



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของ
พอลิแล็กติกแอซิดโดยยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง”

โดย ผศ.ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับและคณะ

เมษายน 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติก แอซิดโดยยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ผศ. ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. นายวุฒิพงศ์ เดชาติวงศ์ ณ อยุธยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดโดยยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง

(ภาษาอังกฤษ) Improvement thermal and mechanical properties of polylactic acid by natural rubber and additive

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ
หน่วยงาน ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทรศัพท์ 02-218-7518, 086-090-2074 โทรสาร 02-255-5831
Email address sirilux.p@chula.ac.th, spoompradub@yahoo.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย นายวุฒิพงศ์ เตชะติวงศ์ ณ อยุธยา

ระยะเวลาดำเนินงาน 18 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน 2553 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2555
(ขยายเวลาจนถึง 30 เม.ย. 2555)

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พอลิแล็กติกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติชนิดหนึ่งซึ่งมีสมบัติเฉพาะตัวที่ดี มีความแข็งแรงและค่ามอดูลัสสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น พลาสติกย่อยสลาย อุปกรณ์ทางการแพทย์ รวมทั้งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมเส้นใย โดยเส้นใยที่ได้มีสมบัติที่ดีหลายอย่างทั้งความแข็งแรงและย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดคือเสียรูปทันทีที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (ประมาณ 55-60 องศาเซลเซียส) มีลักษณะเป็นของแข็งเปราะที่อุณหภูมิห้อง และไม่ยืดหยุ่น ด้วยสาเหตุที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด ให้มีความยืดหยุ่น ทนต่อความร้อนได้สูง โดยการผสมร่วมกับยางธรรมชาติและตัวประสาน (พอลิเมทิลเมทาคริเลต) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีความยืดหยุ่น และค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงขึ้น

วัตถุประสงค์

ปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการนำยางธรรมชาติผสมร่วมกับสารเติมแต่ง

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยได้ โดยนำมาผสมร่วมกับยางธรรมชาติ ซึ่งมีสมบัติเชิงกลดี มีความยืดหยุ่นสูง และพอลิเมทิลเมทาคริเลตใช้เป็นสารเติมแต่งซึ่งมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูง และมีส่วนที่มีขั้วซึ่งอาจช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ และศึกษาสมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต การออกสูตร โดยกำหนดปริมาณยางธรรมชาติ(SNR) เท่ากับ 5, 10 และ 15 phr และปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) เท่ากับ 1, 3 และ 5 phr ผสมร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์(PLA) 100 phr จากข้อมูลทางฐานวิทยาศาสตร์พบว่าความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ SNR มีความเข้ากันได้ต่ำ เมื่อปริมาณ SNR เพิ่มขึ้น การเติม PMMA ส่งผลให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า การเติม PMMA ในปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้ความเข้ากันได้ของ PLA และ SNR ลดลง การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ค่ามอดูลัสความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณSNR หรือ PMMA เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม SNR และ PMMA มีผลต่อการปรับปรุงค่าพลังงานการกระแทก(impact energy) โดยพลังงานการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อปริมาณ SNR และ PMMA เพิ่มขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนพบว่า เมื่อเติม SNR และ PMMA ในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(T_g) เพิ่มขึ้นประมาณ 1 – 2 องศาเซลเซียส เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ SNR เพิ่มขึ้น แต่การเติม PMMA ส่งผลให้เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกลดลงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มด้วยความร้อนมีแนวโน้มลดลง การศึกษาสมบัติเชิงพลวัตพบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการทดสอบสมบัติเชิงกลคือค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ SNR เพิ่มขึ้น และค่า T_g ที่คำนวณได้มีค่าสอดคล้องกับค่า T_g ที่ได้จากเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมทรี(DSC)

พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยางและพอลิเมทิลเมทาคริเลต เนื่องจากเกิดปัญหาความเข้ากันได้ต่ำระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนประเภทของยางธรรมชาติ โดยเลือกใช้น้ำยางร่วมกับตัวประสานพอลิเมทิลเมทาคริเลตออกสูตรโดยกำหนดปริมาณน้ำยาง(LNR) เท่ากับ 5, 10 และ 15 phr และปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 1, 3 และ 5 phr ผสมร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ 100 phr จากข้อมูลทางฐานวิทยาศาสตร์พบว่าความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ LNR มีความเข้ากันได้ดีเมื่อเทียบกับการใช้SNR ในปริมาณเท่ากัน และการเติมPMMA ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ LNR ดียิ่งขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ค่ามอดูลัส ความทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณLNR เพิ่มขึ้น การผสมร่วมกับตัวประสานPMMA พบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ LNR เพิ่มขึ้นไม่เกิน 10 phrและการเติม PMMA สามารถช่วยปรับปรุงค่าพลังงานการกระแทกได้ เมื่อผสมร่วมกับปริมาณLNR ไม่เกิน 5 phr สมบัติเชิงความร้อนเมื่อเติม LNR และ PMMA ในปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่า ค่า T_g ลดลงประมาณ 1 – 2 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับ SNRและอุณหภูมิการสลายตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลง เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณLNR เพิ่มขึ้น แต่การเติม PMMA ส่งผลให้เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกลดลง สมบัติเชิงกลหลังการบ่มด้วยความร้อนมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณLNR เพิ่มขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงพลวัตพบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติเชิงกล คือค่ามอดูลัสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ LNR เพิ่มขึ้น เมื่อเติม PMMA พบว่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นค่า T_g ที่คำนวณได้สอดคล้องกันกับค่า T_g ที่ได้จากเทคนิคDSC

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 2 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติ และน้ำยางธรรมชาติพร้อมตัวประสานพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าการผสมยางธรรมชาติทั้งสองชนิดร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดมีความเข้ากันได้ต่ำ แต่การใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน ส่งผลให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้ดีขึ้น การใส่ยางธรรมชาติทั้งสองชนิดสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมในด้านพลังงานการกระแทกให้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะการใช้ยางธรรมชาติการผสมยางธรรมชาติและ/หรือพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลง โดยสูตรการผสมพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นเส้นใยคือการใช้พอลิแล็กติกแอซิด 100 phr ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และพอลิเมทิลเมทาคริเลต 3 phr พลังงานการกระแทกเพิ่มขึ้น 7 เท่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้น 9 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น 9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

ข้อเสนอแนะ

1. การผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับน้ำยางนั้นมีปัญหาเรื่องความชื้นสูง ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วย ควรมีการอบไล่ความชื้นก่อนทำการบดผสม
2. สูตรผสมร่วมกับยางธรรมชาติซึ่งมีความเข้ากันได้ต่ำ ซึ่งทางผู้วิจัยได้ใช้เครื่องบดผสมภายในเพื่อผสมสารการปรับปรุงพัฒนาสูตรผสมอาจใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงกว่านี้อย่างเครื่องบดผสมแบบสกรูคู่ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการผสมที่ดีกว่ามาก
3. การปรับปรุงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวให้ดียิ่งขึ้นควรหาสารตัวเติมอื่นๆในการผสมรวม อาทิเช่น ออการ์โนเคลย์ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูง พลาสติกไซเซอร์อื่นๆ เป็นต้น

ผลงานทางวิชาการ

- นำเสนอในงานประชุมวิชาการ “The Science Forum 2012” ครั้งที่ 20ประจำปี 2555 ระหว่างวันที่ 19 - 20 เมษายน 2555 ณ อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใย โดยนำมาผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 2 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติและสารเติมแต่งพอลิเมทิลเมทาคริเลต ปริมาณยางธรรมชาติทั้งสองชนิดและพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้เท่ากับ 5, 10, 15 และ 1, 3, 5 ส่วนในร้อยส่วนของยางตามลำดับ การผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ให้ระยะยัด ณ จุดขาดที่ใกล้เคียงกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ในขณะที่ค่าพลังงานการกระแทก อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับน้ำยางและพอลิเมทิลเมทาคริเลต สามารถเข้ากันได้ดีกว่าในกรณีการผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับน้ำยางและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ให้ค่าระยะยัด ณ จุดขาด และค่าพลังงานการกระแทกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าลดลง

คำสำคัญ: พอลิแล็กติกแอซิด; ยางธรรมชาติ; พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ABSTRACT

This research is to study and improve the polylactic acid (PLA) for fiber industrial application by blending with natural rubber (NR) and polymethyl methacrylate (PMMA). There are two kinds of NR, e.g., solid NR (SNR) and NR latex (LNR). NR and PMMA contents were varied as 5, 10, 15 and 1, 3, 5 parts by weight per hundred parts of rubber (phr), respectively. For PLA/SNR/PMMA blends, the elongation at break was similar to pure PLA, while the impact energy, Glass transition temperature (T_g) and decomposition temperature of PLA blends were increased. Based on the SEM results, PLA/LNR/PMMA blends showed the high compatibility compared to PLA/SNR/PMMA. The elongation at break and impact energy of PLA/LNR/PMMA blends were slightly increased compared to pure PLA, while T_g was decreased.

Keyword: *Polylactic acid; natural rubber; polymethyl methacrylate*

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
สารบัญเรื่อง	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูปภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ทฤษฎี	1
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
2.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	7
2.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	
2.2.1 การเตรียมแผ่นและเส้นใยพอลิเมอร์ผสม	7
2.2.2 การทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม	
2.2.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล	7
2.2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน	8
2.2.2.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา	8
2.2.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต	8
บทที่ 3 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
3.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	10
3.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	
3.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับ	
ยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต	10
3.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับ	
น้ำยางพอลิเมทิลเมทาคริเลต	16
3.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	
3.3.1 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ	22
3.3.2 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยาง	27
3.3.3 สมบัติการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	29
3.4 สมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสม	32

บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	34
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก ก	37
ภาคผนวก ข	38
ภาคผนวก ค	41
ภาคผนวก ง	42
สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ	43

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	9
3.1	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	13
3.2	สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	23
3.3	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและสมบัติเชิงความร้อนต่างๆของพอลิเมอร์ผสม	25
3.4	สมบัติการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	30
3.5	สมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสม	33

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	กระบวนการผลิตและสังเคราะห์ตั้งแต่วัตถุดิบเริ่มต้นจนถึงผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์	2
1.2	ลักษณะเม็ดและแผ่นฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด	2
1.3	(a) ผลิตภัณฑ์แก้วที่ทำจากพอลิแล็กติกแอซิด (b) แก้วพอลิแล็กติกแอซิดที่เกิดการหลอมเนื่องจากไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงเกิน Tg ได้	2
3.1	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสม ยางธรรมชาติ และพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดยไม่มีผ่านการอ้งไอออสมียัม (Os ₂ O ₄)(a) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 0 phr, (b) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 1 phr, (c) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 3 phr, (d) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 5 phr	11
3.2	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสม น้ำยางและพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดยผ่านการอ้งไอออสมียัม (Os ₂ O ₄)(a) PLA 100, LNR 5-15, PMMA 0 phr และ (b) PLA 100, LNR 5-15, PMMA 3 phr	12
3.3	กราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับ พอลิเมทิลเมทาคริเลตในสัดส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่	12
3.4	ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม(a)เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่	14
3.5	พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม(a)เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่	15
3.6	กราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับ พอลิเมทิลเมทาคริเลตในสัดส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณน้ำยางคงที่	18
3.7	กราฟเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ และน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดย (a1 - 4) ค่าความทนแรงดึงสูงสุด และ (b1 - 4) ระยะยืด ณ จุดขาด	19
3.8	ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม(a)เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณ น้ำยางคงที่	20

3.9	พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม(a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) – (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณน้ำยางคงที่	21
3.10	กราฟเปรียบเทียบพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติและ น้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดย (a)เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ	22
3.11	กราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับ พอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อ ปริมาณยางธรรมชาติคงที่	24
3.12	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิล เมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณยาง ธรรมชาติแข็งคงที่	26
3.13	กราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยาง ร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อ ปริมาณน้ำยางคงที่	28
3.14	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณ พอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณน้ำยางคงที่	29
3.15	กราฟแสดงสมบัติความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มด้วยความร้อนของ พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติที่อัตราส่วนต่างๆโดย (a) และ (b) พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ(b) และ (d) พอลิเมอร์ผสม ของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยาง	31
3.16	กราฟแสดงสมบัติความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มด้วยความร้อนของ พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วน ต่างๆ โดย (a) และ (b) พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ(b) และ (d) พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยาง	32

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย

พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (biodegradable polymer) ซึ่งมีสมบัติที่ดี มีความแข็งแรง ค่ายังมอดูลัสสูง (Young's modulus) และสามารถย่อยสลายด้วยการฝังกลบในเวลาอันสั้น เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดนั้นสามารถผลิตได้จากพืชที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็น พลาสติกบรรจุภัณฑ์ พลาสติกฟิล์ม ทดแทนพอลิเมอร์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้เอง จึงเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม และตอบรับต่อสถานการณ์ปัจจุบันที่โลกกำลังประสบปัญหาภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้พอลิแล็กติกแอซิดจึงมีการใช้งานทดแทนในหลายอุตสาหกรรม ซึ่งรวมไปถึงอุตสาหกรรมเส้นใย โดยพอลิแล็กติกแอซิดสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ แต่เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติแข็งเปราะ และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำ (55-60 องศาเซลเซียส) เส้นใยที่ได้จึงมีความยืดหยุ่นน้อย เปราะขาดง่าย และเกิดการเสีรูปได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง เส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดจึงยังไม่ได้ได้รับความนิยมเท่าที่ควร เนื่องจากสมบัติของเส้นใยยังด้อยกว่าเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์อื่นๆ ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด ให้มีความยืดหยุ่นและทนความร้อนได้สูง โดยการนำมาผสมร่วมกับยางธรรมชาติซึ่งมีสมบัติเชิงกลดี มีความยืดหยุ่นสูง และศึกษาผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต เพื่อช่วยปรับปรุงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแล็กติกแอซิดให้สูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

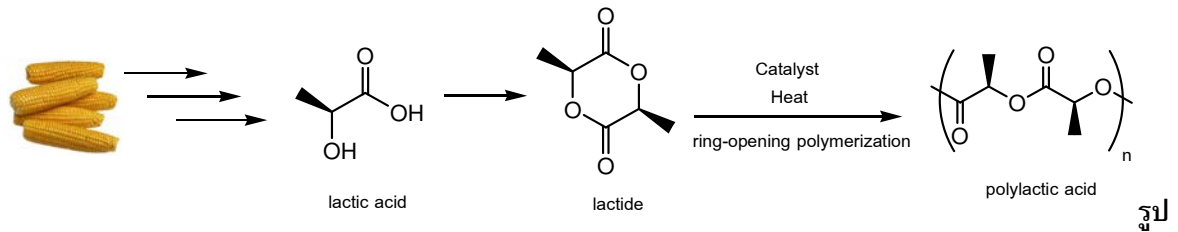
ปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการนำยางธรรมชาติผสมร่วมกับสารเติมแต่ง

1.3 ทฤษฎี

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เริ่มต้นจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ไปสู่กระบวนการผลิตวัสดุ พอลิเมอร์ เส้นใย หรือพลาสติกชนิดต่างๆ ที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ณ ปัจจุบันนี้ได้พบถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งประมาณการได้ว่าจะต้องมีการหมดไปในที่สุด นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่มีการเผาไหม้ ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้ขยายวงกว้างต่อการทำลายระบบนิเวศของโลก ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน ดังนั้น จึงมีการพยายามคิดค้นและพัฒนากระบวนการใหม่ๆ เพื่อลดการใช้วัตถุดิบทางปิโตรเคมี และยังเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดีให้กับสังคมโลก แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหา ก็คือการใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (biodegradable material) ซึ่งเป็นวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่เกิดทดแทนได้ใหม่ในธรรมชาติ (renewable resource) โดยวัสดุเหล่านี้เกิดการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาดและปลอดภัย เช่น น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะเห็นได้ว่าการใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาตินี้สามารถตอบรับปัญหาทั้งทางด้านปริมาณและด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้เป็นอย่างดี^[1]

พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นหนึ่งในวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ผลิตจากวัตถุดิบแบ่ง ข้าวโพด มันสำปะหลัง มีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดวัตถุดิบให้ละเอียดจนได้แป้ง จากนั้นทำการย่อยแบ่งให้เป็นน้ำตาล แล้วนำไปทำการหมัก (fermentation) ด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแล็กติก (lactic acid) แต่อย่างไรก็ตาม กรดแล็กติกไม่สามารถพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) เป็นพอลิแล็กติกแอซิดได้โดยตรงเนื่องจากแต่ละหน่วยของการพอลิเมอไรเซชันจะมีการสูญเสียโมเลกุลน้ำ ด้วยสาเหตุนี้พอลิแล็กติกแอซิดที่ได้จะมีคุณภาพและมวลโมเลกุลต่ำ จึงต้องนำกรด

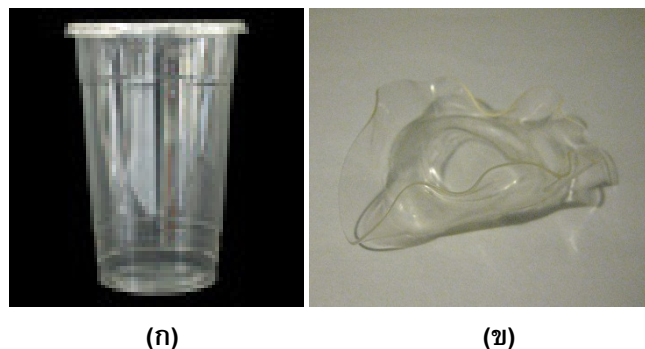
แล็กติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของกรดแล็กติกให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน เรียกว่า แล็กไทด์ (lactide) หลังจากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาการเปิดวง (ring-opening polymerization) จะได้พอลิเมอร์ของ แล็กไทด์ที่มีสายยาว เรียกว่า พอลิแล็กติกแอซิด กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิดโดยสรุปแสดงดังรูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิดมีลักษณะใส แข็งโปร่งแสง สามารถขึ้นรูปได้ทั้งแบบเม็ดและฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตและสังเคราะห์ตั้งแต่วัตถุดิบเริ่มต้นจนถึงผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์^[2]



รูปที่ 1.2 ลักษณะเม็ดและแผ่นฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด^[3]



รูปที่ 1.3 (a)ผลิตภัณฑ์แก้วที่ทำจากพอลิแล็กติกแอซิด(b)แก้วพอลิแล็กติกแอซิดที่เกิดการหลอมเนื่องจากไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงเกิน T_g ได้^[4]

พอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติที่ดีหลายด้าน เช่น ความแข็งแรงสูง มีการซึมผ่านของแก๊สน้อย สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ นำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ทำพลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้เอง (bioplastic) และอุปกรณ์ทางการแพทย์(biomedical) นอกจากนี้ พอลิแล็กติกแอซิดสามารถนำมาทำเป็นเส้นใยได้โดยเส้นใยที่ได้นั้นมีสมบัติเด่นหลายอย่าง เช่น การดูดซึมน้ำและความชื้นต่ำซึ่งนำมาประยุกต์ใช้เป็นชุดกีฬาได้ดี ทนทานต่อแสงและรังสียูวีจึงเหมาะต่อการทำส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ เพราะสีของเส้นใยจะคงทนอยู่ได้นาน ความหนาแน่นต่ำจึงมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยชนิดอื่น^[5] แต่อย่างไรก็ตามพอลิแล็กติกแอซิดมีความยืดหยุ่นต่ำ และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อยู่ที่ 55-60 °c ส่งผลให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก(รูปที่ 1.3) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารเติมแต่ง (additive) ที่สามารถช่วยเพิ่มค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ

คล้ายแก้วให้กับพอลิแล็กติกแอซิดได้ โดยสารที่เลือกใช้ในการทดลองนี้คือพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate) ซึ่งมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูง (105-114 °C) มีความเป็นขั้ว ส่งผลให้โมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตน่าจะผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดได้ดี จากข้อมูลของบริษัท NatureWork[®] ผู้ผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพรายใหญ่ของโลก ได้ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติก พอลิเมอร์ (thermoplastic polymer) หลายชนิด พบว่าการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีการยืดตัวสูงสุด (elongation) และค่ามอดูลัส (tensile modulus) เพิ่มขึ้น^[6]

ยางธรรมชาติ(natural rubber) ได้จากน้ำยางของต้นยางพารา มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) โดยปกติยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่จะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้เมื่อถูกดึงยืด จึงสามารถเกิดเป็นผลึกได้ (crystallize) สมบัติเด่นของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (flexible) สูง เมื่อแรงกระทำจากภายนอกหมดไปจะกลับคืนสู่สภาพเดิมอย่างรวดเร็ว และเนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติดีขึ้น อาทิเช่น ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) ทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูงและมีความร้อนเกิดขึ้นขณะใช้งาน (heat built up) ต่ำ จากสมบัติที่ดีของยางธรรมชาตินี้เอง จึงถูกนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ถังมือยาง ยางรัดของ ยางรถยนต์ และยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น^[7]

จากข้อดีของพอลิเมทิล เมทาคริเลตและยางธรรมชาติที่กล่าวไปข้างต้น ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด ให้มีความยืดหยุ่นและทนต่อความร้อนได้สูง โดยนำการพอลิแล็กติกแอซิดผสมร่วมกับยางธรรมชาติ และพอลิเมทิล เมทาคริเลต และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อนและเชิงพลวัต ตลอดจนลักษณะทางสัณฐานวิทยา ผู้วิจัยคาดหวังว่าพอลิเมทิล เมทาคริเลตจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและยางธรรมชาติจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิแล็กติกแอซิดได้ นอกจากนี้การที่ยางธรรมชาติมีความเป็นผลึกเมื่อถูกดึงยืด จะส่งผลให้พอลิแล็กติกแอซิดมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงขึ้นด้วย องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนากระบวนการผลิตเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดเพื่อให้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้ต่อไปโดยทั่วไปสมบัติของเส้นใยที่ดีคือต้องมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง มีการทนแรงดึงในช่วงอุณหภูมิกว้างๆ ได้สูง ไม่เสีรูปง่ายเมื่อได้รับความเค้น การยืดตัวต้องไม่มาก (ไม่ควรเกิน 20%) มีมอดูลัสความยืดหยุ่นสูง และเส้นใยที่จะนำไปทอเป็นผ้าสำหรับทำเครื่องนุ่งห่ม ต้องมีจุดหลอมเหลวสูง (>200 °C) เพื่อที่จะสามารถนำไปซีกและรีดได้โดยไม่เสีรูปหรือเสื่อมคุณภาพ แต่ต้องไม่สูงเกินไป เพื่อที่จะสามารถนำไปปั่นแบบหลอมเหลว (melt spinning) ได้^[8]

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H. Okamoto และคณะ^[9] ศึกษาผลของการเติมยางธรรมชาติ ต่อการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกให้กับพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) พบว่าความทนทานต่อแรงกระแทกไม่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการผสมยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการตัดแปร และพบว่าความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า เมื่อพอลิแล็กติกแอซิดถูกผสมร่วมกับยางอีพอกซีไดซ์ (ENR-50) ในปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ การใช้ของผสมระหว่าง 5% โดยน้ำหนักของ ENR-50 ร่วมกับ 15% โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น 25 เท่า (60 KJ/m²) ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นว่า ENR-50 แทรกอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ แสดงถึงการยึดเกาะกันดีขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

H. Okamoto และคณะ^[10] ศึกษาผลของการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิแล็กติกแอซิดผสมกับยางธรรมชาติต่อความทนทานแรงกระแทก และอุณหภูมิที่มีผลต่อการเสียรูป (Deflection temperature under load, DTUL) ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ (PLA/NR) พบว่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนของ NR 10% โดยน้ำหนักให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกที่ดีที่สุด (190-280 J/m) และอุณหภูมิ DTUL สูงกว่า 30-40 °C เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน ความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่เป็นผลึกจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ NR เพิ่มขึ้นและค่ามากที่สุดที่ปริมาณ NR 10% โดยน้ำหนักนอกจากนี้อุณหภูมิ DTUL จะลดลงเมื่อปริมาณ NR เพิ่มขึ้น

I. Pillin และคณะ^[11] ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) 4 ชนิด ได้แก่ พอลิ(1,3-บิวเทนไดออล) (poly(1,3-butanediol), PBOH) ไดบิวทิล ซีบาเคท (dibutyl sebacate, DBS) อะซิทิล กลีเซอรอล มอนอลอเรต (acetyl glycerol monolaurate, AGM) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol), PEG) ที่มีต่อสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(Tg) ของ PLA ลดลงเมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ โดยค่า Tg ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติม PEG มากกว่า 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งค่า Tg ที่ลดลงนั้นสอดคล้องกับสมการของฟอกซ์ (Fox equation) สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG มีลักษณะเปราะมาก ค่ามอดูลัสและความเค้นที่จุดขาดน้อยลง ในขณะที่การผสม PLA ร่วมกับ PBOH DBS หรือ AGM พบว่าให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ และมีลักษณะอ่อนนุ่ม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านบรรจุภัณฑ์ได้

M. A. Huneault และคณะ^[12] ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและกลีเซอรอล พลาสติกไซส์ เทอร์โทพลาสติก สตาร์ช (glycerol plasticized thermoplastic starch, TPS) โดยความเข้มข้นของ TPS ที่ใช้อยู่ในช่วง 27-60% โดยน้ำหนักพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการผสม TPS/PLA มีความเข้ากันได้น้อย โดย TPS มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 5-30 ไมโครเมตรใน PLA ดังนั้นนักวิจัยได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ โดยการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) กราฟเข้ากับ PLA ผลที่ได้คือ MA-graft-PLA/TPS มีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาค TPS เล็กลงอยู่ที่ประมาณ 1-3 ไมโครเมตร และวัสดุผสมมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

S. Wang และคณะ^[13] ศึกษาสมบัติเชิงกล ความร้อน และการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดโดยผสมกับพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิลเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลเรต) (poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate, PHBV) และพอลิเอทิลีนไกลคอล พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PHBV/PEG มีระยะยืดที่จุดขาด(elongation at break) เพิ่มขึ้นประมาณ 20%และค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 1-4 เท่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PHBV ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียด พบว่าการเติม PEG ส่งผลให้ค่าความเหนียว (toughness) เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสม PLA/PHBV มีค่าความทนทานต่อความร้อน (thermal stability) และค่าการสลายตัวทางความร้อน (thermal degradation) เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ PHBV บริสุทธิ์ นอกจากนี้การเติม PEG ส่งผลให้อัตราการสลายตัวของ PLA และ PLA/PHBV เพิ่มขึ้น โดยการทดสอบการฝังกลบที่อุณหภูมิห้อง

N. Graupner และคณะ^[14] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใย 4 ประเภท ได้แก่ ฝ้าย (cotton) ป่าน (hemp) ปอชวา (kenaf) และเส้นใยประดิษฐ์ (lyocell) โดยปริมาณของเส้นใยที่ใช้คือ 40% ขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตด้วยแม่พิมพ์แบบอัด (compression molding) พบว่าวัสดุคอมพอสิต kenaf/PLA และ hemp/PLA มีความต้านทานแรงดึงและค้ำยมอดูลัสสูงขึ้น cotton/PLA มีความทนทานต่อแรงกระแทกที่สูงขึ้น ส่วน lyocell/PLA ให้ความต้านทานแรงดึง ค้ำยมอดูลัส และความทนทานต่อแรงกระแทกที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์

S. Ishida และคณะ^[15] ศึกษาการผสมพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) กับยางสังเคราะห์ 4 ประเภท ได้แก่ เอทิลีน-โพรพิลีน โคพอลิเมอร์ (ethylene-propylene copolymer) ยางเอทิลีน-อะคริลิก (ethylene-acrylic rubber) ยางอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดเอน (acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) และยางไอโซพรีน (Isoprene rubber, IR) ที่มีผลต่อค่าความเหนียว (toughness) ของวัสดุโดยทดสอบด้วยเครื่อง Izod impact testing พบว่าค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น โดยการผสม PLA กับ NBR ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นว่า PLA เข้ากันได้ดีกับยาง NBR นอกจากนี้ ยางที่มีความเป็นขั้วสูงจะส่งผลให้ความเหนียวของ PLA มีมาก การทดสอบการทนต่อแรงดึงยืด พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/NBR กับ PLA/IR ที่ไม่ผ่านขบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) แสดงการสูญเสียสภาพความเป็นพลาสติก (plastic deformation) ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก และยังให้ค่าการยืดตัวที่จุดขาด (elongation at break) ที่สูง

H. Balakrishnan และคณะ^[16] ศึกษาสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน และลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดผสมกับเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) และมอนต์โมริลโลไนต์ เคลย์ (montmorillonite, MMT) พบว่าค่า Young's modulus และความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/LLDPE และ PLA/LLDPE/MMT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ แต่อย่างไรก็ตาม ความทนทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/LLDPE/MMT ลดลงเมื่อปริมาณ MMT เพิ่มขึ้น การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) พบว่าค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ของ PLA ทั้งใน PLA/LLDPE และ PLA/LLDPE/MMT ลดลงเมื่อปริมาณของ MMT เพิ่มขึ้น ปริมาณการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติความร้อน (Thermal gravimetric analysis, TGA) พบว่าเมื่อปริมาณของ MMT และ LLDPE ที่เพิ่มขึ้น ทั้งใน PLA/MMT และ PLA/LLDPE/MMT ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) และเอกซเรย์ ดิฟแฟรกชัน สเปกโตรเมทรี (X-ray diffraction spectrometry, XRD) พบว่าที่ปริมาณ 2 phr ของ MMT ให้การกระจายตัวที่ดีที่สุดในตัวกลางของ PLA โดยมี PLA และ LLDPE แทรกในชั้นของ MMT ในลักษณะอินเตอร์คาลเลต (intercalated) ซึ่งการกระจายตัวที่ดีของ MMT นั้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของ PLA/LLDPE/MMT มีค่าสูงขึ้นด้วย

C.W. Phetphaisit และคณะ^[17] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติดัดแปร 2 ชนิด คือยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์พอลิออล (OENR) และยางธรรมชาติพอลิออล (ONR) โดยใช้พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำกร้าฟยางธรรมชาติเหลวพอลิออล (LMW.PDLLA-g-OLNR) และ DL-แลคไทด์กร้าฟยางธรรมชาติเหลวพอลิออล (DL-lactide-g-OLNR) เป็นสารเชื่อมประสาน พอลิเมอร์ผสมถูกเตรียมโดยเครื่องบดผสมภายใน โดยคอมพาวด์ที่ได้ถูกนำไปขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงกลโดยเครื่องอัดรีด ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมถูกนำไปทดสอบสมบัติแรงดึงและแรงกระแทก พบว่าการเติม OENR ในอัตราส่วน PLLA:OENR เท่ากับ 70:30 และไม่เติมสารเชื่อมประสาน ให้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับ PLLA บริสุทธิ์ ในขณะที่ให้ความยืดที่จุดขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเติมสารเชื่อมประสาน LMW.PDLLA-g-OLNR ในอัตราส่วน 2% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าความทนแรงกระแทก และความยืดที่จุดขาดเพิ่มขึ้นมากกว่า PLLA บริสุทธิ์ โดยมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าไม่มากนัก ในขณะที่การเติม ONR ร่วมกับ PLLA ในทุกสูตรพบว่าไม่มีส่วนช่วยให้คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการแบ่งและกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสมพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้สามารถยืดตัวได้มากกว่า 6 เท่าของ PLLA บริสุทธิ์ แต่มีค่าความทนแรงดึงลดลงมาก

H. Balakrishnan และคณะ^[18] ศึกษาการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) และผลของปริมาณ LLDPE ต่อลักษณะพื้นฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม LLDPE 5-15 % โดยน้ำหนักถูกผสมร่วมกับ PLA โดยเครื่องบดผสมแบบสกรูคู่ ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น 53% เมื่อผสมร่วมกับ LLDPE 10 % โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ค่ายังมอดูลัส การทนแรงโค้งงอ ความทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ LLDPE เพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ LLDPE เพิ่มขึ้น

N. Bitinis และคณะ^[19] ศึกษาสภาวะที่ใช้ออกสูตในการผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้คือ อุณหภูมิ เวลา ความเร็วรอบในการหมุนผสม และปริมาณยางธรรมชาติ โดยเฟสของยางธรรมชาติที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของพอลิแล็กติกแอซิด 1.1-2.0 ไมโครเมตร ความเหนียวของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น โดยระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 200 เปอร์เซ็นต์เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 10 % โดยน้ำหนัก

J. R. Khurma และคณะ^[20] ศึกษาการผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิไวนิลบิวทีรัล (polyvinyl butyral, PVB) โดยวิธีหล่อผสมแบบสารละลาย (solution casting) ตัวอย่างฟิล์มนำมาทดสอบด้วยดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแยกออกเป็นสองค่าอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสอง เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าคงที่เมื่อปริมาณของ PVB เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมทั้งความทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง

บทที่ 2

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เกรด 2002D

96% L-Lactide และ 4% D-Lactide

บริษัท Natureworks LLC จำกัด

2.1.2 ยางธรรมชาติ(natural rubber)เกรด STR-5L บริษัท พี โอ อินดัสทรี จำกัด

2.1.3 น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง60% DRC

(high ammonia natural rubber latex, HANR)

บริษัท Thai Rubber latex corporation จำกัด

2.1.4พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate, PMMA)

เกรด VH001

บริษัท Sy smile จำกัด

2.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

2.2.1 การเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสม

สูตรในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม(polymer blend) แสดงดังตารางที่ 2.1โดยใช้เครื่องบดผสมภายใน (internal mixer)รุ่น HAAKE(ประเทศเยอรมนี)เม็ดพอลิแล็กติกแอซิดบดผสมที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาทีหลังจากนั้นผสมยางธรรมชาติซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ยางธรรมชาติเกรด STR-5L และน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง โดยใช้ข้อกรวยย่อแทนในการออกสูตรเป็น S และ L ตามลำดับร่วมกับสารเคมีที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานคือพอลิเมทิลเมทาคริเลตตามลำดับ เป็นเวลา 5 นาทีความเร็วรอบในการหมุนผสม 80 รอบต่อนาที (rounds per minute: rpm)พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ถูกนำไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติกอีกครั้ง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2.2.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆของพอลิเมอร์ผสม

2.2.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

■ ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาด

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ มาตัดเป็นชิ้นงานรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D638 type I กำหนดความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบสมบัติการทนทานต่อการดึงยึดด้วยเครื่อง Universal testing machine LLOYD LR10K (ประเทศอังกฤษ) ความเร็วในการทดสอบ 10มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 สูตร นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

■ ความเหนียวและความทนทานต่อแรงกระแทก

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาตัดเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256แบบไอซอด (Izod)ทดสอบด้วยเครื่อง Impact testing machineInstron model PW 30 (ประเทศอังกฤษ)ความเร็วหัวทดสอบ3.26เมตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ทดลองซ้ำ5 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 สูตร นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

- ความแข็ง

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ตัดเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน D2240 ทดสอบด้วยเครื่อง Shore hardness tester Instron (ประเทศอังกฤษ) ทดสอบแรงกด 5 จุดต่อชิ้นงาน 1 สูตรที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

2.2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

- อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

ซึ่งตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม 10 มิลลิกรัม ลงในอะลูมิเนียมแผ่นแล้วทำการปิดให้เรียบร้อย นำตัวอย่างที่เตรียมทดสอบด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter METTLER TOLEDO DSC822 (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) ช่วงอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจน

- อุณหภูมิการสลายตัว

ซึ่งตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม 10 มิลลิกรัม ลงในแพลตตินัมแพน นำตัวอย่างที่เตรียมทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis PerkinElmer Pyris diamond TG/DTA (ประเทศสหรัฐอเมริกา) ช่วงอุณหภูมิ 40-1000 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจน

- การบ่มด้วยความร้อน

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ตัดเป็นชิ้นงานรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D638 บ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D3045-92 ทดสอบความทนทานต่อการดึงยึดที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่อง Universal testing machine LLOYD LR10K (ประเทศอังกฤษ) ความเร็วในการทดสอบ 10 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 สูตร นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

2.2.2.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทำการหักชิ้นงานที่จะทดสอบโดยนำไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวแล้วนำชิ้นตัวอย่างติดเข้ากับแป้นทองเหลือง หลังจากนั้นชิ้นตัวอย่างถูกนำไปอังให้อออสเมียมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วฉาบผิวด้วยทองผ่านเครื่อง sputter coater รุ่น Blazer SCD040 (ประเทศลิกเตนสไตน์) นำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-5600LV (ประเทศญี่ปุ่น) ใช้ภาวะการทำงานที่ความยาวคลื่น 10 μm ความต่างศักย์ 15 KV ทำการบันทึกภาพที่ได้

2.2.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ตัดเป็นชิ้นงานขนาด 1 x 5 เซนติเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyser METTLER TOLEDO (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) รูปแบบ 3-point bending ช่วงอุณหภูมิ -100 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 2.1 สูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

ชื่อสูตร	ปริมาณ (phr) ¹			
	PLA ²	SNR ³	LNR ⁴	PMMA ⁵
Pure PLA	100	-	-	-
S5M0	100	5	-	-
S5M1	100	5	-	1
S5M3	100	5	-	3
S5M5	100	5	-	5
S10M0	100	10	-	-
S10M1	100	10	-	1
S10M3	100	10	-	3
S10M5	100	10	-	5
S15M0	100	15	-	-
S15M1	100	15	-	1
S15M3	100	15	-	3
S15M5	100	15	-	5
L5M0	100	-	5	-
L5M1	100	-	5	1
L5M3	100	-	5	3
L5M5	100	-	5	5
L10M0	100	-	10	-
L10M1	100	-	10	1
L10M3	100	-	10	3
L10M5	100	-	10	5
L15M0	100	-	15	-
L15M1	100	-	15	1
L15M3	100	-	15	3
L15M5	100	-	15	5

¹ Part per hundred part of resin ² Polylactic acid ³ Natural rubber grade STR-5L

⁴ High ammonia natural rubber latex ⁵ Polymethyl methacrylate

บทที่ 3

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

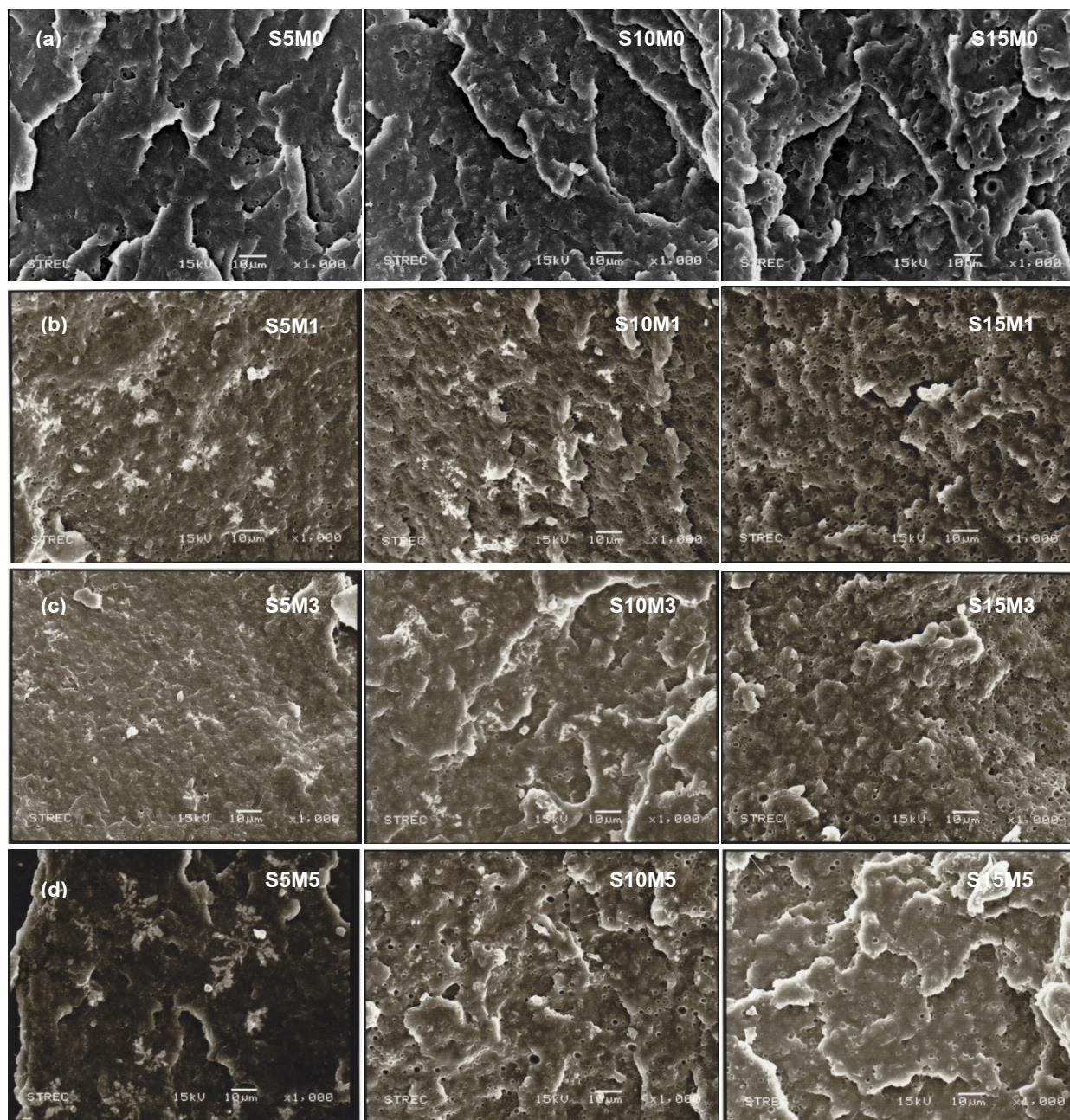
รูปที่ 3.1 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ และรูปที่ 3.2 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วน 0 และ 3 phr ตามลำดับโดยเฟสสีเทาเป็นเฟสหลักของพอลิแล็กติกแอซิด เฟสที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีดำคือเฟสของยางธรรมชาติ และเฟสสีขาวคือเฟสของพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง สังเกตได้จากการที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการผสมโดยใช้ยางเคลือบบนผิวเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดนั้น พอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระน้อยกว่า และเฟสยางธรรมชาติรวมเข้ากับเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดได้ดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติ(แสดงดังรูป 3.1 และ 3.2) เมื่อพิจารณาการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณคงที่ (1, 3 และ 5 phr ในส่วนของยางธรรมชาติและ 3 phr ในส่วนของน้ำยาง) แต่ปริมาณการเติมยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทั้งยางธรรมชาติและน้ำยางกระจายตัวในเฟสพอลิแล็กติกแอซิดได้ดี ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าการใช้น้ำยางมีความเข้ากันได้กับพอลิแล็กติกแอซิดมากกว่าการใช้ยางธรรมชาติ สังเกตได้จากปริมาณของเม็ดกลมสีดำที่ลดลงและรวมเป็นเนื้อเดียวกับเฟสของพอลิแล็กติกแอซิด (ดังแสดงในรูป3.2) แต่เมื่อศึกษาผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของยางธรรมชาติคงที่ (5, 10 และ 15 phr) พบว่าความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับทั้งยางธรรมชาติและน้ำยางลดลง สังเกตได้จากความขรุขระของผิววัสดุที่เพิ่มขึ้น

3.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

3.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

■ ผลของปริมาณยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 3.3 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนต่างๆและตารางที่ 3.1 สรุปค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติเมื่อพิจารณาการใส่ยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมเท่ากับ 5, 10 และ 15 phr(รูปที่ 3.3(a)) จะเห็นว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืดน้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ทั้งนี้อาจมีผลมาจากความเข้ากันไม่ได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดที่มีขั้วกับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้ว (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) ทำให้เฟสของยางธรรมชาติอาจไปขัดขวางการเคลื่อนไหวยของโมเลกุลพอลิแล็กติกแอซิดหรืออีกนัยหนึ่งยางธรรมชาติสามารถประพฤติตัวเป็นสารเสริมแรงได้การใส่ยางธรรมชาติส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นด้วย ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.4(a)) ในขณะที่ค่าพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.5(a)) เพราะการใส่ยางธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าพอลิแล็กติกแอซิด หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นส่วนที่นิ่ม (soft segment) ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง นอกจากนี้ยางธรรมชาติมีสมบัติยืดหยุ่นสูง ส่งผลให้ค่าพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น

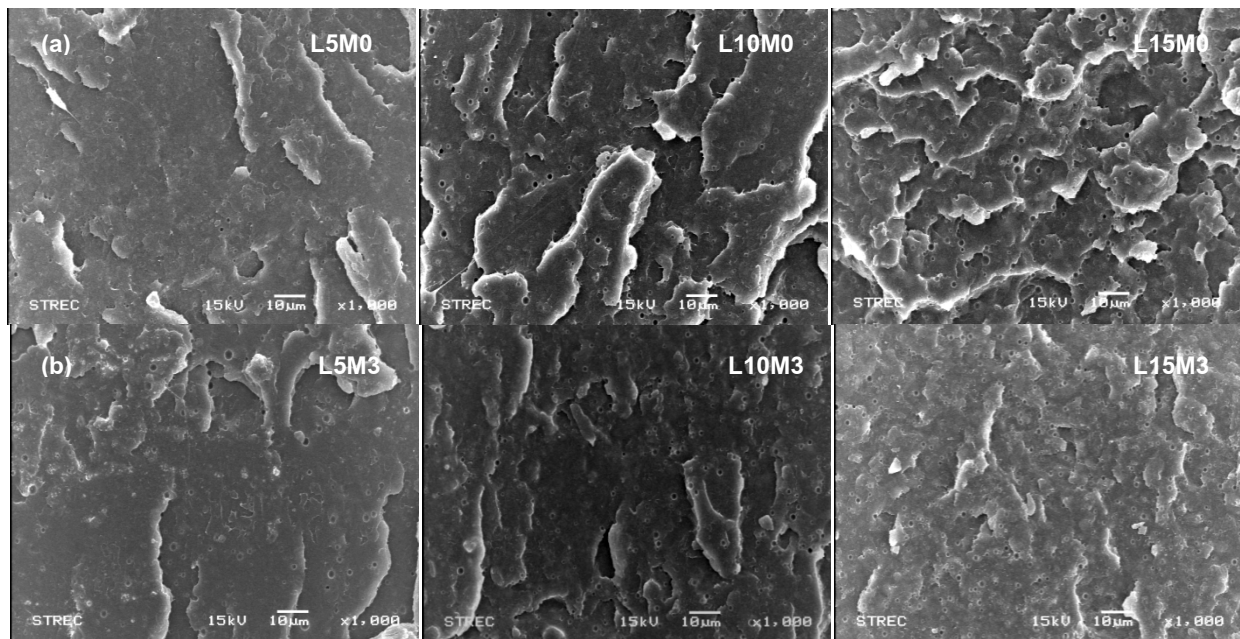


รูปที่ 3.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ

และ พอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยไม่มีผ่านการอ้งไอออสเมียม (Os_2O_4)

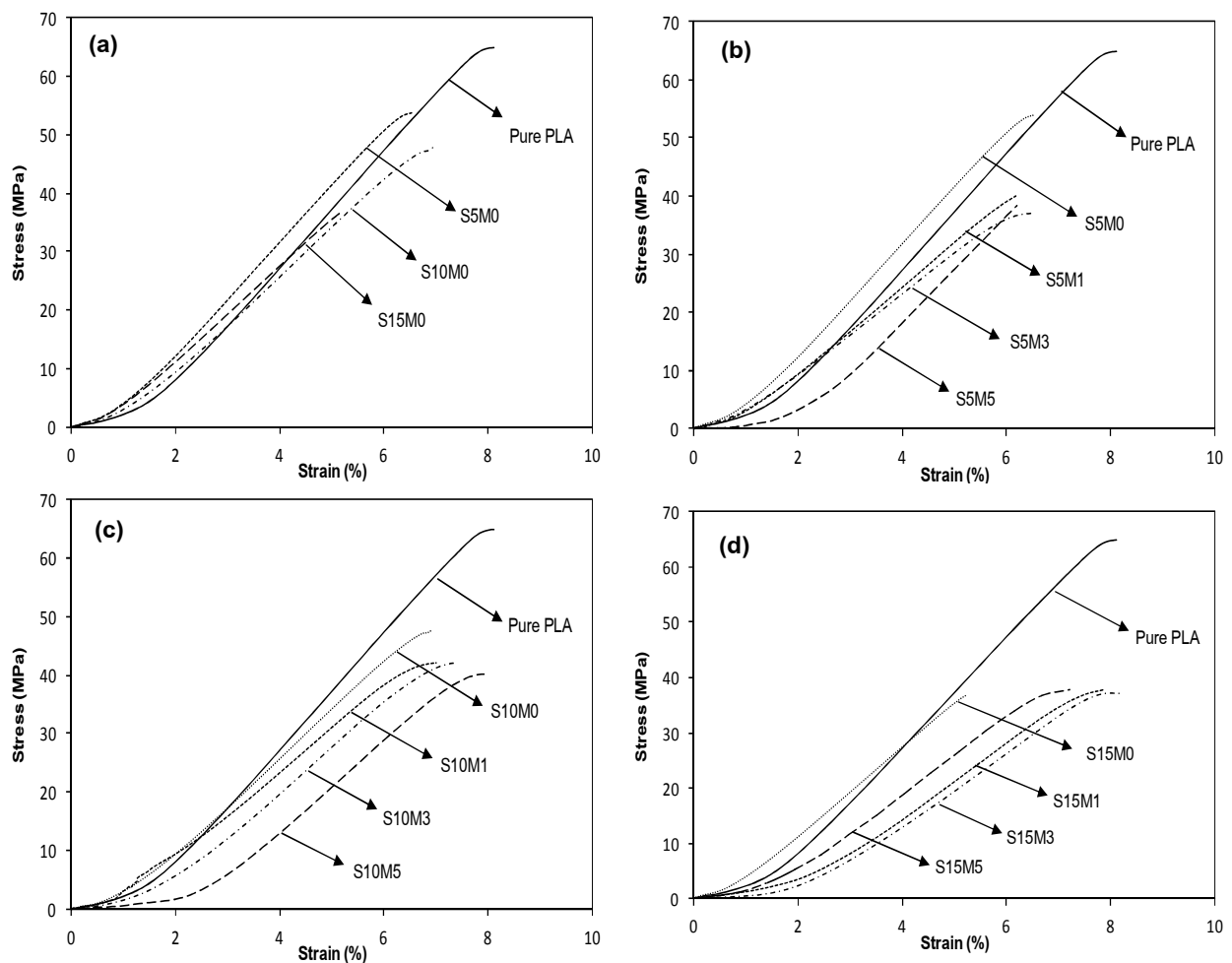
(a) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 0 phr (b) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 1 phr,

(c) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 3 phr, (d) PLA 100, SNR 5-15, PMMA 5 phr



รูปที่ 3.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางและพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดยผ่านการอั่งไอออสเมียม (Os_2O_4)

(a) PLA 100, LNR 5-15, PMMA 0 phr และ (b) PLA 100, LNR 5-15, PMMA 3 phr

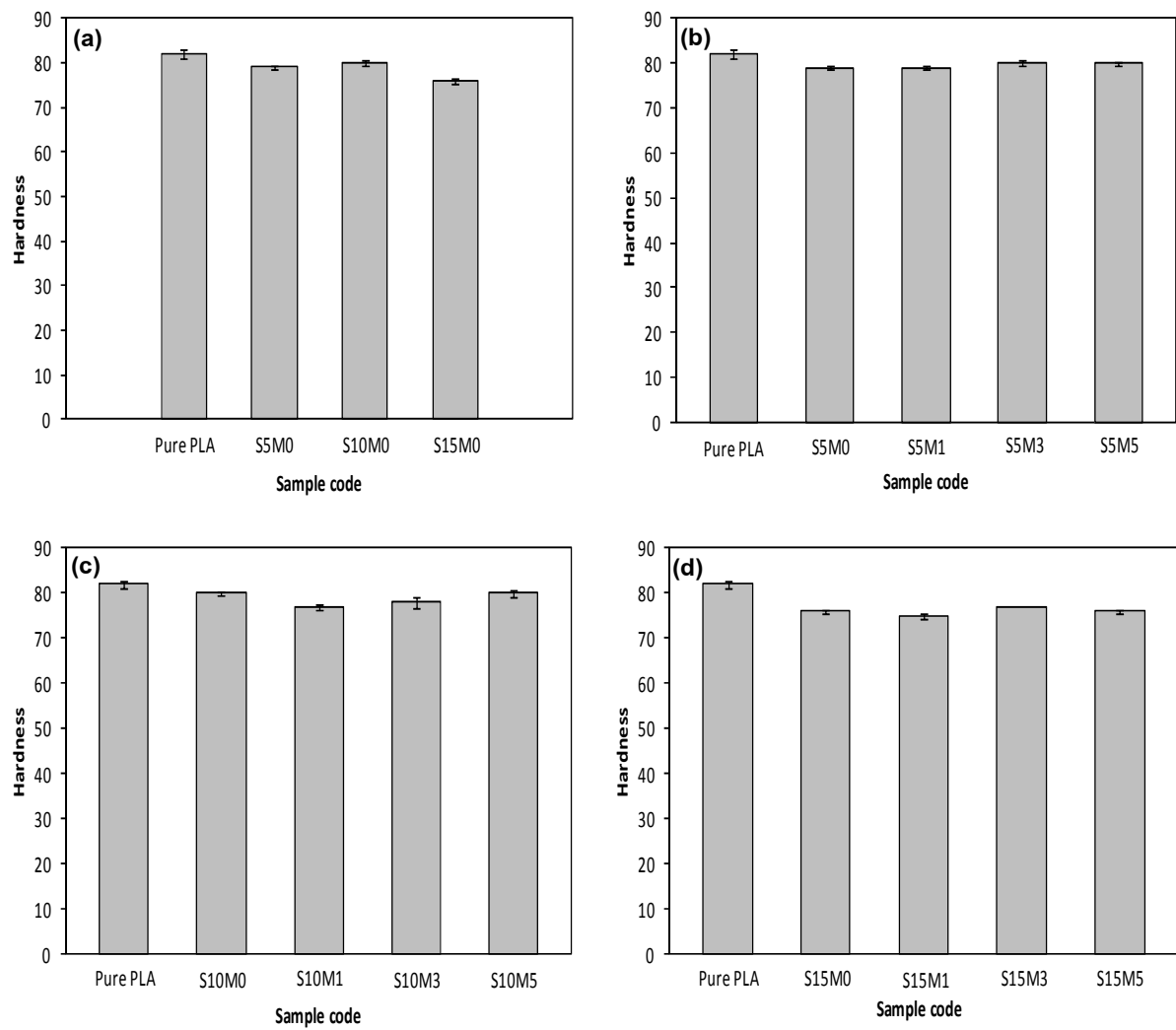


รูปที่ 3.3 กราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในสัดส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่

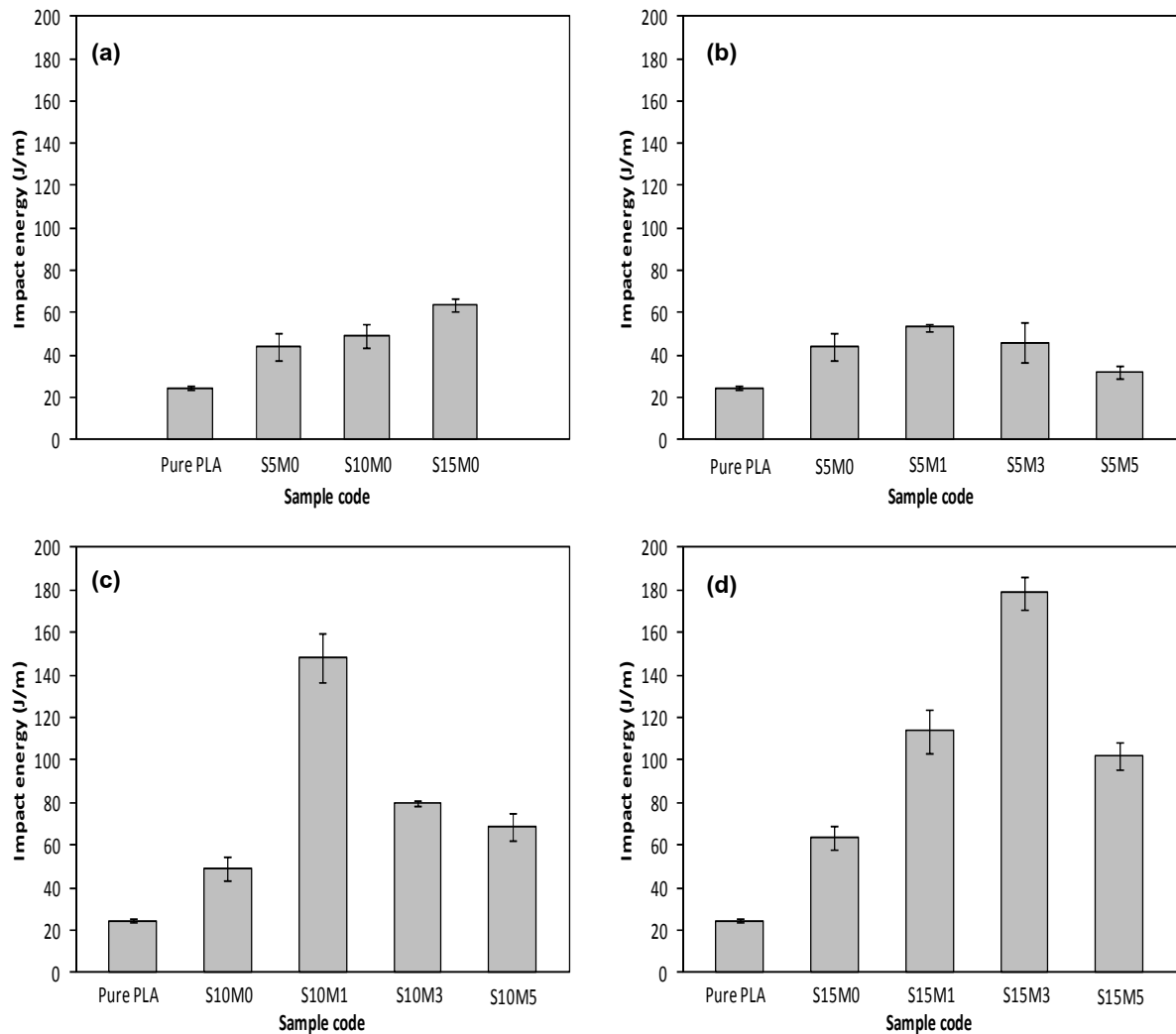
ตารางที่ 3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

Sample code	M_2^1 (MPa)	M_4^1 (MPa)	M_6^1 (MPa)	T_B^2 (MPa)	E_B^3 (%)	Hardness (Shore D)	Impact energy (J/m)
Pure PLA	8.13	26.43	47.74	64.98	8.13	82	24.50
S5M0	12.49	31.73	50.84	53.9	6.54	79	43.99
S5M1	9.48	24.31	38.99	40.01	6.19	79	53.15
S5M3	7.91	22.73	37.39	35.54	6.20	80	46.04
S5M5	3.16	18.13	36.56	38.31	6.20	80	31.74
S10M0	9.52	25.44	42.96	47.88	6.94	80	48.97
S10M1	9.49	23.36	38.33	42.08	7.00	77	147.18
S10M3	5.80	19.69	35.43	42.05	7.38	78	80.13
S10M5	1.73	13.03	28.94	40.17	7.92	80	69.01
S15M0	11.37	27.18	-	36.84	5.21	76	63.66
S15M1	3.45	14.17	28.07	37.75	7.88	75	113.63
S15M3	2.32	12.86	26.2	37.13	8.18	77	178.65
S15M5	5.66	18.80	32.97	37.96	7.21	76	101.76
L5M0	5.53	24.30	44.45	45.18	6.11	80	27.52
L5M1	5.09	17.31	37.55	51.48	7.71	77	39.58
L5M3	4.00	16.05	36.06	50.83	7.69	80	33.46
L5M5	3.43	13.50	33.33	54.14	8.37	78	35.36
L10M0	7.32	23.85	-	40.73	5.84	79	37.15
L10M1	4.74	19.33	37.50	37.74	6.12	77	38.89
L10M3	6.05	20.41	35.43	42.05	7.38	77	31.58
L10M5	2.24	10.81	30.33	38.48	6.99	80	38.25
L15M0	4.93	-	-	10.67	3.00	80	30.23
L15M1	9.23	24.89	-	40.51	5.99	75	26.19
L15M3	9.34	24.20	39.45	42.66	6.81	76	29.13
L15M5	3.96	16.71	33.45	33.81	6.07	75	28.60

¹ Modulus at 2, 4, 6% elongation ² Tensile strength ³ Elongation at break



รูปที่ 3.4 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม (a) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่



รูปที่ 3.5พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม(a)เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่

■ ผลของปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต (1, 3 และ 5 phr) โดยปริมาณยางธรรมชาติคงที่ดังแสดงในรูป 3.3(b) - (d) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณของตัวประสาน (พอลิเมทิลเมทาคริเลต) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงไม่ว่าจะเป็นค่ามอดูลัส ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด ซึ่งอาจจะมีผลมาจากความเข้ากันไม่ได้ระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติดังที่กล่าวไปข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า การใส่สารตัวประสานในปริมาณต่ำๆ การลดลงของสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อมูลลักษณะทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 3.1) สังเกตเห็นได้ว่าการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 1-3 phr นั้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีความเรียบ ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติดีขึ้น จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลมากนัก ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติที่ใส่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.4(b) - (d)) แต่อย่างไรก็ตามพบว่า การใส่ตัวประสานร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมทิลเมทาคริเลตถือเป็นพลาสติกที่มีความแข็งสูงด้วยกันทั้งคู่ การใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ

น้อยจึงไม่ส่งผลต่อค่าดังกล่าว พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.5(b) - (d)) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุด โดยในกรณีของพอลิแล็กติกแอซิดผสมยางธรรมชาติ 5 phr ให้ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุดที่ปริมาณการเติมตัวประสาน 1 phr เช่นเดียวกับการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ 10 phr ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr ให้ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุดที่ปริมาณตัวประสาน 3 phr ณ สัดส่วนการผสมนี้ จะสังเกตว่าความเข้ากันได้ระหว่างเฟสทั้ง 3 ของ พอลิแล็กติกแอซิด ยางธรรมชาติ และพอลิเมทิลเมทาคริเลต สามารถเข้ากันได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นพลังงานการกระแทกลดลงเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้น(เริ่มมีการแยกเฟสเกิดขึ้นพิจารณาในรูปที่ 3.1) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลจากกราฟความเค้น-ความเครียด ถ้าค่าพลังงานการกระแทกสูง พื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดควรมีมาก แต่ผลการทดลองที่ได้กลับให้ผลตรงกันข้าม โดยเหตุผลที่ใช้ในการอธิบายจะอธิบายในหัวข้อสมบัติเชิงความร้อนต่อไป

3.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยางและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

▪ ผลของปริมาณน้ำยางที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

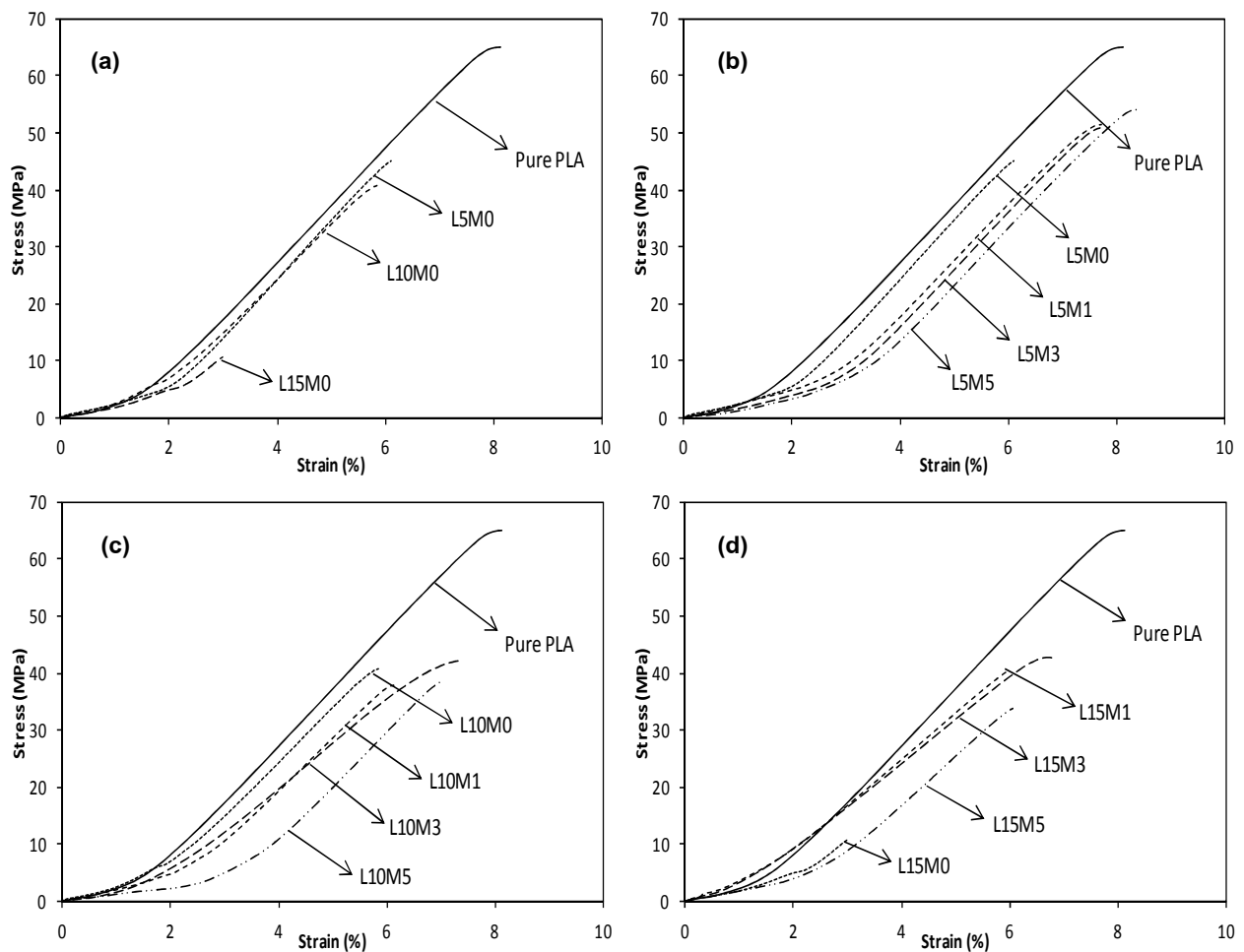
รูปที่ 3.6แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยางที่อัตราส่วนต่างๆและตารางที่ 3.1 สรุปค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยางเมื่อพิจารณาการใส่น้ำยางในพอลิเมอร์ผสมเท่ากับ 5, 10 และ 15 phr จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณน้ำยางส่งผลให้แนวโน้มของค่าความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาดลดลงอย่างมาก แต่ไม่มีผลต่อค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้ากันได้ดีระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยาง ซึ่งสังเกตได้จากข้อมูลลักษณะฐานฐานวิทยา (รูปที่ 3.2) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ (รูปที่ 3.1) พบว่าการใช้น้ำยางมีความเข้ากันได้กับพอลิแล็กติกแอซิดมากกว่าการใช้อยางธรรมชาติ แต่ทั้งนี้พอลิเมอร์ผสมที่ผสมยางธรรมชาตินั้นมีความทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาดที่เหนือกว่า (รูปที่ 3.7(a1)และ (b1))อาจเพราะยางธรรมชาติสามารถรับแรงได้ดีกว่าน้ำยางสมบัติเชิงกลดังกล่าวจึงมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.8(a)) และค่าพลังงานการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น แต่สูงสุดที่ปริมาณน้ำยาง 10 phr (รูปที่ 3.9(a)) เนื่องจากการเติมในปริมาณมากเกินไปนั้นส่งผลต่อความเข้ากันได้ของเฟสพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยาง จึงทำให้สมบัติความทนต่อแรงกระแทกมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ(รูปที่ 3.10(a)) พบว่าการใช้อยางธรรมชาติให้ค่าพลังงานการกระแทกที่เหนือกว่ามาก อาจเป็นไปตามเหตุผลเดียวกันกับที่กล่าวไปข้างต้น นอกจากนี้ สาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีสมบัติแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับน้ำยาง อาจจะมีผลมาจากในระหว่างกระบวนการผสม อุณหภูมิที่ใช้สูงพอที่จะทำให้ให้น้ำในน้ำยางระเหยออก ซึ่งอาจเกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงาน และเป็นสาเหตุให้การรับแรงกระแทกนั้นลดลงได้ เพราะชิ้นงานมีข้อบกพร่อง (defect)

▪ ผลของปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

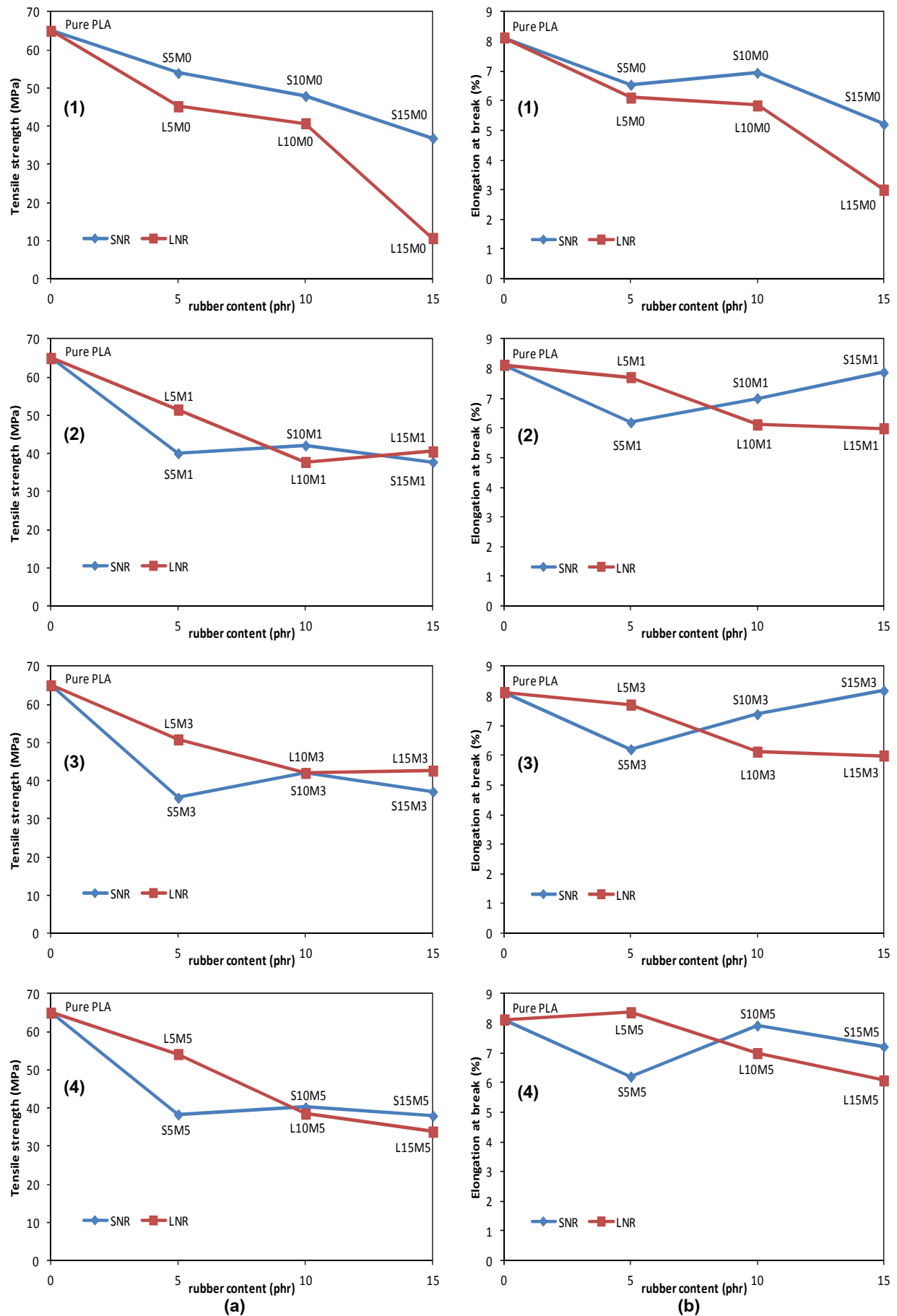
เมื่อพิจารณากราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ (1, 3 และ 5 phr) ในกรณีปริมาณน้ำยางไม่เกิน 10 phr ดังแสดงในรูปที่ 3.6(b) และ (c) พบว่าเมื่อปริมาณของตัวประสานเพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าการใส่ตัวประสานในปริมาณที่มาก

เกินพอ มิได้ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในกรณีการพิจารณาการเติมน้ำยาง 15 phr ดังแสดงในรูป 3.6(d) จะเห็นว่าการเติมตัวประสานมีส่วนช่วยให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น แต่ก็จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อการเติมตัวประสานเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการเติมตัวประสานอย่างพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งเป็นพลาสติกในปริมาณมาก จะไปขัดขวางการเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยาง

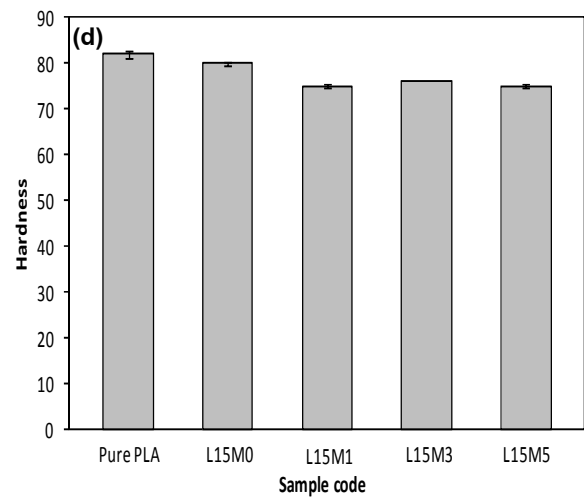
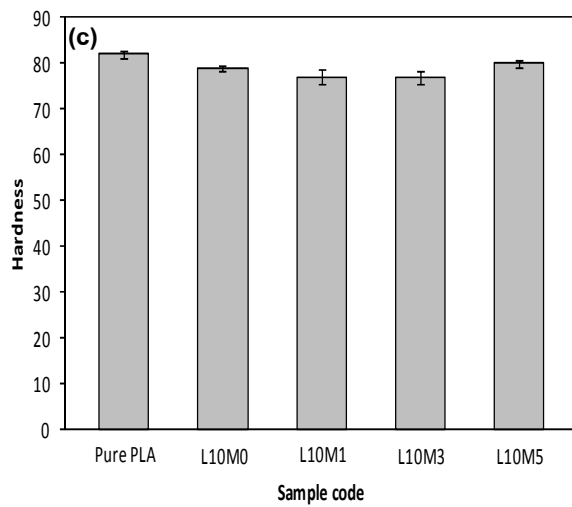
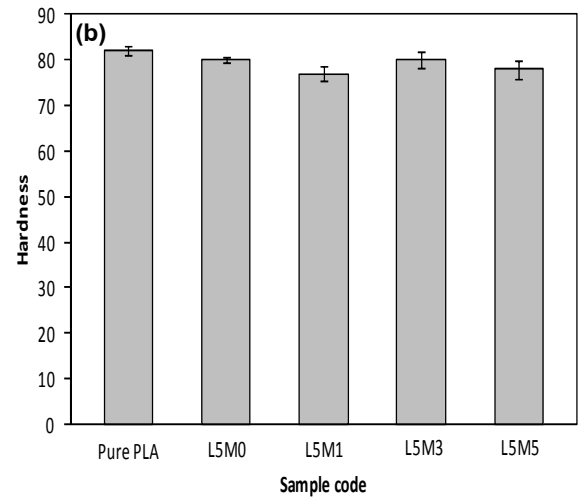
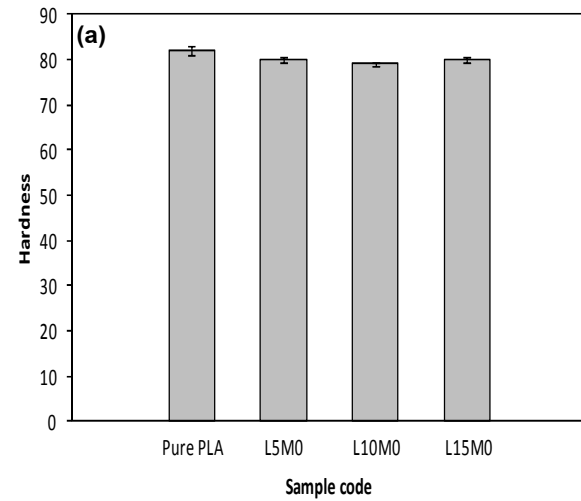
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกที่ผสมยางธรรมชาติและน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต เมื่อเติมตัวประสานพบว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมน้ำยางมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่ผสมยางธรรมชาติมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.7(a2-4) และ 3.7(b2-4) สาเหตุเพราะการใช้ยางธรรมชาติซึ่งผสมเข้ากันกับพอลิแล็กติกแอซิดได้ต่ำ การผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลตจึงไม่ช่วยประสานพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติเข้าด้วยกัน แต่กลับเพิ่มความเกะกะให้กับพอลิเมอร์ผสม เปรียบเทียบกับการใช้น้ำยางซึ่งผสมเข้ากันกับพอลิแล็กติกแอซิดได้ดี การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตจึงช่วยประสานให้น้ำยางเข้ากันกับพอลิแล็กติกแอซิด สมบัติเชิงกลจึงดีขึ้นค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.8(b) – (d)) ไม่พบเปลี่ยนแปลงมากนัก อาจเป็นเพราะการเติมตัวประสานในปริมาณน้อย และค่าความแข็งแรงที่ได้ใกล้เคียงกับการผสมโดยใช้ยางธรรมชาติ ค่าพลังงานการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 3.9(b) – (c)) ในกรณีน้ำยางไม่เกิน 10 phr การใส่ตัวประสานในปริมาณ 1 phr พอลิเมอร์ผสมมีค่าพลังงานการกระแทกที่มากที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นกลับพบว่าพลังงานการกระแทกมีค่าลดลง แต่ในกรณีน้ำยาง 15 phr (รูปที่ 3.9(d)) เมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานพบว่าค่าพลังงานการกระแทกมีแนวโน้มลดลงสาเหตุเพราะความเข้ากันไม่ได้ที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมตัวประสานซึ่งเป็นพลาสติก ส่งผลให้ค่าพลังงานการกระแทกลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยางธรรมชาติ (รูปที่ 3.10 (b) – (d)) พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีพลังงานการกระแทกที่สูงกว่า สาเหตุเป็นเพราะชนิดของยางที่ใช้ ซึ่งยางธรรมชาติรับแรงโหดและแรงกระแทกได้ดีกว่า



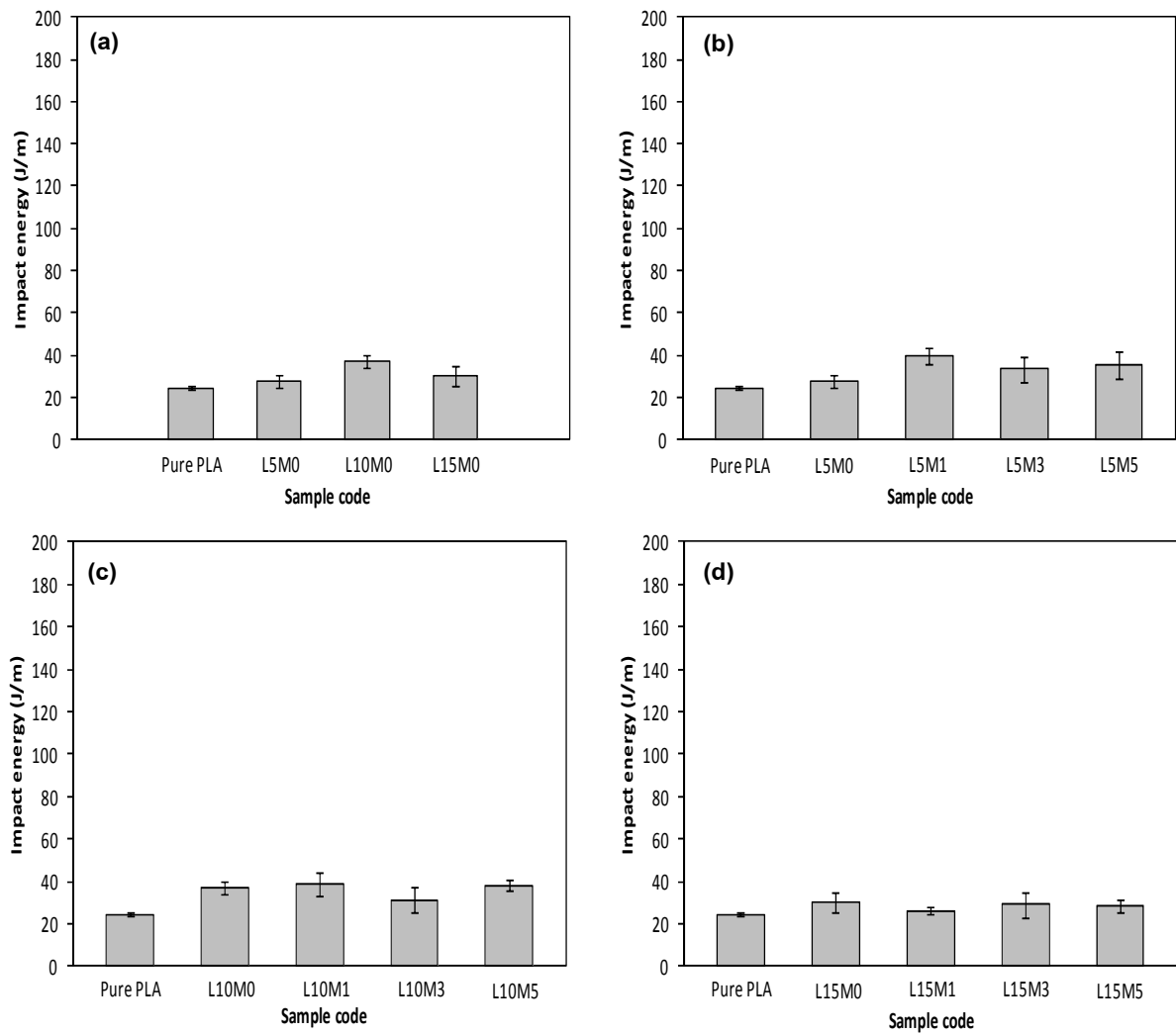
รูปที่ 3.6กราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในสัดส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณน้ำยางคงที่



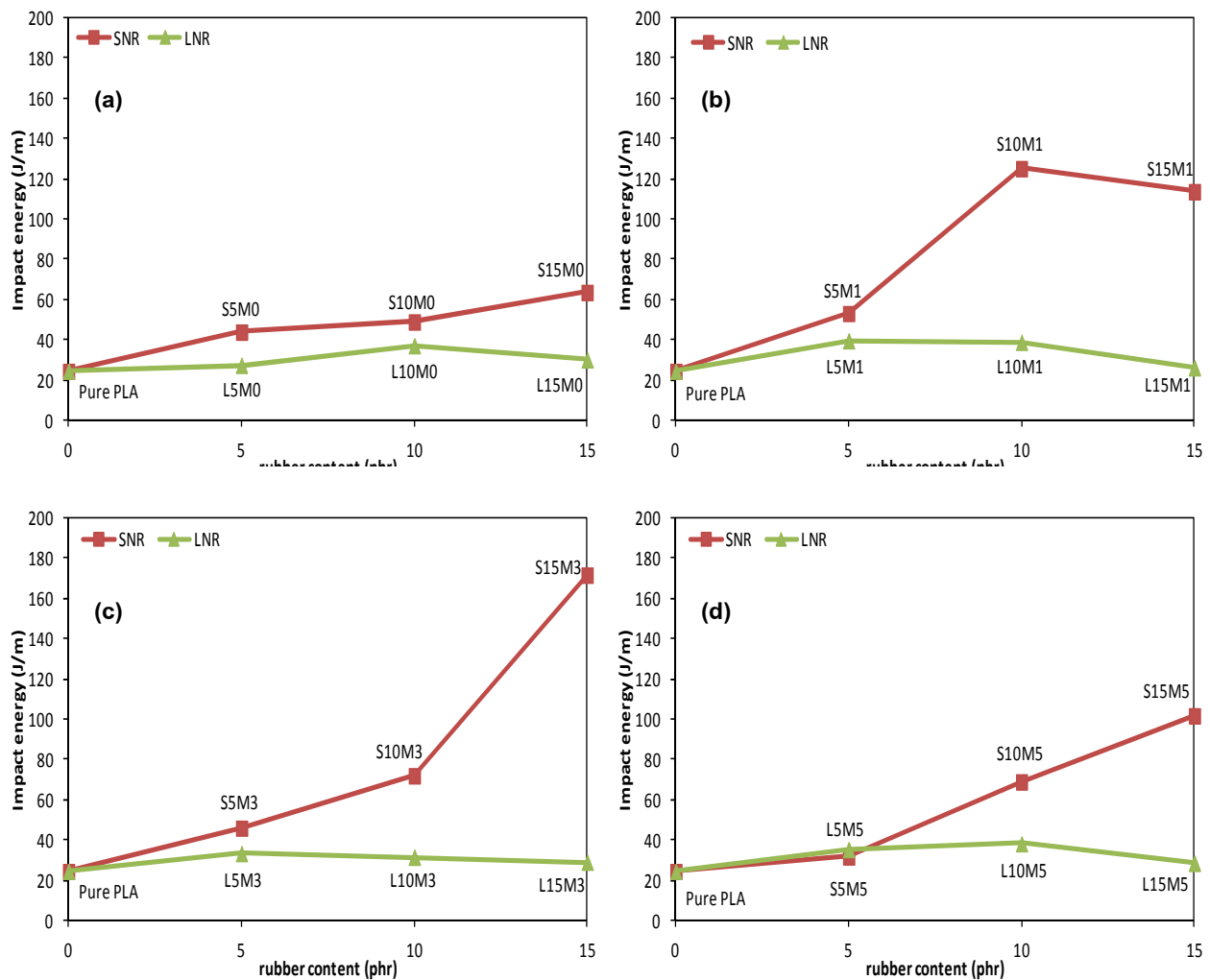
รูปที่ 3.7 กราฟเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติและน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดย (a1 - 4) ค่าความทนแรงดึงสูงสุด และ (b1 - 4) ระยะยืด ณ จุดขาด



รูปที่ 3.8 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณน้ำยางคงที่



รูปที่ 3.9 พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณน้ำยางคงที่



รูปที่ 3.10 กราฟเปรียบเทียบพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติและ
 น้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดย (a) เปรียบเทียบปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณ
 พอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ

3.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

3.3.1 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ

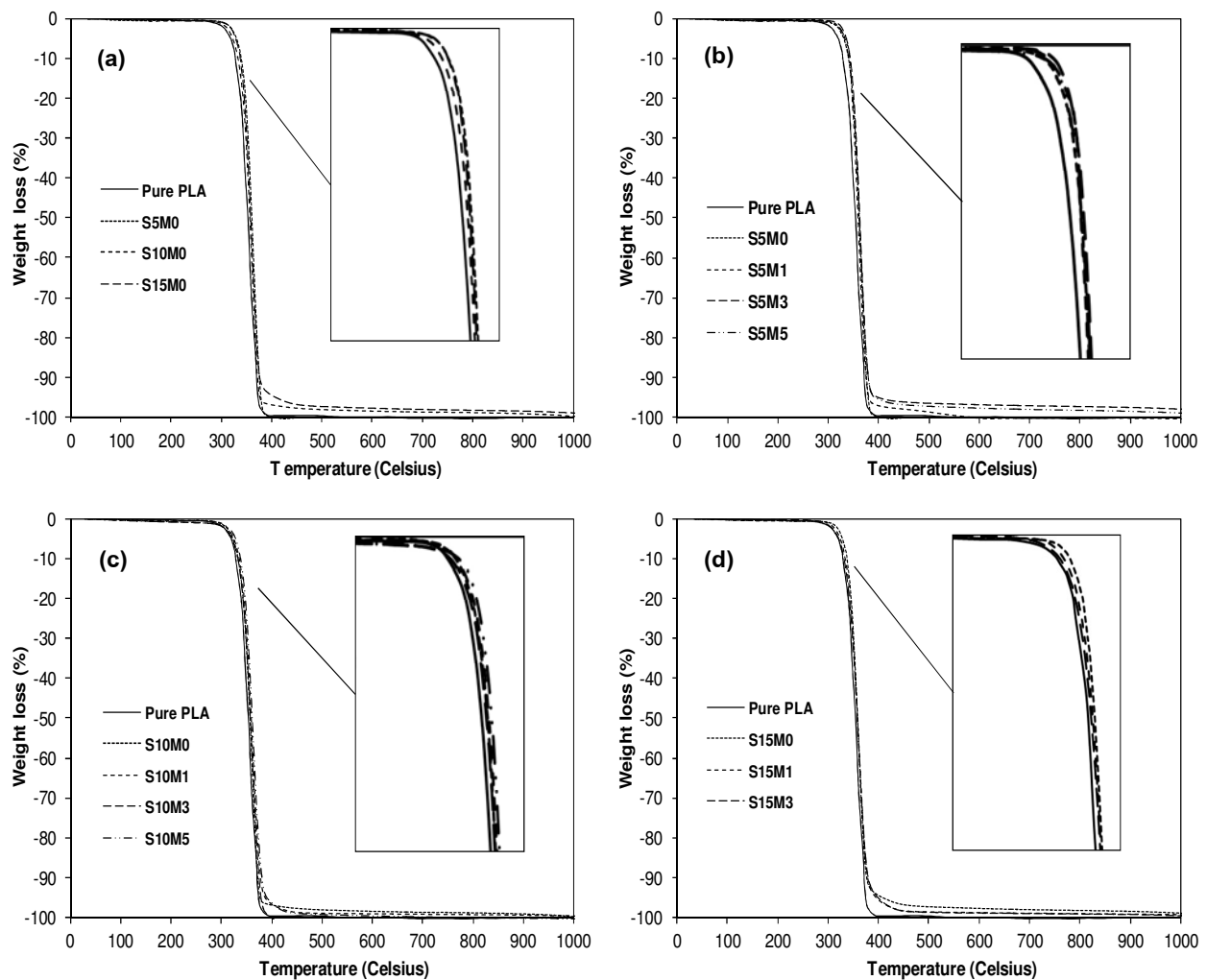
ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและรูปที่ 3.11 แสดงกราฟอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้เทคนิค thermogravimetric analysis พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีอุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัวเท่ากับ 334.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดเท่ากับ 376.2 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติและสารตัวเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นประมาณ (8-14 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่าสนใจมาก เนื่องจากยางธรรมชาติมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ที่ต่ำ น่าจะส่งผลให้สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่ผลการทดลองที่ได้กลับให้ผลตรงกันข้าม ทั้งนี้ อาจจะมีผลเนื่องจากความเข้ากันได้ไม่ดีของเฟสพอลิแล็กติกแอซิดและเฟสยางธรรมชาติทำให้

ตัวกลางของพอลิแล็กติกแอซิดห่อหุ้มอนุภาคยางซึ่งไม่เกิดการสลายตัวหลังจากได้รับพลังงานความร้อน เพราะมีเกราะป้องกันของพอลิแล็กติกแอซิดอยู่ โดยการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมนั้น อาจมีผลมาจากความร้อนสามารถถ่ายโอนไปยังอนุภาคยางได้บางส่วน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการ ถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้แก่พอลิเมอร์ผสมได้

ตารางที่ 3.2 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

Sample code	T_{id}^1	T_{max}^2
Pure PLA	334.3	376.2
S5M0	342.0	378.0
S5M1	341.0	376.0
S5M3	345.0	381.0
S5M5	348.0	380.0
S10M0	342.5	377.7
S10M1	343.0	377.0
S10M3	343.0	382.0
S10M5	347.0	381.0
S15M0	343.0	377.0
S15M1	342.0	382.0
S15M3	343.0	381.0
L5M0	335.5	367.7
L5M1	332.0	372.0
L5M3	339.6	375.4
L5M5	339.3	378.0
L10M0	333.9	374.1
L10M1	336.1	364.0
L10M3	335.5	372.3
L10M5	337.0	376.0
L15M0	332.2	374.3
L15M1	330.0	377.0
L15M3	331.4	374.9
L15M5	331.0	375.0

¹Initial decomposition temperature ²Temperature at the maximum mass-loss rate



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่

ตารางที่ 3.3 แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลว ผลึกและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมและ รูปที่ 3.12 แสดงเทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดย T_g ของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์เท่ากับ 62.97 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) เท่ากับ 133.06 องศาเซลเซียส และ T_m เท่ากับ 155.51 องศาเซลเซียสตามลำดับ

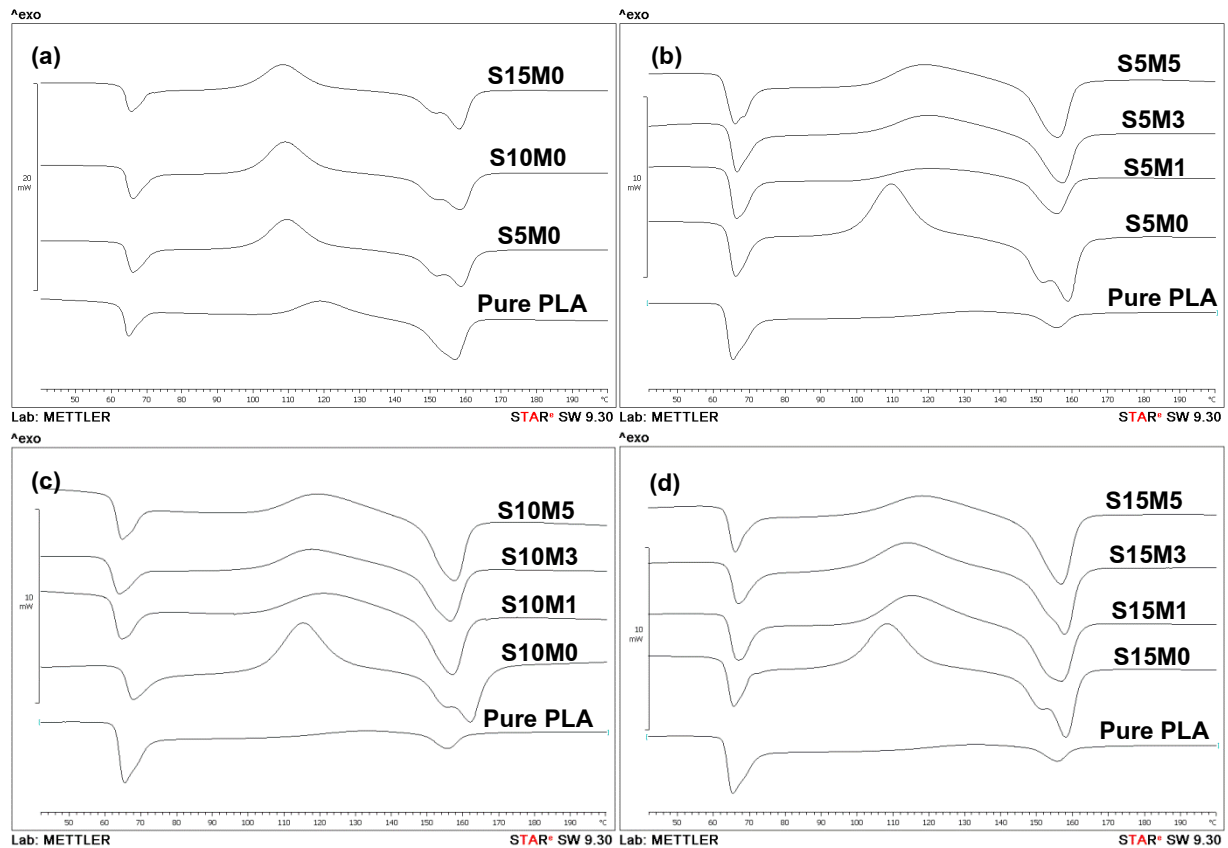
ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, อุณหภูมิการเกิดผลึก, อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสม

Sample code	$T_g(^{\circ}\text{C})^1$	$T_c(^{\circ}\text{C})^2$	$T_m(^{\circ}\text{C})^3$	%Xc ⁴
Pure PLA	62.97	133.06	155.51	11.30
S5M0	63.19	109.49	158.52	24.39
S5M1	63.58	124.05	155.26	4.40
S5M3	63.54	120.08	156.90	17.32
S5M5	63.36	118.59	155.56	18.38
S10M0	63.10	109.00	158.04	27.84
S10M1	63.51	121.05	156.68	9.08
S10M3	63.58	117.58	156.24	11.30
S10M5	63.71	119.71	157.16	14.44
S15M0	62.48	108.30	157.85	55.10
S15M1	63.48	115.27	156.55	11.79
S15M3	63.74	114.13	157.56	20.31
S15M5	63.92	118.43	156.53	23.61
L5M0	60.69	124.11	157.02	17.66
L5M1	61.01	121.40	155.79	14.66
L5M3	61.60	123.36	157.37	19.96
L5M5	60.57	120.07	156.26	18.04
L10M0	60.81	121.15	159.36	21.66
L10M1	59.98	113.45	159.31	34.13
L10M3	60.01	118.63	157.47	23.99
L10M5	61.07	123.42	156.79	13.33
L15M0	60.12	114.05	159.44	51.62
L15M1	60.96	125.40	158.50	10.55
L15M3	60.88	124.09	157.21	11.00
L15M5	61.73	118.10	159.16	21.59

¹Glass transition temperature ²Crystallization temperature ³Melting temperature

⁴Percent crystallinity = $\frac{\Delta H_{m,PLA} - \Delta H_{c,PLA}}{\Delta H_{m(ideal),PLA} \times (X_{PLA})}$; $\Delta H_{m,PLA}$ = enthalpy of fusion of PLA (J/g)

$\Delta H_{c,PLA}$ = enthalpy of crystallization of PLA (J/g), $\Delta H_{m(ideal),PLA}$ = enthalpy of fusion of 100% crystallinity PLA (93.7 J/g), X_{PLA} = weight fraction of PLA



รูปที่ 3.12 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.12(a) พบว่าการใส่ยางธรรมชาติลงไปในพอลิเมอร์ผสม ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T_g และ T_m ของพอลิแล็กติกแอซิด แต่ส่งผลกระทบต่อ T_c อย่างชัดเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใส่ยางธรรมชาติเชิงลงไปส่งผลให้ T_c ของพอลิเมอร์ผสมลดลงจากเดิมประมาณ 23 องศาเซลเซียส นั้นหมายความว่า ยางธรรมชาติช่วยเร่งการเกิดผลึกในพอลิเมอร์ผสม โดยเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก ($\%X_c$) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นดังนี้ ปริมาณยางเพิ่มขึ้น 5, 10 และ 15 phr พบว่า $\%X_c$ เพิ่มขึ้น 24.39, 27.84 และ 55.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งข้อมูลนี้สนับสนุนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ว่าปริมาณผลึกที่สูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อ 3.2.1 แล้วว่า ค่าพลังงานการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น แต่การคาดคะเนจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดกลับให้ผลตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากความเป็นผลึกที่สูงขึ้นของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง การปรากฏพีก T_m มีลักษณะแตกออกเป็นสองพีก นั้นแสดงถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดขึ้นได้ไม่ดี ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้ทางฐานานวิทยา (รูปที่ 3.1) โดยพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดคือ พอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมีผลึกทั้งคู่ แต่อ่อนหภูมิในการหลอมผลึกไม่เท่ากัน

เมื่อผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ปริมาณยางธรรมชาติคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.12(b) – (d) พบว่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง T_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ แต่ T_c กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติทั้งนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็น T_g ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต จะมีพีกเกิดขึ้นในช่วงเดียวกันกับ T_c ของพอลิ

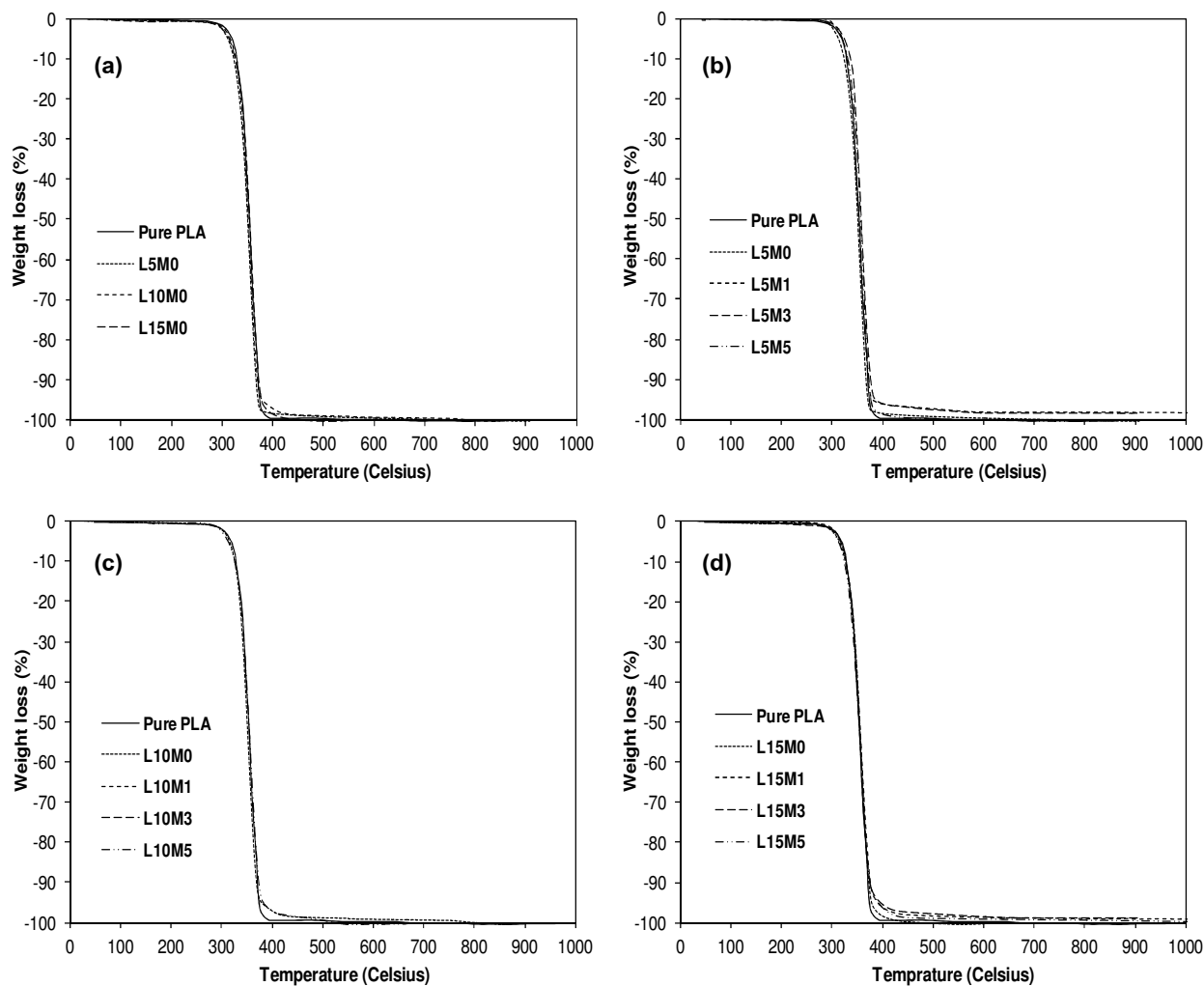
ลิเมอร์ผสม สังเกตได้จากลักษณะเทอร์โมแกรมที่ขึ้นบริเวณนี้จะมีลักษณะที่กว้าง (broad) ความสูงของพีคลดลง เนื่องจากพีคทั้ง 2 คือ T_g และ T_c เกิดการหักล้างกันและเกิดการเคลื่อนย้าย (shift) ของตำแหน่งพีคไปในทิศทางที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ สาเหตุเพราะการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตอาจทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลภายในพอลิแล็กติกแอซิดได้

3.3.2 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยาง

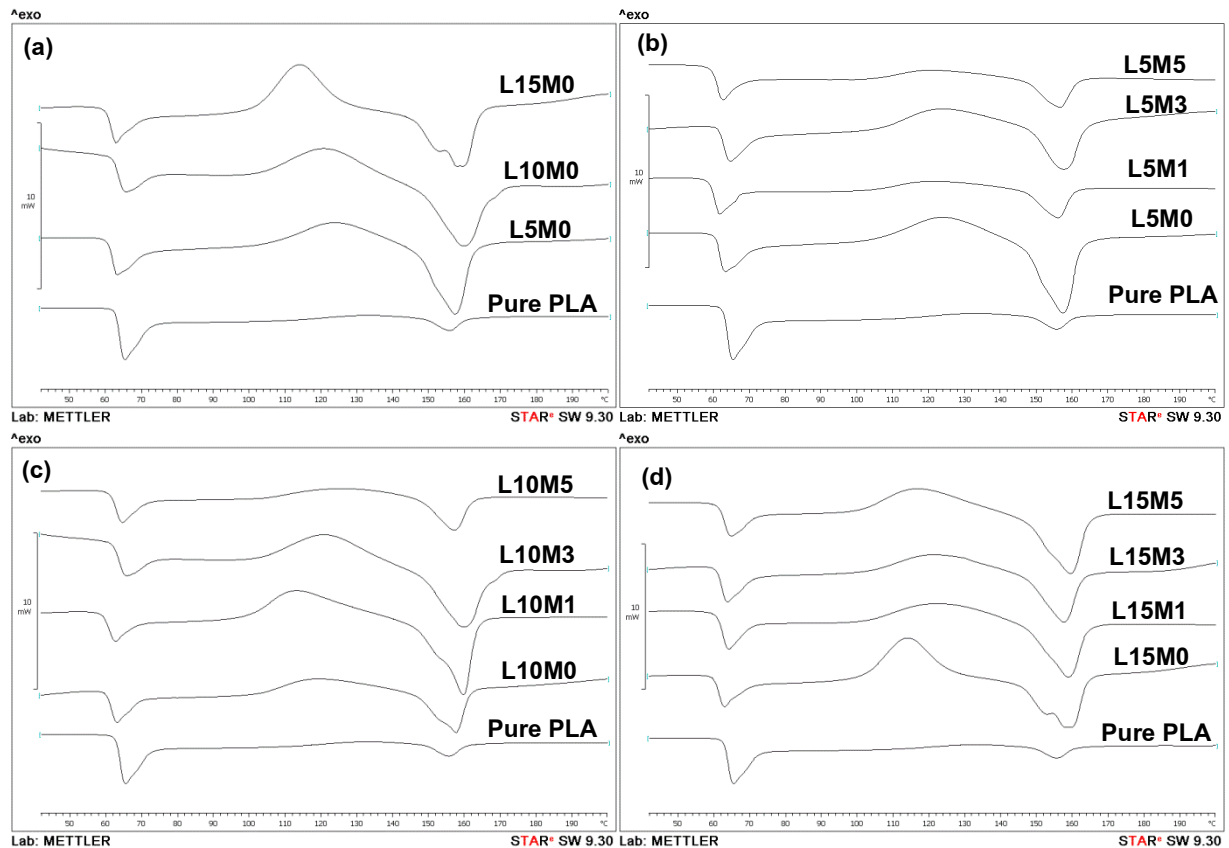
ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและรูปที่ 3.13 แสดงกราฟอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยางในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ โดยไม่ขึ้นกับปริมาณของน้ำยาง แต่เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมีค่าสูงกว่า เนื่องมาจากพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยางมีความเข้ากันได้สูง ตามข้อมูลทาง สัณฐานวิทยา กลไกการถ่ายโอนความร้อนจึงต่างจากในกรณีของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ โดยความร้อนที่ใช้ในการสลายตัวจะถูกถ่ายโอนมายังพอลิเมอร์ทั้งสองพร้อมกัน เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้ดี การสลายตัวจึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าในกรณีแรกจากเหตุผลทางด้านความเข้ากันได้ดังกล่าวการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณเพิ่มขึ้นจึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว

ตารางที่ 3.3 แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสม และรูปที่ 3.14 แสดงเทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมลดลงประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยางมีความเข้ากันได้ดี นอกจากนั้นการผสมร่วมกับสารตัวเติมก็ยังช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดด้วยส่งผลให้ T_g มีค่าลดลงเมื่อพิจารณาที่ค่า T_c พบว่าการผสมปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า T_c มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าน้ำยางเป็นตัวเร่งให้เกิดผลึก ซึ่งเหตุผลดังกล่าวได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 ลักษณะพีค T_m มีลักษณะเป็นพีคเดี่ยวแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ดังแสดงตามข้อมูลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 3.2) เมื่อปริมาณน้ำยางมากกว่า 10 phr พบว่าพีค T_m มีลักษณะแตกออกเป็นสองพีค ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณน้ำยางมากเกินไป ส่งผลให้ความเข้ากันได้ลดลง

เมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ปริมาณยางธรรมชาติคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.14(b) – (d) พบว่าค่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ผสมไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง T_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ แต่ T_c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับน้ำยาง ซึ่งเหตุผลดังกล่าวเป็นไปตามเหตุผลเช่นเดียวกันกับพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น



รูปที่ 3.13กราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณน้ำยางคงที่



รูปที่ 3.14 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมน้ำยางร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) เปรียบเทียบปริมาณน้ำยางที่เพิ่มขึ้น (b) - (d) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับเมื่อปริมาณน้ำยางคงที่

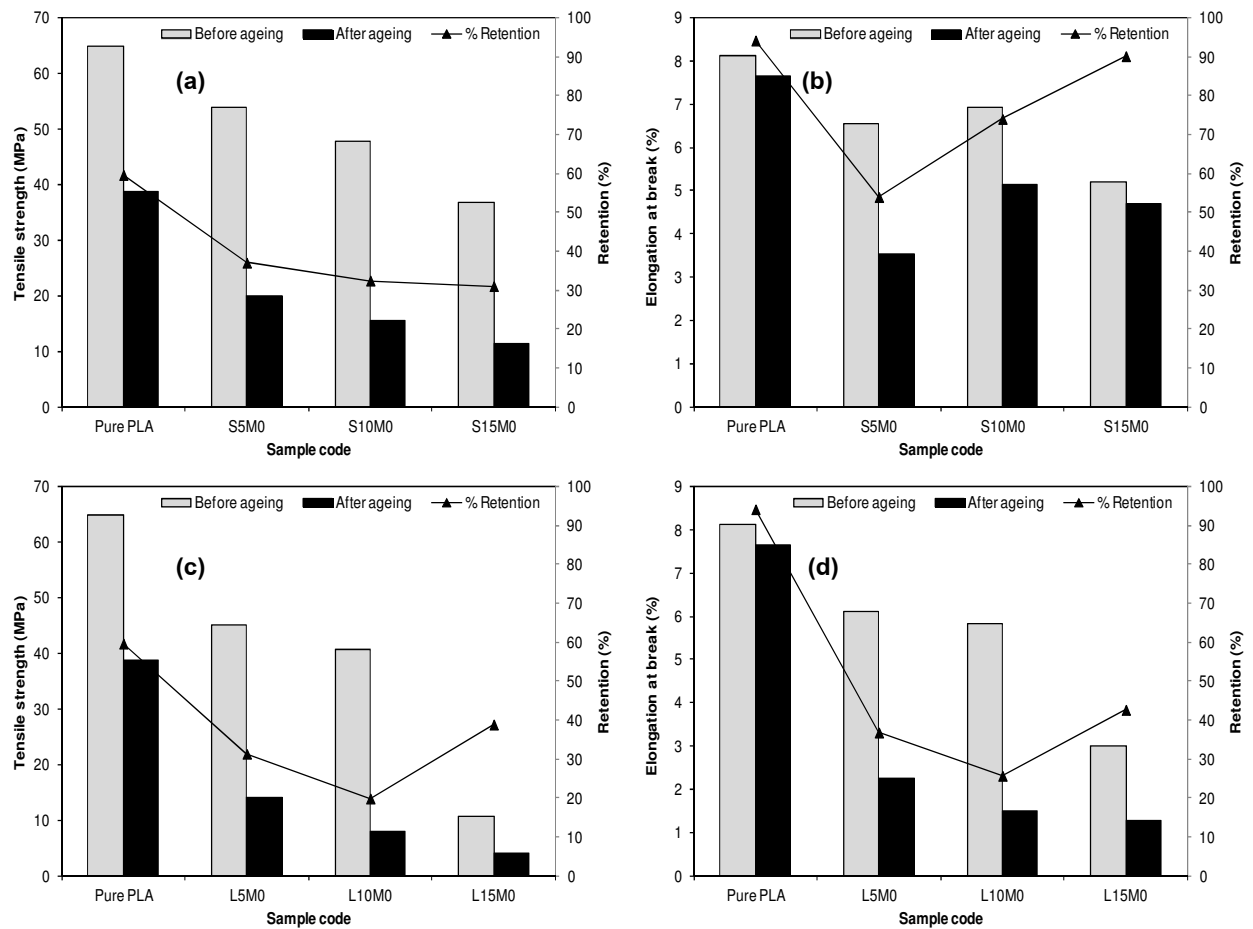
3.3.3 สมบัติการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 3.4 แสดงสมบัติการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติและน้ำยางเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมหลังการบ่มและเปอร์เซ็นต์รีเทนชันมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เนื่องมาจากการมีพันธะคู่ของยางธรรมชาติซึ่งทนความร้อนได้ต่ำ จึงเป็นสาเหตุให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณยางธรรมชาติและน้ำยาง 5 phr แต่มีการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน พบว่าความทนแรงดึงสูงสุด ระยะยืด ณ จุดขาดและเปอร์เซ็นต์รีเทนชันของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.16 แต่ความทนแรงดึงสูงสุดเริ่มลดลงที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากกว่า 3 phr การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูง ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถคงสมบัติไว้ได้ดีขึ้นเมื่อได้รับความร้อน แต่ทั้งนี้การเติมในปริมาณมากเกินไปอาจส่งผลต่อความเข้ากันไม่ได้ เป็นเหตุให้ความทนแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต 5 phr มีค่าลดลง

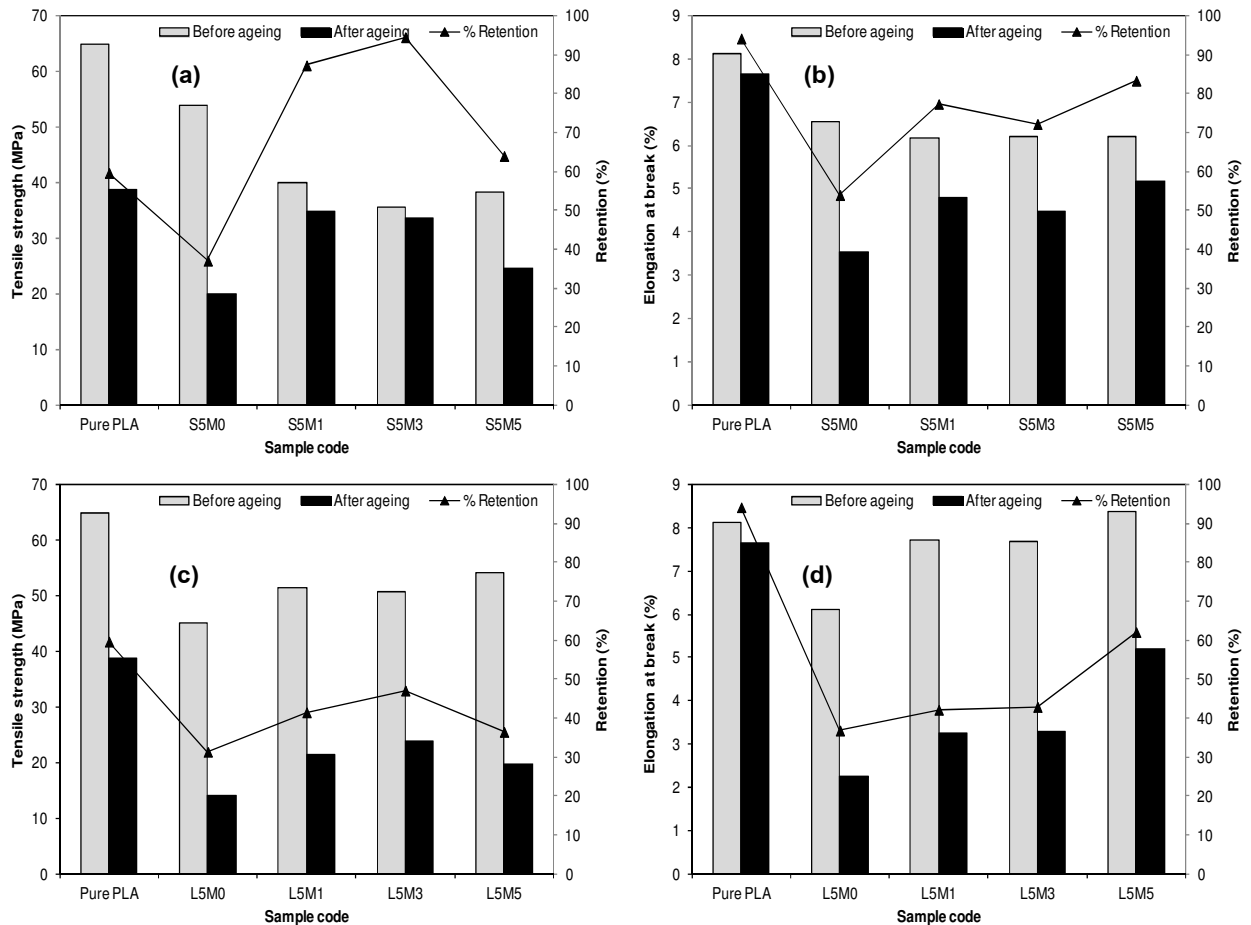
ตารางที่ 3.4 การบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

Sample code	Tensile strength(MPa)			Elongation at break (%)		
	Before aging	After aging	% Retention ¹	Before aging	After aging	% Retention ¹
Pure PLA	64.98	38.77	59.66	8.13	7.66	94.22
S5M0	53.90	19.98	37.07	6.54	3.53	53.98
S5M1	40.01	34.94	87.33	6.19	4.79	77.38
S5M3	35.54	33.61	94.57	6.20	4.48	72.26
S5M5	38.31	24.53	64.03	6.20	5.17	83.39
S10M0	47.88	15.56	32.50	6.94	5.14	74.06
S15M0	36.84	11.44	31.05	5.21	4.70	90.21
L5M0	45.18	14.16	31.34	6.11	2.25	36.82
L5M1	51.48	21.37	41.51	7.71	3.25	42.15
L5M3	50.83	23.94	47.10	7.69	3.30	42.91
L5M5	54.14	19.75	36.48	8.37	5.20	62.13
L10M0	40.73	8.08	19.84	5.84	1.50	25.68
L15M0	10.67	4.15	38.89	3.00	1.28	42.67

¹% Retention = (properties after aging/properties before aging) x 100



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงสมบัติความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติที่อัตราส่วนต่างๆ โดย (a) และ (b) พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ (b) และ (d) พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยาง



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงสมบัติความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดย (a) และ (b) พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ (b) และ (d) พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยาง

3.4 สมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 3.5 แสดงสมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมร่วมกับยางธรรมชาติ และลดลงเมื่อผสมร่วมกับน้ำยาง เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติแข็งแรงและรับแรงได้ดีกว่าน้ำยาง ในขณะที่การผสมร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตปริมาณ 1 phr ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีค่าลดลง ตรงกันข้ามกับผลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยาง ทั้งนี้เนื่องจากผลของความเข้ากันได้ดีของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับน้ำยางและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) ของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับน้ำยางมีค่าน้อยกว่าในพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานพบว่าค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลงทั้งในพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติและน้ำยาง แสดงให้เห็นว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีส่วนช่วยให้วัสดุมีการสูญเสียพลังงานลดลง เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง (rigid) T_g ของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ T_g ของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับน้ำยางมีแนวโน้มลดลงประมาณ 2 องศาเซลเซียส เนื่องจากผลของความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมกับน้ำยาง

ลิเมอร์ทั้งสองชนิดดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.3.2 และค่า T_g ที่ได้จากข้อมูล DMA มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับที่หาได้จากการทดสอบ DSC

ตารางที่ 3.5 สมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสม

Sample code	Storage modulus (MPa) at 25 °C	Loss modulus (MPa) at 25 °C	Loss tangent at maximum of $\tan\delta$	T_g (°C) ¹
Pure PLA	2985.21	130.45	1.33	50.1
S5M0	3463.74	245.24	1.49	51.0
S5M1	2864.32	263.43	1.28	50.9
L5M0	2194.61	1000.04	1.19	48.5
L5M1	2354.00	415.35	1.18	48.0

¹ Calculated from temperature of maximum of $\tan\delta$

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 2 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติ และน้ำยาง และตัวประสานพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าการผสมยางธรรมชาติทั้งสองชนิดร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดมีความเข้ากันได้ต่ำ แต่การใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน ส่งผลให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้ดีขึ้น การใส่ยางทั้งสองชนิดสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมในด้านพลังงานการกระแทกให้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะการใส่ยางธรรมชาติ การผสมยางธรรมชาติและ/หรือพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตทำให้เปอร์เซนต์ความเป็นผลึกลดลง โดยสูตรการผสมพอลิเมอร์ผสมของที่เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นเส้นใยคือการใช้พอลิแล็กติกแอซิด 100 phr ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และพอลิเมทิลเมทาคริเลต 3 phr พลังงานการกระแทกเพิ่มขึ้น 7 เท่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้น 9 องศาเซลเซียส และเปอร์เซนต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น 9 เปอร์เซนต์ เมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

ข้อเสนอแนะ

1. การผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับน้ำยางนั้นมีปัญหาเรื่องความชื้นสูง ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วย ควรมีการอบไล่ความชื้นก่อนทำการบดผสม
2. สูตรผสมร่วมกับยางธรรมชาติซึ่งมีความเข้ากันได้ต่ำ ซึ่งทางผู้วิจัยได้ใช้เครื่องบดผสมภายในเพื่อผสมสาร การปรับปรุงพัฒนาสูตรผสมอาจใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงกว่านี้อย่างเครื่องบดผสมแบบสกรูคู่ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการผสมที่ดีกว่ามาก
3. การปรับปรุงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวให้ดียิ่งขึ้น ควรหาสารตัวเติมอื่นๆในการผสมรวม อาทิเช่น ออการ์โนเคลย์ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูง พลาสติกไซเซอรอื่นๆ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- 1.สมาคมพลาสติกชีวภาพไทย: กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ [online] Available from: http://www.tbia.or.th/en/post.php?post_id=26
2. [online] Available from: <http://images.google.co.th/images?um=1&hl=th&tbs=isch%3A1&sa=1&q=lactide&aq=f&oq=&start=0>
3. [online] Available from: <http://images.google.co.th/images?um=1&hl=th&tbs=isch%3A1&sa=1&q=polylactic+acid&aq=f&oq=&start=0>
4. Wikipedia: PLA cup melted [online] Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/File:PLA_cup_melted.jpg
5. B. Gupta, N. Montrekay, Y. Grohens, "Poly(lactic acid) fiber: An overview" Prog. Polym. Sci., **32**, 455-482 (2007)
6. NatureWorks: Technology Focus Report: Blends of PLA with Other Thermoplastics [online] Available from: <http://www.natureworkslc.com/product-and-applications/ingeo-biopolymer/technical-publications/~media/Files/Blends-Technology-Focus-Report-pdf.ashx>
7. Science news บทความวิทยาศาสตร์: ยางธรรมชาติ (natural rubber) [online] Available from: http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?Itemid=1&id=141&option=com_content&task=view
8. สมบัติสำคัญของเส้นใย Available from Polymer science I
9. H. Okamoto, M. Nakano, A. Usuki, "Toughening of polylactide by melt blending with natural rubber", Polymerpreprint, **54**, 5345 (2005)
10. H. Okamoto, M. Nakano, A. Usuki, "Toughening of polylactide by melt blending with natural rubber(2)-effect of PLA crystallization", Polymer preprint, **55**, 2256 (2006)
11. I. Pillin, N. Montrelay, Y. Grohens, "Thermo-mechanical characterization of plasticized PLA: Is the miscibility the only significant factor?", Polymer, **47**, 4676-4682 (2006)
12. M. A. Huneault, H. Li, "Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends" Polymer, **48**, 270-280 (2007)
13. S. Wang, P. Ma, R. Wang, S. wang, Y. Zhang, Y. Zhang, "Mechanical, thermal and degradation properties of poly(d,l-lactide)/poly(hydroxybutyrate)/poly(ethylene glycol) blend" Polym. Degrad. Stab., **93**, 1364-1369 (2008)
14. N. Graupner, A. S. Herrmann, J. Mussig, "Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas" Composites: part A, **40**, 810-821 (2009)
15. S. Ishida, R. Nagasaki, K. Chino, T. Dong, Y. Inoue, "Toughening of Poly(L-lactide) by melt blending with rubbers" J. Appl. Polym. Sci., **113**, 558-566 (2009)

16. H. Balakrishnan, A. Hassan, M.U. Wahit, A.A. Yussuf, S. Bahri, A. Razak, "Novel toughened polylactic acid/nanocomposite: mechanical, thermal and morphological properties" JMAD, 10.1013/j.matdes.2010.02.008, (2010)
17. C. W. Phetphaisit, "พอลิแลคติกแอซิด-กราฟ-ยางธรรมชาติเหลวตัดแปรไบโอพลาสติกลาสโตเมอร์" ตามสัญญาเลขที่ RDG5050106
18. H. Balakrishnan, A. Hassan, M.U. Wahit, "Mechanical, thermal, and morphological properties of polylactic acid/linear low density poly ethylene blends" J. Elast. Plast., **42**, 223-238(2010)
19. N. Bitinis, R. Verdejo, P. Cassagnau, M.A. Lopez-Manchado, "Structure and properties of polylactide/natural rubber blends" Mat. Chem. Phys., **129**, 823-831(2011)
20. R.J. Khurma, R.D. Rohindra, R. Devi, "Miscibility study of solution cast blends of poly(lactic acid) and poly(vinyl butyral)" S. Pac. J. Nat. Sci. **23**, (2005)
21. [online] Available from: http://www.matraplast.com/twinwall/specs/pepp_properties.html

ภาคผนวก ก

การคำนวณน้ำหนักสูตรผสม

ความจุของเครื่อง internal mixer = 300 กรัม

ยกตัวอย่างคำนวณสูตร S15M3 ใช้ พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) 100 phr

ยางธรรมชาติ(SNR) 15 phr

พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) 3 phr

รวมทั้งหมด 118phr

เพราะฉะนั้นน้ำหนักที่ใช้คือ

$$\text{PLA} = \frac{100 \times 300}{118} = 254.24 \text{ กรัม}$$

$$\text{SNR} = \frac{15 \times 254.24}{100} = 38.14 \text{ กรัม}$$

$$\text{PMMA} = \frac{3 \times 254.24}{100} = 7.62 \text{ กรัม}$$

รวมทั้งหมด 300 กรัม

ยกตัวอย่างคำนวณสูตร L5M5 ใช้ พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) 100 phr

น้ำยาง(LNR) 5 phr

พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) 5 phr

รวมทั้งหมด 110 phr

เพราะฉะนั้นน้ำหนักที่ใช้คือ

$$\text{PLA} = \frac{100 \times 300}{110} = 272.73 \text{ กรัม}$$

$$\text{LNR} = \frac{5 \times 272.73}{100} = 38.14 \text{ กรัม}$$

$$\text{PMMA} = \frac{5 \times 272.73}{100} = 7.63 \text{ กรัม}$$

รวมทั้งหมด 300 กรัม

แต่น้ำยางที่ใช้มี %DRC¹ = 60%

$$\text{เพราะฉะนั้น ต้องชั่งน้ำยาง} = \frac{38.14 \times 100}{60} = 63.56 \text{ กรัม}$$

¹% DRC = Dry rubber content (ปริมาณเนื้อยางแห้งที่มีอยู่ในน้ำยาง)

ภาคผนวก ข

คำนวณต้นทุนการผลิตพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 1 กิโลกรัม

การประมาณต้นทุนที่ใช้เตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 ในงานวิจัยนี้แสดงราคาต้นทุนของสารเคมีและค่าบริการการใช้เครื่องบดผสมและขึ้นรูปดังตารางที่ ข.1 โดยการคำนวณค่าใช้จ่ายในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 ต่อ 1 กิโลกรัมนั้นแบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นค่าสารเคมีประมาณ 100 บาท โดยค่าใช้จ่ายหลักขึ้นกับราคาของพอลิแล็กติกแอซิดเพราะใช้ในปริมาณมากที่สุด (85บาท) และส่วนที่สองเป็นค่าใช้จ่ายเครื่องมือในการผสมและขึ้นรูปประมาณ 1600 บาทต่อแบทช์ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 มีต้นทุนการผลิตต่อกิโลกรัมเท่ากับ $99.99 + 1600 = 1699.99$ บาท

ตาราง ข.1 ราคาสารเคมีและค่าบริการที่ใช้เตรียมพอลิเมอร์ผสม

สารเคมี	ราคา
พอลิแล็กติกแอซิด (PLA)	100 บาท/กิโลกรัม
ยางธรรมชาติ (SNR)	102 บาท/กิโลกรัม
พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)	110 บาท/กิโลกรัม
ค่าบริการ Internal mixer	400 บาท/กิโลกรัม ¹
ค่าบริการ Compression molding	1200บาท/กิโลกรัม ¹

¹400 บาทต่อชั่วโมง

ค่าสารเคมี

ปริมาณ PLA 100 phr ต้องใช้ 847.47 กรัม เป็นเงินเท่ากับ $100 \times 0.8475 = 84.75$ บาท

ปริมาณ SNR 15 phr ต้องใช้ 127.13 กรัม เป็นเงินเท่ากับ $102 \times 0.1271 = 12.7$ บาท

ปริมาณ PMMA 3 phr ต้องใช้ 25.40 กรัม เป็นเงินเท่ากับ $110 \times 0.0254 = 2.54$ บาท

รวมเป็นเงิน = 99.99 บาท

ค่าบริการ

ค่าบริการ internal mixer 400 บาท/ชั่วโมง 1 ชั่วโมงทำได้ 1 กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 400 บาท

ค่าบริการ compression molding 400 บาท/ชั่วโมง 3 ชั่วโมง ทำได้ 1 กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 1200 บาท

รวมเป็นเงิน = 1600บาท

ดังนั้นต้นทุนการผลิตพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 ต่อกิโลกรัมเท่ากับ $99.99 + 1600 = 1699.99$ บาท

จากผลการคำนวณที่ได้ข้างต้น จะเห็นได้ว่าต้นทุนในการผลิตพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 มีค่าใช้จ่ายไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งผู้ใช้อาจพิจารณาเลือกวัสดุตามความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การใช้พอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์เหมาะสมกับงานประเภทพลาสติกทั่วไปเช่น ฟิล์ม บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เป็นต้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ให้สมบัติความทนต่อแรงกระแทกสูง และทนต่อความร้อนได้ดี สามารถนำไปใช้งานทางด้านหน้ากากนิรภัย อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นต้นในขณะที่เดียวกันก็ยังมีสมบัติเพียงพอต่อการนำไปใช้งานเป็นเส้นใยที่ทนทานต่อแรงดึงและความร้อนได้ อาทิเช่น พรหม ผ้าผ่าน หรืออุปกรณ์ตกแต่งได้

การเปรียบเทียบความคุ้มค่าและต้นทุนการผลิตของพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 กับวัสดุที่คาดว่าจะนำไปใช้ทดแทน

นักวิจัยได้พยายามหาสมบัติของพลาสติกชนิดอื่นที่สามารถนำมาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับสูตร S15M3 โดยข้อมูลสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D638 และ D256 แสดงในตาราง ข. 2 พบว่าพอลิเมอร์ผสม S15M3 มีค่าความทนแรงดึงสูงสุดมากกว่าทั้งพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE)และพอลิโพรพิลีน(PP) พลังงานการกระแทกของ S15M3 มีค่าอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง แต่อย่างไรก็ตาม ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม S15M3 มีค่าต่ำกว่าทั้ง PP และ HDPE จากข้อมูลสมบัติเชิงกลข้างต้นพบว่าพอลิเมอร์ผสม S15M3 มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะขึ้นรูปเป็นเส้นใยในสิ่งทอได้ แต่ข้อเสียของพอลิเมอร์ผสม S15M3 คือการยืดตัวที่น้อยทำให้การประยุกต์ใช้เป็นเส้นใยสำหรับเสื้อผ้าอาจจะทำได้ลำบาก เนื่องจากไม่มีความสบายในเวลาสวมใส่ การประยุกต์ใช้ที่ีน่าจะเป็นการใช้เป็นวัสดุผ้าที่ต้องการความทนทาน เช่น พรหม ผ้าปูโต๊ะ หรืออุปกรณ์ตกแต่ง

เมื่อพิจารณาการประมาณต้นทุนที่ใช้เตรียมพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน โดยราคาสารเคมีและเครื่องมือในการบดผสม และขึ้นรูปแสดงดังตาราง ข. 3 ค่าใช้จ่ายในการเตรียมพอลิเมอร์แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ค่าสารเคมีประมาณ 50 บาทต่อกิโลกรัม และส่วนที่สองเป็นค่าเครื่องมือที่ใช้ในการบดผสมและขึ้นรูปประมาณ 1600 บาทต่อ 1 แบทช์ ดังนั้นต้นทุนในการเตรียมพอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีนเท่ากับ 1650 และ 1648 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับพบว่าการใช้พอลิเมอร์ผสม S15M3 อาจยังใช้งานได้ไม่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับ HDPE และ PP ที่มีต้นทุนการผลิตถูกกว่า เนื่องจากราคาเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีนมีราคาต่ำกว่า อาจเพราะเป็นราคาที่ผลิตขึ้นในระดับอุตสาหกรรมซึ่งย่อมมีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 ที่อยู่ในขั้นงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ ในส่วนของการเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดสูตรที่ปรับปรุงค่าความยืดหยุ่นแล้วกับพอลิเมอร์ผสม S15M3 ไม่สามารถทำได้ เพราะทางบริษัท NatureWork ไม่มีข้อมูลรองรับในด้านราคา

ตาราง ข. 2 สมบัติเชิงกลของพลาสติกชนิดต่างๆ

Name	T _b (MPa) ¹	E _b (%) ¹	Impact energy (J/m) ²
พอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3	37.13	8.18	178.65
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	28.00 ^[21]	10.00 ^[21]	209.70 ^[21]
พอลิโพรพิลีน (PP)	27.00 ^[21]	800.00 ^[21]	158.77 ^[21]

¹ASTM D638 การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง²ASTM D256การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

ตาราง ข.3ราคาสารเคมีและค่าบริการที่ใช้เตรียมพอลิเมอร์ที่จะนำ S15M3 ไปใช้ทดแทน

สารเคมี	ราคา
พอลิเอทิลีน (PE)	50บาท/กิโลกรัม
พอลิโพรพิลีน (PP)	48บาท/กิโลกรัม
ค่าใช้บริการ Internal mixer	400 บาท/กิโลกรัม ¹
ค่าใช้บริการ Compression molding	1200บาท/กิโลกรัม ¹

¹400 บาทต่อชั่วโมง

ค่าบริการ

ค่าบริการ internal mixer 400 บาท/ชั่วโมง 1 ชั่วโมง ทำได้ 1 กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 400 บาท
ค่าบริการ compression molding 400 บาท/ชั่วโมง 3 ชั่วโมง ทำได้ 1 กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 1200 บาท
รวมเป็นเงิน = 1600บาท

ค่าสารเคมี

พอลิเอทิลีน 1 กิโลกรัม เป็นเงินเท่ากับ 50 บาท รวมค่าบริการ 1600 บาท เท่ากับ 1650 บาท
พอลิพอฟิลีน 1 กิโลกรัม เป็นเงินเท่ากับ 48 บาทรวมค่าบริการ 1600 บาท เท่ากับ 1648 บาท

ดังนั้นต้นทุนการเตรียมพอลิเอทิลีนและพอลิพอฟิลีน เท่ากับ 1650 และ 1648 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงกิจกรรมที่เสนอในข้อโครงการและกิจกรรมที่ทำจริง

แผนงาน	เดือน							กิจกรรมที่ทำ
	1 – 3	4 – 6	7 – 9	10 – 12	13 – 15	16 – 18	19 – 20	
1. จัดหาวัตถุดิบเพื่อใช้ในงานวิจัย								จัดหาวัตถุดิบ ได้แก่ พอลิแล็กติกแอซิด ยางธรรมชาติ พอลิเอทิลีนเททราฟลูออไรด์ เป็นต้น
2. หาสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด ยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง								ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติและสารเติมแต่งที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อหาสูตรที่เหมาะสม และทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้แม่พิมพ์แบบอัด
3. ศึกษาผลของยางธรรมชาติและสารเติมแต่งที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม								ทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ดังนี้ - ความแข็ง โดย Durometer - ความต้านทานแรงดึง โดย Universal Testing Machine - การยืดตัวขณะขาดโดย Universal Testing Machine - ความต้านทานการฉีกขาด โดย Tear Resistance Tester* - ความเหนียว โดย Impact Testing Machine
4. ศึกษาผลของยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง(พอลิเมทิลเมทาคริเลต) ที่มีต่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะหลอมละลายของพอลิเมอร์ผสม								วัดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะหลอมละลายเพื่อพิจารณาการเติมยางธรรมชาติหรือสารเติมแต่งมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะหลอมละลายของพอลิแล็กติกแอซิด โดยใช้เทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC)
5. ศึกษาผลของยางธรรมชาติและสารเติมแต่งต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสม								วัดสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม โดย Thermogravimetric analysis (TGA) เพื่อหา - วิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไป (weight loss) - สมบัติการปฏิกิริยาด้วยความร้อน (thermal aging) วัดสมบัติเชิงพลวัตของพอลิเมอร์ผสม โดย Dynamic mechanical analysis (DMA) เพื่อหา - ค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus, E') - ค่ามอดูลัสที่สูญเสียไป (loss modulus, E'') - ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (loss tangent, tan δ)
6. ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง								การกระจายตัวของยางธรรมชาติหรือสารเติมแต่งในตัวอย่างพอลิแล็กติกแอซิด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน								เขียนรายงาน เสรยมนำเสนอปิดโครงการ

■ กิจกรรมที่เสนอในข้อโครงการ

□ กิจกรรมที่ทำจริง

หมายเหตุ

* การทดสอบความต้านทานการฉีกขาดทางผู้วิจัยไม่ทำการทดสอบเพราะไม่สามารถหาเครื่องมือวิเคราะห์ได้

บทคัดย่อเพื่อเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ “The science forum 2012” ครั้งที่ 20 ประจำปี 2555 ระหว่างวันที่ 19-20 เมษายน ณ อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

68 The Science Forum 2012

Production of conducting natural rubber composite by graphite waste from metals smelting industry

Amornthep Klayhan¹, Sarut Thongprecha¹
and Sirilux Poompradub^{1,2}

¹ Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University;

² Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chulalongkorn University;
Tel: 0-2218-7518, e-mail: sirilux.p@chula.ac.th

The effect of graphite content on electrical conductivity and mechanical properties of natural rubber composite material was investigated. Carbon black was used as a reference. Characterizations of graphite were verified by proximate analysis, CHN analysis, thermogravimetric analysis, X-ray diffraction and X-ray fluorescence, respectively. Cure characteristic of rubber compounding by using sulfur system for vulcanization in various filler loadings (5-40 part per hundred rubbers: phr) were performed by a moving die rheometer. The mechanical properties and thermal properties of composite materials were examined in terms of tensile strength, tear strength and hardness, respectively. The electrical properties were also tested by four point probe and the morphology of composites was illustrated by using scanning electrons microscopy.

Keywords: Carbon black, conducting polymer, graphite, natural rubber

Study the application of chitosan membrane in DMFC

Phansa Tungwatanapipat¹, Danupol Ngamsittisak¹
and Khantong Soontarapa¹

¹ Fuel Research Center, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University;
Tel: 0-2218-7678, e-mail: khantong@sc.chula.ac.th

This research aimed to develop a direct methanol fuel cell (DMFC) as an alternative electricity generating device. The DMFC in this study used the acid treated commercial chitosan membranes. The

palladium (Pd) catalyst was loaded on the membrane by electroless plating technique. The plated membrane was sandwiched between two carbon papers for hot pressing to prepare as a membrane electrode assembly (MEA). The DMFC demonstration unit was designed and fabricated for testing the membrane performance. The EDX result showed the existence of Pd catalyst on the membrane. The membrane proton conductivity was measured to find the optimum plating condition. It was found that the proton conductivity at optimum condition of 303 K was 0.0198 S/cm. The optimum condition for hot pressing was at 35 kg/cm² and 333 K. The open circuit volt of 41 mV was obtained from the 1 M direct methanol single cell.

Keywords: Chitosan membrane, Pd, electroless plating, DMFC

Morphological, thermal, and mechanical properties of polylactic acid blend with natural rubber and polymethyl methacrylate

Wuthiphong Dechatiwong¹
and Sirilux Poompradub^{2,3}

¹ Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University;

² Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University;

³ Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chulalongkorn University;
Tel. 0-2218-7523-5, e-mail: sirilux_p@chula.ac.th

The polylactic acid (PLA)/natural rubber (NR) composites blend together with polymethyl methacrylate (PMMA) were prepared in an internal mixer. Two kinds of NR were used, i. e., NR latex and solid NR. Due to the poor compatibility between PLA and NR, PMMA was used as a compatibilizer in this study. The PMMA and NR contents were varied. The morphological studies of composite materials were investigated by scanning electron microscope. Thermal and mechanical properties of composite materials were also investigated by thermogravimetric analysis and universal tensile testing, respectively.

Keywords: Polylactic acid, natural rubber, polymethyl methacrylate

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

“การปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดโดยทางธรรมชาติและสารเติมแต่ง” สัญญาเลขที่ RDG 5350057

43

<u>ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ</u>	<u>ชี้แจงโดยนักวิจัย</u>
ความเห็นด้านวิชาการ(Technical) 1. การเปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบประสมกับ output 1.1 ยังขาดการพัฒนาสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด ให้มีสมบัติที่ดี และนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เพราะอุตสาหกรรมสิ่งทอสนใจสมบัติ Tensile มากกว่า Impact ซึ่งในงานวิจัยนี้ Tensile มีค่าต่ำมาก ในขณะที่มีค่า Impact สูง จึงคิดว่าควรหาการประยุกต์ใช้อย่างอื่นน่าจะดีกว่า 2. ควรปรับปรุงรูปแบบการร่างรายงาน โดยเฉพาะบทที่ 3 (ผลการทดลอง) และ 4 (วิเคราะห์ผลการทดลอง) ทำให้ขาดความต่อเนื่องทางเนื้อหา และทำความเข้าใจยาก ดังนั้นควรรวมเป็นบทเดียวกัน และจัดลำดับการนำเสนอให้อ่านเข้าใจง่าย 3. ในส่วนความแม่นยำและความถูกต้องของข้อมูล พบว่า ข้อมูลบางส่วนมีความแปรปรวนสูง (ดูจากกราฟที่แสดงค่าสูงสุด-ต่ำสุด) ขอให้นักวิจัยพิจารณาเพิ่มเติมตามที่คุณวุฒิชี้แจงไปในตัวรายงาน 4. มีความครบถ้วนในส่วนของเนื้อหา แต่นักวิจัยยังขาดระบบการเชื่อมโยงที่ดี	1.1 พอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านค่าพลังงานการกระแทกซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมีการปรับปรุงด้านสมบัติเชิงความร้อน ทั้งอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่อการกระแทกสูง และทนอุณหภูมิสูงได้ดี เช่น หน้ากากนิรภัย อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันก็ยังมีสมบัติเพียงพอต่อการนำไปใช้งานเป็นเส้นใยที่ทนทานต่อแรงดึงและความร้อนได้ อาทิเช่น พรหม ผ้าปูโต๊ะ หรืออุปกรณ์ตกแต่งโดยแสดงตารางเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพลาสติกชนิดอื่นๆดังในภาคผนวก ข หน้า 40 2. ได้ดำเนินการปรับปรุงรูปแบบรายงาน โดยรวมบทที่ 3 และ 4 เป็นบทที่ 3 ในหัวข้อ “ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง” เรียบร้อยแล้ว 3. ได้ดำเนินการแก้ไข และปรับปรุงข้อมูลในส่วนที่มีความแปรปรวนสูง ในรูปที่ 3.5 “พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม” หน้า 15 โดยทำการศึกษาซ้ำ และตัดค่าที่มีความเบี่ยงเบนสูงออกจากกลุ่ม 4. ได้ดำเนินการแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

<u>ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ</u>	<u>ชี้แจงโดยนักวิจัย</u>
5. ควรเรียกชื่อชนิดยางที่ถูกต้อง ไม่นิยมใช้ยางธรรมชาติแข็ง 6. ควรระบุชนิดของน้ำยางที่ใช้ ว่าเป็นน้ำยางสด หรือน้ำยางข้น 7. การเขียนข้อเสนอแนะในเรื่องการผสมน้ำยางใน internal mixer ควรทราบมาก่อนว่า ไม่ควรผสมน้ำยางกับของแข็งอื่นๆ (ในเครื่องมือที่ไม่เหมาะสม) 8. การใช้หน่วย phr ควรเข้าใจความหมาย และลักษณะการใช้ที่นิยมในแบบของนักเทคโนโลยียาง 9. ในหน้าที่ 3 ค่า T_g ไม่ใช่คุณสมบัติหลอมเหลวของพลาสติก นักวิจัยควรแก้ไขให้ถูกต้อง 10. ในย่อหน้าที่ 3 บรรทัดสุดท้าย กล่าวถึงสมบัติของเส้นใยที่ดี ซึ่งผู้ประเมินเคยแนะนำว่า นักวิจัยควรหา specification ของเส้นใยที่เหมาะสมมาเป็น benchmark ของสมบัติที่ทดสอบ และนำค่าสมบัติมาใช้ในการเปรียบเทียบ เพราะสุดท้ายไม่สามารถสรุปได้ว่า สิ่งที่ทำมาใช้งานได้หรือไม่	5. ได้ดำเนินการเปลี่ยนวิธีการเรียกชื่อจาก “ยางธรรมชาติแข็ง” เป็น “ยางธรรมชาติ” เรียบร้อยแล้ว 6. น้ำยางที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น “น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง 60% DRC” ระบุไว้ในส่วนของบทที่ 2 หัวข้อ 2.1 7. ในงานวิจัยนี้ได้ให้นำน้ำยางผสมกับของแข็งโดยตรงลงในเครื่อง internal mixer ผู้วิจัยได้ทำการเคลือบน้ำยางธรรมชาติบนเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดและนำไปอบให้แห้งก่อนถึงจะนำไปผสมใน internal mixer 8. ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หน่วย phr ระบุเป็น Part per hundred part of resin (based on PLA resin) 9. ได้ดำเนินการแก้ไขข้อมูลตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้วในบรรทัดสุดท้าย หน้าที่ 2 เป็น “ส่งผลให้เกิดการเสีรูปได้ง่ายที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก” 10. ในงานวิจัยนี้เตรียมชิ้นงานทดสอบในรูปแบบพลาสติกแผ่น ซึ่งการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับชิ้นงานที่เป็นเส้นใยอาจเป็นไปได้ยาก ทางผู้วิจัยดำเนินการหาสมบัติของเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆที่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยมาแสดงเปรียบเทียบกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสมสูตร S15M3 เพื่อสรุปว่าคุ่มค่าและสามารถใช้งานเป็นเส้นใยได้หรือไม่ โดยแสดงในภาคผนวก ข หน้าที่ 40 โดยสมบัติเชิงกลของพลาสติกชนิดต่าง ๆ ที่แสดงในตาราง ข. 3 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง และ D256 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

<u>ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ</u>	<u>ชี้แจงโดยนักวิจัย</u>
11. ในหน้าที่ 8 โปรดระบุด้วยว่า การบ่มด้วยความร้อนที่สภาวะ 100 °C เวลา 1 ชั่วโมงนั้น อ้างอิงมาจากมาตรฐานใด 12. ตารางที่ 3.1 หน้า 12 จากการสรุปว่า สูตรที่เหมาะสมคือ S15M3 นั้นมีค่า T_g ที่ 37.13 MPa ค่าดังกล่าวแข็งแรงเพียงพอในการใช้เป็นเส้นใยในสิ่งทอหรือไม่ เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆในตารางพบว่า ค่าดังกล่าวค่อนข้างต่ำ 13. ตารางที่ 3.4 หน้า 15 มีค่าสมบัติ Tensile ของหลายสูตรที่หายไปจากตาราง เพราะเหตุใด โดยเฉพาะสูตรที่เหมาะสม คือ S15M3 14. หน้าที่ 17 การอธิบายผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งเป็นตัวประสาน ซึ่งควรจะส่งผลทางบวกกับสมบัติเชิงกลทุกค่า แต่ผลการทดลองแสดงในเชิงลบทั้งหมด โดยให้เหตุผลว่าเกิดการเข้ากันไม่ได้สำหรับเฟส PLA และ NR อยากให้นักวิจัยชี้แจงว่าทำไมจึงไม่หาวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้ และแนวทางในทฤษฎีที่จะสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ได้บ้าง เพื่อให้ PMMA ทำหน้าที่เป็นตัวประสานที่แท้จริงดังที่ควรจะเป็น หรืออาจเปลี่ยนตัวประสานอื่น ดังที่นักวิจัยเคยตอบข้อคิดเห็นในรายงานความก้าวหน้า 9 เดือน	11. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการบ่มด้วยความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D3045-92 แก้วแล้วในหัวข้อ 2.2.2.2 หน้าที่ 8 12. สูตร S15M3 มีค่า T_g 37.13 MPa มีความแข็งแรงเพียงพอในการใช้เป็นเส้นใยในสิ่งทอได้ และได้ดำเนินการแก้ไขเพิ่มเติมไว้ในภาคผนวก ข หน้าที่ 40 13. ตอนแรกผู้วิจัยพิจารณาผลจากสมบัติ tensile เป็นหลัก พบว่าสมบัติ tensile ของพอลิเมอร์ผสมในสูตรที่ใส่ยางธรรมชาติในสัดส่วนต่ำ ๆ ให้ผลที่ดีขึ้น จึงเน้นการพิจารณาสมบัติการบ่มความร้อนเฉพาะในกลุ่มตัวอย่างนี้ จึงมิได้ทำการทดสอบในกรณีชุดของการใส่ปริมาณยางที่ 15 phr ที่ผสมร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต 14. จากข้อมูลที่ได้ในงานวิจัยนี้ การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติได้ นอกจากนี้พอลิเมทิลเมทาคริเลตยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วย แต่อย่างไรก็ตามทางผู้วิจัยก็ได้คำนึงเรื่องนี้ได้พยายามมองหาตัวประสานอื่นมาทดแทนการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลต เช่นการเลือกใช้ epoxidized natural rubber (ENR) เนื่องจากโครงสร้างยาง ENR มีความเป็นขั้วจากหมู่ epoxide ที่สามารถเข้ากับ PLA ได้ และสายโซ่หลักคาร์บอนสามารถที่จะเข้ากับยางธรรมชาติได้ ซึ่งผลการทดลองอยู่ในระหว่างการดำเนินงานวิจัย

<u>ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ</u>	<u>ชี้แจงโดยนักวิจัย</u>
15. หน้าที่ 20 บรรทัดสุดท้าย ขอให้นักวิจัยขยายความถึงค่า Rigidity ของยางธรรมชาติ แข็งเมื่อเทียบกับเนื้อยางที่ได้จากน้ำยางธรรมชาติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการนำมาเป็นเหตุผลของสมบัติเชิงกลที่ลดลงด้วย และถ้าเป็นไปได้ ขอข้อมูลค่า Rigidity ของยางทั้งสองจากเอกสารที่อ้างอิงได้ 16. การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ในภาคผนวก ข การเปรียบเทียบราคาควรเปรียบเทียบกับราคาของวัสดุเส้นใยที่คาดว่าจะเอาไปใช้ทดแทน เพื่อดูว่าคุ้มค่าที่จะนำไปใช้ในงานนี้หรือไม่ หรือไม่ก็เปรียบเทียบกับ Modified PLA ของบริษัทใหญ่ เช่น NatureWork สูตรที่ปรับปรุงค่าความยืดหยุ่นแล้ว	15. นักวิจัยได้มาไตร่ตรองใหม่ตาม comment ของผู้ทรงคุณวุฒิ หลังจากที่น่าในน้ำยางระเหยออกไป ค่า Rigidityของน้ำยางธรรมชาติควรจะมีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ ดังนั้นผู้วิจัยได้เปลี่ยนเหตุผลของการลดลงของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับน้ำยางธรรมชาติ แสดงในหัวข้อที่ 3.2.2 หน้าที่ 16 ดังนี้“สาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีสมบัติแข็งแรงแรงมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับน้ำยาง อาจจะมีผลมาจากในระหว่างกระบวนการผสม อุณหภูมิที่ใช้สูงพอที่จะทำให้ให้น้ำในน้ำยางระเหยออก ซึ่งอาจเกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงาน และเป็นสาเหตุให้การรับแรงกระแทกนั้นลดลงได้ เพราะชิ้นงานมีข้อบกพร่อง (defect)” 16. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้วในภาคผนวก ข หน้าที่ 39
<u>ข้อชี้แจงเพิ่มเติม</u> 1. ทำไม 3.1 ถึง ไม่อั่งไอออสเมียมแต่ 3.2 ถึงอั่ง PMMA น่าจะจับกับ PMMA แล้วเห็นเป็นสีขาวใช่หรือไม่ แต่ทำไม 3.1 ไม่อั่งก็เห็นเป็นสีขาว 2. การใส่น้ำยางลงไป 5, 10 และ 15 phr คิดเป็นปริมาณเนื้อยางแห้ง 3, 6 และ 9 กรัม ดังนั้นคุณสามารถเปรียบเทียบคร่าว ๆ ได้ระหว่างการใช้อย่างแห้งสูตร 5 และ 10 กรัม กับสูตรน้ำยาง 10 และ 15 phr ดังนั้นการเปรียบเทียบข้อมูลในหัวข้อ 3.2.2 ควรเขียนให้ชัดเจนกว่านี้	1. การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยผ่านการออสเมียม เพื่อเป็นการทดสอบว่ายางธรรมชาติยังคงอยู่ ไม่สลายตัวไปหลังจากผสมใน internal mixer ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส โดยการอั่งไอออสเมียมนั้นไม่มีผลต่อ PMMA ซึ่งมองเห็นเป็นฟอสสีขาวอยู่แล้วแม้จะอั่งหรือไม่ได้อั่งไอออสเมียม 2. ในงานวิจัยนี้ปริมาณยางที่ผสมร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดทั้ง 2 กรณี คือยางธรรมชาติและน้ำยางธรรมชาติ ในปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ได้มีการคำนวณ คิดปริมาณเนื้อยางธรรมชาติในปริมาณที่เท่ากันแล้ว(การคำนวณปริมาณของยางธรรมชาติและน้ำยางแสดงในหัวข้อภาคผนวก ก) ดังนั้นข้อมูลที่แสดงในส่วนของผลการทดลองสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้โดยตรง

<u>ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ</u>	<u>ชี้แจงโดยนักวิจัย</u>
3. T_mสองพีคมีได้หลายความหมาย 3.1 พอลิเมอร์ 2 ตัว มีผลึกทั้งคู่ และมีอุณหภูมิหลอมผลึกใกล้เคียงกัน 3.2 พอลิเมอร์ตัวเดียวแต่มีผลึก 2 ขนาด ซึ่งอาจเกิดได้จาก - มี 2 ขนาดตั้งแต่ต้น การที่อุณหภูมิหลอมพอลิเมอร์ผสมช่วยให้เกิดผลึก 2 ขนาด (ของพอลิเมอร์ตัวเดียว) - อุณหภูมิในการวิเคราะห์ DSC ไม่เหมาะสม ความร้อนที่ทำให้ทำให้ผลึกที่ฝังอยู่ fold ต่อทำให้ผลึกบางส่วนใหญ่ขึ้น เมื่อถึงจุดหลอมจึงเห็น T_mเป็นสองพีค ข้อ 3.1 อาจบอกได้ว่าพอลิเมอร์ 2 ตัวไม่เข้ากันจึงเห็นเป็น T_mสองพีค แต่ต้องเป็น T_mของพอลิเมอร์ 2 ตัว ไม่ใช่ตัวเดียว ถ้าเป็นข้อ 3.2 จะบอกไม่ได้ถึงความเข้ากันได้หรือไม่ได้ของพอลิเมอร์	3. ทางคณะผู้วิจัยได้อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 3.3.1 หน้า 26 ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิตามหัวข้อ 3.1 ว่าพอลิเมอร์ทั้ง 2 เข้ากันไม่ได้เพราะพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติต่างมีอุณหภูมิการหลอมผลึกที่ไม่เท่ากัน จึงปรากฏพีคของ T_mเป็น 2 พีค โดยในกรณีที่ 3.2 มีน่าจะเป็นไปได้ เพราะในการทดสอบ pure PLA ให้ T_mเพียง 1 พีค นั้นหมายความว่าผลึกน่าจะมีขนาดใกล้เคียงกัน หรือ อีกนัยหนึ่งคือมี size เพียงขนาดเดียว ส่วนในกรณีที่สองที่กล่าวว่า ภาวะในการทดสอบเครื่อง DSC ไม่เหมาะสมก็ไม่อาจจะเป็นไปได้ เพราะถ้าสังเกตรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับน้ำยางมีลักษณะเป็นพีคเดียว (ในกรณีที่การใส่น้ำยางในปริมาณต่ำ ๆ) แต่จะเกิดแยกพีคขึ้นเป็น 2 พีค ที่ปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้นเป็น 15 phr เพราะความเข้ากันไม่ได้ระหว่างเฟสทั้ง 2 ของพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยางธรรมชาตินั่นเอง