

การปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิเอเล็กติกแอซิดโดยยางธรรมชาติ
และสารเติมแต่ง

นายวุฒิพงษ์เดชาติวังศ์ ณ อยุธยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ที่ส่งมาทางบัณฑิตวิทยาลัย
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

IMPROVEMENT OF THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYLACTIC ACID BY NATURAL RUBBER AND ADDITIVES

Mr. Wuthiphong Dechatiwong Na Ayutthaya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิ

แล็กติกแอซิดโดยยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง

โดย

นายวุฒิพงศ์ เดชาติวงศ์ ณ อยุธยา

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพฤษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธารินี นามพิชญ์)

วุฒิพงษ์ เดชาติวงศ์ ณ อยุธยา : การปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิ
 แล็กติกแอซิดโดยยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง (IMPROVEMENT OF THERMAL AND
 MECHANICAL PROPERTIES OF POLYLACTIC ACID BY NATURAL RUBBER
 AND ADDITIVES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ, 70 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาและมุ่งเน้นพัฒนาสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดให้สามารถประยุกต์ใช้
 งานได้หลากหลายขึ้น โดยผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติและตัวประสานสองชนิด
 ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต และยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ รวมทั้งการใช้ตัวประสานร่วม ใน
 รูปแบบการทำพอลิเมอร์ผสม ผสมในเครื่องบดผสมภายใน และขึ้นรูปแผ่นผลิตภัณฑ์โดยใช้
 แม่พิมพ์แบบอัด ศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติและปริมาณตัวประสานที่ใช้แต่ละชนิดต่อ
 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคือการผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติ
 15 ส่วนต่อพอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน และใช้ตัวประสานร่วมที่ปริมาณยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์
 และพอลิเมทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 3 ส่วนและ 1 ส่วนต่อพอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน ตามลำดับ
 ให้ระยะยืด ณ จุดขาดสูงและค่าพลังงานการกระแทกถึง 94.46 เปอร์เซ็นต์ และ 230.61 จูลล์ต่อ
 เมตร ซึ่งให้ค่าที่สูงกว่าค่าของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ถึง 11.4 และ 9.4 เท่า ตามลำดับ การ
 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิการสลายตัว เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และ
 สมบัติการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะสัญญาณพบว่าพื้นผิวมีความ
 เข้ากันได้ดีกว่าการใช้ตัวประสานเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง ตลอดจนสมบัติเชิงพลวัตด้านมอดูลัส
 สะสมนั้นมีค่าสูงเทียบเท่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ปลายมือชื่อ นิสิต

ปีการศึกษา 2555..... ปลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5272550223: MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLYLACTIC ACID/ NATURAL RUBBER/ POLYMETHYL METHACRYLATE/ EPOXIDIZED NATURAL RUBBER/ POLYMER BLEND

WUTHIPHONG DECHATIWONG NA AYUTTHAYA : IMPROVEMENT OF THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYLACTIC ACID BY NATURAL RUBBER AND ADDITIVES. ADVISOR : ASST. SIRILUX PHUMPRADUB, Ph.D., 70 pp

This research is to study and improve the polylactic acid (PLA) for many applications by blending with natural rubber (NR). Two types of compatibilizer i.e. polymethyl methacrylate (PMMA) and epoxidized natural rubber (ENR) including PMMA-ENR co-compatibilizer were used. The polymer blends were prepared in an internal mixer and molded process by compression molding. The effects of NR and compatibilizer on properties of PLA were studied. The results show that the optimal condition of the blend formulation was mixing between PLA and NR 15 phr with using ENR-PMMA as co-compatibilizer at 3 and 1 phr, respectively. The elongation at break and impact energy of polymer blend were significantly increased up to 94.46 % and 230.61 J/m, respectively. Their values were higher than those of pure PLA (11.4 and 9.4-fold, respectively). Thermal properties of polymer blend such as decomposition temperature, percent crystallinity and thermal aging were improved. The well compatibility between PLA and NR was obtained by using the ENR-PMMA as co-compatibilizer as seen by SEM. The dynamic properties in term of storage modulus were comparable with pure PLA.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature

Academic Year: 2012..... Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ ที่ให้คำปรึกษาแนวคิด และแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนวิธีการแก้ไขปัญหา รวมถึงความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจึงทำให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตะการพฤษ และ ดร.ธารินี นามพิชญ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความเห็น คำแนะนำ และแนวทางในการวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนสำหรับการ ทำงานวิจัย และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ช่วยเหลือในด้านเทคนิคและ สถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรประจำภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกในการ ใช้ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ และเทคนิคต่าง ๆ ในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และญาติพี่น้อง ที่คอยดูแล ให้กำลังใจ รวมถึง ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนต่าง ๆ ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ

บทที่

1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย	2
	1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
	2.1 พอลิแล็กติกแอซิด	5
	2.1.1 สเตอริโอไอโซเมอร์ของแล็กไทด์	6
	2.1.2 การผลิตพอลิแล็กติกแอซิด	6
	2.1.3 ข้อดี-ข้อเสียของและการประยุกต์ใช้งานพอลิแล็กติกแอซิด	7
	2.1.3.1 ข้อดีของพอลิแล็กติกแอซิด	7
	2.1.3.2 ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด	8
	2.2 ยางธรรมชาติ	8
	2.3 พอลิเมออร์ผสม	9
	2.3.1 กลไกสภาพความเข้ากันได้	10
	2.3.2 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้	10

	หน้า
2.3.2.1 การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์	10
2.3.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์	11
2.3.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำ ปฏิกิริยา	11
2.3.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอไรเซชัน ในระหว่างการผสม	12
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานของพอลิเมอร์ผสม	12
2.3.3.1 สัดส่วนการผสมของพอลิเมอร์	12
2.3.3.2 ความหนืดของพอลิเมอร์	13
2.3.3.3 วิธีการผสม	13
2.3.4 การเพิ่มความเหนียวของพลาสติกด้วยยาง	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	18
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	18
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	18
3.2.1 การเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสม	18
3.2.2 การทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม	18
3.2.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล	18
3.2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน	19
3.2.2.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา	20
3.2.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต	20
4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	22
4.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมยางธรรมชาติ	22
4.1.1 สัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ	22
4.1.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับผสมยางธรรมชาติ	22
4.1.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ	26

4.2 สมบัติและเปรียบเทียบสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมยางธรรมชาติร่วมกับ	
ตัวประสาน.....	28
4.2.1 สัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัว	
ประสาน.....	28
4.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัว	
ประสาน.....	31
4.2.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับ	
ตัวประสาน.....	36
4.3 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วม.....	42
4.3.1 สัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัว	
ประสานร่วม.....	42
4.3.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัว	
ประสานร่วม.....	43
4.3.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับ	
ตัวประสานร่วม.....	46
4.3.4 สมบัติเชิงพลวัตของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับ	
ตัวประสานร่วม.....	48
4.4 การวิเคราะห์การประยุกต์ใช้งานของพอลิเมอร์ผสม.....	51
5 สรุปผลการทดลอง.....	52
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	61
ภาคผนวก ค.....	62
ภาคผนวก ง.....	66
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	สูตรการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์..... 21
4.1	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม 25
4.2	สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม..... 27
4.3	คุณสมบัติเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, คุณสมบัติการเกิดผลึก, คุณสมบัติการหลอมเหลวผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ 28
4.4	คุณสมบัติเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, คุณสมบัติการเกิดผลึก, คุณสมบัติการหลอมเหลวผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริลิตและยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์เป็นตัวประสาน 41
4.5	คุณสมบัติเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, คุณสมบัติการเกิดผลึก, คุณสมบัติการหลอมเหลวผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์-พอลิเมทิลเมทาคริลิต..... 47
4.6	ค่าความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาด ก่อน-หลังการบ่มด้วยความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์-พอลิเมทิลเมทาคริลิต..... 48
ก.1	สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้ในงานวิจัย 58
ก.2	สมบัติของยางธรรมชาติเกรด STR-5L ที่ใช้ในงานวิจัย..... 59
ก.3	สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 59
ก.4	สมบัติของพอลิเมทิลเมทาคริลิตที่ใช้ในงานวิจัย 60
ค.1	ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 62
ค.2	ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานพอลิเมทิลเมทาคริลิต 63
ค.3	ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ 64
ค.4	ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์-พอลิเมทิลเมทาคริลิต..... 65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด..... 5
2.2	สเตรโอไอโซเมอร์ของแล็กไทด์ โดย (a) แอล-แล็กไทด์ (b) เมโซ-แล็กไทด์ และ (c) ดี-แล็กไทด์..... 6
2.3	กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด..... 7
2.4	สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ..... 9
2.5	ผลของปริมาณพอลิเมอร์ B ต่อลักษณะของพอลิเมอร์ผสมของ A และ B..... 13
4.1	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ผ่านการอ้งไฮออสเมียมออกไซด์ (Os_2O_4) (a) PLA 100, NR 5 phr (b) PLA 100, NR 10 phr และ (c) PLA 100, NR 15 phr..... 22
4.2	กราฟแสดงค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่าง ๆ..... 23
4.3	ความแข็งของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ..... 24
4.4	พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ..... 24
4.5	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ผ่านการอ้งไฮออสเมียมออกไซด์ (Os_2O_4) (a) PLA 100, NR 5-15, PMMA 1 phr, (b) PLA 100, NR 5-15, PMMA 3 phr และ (c) PLA 100, NR 5-15, PMMA 5 phr .. 29
4.6	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ผ่านการอ้งไฮออสเมียมออกไซด์ (Os_2O_4) (a) PLA 100, NR 5-15, ENR 1 phr, (b) PLA 100, NR 5-15, ENR 3 phr, (c) PLA 100, NR 5-15, ENR 5 phr..... 30

รูปที่	หน้า	
4.7	กราฟแสดงค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด ที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยาง ธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	32
4.8	ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิล เมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	33
4.9	พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิ เมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	34
4.10	กราฟแสดงค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด ที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	37
4.11	ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติ อิพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	38
4.12	พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณยาง ธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	39
4.13	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิ แล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ 15 phr ร่วมกับยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ 3 phr และพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr ที่ผ่านการอ้งไอออสเมียมออกไซด์ (Os_2O_4).....	43
4.14	ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีต่อความเค้น-ความเครียดของ พอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และยาง ธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3).....	44

รูปที่	หน้า
4.15 ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีต่อค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3).....	45
4.16 ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีต่อค่าพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3).....	45
4.17 กราฟแสดงสมบัติเชิงพลวัตของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วม โดย (a) มอดูลัสสะสม และ (b) ค่าแทนเดลด้า.....	50
ง.1 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ.....	66
ง.2 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) - (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	67
ง.3 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) - (c) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ.....	68
ง.4 เทอร์โมแกรมแสดงผลของปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ 15 phr ร่วมกับยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3).....	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid: PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ มีความแข็งแรงสูง ผสมเข้ากับพอลิเมอร์ชนิดอื่นได้ดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ใช้ทำพลาสติกย่อยสลาย (bioplastic) เช่น บรรจุภัณฑ์ พิล์ม เส้นใย อุปกรณ์ทางการแพทย์ (biomedical) เช่น วัสดุย่อยสลายได้ในตัวผู้ป่วย และวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) อย่างไรก็ตาม พอลิแล็กติกแอซิดมีข้อด้อยคือ มีความแข็งแรงสูง มีการยึดตัวและความเหนียวต่ำ ทนทานต่อแรงกระแทกน้อย และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ที่ 55-60 องศาเซลเซียส จึงทำให้เสียรูปง่าย ข้อด้อยดังกล่าวส่งผลให้พอลิแล็กติกแอซิดมีขีดจำกัดในการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดปรับปรุงสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature: T_g) ของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเทคนิคการทำพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ซึ่งเป็นเทคนิคทั่วไปที่สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดโดยการผสมเข้ากับวัสดุชนิดอื่น วัสดุที่สนใจจะนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลคือยางธรรมชาติ ซึ่งมีความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง และการฉีกขาดสูง แต่อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความเป็นขี้ดต่ำ ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดเป็นวัสดุที่มีขี้ด ดังนั้นการผสมกันระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติจึงเข้ากันไม่ได้ การเลือกใช้ตัวประสานอย่างพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate: PMMA) และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (epoxidized natural rubber: ENR) ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเสริมความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ ซึ่งตัวประสานทั้งสองมีหมู่ที่มีขี้ด โดยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (ประมาณ 115 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิการสลายตัวสูง ซึ่งน่าจะช่วยปรับปรุงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดได้และการใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสานที่มีข้อดีคือสามารถผสมร่วมกับยางธรรมชาติและพอลิแล็กติกแอซิดได้ดีมาก ก็น่าจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดสูงขึ้น

จากข้อดีของยางธรรมชาติ พอลิเมทิลเมทาคริเลต และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่กล่าวไปข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด

โดยทำการผสมร่วมกันกับยางธรรมชาติ โดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด โดยผสมยางธรรมชาติร่วมกับสารเติมแต่ง

1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของยางธรรมชาติ และผลของตัวประสานที่มีผลต่อสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดโดยเลือกใช้ตัวประสานที่มีขั้วซึ่งมีแนวโน้มในการผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติได้ดีคือพอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ โดยศึกษาปริมาณยางธรรมชาติที่ใช้ในระบบเท่ากับ 5, 10 และ 15 phr และปริมาณตัวประสานที่ใช้เท่ากับ 1, 3 และ 5 phr รวมทั้งทดลองการใช้ตัวประสานร่วม ศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึงสูงสุด ระยะเวลายืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทก และความแข็ง) สมบัติเชิงความร้อน (อุณหภูมิการสลายตัว อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการหลอมผลึก เปอร์เซนต์ความเป็นผลึก และสมบัติการบ่มด้วยความร้อน) และสมบัติเชิงพลวัต (มอดุลัสสะสม มอดุลัสที่สูญเสีย และค่าแทนเดลต้า) และสามารถเปรียบเทียบสมบัติที่ปรับปรุงขึ้นของพอลิเมอร์ผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ได้

1.4 การดำเนินงานวิจัย

1.5.1 จัดหาวัตถุดิบเพื่อใช้ในงานวิจัย

1.5.2 หาสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม และทำการบดผสมพอลิแล็กติกแอซิดเกรด 2002D (มวลโมเลกุลเท่ากับ 121400 กรัมต่อโมล) ร่วมกับยางธรรมชาติและตัวประสาน (พอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์) ในอัตราส่วนดังนี้

- พอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน ยางธรรมชาติ 0-15 ส่วน และพอลิเมทิลเมทาคริเลต 0-5 ส่วนต่อพอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน

- พอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน ยางธรรมชาติ 0-15 ส่วน และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 0-5 ส่วนต่อพอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน
- พอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน ยางธรรมชาติ 0-15 ส่วน ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 0-5 ส่วน และพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อพอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน

(ไม่มีการเติมสารเคมีที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ) ด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer)

- 1.5.3 ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในรูปของแผ่น (sheet) โดยใช้แม่พิมพ์แบบอัด (compression molding)
- 1.5.4 ศึกษาผลของยางธรรมชาติและตัวประสานที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด ได้แก่
- ความแข็ง (hardness) โดยเครื่องวัดความแข็งของยางและพลาสติก (durometer) ตาม ASTM D2240
 - ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) โดยเครื่องทดสอบสมบัติทางกลแบบเอนกประสงค์ (universal testing machine) ตาม ASTM D638
 - การยืดตัวขณะขาด (elongation at break) โดยเครื่องทดสอบสมบัติทางกลแบบเอนกประสงค์ (universal testing machine) ตาม ASTM D638
 - ความเหนียว (toughness) โดยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact testing machine) ตาม ASTM D256
- 1.5.5 ศึกษาค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature: T_g) ของพอลิเมอร์ผสมโดยดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter: DSC)
- 1.5.6 ศึกษาการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมโดยเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิส (thermogravimetric analysis: TGA) เพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียไป (weight loss)
- 1.5.7 ศึกษาสมบัติการบ่มตัวด้วยความร้อน (thermal aging) ของพอลิเมอร์ผสม

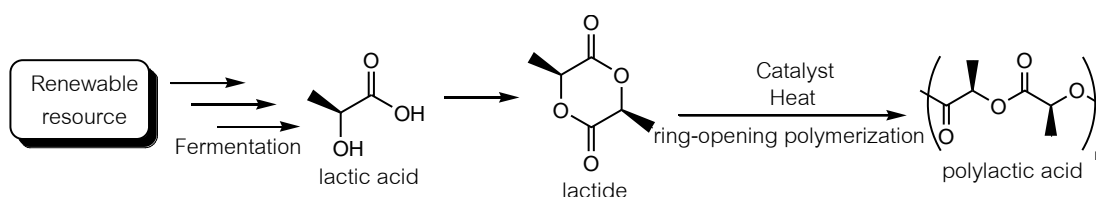
- 1.5.8 ศึกษาสมบัติเชิงพลวัต (dynamic mechanical properties) ของพอลิเมอร์ผสม โดยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (dynamic mechanical analysis: DMA) เพื่อหาค่า
- มอดุลัสสะสม (storage modulus: E')
 - มอดุลัสที่สูญเสียไป (loss modulus: E'')
 - การสูญเสียแทนเจนต์ (loss tangent: $\tan\delta$)
- 1.5.9 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)
- 1.5.10 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด [1-3]

พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid) หรือพอลิแล็กไทด์ (polylactide) เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ สังเคราะห์ได้จากการหมักวัสดุทางธรรมชาติจำพวกพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ได้เป็นกรดแล็กติก (lactic acid) แต่กรดแล็กติกไม่สามารถพอลิเมอไรเซชันได้โดยตรง เนื่องจากแต่ละหน่วยของการพอลิเมอไรส์จะมีการสูญเสียโมเลกุลน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้พอลิแล็กติกแอซิดมีคุณภาพและมวลโมเลกุลต่ำ การสังเคราะห์จึงต้องนำกรดแล็กติกผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน เรียกว่า แล็กไทด์ (lactide) หลังจากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยาเปิดวง จะได้พอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของแล็กไทด์ที่มีสายยาว กระบวนการสังเคราะห์ของพอลิแล็กติกแอซิดสรุปได้ดังรูปที่ 2.1

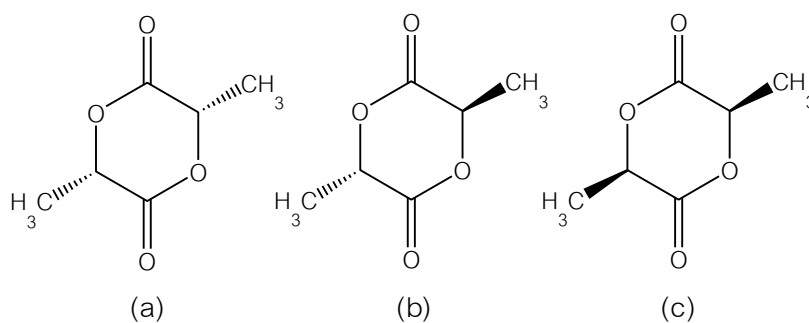


รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีศักยภาพในการทดแทนพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ยกตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิโพรพิลีน (polypropylene) พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเรต (polyethylene terephthalate) และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป ด้วยสาเหตุนี้พอลิแล็กติกแอซิดจึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และมีสมบัติที่เทียบเท่าพลาสติกทั่วไป เช่น พลาสติกบรรจุภัณฑ์ ฟิล์ม อุปกรณ์ทางการแพทย์และวิศวกรรม

2.1.1 สเตอริโอไอโซเมอร์ของแล็กไทด์ [1]

ในกระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด แล็กติกแอซิดนั้นไม่สามารถพอลิเมอไรซ์เป็นพอลิแล็กติกแอซิดได้ทันที จำเป็นต้องเกิดเป็นสารตัวกลางซึ่งเรียกว่าแล็กไทด์ก่อน จึงจะทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงได้พอลิเมอไรซายยาวของพอลิแล็กติกแอซิด โดยในขั้นการผลิต แล็กไทด์มีโครงสร้างที่เป็นไปได้สามรูปแบบ คือ ดี-แล็กไทด์ (D-lactide) แอล-แล็กไทด์ (L-lactide) และ ดี, แอล-แล็กไทด์หรือเมโซ-แล็กไทด์ (D,L-lactide, Meso-lactide) โครงสร้างของแล็กไทด์ทั้งสามแสดงดังรูปที่ 2.2 ดี- และ แอล-แล็กไทด์ มีโครงสร้างที่เหมือนเป็นภาพสะท้อนกันอยู่ จึงมีสมบัติที่คล้ายกัน แต่เมโซ-แล็กไทด์นั้นไม่เป็นภาพสะท้อนกับอีกสองไอโซเมอร์ที่กล่าวมา จึงมีสมบัติที่แตกต่างออกไป ก่อนกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน แล็กไทด์ต้องถูกแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่มีโครงสร้างของดี-แล็กไทด์ต่ำ (low D-lactide stream) และส่วนที่มีดี-หรือเมโซ-แล็กไทด์สูง (high D-/Meso-lactide stream) การพอลิเมอไรเซชันระหว่างแล็กไทด์ที่มีสเตอริโอไอโซเมอร์แตกต่างกันจะส่งผลให้สามารถควบคุมความยาวของสายโซ่หรือมวลโมเลกุลรวมทั้งความบริสุทธิ์ของพอลิแล็กติกแอซิดได้ โดยการกำหนดจำนวนของดี-แล็กไทด์ พอลิแล็กติกแอซิดที่ประกอบด้วยแอล-แล็กไทด์จำนวนมากจะมีความเป็นผลึกที่สูง ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดที่ประกอบด้วยดี-แล็กไทด์จำนวนมากจะมีความเป็นอสัณฐาน

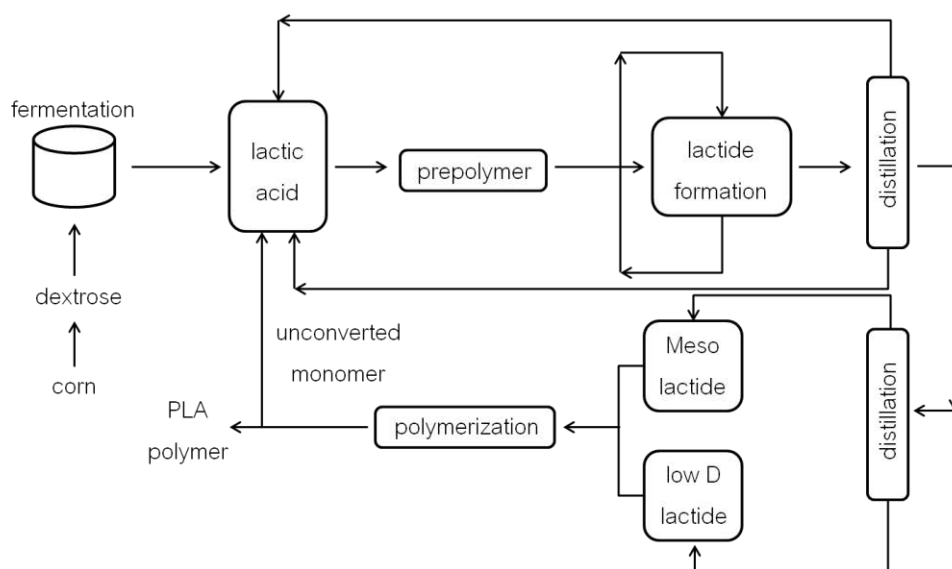


รูปที่ 2.2 สเตอริโอไอโซเมอร์ของแล็กไทด์ โดย (a) แอล-แล็กไทด์ (b) เมโซ-แล็กไทด์ และ (c) ดี-แล็กไทด์

2.1.2 การผลิตพอลิแล็กติกแอซิด [2,3]

การผลิตพอลิแล็กติกแอซิดเริ่มต้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1983 ในครั้งแรกรวมสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดยังไม่ดีมากนัก และด้วยราคาที่สูงมากเนื่องจากการผลิตยังผลิตได้ในปริมาณน้อย การใช้งานจึงถูกจำกัดแค่ ใช้เป็นเครื่องมือทางการแพทย์ จนกระทั่งในปี 2002 บริษัท NatureWork ได้ก่อตั้งขึ้น ซึ่งมีระบบการผลิตที่สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก พอลิแล็กติกแอซิด

จึงเป็นที่นิยมมากขึ้น และเริ่มเข้ามาทดแทนพลาสติกในปัจจุบันได้ กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิดแสดงดังรูปที่ 2.3 เริ่มจากการหมักแป้งให้กลายเป็นแล็กติกแอซิดและทำปฏิกิริยาคอนเดนเซชันพอลิเมอร์ไรเซชันต่อพรีพอลิเมอร์มวลโมเลกุลต่ำของพอลิแล็กติกแอซิด (มวลโมเลกุลประมาณ 5000) จากนั้นจึงเปลี่ยนพรีพอลิเมอร์เป็นวงแล็กไทด์โดยทำปฏิกิริยาปิดวงและทำการกลั่นแล็กไทด์ที่ได้เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ ขั้นตอนสุดท้ายคือทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ของแล็กไทด์ โดยใช้ดีบุกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้พอลิแล็กติกแอซิดซึ่งมีมวลโมเลกุลสูง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแล้ว มอนอเมอร์ที่ยังเหลืออยู่ในปฏิกิริยาจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการเริ่มต้นของการผลิต



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด [2]

2.1.3 ข้อดี-ข้อเสียและการประยุกต์ใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิด [1]

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์พลาสติกที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเนื่องจากการทดแทนพอลิเมอร์ชนิดเก่าที่ได้จากอุตสาหกรรม เช่น บรรจุภัณฑ์ต่างๆ ฟิล์ม เส้นใย และยังใช้งานเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ด้วย โดยการใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิดมีทั้ง ประโยชน์ที่ได้รับและข้อจำกัดที่เพิ่มมากขึ้น โดยข้อดี-ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิดสรุปได้ดังนี้

2.1.3.1 ข้อดีของพอลิแล็กติกแอซิด

- เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นสมบัติสำคัญของพอลิแล็กติกแอซิดที่ได้รับการสนับสนุนให้ใช้ทดแทนพลาสติกในปัจจุบัน เนื่องจากการผลิตโดยใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นสาร

ตั้งต้น จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติได้น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

- สามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิคเดียวกันกับพอลิเมอรัพลาสติกในปัจจุบัน เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เหนือกว่าไบโอพอลิเมอรัชนิดอื่นๆ ทำให้สามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย เช่น การอัดรีด (extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection) การเป่าฟิล์ม (blow film) รวมถึงการสปินเป็นเส้นใย (fiber spinning)

- ประหยัดพลังงาน การผลิตพอลิแล็กติกแอซิดใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าพอลิเมอรัจากอุตสาหกรรมเคมีถึงร้อยละ 25-55 และในอนาคตอาจจะลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 อีกทั้งการใช้พลังงานในการผลิตที่น้อยลงย่อมส่งผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์พอลิเมอรัด้วย

2.1.3.2 ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด

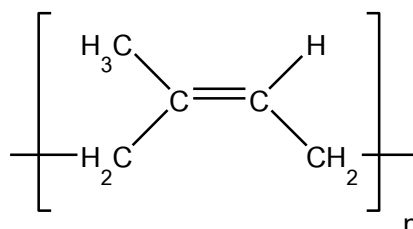
- มีความเหนียวต่ำมาก โดยพอลิแล็กติกแอซิดมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะ มีการยืดตัวสูงสุดที่ต่ำกว่า 10 % ข้อเสียนี้เป็นการจำกัดการใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิดอย่างมาก ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความเครียด และความทนต่อแรงกระแทกสูง

- มีการสลายตัวในอัตราเร็วต่ำ เนื่องจากการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล สัณฐานวิทยา โครงสร้างทางสเตอริโอเคมี เป็นต้น ซึ่งการสลายตัวอาจช้าลงถึง 3 ปีกว่าจะสลายตัวหมด

2.2 ยางธรรมชาติ [4-5]

ยางธรรมชาติคือพอลิเมอรัชนิดหนึ่งซึ่งมีความสามารถในการคืนรูปได้ ได้จากต้นยางพารา (ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Hevea brasiliensis*) โดยยางพาราจัดเป็นหนึ่งในพืชที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมชนิดหนึ่งในประเทศไทย จัดเป็นพืชเศรษฐกิจอันดับสองของประเทศรองจากข้าว ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุดในโลก การผลิตยางธรรมชาติสามารถทำได้ในรูปแบบต่างๆ เช่น ยางดิบแห้ง ซึ่งได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (ribb smoke sheet) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet) ยางแท่งเอสทีอาร์ (Standard Thai Rubber, STR) ยางเครพ (crepe) และยางskim (skim) อีกประเภทหนึ่งคือ ยางเหลว ซึ่งได้แก่ น้ำยางข้น (concentrated Latex) และน้ำยางคงรูป (prevulcanized rubber) ยางธรรมชาติมีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น ซีล-1,4-พอลิ

ไอโซพรีน (cis-1, 4-polyisoprene) โดยมีลักษณะเป็นสายยาวของไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง โดยโครงสร้างของยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

จากสูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนส่วนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในภาวะถูกดึงยืดหรือที่อุณหภูมิต่ำ ยางธรรมชาติสามารถเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้ดีขึ้น ทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้ ซึ่งการที่ยางธรรมชาติเกิดผลึกจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลดี เช่น ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติคือมีความยืดหยุ่น (elasticity) สูงมาก เมื่อแรงกระทำหมดไป ยางธรรมชาติจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมที่ขนาดเดิมหรือใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว จากสมบัติที่ดีที่กล่าวมา ยางธรรมชาติสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น ยางรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ยางรัดของ ถุงมือหรือรองเท้ายาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง เป็นต้น

2.3 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) [6]

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยนำพอลิเมอร์สองชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ สารละลาย (solution) หรือสภาวะหลอมเหลว (molten state) มาผสมรวมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดรวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างพอลิเมอร์ต่างชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยธรรมชาติแล้วเป็นไปได้ยาก พอลิเมอร์ผสมจึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไป

อย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง (defects) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาสภาพความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมรวมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกัน จึงไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างอิสระและเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์สองชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่นการดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

2.3.1 กลไกสภาพความเข้ากันได้ (compatibility mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (stress concentration) จากเฟสกระจาย (disperse phase) ในเมทริกซ์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้โครงสร้างพื้นฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

2.3.2 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (method of compatibilization) [6]

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้ขึ้นกับหลายปัจจัย โดยอาจพิจารณาจากความยากง่าย หรือต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

2.3.2.1 ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic miscibility)

เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมมูลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ

	ΔG	=	$\Delta H - T\Delta S$
โดยที่	ΔG	=	การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม
	ΔH	=	การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม
	ΔS	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม
	T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ ระบบของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมเข้ากันได้ดี ΔG จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งระบบจริงแล้ว ΔG มักจะมีค่าเท่ากับ ΔH และมี ΔS ที่น้อยมาก พอลิเมอร์ผสมจึงเข้ากันได้ไม่ดี ($\Delta G > 0$)

2.3.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (addition of block or graft copolymers)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม

2.3.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (addition of functional/reactive polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น การเกิดพันธะไฮดรอกซิลหรือกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่พอลิโอฟีนิล โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มี

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโพลีเอไมด์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสมที่ได้รับความนิยมทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

2.3.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอโรเรเซชัน ในระหว่างการผสม (In-situ grafting polymerization)

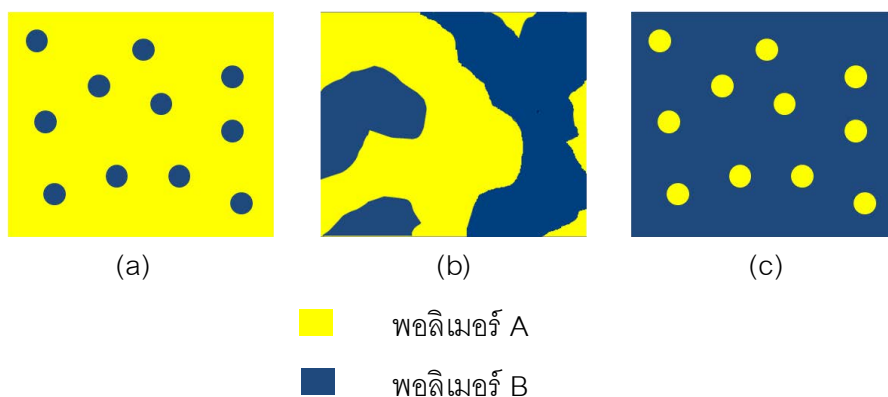
การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอโรเรเซชันในระหว่างการผสม (reactive blending) เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่น ๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดีกว่า

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานของพอลิเมอร์ผสม (effect of factor on morphology of polymer blend) [7]

ลักษณะสัณฐานของพอลิเมอร์ผสมเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์และคาดเดาสมบัติทั้งสมบัติทางกายภาพและเชิงกล โดยลักษณะสัณฐานของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

2.3.3.1 สัดส่วนการผสมของพอลิเมอร์ (polymer proportion)

สำหรับพอลิเมอร์สองชนิดที่เข้ากันไม่ได้ ยกตัวอย่างพอลิเมอร์ A และ B โดยพอลิเมอร์ B ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าจะแยกตัวและกระจายอยู่ในเฟสที่ใหญ่กว่าของพอลิเมอร์ A พอลิเมอร์ A เรียกว่า เฟสต่อเนื่อง (continuous phase) และพอลิเมอร์ B เรียกว่า เฟสกระจาย (dispersed phase) ดังแสดงในรูปที่ 2.5(a) ถ้าใส่ปริมาณของพอลิเมอร์ B เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ B จะกลายเป็นเฟสต่อเนื่อง ในขณะที่เดียวกันพอลิเมอร์ A จะกลายเป็นเฟสกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.5(c) สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วนที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ B ซึ่งมีปริมาณมากกว่าพอลิเมอร์ A ดังแสดงในรูปที่ 2.5(b) แสดงถึงพื้นที่พอลิเมอร์ผสม B มีมากกว่าพอลิเมอร์ A แต่พอลิเมอร์ทั้งสองต่างร่วมกันเป็นเฟสต่อเนื่อง (co-continuous phase)



รูปที่ 2.5 ผลของปริมาณพอลิเมอร์ B ต่อลักษณะของพอลิเมอร์ผสมของ A และ B

2.3.3.2 ความหนืดของพอลิเมอร์ (polymer viscosity)

พอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำจะมีแนวโน้มเป็นเฟสต่อเนื่อง ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำกว่าจะมีแนวโน้มเป็นเฟสกระจาย เพราะฉะนั้น ความแตกต่างทางความหนืดของแต่ละพอลิเมอร์ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะฐานที่แตกต่างกัน

2.3.3.3 วิธีการผสม (blend method)

วิธีการผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะฐานของพอลิเมอร์ผสม กระบวนการผสมมีมากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ต้องการผสม เช่น การผสมทางเชิงกล (mechanical blending) การผสมทางกลร่วมกับทางเคมี (mechano-chemical blending) การผสมในรูปของน้ำยาง (latex blending) การผสมทางเคมี (chemical blending) และการผสมในรูปของสารละลาย (solution blending) แต่ละกระบวนการที่กล่าวมา มีความแตกต่างกันด้านแรงเฉือน ซึ่งส่งผลให้ลักษณะฐานของพอลิเมอร์ผสมแตกต่างกันด้วยตามปกติแล้ว ขนาดของพอลิเมอร์ในเฟสกระจายจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มเวลาและเพิ่มแรงในการผสม อีกปัจจัยหนึ่งคือชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม ซึ่งแต่ละชนิดให้ความเค้นเฉือน (shear stress) และอัตราการไหลของพอลิเมอร์ (polymer flow rate) ในระหว่างกระบวนการผสมที่แตกต่างกัน

2.3.4 การเพิ่มความเหนียวของพลาสติกด้วยยาง (rubber toughening plastic)

เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ส่วนมาก เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิแล็กติกแอซิด เป็นต้น มีสมบัติแข็งเปราะเมื่อถูกดึงยืด สมบัตินี้ดังกล่าวส่งผลต่อการจำกัดการประยุกต์ใช้งานของพอลิเมอร์นั้น ๆ ทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคือการผสมเข้ากับอีลาสติกพอลิ

เมอร์ได้แก่ ยางชนิดต่าง ๆ โดยส่วนที่เป็นอีลาสติกจะกระจายตัวอยู่ในเฟสของพลาสติกซึ่งเป็นของแข็ง (ขนาดประมาณ 10-20 ไมโครเมตร) ส่วนของอีลาสติกที่มีมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำจะส่งผลให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงที่น้อยลง จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานในการแตกหักมากขึ้นได้รับการดึงยืดหรือพุดได้อีกนัยหนึ่งว่าวัสดุผสมมีความเหนียวมากขึ้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Okamoto และคณะ [8] ศึกษาผลของการเติมยางธรรมชาติต่อการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกให้กับพอลิแล็กติกแอซิด พบว่าความทนทานต่อแรงกระแทกไม่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการผสมยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการตัดแปร ในขณะที่ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า เมื่อพอลิแล็กติกแอซิดถูกผสมร่วมกับยางอีพอกซีไดซ์ (ENR-50) ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ การใช้ของผสมระหว่าง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ ENR-50 ร่วมกับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มขึ้น 25 เท่า (60 KJ/m^2) ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงให้เห็นว่า ENR-50 แทรกอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ แสดงถึงการยึดเกาะกันดีขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

Okamoto และคณะ [9] ศึกษาผลของการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติต่อความทนทานแรงกระแทก และอุณหภูมิที่มีผลต่อการเสียรูป (Deflection Temperature Under Load: DTUL) พบว่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนของ NR 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกที่ดีที่สุด ($190\text{-}280 \text{ J/m}$) และอุณหภูมิ DTUL สูงขึ้น $30\text{-}40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน ความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนที่เป็นผลึกจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ NR เพิ่มขึ้น และค่ามากที่สุดที่ปริมาณ NR 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิ DTUL จะลดลงเมื่อปริมาณ NR เพิ่มขึ้น

Pillin และคณะ [10] ศึกษาผลของพลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) 4 ชนิด ได้แก่ พอลิ(1,3-บิวเทนไดออล) (poly(1,3-butanediol): PBOH) ไดบิวทิล ซีบาเคท (dibutyl sebacate: DBS) อะซีทิล กลีเซอรอล มอนอลอูเรต (acetyl glycerol monolaurate: AGM) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol): PEG) ที่มีต่อสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิแล็กติกแอซิดลดลงเมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซออร์

โดยค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติม PEG มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งค่า T_g ที่ลดลงนั้นสอดคล้องกับสมการของฟอกซ์ (Fox equation) สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) มีลักษณะเปราะมาก ค่ามอดูลัสและความเค้นที่จุดขาดน้อยลง ในขณะที่การผสม พอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับ PBOH DBS หรือ AGM พบว่าให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ และมีลักษณะอ่อนนิ่ม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านบรรจุภัณฑ์ได้

Huneault และคณะ [11] ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและกลีเซอรอล พลาสติไซส์ เทอร์โมพลาสติค สตาร์ช (glycerol plasticized thermoplastic starch: TPS) โดยความเข้มข้นของ TPS ที่ใช้อยู่ในช่วง 27-60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/TPS มีความเข้ากันได้น้อย โดย TPS มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 5-30 ไมโครเมตรในพอลิแล็กติกแอซิด ดังนั้นนักวิจัยได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ โดยการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride: MA) กราฟต์เข้ากับพอลิแล็กติกแอซิด ผลที่ได้คือ MA-graft-PLA/TPS มีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาค TPS เล็กลงอยู่ที่ประมาณ 1-3 ไมโครเมตร และพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

Ishida และคณะ [12] ศึกษาการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับยางสังเคราะห์ 4 ประเภท ได้แก่ เอทิลีน-โพรพิลีนโคพอลิเมอร์ (ethylene-propylene copolymer) ยางเอทิลีน-อะคริลิก (ethylene-acrylic rubber) ยางอะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน (acrylonitrile-butadiene rubber: NBR) และยางไอโซพรีน (isoprene rubber: IR) ที่มีต่อค่าความเหนียวของวัสดุโดยทดสอบด้วยเครื่อง Izod impact testing พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยาง NBR (PLA/NBR) มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นว่า พอลิแล็กติกแอซิดเข้ากันได้ดีกับยาง NBR นอกจากนี้ ยางที่มีความเป็นขั้วสูงจะส่งผลให้ความเหนียวของพอลิแล็กติกแอซิดมาก การทดสอบความทนต่อแรงดึงยืด พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/NBR กับ PLA/IR ที่ไม่ผ่านขบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) แสดงการสูญเสียสภาพความเป็นพลาสติก (plastic deformation) ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก และยังให้ค่าการยืดตัวที่จุดขาด (elongation at break) ที่สูง

Balakrishnan และคณะ [13] ศึกษาการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene: LLDPE) ต่อลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติ

เชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสม โดย LLDPE 5-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักถูกผสมร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเครื่องบดผสมแบบสกรูคู่ ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น 53% เมื่อผสมร่วมกับ LLDPE 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ LLDPE เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ LLDPE เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ค่ายังมอดูลัส การทนแรงโค้งงอ ความทนแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง

Balakrishnan และคณะ [14] ศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene: LLDPE) และมอนต์โมริลโลไนต์ เคลย์ (montmorillonite: MMT) พบว่าค่ายังมอดูลัส ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด และ LLDPE (PLA/LLDPE) และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/LLDPE และ MMT (PLA/LLDPE/MMT) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม ความทนทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/LLDPE/MMT ลดลงเมื่อปริมาณ MMT เพิ่มมากขึ้น การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter: DSC) พบว่าค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature: T_c) ของพอลิแล็กติกแอซิด ทั้งใน PLA/LLDPE และ PLA/LLDPE/MMT ลดลงเมื่อปริมาณของ MMT เพิ่มขึ้น ปริมาณการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติการสลายตัวทางความร้อน (thermal gravimetric analysis: TGA) พบว่าเมื่อปริมาณของ MMT และ LLDPE ที่เพิ่มขึ้น ทั้งใน PLA/MMT และ PLA/LLDPE/MMT ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope: TEM) และเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน สเปกโตรเมทรี (x-ray diffraction spectrometry: XRD) พบว่าที่ปริมาณ 2 phr ของ MMT ให้การกระจายตัวที่ดีที่สุดในตัวกลางของพอลิแล็กติกแอซิด โดยมีพอลิแล็กติกแอซิดและ LLDPE แทรกในชั้นของ MMT ในลักษณะอินเตอร์-คาลเลต (intercalated) ซึ่งการกระจายตัวที่ดีของ MMT นั้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของ PLA/LLDPE/MMT มีค่าสูงขึ้นด้วย

Bitinis และคณะ [15] ศึกษาภาวะที่ใช้ออกสูตรในการผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้คือ อุณหภูมิ เวลา ความเร็วรอบในการหมุนผสม และปริมาณยางธรรมชาติ โดยเฟสของยางธรรมชาติที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดมี

ขนาด 1.1-2.0 ไมโครเมตร ความเหนียวของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น โดยระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 200 เปอร์เซ็นต์เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid: PLA) เกรด 2002D บริษัท เนเชอรัลเวียร์ดส์ แอลแอลซี จำกัด
- 3.1.2 ยางธรรมชาติ (natural rubber: NR) เกรด STR-5L บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
- 3.1.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate: PMMA) เกรด VH001 บริษัท ซาย สมายล์ จำกัด
- 3.1.4 ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ระดับออกซิเดชันร้อยละ 50 (epoxidized natural rubber-50: ENR-50) เกรดการค้า บริษัท แซน-แทป อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสม

สูตรในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยใช้เครื่องบดผสม ภายใน (internal mixer) รุ่น HAAKE (ประเทศเยอรมนี) เม็ดพอลิแล็กติกแอซิดบดผสมที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที หลังจากนั้นผสมยางธรรมชาติ และสารเคมีที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานคือพอลิเมทิลเมทาคริเลตหรือยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ตามลำดับ เป็นเวลา 5 นาที ความเร็วรอบในการหมุนผสม 80 รอบต่อนาที (rounds per minute: rpm) พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ถูกนำไปบดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติกอีกครั้ง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดที่ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสม

3.2.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.2.2.1.1 ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาด

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ มาตัดเป็นชิ้นงาน รูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D638 type I กำหนดความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบสมบัติการทนทานต่อการดึงยืดด้วยเครื่อง universal testing machine LLOYD LR10K (ประเทศอังกฤษ)

ความเร็วในการทดสอบ 10 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 สูตร นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

3.2.2.1.2 ความเหนียวและความทนทานต่อแรงกระแทก

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาตัดเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบไอซอด (Izod) ทดสอบด้วยเครื่อง impact testing machine Instron model PW 30 (ประเทศอังกฤษ) ความเร็วหัวทดสอบ 3.26 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ทดลองซ้ำ 5 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 สูตร นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

3.2.2.1.3 ความแข็ง

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ตัดเป็นชิ้นงานตามมาตรฐาน D2240 ทดสอบด้วยเครื่อง shore hardness tester Instron (ประเทศอังกฤษ) ทดสอบแรงกด 5 จุดต่อชิ้นงาน 1 สูตร ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

3.2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

3.2.2.2.1 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

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

3.2.2.2.2 อุณหภูมิการสลายตัว

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

3.2.2.2.3 การบ่มด้วยความร้อน

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ตัดเป็นชิ้นงานรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน D638 บ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบความทนทานต่อการดึงยึดที่เปลี่ยนไป ด้วยเครื่อง universal testing machine LLOYD LR10K (ประเทศอังกฤษ) ความเร็วในการทดสอบ 10 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 ชุด นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้รายงานผลการทดลอง

3.2.2.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

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

3.2.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ตัดเป็นชิ้นงานขนาด 1 x 5 เซนติเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง dynamic mechanical analyser METTLER TOLEDO (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) รูปแบบ 3-point bending ช่วงอุณหภูมิ -100 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 3.1 สูตรการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์

ชื่อสูตร	ปริมาณ (phr) ¹			
	PLA ²	NR ³	PMMA ⁴	ENR ⁵
Pure PLA	100	-	-	-
N5	100	5	-	-
N5M1	100	5	1	-
N5M3	100	5	3	-
N5M5	100	5	5	-
N10	100	10	-	-
N10M1	100	10	1	-
N10M3	100	10	3	-
N10M5	100	10	5	-
N15	100	15	-	-
N15M1	100	15	1	-
N15M3	100	15	3	-
N15M5	100	15	5	-
N5E1	100	5	-	1
N5E3	100	5	-	3
N5E5	100	5	-	5
N10E1	100	10	-	1
N10E3	100	10	-	3
N10E5	100	10	-	5
N15E1	100	15	-	1
N15E3	100	15	-	3
N15E5	100	15	-	5
N15E3M1	100	15	1	3
N15E3M3	100	15	3	3
N15E3M5	100	15	5	3

¹ ส่วนต่อพอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน ² พอลิแล็กติกแอซิด ³ ยางธรรมชาติ ⁴ พอลิเมทิลเมทาคริเลต ⁵ ยางธรรมชาติอีพอกซีไดร์

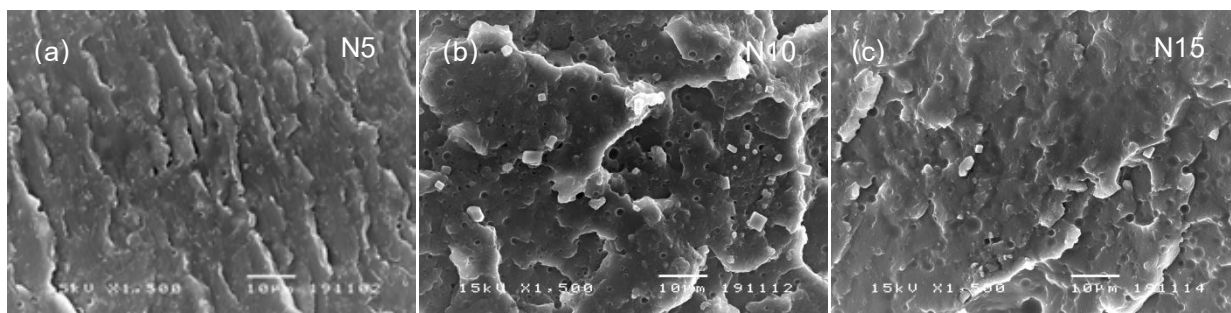
บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมยางธรรมชาติ

4.1.1 สัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ

รูปที่ 4.1 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ และรูปที่ 4.2 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีในอัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับ โดยเฟสสีดำเป็นเฟสหลักของพอลิแล็กติกแอซิด เฟสที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีดำคือเฟสของยางธรรมชาติ และเฟสสีขาวคือเฟสของพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง สังเกตได้จากการที่พื้นผิวของ พอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น (แสดงดังรูปที่ 4.1(a))

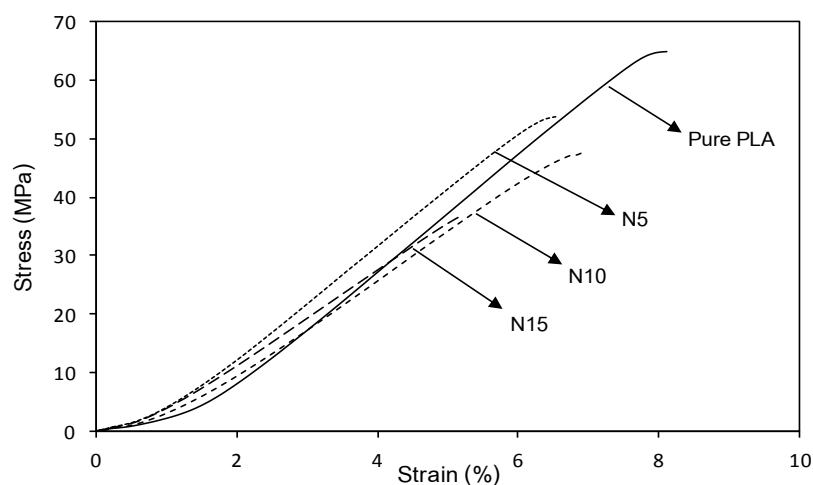


รูปที่ 4.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ผ่านการอั่งไอออกซิเจนออกไซด์ (Os_2O_4)
(a) PLA 100, NR 5 phr (b) PLA 100, NR 10 phr และ (c) PLA 100, NR 15 phr

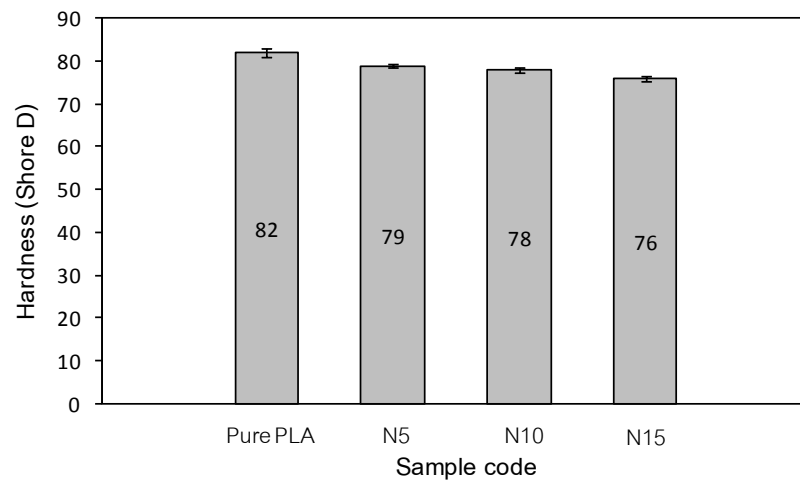
4.1.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับผสมยางธรรมชาติ

รูปที่ 4.2 แสดงกราฟค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนต่าง ๆ และตารางที่ 4.1 สรุปค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาการใส่ยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมเท่ากับ 5, 10 และ 15 phr จะเห็นว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืดน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ทั้งนี้อาจมีผลมาจากความเข้ากันไม่ได้ระหว่างพอลิ

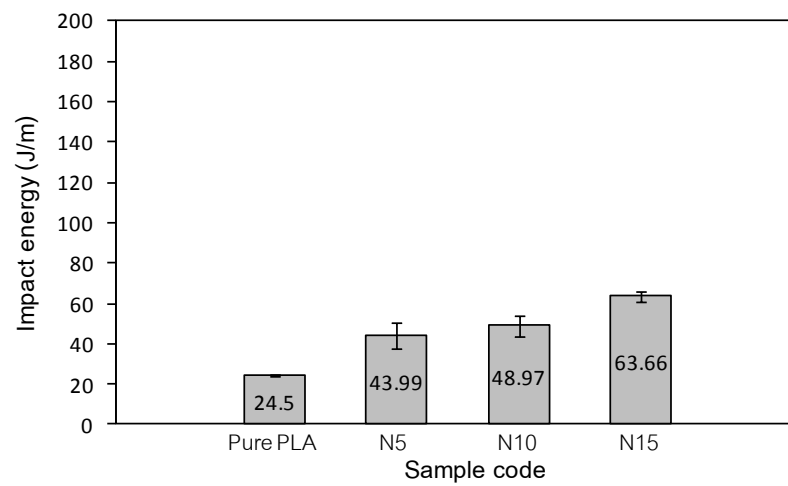
แล็กติกแอซิดที่มีชั้วกับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีชั้ว (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) ทำให้เฟสของยางธรรมชาติ อาจไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลพอลิแล็กติกแอซิดหรืออีกนัยหนึ่งยางธรรมชาติ สามารถประพฤติตัวเป็นสารเสริมแรงได้ [16] แต่อย่างไรก็ตามการใส่ยางธรรมชาติส่งผลให้ระยะ ยืด ณ จุดขาดและความแข็ง (รูปที่ 4.3) ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยาง ธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ยางธรรมชาติเป็นส่วนที่มีความแข็งน้อยกว่าพอลิแล็กติกแอซิด หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นส่วนที่นิ่ม (soft segment) ทำให้ความแข็งของวัสดุลดลง ค่าพลังงานการ กระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.4) เนื่องจากยาง ธรรมชาติมีสมบัติยืดหยุ่นสูง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับค่าพลังงานการกระแทกของพอลิ เมอร์ผสมเพิ่มขึ้นได้เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น [17-18]



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสม ยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.4 พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ชื่อสูตร	Young's Modulus ¹ (MPa)	UT _B ² (MPa)	E _B ³ (%)	Hardness ⁴ (Shore D)	Impact energy ⁵ (J/m)
Pure PLA	1022.77±3.97	64.98±0.89	8.13±0.35	82±0.90	24.50±0.70
N5	987.59±8.65	53.90±1.87	6.54±0.26	79±0.40	43.99±6.26
N5M1	945.06±11.08	40.01±0.53	6.19±0.36	79±0.50	53.15±1.94
N5M3	911.12±8.23	35.54±0.53	6.20±0.23	80±0.50	46.04±9.40
N5M5	805.22±15.77	38.31±2.18	6.20±0.69	80±0.40	31.74±2.92
N10	866.62±11.49	47.88±1.53	6.94±0.66	80±0.50	48.97±5.45
N10M1	910.87±7.21	42.08±2.59	7.00±0.30	77±0.50	147.18±11.63
N10M3	812.62±7.95	42.05±0.54	7.38±0.18	78±1.30	80.13±1.36
N10M5	791.18±14.48	40.17±1.26	7.92±1.66	80±0.80	69.01±6.54
N15	801.49±4.35	36.84±1.92	5.21±0.57	76±0.50	63.66±2.68
N15M1	756.25±6.03	37.75±1.40	7.88±0.87	75±0.50	113.63±10.03
N15M3	737.67±1.22	37.13±0.67	8.18±0.57	77±0.00	178.65±7.50
N15M5	821.23±12.67	37.96±0.20	7.21±0.37	76±0.40	101.76±17.43
N5E1	879.80±12.26	44.80±0.81	6.90±1.28	76±1.30	53.94±6.20
N5E3	885.03±16.53	43.92±1.92	7.61±0.81	75±0.40	60.43±5.06
N5E5	809.85±16.48	38.73±2.60	7.19±0.20	77±0.90	53.59±5.60
N10E1	724.72±14.89	37.66±0.93	12.18±1.05	77±0.70	85.06±10.37
N10E3	655.66±15.22	36.42±0.89	10.95±0.85	74±1.00	100.36±6.99
N10E5	681.77±17.85	31.98±2.45	10.63±1.35	75±0.40	78.16±11.00
N15E1	743.35±1.43	33.20±0.10	12.26±1.14	75±0.70	60.16±5.47
N15E3	706.37±12.31	31.75±1.42	18.38±0.63	75±0.50	73.46±7.11
N15E5	658.60±12.28	28.69±0.64	10.89±1.65	75±0.50	80.12±7.29
N15E3M1	681.07±14.35	30.21±0.58	94.46±2.56	75±0.00	230.61±15.18
N15E3M3	699.22±7.12	32.42±1.89	36.49±2.03	75±0.50	146.23±4.71
N15E3M5	725.53±14.60	35.80±2.12	31.60±5.51	75±0.50	115.91±8.97

¹ค่ามอดูลัสของยัง ²ความทนแรงดึงสูงสุด ³ระยะยืด ณ จุดขาด ⁴ความแข็ง ⁵พลังงานการกระแทก

4.1.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก อนุาลิซิส พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีอุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัวเท่ากับ 334.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดเท่ากับ 376.2 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติมีอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น (ประมาณ 8-9 องศาเซลเซียส) เนื่องจากยางธรรมชาติมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง โดยการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมนั้น มีผลมาจากความร้อนสามารถถ่ายโอนไปยังอนุภาคยางได้บางส่วน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้แก่พอลิเมอร์ผสมได้

ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ($\% X_c$) ของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ โดย T_g ของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์เท่ากับ 62.97 องศาเซลเซียส T_c เท่ากับ 133.06 องศาเซลเซียส และ T_m เท่ากับ 155.51 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การใส่ยางธรรมชาติลงไปในพอลิเมอร์ผสม ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T_g และ T_m ของพอลิแล็กติกแอซิด แต่ส่งผลกระทบต่อ T_c อย่างชัดเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใส่ยางธรรมชาติลงไปส่งผลให้ T_c ของพอลิเมอร์ผสมลดลงจากเดิมประมาณ 23 องศาเซลเซียส นั้นหมายความว่า ยางธรรมชาติช่วยเร่งการเกิดผลึกในพอลิเมอร์ผสม โดย $\% X_c$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นดังนี้ 24.39, 27.84 และ 55.10 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณยางธรรมชาติ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อ 4.2 แล้วว่า ค่าพลังงานการระเหยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น แต่การคาดคะเนจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดกลับให้ผลตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากความเป็นผลึกที่สูงขึ้นของพอลิเมอร์ผสมนั่นเอง

การปรากฏพีค T_m มีลักษณะแตกออกเป็นสองพีค นั้นแสดงถึงความเข้ากันได้ น้อยของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้ทางฐานานวิทยา (รูปที่ 4.1) นอกจากนี้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิด คือพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติยังแสดงความสามารถในการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่างกัน ส่งผลให้ค่า T_m ที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากันอีกด้วย

ตารางที่ 4.2 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

ชื่อสูตร	T_{id} ($^{\circ}\text{C}$) ¹	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$) ²
Pure PLA	334.3	376.2
N5	342.0	378.0
N5M1	341.0	376.0
N5M3	345.0	381.0
N5M5	348.0	380.0
N10	342.5	377.7
N10M1	343.0	377.0
N10M3	343.0	382.0
N10M5	347.0	381.0
N15	343.0	377.0
N15M1	342.0	382.0
N15M3	343.0	381.0
N15M5	347.0	381.0
N5E1	330.0	368.0
N5E3	331.0	370.0
N5E5	329.0	370.0
N10E1	339.0	377.0
N10E3	339.0	378.0
N10E5	335.0	377.0
N15E1	342.0	380.0
N15E3	342.0	380.0
N15E5	339.0	380.0
N15E3M1	345.0	377.0
N15E3M3	340.0	379.0
N15E3M5	332.0	379.0

¹อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น ²อุณหภูมิที่สารมีการสลายตัวสูงสุด

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, อุณหภูมิการเกิดผลึก, อุณหภูมิการหลอมเหลว ผลึกและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ

ชื่อสูตร	T_g ($^{\circ}\text{C}$) ¹	T_c ($^{\circ}\text{C}$) ²	ΔH_c ³ (J/g)	T_m ($^{\circ}\text{C}$) ⁴	ΔH_m ⁵ (J/g)	% X_c ⁶
Pure PLA	63.0	133.1	41.1	155.5	51.6	11.3
N5	63.2	109.5	64.9	158.5	86.6	24.4
N10	63.1	109.0	65.2	158.0	88.8	27.8
N15	62.4	108.3	76.0	157.8	120.6	55.1

¹อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ²อุณหภูมิการเกิดผลึก ³พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึก ⁴อุณหภูมิการหลอมผลึก

⁵พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ⁶เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก = $\frac{\Delta H_{m,PLA} - \Delta H_{c,PLA}}{\Delta H_{m(ideal),PLA} \times (X_{PLA})}$; โดยที่

$\Delta H_{m,PLA}$ = พลังงานในการหลอมผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด

$\Delta H_{c,PLA}$ = พลังงานในการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด,

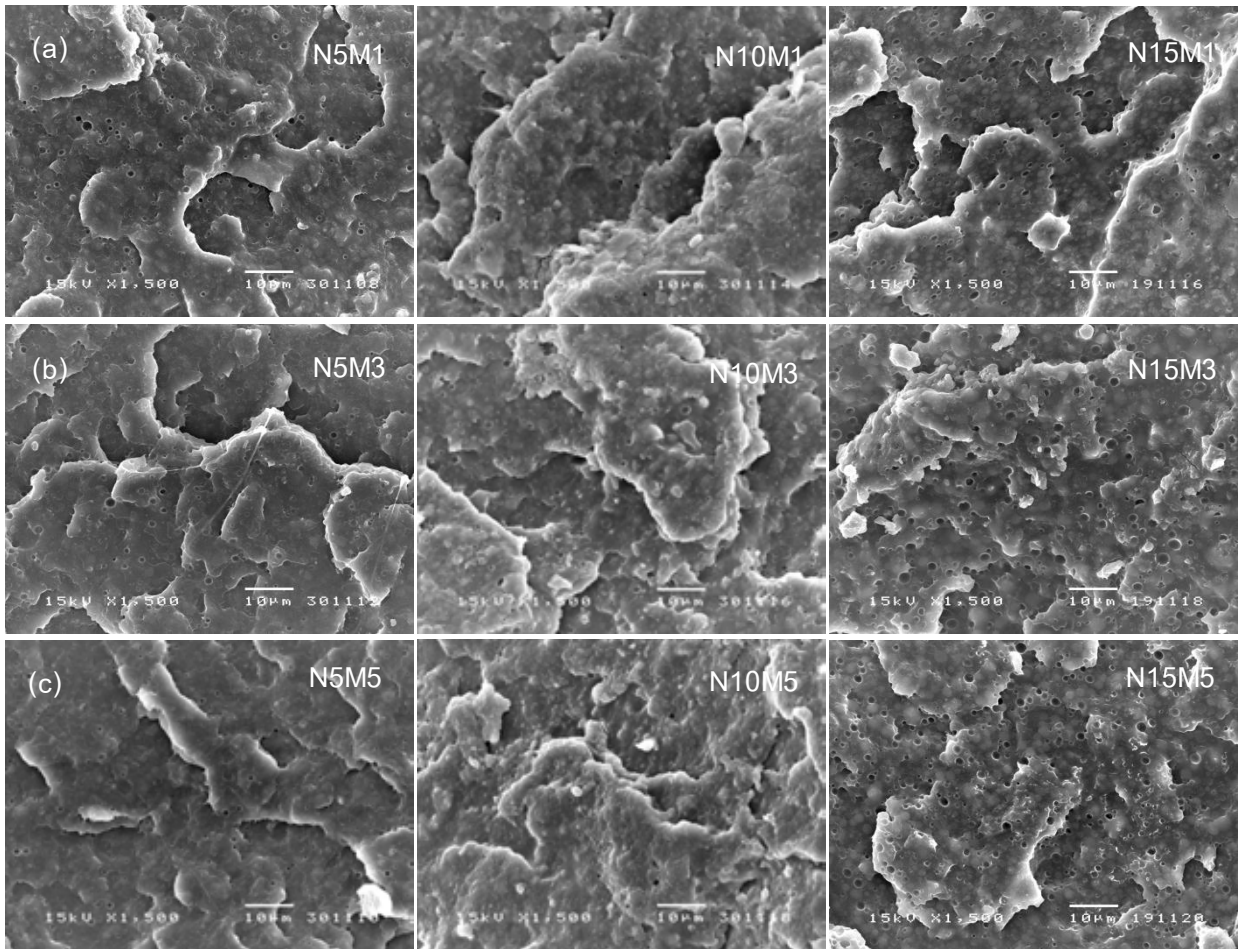
$\Delta H_{m(ideal),PLA}$ = พลังงานในการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเป็นผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (93.7 J/g)

X_{PLA} = เศษส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม

4.2 สมบัติและเปรียบเทียบสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน

4.2.1 สันฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน

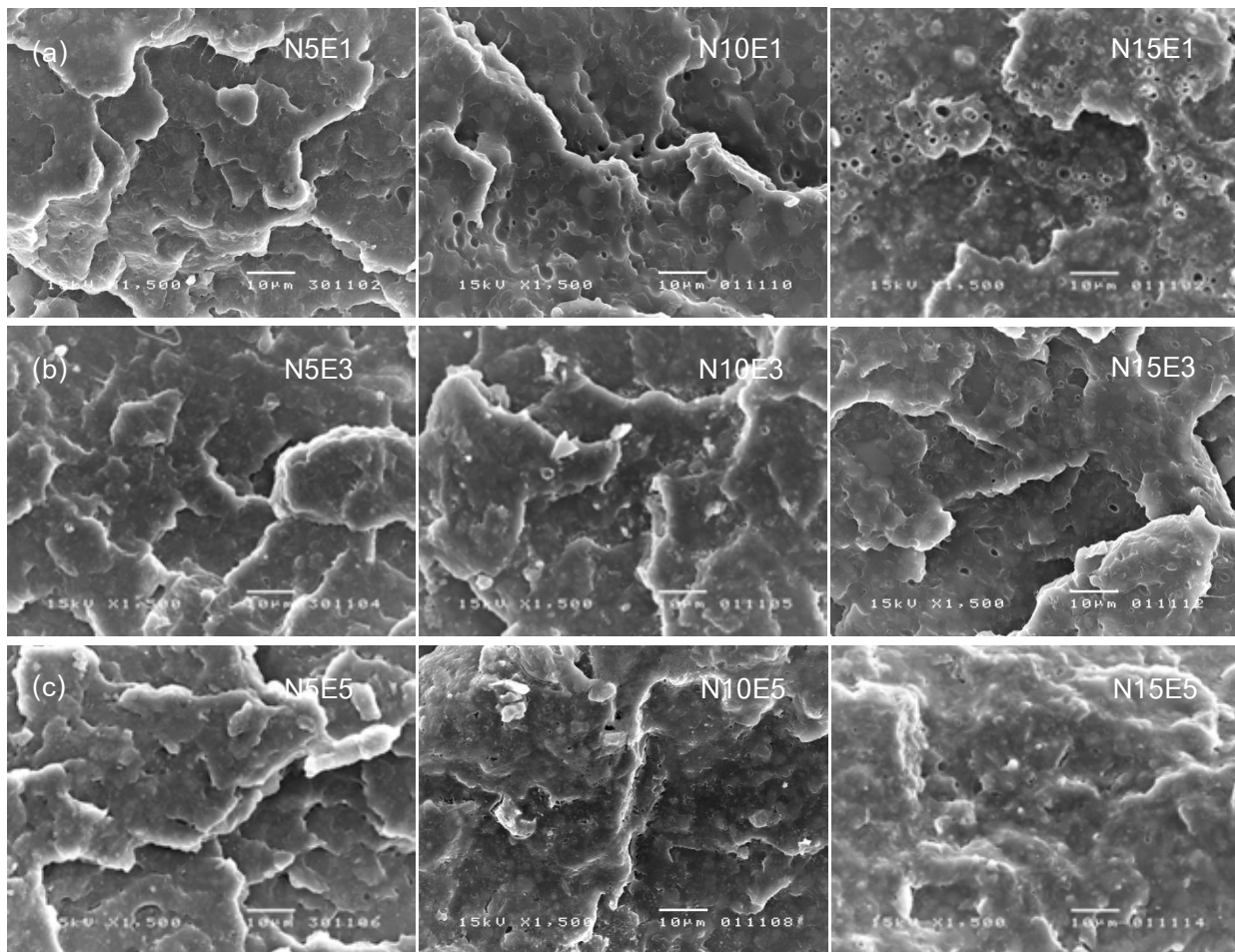
เมื่อผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าในปริมาณการใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลต 1-3 phr ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น แต่ความเข้ากันได้ลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นเป็น 5 phr สังเกตได้จากความขรุขระของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก (แสดงดังรูปที่ 4.5) เปรียบเทียบกับการใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน พบว่าปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระน้อยลง ปริมาณของเม็ดกลมสีดำที่ลดลงและรวมเป็นเนื้อเดียวกับเฟสของพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้น (แสดงดังรูปที่ 4.6) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวประสานทั้งสอง พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสานมีลักษณะพื้นผิวเรียบกว่าและขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน อาจเป็นเพราะการที่ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มีหมู่แทนที่มีขั้วเป็นหมู่ของอีเทอร์ซึ่งมีขนาดเล็กและมีผลของความเกาะกันน้อยกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งมีหมู่แทนที่เป็นหมู่ของเมทิลเอสเทอร์



รูปที่ 4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสม
 ยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ผ่านการอ้งไอออกซิเจนออกไซด์ (Os_2O_4)

(a) PLA 100, NR 5-15, PMMA 1 phr, (b) PLA 100, NR 5-15, PMMA 3 phr

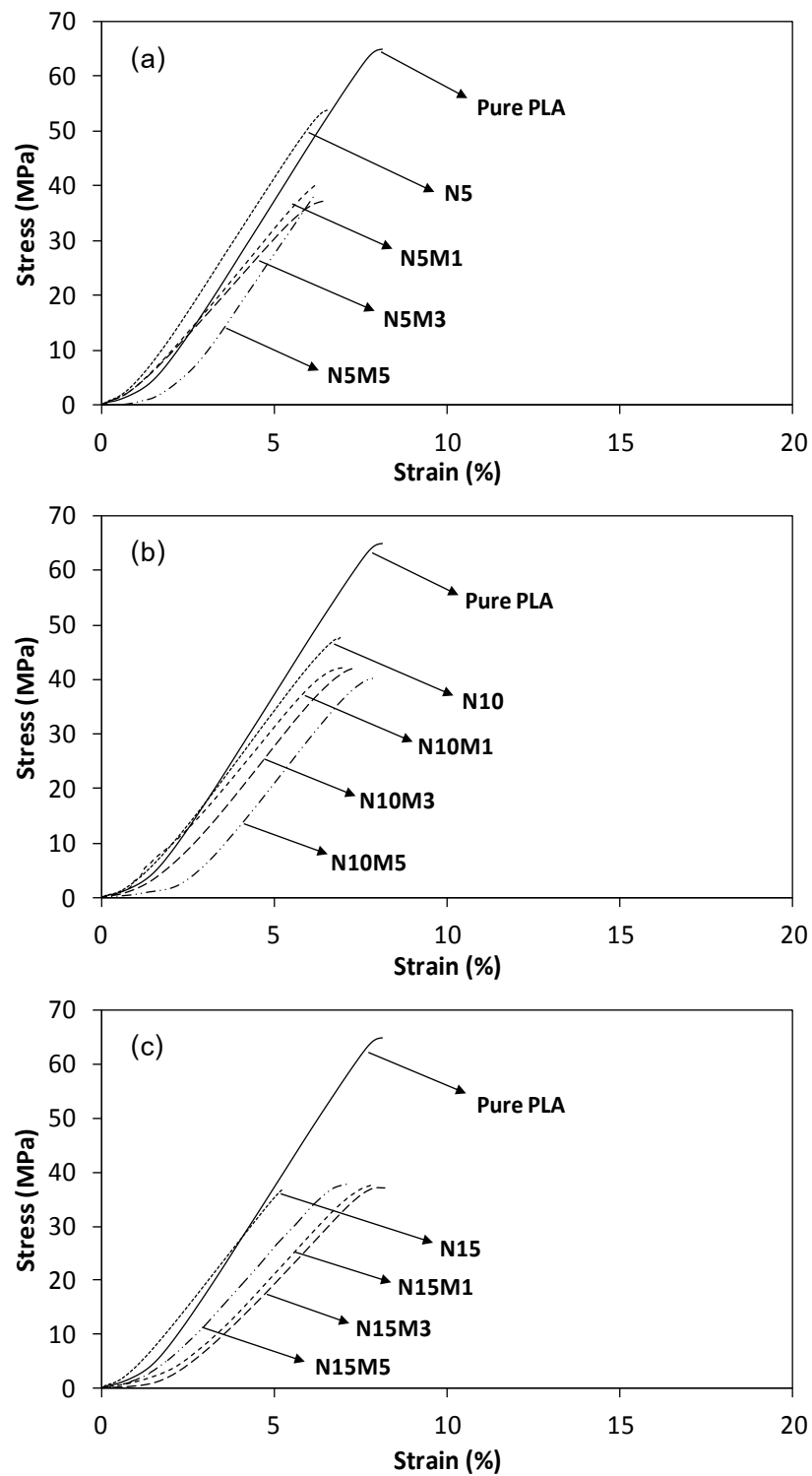
และ (c) PLA 100, NR 5-15, PMMA 5 phr



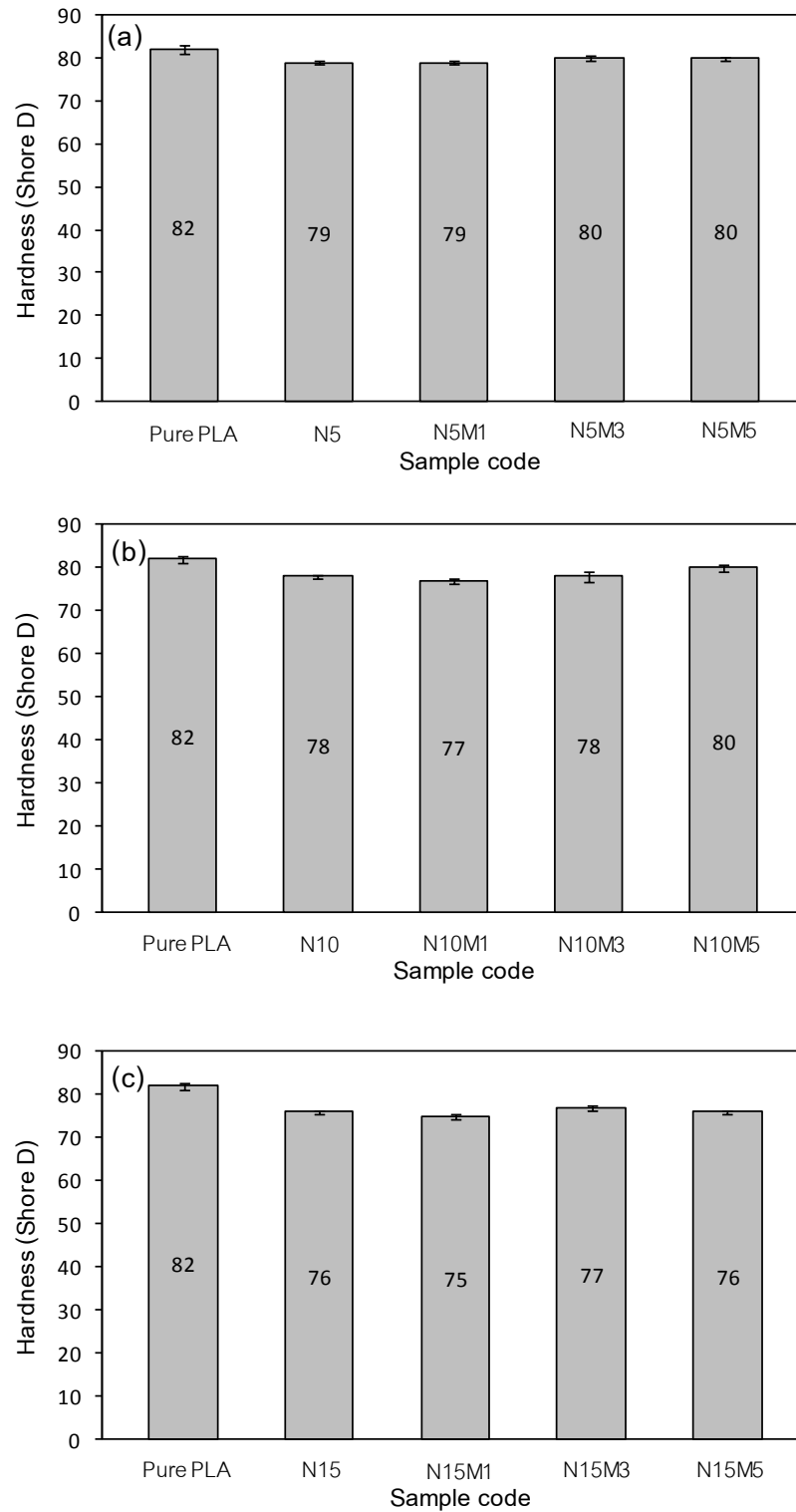
รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสม
 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ผ่านการอ้งไอออสเมียมออกไซด์
 (Os_2O_4) (a) PLA 100, NR 5-15, ENR 1 phr, (b) PLA 100, NR 5-15, ENR 3 phr,
 (c) PLA 100, NR 5-15, ENR 5 phr

4.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน

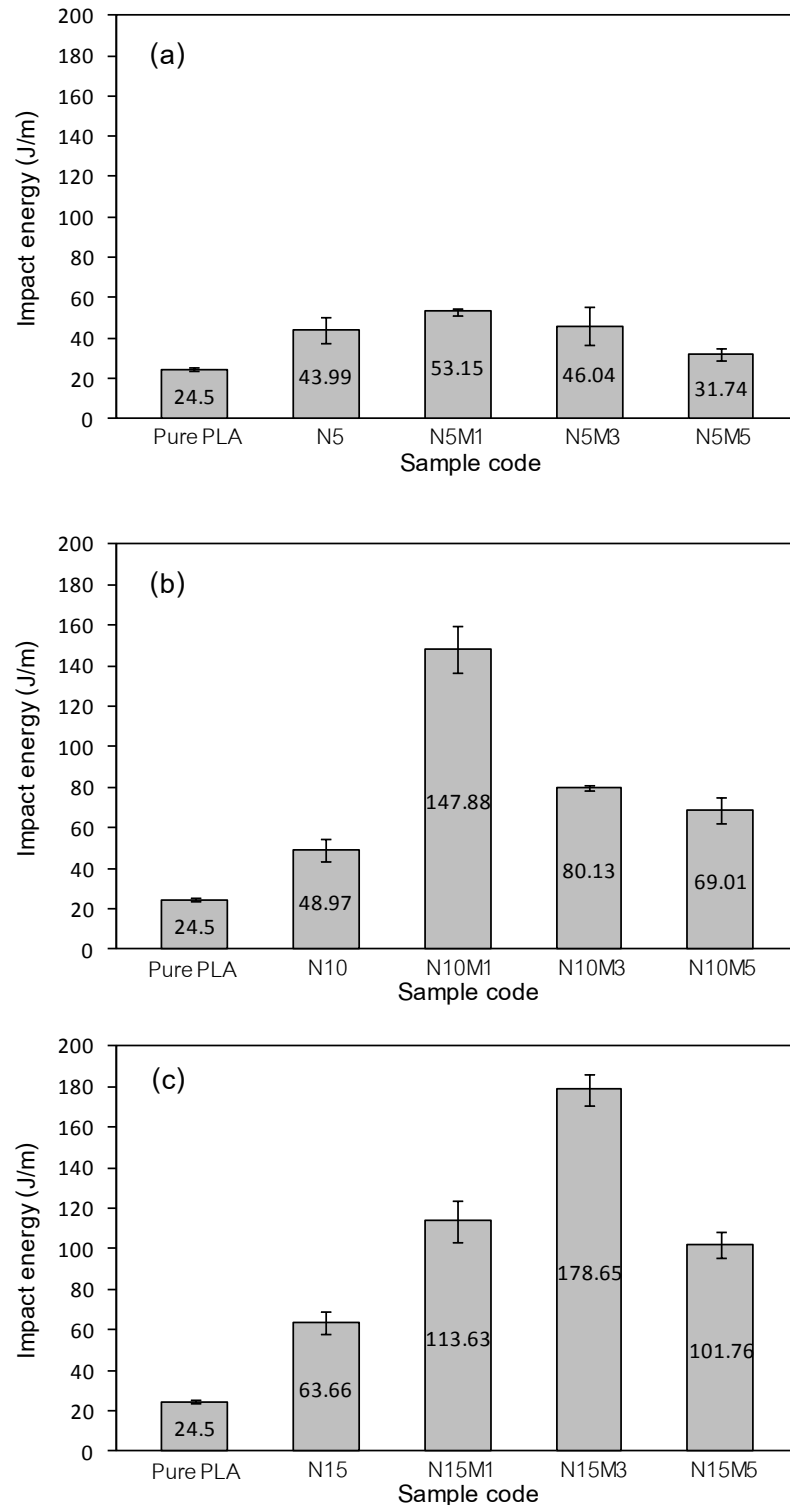
เมื่อพิจารณาผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีต่อค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต (1, 3 และ 5 phr) และให้ปริมาณยางธรรมชาติคงที่ดังแสดงในรูป 4.7 และค่าสมบัติเชิงกลแสดงดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณของตัวประสาน (พอลิเมทิลเมทาคริเลต) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงไม่ว่าจะเป็นค่ามอดูลัส ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด และระยะยืด ณ จุดขาด ซึ่งอาจจะมีผลมาจากความเข้ากันไม่ได้ระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติดังที่กล่าวไปข้างต้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการใส่สารตัวประสานในปริมาณต่ำ ๆ การลดลงของสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อมูลลักษณะทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.5) สังเกตเห็นได้ว่าการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 1-3 phr นั้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีความเรียบ ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติดีขึ้น จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลมากนัก ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติที่ใส่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.8) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการใส่ตัวประสานร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งมากนัก ทั้งนี้เนื่องจาก พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมทิลเมทาคริเลตถือเป็นพลาสติกที่มีความแข็งสูงด้วยกันทั้งคู่ การใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณน้อยจึงไม่ส่งผลต่อค่าดังกล่าว พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.9) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุด โดยในกรณีของพอลิแล็กติกแอซิดผสมยางธรรมชาติ 5 phr ให้ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุดที่ปริมาณการเติมตัวประสาน 1 phr เช่นเดียวกับการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ 10 phr ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr ให้ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุดที่ปริมาณตัวประสาน 3 phr ณ สัดส่วนการผสมนี้ จะสังเกตว่าความเข้ากันได้ระหว่างเฟสทั้งสามของพอลิแล็กติกแอซิด ยางธรรมชาติ และพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถเข้ากันได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.5 หลังจากนั้นพลังงานการกระแทกลดลงเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้น (เริ่มมีการแยกเฟสเกิดขึ้น พิจารณาในรูปที่ 4.5) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลจากกราฟความเค้น-ความเครียด ถ้าค่าพลังงานการกระแทกสูง พื้นที่ใต้กราฟ ความเค้น-ความเครียดควรจะมีมาก แต่ผลการทดลองที่ได้กลับให้ผลตรงกันข้าม โดยเหตุผลที่ใช้ในการอธิบายจะอธิบายในหัวข้อสมบัติเชิงความร้อนต่อไป



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ

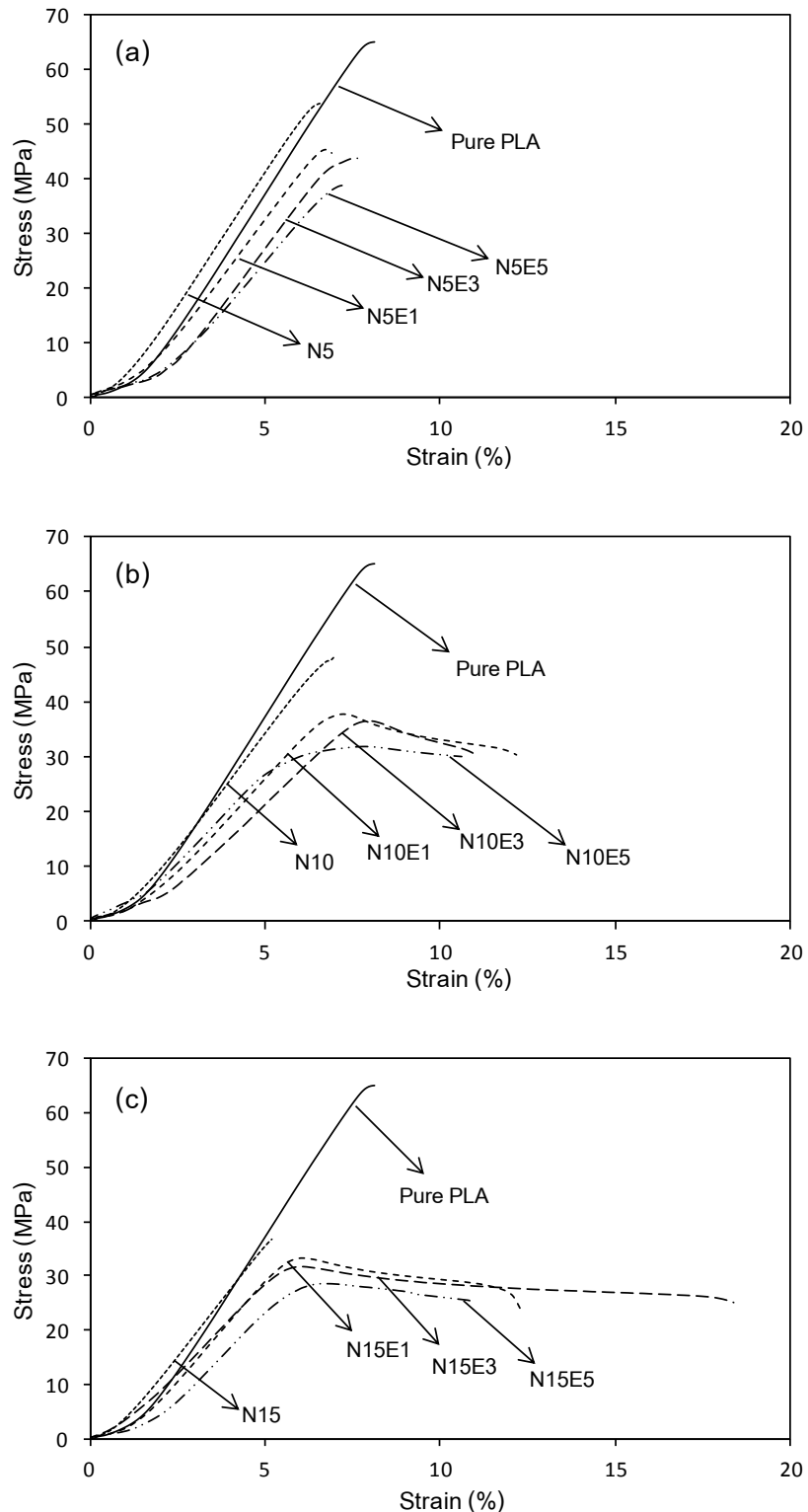
เมื่อพิจารณาผลของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีต่อค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ (1, 3 และ 5 phr) โดยให้ปริมาณยางธรรมชาติคงที่ดังแสดงในรูป 4.10 และค่าสมบัติเชิงกลแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าการเพิ่มขึ้นของยางธรรมชาติ และปริมาณตัวประสานชนิดยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ ส่งผลให้มอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกับค่าความทนแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเติมทั้งยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ซึ่งเป็นส่วนที่นุ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน พบว่าการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตให้ค่ามอดูลัสและค่าความทนแรงดึงสูงสุดสูงกว่าการใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน สาเหตุเพราะพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีความแข็งมากกว่ายางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ หรือเรียกได้ว่าเป็นส่วนที่แข็ง แต่อย่างไรก็ตามระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้นไม่เกิน 3 phr มากกว่านั้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติเกิดขึ้นในช่วงการเติมดังกล่าว แต่ทั้งนี้การเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ในปริมาณ 5 phr ส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง สาเหตุอาจเพราะยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มากเกินไปอาจขัดขวางการช่วยประสานเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมจึงลดลง และการมีหมู่ที่มีขั้วของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มากเกินไปซึ่งส่งผลให้เข้ากันได้ยากกับยางธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน พบว่าระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งเป็นเฟสพลาสติกแข็งอาจส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มแข็งเปราะกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ ซึ่งช่วยเสริมความเป็นอิลาสติกให้พอลิเมอร์ผสม (แสดงดังรูปที่ 4.10(c) และ (d))

ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้น (แสดงดังรูปที่ 4.11) เนื่องจากการเพิ่มของปริมาณส่วนที่นุ่มจากยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ซึ่งค่าความแข็งมีแนวโน้มน้อยกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นส่วนที่แข็งจึงให้ค่าความแข็งที่มากกว่าการใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ซึ่งเป็นส่วนที่นุ่ม

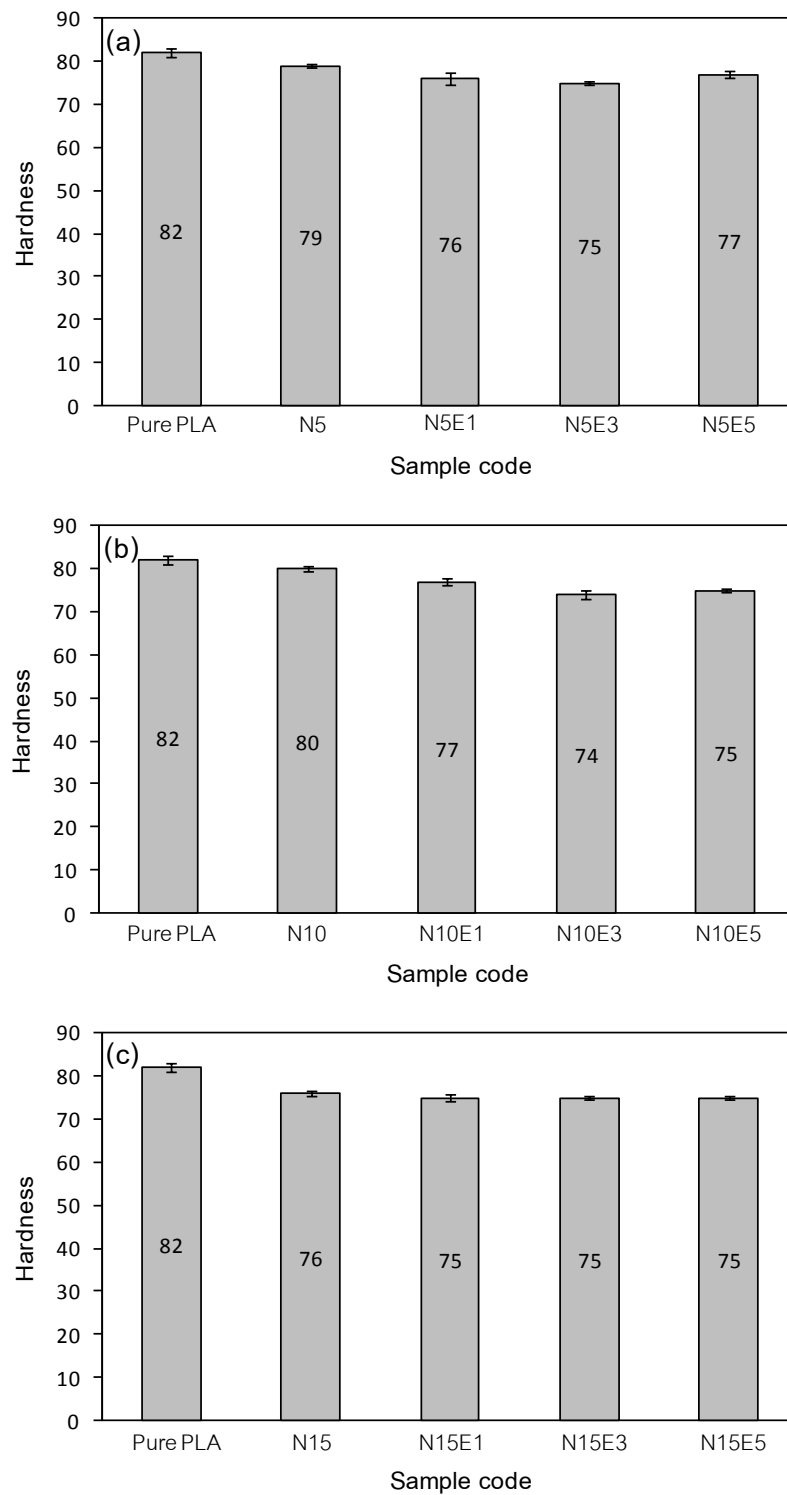
พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.12) โดยพอลิเมอร์ผสมให้ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุดที่การเติมยางธรรมชาติ 5 และ 10 phr ร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน 3 phr และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นเป็น 5 phr เนื่องจากการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสานในปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างช่วงระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ในขณะที่การผสมพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr ให้ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุดที่ปริมาณตัวประสานเท่ากับ 5 phr อาจเป็นเพราะปริมาณยางธรรมชาติสูงกว่ายางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มาก ส่งผลให้ปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่สูงจึงช่วยประสานระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานพบว่าแนวโน้มของค่าพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานมีค่าต่ำกว่า สาเหตุอาจเพราะการเติมปริมาณเฟสที่แข็งอย่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความแกร่งและรับแรงกระแทกได้ดีกว่า

4.2.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน

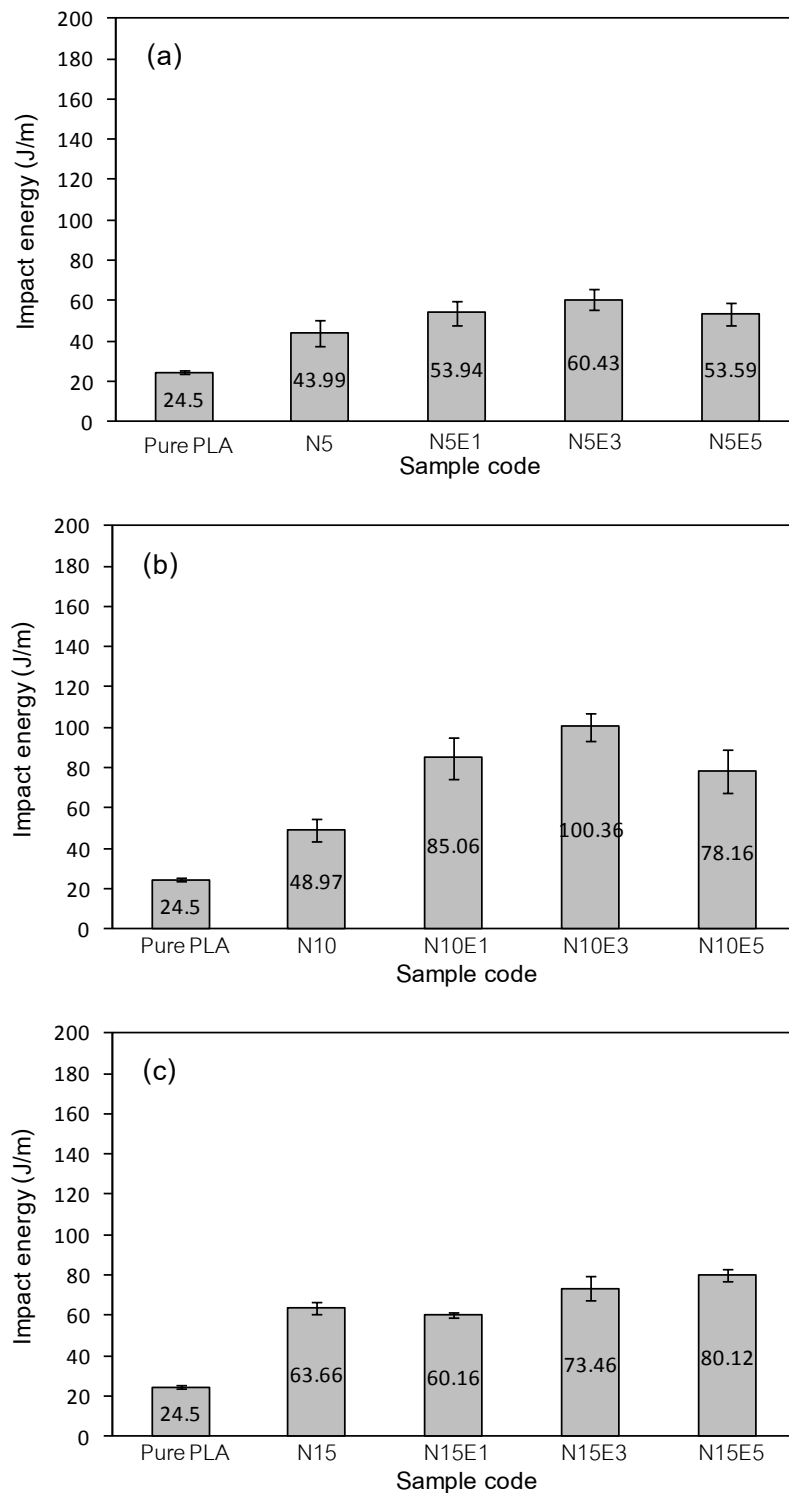
พิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตสูง (ประมาณ 350 องศาเซลเซียส) อีกหนึ่งสาเหตุคือการใส่ตัวประสานนั้นส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติดีขึ้น [19-21] ทำให้ทั้งสองเฟสยึดเหนี่ยวกันได้ดีส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสม
 ยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดย (a) – (c) เปรียบเทียบ
 ปริมาณยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10
 และ 15 phr ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ความแข็งของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคิงที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 พลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม โดย (a) – (c) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ

พิจารณาคูณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าคูณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ผสมยางธรรมชาติโดยไม่ใช้ตัวประสานและต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน โดยปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คูณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีในปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้โมเลกุลของออกซิเจนก่อให้เกิดการเผาไหม้โดยใช้ความร้อนได้ง่ายขึ้น (thermal oxidation) [22]

เมื่อผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ปริมาณยางธรรมชาติคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง T_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ แต่ T_c กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ ทั้งนี้ที่คูณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็น T_g ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต จะมีพีคเกิดขึ้นในช่วงเดียวกันกับ T_c ของพอลิเมอร์ผสม สังเกตได้จากลักษณะเทอร์โมแกรมที่ขึ้นบริเวณนี้จะมีลักษณะที่กว้าง (broad) ความสูงของพีคลดลง ตำแหน่งของพีคไปในทิศทางที่คูณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ สาเหตุเพราะการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตอาจทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลภายในพอลิแล็กติกแอซิดได้

เมื่อพิจารณาการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีเป็นตัวประสานในปริมาณเพิ่มขึ้น ดังแสดงตารางที่ 4.4 พบว่า T_g พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณตัวประสานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับยางธรรมชาติและพอลิเมทิลเมทาคริเลต เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีมีผลของความเกาะที่น้อยกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลต ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมมีการหมุนและเคลื่อนไหวได้ง่ายกว่า แต่การเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีที่มากเกินไป (5 phr) ส่งผลให้ T_g ของพอลิเมอร์ผสมนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การเติมตัวประสานในปริมาณมากเกินไปทำให้ขัดขวางการหมุนของสายโซ่โมเลกุลในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นเหตุผลเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของ T_c ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีเพิ่มขึ้น เป็นไปในทางตรงกันข้ามกับ X_c ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีเพิ่มขึ้น หรือ T_c เพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไคซีในปริมาณมากส่งผลให้โมเลกุลยางธรรมชาติที่เป็นสาร

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, อุณหภูมิการเกิดผลึก, อุณหภูมิการหลอมเหลว ผลึกและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิล

เมทาคริเลตและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน

ชื่อสูตร	T_g ($^{\circ}\text{C}$) ¹	T_c ($^{\circ}\text{C}$) ²	ΔH_c ³ (J/g)	T_m ($^{\circ}\text{C}$) ⁴	ΔH_m ⁵ (J/g)	% X_c ⁶
Pure PLA	63.0	133.1	41.1	155.5	51.6	11.3
N5	63.2	109.5	64.9	158.5	86.6	24.4
N5M1	63.6	118.6	67.6	155.3	83.7	18.4
N5M3	63.5	120.1	67.0	156.9	81.9	17.3
N5M5	63.4	124.1	74.7	155.6	78.4	4.4
N5E1	60.3	115.1	73.6	157.5	101.3	31.3
N5E3	59.4	116.8	83.5	157.0	112.1	33.1
N5E5	59.8	123.4	78.1	157.7	99.1	24.8
N10	63.1	109.0	65.2	158.0	88.8	27.8
N10M1	63.5	119.7	68.8	156.7	80.9	14.4
N10M3	63.6	117.6	68.8	156.2	78.1	11.3
N10M5	63.7	121.1	70.5	157.2	77.8	9.08
N10E1	62.6	117.3	69.4	158.0	78.8	11.1
N10E3	59.6	115.6	59.8	157.7	77.1	21.0
N10E5	58.6	112.8	51.9	159.2	72.5	25.5
N15	62.4	108.3	76.0	157.9	120.6	55.1
N15M1	63.5	115.3	66.3	156.6	85.2	23.6
N15M3	63.7	115.4	68.8	156.6	84.9	20.3
N15M5	63.9	118.4	69.8	156.5	78.9	11.8
N15E1	58.2	114.0	56.1	159.2	94.2	47.1
N15E3	58.6	115.6	80.5	158.0	113.5	41.7
N15E5	59.0	116.2	83.1	158.1	117.3	43.9

¹อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ²อุณหภูมิการเกิดผลึก ³พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึก ⁴อุณหภูมิการหลอมผลึก

⁵พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ⁶เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก = $\frac{\Delta H_{m,PLA} - \Delta H_{c,PLA}}{\Delta H_{m(ideal),PLA} \times (X_{PLA})}$; โดยที่

$\Delta H_{m,PLA}$ = พลังงานในการหลอมผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด

$\Delta H_{c,PLA}$ = พลังงานในการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด,

$\Delta H_{m(ideal),PLA}$ = พลังงานในการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเป็นผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (93.7 J/g)

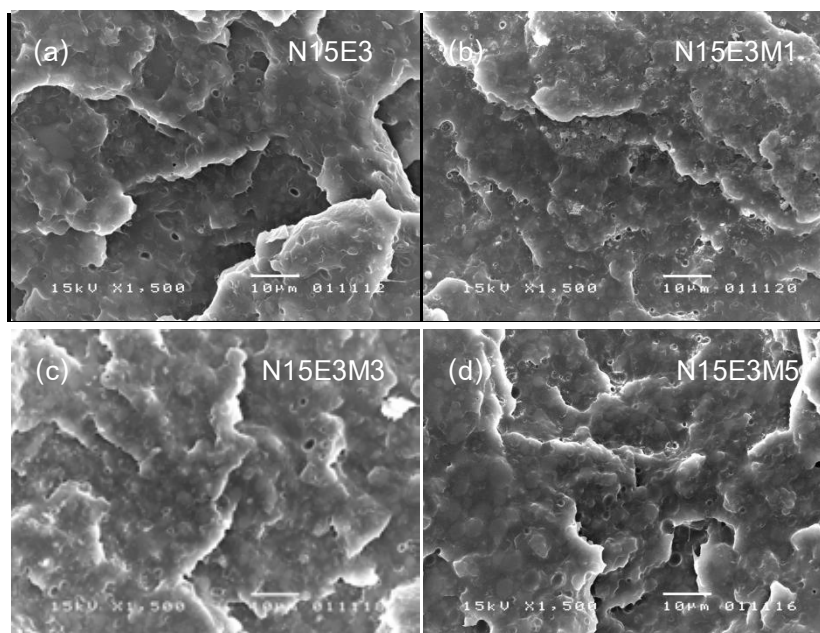
X_{PLA} = เศษส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม

ก่อนผลึกถูกขัดขวาง ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีการเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและมีอัตราการเกิดผลึกต่ำลง การลดลงของ % X_c เมื่อเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ในปริมาณมากขึ้นไป ส่งผลให้ T_m ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง สาเหตุเกิดจากการลดลงของปริมาณผลึกทำให้ต้องการพลังงานในการหลอมผลึกน้อยลง

4.3 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

4.3.1 สันฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

จากข้อมูลทางสันฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ข้างต้นสรุปได้ว่าการเติมยางธรรมชาติ 15 phr ร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเรียบและให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นสมบัติที่ทางคณะผู้วิจัยต้องการ จึงสนใจที่จะนำสูตรนี้ (N15E3) ไปทำการศึกษาต่อ โดยทำการผสมร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งจากผลการทดลองที่แล้มาพบว่า การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงกระแทกและเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่พอลิเมอร์ผสมได้ โดยรูปที่ 4.13 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ 15 phr ร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr และ พอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า การผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง โดยสังเกตได้จากพื้นผิวของวัสดุที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าการผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 1 phr พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและลักษณะใกล้เคียงกับ N15E3

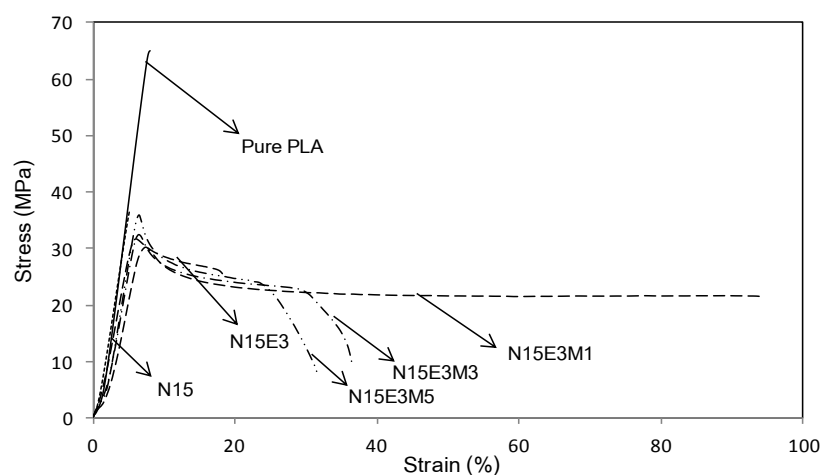


รูปที่ 4.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ 15 phr ร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr และพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ (a) 0 phr, (b) 1 phr, (c) 3 phr และ (d) 5 phr ที่ผ่านการอังไฮดรอกซิเจนออกไซด์ (Os_2O_4)

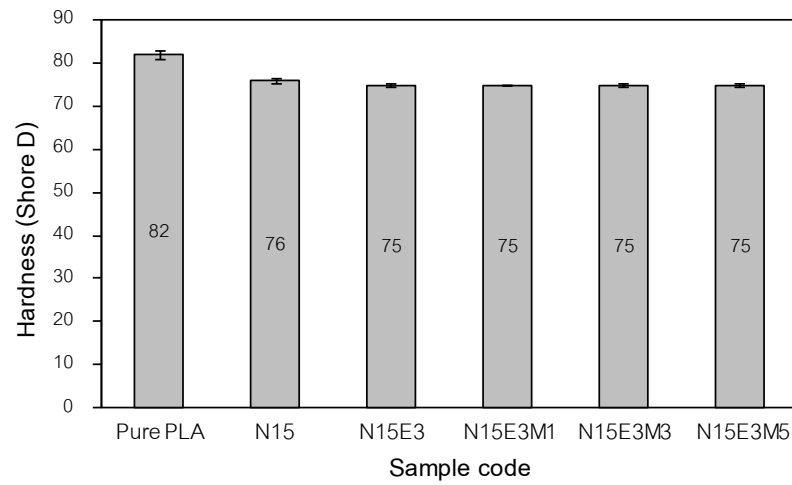
4.3.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

รูปที่ 4.14 แสดงผลของปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีต่อความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3) พบว่าค่ามอดูลัสและความทนแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น สาเหตุอาจเพราะการเติมเฟสที่แข็งอย่างพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าระยะยืด ณ จุดขาดที่มีแนวโน้มลดลง แต่การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลต 1 phr พบว่าให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างมากถึง 94.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3 ถึง 5.1 เท่า และสูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ถึง 11.6 เท่า การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณน้อย ส่งผลต่อความเข้ากันได้ที่ดีกว่า (ดังแสดงในรูปที่ 4.13) ค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3 เนื่องจากการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณเพียงเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ค่าพลังงานการกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 1 phr (สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3 ถึง 3.1 เท่า และสูงกว่า

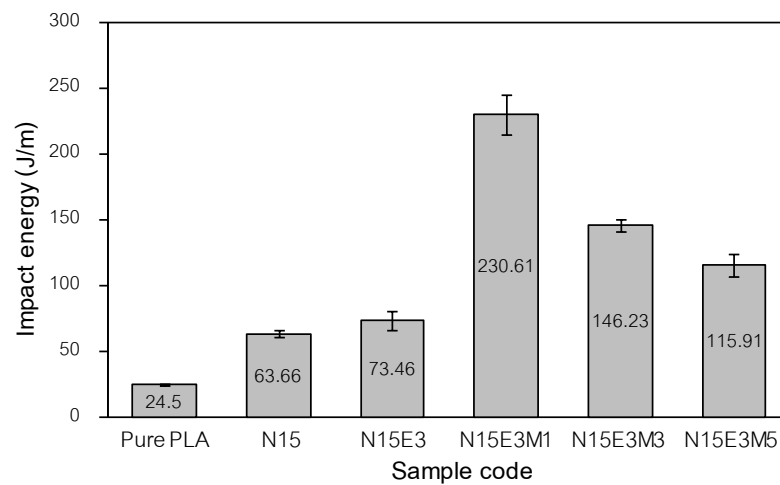
พอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ถึง 9.4 เท่า) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 การลดลงและเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลอาจมีสาเหตุมาจากการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมมากยิ่งขึ้น โดยการเข้าไปแทรกหรือประสานระหว่างยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ แต่ละเฟสในพอลิเมอร์ผสมจึงมีอันตรกิริยาที่มากขึ้นกว่าเดิมซึ่งเป็นเหตุให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดและพลังงานการกระแทกนั้นสูงขึ้นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณมากขึ้น (มากกว่า 3 phr) ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ลดลง เนื่องจากหมู่แทนที่ขนาดใหญ่และมีความกะกะเยอะของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีต่อความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3)



รูปที่ 4.15 ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีต่อค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3)



รูปที่ 4.16 ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีต่อค่าพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ 15 phr และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3)

4.3.3 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

เมื่อพิจารณาผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่ค่าสูงขึ้นเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3 และพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ เมื่อเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 1 phr การเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณน้อยอาจส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติดีขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น (3-5 phr) พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างมาก เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแต่ละเฟสที่ลดลงเพราะปริมาณหมู่เกาะของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น เมื่อแรงยึดเหนี่ยวแต่ละเฟสลดลงจึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีการสลายตัวทางความร้อนที่ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.5 แสดงผลจากดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าเมื่อปริมาณของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น T_g มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีผลของความเกาะเกาะเยอะทำให้โมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมมีการหมุนได้ลำบาก แต่การเพิ่มขึ้นของ T_g ยังน้อยกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติโดยไม่ได้เติมตัวประสาน อาจเพราะการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่เข้ากับยางธรรมชาติได้ดีมาก จึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นซึ่งทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมเกิดการหมุนได้สะดวกขึ้น T_m ของพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ T_c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตรงกันข้ามกับ $\% X_c$ ที่มีแนวโน้มลดลง สาเหตุเพราะการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการขัดขวางการเกิดผลึกของยางธรรมชาติซึ่งเป็นสารก่อผลึก โดยการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 1 phr ในพอลิเมอร์ผสม (N15E3M1) พบว่า $\% X_c$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวประสานช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากัน และช่วยให้โมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหวได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว, อุณหภูมิการเกิดผลึก, อุณหภูมิการหลอมเหลว ผลึกและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน ร้อยยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ชื่อสูตร	T_g (°C) ¹	T_c (°C) ²	ΔH_c ³ (J/g)	T_m (°C) ⁴	ΔH_m ⁵ (J/g)	% X_c ⁶
Pure PLA	62.3	133.1	41.1	155.5	51.6	11.3
N15	62.4	108.3	76.0	157.9	120.6	55.1
N15E3	58.6	115.6	80.5	158.1	113.5	41.7
N15E3M1	59.2	114.0	66.6	156.5	102.3	45.3
N15E3M3	59.3	115.1	69.1	156.7	98.2	37.8
N15E3M5	59.6	115.3	73.4	156.9	96.7	30.6

¹อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ²อุณหภูมิการเกิดผลึก ³พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึก ⁴อุณหภูมิการหลอมผลึก

⁵พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ⁶เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก = $\frac{\Delta H_{m,PLA} - \Delta H_{c,PLA}}{\Delta H_{m(ideal),PLA} \times (X_{PLA})}$; โดยที่

$\Delta H_{m,PLA}$ = พลังงานในการหลอมผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด

$\Delta H_{c,PLA}$ = พลังงานในการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด,

$\Delta H_{m(ideal),PLA}$ = พลังงานในการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเป็นผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (93.7 J/g)

X_{PLA} = เศษส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติเชิงกลก่อน-หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุดของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมปริมาณยางธรรมชาติ 15 phr หลังการบ่มมีค่าลดลงมากกว่าก่อนการบ่มอย่างมาก เนื่องจากการมีพันธะคู่ของยางซึ่งทนความร้อนได้ต่ำ เมื่อเติมปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr เป็นตัวประสาน พบว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุดหลังการบ่มมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนการบ่ม สาเหตุเพราะยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มีพันธะคู่ที่ทนความร้อนได้ต่ำน้อยลง

เมื่อเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานร่วมในปริมาณ 1-5 phr พบว่าค่าความทนแรงดึงสูงสุดหลังการบ่มมีค่าสูงกว่าก่อนการบ่มที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 1 และ 3 phr แต่เมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นถึง 5 phr ความทนแรงดึงสูงสุดกลับต่ำลง จะเห็นว่าพอลิเมทิล เมทาคริเลตเป็นสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง [23-24] และการเติมในปริมาณน้อยนั้นยังส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติดีขึ้น ซึ่งการลดลงของค่าความทนแรงดึงสูงสุดหลังการบ่มเมื่อเติมปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเท่ากับ 5 phr นั้นเป็นผลมาจากอันตรกิริยาที่ลดลงนั่นเอง

ระยะยืด ณ จุดขาดก่อน-หลังการบ่มด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมทุกตัวมีค่าลดลงทั้งหมด โดยพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีการคงสมบัติไว้ได้ดีที่สุด แต่พอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3M1 ยังมีระยะยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มที่สูงที่สุด

ตารางที่ 4.6 ค่าความทนแรงดึงสูงสุดและระยะยืด ณ จุดขาด ก่อน-หลังการบ่มด้วยความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วม ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ชื่อสูตร	UT_B^1 (MPa)		E_B^2 (%)	
	Before aging ³	After aging ⁴	Before aging	After aging
Pure PLA	65.0±0.89	38.9±2.62	8.1±0.35	7.7±0.20
N15	36.8±1.71	8.6±1.77	5.2±0.28	2.8±0.24
N15E3	31.8±0.74	30.2±0.46	18.4±0.09	6.2±0.17
N15E3M1	30.2±2.60	33.6±0.42	94.5±8.78	15.1±0.64
N15E3M3	32.4±0.56	35.8±3.94	36.5±7.05	8.1±0.51
N15E3M5	35.8±2.59	33.8±0.63	31.6±2.61	8.5±0.26

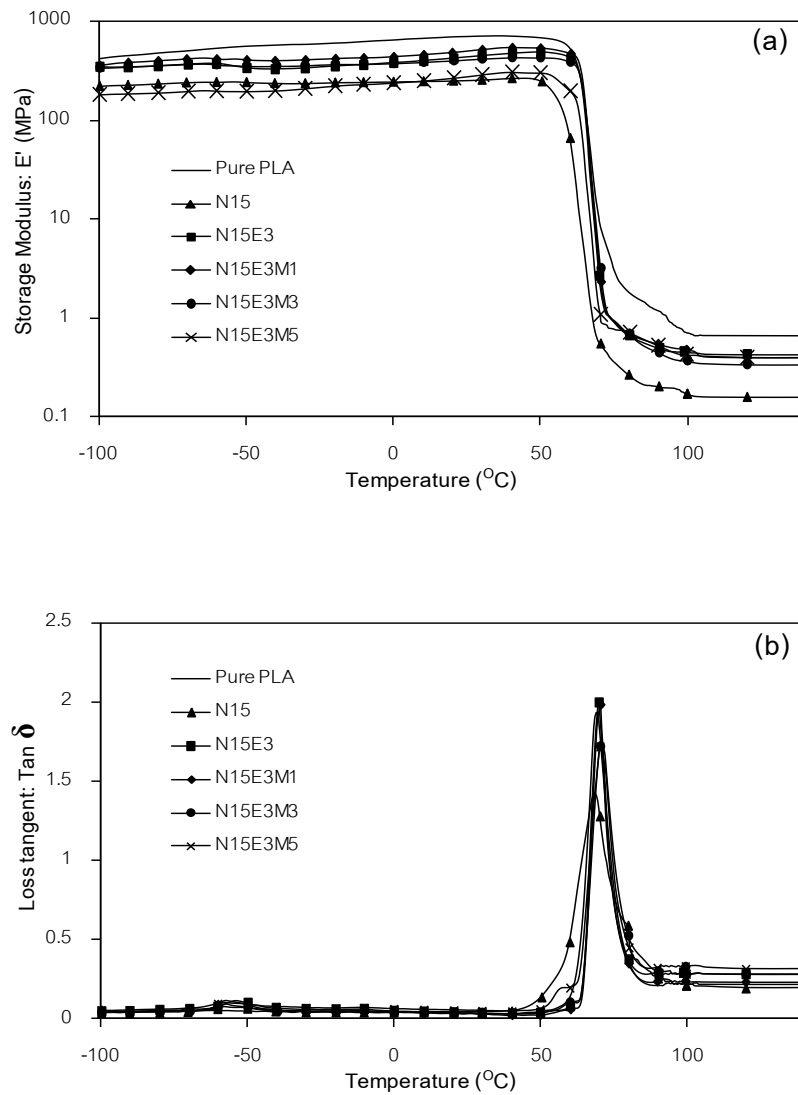
¹ความทนแรงดึงสูงสุด ²ระยะยืด ณ จุดขาด ³ก่อนการบ่มเร่ง ⁴หลังการบ่มเร่ง

4.3.4 สมบัติเชิงพลวัตของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus: E') ของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 4.17(a) พบว่าพอลิเมอร์ผสมแสดงพฤติกรรมสามแบบ ได้แก่ ช่วงพฤติกรรมคล้ายแก้ว (glassy region) ช่วงการเปลี่ยนแปลง (transition) และ ช่วงพฤติกรรมแบบยาง (rubbery region) ค่ามอดูลัสสะสมในช่วงการแสดงพฤติกรรมคล้ายแก้วของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ (ช่วงประมาณ -100 ถึง 60 องศาเซลเซียส) พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสสะสมที่สูงที่สุด เมื่อเติมปริมาณยาง 15 phr พบว่าค่ามอดูลัสสะสมมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการผสมร่วมกับตัวประสานยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ 3 phr (สูตร N15E3) พบว่าค่ามอดูลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มากไปกว่านั้น การผสมพอลิเมทิลเมทาคริเลต 1 phr ร่วมกับพอลิเมอร์ผสมสูตร N15E3 ค่ามอดูลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากการเติมตัวประสานชนิดยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ และการใช้ตัวประสานร่วมกันทั้งสองชนิดนั้นส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมีมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมพอลิเมทิล

เมทาคริเลตในปริมาณเพิ่มขึ้น (3-5 phr) พบว่าค่ามอดุลัสสะสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น สาเหตุเพราะอันตรกิริยาที่ลดลงเนื่องจากความเกาะเกาะจากหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ในช่วงที่สองพอลิเมอร์ผสมเกิดการทรานซิชันที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส และในช่วงที่สามที่อุณหภูมิ 60-140 องศาเซลเซียสพอลิเมอร์ผสมมีพฤติกรรมคล้ายยาง

ค่าแทนเดลต้า ($\tan \delta$) ของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 4.17(b) พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่การทรานซิชันที่สองตำแหน่งคือที่ตำแหน่งประมาณ -60 องศาเซลเซียสซึ่งเกิดจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ และที่ตำแหน่งประมาณ 60 องศาเซลเซียสคือการทรานซิชันของพอลิแล็กติกแอซิด โดยพอลิเมอร์ผสมที่ผสมยางธรรมชาติโดยไม่เติมตัวประสานเกิดการทรานซิชันก่อน แสดงให้เห็นถึงค่า T_g ที่ต่ำที่สุดเนื่องจากยางธรรมชาติช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลหมุนได้ดีขึ้น ในส่วนของพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่น ๆ มีการทรานซิชันที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยพอลิเมอร์ผสมที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะมีการทรานซิชันที่อุณหภูมิสูงกว่าสูตรอื่น ๆ เล็กน้อย เนื่องมาจากความเกาะเกาะของหมู่ฟังก์ชันในสายโซ่ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงสมบัติเชิงพลวัตของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัว
ประสานร่วม โดย (a) มอดุลัสสะสม และ (b) ค่าแทนเดลต้า

4.4 การวิเคราะห์การประยุกต์ใช้งานของพอลิเมอร์ผสม

ปัญหาที่เกิดจากการประยุกต์ใช้พอลิแล็กติกแอซิดในงานอุตสาหกรรมเส้นใยคือการมีความยืดหยุ่น การยืดตัว ความเหนียว รวมทั้งความทนต่อความร้อนต่ำ ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยลำบาก และผลิตภัณฑ์เส้นใยที่ได้มีสมบัติที่ไม่ดี การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยผสมพอลิแล็กติกแอซิดเข้ากับยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลให้สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยได้ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้ต่ำ จึงทำการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน พบว่าสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีข้อดีที่แตกต่างกัน พอลิเมอร์ผสมที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน ให้สมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกและการทนต่อความร้อนสูง เหมาะกับการใช้งานทางด้าน หมวกกันน็อก อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนคอมพิวเตอร ในขณะที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นตัวประสาน ให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้านระยะยืด ณ จุดขาดที่ดี เหมาะกับการใช้งานทางด้าน พลาสติกฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมที่พอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสานร่วมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต ผลที่ได้พบว่ามีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่ดีมาก มีระยะยืด ณ จุดขาดและทนต่อแรงกระแทกได้สูง รวมทั้งมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเยี่ยม ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเส้นใยได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดโดยผสมร่วมกับยางธรรมชาติและตัวประสาน 2 ชนิด ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต และยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีสมบัติเชิงกลด้านระยะยืด ณ จุดขาด และพลังงานการกระแทกต่ำมาก และมีสมบัติเชิงความร้อนด้านอุณหภูมิการสลายตัว เปอร์เซนต์ความ เป็นผลึกน้อย เมื่อผสมร่วมกับยางธรรมชาติพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติด้านพลังงานการกระแทก อุณหภูมิการสลายตัว และเปอร์เซนต์ผลึกเพิ่มขึ้น แต่ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมยังต่ำมาก เนื่องจากความแตกต่างระหว่างช่วงระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ ส่งผลต่อระยะยืด ณ จุดขาดซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

การผสมพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน ผลที่ได้คือตัวประสาน ทั้งสองต่างมีข้อดีที่แตกต่างกันคือ การใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี และมีความแกร่ง เป็นตัวประสานช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าอุณหภูมิการสลายตัว ค่าอุณหภูมิ เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าพลังงานการกระแทกสูงขึ้นอย่างมาก แต่ค่าระยะยืด ณ จุดขาดยัง ไม่มีการปรับปรุงเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ การใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เป็นตัว ประสาน พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าระยะยืด ณ จุดขาดที่เพิ่มขึ้นสูงมาก รวมทั้งมีพลังงานการ กระแทกที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่าอุณหภูมิการสลายตัวและ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมี ค่าลดลงเมื่อเทียบกับการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน

ดังนั้น เมื่อผสมพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ 15 phr ร่วมกับตัวประสานร่วม ชนิดยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (ENR-PMMA compatibilizer) ใน ปริมาณ 3 และ 1 phr ตามลำดับ ณ อัตราส่วนการผสมนี้ สมบัติเชิงกลด้านระยะยืด ณ จุดขาด และพลังงานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยเพิ่มขึ้นถึง 1140 และ 940 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10.3 องศาเซลเซียส เปอร์เซนต์ ความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 11.30 เป็น 45.28 เปอร์เซนต์ สมบัติเชิงกลหลังการบ่มด้วยความ ร้อนมีค่าสูงที่สุด และสมบัติเชิงพลวัตด้านมอดูลัสสะสมมีค่าใกล้เคียงเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติก แอซิดบริสุทธิ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เทคนิคในการผสมอาจยังมีประสิทธิภาพไม่พอ เนื่องจากทางผู้วิจัยใช้เครื่องบดผสมภายใน โดยการปรับปรุงการผสมอาจเปลี่ยนไปใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงกว่านี้ เช่น เครื่องบดผสมแบบสกรูคู่

5.2.3 การปรับปรุงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการสลายตัวให้ดียิ่งขึ้น อาจเปลี่ยนไปใช้สารตัวเติมอื่น ๆ ในการผสมร่วม อาทิเช่น ออร์การ์โนเคลย์ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูง พลาสติกไซเซอรอื่น ๆ เช่น พอลิเอทิลีน ไกลคอล พอลิพรอพิลีน ไกลคอล พอลิ(1,3-บิวเทนไดออล) เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] Rasal, R. M., Janorkar, A. V., and Hirt, D. E. Poly(lactic acid) modifications. *Prog. Polym. Sci.* 35 (2010) : 338–356.
- [2] Farrington, D.W., Lunt, J., Davies, S., and Blackburn, R.S. Poly(lactic acid) fibers. in *Biodegradable and sustainable fibres*, pp. 191-219. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [3] Gupta, B., Revagade, N., and Hilborn, J. Poly(lactic acid) fiber: An overview. *Prog. Polym. Sci.* 32 (2007) : 455–482.
- [4] Brydson, J. A. *Rubbery materials and their compounds*. London : Elsevier Science Ed, 1994.
- [5] เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์. เทคโนโลยีของยาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [6] Paul, D.R., Barlow, J.W., and Keskkula, H. Polymer Blends. in *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering Vol.10*, pp. 399-461. New York : John Wiley & Sons. Inc., 1988.
- [7] Collyer, A. A. *Rubber toughened engineering plastics*. London : Chapman & Hall, 1994.
- [8] Okamoto, H., Nakano, M., and Usuki, A. Toughening of polylactide by melt blending with natural rubber. *Polymer preprint.* 54 (2005) : 5345.
- [9] Okamoto, H., Nakano, M., and Usuki, A. Toughening of polylactide by melt blending with natural rubber(2)-effect of PLA crystallization. *Polymer preprint.* 55 (2006) : 2256.
- [10] Pillin, I., Montrelay, N., and Grohens, Y. Thermo-mechanical characterization of plasticized PLA: Is the miscibility the only significant factor?. *Polymer.* 47 (2006) : 4676-4682.
- [11] Huneault, M. A., and Li, H. Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends. *Polymer.* 48 (2007) : 270-280.

- [12] Ishida, S., Nagasaki, R., Chino, K., Dong, T., and Inoue, Y. Toughening of poly (L-lactide) by melt blending with rubbers. *J. Appl. Polym. Sci.* 113 (2009) : 558-566.
- [13] Balakrishnan, H., Hassan, A., Wahit, M.U., Yussuf, A.A., Bahri, S., and Razak, A. Novel toughened polylactic acid nanocomposite: mechanical, thermal and morphological properties. *Mater. Des.* 37 (2010) : 3289-3298.
- [15] Bitinis, N., Verdejo, R., Cassagnau, P., and Lopez-Manchado, M.A. Structure and properties of polylactide/natural rubber blends. *Mater. Chem. Phys.* 129 (2011) : 823-831.
- [16] Balakrishnan, H., Hassan, A., and Wahit, M.U. Mechanical, thermal, and morphological properties of polylactic acid/linear low density poly ethylene blends. *J. Elast. Plast.* 42 (2010) : 223-238.
- [17] Jaratrotkamjorn, R., Khaokong, C., and Tanrattanakul, V. Toughness enhancement of poly(lactic acid) by melt blending with natural rubber. *J. Appl. Polym. Sci.* 124 (2012) : 5027–5036.
- [18] พัชรภรณ์ สมดี. พอลิแล็กติกแอซิดเสริมความเหนียวด้วยยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- [19] Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., Chumsamrong, P., and Ruksakulpiwat, Y. Comparison between mechanical and thermal properties of polylactic acid and natural rubber blend using calcium carbonate and vetiver glass fiber as filler. *Adv. Mater. Res.* 410 (2012) : 59-62.
- [20] Luo, F. et al. Effect of compatibilizers on the mechanical properties of low density polyethylene/lignin blends. *Chinese J. of Polym. Sci.* 27 (2009) : 833-842.
- [21] Waryat, Romli, M., Suryani, A., Yuliasih, I., and Johan, S. Using of a compatibilizer to improve morphological, physical and mechanical properties of biodegradable plastic from thermoplastic starch/LLDPE blends. *Int. J. Eng. Tech.* 13 (2013) : 115-122.

- [22] Chan, C. H., Sulaiman, S. F., Kammer, H. W., Sim, L. H., and Harun, M. K. Thermal properties of epoxidized natural rubber-based polymer blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 120 (2011) : 1774–1781.
- [23] Lomakin, S.M., Brown, J.E., Breese, R.S., and Nyden, M.R. An investigation of the thermal stability and char-forming tendency of cross-linked poly(methyl methacrylate). *Polym. Degrad. Stabil.* 41 (1993) : 229-243.
- [24] Beyler, C.L., and Hirschler, M.M. Thermal decomposition of polymers. in *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 110-132. Massachusetts : National Fire Protection Association, 2002.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติของพอลิเมอร์	ผลการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm ³)	1.24
ดัชนีการไหล ที่น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส (กรัมต่อ10นาที, g/10 min)	5.0 - 7.0
ความทนแรงดึงสูงสุด ณ จุดขาด (เมกะปาสคาล, MPa)	53.0
ความทนแรงดึงสูงสุด (เมกะปาสคาล, MPa)	60.0
ระยะยืด ณ จุดขาด (ร้อยละ, %)	6.0
มอดุลัสความยืดหยุ่น (กิกะปาสคาล, GPa)	3.45
ความทนต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (จูลต่อเซนติเมตร, J/cm)	0.1281
ค่าแสงส่องผ่าน (ร้อยละ, %)	90
อุณหภูมิส่วนประกอบ (องศาเซลเซียส, °C)	180.0
อุณหภูมิส่วนแตกเปราะ (องศาเซลเซียส, °C)	200.0
อุณหภูมิส่วนหัวตาย (องศาเซลเซียส, °C)	190.0
อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส, °C)	210.0
อุณหภูมิการอบแห้ง ที่เวลา 2 ชั่วโมง (องศาเซลเซียส, °C)	90.0
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ, %)	0.025
จุดกลั่นตัว (องศาเซลเซียส, °C)	-40.0
อัตราการไหลของอากาศในการอบไล่ความชื้น (ลิตรต่อนาที, l/min)	14.2
ความเร็วรอบในการหมุนผสม (รอบต่อวินาที, rpm)	20-100

ตารางที่ ก.2 สมบัติของยางธรรมชาติเกรด STR-5L ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติของยาง	ผลการทดสอบ
ปริมาณสิ่งสกปรก สูงสุดไม่เกิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก, %wt)	0.04
ปริมาณเถ้า สูงสุดไม่เกิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก, %wt)	0.40
ปริมาณสิ่งระเหย สูงสุดไม่เกิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก, %wt)	0.80
ปริมาณไนโตรเจน สูงสุดไม่เกิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก, %wt)	0.60
ความอ่อนตัวเริ่มแรก ไม่ต่ำกว่า	35
ดัชนีความอ่อนตัว ไม่ต่ำกว่า	60
สี วัดด้วยไลวิบอนด์ สูงสุดไม่เกิน	6
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 100 องศาเซลเซียส) ¹	-
สี پایชื่อ	เขียวอ่อน

ตารางที่ ก.3 สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติของยาง	ผลการทดสอบ
ระดับออกซิเดชัน (ร้อยละ, %)	50
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (องศาเซลเซียส, °C)	-24
ความหนาแน่น (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, mg/m ³)	1.02
ดัชนีการละลาย (J/m ³) ^{0.5}	18.2
สี วัดด้วยไลวิบอนด์ สูงสุดไม่เกิน	3.5
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 100 องศาเซลเซียส) ¹	70.- 90
ระดับโปรตีน (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g)	0.0008
การทดสอบภูมิแพ้โปรตีนแอลเลอเจน โดยวิธีของ RAST	2-4

¹หน่วยของค่าความหนืดมูนนี่ โดย M หมายถึง Mooney L หมายถึงงานหมุนขนาดใหญ่ (ถ้าใช้งานหมุนขนาดเล็กให้ใช้อักษร S)

1 หมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนทดสอบเป็นนาที 4 หมายถึงเวลาที่ใช้ในการทดสอบเป็นนาที และ 100 องศาเซลเซียส หมายถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ ก.4 สมบัติของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติของพอลิเมอรั	ผลการทดสอบ
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm^3)	1.19
การดูดซับน้ำ (ร้อยละ, %)	0.30
การหดตัวเชิงเส้น (เซนติเมตรต่อเซนติเมตร, cm/cm)	0.0020 – 0.0060
ดัชนีการไหล ที่น้ำหนัก 3.80 กิโลกรัม อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส (กรัมต่อ10นาที, g/10 min)	19
ค่าความแข็งร็อกเวลล์	100
ความทนแรงดึงสูงสุด ณ จุดขาด (เมกะปาสคาล, MPa)	72.57
ระยะยืด ณ จุดขาด (ร้อยละ, %)	5.0
มอดูลัสความยืดหยุ่น (กิกะปาสคาล, GPa)	3.23
ความทนแรงดัดงอ (เมกะปาสคาล, MPa)	107.87
มอดูลัสแรงดัดงอ (กิกะปาสคาล, GPa)	3.14
ความทนทานต่อแรงกด (เมกะปาสคาล, MPa)	108.0
ความทนต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (จูลต่อเซนติเมตร, J/cm)	0.209
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ไมโครเมตรต่อเมตร-องศาเซลเซียส, $\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$)	59.9
ความร้อนจำเพาะ (จูลต่อกรัม-องศาเซลเซียส, $\text{J/g-}^\circ\text{C}$)	1.46
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลวิน, W/m-K)	0.209
อุณหภูมิการเสีรูปร่าง ที่ 1.8 เมกะปาสคาล (องศาเซลเซียส, $^\circ\text{C}$)	100
อุณหภูมิจุดอ่อนตัว (องศาเซลเซียส, $^\circ\text{C}$)	115
ดัชนีหักเห	1.49
ค่าแสงส่องผ่าน (ร้อยละ, %)	93

ภาคผนวก ข

การคำนวณน้ำหนักสูตรผสม

ความจุของเครื่องบดผสมภายใน = 300 กรัม

ยกตัวอย่างคำนวณสูตร N15E3M1

โดยใช้

พอลิแล็กติกแอซิด (PLA)	100 phr
ยางธรรมชาติ (NR)	15 phr
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (ENR)	3 phr
พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)	1 phr
รวมทั้งหมด	119 phr

น้ำหนักที่ใช้คือ

$$\begin{aligned} \text{PLA} &= \frac{100 \times 300}{119} = 252.10 \text{ กรัม} \\ \text{NR} &= \frac{15 \times 252.10}{100} = 37.82 \text{ กรัม} \\ \text{ENR} &= \frac{3 \times 252.10}{100} = 7.56 \text{ กรัม} \\ \text{PMMA} &= \frac{1 \times 252.10}{100} = 2.52 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นต้องซึ่งปริมาณสารแต่ละตัวเท่ากับ

พอลิแล็กติกแอซิด (PLA)	252.10 กรัม
ยางธรรมชาติ (NR)	37.82 กรัม
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (ENR)	7.56 กรัม
พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)	2.52 กรัม
รวมทั้งหมด	300.00 กรัม

ภาคผนวก ค

ข้อมูลสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมร่วมกับยางธรรมชาติ

ชื่อสูตร	Pure PLA	N5	N10	N15
Young's modulus ¹ (MPa)	1020.0	983.2	866.0	798.8
	1021.0	982.0	878.4	799.1
	1027.3	997.6	855.5	806.5
	Mean ²	1022.8	987.6	866.6
SD ³	3.96	8.65	11.49	4.35
UT _B ⁴ (MPa)	66.0	55.9	49.0	39.1
	64.7	52.2	48.5	35.7
	64.3	53.6	46.1	35.8
	Mean	65.0	53.9	47.9
SD	0.89	1.87	1.53	1.92
E _B ⁵ (%)	8.4	6.46	6.4	5.9
	8.3	6.33	6.8	4.8
	7.7	6.83	7.7	4.9
	Mean	8.1	6.54	6.9
SD	0.35	0.26	0.66	0.57
Hardness ⁶	81	79	78	76
	82	79	78	76
	83	80	78	75
	81	79	79	76
	81	79	79	75
	Mean	82	79	78
SD	0.9	0.4	0.5	0.5
Impact energy ⁷ (J/m)	25.3	51.2	54.8	66.08
	24.2	39.8	44.1	63.36
	24.4	40.9	47.8	60.82
	Mean	24.5	44.0	48.9
SD	0.70	6.26	5.45	2.68

¹ค่ามอดูลัสของยัง ²ค่าเฉลี่ย ³ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ⁴ความทนแรงดึงสูงสุด ⁵ระยะยืด ณ จุดขาด ⁶ความแข็ง

⁷พลังงานการกระแทก

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน
พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ชื่อสูตร	N5M1	N5M3	N5M5	N10M1	N10M3	N10M5	N15M1	N15M3	N15M5
Young's modulus ¹ (MPa)	936.9	901.6	779.6	917.0	803.4	802.4	750.3	736.6	822.5
Mean ²	945.1	911.1	805.2	910.9	812.6	791.2	756.3	737.7	821.2
SD ³	11.08	8.23	30.77	7.21	7.95	14.48	6.03	1.22	12.67
UT _B ⁴ (MPa)	40.6	35.2	40.8	43.5	42.3	40.2	36.4	36.7	37.8
Mean	39.5	36.1	37.6	43.6	41.4	41.4	37.7	37.9	38.0
SD	39.9	35.3	36.6	39.1	42.4	38.9	39.2	36.8	38.2
Mean	40.0	35.5	38.3	42.1	42.0	40.2	37.8	37.1	38.0
SD	0.53	0.53	2.18	2.59	0.54	1.26	1.40	0.67	0.20
E _B ⁵ (%)	6.52	6.08	6.45	6.99	7.34	6.34	7.60	7.84	6.84
Mean	6.25	6.46	5.42	6.70	7.23	7.77	7.19	7.87	7.21
SD	5.80	6.05	6.73	7.31	7.58	9.65	8.85	8.84	7.58
Mean	6.19	6.20	6.20	7.00	7.38	7.92	7.88	8.18	7.21
SD	0.36	0.23	0.69	0.30	0.18	1.66	0.87	0.57	0.37
Hardness ⁶	78	80	80	78	77	80	76	77	76
Mean	79	79	80	77	76	81	75	77	76
SD	79	79	80	78	79	79	75	77	76
Mean	79	80	80	77	79	80	76	77	76
SD	78	79	81	77	78	79	75	77	77
Mean	79	80	80	77	78	80	75	77	76
SD	0.5	0.5	0.4	0.5	1.3	0.8	0.5	0.0	0.4
Impact energy ⁷ (J/m)	53.7	49.3	34.3	141.8	81.5	75.4	124.3	180.2	116.4
Mean	54.8	53.5	32.4	140.6	80.1	69.3	112.2	167.1	106.5
SD	51.0	35.4	28.5	161.3	78.8	62.3	104.4	167.3	82.5
Mean	53.2	46.0	31.7	125.0	80.1	69.0	113.6	171.5	101.8
SD	1.95	9.47	2.92	11.64	1.36	6.54	10.03	7.50	17.43

¹ค่ามอดูลัสของยัง ²ค่าเฉลี่ย ³ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ⁴ความทนแรงดึงสูงสุด ⁵ระยะยืด ณ จุดขาด ⁶ความแข็ง

⁷พลังงานการกระแทก

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์

ชื่อสูตร	N5E1	N5E3	N5E5	N10E1	N10E3	N10E5	N15E1	N15E3	N15E5
Young's modulus ¹ (MPa)	883.5	885.5	791.0	716.2	649.5	681.0	742.7	696.1	647.7
Mean ²	866.1	901.3	816.8	716.1	673.0	689.2	742.3	703.0	671.9
SD ³	889.8	868.3	821.7	741.9	644.5	715.2	745.0	720.0	656.2
UT _B ⁴ (MPa)	879.8	885.0	809.8	724.7	655.7	695.1	743.3	706.4	658.6
Mean	12.26	16.53	16.48	14.89	15.22	17.85	1.43	12.31	12.28
SD	44.3	44.6	37.4	37.7	37.0	33.2	33.1	31.7	28.2
Mean	45.7	45.4	37.1	38.6	36.9	33.6	33.2	30.3	28.5
SD	44.4	41.7	41.7	36.7	35.4	29.2	33.3	33.2	29.4
Mean	44.8	43.9	38.7	37.7	36.4	32.0	33.2	31.8	28.7
SD	0.81	1.92	2.60	0.93	0.89	2.45	0.10	1.42	0.64
E _B ⁵ (%)	6.8	6.7	7.0	11.2	10.7	10.2	13.4	18.1	12.8
Mean	8.2	7.8	7.4	12.1	10.3	12.1	11.1	18.0	10.1
SD	5.7	8.3	7.1	13.3	11.9	9.5	12.3	19.1	9.8
Mean	6.9	7.6	7.2	12.2	11.0	10.6	12.3	18.4	10.9
SD	1.28	0.81	0.20	1.05	0.85	1.35	1.14	0.63	1.65
Hardness ⁶	74	75	75	76	73	75	76	75	74
Mean	76	75	77	77	73	76	75	75	75
SD	77	76	77	78	75	75	74	76	75
Mean	77	75	77	77	75	75	75	76	75
SD	77	75	77	77	74	75	75	75	74
Mean	76	75	77	77	74	75	75	75	75
SD	1.3	0.4	0.9	0.7	1.0	0.4	0.7	0.5	0.5
Impact energy ⁷ (J/m)	54.0	66.2	59.0	91.3	106.1	89.1	66.3	80.4	85.3
Mean	60.1	58.4	47.8	73.1	102.4	78.3	58.2	73.9	83.3
SD	47.7	56.7	54.0	90.8	92.6	67.1	55.9	66.2	71.8
Mean	53.9	60.4	53.6	85.1	100.4	78.2	60.2	73.5	80.1
SD	6.20	5.06	5.61	10.37	6.99	11.00	5.47	7.11	7.29

¹ค่ามอดูลัสของยัง ²ค่าเฉลี่ย ³ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ⁴ความทนแรงดึงสูงสุด ⁵ระยะยืด ณ จุดขาด ⁶ความแข็ง

⁷พลังงานการกระแทก

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับตัวประสาน
ร่วมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

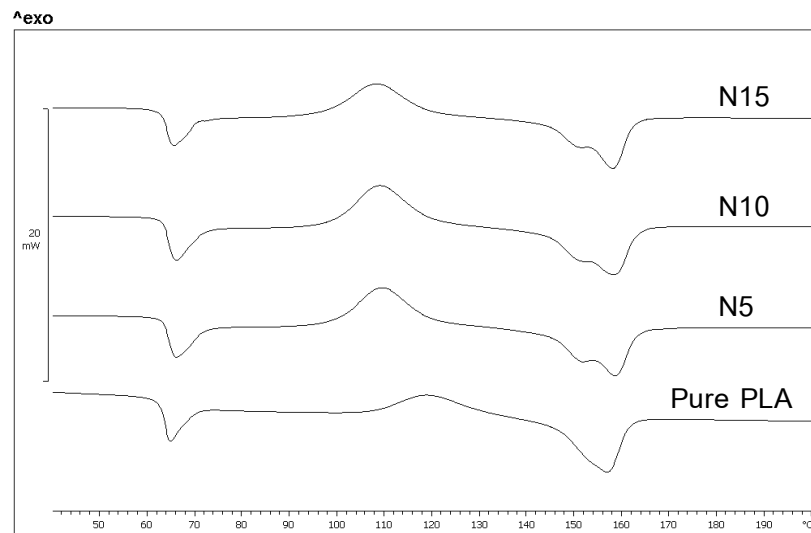
ชื่อสูตร	N15E3M1	N15E3M3	N15E3M5
Young's modulus ¹ (MPa)	686.0	704.3	740.5
	692.3	691.1	724.7
	665.0	702.3	711.4
	681.1	699.2	725.5
Mean ²	681.1	699.2	725.5
SD ³	14.30	7.12	14.60
UT _B ⁴ (MPa)	30.8	31.6	34.0
	29.6	31.1	35.2
	30.2	34.6	38.2
	30.2	32.4	35.8
Mean	30.2	32.4	35.8
SD	0.58	1.89	2.12
E _B ⁵ (%)	96.0	35.7	36.5
	95.9	38.8	31.9
	91.5	35.0	25.5
	94.5	36.5	31.3
Mean	94.5	36.5	31.3
SD	2.56	2.03	5.51
Hardness ⁶	75	75	76
	75	75	75
	75	76	75
	75	75	76
	75	76	75
	75	75	75
Mean	75	75	75
SD	0.0	0.5	0.5
Impact energy ⁷ (J/m)	213.6	148.1	126.3
	242.8	149.7	111.3
	235.5	140.8	110.2
	230.6	146.2	115.9
Mean	230.6	146.2	115.9
SD	15.18	4.71	8.97

¹ค่ามอดูลัสของยัง ²ค่าเฉลี่ย ³ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ⁴ความทนแรงดึงสูงสุด ⁵ระยะยืด ณ จุดขาด ⁶ความแข็ง

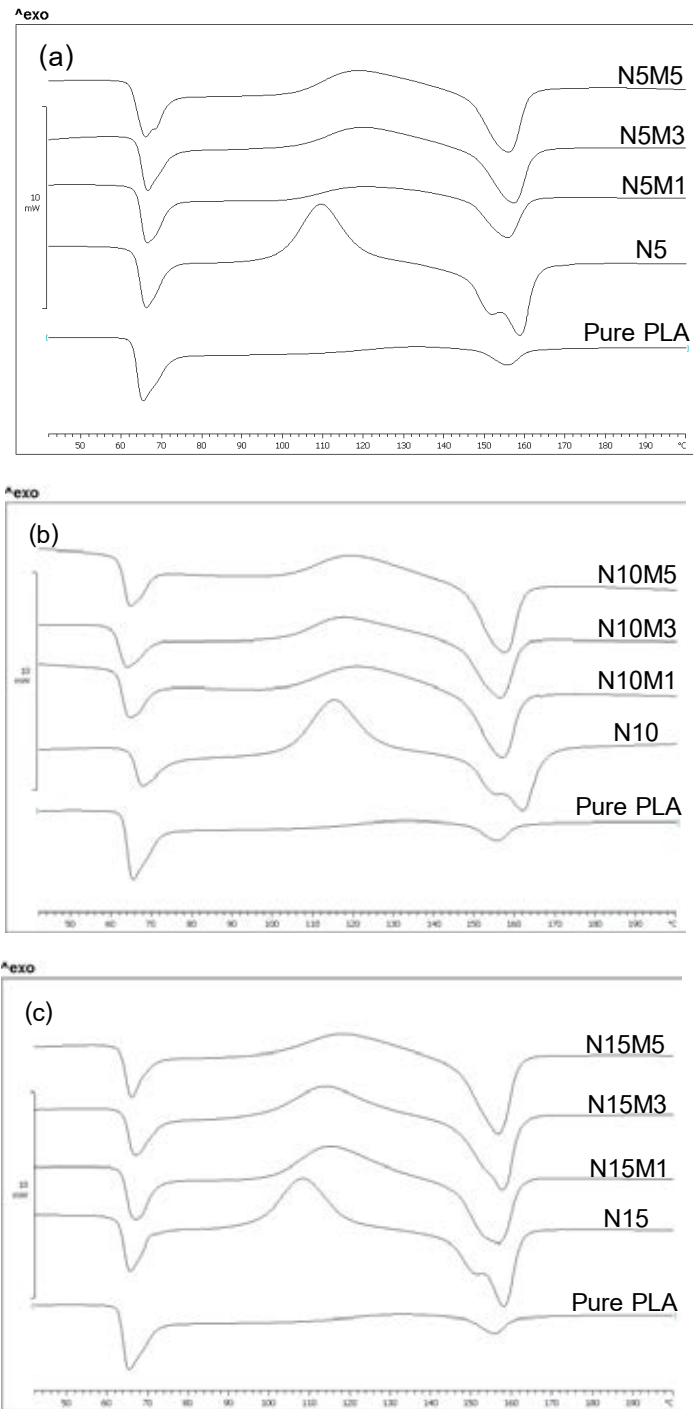
⁷พลังงานการกระแทก

ภาคผนวก ง

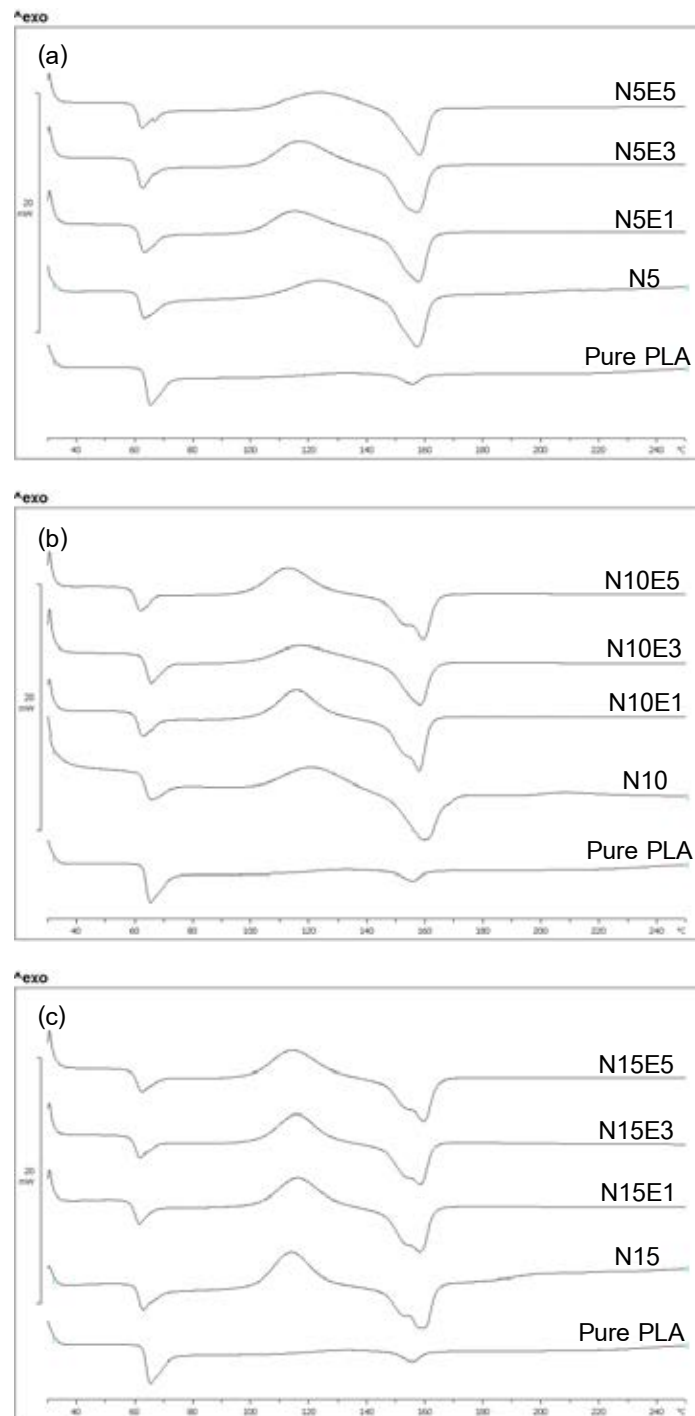
ผลจากดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์



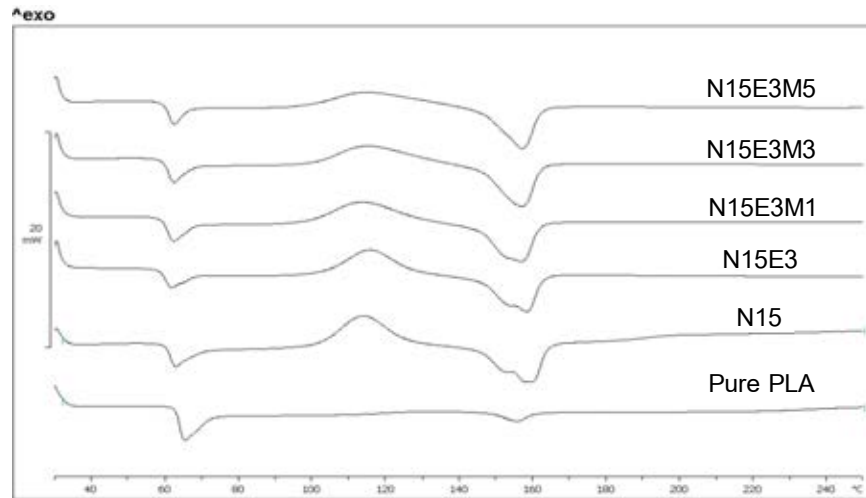
รูปที่ ง.1 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติ
ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ ๒.2 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) - (c) เปรียบเทียบปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ในอัตราส่วนต่างๆ โดย (a) - (c) เปรียบเทียบปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้น 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติคงที่ที่ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ



รูปที่ ง.4 เทอร์โมแกรมแสดงผลของปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตในอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ 15 phr ร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ 3 phr (N15E3)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวุฒิพงษ์ เดชาติวงศ์ ณ อยุธยา เกิดเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม 2529 ที่สุโขทัย สำเร็จ การศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552

การนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ

“Morphological, Thermal, and Mechanical Properties of Polylactic Acid Blend with Natural rubber and Polymethyl Methacrylate” เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ “The science forum 2012” ครั้งที่ 20 ประจำปี 2555 ระหว่างวันที่ 19-20 เมษายน ณ อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

“Morphological, Thermal, and Mechanical Properties of Poly(lactic Acid) Blend with Natural rubber and Poly(methyl Methacrylate)” เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ “Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium (EMSES)” ครั้งที่ 10 ประจำปี 2555 ระหว่างวันที่ 5-8 ธันวาคม ณ โรงแรมสุนีย์แกรนด์ อุบลราชธานี