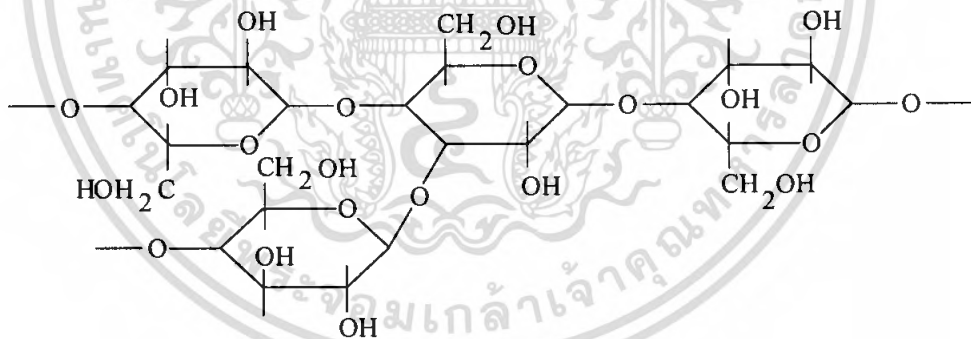
อาหารทนความร้อน ขึ้น การกระจายของแป้งดีขึ้น ทำให้โพลิเมอร์อยู่ตัว ควบคุมการเกิดน้ำแข็งในอาหาร เป็นต้น

5. ยา (Drugs) ในยาเม็ดหนึ่งนอกจากจะมีตัวยาแล้วยังมีสารอื่น เช่น เซลลูโลส เป็นส่วนประกอบด้วย เพื่อช่วยให้เม็ดยาคงทนไม่แตกง่าย และยังทำให้เม็ดยาแตกตัวได้ดีในกระเพาะอาหาร

6. เครื่องสำอาง (Cosmetic) เซลลูโลสที่ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางที่รู้จักกันดีมีชื่อทางการค้าว่า Avicel-Re481 ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส 89% และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose ; CMC) 11% ใช้ผสมในยาสีฟัน แชมพู ครีม เป็นต้น

2.5.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลส แต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไคโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก และกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยจะรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในขังข้าวโพด เฮกเซน สูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงสูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [9]

ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส มีดังนี้

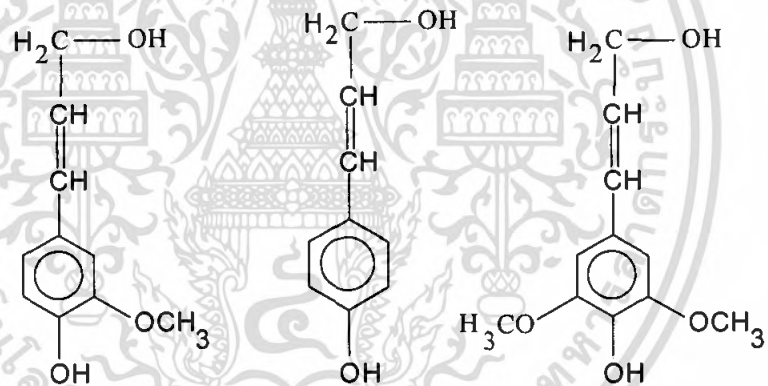
1. เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) แมนโนส (Mannose) ไคโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) กรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) และกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) แต่เซลลูโลสจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นกลูโคสอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

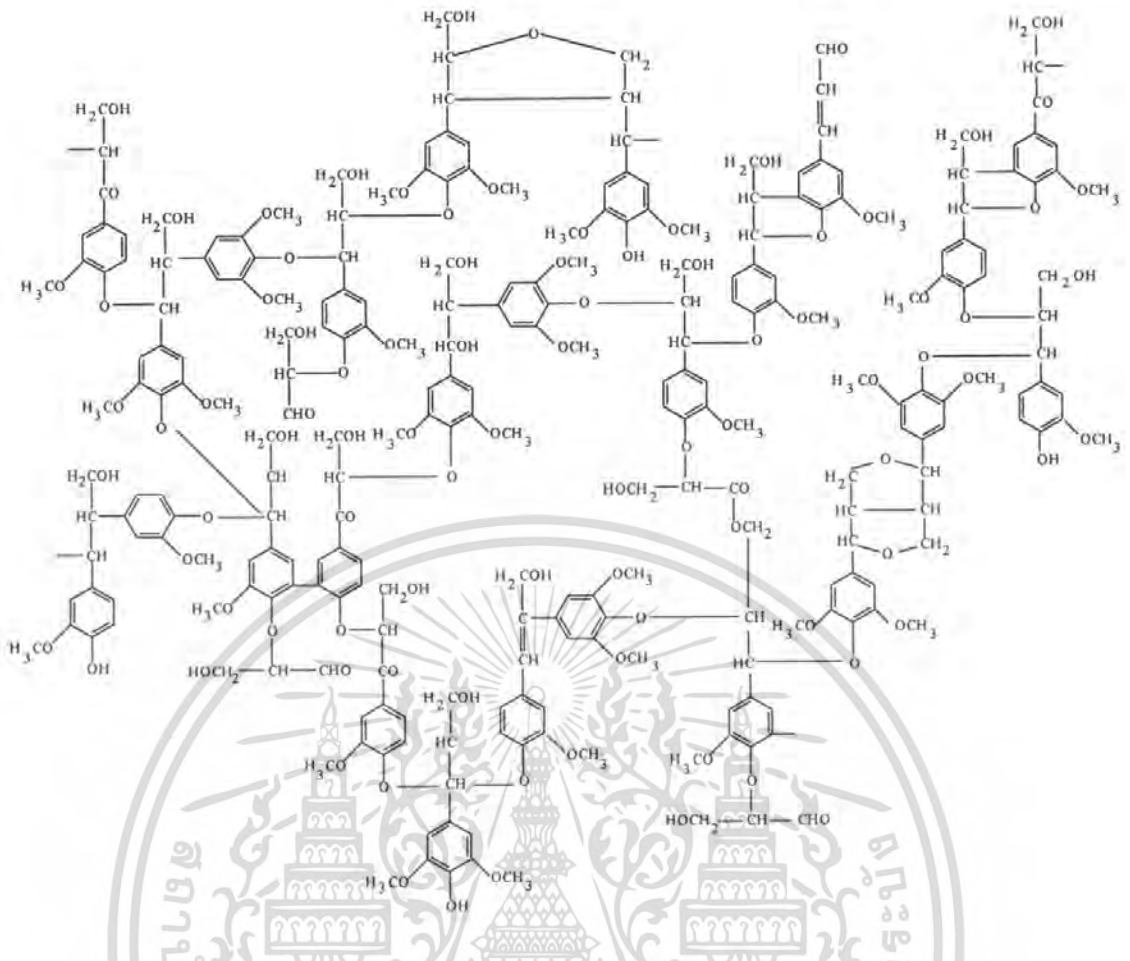
2. เฮมิเซลลูโลสจะมีลักษณะสายโซ่โมเลกุลเป็นโซ่กิ่ง (Branch chain) แต่เซลลูโลสจะมีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นตรง (Linear chain)
3. องศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ของเซลลูโลสจะมีค่าสูงกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10-100 เท่า

2.5.3 ลิกนิน

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเชิงซ้อนของพอลิเมอร์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ซึ่งจะมีทั้งอะลิฟาติก (Aliphatic) และอะโรมาติก (Aromatic) เป็นองค์ประกอบ ทำให้ลิกนินไม่ละลายน้ำและมีความแข็งสูง แต่ไม่มีสมบัติการยืดหยุ่น ซึ่งลิกนินนั้นยังช่วยยึดส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นพืชที่มีปริมาณลิกนินมากก็จะมี ความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างหน่วยที่ซ้ำกันของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.12

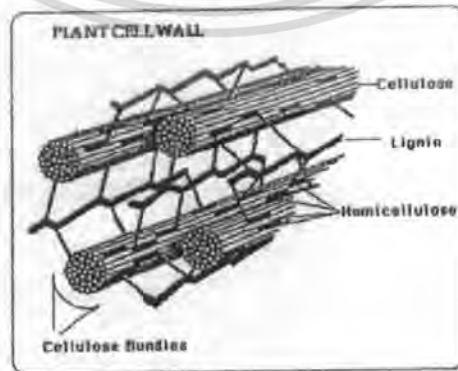


รูปที่ 2.12 แสดงหน่วยที่ซ้ำกันของลิกนิน [10]



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโมเลกุลของลิกนิน [8]

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินไม่เท่ากันขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งสูง และไม้อายุมากขึ้นไม้ที่มีอายุน้อยจะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 หญ้าแฝก [11]

หญ้าแฝกจัดเป็นหญ้าเขตร้อนที่ขึ้นตามธรรมชาติ กระจายอยู่ทั่วไปในสภาพแวดล้อมต่างๆ ประเทศไทยสามารถพบหญ้าแฝกขึ้นอยู่ตามธรรมชาติในพื้นที่ทั่วไปจากที่ลุ่มจนถึงที่ดอน และสามารถขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิด มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria zizanioides* เป็นพืชตระกูลหญ้าขึ้นเป็นกอหนาแน่น เจริญเติบโตโดยการแตกกออย่างรวดเร็ว เส้นผ่านศูนย์กลางกอประมาณ 30 เซนติเมตร ความสูงจากยอดประมาณ 0.5 ถึง 1.5 เซนติเมตร ลักษณะใบแคบ ยาวประมาณ 75 เซนติเมตร ความสูงจากยอดประมาณ 75 เซนติเมตร ความกว้างประมาณ 8 มิลลิเมตร ค่อนข้างแข็ง หากนำมาปลูกติดต่อกันเป็นแนวยาวขวางแนวลาดเทของพื้นที่ กอซึ่งอยู่เหนือดินก็จะแตกกอติดต่อกันเหมือนรั้วต้นไม้ สามารถกรองเศษพืชและตะกอนดิน ซึ่งถูกน้ำชะล้างพัดพามาตกทับถมดินติดอยู่กับกอหญ้าเกิดเป็นคันดินตามธรรมชาติได้ หญ้าแฝกเป็นพืชที่มีระบบรากลึกเจริญเติบโตในแนวตั้งมากกว่าออกทางด้านข้าง และมีจำนวนรากมากจึงเป็นพืชที่ทนแล้งได้ดี รากจะประสานติดต่อกันแน่นหนาเสมือนม่านหรือกำแพงใต้ดิน สามารถกักเก็บน้ำและความชื้นได้ ระบบรากแผ่ขยายกว้างเพียง 50 เซนติเมตร โดยรอบกอเท่านั้น จึงไม่เป็นอุปสรรคต่อพืชที่อยู่ข้างเคียง จัดเป็นมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้ดินมีความชื้น และรักษาหน้าดินเพื่อใช้สำหรับปลูกพืชเศรษฐกิจ การใช้หญ้าแฝกในการอนุรักษ์ดินและน้ำดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายมาก เป็นการนำไปสู่การพัฒนากระบวนการเกษตรกรรมในเขตพื้นที่การเกษตรน้ำฝนที่มีความมั่นคงและยั่งยืนได้ สามารถนำวิธีการนี้ไปใช้ในพื้นที่อื่นๆ เพื่อรักษาสภาพแวดล้อม อนุรักษ์สภาพแวดล้อม และอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น พื้นที่สองข้างทาง คลองชลประทานอ่างเก็บน้ำ บ่อน้ำ ป่าไม้ ป้องกันขอบตลิ่ง คอสะพาน และไหล่ถนน เป็นต้น

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาหญ้าสกุล *Vetiveria* อย่างเป็นระบบทางอนุกรมวิธาน ผลของการศึกษาปรากฏว่า หญ้าแฝกที่พบในประเทศไทยสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ หญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides* Nash) และแฝกดอน (*Vetiveria nomoralis* A. Camus) โดยลักษณะของหญ้าแฝก แสดงดังรูปที่ 2.15 ส่วนความแตกต่างของหญ้าแฝกหอม และหญ้าแฝกดอน แสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะหญ้าแฝก [12]

1. หญ้าแฝกหอม หรือหญ้าแฝกกลม หรือหญ้าแฝกบ้าน (*Vetiveria zizanioides* Nash)

พบขึ้นอยู่ทั่วไปในสภาพแวดล้อมต่างๆ สามารถปรับตัวเข้ากับพื้นที่นั้นได้ดี หญ้าแฝกหอม มีใบยาว 45-100 เซนติเมตร กว้าง 0.6-1.2 เซนติเมตร มีหลังใบโค้งปลายใบแบน มีสีเขียวเข้ม เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมากทำให้ดูมัน ท้องใบออกสีขาวที่ดกกว่าด้านหลังใบ และเมื่อนำใบส่องดูกับแดดจะเห็นรอยกันขวางในเนื้อใบ (Septum) ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะพื้นใบบริเวณส่วนโคนและกลางใบ เส้นกลางใบ (Midrib) มีตั้งอยู่ในแผ่นใบไม่โตหรือเด่นชัดเจน หญ้าแฝกหอม มีอายุประมาณ 1 ปี จะมีรากที่ยังลึกได้ประมาณกว่า 1 เมตร ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพของดินและความสมบูรณ์ของพืชในสภาพธรรมชาติ ดินร่วนปนทรายที่มีการระบายน้ำได้ดี หญ้าแฝกจะให้รากยาวที่สุด

2. หญ้าแฝกดอน หรือหญ้าแฝกป่า (*Vetiveria nomoralis* A. Camus)

พบทั่วไปในที่ค่อนข้างแห้งแล้ง หรือบริเวณดินที่ระบายน้ำได้ดีในทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะในป่าเต็งรัง แต่จะมีน้อยในภาคใต้ สามารถขึ้นได้ดีในที่แดดปานกลาง หญ้าแฝกดอนมีใบยาว 35-80 เซนติเมตร กว้าง 0.4-0.8 เซนติเมตร ใบสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันสามเหลี่ยม เนื้อใบหยาบ มีไขเคลือบน้อยทำให้ดูกร้านไม่เหลือบมัน ท้องใบสีเดียวกับหลังใบ แต่มีสีซีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกันในเนื้อใบ เส้นกลางใบสังเกตเห็นชัดเจนมีลักษณะเป็นแกนนูนด้านหลัง โดยทั่วไปหญ้าแฝกที่มีอายุประมาณ 1 ปี จะมีรากลึกประมาณ 80-100 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบความแตกต่างของหญ้าแฝกหอมและหญ้าแฝกดอน [11]

หญ้าแฝกหอม	หญ้าแฝกดอน
<p>ถิ่นกำเนิด</p> <ul style="list-style-type: none"> - ดอนกลางของทวีปเอเชีย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศอินเดีย - มีการนำไปปลูกขยายพันธุ์ทั่วไป 	<p>ถิ่นกำเนิด</p> <ul style="list-style-type: none"> - เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศไทย ลาว เขมร และเวียดนาม - กระจายพันธุ์อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ไม่มีการนำไปปลูกขยายพันธุ์
<p>ลักษณะกอ</p> <ul style="list-style-type: none"> - เป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง - สูงประมาณ 150-200 เซนติเมตร - มีการแตกตะเกียงและแตกแขนงลำต้นได้ 	<p>ลักษณะกอ</p> <ul style="list-style-type: none"> - เป็นพุ่ม ใบยาว ปลายจะแผ่โค้งลงคล้ายกอตะไคร้ ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม - สูง 100-150 เซนติเมตร - ปกติไม่มีการแตกตะเกียง และแขนงลำต้น
<p>ใบ</p> <ul style="list-style-type: none"> - ยาว 45-100 เซนติเมตร กว้าง 0.6-1.2 เซนติเมตร - ใบสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ท้องใบออกสีขาวมีรอยกั้นขวาง เนื้อใบสอกับแตกเห็นชัดเจน - เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมาก ทำให้ดูนุ่มมัน 	<p>ใบ</p> <ul style="list-style-type: none"> - ยาว 35-80 เซนติเมตร กว้าง 0.4-0.8 เซนติเมตร - ใบสีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันแข็งสามเหลี่ยม ท้องใบสีเดียวกับด้านหลังใบแต่ซีดกว่า แผ่นใบเมื่อสอกับแตกไม่เห็นรอยกั้น ในเนื้อใบเมื่อสอกับแตกไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ - เนื้อใบหยาบ มีไขเคลือบน้อยทำให้ดูกร้านไม่เคลือบมัน
<p>ช่อดอกและดอก</p> <ul style="list-style-type: none"> - ช่อดอกสูง 150-250 เซนติเมตร - ส่วนใหญ่มีสีอมม่วง - ดอกย่อยส่วนใหญ่ไม่มีริยางค์แข็ง 	<p>ช่อดอกและดอก</p> <ul style="list-style-type: none"> - สูง 100-150 เซนติเมตร - มีได้หลายสีตั้งแต่สีขาวครีม สีม่วง - ดอกย่อยมีริยางค์แข็ง
<p>เมล็ด</p> <ul style="list-style-type: none"> - ขนาดโตกว่าหญ้าแฝกดอนเล็กน้อย 	<p>เมล็ด</p> <ul style="list-style-type: none"> - ขนาดเล็กกว่าหญ้าแฝกหอม
<p>ราก</p> <ul style="list-style-type: none"> - มีความหอมเย็น มีน้ำมันหอมระเหยอยู่เฉลี่ย 1.4-1.6 % ของน้ำหนักแห้ง - โดยทั่วไปรากหยั่งลึกประมาณ 100-300 เซนติเมตร 	<p>ราก</p> <ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีความหอม - รากสั้นกว่า โดยทั่วไปรากหยั่งลึกประมาณ 80-100 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การใช้ประโยชน์หญ้าแฝก

จุดประสงค์หลักในการปลูกหญ้าแฝกก็เพื่อใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ ซึ่งนอกจากนี้ส่วนใบ ลำต้น และรากของหญ้าแฝก ยังสามารถที่จะนำไปทำอย่างอื่นได้อีก ดังนี้

2.6.1.1 การใช้ประโยชน์จากหญ้าแฝกสำหรับงานศิลปหัตถกรรม

หญ้าแฝกที่สามารถนำมาใช้ในงานหัตถกรรม ได้แก่ กลุ่มหญ้าแฝกหอม (*Vetiveria zizanioides* Nash) ซึ่งมีใบมันและยาว เมื่อโดนน้ำจะนิ่ม

งานหัตถกรรมที่ใช้หญ้าแฝกจะเป็นงานประเภทเครื่องจักรสาน เช่น

- ทำเป็นตะกร้า และภาชนะ ได้แก่ ตะกร้า กระจาด และภาชนะรองต่างๆ
- ทำเป็นเครื่องตกแต่งบ้าน ได้แก่ นวพิภาแขวนกรอบรูป โป๊ะไฟ ของตั้งโชว์
- ทำเป็นเครื่องประดับ ได้แก่ กระเป๋า หมวก เข็มขัด เข็มกลัดติดเสื้อ
- ทำเป็นของใช้สำนักงาน ได้แก่ แฟ้มเอกสาร ปกไดอารี่



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ศิลปหัตถกรรมจากหญ้าแฝก [13,14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.2 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุเพาะเห็ด

ใบของหญ้าแฝกมีองค์ประกอบทางเคมี พวกเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และโปรตีน ทยาบ รวมทั้งแร่ธาตุต่างๆ ที่เชื้อราบางชนิดสามารถเจริญเติบโตในกระบวนการของการหมักได้ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับเพาะเห็ดได้ เห็ดที่ขึ้นได้ดีในวัสดุเฉพาะที่เตรียมจากต้นและใบแฝก ได้แก่ เห็ดนางรม เห็ดนางฟ้า และเห็ดหอม

2.6.1.3 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุคลุมหลังคา

คนไทยใช้ต้นหญ้าแฝก และใบหญ้าแฝกเป็นวัสดุคลุมหลังคาเช่นเดียวกับการใช้ใบจาก ก่อนที่จะเปลี่ยนมาใช้ใบหญ้าคาซึ่งหาซื้อได้ง่าย แต่หญ้าแฝกเป็นวัสดุคลุมหลังคาที่มีสมบัติดีกว่า การใช้หญ้าคามาก เพราะส่วนลำต้นและใบของหญ้าแฝกมีไขเคลือบ มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว และมักจะไม้ถูกแมลงทำลาย

2.6.1.4 การใช้ประโยชน์จากต้นและใบหญ้าแฝกมาทำเป็นปุ๋ยหมักและพืชคลุมดิน

ต้นและใบหญ้าแฝกจะย่อยสลายเป็นปุ๋ยหมักอย่างสมบูรณ์ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ฟู จะมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ คำนวณได้ว่าปุ๋ยหมักจากใบหญ้าแฝก 1 ต้น เทียบเท่ากับแอมโมเนียมซัลเฟต ได้ 43 กิโลกรัม โดยมีแนวโน้มว่าปุ๋ยหญ้าแฝกหมักมีปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โบแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น (โดยมีค่าเฉลี่ย 0.86 0.29 1.12 0.55 และ 0.41 % ตามลำดับ) และมีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7.0 นอกจากนี้ปุ๋ยหมักจากต้นและใบหญ้าแฝกยังให้สารปรับปรุงดินหรือกรดฮิวมิคอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ยูคาลิปตัส [4]

ไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) เป็นไม้ที่สำคัญมากในปัจจุบัน โดยต้นยูคาลิปตัสจะมีลักษณะสูง โด่งาย ปลูกได้ในทุกสภาพดิน มีความทนทาน เมื่อปลูกแล้วสามารถตัดได้ 2-3 ครั้ง โดยไม่ต้องปลูกใหม่ ด้วยเหตุดังกล่าวไม้ยูคาลิปตัสจึงเป็นที่นิยมปลูกและใช้งาน

ต้นยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส (*Eucalyptus camaldulensis*) เป็นต้นยูคาลิปตัสที่ปลูกได้ดีในประเทศไทย โดยลักษณะของไม้จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนนอกสุดเป็นส่วนเปลือก จะมีสีซีดหรือสีครีม และจะมีเขตของเนื้อไม้ที่มีสีต่างกันออกไปมากคือ ส่วนที่เรียกว่า แก่น (Heartwood) เป็นส่วนที่มีสีน้ำตาลเข้ม และด้านนอกแก่นจะมีสีขาวเรียกว่า กระจพี (Sapwood) ส่วนนี้จะมีความหนาขึ้นกับอายุของต้นไม้ ส่วนของกระจพีสามารถถูกทำลายได้ง่ายโดยแมลง หรือเห็ด รา ต่างๆ ได้มากกว่าแก่น ถึงแม้ส่วนประกอบของเซลล์ โครงสร้างของกระจพี และแก่นจะเหมือนกัน แต่การสะสมของสารเคมีโดยกระจพีจะถูกซึมเข้าไปได้ง่ายกว่าแก่น และกระจพีจะมีสภาวะที่จะถูกซึมซาบโดยสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเยื่อได้ดี เป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมทำกระดาษได้ดี โดยทั่วไปยูคาลิปตัสจะมีสมบัติ ดังนี้

- ปริมาณความชื้น	26.3	%
- ความถ่วงจำเพาะ	1.033	
- ความแข็งแรงต่อการตัด	779	kg/cm ²
- ความแข็งแรงต่อการบีบ	368	kg/cm ²
- ความแข็งแรงต่อการเฉือน	126	kg/cm ²



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของต้นยูคาลิปตัส [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กระถินคราสชิคาร์ป่า [16,17,18]

กระถินคราสชิคาร์ป่ามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Acacia crassicaarpa* มีถิ่นกำเนิดอยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ และหมู่เกาะนิวกีนิ โดยได้เริ่มนำเข้ามาปลูกในประเทศไทยเมื่อปี 2528 โดยเฉพาะกระถินคราสชิคาร์ป่าที่มีถิ่นกำเนิดในปาปัวนิวกินี ให้ผลผลิตเนื้อไม้สูงมาก เป็นไม้ที่เจริญเติบโตเร็ว มีคุณภาพเนื้อไม้ดี และยังช่วยปรับปรุงสภาพดิน มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนเช่นเดียวกับพืชตระกูลถั่ว มีลวดลายและสีสันทของเนื้อไม้สวยงาม แต่ใช้เวลาในการปลูกสั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม้สักที่มีขนาดรอบลำต้น 10-11 นิ้ว ที่ใช้เวลาในการปลูก 20-25 ปี แต่กระถินคราสชิคาร์ป่าใช้เวลาปลูกเพียง 10-15 ปีเท่านั้น และกว่า 70 ประเทศได้นำไปปลูกเพื่อฟื้นฟูสภาพป่าและนำไปใช้ประโยชน์เป็นไม้ใช้สอยในด้านต่างๆ เช่น ไม้พืน ทำเฟอร์นิเจอร์ และการผลิตสารแทนนิน เป็นต้น ส่วนในประเทศอินโดนีเซียได้นำไปปลูกป่า เพื่อผลิตเป็นเยื่อกระดาษ โดยกรมป่าไม้ได้ปรับปรุงพันธุ์ไม้กระถินคราสชิคาร์ป่า และสร้างฐานพันธุ์กรรมสำหรับส่งเสริมประชาชนปลูกป่าเศรษฐกิจต่อไป



รูปที่ 2.18 ต้นกระถินคราสชิคาร์ป่า [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ต้นกระถินคราสหิคารป่า (โตเต็มวัย) [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G.H.Yew และคณะ [19] ศึกษาวัสดุประกอบของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ประกอบด้วยพอลิแลคติกแอซิด (PLA), แป้งข้าวเจ้า (RS) (0-50 wt%) และยาง ENR 50 (Epoxidised Natural Rubber) ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และใช้เครื่องกดอัดเพื่อทำชิ้นงานตัวอย่างให้เป็นรูปดัมเบลล์ ทดสอบสมบัติการดึงเพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบระหว่าง พอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานบริเวณพื้นผิวที่เกิดการแตกหัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่า 20% โดยน้ำหนักของแป้งข้าวเจ้า (RS) จะทำให้มีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว นอกจากนั้นพบว่า 20% โดยน้ำหนักของแป้งข้าวเจ้า (RS) ยังทำให้ความแข็งแรงดึงและการยืด ณ จุดขาด ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่าลดลง อาจเป็นผลมาจากการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของแป้งข้าวเจ้า (RS) การนำยาง ENR 50 เข้ามาผสมด้วยจะทำให้ความแข็งแรงดึงและการยืด ณ จุดขาด ของวัสดุประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง ENR 50 ประพฤติตัวเป็นสารที่ยืดหยุ่นได้ และมีประสิทธิภาพในการเป็นสารช่วยผสม ส่วนที่น่าสนใจคือ ลักษณะพื้นผิวของวัสดุประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) ถูกเปลี่ยนสภาพให้อ่อนตัวเมื่อเติมยาง ENR 50 ลงไป ส่วนจลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำสำหรับวัสดุประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) เป็นไปตาม Fick's law ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุลโดยจำนวน และค่าองศาการเกิดพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแป้งข้าวเจ้า (RS) และยาง ENR 50 สมบัติการดึงของวัสดุประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) จะมีคุณภาพลดลงหลังจากดูดซับน้ำแล้วความสามารถในการคงรูปและกลับสู่สภาพเดิมของวัสดุประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการไฮโดรไลซิสของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) จึงเกิดการสลายตัวของวัสดุประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) ที่บริเวณอินเตอร์เฟซและบริเวณอนุภาคของแป้งข้าวเจ้า (RS) สิ่งที่เพิ่มเติมคือ ในส่วนของสมบัติการดึงของวัสดุประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับแป้งข้าวเจ้า (RS) จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ซึ่งรูขนาดเล็กและส่วนที่สึกกร่อนไปบริเวณพื้นผิว แสดงให้เห็นว่าการเกิดไฮโดรไลซิสสูง ถึงอย่างไรก็ตาม การเติมยาง ENR 50 ช่วยทำให้สมบัติการดึงดีขึ้น และช่วยเพิ่มการย่อยสลายได้โดยธรรมชาติของวัสดุประกอบ เมื่อถูกน้ำและเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส

Edwin Bodros และคณะ [20] ศึกษาเทอร์โมพลาสติกที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ส่วนใหญ่ใช้ผลิตในอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติการดึงของคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้กับเส้นใยธรรมชาติ คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้นี้จึงควรนำมาใช้แทนพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว โดยวัสดุที่ใช้ ได้แก่ เส้นใยป่าน , พอลิแลคติกแอซิด (PLA) , แอล-พอลิแลคติกแอซิด (PLLA) , Poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) , พอลิบิวทิลีนไดคาร์บอเนต และแป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก , Poly(butylene succinate) (PBS) และ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิตด้วยเทคนิคการนำแผ่นฟิล์มวางซ้อนกัน (film stacking) หลังจากศึกษาตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการแล้ว และมีการปรับใช้กับคอมโพสิตประเภทเทอร์โมพลาสติก การทดสอบจะทำการตัดตัวอย่างออกจากคอมโพสิต เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าสมบัติการดึงมีค่ามากขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณเส้นใย ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของคอมโพสิตระหว่างแอล-พอลิแลคติกแอซิด (PLLA) และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเส้นใยป่าน มีค่ามากและใกล้เคียงกับคอมโพสิตระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยป่าน ส่วนค่าความแข็งแรงดึงจำเพาะ และค่ามอดุลัสของคอมโพสิตระหว่างแอล-พอลิแลคติกแอซิด (PLLA) กับเส้นใยป่าน ปรากฏว่า มีค่าเกือบจะเท่ากับค่าของคอมโพสิตระหว่างพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้ว

Lee และคณะ [21] ได้ศึกษาผลของไลซีน-ไดไอโซไซยาเนต (Lysine-based diisocyanate ; LDI) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบ ที่มีผลต่อการสลายตัวของชีวภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งมีส่วนเสริมแรง คือ เส้นใยไผ่ และมีส่วนเมตริกซ์เป็นพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate) ; PBS) สมบัติการดึงยึด ความสามารถในการต้านทานน้ำ และความสามารถในการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการเติม LDI ขณะที่การส่งผ่านความร้อนจะยากขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงแบบร่างตาข่ายระหว่างเมตริกซ์กับเส้นใย อุณหภูมิการตกผลึกของคอมโพสิตทั้งสองจะเพิ่มขึ้น แต่เอนทัลปีจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ LDI ความร้อนในการละลายของคอมโพสิตทั้งสองจะลดลงเมื่อเติม LDI ขณะที่อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิการสลายตัวของความร้อนของคอมโพสิตทั้งสองจะต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ แต่คอมโพสิตที่เติม LDI จะมีอุณหภูมิการสลายตัวของความร้อนสูงกว่าที่ไม่เติม LDI การสลายตัวเนื่องจากเอนไซม์ของ PLA/BF จะใช้ Proteinase K และ PBS/BF จะใช้ Lipase PS โดยคอมโพสิตทั้งสองสามารถสลายตัว เนื่องจากเอนไซม์ได้รวดเร็ว และการเติม LDI จะทำให้การสลายตัวเกิดได้ช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Huda และคณะ [22] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน โดยเปรียบเทียบระหว่างพอลิพรอพิลีน (Polypropylene ; PP) ที่มีเส้นใยแก้วเป็นส่วนเสริมแรง (PP/glass fiber) กับพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) ที่มีเส้นใยจากกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้แล้วเป็นส่วนเสริมแรง (PLA/RNCF) และเส้นใยแก้วเป็นส่วนเสริมแรง (PLA/glass fiber) โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบชนิดฉีด จากการทดลองพบว่า พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิพรอพิลีน และการเติมส่วนเสริมแรงจะทำให้มีค่าความแข็งดิ่งยึด และความแข็งยึดหยุ่น เพิ่มขึ้น โดยเส้นใยแก้วจะเสริมแรงได้ดีกว่าเส้นใยกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้แล้ว ค่าความแข็งแรงกระแทกจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมเส้นใยส่วนสมบัติทางความร้อนทำการพิจารณาอุณหภูมิการเสียรูปทางความร้อน (HDT) พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีความเสถียรภาพทางความร้อนเมื่อทำการเติมส่วนเสริมแรง

Huda และคณะ [23] ได้ศึกษาวัสดุประกอบพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้แล้ว (RNCF) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบ PLA ที่เสริมแรงด้วยทัลคัม (Talcum หรือ Talc) โดยในการทดลองได้มีการผลิต PLA และพอลิพรอพิลีน (PP) บริสุทธิ์ และวัสดุประกอบ PP/RNCF PP/talc เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเสริม โดยวัสดุทั้งหมดจะถูกนำมาผสมและขึ้นรูปด้วยระบบไมโครคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะและโมลด์ดิง โดยในวัสดุประกอบจะมีอัตราส่วนพอลิเมอร์เมตริกซ์ต่อวัฏภาคเสริมแรง 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่า วัสดุประกอบ PLA/RNCF มีค่ามอดุลัสดิ่งยึดและมอดุลัสโค้งงอสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ โดยค่ามอดุลัสดิ่งยึดของ PLA/RNCF จะมีค่าสูงกว่า PLA/talc วัสดุประกอบของ PLA จะมีสมบัติการดิ่งยึดและสมบัติการโค้งงอสูงกว่าวัสดุประกอบ PP ที่เสริมแรงด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน จากการทดสอบโดยเครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter ; DSC) พบว่า PLA บริสุทธิ์ PLA/RNCF และ PLA/talc มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อน (Dynamic Mechanical Analysis ; DMA) พบว่า ค่ามอดุลัสสูญเสียและค่ามอดุลัสสะสมของ PLA/RNCF มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการกระจายพลังงาน ($\tan \delta$) ลดลง จากการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Gravimetry Analysis ; TGA) พบว่า PLA/talc มีเสถียรภาพทางความร้อนใกล้เคียงกับ PLA/RNCF นอกจากนี้ในการทดสอบสมบัติทางความร้อน (Heat Deflection Temperature ; HDT) พบว่า PLA/RNCF มีจุดอ่อนตัวสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ แต่ต่ำกว่า PLA/talc ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของวัฏภาคเสริมแรงในพอลิเมอร์สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning

Electron Microscope ; SEM) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของ Talcum ที่สม่ำเสมอกว่า RNCf ใน PLA

Avérous และคณะ [24] ได้ศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ลิกโนเซลลูโลซิกเป็นสารตัวเติม (Lignocellulosic fillers) โดยเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนและพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพที่ผลิตได้ วัสดุเหล่านี้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เมตริกซ์ คือ ส่วนที่เป็นอะโรมาติก โคลิโพลีเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีสมบัติเฉพาะที่สามารถตรวจสอบได้ด้วย NMR และ SEC ลิกโนเซลลูโลซิกที่ใช้เป็นสารตัวเติม ได้มาจากส่วนที่ไม่ต้องการของฟางข้าวสาลีจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำการแยกขนาดของสารตัวเติมโดยใช้ตะแกรงร่อนจากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์ขนาดและโครงสร้างทางเคมี เซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความแตกต่างของเทคนิคที่ใช้ พฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อน และเทคนิค DSC เพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และความเป็นผลึกของวัสดุ วัสดุเหล่านี้จะมีพฤติกรรมเชิงกลที่ดีถ้าสารตัวเติมและเมตริกซ์มีความสามารถในการเข้ากันได้สูง การอัดแน่นของปริมาณสารตัวเติม ขนาดของสารตัวเติม และธรรมชาติของแต่ละส่วนประกอบ จะถูกตรวจวิเคราะห์ การทำนายพฤติกรรมเชิงกลสามารถทำได้โดยใช้สมการของ Takayanagi ซึ่งจะหาค่าตอบที่ถูกต้องในการประเมินค่ามอดุลัส โดยมีปริมาณสารตัวเติมอยู่ในช่วง 0-30 % โดยน้ำหนัก

Pandey และคณะ [25] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต ซึ่งในปัจจุบันนี้วัสดุดังกล่าวกำลังได้รับความสนใจทั้งทางด้านวิชาการและด้านอุตสาหกรรม สมบัติของวัสดุพอลิเมอร์สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยทำให้รวมตัวกับชั้นของซิลิเกตที่ความเข้มข้นต่ำๆ อย่างเหมาะสม วัสดุจะใช้งานได้ทนทานขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น แสง ความร้อน การขูดถูเสียดสีเชิงกล เป็นต้น การศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นที่สุด ทั้งนี้เพื่อขยายข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งาน ความทนทานหรืออายุการใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตสามารถประเมินค่าได้ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน การทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความทนทานที่แตกต่างกันในการใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตภายใต้ความร้อนและแสง โดยทั่วไปวัสดุนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์ทุกชนิดจะมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของชั้นซิลิเกต ความสามารถในการสลายตัวภายใต้แสงยูวีเป็นปัญหาสำคัญ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. Poly (lactic acid) (เกรด 4042D)* บริษัท Naturework Co.,Ltd.
2. Phenolic antioxidant (Anox[®] 20) บริษัท Optimaltech Co.,Ltd.
3. Phosphite antioxidant (Alkanox[®] 240) บริษัท Optimaltech Co.,Ltd.

หมายเหตุ * Datasheet ของ Poly (lactic acid) แสดงในภาคผนวก ก

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตู้อบ รุ่น UM 400 : MEMERT Co.,Ltd.
2. เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
3. เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) รุ่น 01409023 : Retsch Co.,Ltd. พร้อมกับตะแกรงมาตรฐานขนาด <20 20-50 50-80 และ >80 mesh
4. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 110 : Lab Tech Engineering Co.,Ltd.
5. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) : Bosco Engineering Co.,Ltd.
6. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) รุ่น TT1-220/80 HITECH (Cosmo).
7. เครื่องทดสอบแรงกด (Universal testing machine) รุ่น LR 5K , LR 30K : Lloyd Instrument Co.,Ltd.
8. เครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) รุ่น 258-PC : Yasuda Seiki Seisakusho Co.,Ltd.
9. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester) Shore D รุ่น Yasuda,7689
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope ; SEM) รุ่น JEOL JSM 62
11. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter ; DSC) : METTLER TOLEDO Co.,Ltd.
12. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Heat Deflection Temperature ; HDT) รุ่น WALLACE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เครื่อง Defibrator : Metso Co.,Ltd.
14. เดซิกเคเตอร์ (Desiccator)
15. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
16. เครื่องวัดพีเอช

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใย

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาเส้นใยหญ้าแฝก ยูคาลิปตัส และกระถินคราสชิคาริป้า ที่เตรียมได้จาก 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp; MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP) ซึ่งสามารถเตรียมได้ดังนี้

ก. กระบวนการเชิงกล (MP) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นไม้ที่ล้างสะอาดไปบดด้วยเครื่องบด
2. ทำการแยกขนาดโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงร่อนขนาด 20 50 และ 80 mesh เพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย
3. นำเส้นใยที่ได้จากการแยกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นให้หมดไป ก่อนนำไปทำการผสมกับพอลิเมอร์

ข. กระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นไม้ที่ล้างสะอาดไปเข้าเครื่อง Defibrator ให้ความร้อนกับชิ้นไม้ด้วยไอน้ำภายใต้ความดันไอ (ความดัน 9 Bar) จนกระทั่งอุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการบดชิ้นไม้ให้แยกออกจากกันภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง (การบดใช้วิธีการเสียดสีของเครื่อง Defibrator ประกอบด้วยจานบดที่มีผิวหยาบเป็นสองจาน โดยจานหนึ่งหรือสองจานหมุนสวนทางเสียดสีกัน) ชิ้นไม้ที่อยู่ระหว่างจานทั้งสองจะแยกออกเป็นเส้นใยหรือกลุ่มเส้นใยประมาณ 90-95 % ขึ้นอยู่กับสภาวะที่แยกเยื่อ ได้แก่ อุณหภูมิไอน้ำ เวลาในการบดชิ้นไม้
2. นำเยื่อไม้ที่เตรียมได้ไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่องปั่นแห้ง จากนั้นนำไปตากแดด
3. ทำการแยกขนาดเส้นใยไม้ด้วยเครื่องร่อนแยกขนาดที่มีตะแกรงขนาด 20 50 และ 80 mesh เพื่อควบคุมขนาดของเส้นใย
4. นำเส้นใยที่ได้จากการแยกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นให้หมด ก่อนนำไปทำการผสมกับพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขั้นตอนการผสม

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

- 1) นำเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมโดยวิธี MP ขนาด 20-50 mesh มาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) ชั่งสูตรผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1
- 3) ทำการผสม PLA เส้นใยหญ้าแฝกที่ทำการอบแล้ว และแอนติออกซิแดนท์ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเวลา 15 นาที
- 4) นำของผสมที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder)
- 5) นำของผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
- 6) นำของผสมใส่ลงในส่วนป้อนสาร (Hopper) ของเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) แล้วทำการปรับอุณหภูมิและสภาวะต่างๆ ตามความเหมาะสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด สภาวะการฉีดแสดงในภาคผนวก ข
- 7) เก็บชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปไว้ที่อุณหภูมิทำการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 8) ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมไว้ เพื่อใช้พิจารณาเลือกปริมาณเส้นใยที่ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

- 1) นำเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมโดยวิธี MP ที่มีขนาด <20 20-50 50-80 และ >80 mesh มาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำเส้นใยแต่ละขนาดมาผสมกับส่วนผสมอื่นๆ ตามตารางที่ 3.1
- 3) ทำการผสม PLA เส้นใยหญ้าแฝกที่ทำการอบแล้ว และแอนติออกซิแดนท์ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นเวลา 15 นาที
- 4) นำของผสมที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก
- 5) นำของผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
- 6) นำของผสมใส่ในลงส่วนป้อนสารของเครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วทำการปรับอุณหภูมิและสภาวะต่างๆ ตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด สภาวะการฉีดแสดงในภาคผนวก ข
- 7) เก็บชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปไว้ที่อุณหภูมิทำการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมไว้ พิจารณาเลือกขนาดเส้นใยที่ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของประเภทเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

- 1) นำเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมโดยวิธี MP และวิธี TMP มาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) ชั่งสูตรผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 โดยเลือกขนาดและปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 และ 2
- 3) ทำการผสม PLA เส้นใยหญ้าแฝกที่ทำการอบแล้ว และแอนตี้ออกซิแดนท์ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นเวลา 15 นาที
- 4) นำของผสมที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก
- 5) นำของผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น
- 6) นำของผสมใส่ลงส่วนบ่อนสารของเครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วทำการปรับอุณหภูมิและสภาวะต่างๆ ตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด สภาวะการฉีดแสดงในภาคผนวก ข
- 7) เก็บชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปไว้ที่อุณหภูมิทำการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 8) ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมไว้
- 9) เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่เตรียมได้จากเส้นใยหญ้าแฝกทั้งสองประเภท

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของชนิดเส้นใยที่มีต่อผลสมบัติของคอมโพสิต

- 1) นำเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป่า ที่เตรียมโดยวิธี TMP มาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) ชั่งสูตรผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 โดยเลือกขนาดและปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 และ 2
- 3) ทำการผสม PLA เส้นใยชนิดต่างๆ ที่ทำการอบแล้ว และแอนตี้ออกซิแดนท์ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นเวลา 15 นาที
- 4) นำของผสมที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก
- 5) นำของผสมที่ทำการบดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) นำของผสมใส่ลงส่วนป้อนสารของเครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วทำการปรับอุณหภูมิ และสภาวะต่างๆ ตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด สภาวะการฉีดแสดงในภาคผนวก ข
- 7) เก็บชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปไว้ที่อุณหภูมิทำการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 8) ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมไว้
- 9) เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และศึกษาสัญญาณวิทยาของชิ้นงานที่เตรียมจากเส้นใยชนิดทั้งสามชนิด

3.4 การทดสอบ

ในการทดสอบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้จากการทำการทดสอบมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของสูตรต่างๆ

ส่วนประกอบ (โดยน้ำหนัก)	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
PLA	85	70	55
เส้นใยธรรมชาติ*	15	30	45
Anox [®] 20	0.05 php	0.05 php	0.05 php
Alkanox [®] 240	0.05 php	0.05 php	0.05 php

หมายเหตุ *

- ปัจจัยที่ศึกษา คือ
- เส้นใยหญ้าแฝก MP ขนาด <20 , 20-50 , 50-80 , >80 mesh
 - เส้นใยหญ้าแฝก MP และ TMP
 - ชนิดของไม้ ได้แก่ หญ้าแฝก ยูคาลิปตัส และกระถินคราสชิคาร์ป่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต

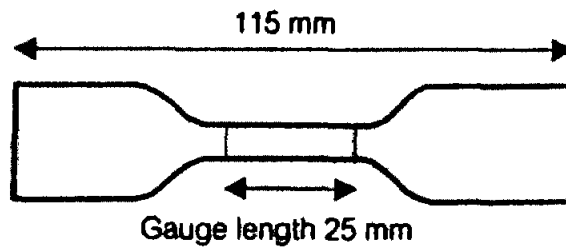
สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยรายงานผล
ความแข็งแรงดึง	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส	ASTM D 638	MPa
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	ASTM D 638	%
ความแข็งแรงกระแทก	ASTM D 256	kJ/m^2
ความแข็งกด	ASTM D 785	Shore D
ความแข็งแรงโค้งงอ	ASTM D 790	MPa
มอดุลัสโค้งงอ	ASTM D 790	MPa
อุณหภูมิเสีयरูปทางความร้อน	ASTM D 648	$^{\circ}\text{C}$
เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ	ASTM D 570	%

3.4.1 สมบัติเชิงกล

3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

การหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 638 [26] ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละครั้ง โดยชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์แสดงดังรูปที่ 3.1 และสภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 30 kN
- ความเร็วในการดึง (Test speed) 100 mm/min
- ความยาวเกจ (Guage length) 25 mm



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)} ; \sigma = F / A$$

$$\text{มอดุลัส (Tensile modulus)} ; E = \frac{\text{Difference in stress}}{\text{Difference in corresponding strain}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (\%Elongation at break)} = \left[\frac{L - L_0}{L_0} \right] \times 100$$

เมื่อ F คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ช่วงที่ชิ้นงานแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน; Gauge length (mm)

3.4.1.2 ความแข็งแรงกระแทก

การหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 256 [27] โดยการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) แบบมีรอยบาก (Notch) ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ IS คือ ค่าความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)

W คือ ค่าพลังงานกระแทก (kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่แตกหัก (m^2)

3.4.1.3 ความแข็งกด

การหาค่าความแข็งกด (Hardness tester ; Shore D) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 785 [28] โดยใช้มาตรฐานแบบ Shore D ในการทดสอบ ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาทดสอบต้องเรียบ และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 mm โดยแต่ละชิ้นงานกดทั้งหมด 10 จุด และกดเป็นเวลา 5 วินาที จึงอ่านค่าที่ได้

3.4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ

การหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D 790 [29] ใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละครั้ง โดยสภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell)	5	kN
- ความเร็วในการกด (Compression speed)	10	mm / min
- ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length)	40	mm

ค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ มีดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ F คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างโค้งงอ (N)
 L คือ Span length (40 mm)
 B คือ ความกว้างของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
 h คือ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
 ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงความชันเป็นเส้นตรง (N)
 Δd คือ ระยะกดโค้งงอ (mm)

3.4.2 สมบัติทางกายภาพ

3.4.2.1 ทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%Water absorption) เป็นไปตั้งมาตรฐาน ASTM D 570 [30] โดยนำชิ้นงานคอมโพสิตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า น้ำหนัก 2.00–5.00 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 30–45 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง (ทดสอบ 4 ตำแหน่ง) จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 45 วัน โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในทุกๆ 2 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

3.4.2.2 ทดสอบการฝังดิน

การทดสอบการฝังดิน (Burial test) เป็นการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุคอมโพสิต โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 5 เซนติเมตร และขุดดินขึ้นมาเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงโดยการถ่ายรูปทุกอาทิตย์ มีการบันทึกอุณหภูมิ ความชื้น และค่าความเป็นกรดต่างของดินทุก 1 สัปดาห์

3.4.3 สมบัติทางความร้อน

3.4.3.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

DSC เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของความร้อน (Heat flow) ที่ให้แก่สารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ ในทางปฏิบัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (Enthalpy ; H) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีนี้เราสามารถให้ DSC ตรวจวัดได้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลายชนิด เช่น การเปลี่ยนแปลงมวล รูปร่าง หรือคุณสมบัติทางแสงของสารจะส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดของอุณหภูมิ นอกจากนี้เครื่อง DSC ยังใช้ในการวัดความจุความร้อน (Heat capacity ; C_p) ซึ่งเป็นสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับพอลิเมอร์ เนื่องจากประวัติของกระบวนการผลิต สมบัติเชิงกล และการให้ความร้อนในรูปแบบต่างๆ แสดงให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ ซึ่งใช้บ่งบอกความเป็นสารนั้นๆ ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย บางครั้งเรียกว่า “เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ (Fingerprint)” นั้นแสดงว่าค่าพลังงานของระบบจะมีค่าเฉพาะเพียงค่าเดียวเท่านั้น ดังการเปลี่ยนแปลงของ C_p เมื่อเทียบกับสารอ้างอิงสามารถใช้บ่งบอกประวัติที่ผ่านมาของพอลิเมอร์ ตัวอย่างนั้นได้ โดยสภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ = 10 °C / min
- ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ = 30 – 250 °C

สามารถคำนวณค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity ; X_c) ของ PLA ได้ดังสมการนี้

$$X_c (\%) = \Delta H_m \times 100 / (93 \times X_{PLA})$$

- เมื่อ ΔH_m คือ เอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม
 ค่า 93 J/g คือ ค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลว PLA ที่มีความเป็นผลึก 100% [6]
 X_{PLA} คือ อัตราส่วนของ PLA ในวัสดุ

3.4.3.2 Heat Deflection Temperature (HDT)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 648 [31] โดยใช้แรง 0.46 MPa กดลงตรงกลางของชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า ด้วยเทคนิคการทดสอบการโค้งงอสามจุด (Three-point bending test) ให้ความร้อนด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึง 200 องศาเซลเซียสหรือจนกว่าวัสดุนี้ม้วนตัว โดยใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลาง

3.4.4 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดเพื่อศึกษาการยึดติดระหว่างเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์ และการกระจายตัวของเส้นใยในพอลิเมอร์ การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยนำตัวอย่างมาแช่ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) แช่ตัวอย่างเป็นเวลา 30 นาที และทำการหักทันทีที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

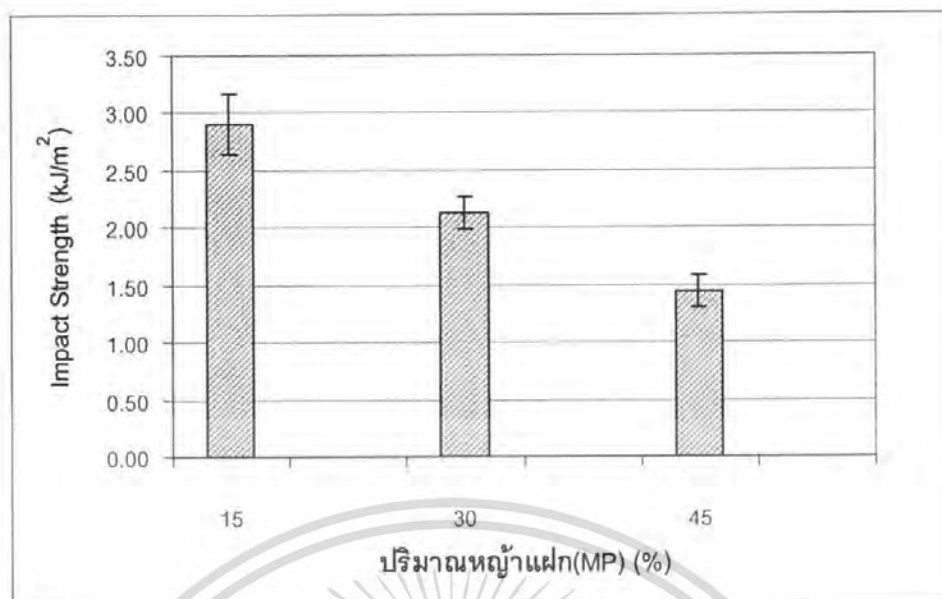
โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิแลคติกเอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) ผสมเส้นใยธรรมชาติ เพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใย โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (Mechanical pulp ; MP) ปริมาณ 15% 30% และ 45% ของ PLA ศึกษาผลของขนาดเส้นใย โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ที่มีขนาด <20 20-50 50-80 และ >80 mesh ศึกษาผลของประเภทเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP และกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp ; TMP) ศึกษาผลของชนิดเส้นใย โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูกาลิปตัส เส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้า ที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยเลือกใช้ปริมาณและขนาดของเส้นใยที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการฉีด (Injection molding) สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

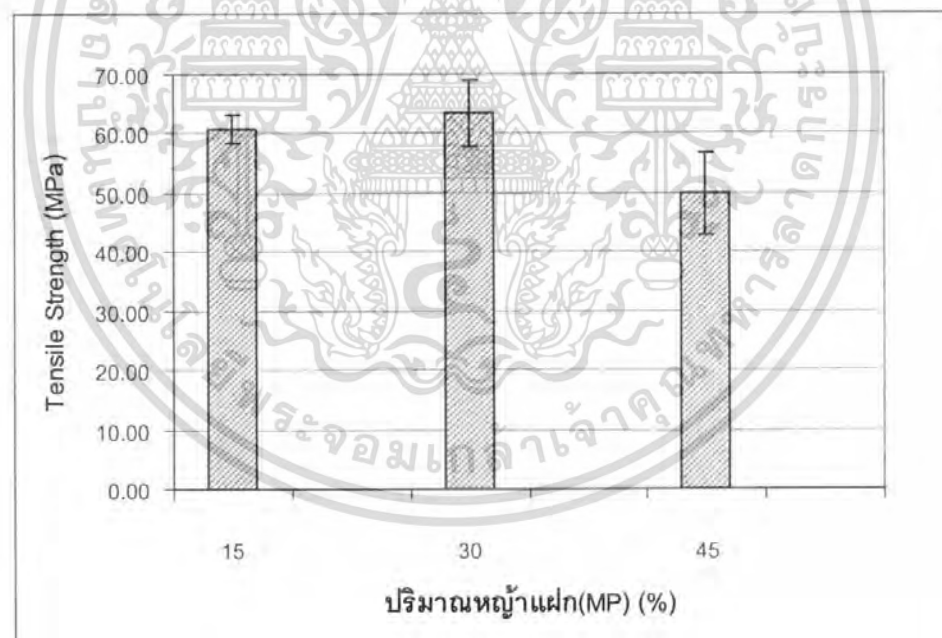
การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต โดยนำเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ขนาด 20-50 mesh ผสมใน PLA ใช้อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยหญ้าแฝก เท่ากับ 85:15 70:30 และ 55:45 ซึ่งทุกสูตรจะมีการเติม Phenolic antioxidant (Anox[®] 20) และ Phosphite antioxidant (Alkanox[®] 240) อย่างละ 0.05 php แล้วนำไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง เบรคเซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ ทดสอบสมบัติทางความร้อน ได้แก่ Heat Deflection Temperature (HDT) ของชิ้นงานที่เตรียมได้ เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกปริมาณเส้นใยที่ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีที่สุด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1-4.8

4.1.1 สมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทก ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของวัสดุ PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยใน PLA เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ที่เรียกว่า รอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) มากขึ้น ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่แข็งแรง (Weak point) จุดบกพร่องนี้จะเป็นจุดริเริ่มการขาดหรือแยกออกจากกันเมื่อได้รับแรง ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถส่งถ่ายแรงที่ได้รับไปยังเส้นใยได้ ชีงงานจึงเกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น ถ้าปริมาณเส้นใยมากขึ้น จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นก็จะมีมากด้วย และเนื่องจากเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP เป็นชิ้นไม้ที่ถูกบดด้วยเครื่องบด จะมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นหรือเป็นก้อน และมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio; L/D) ต่ำ (ค่า Aspect ratio แสดงในภาคผนวก ค) จึงเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ที่ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อเท่านั้น ไม่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงหรือเสริมแรงต่ำ และความแข็งแรงดึงที่ปริมาณหญ้าแฝก 45% ของ PLA มีค่าลดลง เนื่องจากเส้นใยมีความหนาแน่นรวมต่ำ ดังนั้นการใส่เส้นใยปริมาณมากจะทำให้เกิดความยากในการผสม อาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี และเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย ซึ่งจะเป็นจุดริเริ่มของการเสียหาย และการที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตมีค่าลดลง สามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ขยายความเครียด (Strain amplification effect) คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใส่สารตัวเติมแข็งในพอลิเมอร์แล้วทำให้ความเครียด (Strain) และการเปลี่ยนความเครียด (Strain rate) ของพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างก้อนอนุภาคของสารตัวเติม มีค่าสูงกว่าความเครียดของวัสดุโดยรวม (Macroscopic strain) ที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการดึง เมื่อให้แรงดึงตัวอย่างให้ยืดออกที่ความยาวหนึ่ง ส่วนของเส้นใยไม่มีการเปลี่ยนขนาดเมื่อได้รับแรงดึง เนื่องจากเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความแข็ง มีค่ามอดุลัสสูงและเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ เส้นใยที่แทรกตัวในเนื้อพอลิเมอร์ทำให้ความต่อเนื่องของพอลิเมอร์ลดลง ดังนั้นเมื่อให้แรงกับวัสดุคอมโพสิต ส่วนของพอลิเมอร์จะเป็นส่วนที่เปลี่ยนขนาดหรือได้รับความเครียดเพิ่มขึ้น ในขณะที่เส้นใยจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Undeformable) มีขนาดเท่าเดิม ยิ่งผสมเส้นใยในพอลิเมอร์ปริมาณมากขึ้น หรือทำการดึงยืดให้พอลิเมอร์ขยายมากขึ้น (ความเครียดสูง) ทำให้เกิดปรากฏการณ์ขยายความเครียดของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นด้วย จนเกินความสามารถในการขยายขนาดของวัสดุ เป็นผลให้เกิดการขาดหรือเสียหายที่เปอร์เซ็นต์การยืดต่ำกว่า

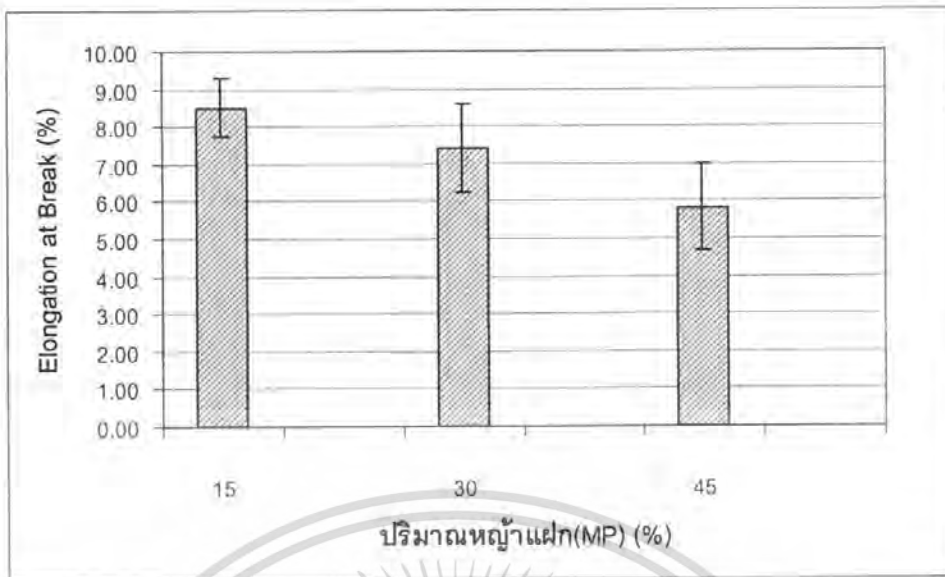


รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงดึง

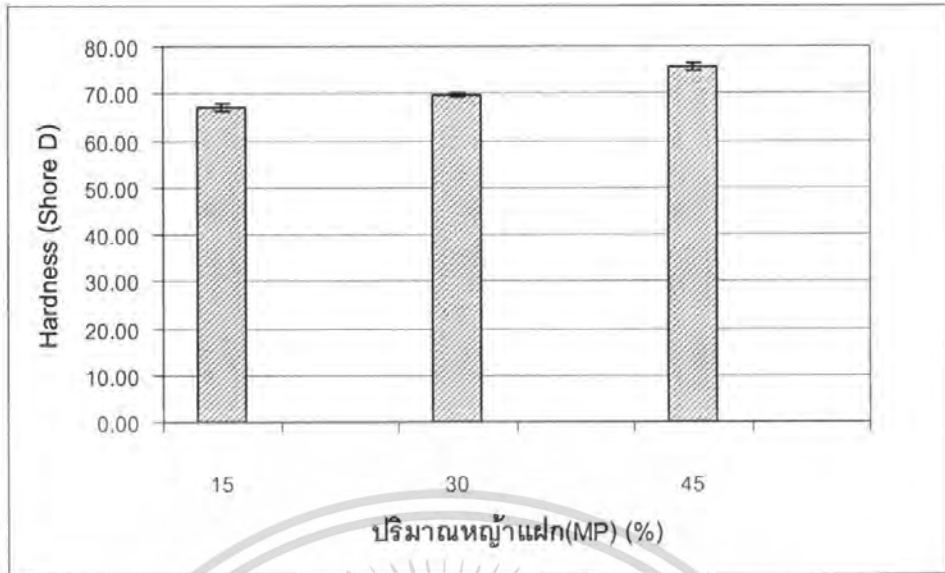
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



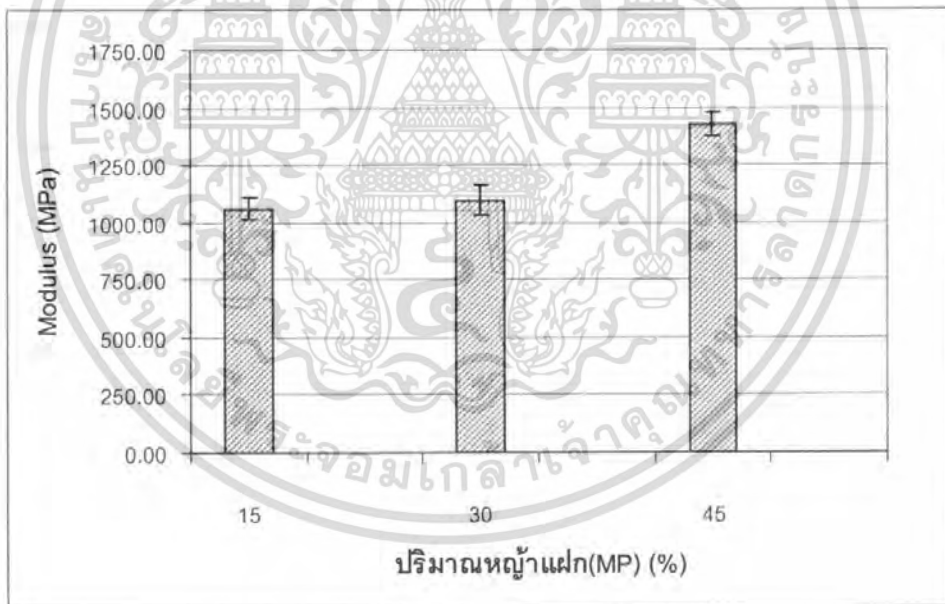
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหน้ำแฝก (MP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้สมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการทดสอบความแข็งกดเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความแข็งที่พื้นผิวของชิ้นงาน เป็นการให้แรงกดบนผิววัสดุให้ยุบตัว (Indentation) แต่ไม่ทะลุ โดยที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานจะเป็นพอลิเมอร์ ส่วนเส้นใยจะอยู่ภายในของชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบความแข็งกดค่าที่ได้จึงใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอาจมีเส้นใยบางส่วนบนอยู่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ค่าความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการทดสอบมอดุลัสเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรง เป็นค่าความแข็งในช่วงเริ่มต้น เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงกระทำและส่งผ่านแรงกระทำได้มากขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากเส้นใยหน้ำแฝกมีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิเมอร์ ดังนั้น การใส่ปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ทำให้คอมโพสิตมีค่ามอดุลัสเพิ่มสูงขึ้น ตามกฎของของผสม (Rule of mixture) กล่าวคือ สมบัติบางประการของวัสดุผสมจะขึ้นกับสัดส่วนและสมบัติของแต่ละองค์ประกอบในวัสดุผสมนั้น สมบัติบางประการที่เป็นไปตามกฎของของผสม เช่น มอดุลัส ความหนาแน่น ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



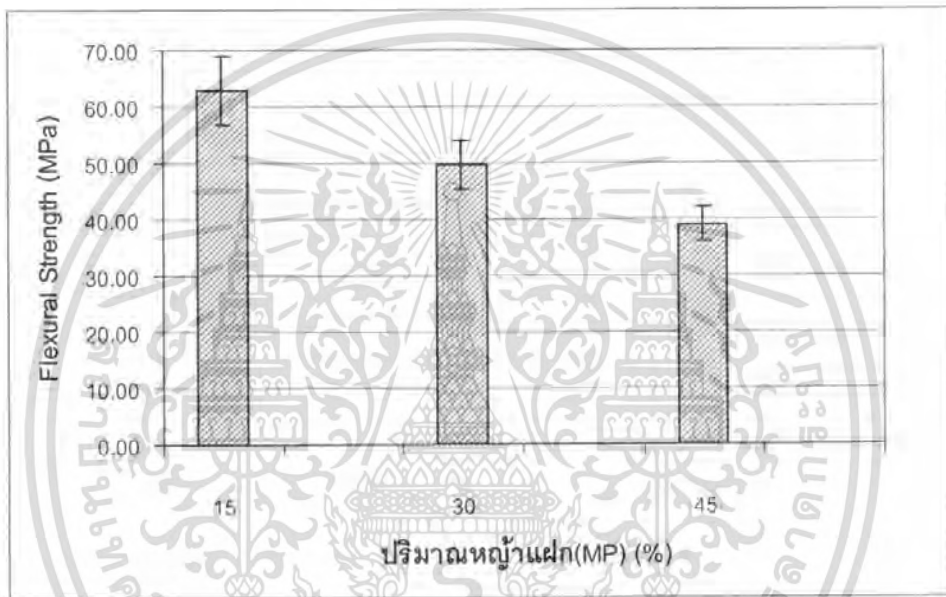
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งกด



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่ามอดุลัส

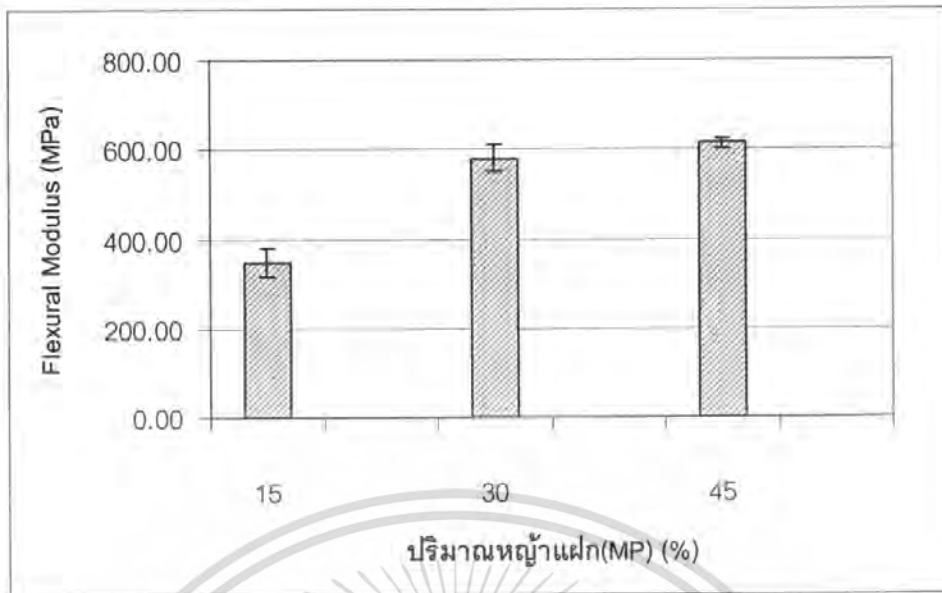
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรงที่มากกระท่อนที่่จะเกิดการโค้งงอ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการผสมเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ไม่ได้ทำหน้าที่เสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต และการเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นการเพิ่มรอยต่อระหว่างวัสดุ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่แข็งแรง โดยแรงกดที่ให้จะตั้งฉากกับการจัดเรียงตัวของเส้นใย การเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นจึงอาจทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี จะไม่สามารถรับและกระจายแรงที่มากกระทำได้ ส่งผลให้ชิ้นงานรับแรงกดได้น้อยลง



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ

จากรูปที่ 4.7 ค่ามอดุลัสโค้งงอเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการโค้งงอเมื่อได้รับแรง พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงและส่งผ่านแรงกระทำได้มากขึ้น เนื่องจากเส้นใยสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต และการเพิ่มปริมาณเส้นใย ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น แรงที่ใช้ในการกดให้ชิ้นงานเกิดการเสียสภาพจึงมีค่ามากด้วย

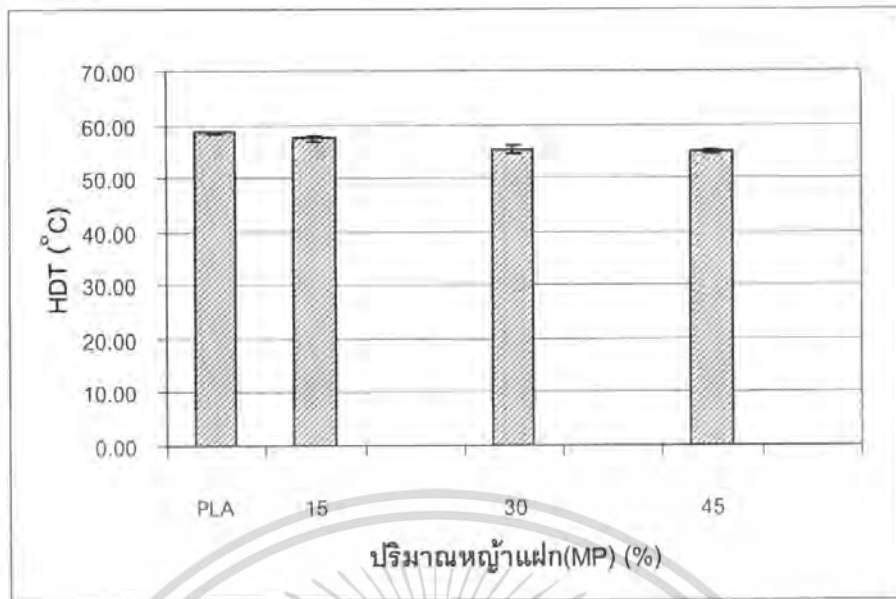


รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหญ้าแฝก (MP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ

4.1.2. Heat Deflection Temperature (HDT)

จากรูปที่ 4.8 การทดสอบ HDT เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการทดสอบการโค้งงอสามจุด (Three-point bending test) โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกว่าวัสดุจะบิด เพื่อหาอุณหภูมิที่วัสดุทนได้ขณะใช้งาน เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเส้นใย 15% 30% และ 45% ของ PLA พบว่าค่า HDT ของวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบได้ไม่มีข้อแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำ PLA คอมโพสิตมาเปรียบเทียบกับ Pure PLA พบว่าเส้นใยหญ้าแฝกที่ผสมลงใน PLA จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้มีระยะห่างระหว่างสายโซ่มากขึ้น เมื่อมีการให้ความร้อนวัสดุจะใช้อุณหภูมิต่ำลงในการทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้นการผสมเส้นใยธรรมชาติลงใน PLA ส่งผลทำให้ค่า HDT ต่ำลงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหน้าแม่ (MP) กับค่า HDT

เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยธรรมชาติเพื่อนำไปใช้ในการทำวิจัยขั้นต่อไป พบว่าอัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยธรรมชาติ เท่ากับ 70:30 หรือการใช้ปริมาณเส้นใยธรรมชาติ 30% ของ PLA เหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับทำวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น แต่การใส่เส้นใยธรรมชาติในปริมาณมากจะมีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อย ทำให้ยากต่อการผสมให้เกิดความเข้ากันระหว่าง PLA กับเส้นใยธรรมชาติ จึงอาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลให้ลดลง

4.2 การศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

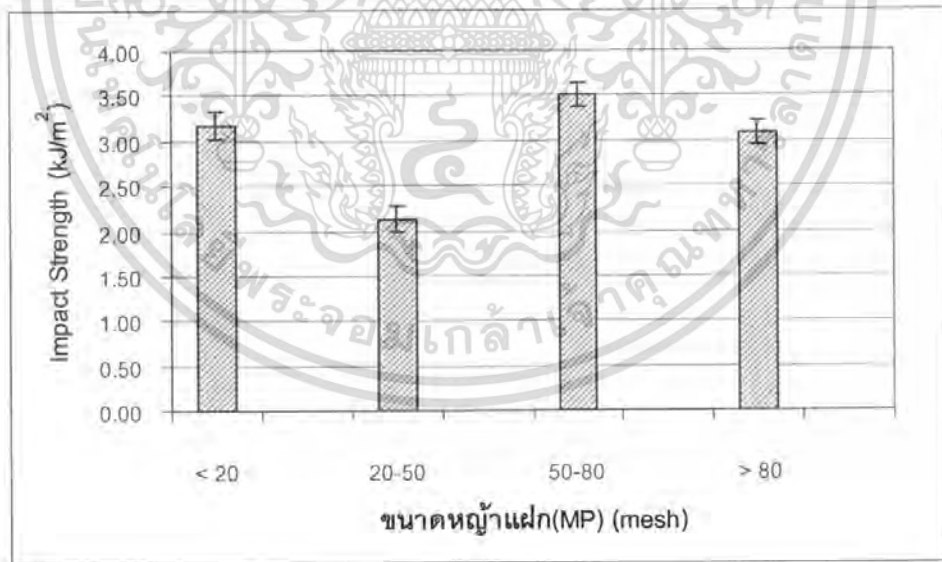
การศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต โดยนำเส้นใยหน้าแม่ที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ที่มีขนาด <20 20-50 50-80 และ >80 mesh ผสมใน PLA ใช้อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยหน้าแม่ เท่ากับ 70:30 เนื่องจากการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต (ข้อ 4.1) พบว่า อัตราส่วนนี้ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แล้วนำไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมได้ เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดเส้นใยที่ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีที่สุด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่

4.9 - 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

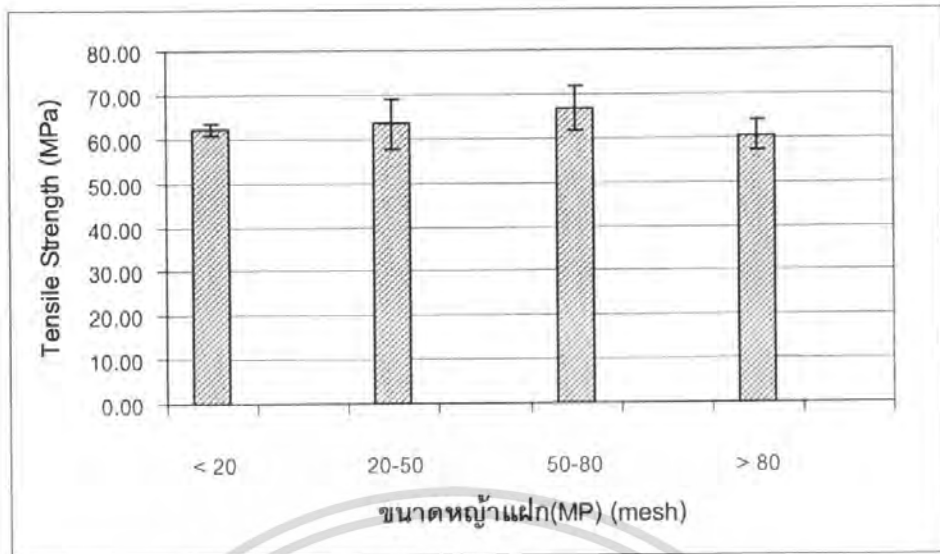
4.2.1 สมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.9 - 4.15 พบว่า ขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก เนื่องจากเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP จะมี Aspect ratio ต่ำ เป็นสารตัวเติมที่ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อเท่านั้น ไม่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรง จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องของขนาดเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP (ข้อ 4.3) ดังรูปที่ 4.18 - 4.24 จากผลการทดสอบพบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับกับเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP เนื่องจากอาจเกิดจุดบกพร่อง (Defect) ขึ้นในชิ้นงาน ดังนั้นการศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตในครั้งนี้ จึงไม่พิจารณาถึงประเด็นของขนาดเส้นใย แต่เส้นใยหญ้าแฝกขนาด 20-50 และ 50-80 mesh ที่นำมาใช้ (รูปที่ 4.17 (ข) และ (ค) ตามลำดับ) ให้สมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน เนื่องจากเส้นใยมีลักษณะยาวและมีความยาวใกล้เคียงกัน ทำให้รับแรงและส่งผ่านแรงได้ดี โดยที่ขนาด 20-50 mesh สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วนเส้นใยที่มีขนาดใหญ่เกินไป (<20 mesh) ทำให้การกระจายตัวของเส้นใยใน PLA เกิดขึ้นได้ไม่ดี เนื่องจากเส้นใยอาจจับตัวเป็นก้อนและเกิดช่องว่างขึ้นภายใน จึงไม่สามารถรับแรงกระทำได้ดี แต่ถ้าขนาดของเส้นใยสั้นเกินไป (>80 mesh) จะเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มเนื้อ ไม่ได้ช่วยเสริมแรง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลง

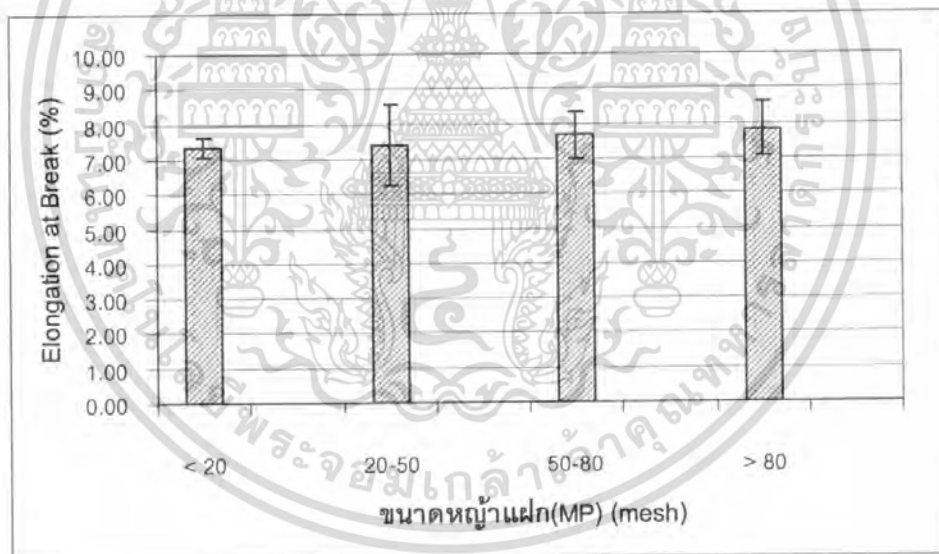


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหญ้าแฝก (MP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

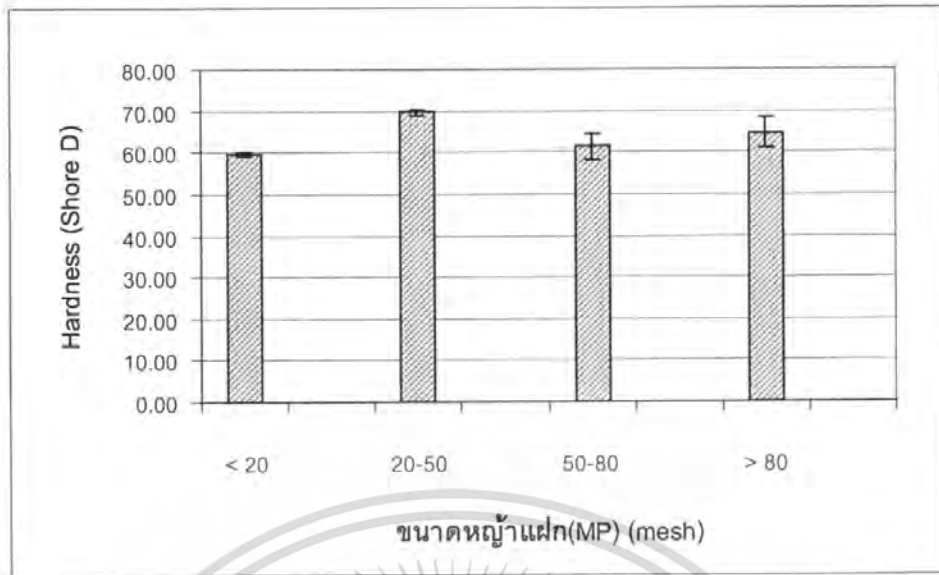


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหน้าแปลน (MP) กับค่าความแข็งแรงดึง

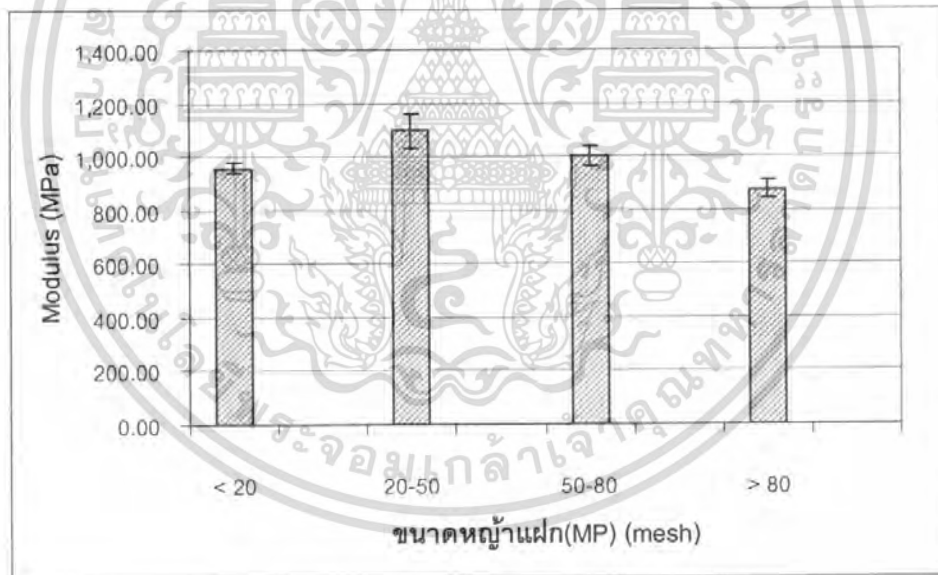


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหน้าแปลน (MP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

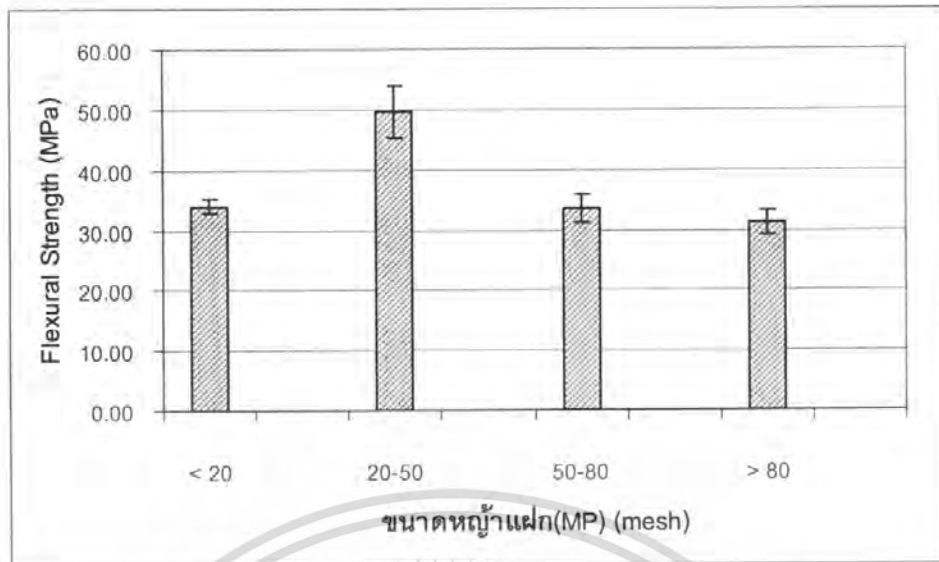


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหน้าแปลน (MP) กับค่าความแข็งกด

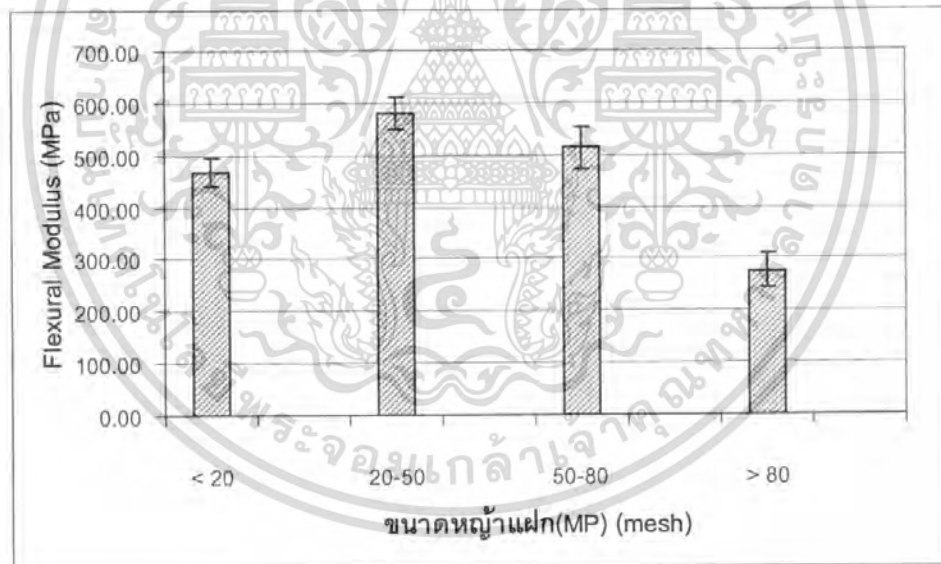


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหน้าแปลน (MP) กับค่ามอดุลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหน้าแปลน (MP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ

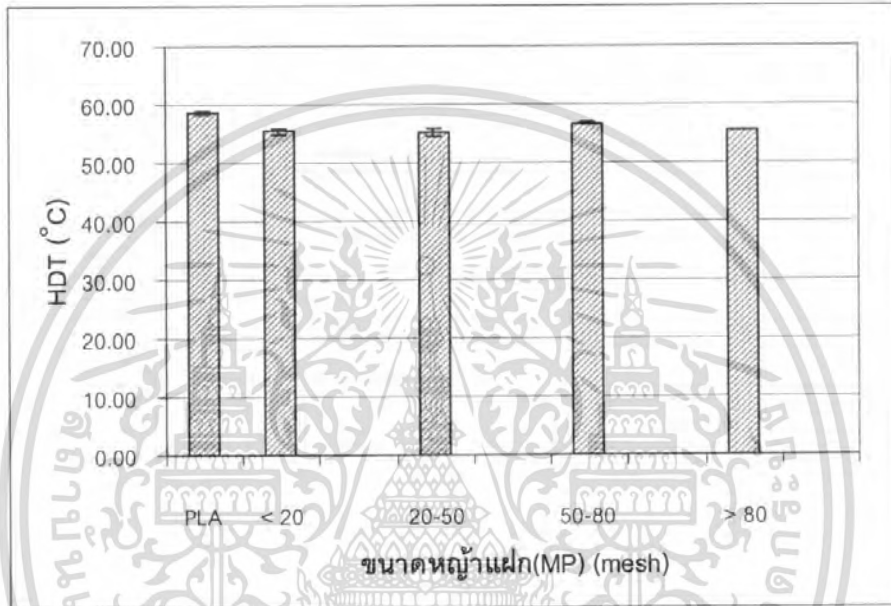


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหน้าแปลน (MP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ

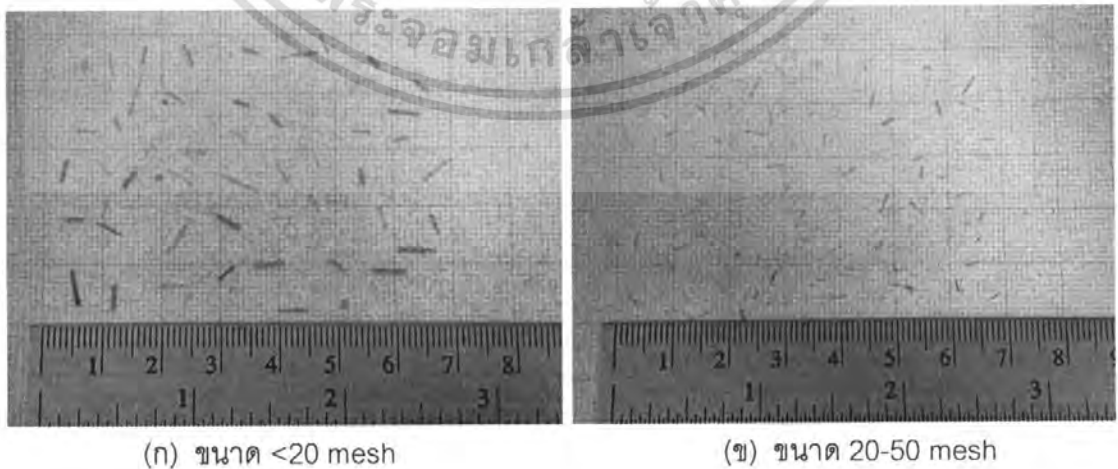
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 Heat Deflection Temperature (HDT)

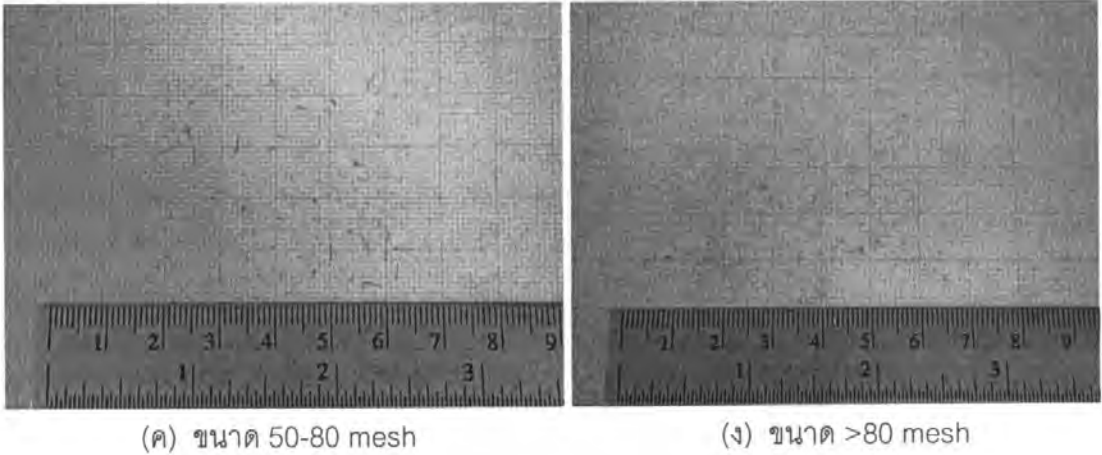
จากรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณาผลของขนาดเส้นใย <20 20-50 50-80 และ >80 mesh พบว่าค่า HDT ของวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบได้ไม่มีข้อแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำ PLA คอมโพสิตมาเปรียบเทียบกับ Pure PLA พบว่าการผสมเส้นใยธรรมชาติลงใน PLA ส่งผลทำให้ค่า HDT ต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากเหตุผลเช่นเดียวกับการพิจารณาผลของปริมาณเส้นใย (ข้อ 4.1.2)



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหน้าแม่ (MP) กับค่า HDT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ขนาด 50-80 mesh

(ง) ขนาด >80 mesh

รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการเชิงกล (MP) ขนาดต่างๆ ที่กำลังขยาย 2.5 เท่า

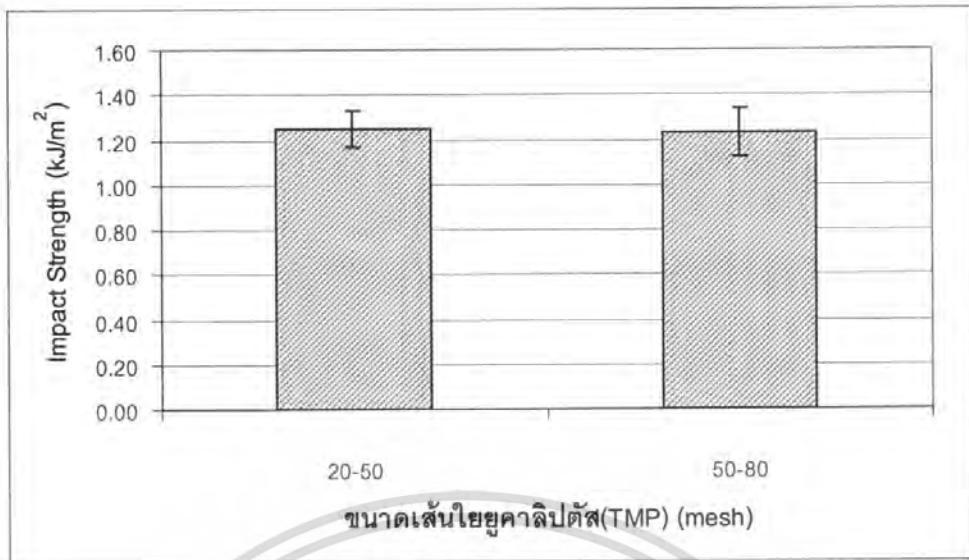
4.3 การศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

เนื่องจากขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องผลของขนาดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต โดยนำเส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP ที่มีขนาด 20-50 และ 50-80 mesh ผสมใน PLA ใช้อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยยูคาลิปตัส เท่ากับ 70:30 เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แล้วนำไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมได้ เพื่อใช้ในการพิจารณาขนาดเส้นใยที่ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติดีที่สุด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 - 4.24

4.3.1 สมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.18 - 4.24 จากผลการทดสอบพบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับกับเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP คือ ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก ดังนั้นการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตในงานวิจัยนี้ จึงไม่พิจารณาถึงผลของขนาดเส้นใยที่มีต่อสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

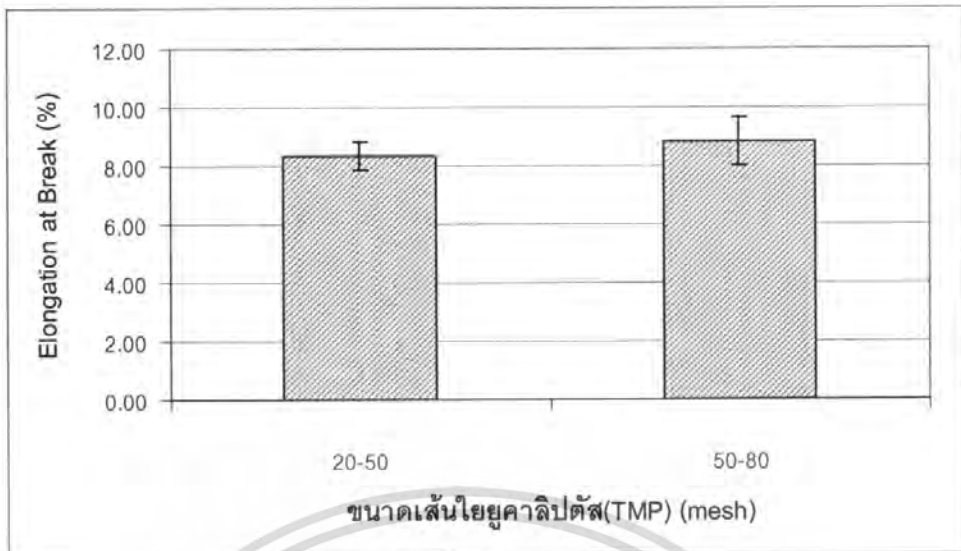


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่าความแข็งแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

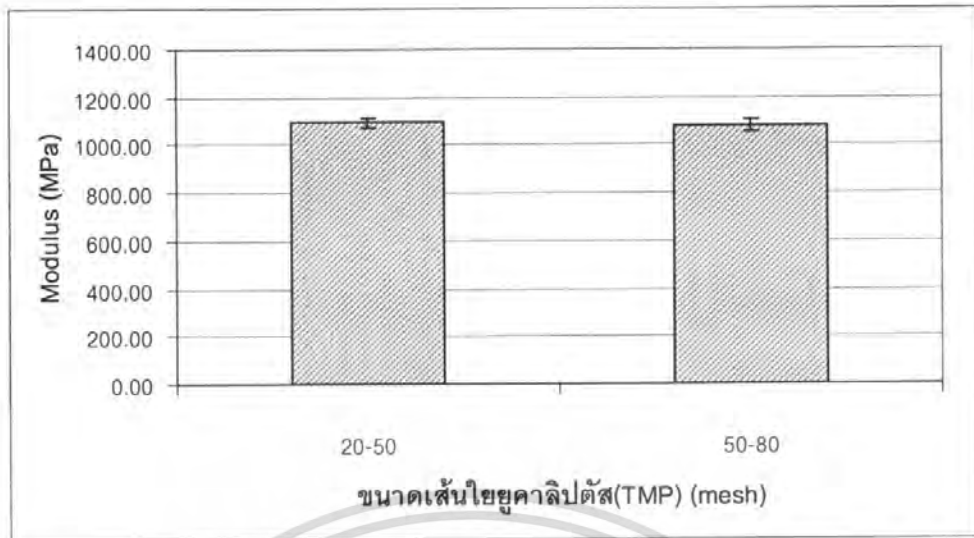


รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปัส (TMP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปัส (TMP) กับค่าความแข็งกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

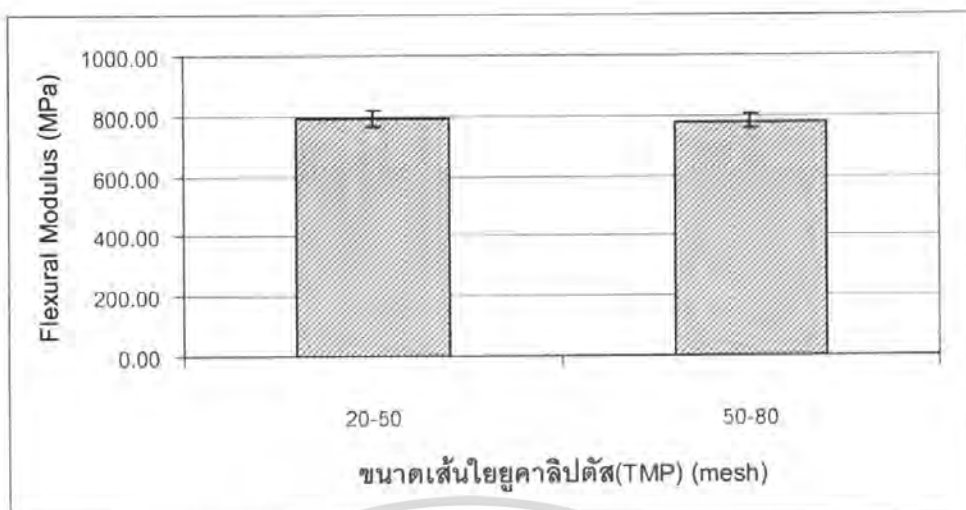


รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่ามอดุลัส



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นใยคาลิปดัส (TMP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ

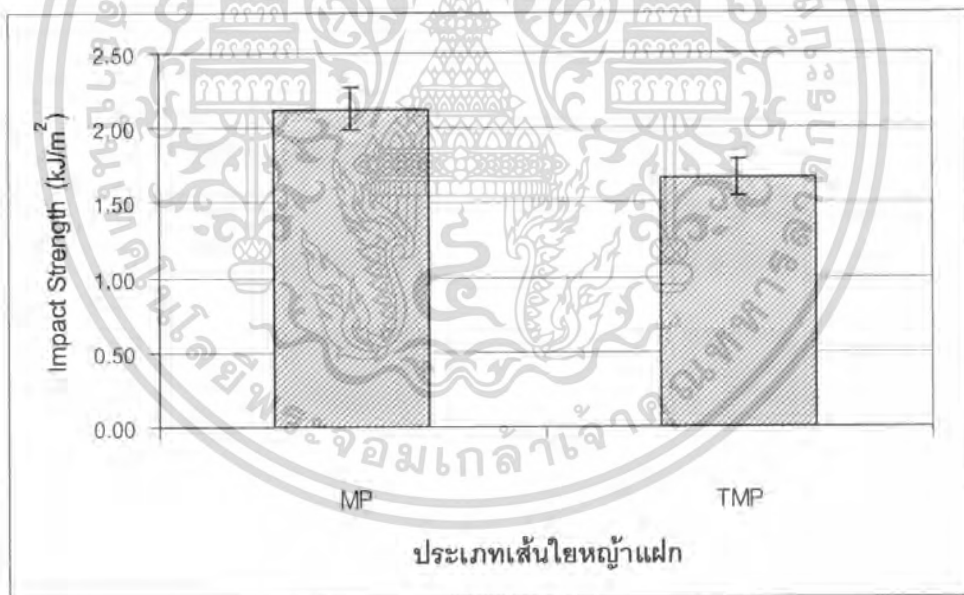
4.4 การศึกษาผลของประเภทเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

การศึกษาผลของประเภทเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต โดยใช้เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP นำมาเปรียบเทียบกับเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP ผสมใน PLA ใช้อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยหญ้าแฝก เท่ากับ 70:30 เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด แล้วนำไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และลักษณะวิทยาของชิ้นงานที่เตรียมได้ เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกประเภทเส้นใยที่ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติดีที่สุด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25 - 4.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

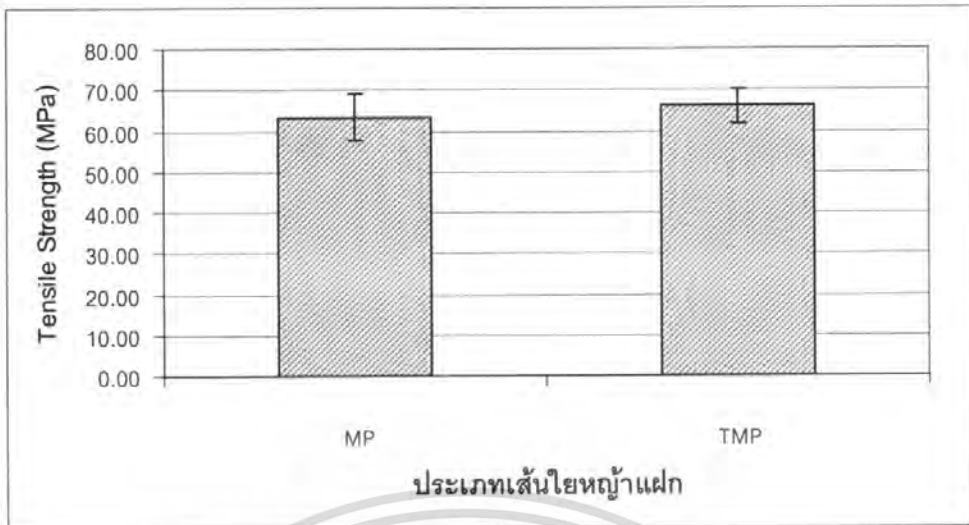
4.4.1 สมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.25 - 4.31 พบว่า ประเภทของเส้นใยที่เตรียมจากกระบวนการ MP กับเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ต่างกันมากนัก การที่เส้นใยหญ้าแฝกประเภท TMP มีค่า Aspect ratio สูง เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นยาว (รูปที่ 4.33 (ข)) ซึ่งจะช่วยให้เสริมแรงได้ดี แต่ผลของสมบัติเชิงกลที่ได้ให้ผลไม่เด่นชัด อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวของเส้นใยหญ้าแฝกประเภท TMP ใน PLA เกิดขึ้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร เส้นใยพันกันและอาจเกิดช่องว่างขึ้นภายใน ทำให้ไม่สามารถรับแรงกระทำได้ดี สำหรับสมบัติความโค้งงอ ได้แก่ ค่ามอดุลัสโค้งงอ ดังรูปที่ 4.31 พบว่าเส้นใยหญ้าแฝกประเภท TMP มีค่าแตกต่างกับประเภท MP อย่างเห็นได้ชัดประมาณ 3 เท่า เนื่องจากการทดสอบสมบัติความโค้งงอนี้ เป็นการให้แรงในทิศทางตั้งฉากกับการจัดเรียงตัวของเส้นใย เมื่อชิ้นงานมีความแข็งแรงมาก ทำให้ต้องใช้แรงในการกดมากเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเสียสภาพ ดังนั้นเมื่อพิจารณาประเภทของเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP มีแนวโน้มให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP

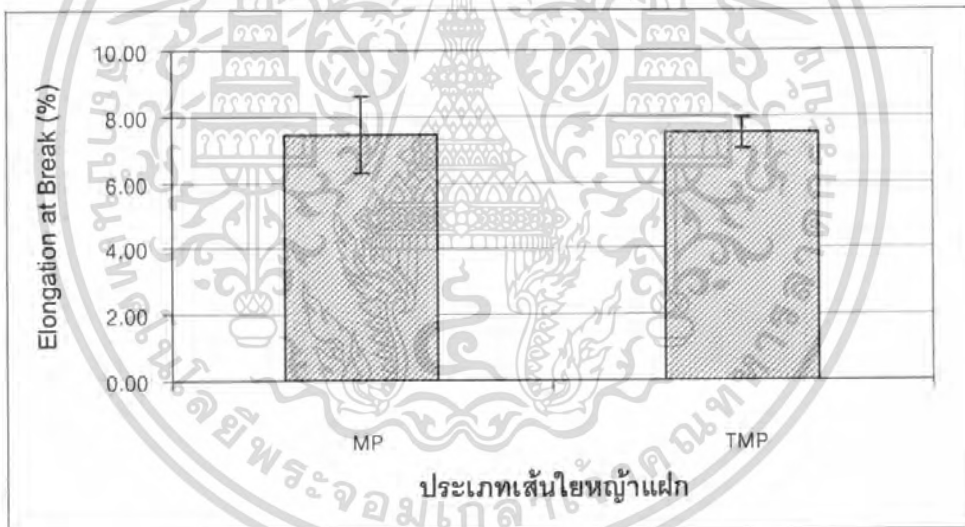


รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่าความแข็งแรงกระแทก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

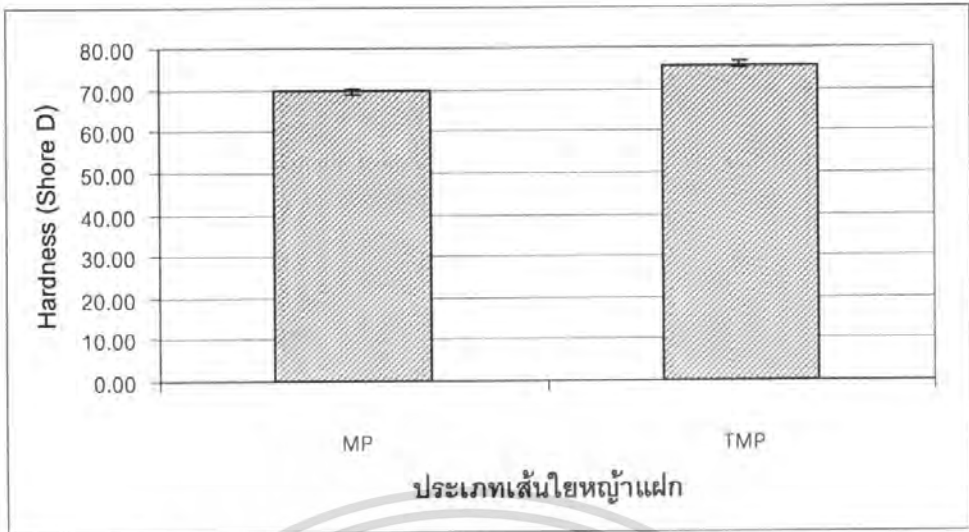


รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่าความแข็งแรงดึง

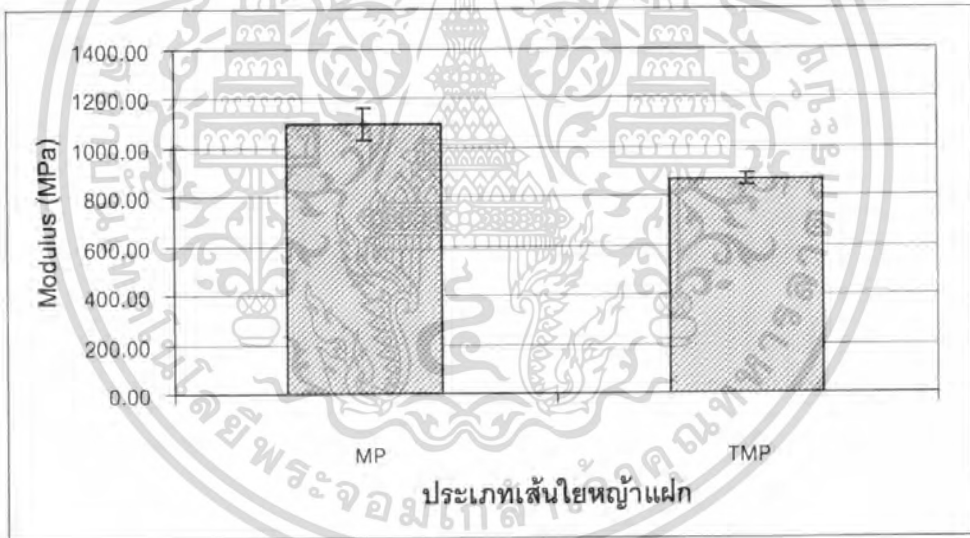


รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

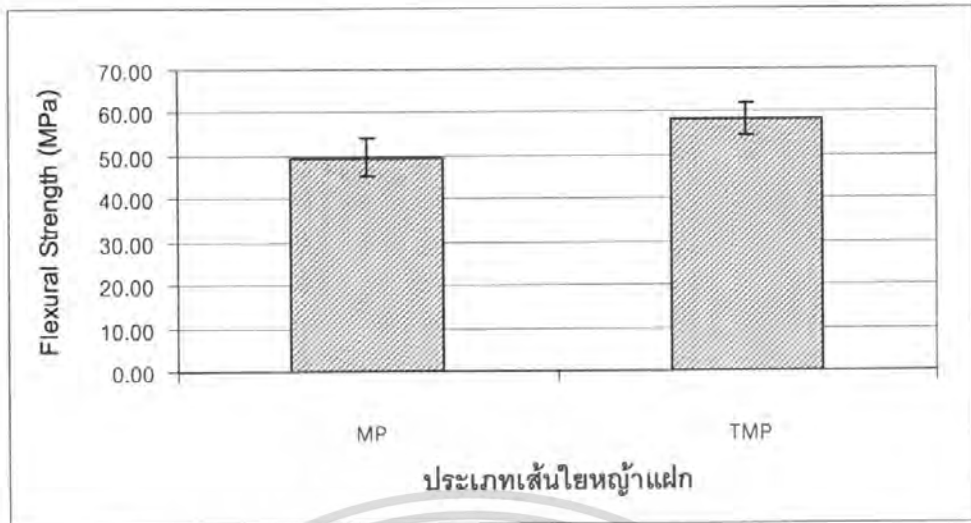


รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่าความแข็งกด

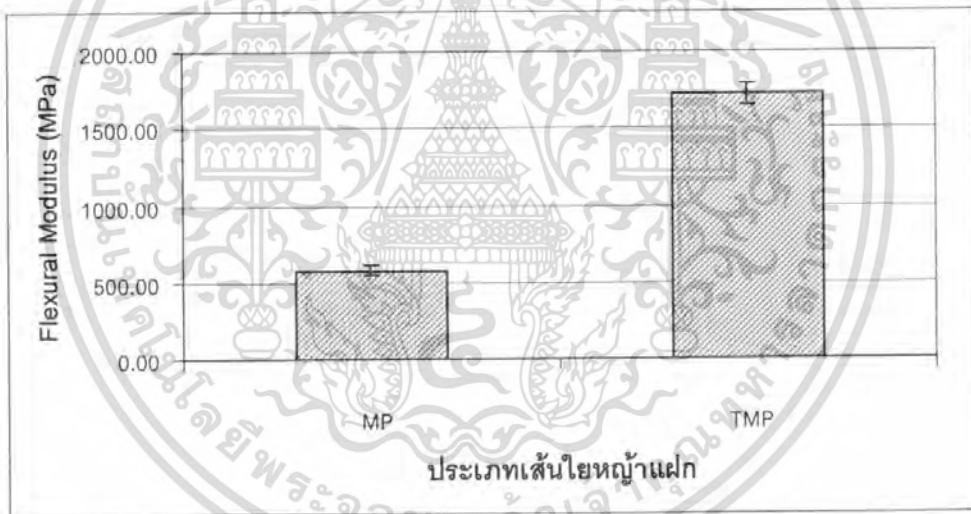


รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่ามอดุลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่าความแข็งแรงโค้งงอ

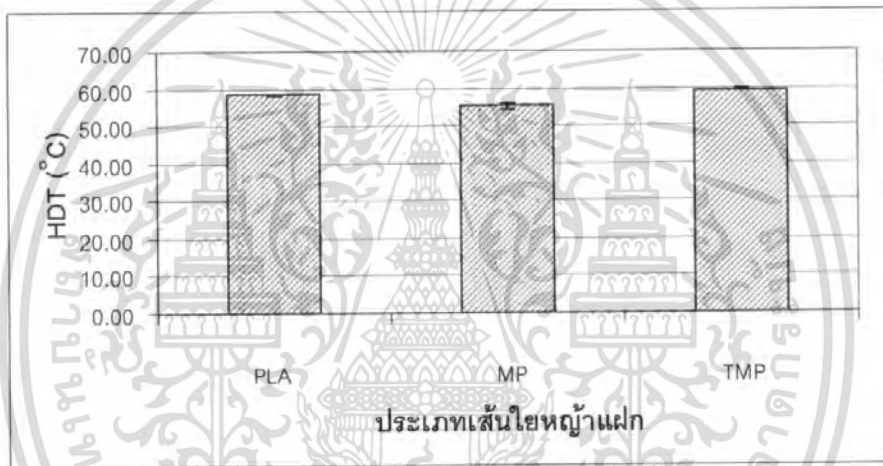


รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่ามอดุลัสโค้งงอ

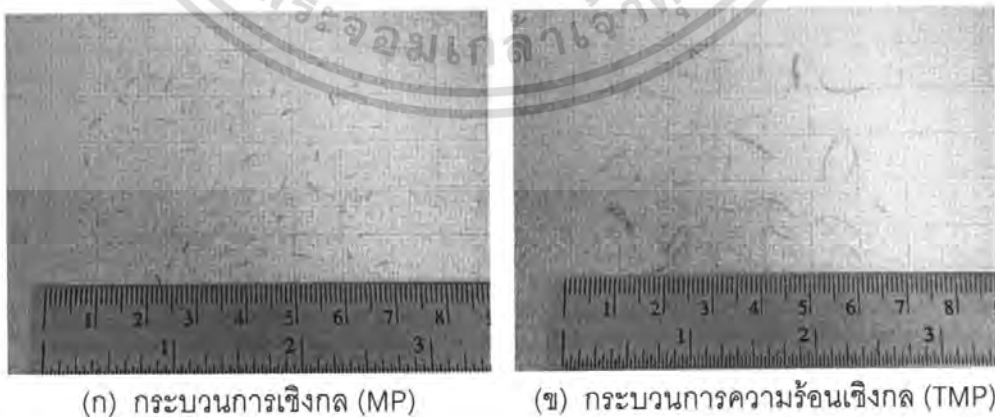
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 Heat Deflection Temperature (HDT)

จากรูปที่ 4.32 เมื่อพิจารณาผลของเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP กับ TMP พบว่าค่า HDT ของวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบได้ไม่มีข้อแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า HDT ของ PLA มีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าจะป็นอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PLA และจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ตารางที่ 4.1) พบว่าค่าองศาความเป็นผลึกของ PLA PLA+VM และ PLA+VT มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่ามีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้อุณหภูมิที่ทำให้วัสดุอ่อนตัวหรือค่า HDT มีค่าใกล้เคียงกันด้วย



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทเส้นใยหญ้าแฝกกับค่า HDT



รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการต่างๆ

ที่กำลังขยาย 2.5 เท่า

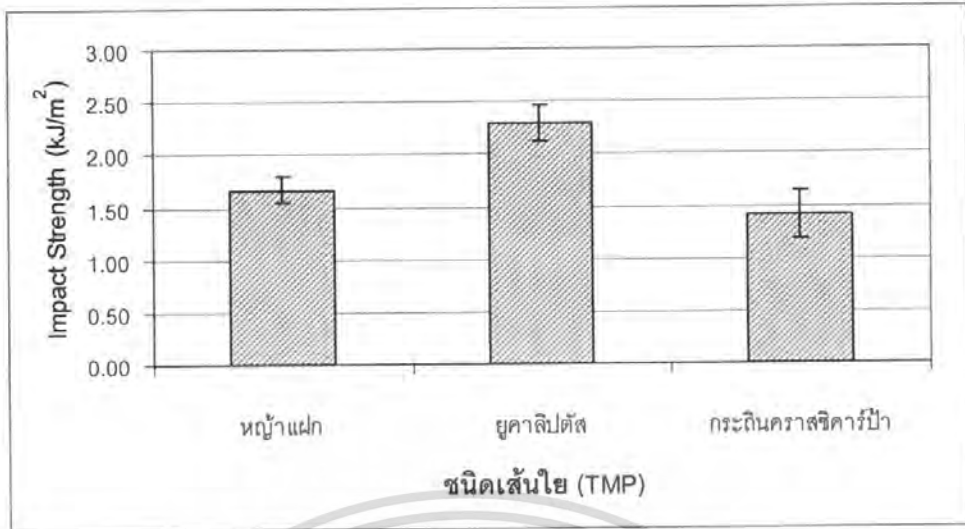
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาผลของชนิดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

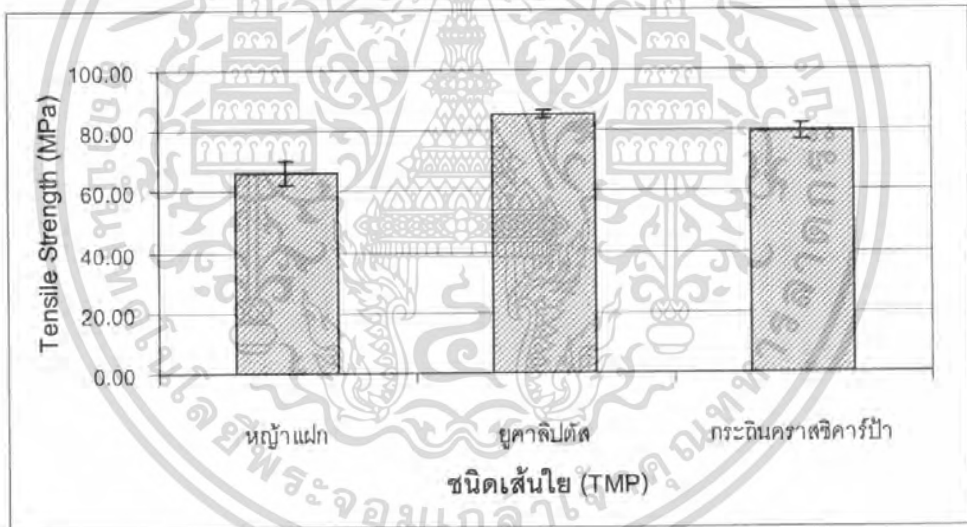
การศึกษาผลของชนิดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต โดยการนำเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้า ที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยใช้ อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยแต่ละชนิด เท่ากับ 70:30 เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และจากการศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต (ข้อ 4.3) พบว่า ขนาดเส้นใยไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกล จึงไม่ได้ทำการแยกขนาดของเส้นใย แล้วนำ ชิ้นงานไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และ สันฐานวิทยาของชิ้นงานที่เตรียมได้ เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดเส้นใยที่ทำให้วัสดุคอมโพสิต มีสมบัติดีที่สุด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.34 - 4.41

4.5.1 สมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.34-4.40 พบว่าชนิดของเส้นใยไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก ให้ค่าที่แตกต่างกันไม่มาก โดยที่เส้นใยยูคาลิปตัสกับเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้าให้สมบัติที่ใกล้เคียงกัน เพราะทั้งสองชนิดนี้เป็นไม้เนื้อแข็ง แต่เส้นใยยูคาลิปตัสจะให้สมบัติที่ดีกว่าเล็กน้อย และให้ค่ามากที่สุด โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงกระแทก ในรูปที่ 4.34 และค่าความแข็งแรงดึง ในรูปที่ 4.35 เนื่องจาก เส้นใยยูคาลิปตัส (รูปที่ 4.42 (ข)) มีความขรุขระและมีค่า Aspect ratio มากกว่าเส้นใยกระถิน คราสชิคาร์ป้า (รูปที่ 4.42 (ค)) ทำให้ยึดจับกับพอลิเมอร์ได้ดีกว่าด้วย และสาเหตุที่เส้นใยทั้งสาม ชนิดนี้ให้สมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากเส้นใยประเภท TMP เกิดการพันกันขณะทำการผสม ทำให้เส้นใยกระจายตัวใน PLA ได้ไม่ดีเท่าที่ควร

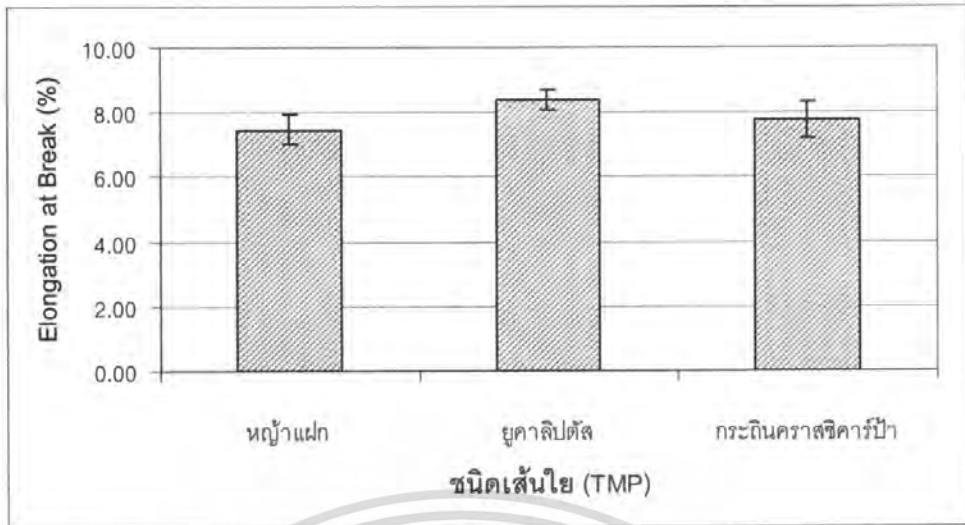


รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรงกระแทก

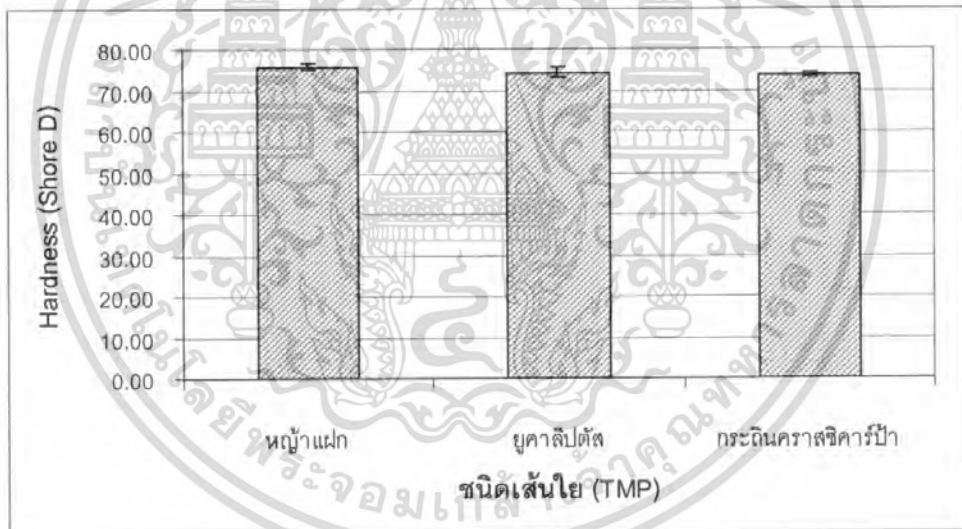


รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

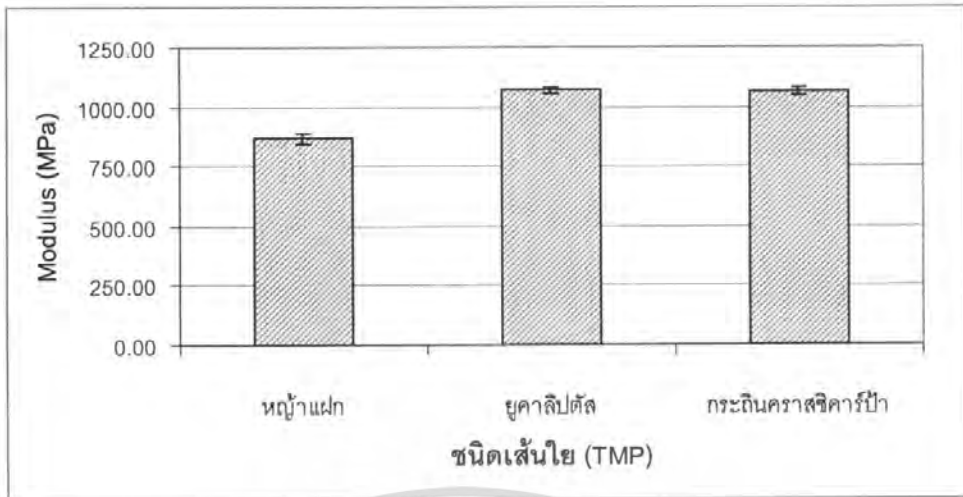


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

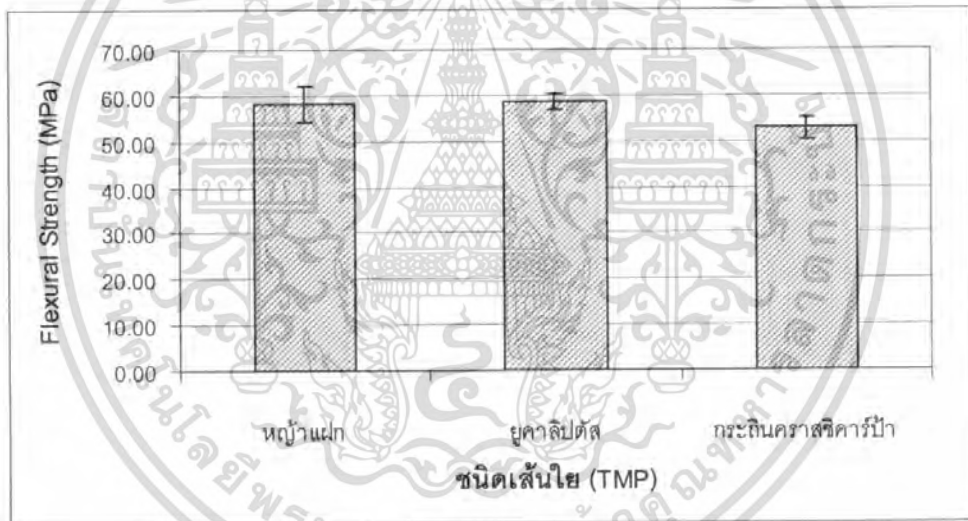


รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

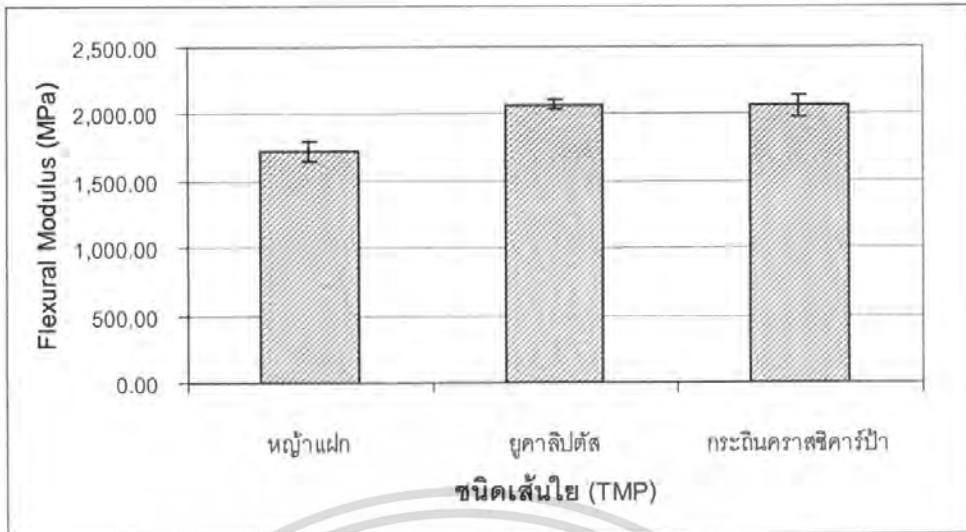


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่ามอดุลัส



รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่าความแข็งแรงโค้งงอ

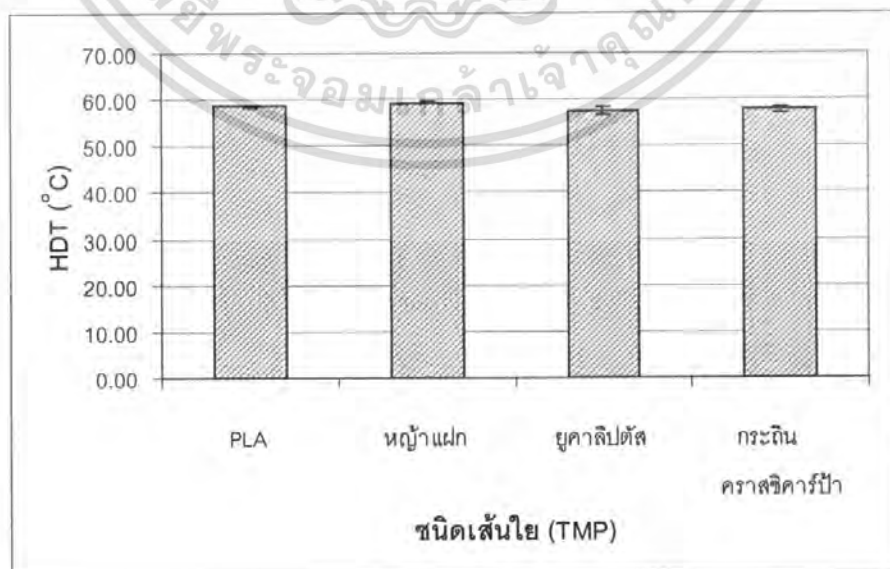
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



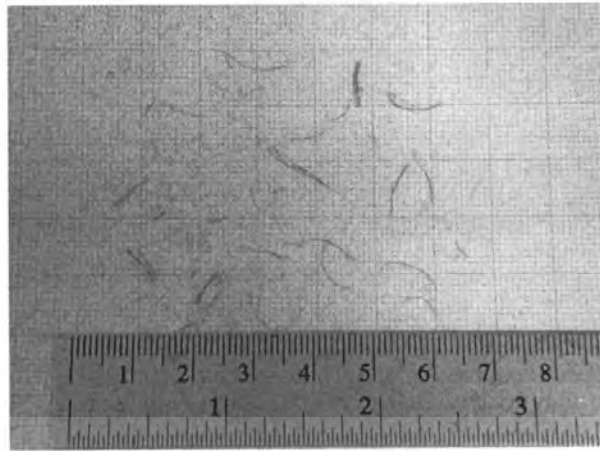
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่ามอดุลัสโค้งงอ

4.5.2 Heat Deflection Temperature (HDT)

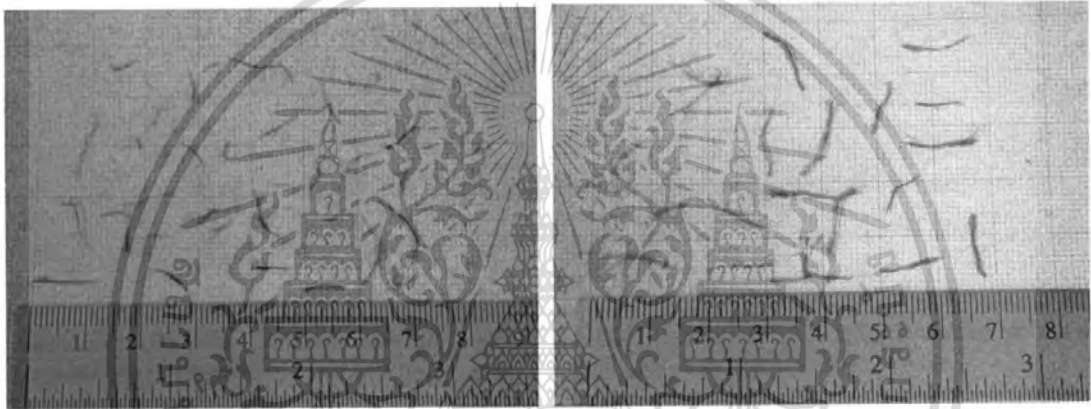
จากรูปที่ 4.41 เมื่อพิจารณาผลของชนิดเส้นใยหน้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสสิคาร์ป้าที่เตรียมมาจากระบวนการ TMP พบว่าค่า HDT ของวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบไม่มีข้อแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเหตุผลเช่นเดียวกับการพิจารณาผลของประเภทเส้นใย (ข้อ 4.4.2)



เอกสารรูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเส้นใย (TMP) กับค่า HDT ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เส้นใยหญ้าแฝก



(ข) เส้นใยคาลิปตัส

(ค) เส้นใยกระถินคราสซิคาร์ป้า

รูปที่ 4.42 แสดงลักษณะของเส้นใยชนิดต่างๆ ที่เตรียมจากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ที่กำลังขยาย 2.5 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC จะทำการศึกษาถึงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) โดยนำเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP และเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส เส้นใยกระถินคราสชิคาริป้าที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยใช้อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยแต่ละชนิด เท่ากับ 70:30 เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนกับ PLA โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และองศาความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยธรรมชาติ (70:30)

ตัวอย่าง	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	% Crystallinity
PLA	153.2	15.4	16.5
PLA+VM	149.1	14.2	15.2
PLA+VT	151.9	17.3	18.6
PLA+EUT	150.0	22.9	24.6
PLA+CT	150.4	19.9	21.4

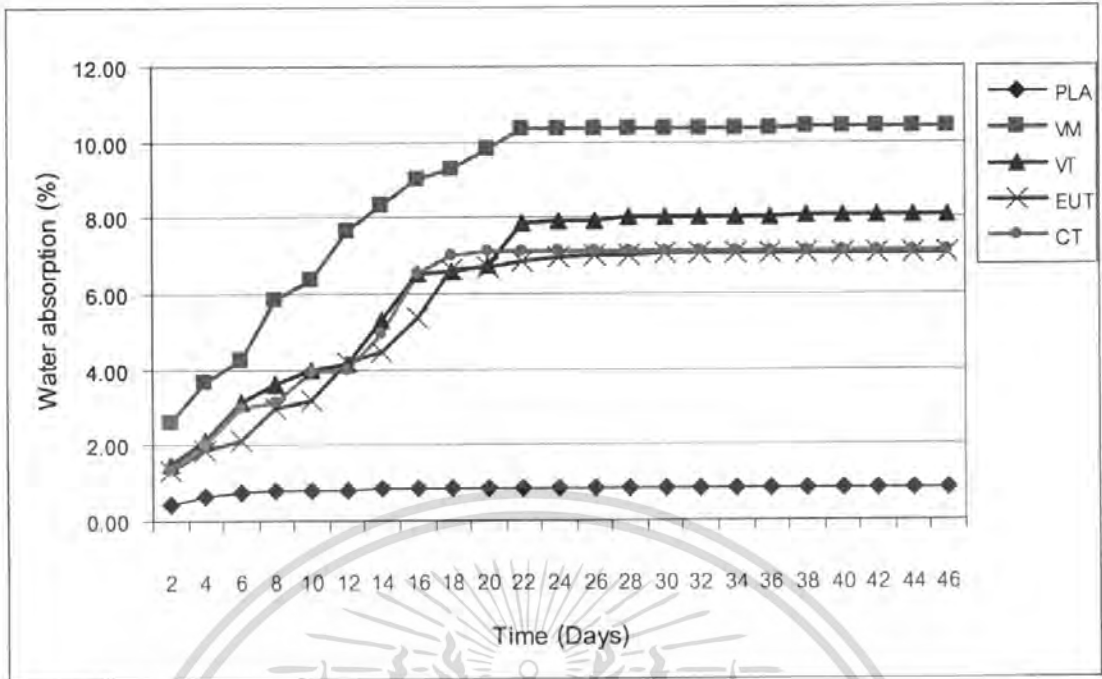
อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ทำให้ผลึกเกิดการหลอมเหลว โดยจะสัมพันธ์กับขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น เช่น ผลึกที่มีขนาดเล็กจะมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ต่ำ จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน สามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.1 พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นั่นคือ เมื่อเติมเส้นใยแต่ละชนิดใน PLA จะไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึกที่เกิดขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า ขนาดของผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยค่าองศาความเป็นผลึกเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อเติมเส้นใยแต่ละชนิดใน PLA ไม่ส่งผลต่อองศาความเป็นผลึกให้มีค่าเปลี่ยนแปลงมากนัก หรือกล่าวได้ว่าปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังใส่เส้นใยมีปริมาณใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP มีองศาความเป็นผลึกมากกว่าเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP เนื่องจากเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP เกิดการกระจายตัวของเส้นใยได้ดี ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์กับสารเสริมแรงดีขึ้น โดยเฉพาะเส้นใยยูคาลิปตัสที่ให้ค่าองศาความเป็นผลึกสูงกว่าเส้นใยกระถินคราสชิคาริป้า และเส้นใยหญ้าแฝก ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 สมบัติทางกายภาพ

4.7.1 ทดสอบการดูดซับน้ำ

สมบัติในการดูดซับน้ำ (Water absorption) แสดงถึงความสามารถของคอมโพสิตที่สามารถดูดซับน้ำเข้าไปในช่องว่างภายในคอมโพสิต โดยนำเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP และเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส เส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป่าที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยใช้อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยแต่ละชนิด เท่ากับ 70:30 เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด จากรูปที่ 4.43 เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ พบว่า การผสมเส้นใยธรรมชาติลงใน PLA ทำให้การดูดซับน้ำของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างมาก (อิมดัวที่ประมาณ 10%) เมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่ได้ผสมเส้นใยธรรมชาติ (อิมดัวที่ประมาณ 1%) โดยค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการแช่น้ำ หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไป (ประมาณ 20 วัน) เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบของเซลลูโลส ดังนั้นจึงมีหมู่ไฮดรอกซี (หมู่-OH) ที่มีความเป็นขั้ว หมู่ไฮดรอกซีสามารถดูดซับน้ำได้ดี โดยเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ แต่เมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับน้ำก็จะมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากมีการดูดซับน้ำจนถึงจุดอิมดัว และจากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP (รูปที่ 4.50) มีมากกว่าของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP (รูปที่ 4.51) เนื่องจากเส้นใยประเภท MP ยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ไม่ดี เส้นใยมีค่า Aspect ratio ต่ำ มีลักษณะเป็นเส้นสั้นหรือเป็นก้อน ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำ จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของ PLA กับเส้นใยหญ้าแฝกประเภท MP มีค่าสูงที่สุด ส่วนเส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป่า ประเภท TMP ทั้ง 3 ชนิดนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเส้นใยประเภท TMP มีค่า Aspect ratio สูง มีลักษณะเป็นเส้นยาว และจากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่ามีการยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดีกว่า ทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์น้อยลง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำจึงมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพัทธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำกับเวลาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยธรรมชาติ (70:30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ทดสอบการฝังดิน

การทดสอบการฝังดิน เป็นการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุคอมโพสิต โดยนำเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมจากกระบวนการ MP ที่อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยหญ้าแฝก เท่ากับ 70:30 และ 55:45 เพื่อทดสอบความสามารถในการย่อยสลายเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น และใช้เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยใช้อัตราส่วนของ PLA ต่อเส้นใยหญ้าแฝก เท่ากับ 70:30 เพื่อทดสอบความสามารถในการย่อยสลายระหว่างเส้นใยประเภท MP เทียบกับประเภท TMP ด้วยวิธีการนำชิ้นงานไปทดสอบการฝังดิน (ลึกประมาณ 5 cm) และบันทึกการเปลี่ยนแปลงโดยการถ่ายรูปทุกสัปดาห์ แสดงดังรูปที่ 4.44 โดยควบคุมค่าความชื้นที่ 50% อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดต่างของดิน แสดงในภาคผนวก จ การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน เป็นการทดสอบการย่อยสลายเชิงเปรียบเทียบ (Comparative study) เพื่อศึกษาผลการย่อยสลายอย่างง่ายของ PLA เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM มีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายราคาแพง



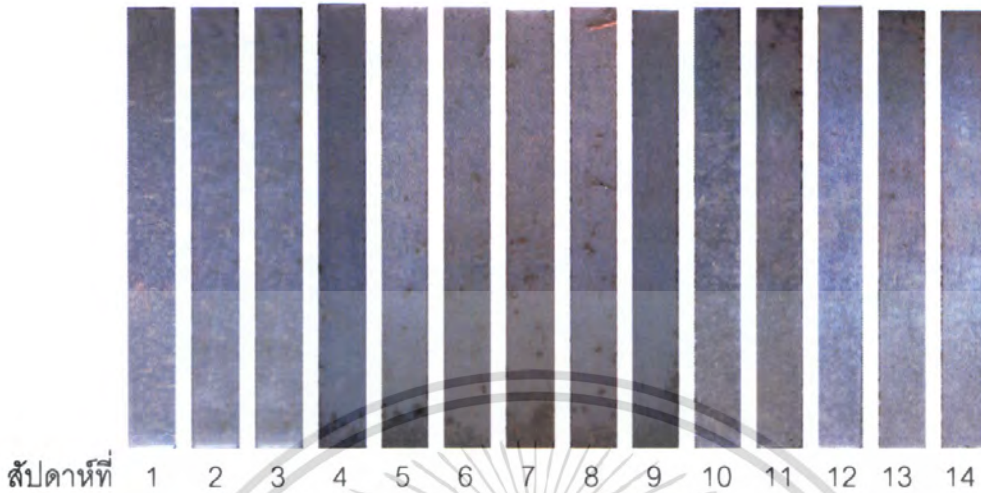
รูปที่ 4.44 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับเส้นใยหญ้าแฝก ในสัปดาห์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

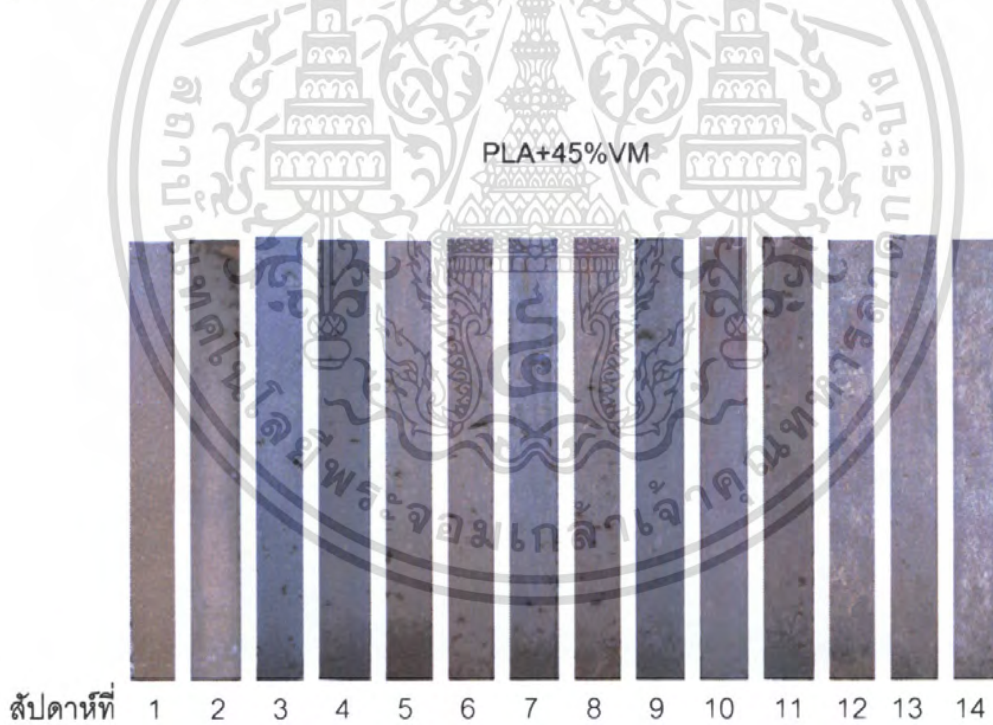
เมื่อพิจารณาชิ้นงานจากสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 14 พบว่า PLA+45%VM (รูปที่ 4.46) เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่า PLA+30%VM (รูปที่ 4.47) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ ที่เรียกว่า รอยต่อระหว่างวัฏภาคมีมากขึ้น เป็นบริเวณที่ไม่แข็งแรง จุลินทรีย์สามารถแทรกเข้าไปทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น และจากที่เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP สามารถดูดซับน้ำได้ดีที่สุด (รูปที่ 4.43) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่บริเวณหมู่เอสเตอร์ (Ester group) ในโครงสร้างของ PLA ซึ่งช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้นเช่นกัน ลักษณะชิ้นงาน PLA+45%VM จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้น มีสีซีดในบางบริเวณ และพบว่า PLA+30%VM (รูปที่ 4.47) เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่า PLA+30%VT (รูปที่ 4.48) เนื่องจากเส้นใยประเภท MP มีค่า Aspect ratio ต่ำ เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นสั้น จึงยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ไม่ดี และจากฐานฐานวิทยา พบว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP (รูปที่ 4.50) มีมากกว่าของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP (รูปที่ 4.51) จึงทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากขึ้น ส่วนเส้นใยประเภท TMP จะมีค่า Aspect ratio สูงกว่า เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นยาว สามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีกว่า และจากความสามารถในการดูดซับน้ำของเส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการ MP ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยชิ้นงานจะเกิดการย่อยสลายบริเวณด้านนอกก่อน เนื่องจากเป็นบริเวณที่สัมผัสกับจุลินทรีย์และความชื้นได้มากที่สุด เมื่อนำชิ้นงานพอลิเมอร์คอมโพสิตทุกสูตรมาเปรียบเทียบกับ Pure PLA (รูปที่ 4.45) พบว่า สามารถย่อยสลายได้เร็วและเกิดการเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าชิ้นงานของ PLA ที่ไม่มีการเติมเส้นใยหญ้าแฝก

การที่ชิ้นงาน PLA คอมโพสิตเกิดการย่อยสลายได้ช้าและเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน อาจเป็นผลมาจากการใช้คุณสมบัติทดสอบต่ำเกินไป ทำให้ต้องใช้เวลานานจึงจะเห็นการย่อยสลายได้ชัดเจน ซึ่งคุณสมบัติที่ควรใช้ในการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน จะต้องปรับคุณสมบัติให้สูงประมาณ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PLA

PLA



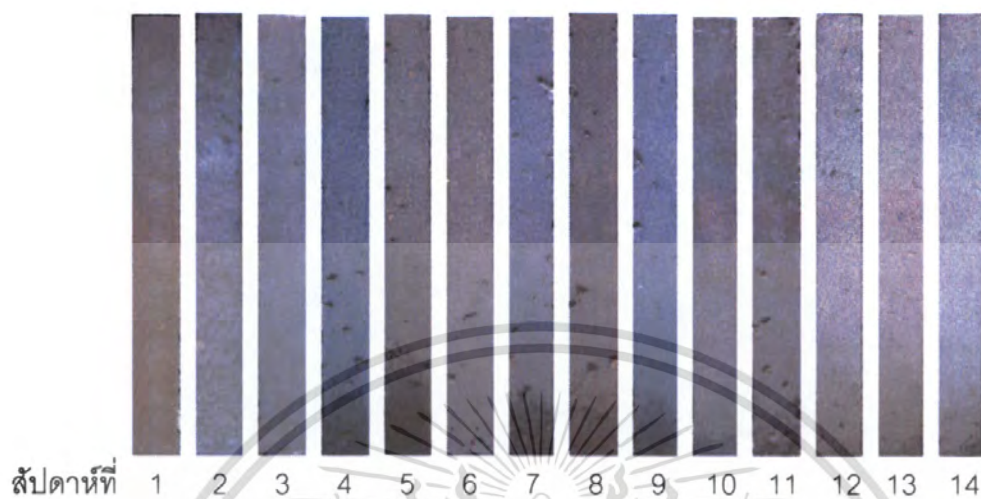
รูปที่ 4.45 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของ PLA



รูปที่ 4.46 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 45% เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (MP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLA+30%VM



สัปดาห์ที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

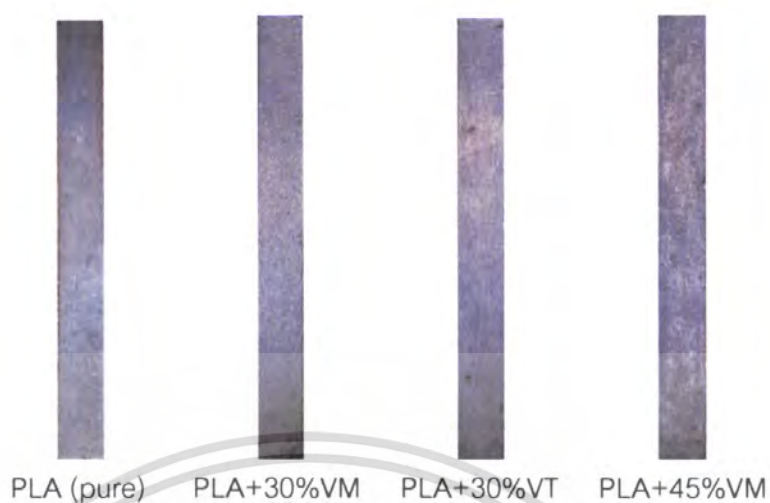
รูปที่ 4.47 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 30% เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (MP)



สัปดาห์ที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

รูปที่ 4.48 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 30% เส้นใยหญ้าแฝกที่เตรียมได้จากกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 แสดงรูปชิ้นงานที่ทดสอบการฝังดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ เส้นใยหญ้าแฝก ในสัปดาห์ที่ 14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

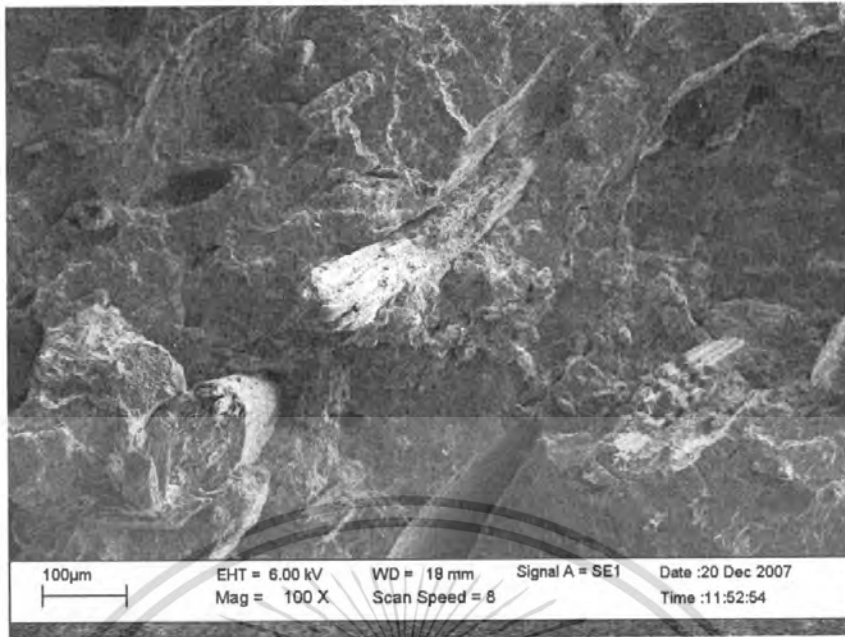
4.8 สันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

SEM เป็นการศึกษาสันฐานวิทยาพื้นผิวของวัสดุ ที่เตรียมได้จากการหักที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นจึงทำการหักชิ้นงาน ในการทดลองนี้ทำการศึกษา SEM ของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการศึกษาผลของประเภทเส้นใยที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต และศึกษาผลของชนิดเส้นใยที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเป็นสูตรผสมที่เลือกเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวเมื่อมีการเปลี่ยนประเภทและชนิดเส้นใย โดยผลของการศึกษา SEM แสดงดังรูปที่ 4.50 - 4.53

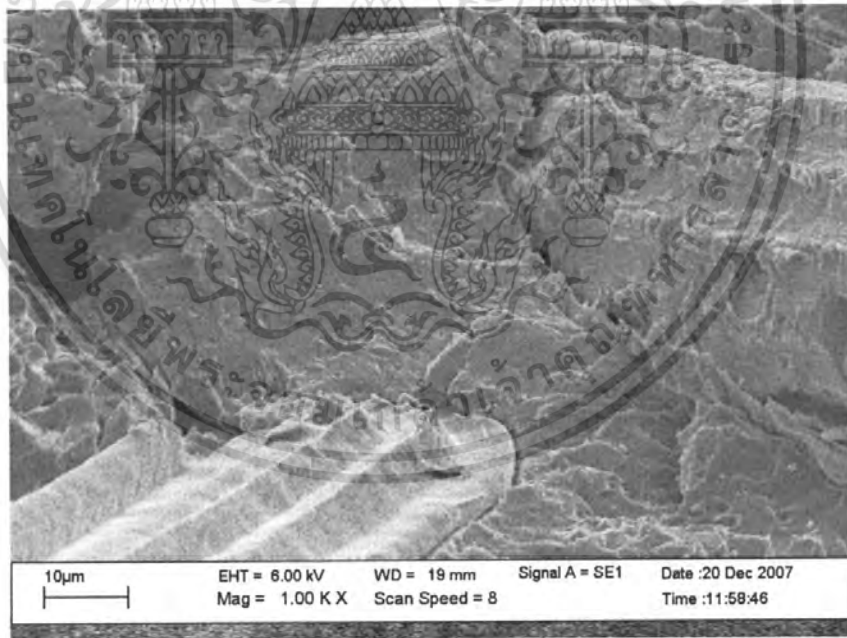
จากรูปที่ 4.50 แสดงภาพ SEM ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยหญ้าแฝกประเภท MP 30 php ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ภาพ(ก)) และ 1000 เท่า (ภาพ(ข)) ซึ่งจากภาพ (ก) มีการกระจายตัวของเส้นใยได้ดีในพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของเส้นใยจากพอลิเมอร์ในขณะที่เตรียมตัวอย่างโดยหักที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งช่องว่างนี้แสดงให้เห็นว่าเส้นใยกับพอลิเมอร์มีการยึดเกาะกันได้ดี และจากภาพ (ข) เมื่อทำการขยายที่ 1000 เท่า เพื่อศึกษาการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ พบว่า เกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์กับเส้นใย ซึ่งช่องว่างนี้จะเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานโดยจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลให้ลดลงและเกิดการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.51 แสดงภาพ SEM ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยหญ้าแฝกประเภท TMP 30 php ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 1000 เท่า (แสดงดังภาพ (ก) และ (ข) ตามลำดับ) จากภาพ (ก) แสดงการกระจายตัวของเส้นใยที่ดี แต่ยังพบช่องว่างกระจายอยู่ทั่วไป เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เป็นการยึดเกาะทางกายภาพเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มกำลังขยาย ดังภาพ (ข) พบว่า ช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์และเส้นใยมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.50 ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นและการดูดซับน้ำลดลง

จากรูปที่ 4.52 และรูปที่ 4.53 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยยูคาลิปตัสประเภท TMP 30 php (แสดงดังรูปที่ 4.52 ภาพ (ก) และ (ข) ตามลำดับ) และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA และเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้าประเภท TMP 30 php (แสดงดังรูปที่ 4.53 ภาพ (ก) และ (ข) ตามลำดับ) โดยภาพ (ก) แสดงการกระจายตัวได้ดี และเมื่อเพิ่มกำลังขยายดังภาพ (ข) พบว่า รอยต่อระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์และเส้นใยยูคาลิปตัสมีขนาดเล็กกว่ารอยต่อระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์และเส้นใยชนิดอื่นๆ ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยยูคาลิปตัสกับของเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้า มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

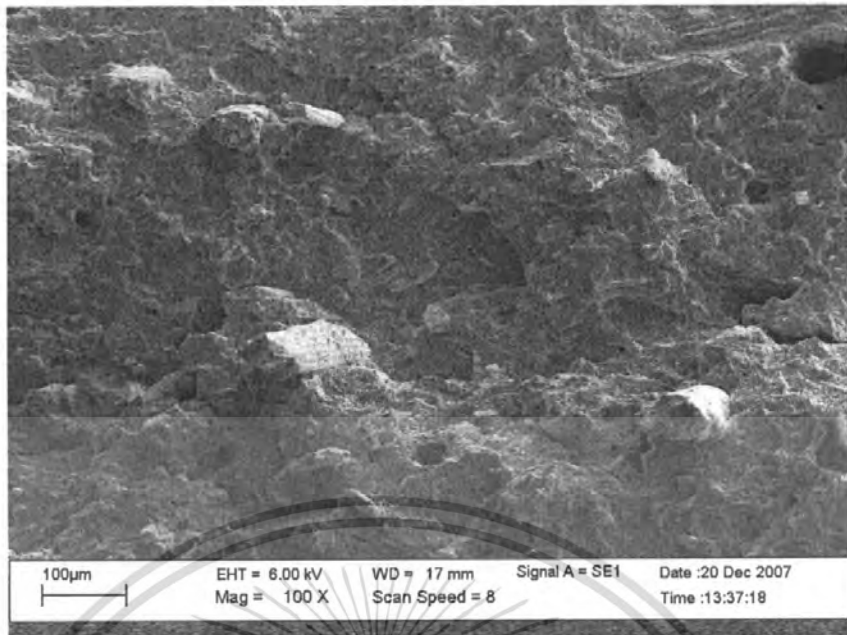


(ก) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายต่ำ (100 เท่า)

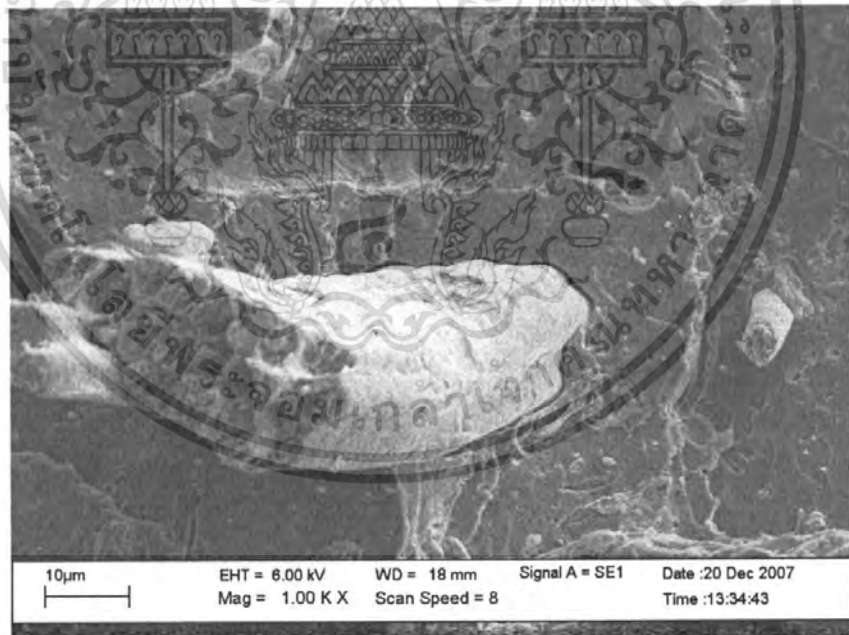


(ข) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายสูง (1000 เท่า)

รูปที่ 4.50 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และได้ยื่นขอจดทะเบียน MP 30 phn ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายต่ำ (100 เท่า)

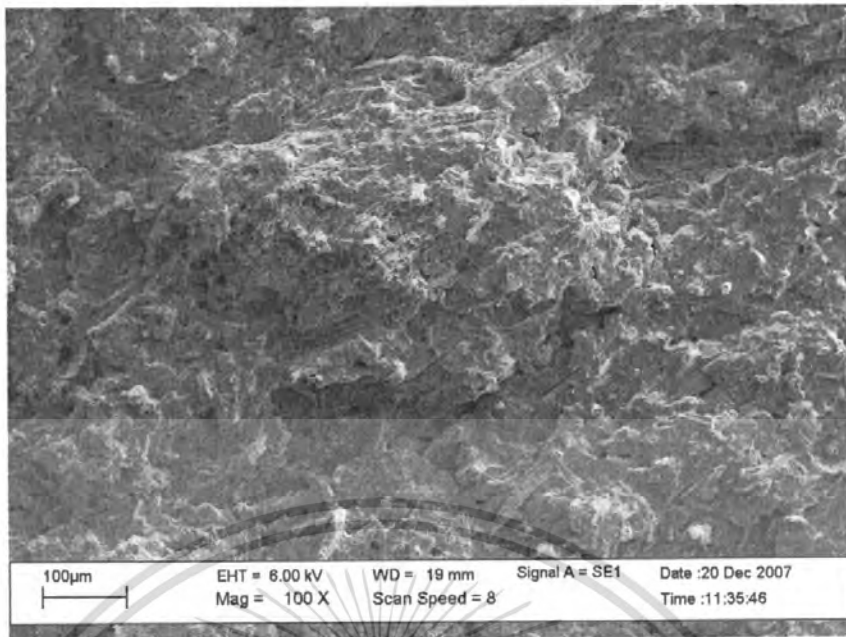


(ข) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายสูง (1000 เท่า)

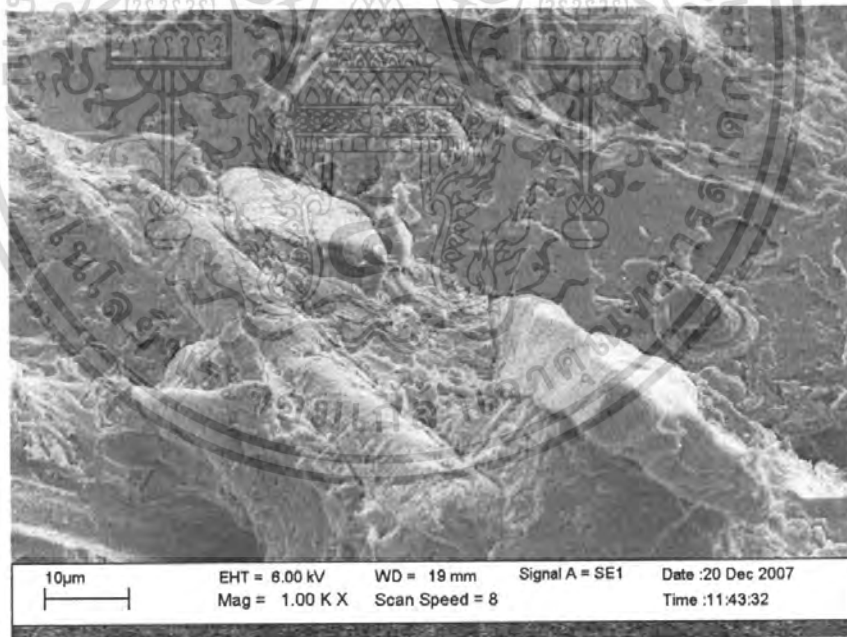
รูปที่ 4.51 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA

และเส้นใยหญ้าแฝกประเภท TMP 30 php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



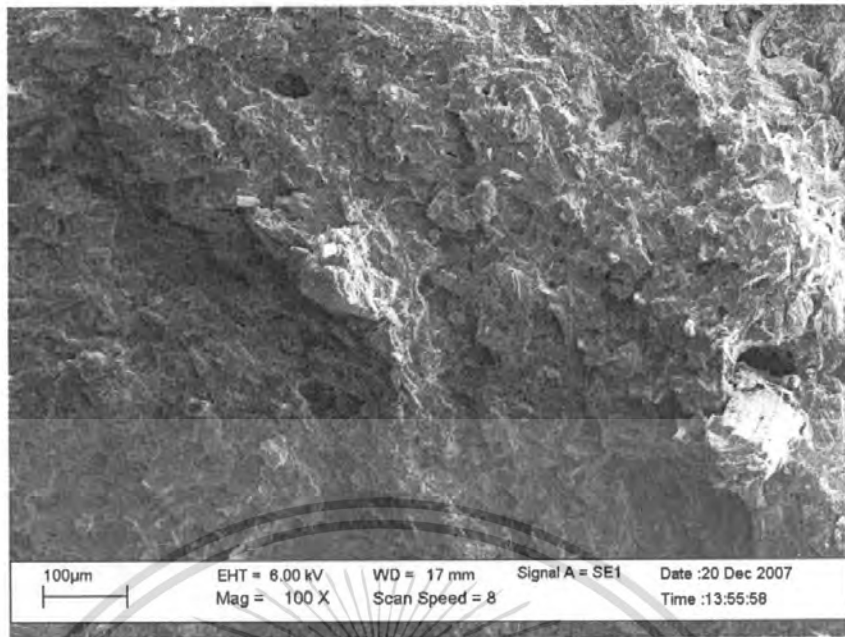
(ก) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายต่ำ (100 เท่า)



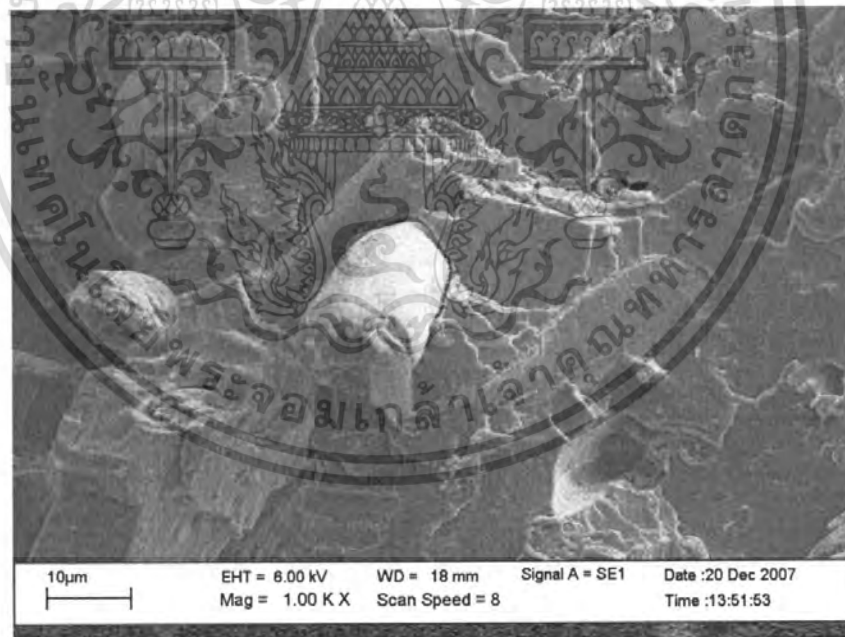
(ข) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายสูง (1000 เท่า)

รูปที่ 4.52 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมทรัพย์สินทางปัญญา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายต่ำ (100 เท่า)



(ข) ภาพ SEM ขนาดกำลังขยายสูง (1000 เท่า)

รูปที่ 4.53 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยมูลนิธิโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีชีวภาพและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบ

ในการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติ โดยงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถิน คราสซิคาร์ป้า จากผลการทดสอบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของ PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด ที่ปริมาณ 30% ของ PLA เพื่อทำการเปรียบเทียบกับต้นทุนวัตถุดิบของ Pure PLA

จากตารางที่ 4.2 พบว่า Pure PLA มีราคา กิโลกรัมละ 140.00 บาท ส่วนสูตรพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA+30%VT มีราคา กิโลกรัมละ 98.925 บาท PLA+30%EUT และ PLA+30%CT มีราคา กิโลกรัมละ 98.85 บาท จะเห็นได้ว่าการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดนี้มีราคาถูกกว่า Pure PLA ดังนี้ สำหรับ PLA+30%VT มีราคาถูกกว่าอยู่ที่ กิโลกรัมละ 41.075 บาท ส่วน PLA+30%EUT และ PLA+30%CT มีราคาถูกกว่า อยู่ที่ กิโลกรัมละ 41.15 บาท ดังนั้นการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติ ในงานวิจัยครั้งนี้ สามารถช่วยลดต้นทุนของวัตถุดิบ และนำไปใช้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

สารเคมี	ราคาตลาด (บาท/กิโลกรัม)	สูตรของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ							
		Pure PLA		PLA+30%VT		PLA+30%EUT		PLA+30%CT	
		ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
PLA	140.00	100	140.00	70	98.00	70	98.00	70	98.00
เส้นใย หญ้าแฝก (ประเภท TMP)	1.75	-	-	30	0.525	-	-	-	-
เส้นใย ยูคาลิปตัส (ประเภท TMP)	1.50	-	-	-	-	30	0.45	-	-
เส้นใยกระถิน คราสซิคาร์ป้า (ประเภท TMP)	1.50	-	-	-	-	-	-	30	0.45
Anox [®] 20	430.00	-	-	0.05	0.215	0.05	0.215	0.05	0.215
Alkanox [®] 240	370.00	-	-	0.05	0.185	0.05	0.185	0.05	0.185
		รวม	140.00	รวม	98.925	รวม	98.85	รวม	98.85
				ลดต้นทุน	41.075	ลดต้นทุน	41.15	ลดต้นทุน	41.15

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid) ; PLA) ผสมเส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถิน คราสซิคาร์ป้า โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป ชิ้นงานที่ได้จะนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต เพื่อหาปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมและสามารถขึ้นรูปได้ ตอนที่ 2 เป็นการศึกษาขนาดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต ตอนที่ 3 เป็นการศึกษาประเภทเส้นใยที่เตรียมได้จากกระบวนการเชิงกล (MP) และกระบวนการความร้อนเชิงกล (TMP) ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต จากนั้นจะสรุปผลการทดลองที่ได้จากทั้ง 3 ตอน เพื่อนำสูตรที่ได้ไปขึ้นรูปชิ้นงานในตอนที่ 4 ซึ่งเป็นการศึกษาชนิดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลของปริมาณเส้นใย
 - 1.1 เส้นใยหญ้าแฝกส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าความแข็งกด มอดุลัส และมอดุลัสโค้งงอเพิ่มขึ้น แต่มีค่าความแข็งแรงกระแทก ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงโค้งงอลดลง
 - 1.2 ปริมาณเส้นใยหญ้าแฝกที่เพิ่มขึ้น ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถย่อยสลายได้เร็วขึ้น
 - 1.3 ปริมาณเส้นใยหญ้าแฝกที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อน โดยค่า Heat Deflection Temperature (HDT) ไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับ Pure PLA
 - 1.4 ในงานวิจัยนี้ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม คือ 30 php
2. ผลของขนาดเส้นใย
 - 2.1 สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์คอมโพสิต จะขึ้นกับสมบัติของเมตริกซ์เป็นหลัก เนื่องจากใส่เส้นใยในปริมาณที่เท่ากัน
 - 2.2 ขนาดของเส้นใยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล โดยค่าที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.3 ขนาดของเส้นใยไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน โดยค่า HDT ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับ Pure PLA
3. ผลของประเภทเส้นใย
- 3.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบชิ้นงานพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่เตรียมได้จากเส้นใยประเภท MP และ TMP พบว่าเส้นใยประเภท TMP มีค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอเพิ่มขึ้น โดยที่สมบัติเชิงกลอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกัน
- 3.2 จากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยใส่ปริมาณเส้นใย 30 php เท่ากัน พบว่าเส้นใยประเภท MP สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าเส้นใยประเภท TMP
- 3.3 จากการทดสอบการดูดซับน้ำ โดยใส่ปริมาณเส้นใย 30 php เท่ากัน พบว่าเส้นใยประเภท TMP มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำกว่าเส้นใยประเภท MP
- 3.4 ประเภทของเส้นใยส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ดังนี้ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนองศาความเป็นผลึกของเส้นใยประเภท TMP จะมีความสูงกว่าเส้นใยประเภท MP และค่า HDT ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับ Pure PLA
- 3.5 การศึกษาพื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าเส้นใยประเภท TMP มีการกระจายตัวที่ดี มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ได้ดีกว่าเส้นใยประเภท MP
4. ผลของชนิดเส้นใย
- 4.1 เส้นใยหญ้าแฝก เส้นใยยูคาลิปตัส และเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้า ที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยใส่ปริมาณเส้นใย 30 php เท่ากัน พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก โดยที่เส้นใยยูคาลิปตัสกับเส้นใยกระถินคราสชิคาร์ป้าให้สมบัติใกล้เคียงกัน แต่เส้นใยยูคาลิปตัสจะให้ค่าความแข็งแรงกระแทก และค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น
- 4.2 จากการทดสอบการดูดซับน้ำ โดยใส่ปริมาณเส้นใย 30 php เท่ากัน พบว่าเส้นใยยูคาลิปตัสมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุด
- 4.3 ชนิดของเส้นใยส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ดังนี้ ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนองศาความเป็นผลึกของเส้นใยยูคาลิปตัสมีค่าสูงที่สุด และค่า HDT ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับ Pure PLA

- 4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้ SEM พบว่าเส้นใยยูคาลิปตัสและเส้นใยกระถิน
คราสชิคาร์ป้า มีการกระจายตัวที่ดี และมีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์
ได้ดีกว่าเส้นใยหญ้าแฝก
- 4.5 เมื่อเปรียบเทียบชนิดเส้นใยทั้ง 3 ชนิด พบว่าชนิดเส้นใยที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด
คือ เส้นใยยูคาลิปตัส

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานตัวอย่างในงานวิจัยครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า
คอมโพสิตที่ได้จาก PLA ผสมเส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากกระบวนการ TMP โดยใส่ปริมาณ
เส้นใย 30 phr ให้สมบัติในด้านต่างๆ ดีที่สุด คือ พอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถทนทานต่อแรงดึง
และแรงกระแทกได้ดี มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ Pure PLA และจากการศึกษา
สัณฐานวิทยา พบว่ามีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ได้ดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติ โดยเลือกใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่สามารถ
ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น อีโคเฟล็กซ์ (Ecoflex[®]) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
(Poly(butylene succinate) ; PBS) ฯลฯ
2. เพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติในพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อช่วยในการเสริมแรง และช่วย
ลดต้นทุนมากขึ้น โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดอื่นๆ ในสูตรผสม เช่น
พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) ฯลฯ ซึ่งจะ
ช่วยให้การขึ้นรูปชิ้นงานทำได้ง่ายขึ้น
3. ปรับปรุงสีของพอลิเมอร์คอมโพสิตให้มีสีที่สวยงาม
4. ทดลองขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ และทดสอบการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ธนาวดี ลีจจากภัย, **พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม**, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ จำกัด, กรุงเทพมหานคร, 2549.
2. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, **เอกสารประกอบการเรียนวิชาวัสดุเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม**, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2549.
3. <http://www.enviroarc.net/index.php>
4. ปิยะวรรณ เจียวก๊ก และพงศ์ศักดิ์ แพน้อย, **การศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตไม้เทียมจากพอลิพรอพิลีนและไม้ยูคาลิปตัส**, ปรินูญานินพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2543.
5. ลักษณะ วิงษ์กำภู และสาวิตรี พิเชฐกิจจาวัฒน์, **การศึกษาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ โดยใช้สารตัวเติมธรรมชาติ**, ปรินูญานินพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2541.
6. กรรณิการ์ ไพโรศรี และกิงกาญจน์ พิษณุลักษณะ, **การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเพล็กซ์และพอลิแลคติกเอซิดผสมแป้งตัดแปรเอสเทอร์**, ปรินูญานินพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2549.
7. A.K.Bledzki and J.Gassan, **Composites reinforced with cellulose based fibers**, Prog.Polym.Sci.,24,1999,221-274.
8. <http://www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html>
9. J.I.Kroschwitz, **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, Vol6, 1990, 655.
10. Banks, W.B.;Lawther,J.M.**Derivatization of wood in composition**, in Cellulose Polymer, Blends and Composites.(Gillbert,R.D.ed), Hanser Publishers, New York, 1994, 131-153.
11. มูลนิธิชัยพัฒนา, 1996 [Online]. Available : <http://www.chaipat.or.th/noframe/thai/index.html>.
12. http://www.moac-info.net/modules/webboard/attachfile13_546_21.jpg
13. <http://www.rta.mi.th/data/vetivevia/image/pic-s/s2.jpg>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. <http://www.nrct.net/images/pics/100403news06.jpg>
15. http://www.forest.go.th/silvic/WP_SVGStations/S_Stations/North_Stations/Intakin/images/image051.jpg
16. <http://www.worldwidewattle.com/speciesgallery/crassicarpa.php>
17. <http://www.forest.go.th/research/Acacia/A7.html>
18. <http://www.phtnet.org/news/view-news.asp?nID=515>
19. G.H.Yew,A.M.Mohd Yusof,Z.A.Mohd Ishak and U.S.Ishiaku, Water absorption and enzymatic degradation of poly(lactic acid)/rice starch composites, **Polymer Degradation and stability**, 2005, 90, 488-500.
20. Edwin Bodros,Isabelle Pillin,Nicolas Montrelay and Christophe Baley, Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural application?, **Composites Science and Technology**, 2007, 67, 462-470.
21. Seung-Hwan Lee and Siqun Wang."Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with-based coupling agent." **Composites Part A : applied science and manufacturing**.,2006.pp.80 – 91.
22. Masud S. Huda, Lawrence T. Drzal, Amar K. Mohanty and Manjusri Misra. "Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly(lactic acid) composite: A comparative study" **Composites science and Technology**.,2006.pp.1 – 12.
23. Huda M. S., Drzal L. T.,Mohanty A. K.,Williams K.,Mielewski D. F."A study on biocomposites from recycled newspaper fiber and poly(lactic acid)" **Ind.Eng.Chem.Res.**2005;44:5593 – 5601.
24. L. Avérous, F. Le Digabel."Properties of biocomposites based on lignocellulosic fillers" **Carbohydrate Polymers**.,2006.pp.480-493.
25. Jitendra K. Pandey, K. Raghunatha Reddy, A. Pratheep Kumar, R.P. Singh. "An overview on the degradability of polymer nanocomposites" **Polymer Degradation and Stability**.,2005.pp.234-250.
26. ASTM D 638. "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)." Philadelphia : **American Society for Testing and materials**.,1993.

27. ASTM D 256. "Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials." Philadelphia : **American Society for Testing and materials.**,1993.
28. ASTM D 785. "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials." Philadelphia : **American Society for Testing and materials.**,1993.
29. ASTM D 790. "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials." Philadelphia : **American Society for Testing and materials.**,1993.
30. ASTM D 570. "Standard Test Methods for Water Absorption of Plastics." Philadelphia : **American Society for Testing and materials.**,1993.
31. ASTM D 648. "Standard Test Methods for Heat Deflection Temperature." Philadelphia : **American Society for Testing and materials.**,1993.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NatureWorks® PLA Polymer 4042D Biaxially Oriented Films – General Purpose

Film Characteristics/ Applications

NatureWorks® PLA (polylactide) polymer 4042D – a product from NatureWorks LLC – can be converted into a biaxially oriented film with use temperatures up to 205°F (130°C). This film has excellent optics, good machinability and excellent twist and deadfold. These properties make 4042D film an ideal candidate for candy twistwrap and other packaging applications. Additional properties include advantageous barrier to flavor and grease and superior oil resistance.

Polymer Characteristics

PLA polymer is available in pellet form. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed.

Machine Configuration

PLA polymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. PLA resins will process on conventional cast tenter equipment. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks LLC technical support.

Process Details

Startup and Shutdown

PLA polymer 4042D is not compatible with a wide variety of polyolefin resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce PLA polymer into the extruder at the operating

Processing Temperature Profile		
Melt Temperature	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temperature	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	375°F	190°C
Screw Speed	20-100 rpm	
MD Draw Temp.	140-160°F	60-70°C
TD Draw Temp.	160-175°F	70-80°C
Heat Set Oven	205-285°F	120-140°C

conditions used in Step 1.

4. Once PLA polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

Drying

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of -30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

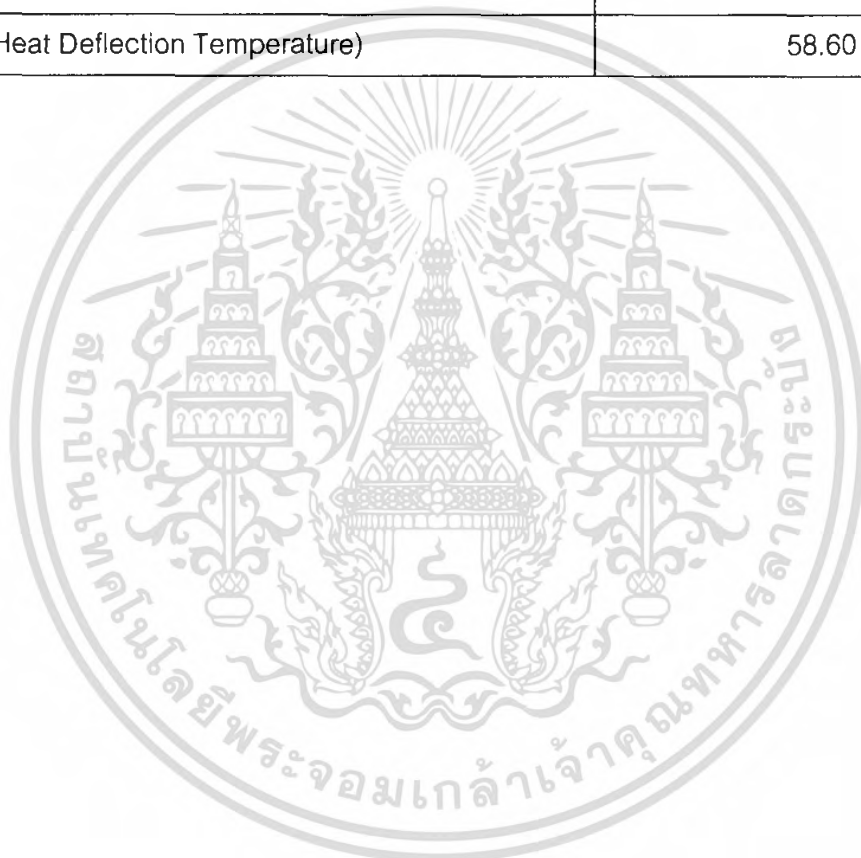
Typical Material & Application Properties ^(1,2,3)			
Film Properties		Value	ASTM Method
Density		1.25 g/cc	D1505
Tensile Strength MD		16 kpsi	D882
	TD	21 kpsi	D882
Tensile Modulus MD		480 kpsi	D882
	TD	560 kpsi	D882
Elongation at Break	MD	160%	D882
	TD	100%	D882
Elmendorf Tear MD		15 g/mil	D1922
	TD	13 g/mil	D1922
Spencer Impact		2.5 joules	
Transmission Rates	Oxygen	550 cc-mil/m ² /24 hr atm	D1434
	Carbon Dioxide	3,000 cc-mil/m ² /24 hr atm	D1434
	Water Vapor	325 g-mil/m ² /24 hr atm	E96
Optical Characteristics	Haze	2.1%	D1003
	Gloss, 20°	90	D1003
Thermal Characteristics	Glass Transition Temperature	126°F (52°C)	D3418
	Melting Point	279°F (136°C)	D1003

⁽¹⁾ Typical properties; not to be construed as specifications. ⁽²⁾ All properties measured on 1.0 mil film. ⁽³⁾ Typical values for a film oriented 3.5x in MD and 5x in TD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA)

สมบัติเชิงกล	ค่าที่ทดสอบ
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	70.03 MPa
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	49.17 %
มอดุลัส (Modulus)	77.44 MPa
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	4.33 kJ/m ²
ความแข็งกด (Hardness)	70.35
HDT (Heat Deflection Temperature)	58.60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding

TIME PROGRAMING

DIE CLS/OPN TIME	:	50	MELTING TIME	:	200
SID-COR ACT TIME	:	50	DECOMPRS TIME	:	0
1 ST STG INJ TIME	:	18	COOLING TIME	:	100
2 ND STG INJ TIME	:	18	EJECTOR COUNT	:	1
3 RD STG INJ TIME	:	18	SCW FWD TIME	:	0
EJECT FWD DLY TIME	:	0	SCW BWD TIME1	:	0
MELTING DLY TIME	:	0	SCW BWD TIME2	:	0
EJE BKD DLY TIME	:	0	ALARM TIME	:	500

PRESSURE PROGRAMING

DIE CLS PRESR	:	45	DECOMP PRESR	:	55
CLS LOW PRESR	:	30	PLUNGER PRESR	:	40
CLS HI PRESR	:	55	EJECTOR PRESR	:	50
DIE OPN PRESR	:	50	SCW-IN PRESR	:	35
1 ST PRESR	:	52	DIE ADJ PRESR	:	60
2 ND PRESR	:	48			
3 RD PRESR	:	46			
MELTING PRESR	:	50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROGRAMING FLOW SPEED

RAPID CLS SPD	:	30	1 ST STG INJ SPD	:	16
HIGH CLS SPD	:	55	2 ND STG INJ SPD	:	16
CLAMPING SPD	:	50	3 RD STG INJ SPD	:	15
DIE OPN SLW1	:	30	MELTING SPD	:	50
RAPID OPN SPD	:	40	DECOMP SPD	:	50
DIE OPN SLW2	:	30	EJECTOR SPD	:	40
PLUNGER SPD	:	40	SCREW-IN SPD	:	0
DIE ADJ SPD	:	40	DIE CHANGE SPD	:	10

PROGRAMING TEMPERATURES

PROGRAMED TEMP	CURRENT TEMP
NOZZLE	180
ZONE 1	175
ZONE 2	170
ZONE 3	155
ZONE 4	155
ZONE 5	150
ZONE 6	150

PROGRAMME OPTIONS

DIE CLS SPD	:	1	1 = HI SPD	2 = FAST SPD
PLUNGER SPD	:	1	1 = USE	2 = NO USE
EJECTOR	:	1	1 = STAL	2 = MULTI 3 = FIXD NB
SCRW	:	1	1 = USE	2 = NO USE 3 = SID-COR
SID-COR	:	1	1 = TIME	2 = TRAVEL
INJ.FUNC.	:	1	1 = TIME	2 = TRAVEL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio; L/D)
ของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

ชนิดเส้นใย	ค่า Aspect ratio (L/D)
หญ้าแฝก ประเภท MP	40.82
หญ้าแฝก ประเภท TMP	100.25
ยูคาลิปตัส ประเภท TMP	164.94
กระถินคราสซิคาร์ป้า ประเภท TMP	137.50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus (MPa)
PLA+15%VM ขนาด 20-50 mesh	60.88 ± 2.30	8.51 ± 0.78	1062.00 ± 49.82
PLA+30%VM ขนาด 20-50 mesh	63.39 ± 5.74	7.42 ± 1.16	1095.84 ± 66.24
PLA+45%VM ขนาด 20-50 mesh	49.82 ± 7.03	5.83 ± 1.16	1427.23 ± 52.20

สูตร	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m ²)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
PLA+15%VM ขนาด 20-50 mesh	66.98 ± 0.84	2.90 ± 0.26	62.87 ± 6.05	349.87 ± 31.81
PLA+30%VM ขนาด 20-50 mesh	69.58 ± 0.52	2.13 ± 0.14	49.65 ± 4.38	579.92 ± 29.45
PLA+45%VM ขนาด 20-50 mesh	75.75 ± 0.87	1.44 ± 0.14	39.01 ± 3.06	613.26 ± 12.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่2 ศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

โดยใช้เส้นใยประเภท MP

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus (MPa)
PLA+30%VM ขนาด <20 mesh	62.08 ± 1.37	7.32 ± 0.29	959.44 ± 19.11
PLA+30%VM ขนาด 20-50 mesh	63.39 ± 5.74	7.42 ± 1.16	1095.84 ± 66.24
PLA+30%VM ขนาด 50-80 mesh	66.92 ± 5.07	7.67 ± 0.66	1000.70 ± 39.98
PLA+30%VM ขนาด >80 mesh	60.50 ± 3.37	7.83 ± 0.79	876.00 ± 33.43

สูตร	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m ²)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
PLA+30%VM ขนาด <20 mesh	59.48 ± 0.53	3.17 ± 0.15	33.91 ± 1.20	468.35 ± 27.57
PLA+30%VM ขนาด 20-50 mesh	69.58 ± 0.52	2.13 ± 0.14	49.65 ± 4.38	579.92 ± 29.45
PLA+30%VM ขนาด 50-80 mesh	61.48 ± 3.12	3.51 ± 0.14	33.40 ± 2.30	512.44 ± 38.75
PLA+30%VM ขนาด >80 mesh	64.60 ± 3.54	3.08 ± 0.14	31.09 ± 1.94	275.82 ± 32.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้เส้นใยประเภท TMP

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus (MPa)
PLA+30%EUT ขนาด 20-50 mesh	76.38 ± 5.84	8.33 ± 0.48	1093.75 ± 22.87
PLA+30%EUT ขนาด 50-80 mesh	75.71 ± 4.37	8.84 ± 0.82	1081.25 ± 26.58

สูตร	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m ²)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
PLA+30%EUT ขนาด 20-50 mesh	71.55 ± 0.66	1.25 ± 0.08	68.61 ± 2.36	790.27 ± 25.85
PLA+30%EUT ขนาด 50-80 mesh	72.65 ± 0.71	1.23 ± 0.11	69.14 ± 1.91	781.67 ± 20.54

ตอนที่3 ศึกษาผลของประเภทเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus (MPa)
PLA+30%VM	63.39 ± 5.74	7.42 ± 1.16	1095.84 ± 66.24
PLA+30%VT	66.06 ± 4.11	7.47 ± 0.47	867.43 ± 21.90

สูตร	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m ²)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
PLA+30%VM	69.58 ± 0.52	2.13 ± 0.14	49.63 ± 4.38	579.92 ± 29.45
PLA+30%VT	75.80 ± 0.78	1.67 ± 0.12	58.27 ± 3.89	1722.20 ± 72.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่4 ศึกษาผลของชนิดเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

สูตร	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus (MPa)
PLA+30%VT	66.06 ± 4.11	7.47 ± 0.47	867.43 ± 21.90
PLA+30%EUT	85.44 ± 1.60	8.37 ± 0.32	1070.44 ± 10.58
PLA+30%CT	79.43 ± 2.40	7.51 ± 0.99	1064.13 ± 19.36

สูตร	Hardness (Shore D)	Impact strength (kJ/m ²)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
PLA+30%VT	75.80 ± 0.78	1.67 ± 0.12	58.27 ± 3.89	1722.20 ± 72.29
PLA+30%EUT	74.30 ± 1.23	2.30 ± 0.17	58.55 ± 1.80	2067.57 ± 36.85
PLA+30%CT	73.69 ± 0.61	1.41 ± 0.23	52.72 ± 2.51	2062.59 ± 82.06

ตารางแสดงค่า HDT ของคอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติ

สูตร	HDT (°C)
Pure PLA	58.60 ± 0.20
PLA + 15%VM ขนาด 20-50 mesh	57.40 ± 0.50
PLA + 30%VM ขนาด 20-50 mesh	55.30 ± 0.70
PLA + 45%VM ขนาด 20-50 mesh	54.90 ± 0.40
PLA + 30%VM ขนาด <20 mesh	55.50 ± 0.50
PLA + 30%VM ขนาด 20-50 mesh	55.30 ± 0.70
PLA + 30%VM ขนาด 50-80 mesh	56.70 ± 0.30
PLA + 30%VM ขนาด >80 mesh	55.50
PLA + 30%VT	59.40 ± 0.40
PLA + 30%EUT	57.50 ± 0.70
PLA + 30%CT	57.70 ± 0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำกับเวลาของคอมโพสิตระหว่าง PLA ผสมเส้นใยธรรมชาติ

วันที่	PLA	PLA+30%VM	PLA+30%VT	PLA+30%EUT	PLA+30%CT
2	0.45	2.58	1.47	1.31	1.35
4	0.63	3.67	2.12	1.85	2.00
6	0.75	4.26	3.11	2.14	2.96
8	0.79	5.86	3.62	2.98	3.11
10	0.82	6.35	3.98	3.16	3.95
12	0.82	7.62	4.16	4.22	4.00
14	0.83	8.35	5.33	4.44	4.96
16	0.83	9.02	6.54	5.38	6.52
18	0.85	9.29	6.61	6.65	7.00
20	0.86	9.84	6.74	6.71	7.10
22	0.86	10.33	7.87	6.84	7.12
24	0.87	10.35	7.90	6.95	7.12
26	0.87	10.35	7.92	7.00	7.12
28	0.87	10.37	8.00	7.03	7.12
30	0.87	10.37	8.00	7.06	7.12
32	0.87	10.37	8.01	7.06	7.12
34	0.87	10.38	8.03	7.06	7.13
36	0.87	10.38	8.04	7.06	7.13
38	0.87	10.39	8.05	7.06	7.13
40	0.87	10.39	8.05	7.06	7.13
42	0.87	10.39	8.05	7.06	7.13
44	0.87	10.39	8.05	7.06	7.13
46	0.87	10.39	8.05	7.06	7.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงการควบคุมค่าความชื้น อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดต่างของดิน

วัน/เดือน/ปี	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	pH
31 พ.ย. 50	50	23.5	7
6 ธ.ค. 50	50	25.0	6
14 ธ.ค. 50	50	27.0	6.5
20 ธ.ค. 50	50	28.0	7.5
27 ธ.ค. 50	50	27.0	6
4 ม.ค. 51	50	24.0	6
11 ม.ค. 51	50	26.0	6
18 ม.ค. 51	50	27.0	7
25 ม.ค. 51	50	26.5	6
1 ก.พ. 51	50	26.0	6
8 ก.พ. 51	50	25.0	7
15 ก.พ. 51	50	27.0	7
22 ก.พ. 51	50	26.0	7
29 ก.พ. 51	50	26.0	6

หมายเหตุ : น้ำหนักดินทั้งหมด 15 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



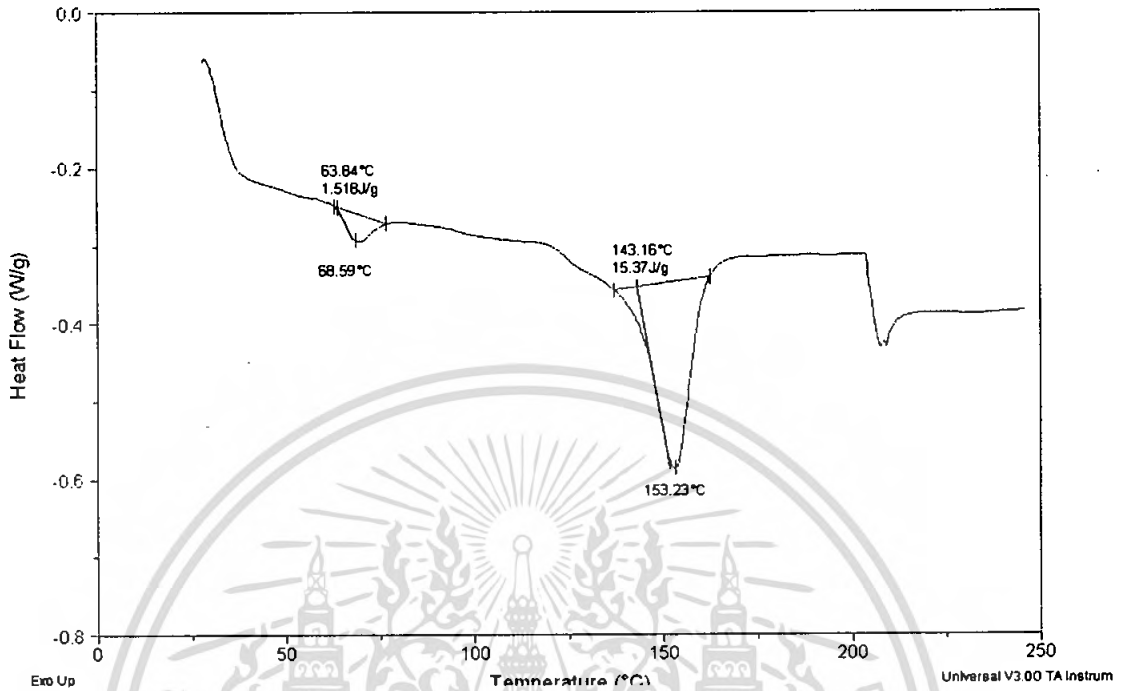
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ DSC ของ PLA

Sample: PLA
Size: 15.2000 mg
Method: spsl

DSC

File: C:\TAData\DSC\sumpan\PLA.001
Operator: to
Run Date: 4-Mar-08 15:48

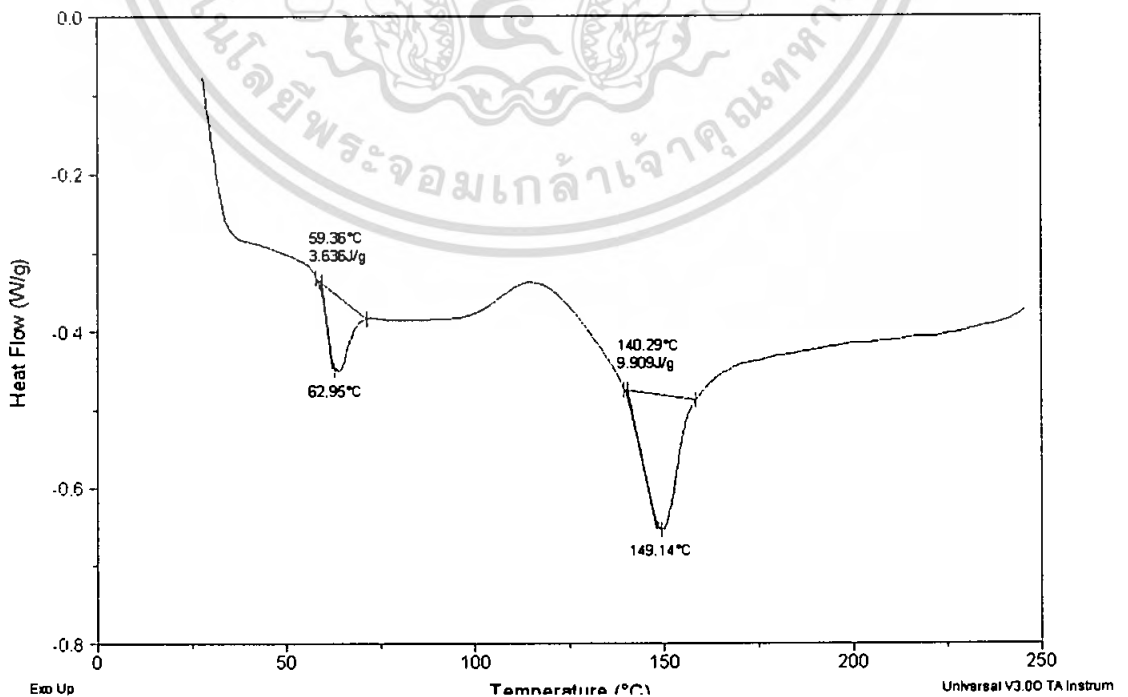


กราฟ DSC ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 30%เส้นใยหญ้าแฝกประเภท MP

Sample: VM
Size: 12.7000 mg
Method: spsl

DSC

File: C:\TAData\DSC\sumpan\VM.001
Operator: to
Run Date: 4-Mar-08 15:13



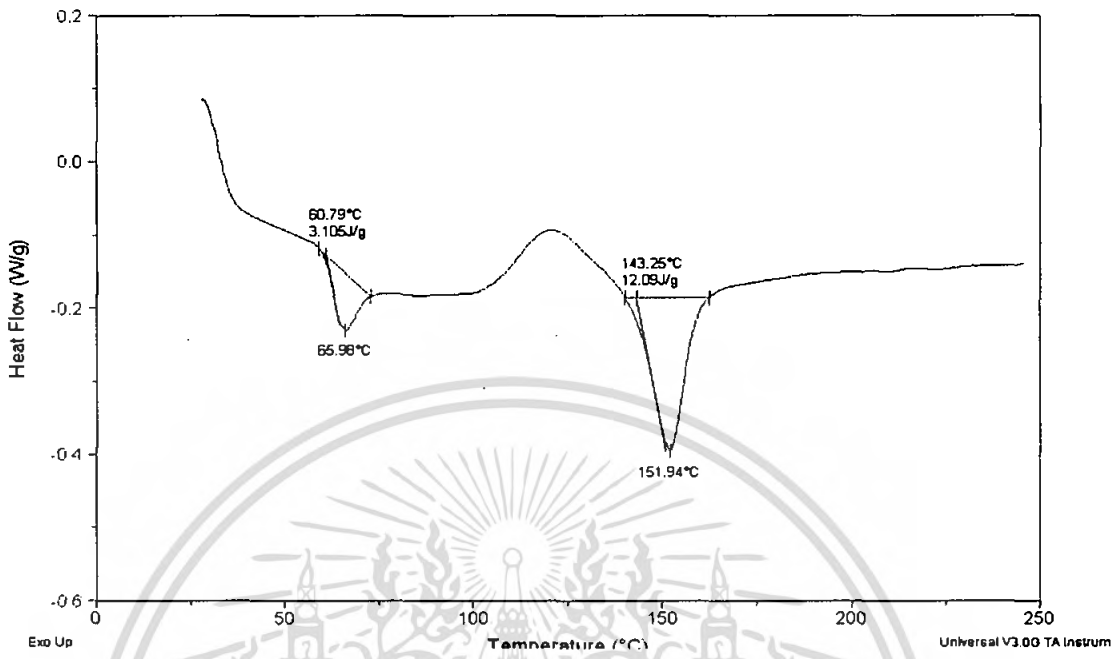
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ DSC ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 30%เส้นใยหญ้าแฝกประเภท TMP

Sample: CT
Size: 15.4000 mg
Method: spsl

DSC

File: C:\TA\Data\DSC\sumpan\VT.001
Operator: to
Run Date: 4-Mar-08 14:24

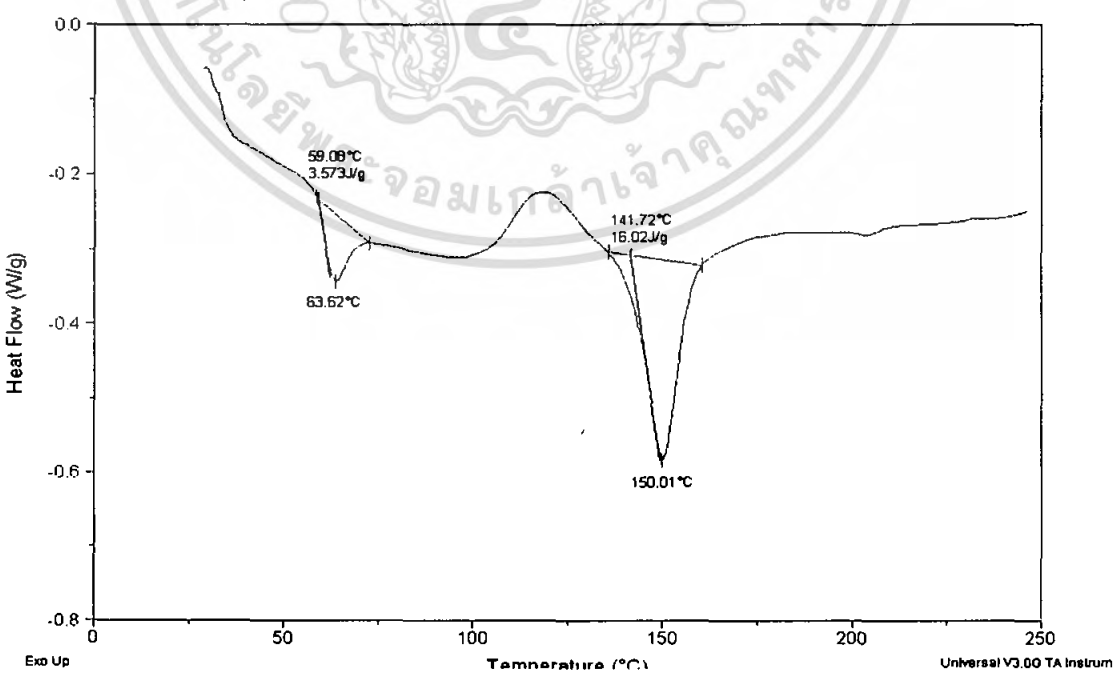


กราฟ DSC ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA กับ 30%เส้นใยยูคาลิปตัสประเภท TMP

Sample: EUT
Size: 12.5000 mg
Method: spsl

DSC

File: C:\TA\Data\DSC\sumpan\EUT.001
Operator: to
Run Date: 4-Mar-08 12:22



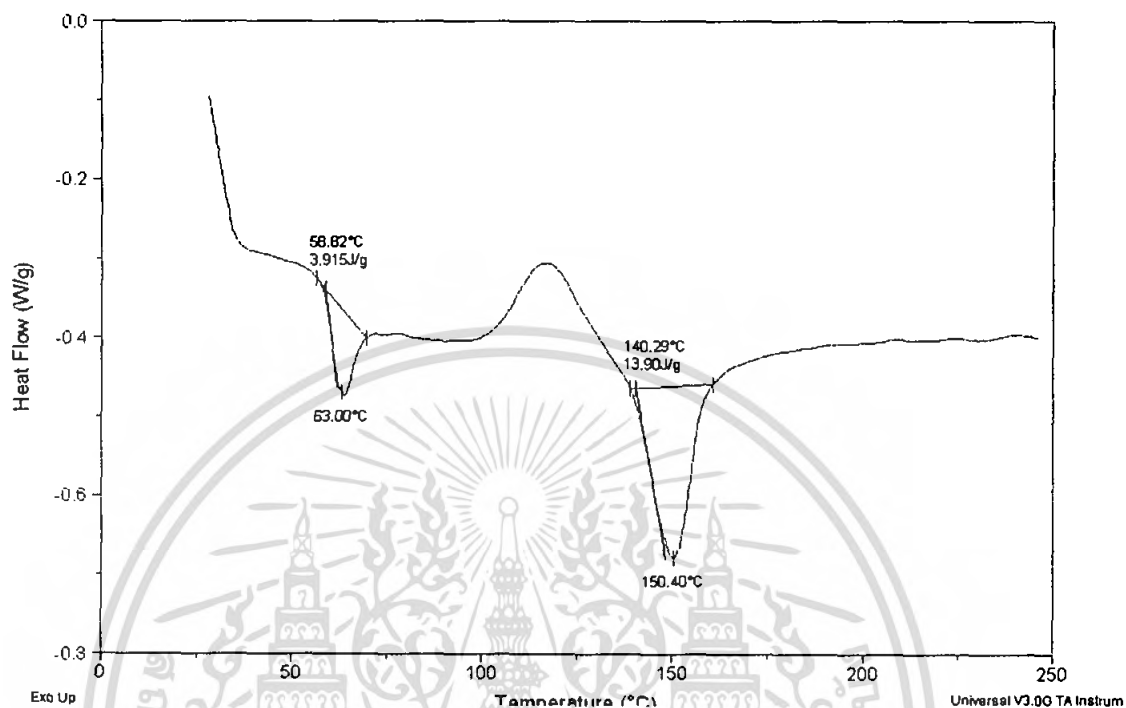
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ DSC ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA
กับ 30%เส้นใยกระดิ่งนครราชสีมาประเภท TMP

Sample: CT
Size: 10.0000 mg
Method: spsl

DSC

File: C:\TA\Data\DSC\sumpan\CT.001
Operator: to
Run Date: 4-Mar-08 13:37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้