



การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิดด้วย
วัสดุธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปร

Toughening Modification of Polylactic acid with
Modified Natural Materials

ผศ.ดร. กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๑
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าผลของการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดด้วยการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) และเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ การปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดถูกประเมินผลโดยการทดสอบแรงดึงและแรงกระแทก เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (DSC) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สำหรับผลการเติมยาง ENR พบว่า การเพิ่มปริมาณยาง ENR มีผลในการช่วยปรับปรุงการยึดตัว ผนึก จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทก แต่ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึง และความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ปริมาณผลึก และจุดหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดมีแนวโน้มลดลงด้วยการเติมยาง ENR สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีถูกพบว่า พีค C=O ของพอลิเมอร์ผสมมีขยับตำแหน่งไปเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิด สูตรที่ดีที่สุดในการปรับปรุงความเหนียวสำหรับกรณีการเติมยาง ENR คือ การเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความต้านทานแรงกระแทก 1,982.55 %เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด สำหรับการเสริมประสิทธิภาพด้วยสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าการเติม Joncryl® ADR-4300 ช่วยปรับปรุงทั้งสมบัติแรงดึงและแรงกระแทก และพบว่า กรณีการเติม Joncryl® ADR-4300 0.5 %โดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิดเป็นสูตรที่มีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด ปริมาณผลึก และจุดหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าลดลง เมื่อเติม Joncryl® ADR-4300 เนื่องจากสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยขยายสายโซ่สำหรับพอลิแลคติกแอซิดด้วยจึงอาจไปขัดขวางการเกิดผลึก อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยการเติม Joncryl® ADR-4300

คำสำคัญ: พลาสติกชีวภาพ/พอลิแลคติกแอซิด/ความเหนียว/ยางธรรมชาติอีพอกไซด์/สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Abstract

This research work was to study the toughening modification of polylactic acid by the mixing with epoxidized natural rubber (ENR) and the increase of effectiveness of mechanical properties with a compatibilizer. Enhancement of properties in polylactic acid was evaluated by tensile and impact testings, Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FTIR) technique, Differential Scanning Calorimetry (DSC) technique and Scanning Electron Microscope (SEM). For the addition of ENR, it was revealed that the increase of ENR contents improved elongation at break and impact strength but decreased tensile modulus and ultimate tensile strength. Glass transition temperature (T_g), percentage crystallinity and the melting point of polylactic acid tended to decrease with the addition of ENR. Chemical change was found that position of C=O peak in polymer blend was slightly shifted as compared to the spectrum of neat polylactic acid. The optimum formulation for toughening modification was ENR content of 30 wt%. Its impact strength was 1,982.55 % of neat polylactic acid. For increasing effectiveness of mechanical properties with a compatibilizer, it revealed that the addition of Joncryl® ADR-4300 as compatibilizer improved both tensile and impact properties. The optimum loading of a compatibilizer for improving mechanical properties was 0.5 wt% of polylactic acid. The decreases of crystallinity and melting point of polylactic acid with adding Joncryl® ADR-4300 might be because Joncryl® ADR-4300 was also chain extender of polylactic acid and it might be obstructing crystallization. The presence of Joncryl® ADR-4300 unaffected on T_g value and chemical change.

Keywords: Bioplastic/Polylactic acid/Toughness/Epoxidized natural rubber/Compatibilizer

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้ทุนงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน

คณะวิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บัญชีตาราง	ฉ
บัญชีรูป	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลาสติกชีวภาพ	4
2.2 พอลิแลกติกแอซิด	5
2.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์	10
2.4 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	15
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	16
3. วิธีการดำเนินการวิจัย	18
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	18
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	20
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	21
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	32
4.1 ผลการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด	32
4.2 ผลการศึกษาค้นหาปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์	40

บทที่	หน้า
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	47
5.1 การศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด	47
5.2 การศึกษาการหาปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติอพอกไซด์	47
เอกสารอ้างอิง	49
ประวัตินักวิจัย	52



บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการเติมเขม่าดำ	13
2	เปรียบเทียบผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยเขม่าดำและซิลิกา	13
3	เปรียบเทียบผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยเขม่าดำและซิลิกา	14
4	สมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดที่ผสมกับยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์	38
5	สมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิแลกติกแอซิดสำหรับกรณีการเติมยาง ENR และการเติม Joncryl ® ADR-4300 เปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่มีการเติมสาร	45



บัญชีรูป

รูปที่		หน้า
1	การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้	5
2	สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลกติกแอซิด	6
3	โครงสร้างของกรดแลกติก รูปแบบดี- และแอล-ไอโซเมอร์	7
4	กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง	8
5	ปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันที่ตัดแปรงธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR ด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก	11
6	การเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ไซด์	11
7	ปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและกรดเปอร์แอซิดิก	11
8	สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอ็อกซิเดชัน 50 %mol	11
9	ความทนต่อน้ำมันของยาง ENR-25 ENR-50 ยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน และยางไนไตรล์ เมื่อถูกแช่น้ำมัน 1, 2 และ 3 ตามมาตรฐาน ASTM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเวลา 70 ชั่วโมง	14
10	ภาพทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างระหว่างพอลิพรอพิลีน และเทอร์โมพลาสติกสเตรซที่มีการเติม MAPP และไม่มีเติม	16
11	เม็ดพอลิแลกติกแอซิด เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC	18
12	ยางธรรมชาติอ็อกไซด์ เกรด ENR50 ของบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด	19
13	สารเชื่อมโยงไดควิมิวเพอร์ออกไซด์ ของบริษัท Sigma-Aldrich	19
14	สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ Joncryl ® ADR-4300 ของบริษัท BASF	20
15	แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอ็อกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด	21
16	เครื่องผสมแบบระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด	22
17	เครื่องอัดด้วยความดัน รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน	23
18	ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง	24
19	ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	24
20	เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus	25
21	ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน	26

รูปที่		หน้า
22	ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน	27
23	เครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2	27
24	เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P	28
25	เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH	29
26	เครื่อง FT-IR spectrometer รุ่น Spectrum One ของบริษัท Perkin Elmer จำกัด	29
27	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV	30
28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผสมและแรงบิดที่เกิดขึ้น รวมถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการผสมพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่เติม DCP ด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด	32
29	ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน	33
30	ผลของปริมาณยาง ENR ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR	34
31	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน	35
32	ผลของการปรับปรุงแรงกระแทกของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยวิธีการผสมแบบกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์	36
33	ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิดที่เติมยาง ENR ภายหลังการทดสอบแรงกระแทก	37
34	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิด พอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และยาง ENR	39
35	ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และมีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ปริมาณต่างๆ กันเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด	41
36	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และมีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ปริมาณต่างๆ กันเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด	41
37	ผลของการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ Joncryl ® ADR-4300 ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก	42

รูปที่		หน้า
38	ผลของการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงกระทำของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติม ยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก ที่มีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ปริมาณต่างๆ กัน	43
39	ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิดที่เติมยาง ENR ภายหลังจากทดสอบ แรงกระทำ	44
40	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมและไม่เติม Joncryl ® ADR-4300 2.0 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด	45



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradable plastic) จึงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ทางการค้าทดแทนการใช้พลาสติกที่มาจากปิโตรเลียมซึ่งย่อยสลายได้ยาก และกำลังเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมของโลกที่รุนแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้แล้ว พอลิแลคติกแอซิดยังมีสมบัติทางกลที่ดี โดยมีความสามารถในการรับแรงได้ดี และมีความคงรูปร่างสูง [1] แต่อย่างไรก็ตาม พอลิแลคติกแอซิดยังคงมีข้อด้อยอยู่บางประการที่จำเป็นต้องปรับปรุงเพื่อให้พอลิแลคติกแอซิดสามารถนำมาใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์ได้ดียิ่งขึ้น เช่น ความเปราะ และความทนต่อแรงกระแทก จากการศึกษางานวิจัย พบว่า การปรับปรุงความเหนียว และความทนแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดสามารถปรับปรุงได้หลากหลายวิธี เช่น การเติมสารพลาสติกไซเซอร์ [2-4] การเติมเฟสของยาง [5-7] การเติมเฟสของยางร่วมกับสารเสริมแรง [8-9] สำหรับโครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายในการปรับปรุงสมบัติที่ด้อยของพอลิแลคติกแอซิดเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ และต้องการนำยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีมากในประเทศไทยมาใช้ในการปรับปรุง แต่เนื่องจากความไม่เข้ากันของพอลิแลคติกแอซิดและยางธรรมชาติจึงทำให้การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดด้วยยางธรรมชาติเป็นไปได้โดยไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ซึ่งเป็นยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรมาใช้ในการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide group หรือ oxirane group) ในยาง ENR อาจเกิดแรงกระทำกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของ พอลิแลคติกแอซิด แต่จากการพิจารณางานวิจัยที่ผ่านมา [6-9] พบว่า ถ้าทำการเติมเฟสยาง ENR มากกว่า 10 %โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงลดลงอย่างมาก เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวควบคู่ไปกับการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด โดยทำการผสมยาง ENR และพอลิแลคติกแอซิดด้วยวิธีการผสมแบบกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ (Dynamic vulcanization) หรือวิธีการผสมที่มีกระบวนการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางระหว่างการผสมเกิดเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic vulcanizate, TPV) โดยการเลือกใช้ไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) เพราะสามารถเข้ากันได้กับทั้งพอลิแลคติกแอซิดและยาง ENR [10] นอกจากนี้ยังต้องการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและยาง ENR จึงทำการศึกษาผลของการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) เพื่อทำหน้าที่ช่วยให้เฟสของยาง ENR เกิดการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น เสริมประสิทธิภาพการดูดซับแรง พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติที่ด้อยลงจากการเติมยาง ENR โดยการเลือกใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีสมบัติเป็นสารช่วยขยายสายโซ่ (Chain extender) ของพอลิแลคติกแอซิดด้วย ทั้งนี้เพราะสารช่วยขยายสายโซ่จะมีผลทำให้พอลิแลคติกแอซิดมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น และทำให้เกิดโครงสร้างแบบ

กึ่งขึ้นกับพอลิแลกติกแอซิดซึ่งจะมีส่วนช่วยทำให้ค่า โมดูลัสและความทนต่อแรงของพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ส่วนที่เป็นกึ่งก้านจะมีส่วนช่วยทำให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) กับเฟสของยางจึงมีส่วนช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเฟส และช่วยในการส่งผ่านแรงที่มากระทำ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาแนวทางการปรับปรุงความเหนียว และความทนแรงกระทำของพอลิแลกติกแอซิด โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาผลของปริมาณยาง ENR ที่มีต่อสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่ทำการผสมด้วยวิธีวิธีการผสมแบบกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ และการศึกษาผลของปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR โดยทำการประเมินผลจากการทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางเคมี และทางสัณฐานวิทยา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงความเหนียว และความทนแรงกระทำของพอลิแลกติกแอซิด และปรับปรุงการลดลงของค่าความแข็งแรงและคงรูปของพอลิแลกติกแอซิดที่ผ่านการเติมยาง ENR
- 1.2.2 เพื่อหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด ยาง ENR และสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สามารถนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์
- 1.2.3 เพื่อส่งเสริมการนำวัสดุที่ตัดแปรรูปจากยางธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น
- 1.2.4 เพื่อเสริมสร้างศักยภาพ และความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย พอลิแลกติกแอซิด, ยาง ENR และสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีสมบัติเป็นสารช่วยขยายสายโซ่
- 1.3.2 เครื่องมือที่ใช้การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เครื่องผสมแบบภายใน และเครื่องอัดความดันสูง
- 1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้
- 1.3.4 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้
 - สมบัติทางกล ตามมาตรฐาน ASTM
 - สมบัติทางความร้อน
 - สมบัติทางเคมี
 - สัณฐานวิทยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – การพัฒนาแนวทางการปรับปรุงสมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพโดยการใช้วัสดุธรรมชาติที่ผ่านการตัดแปรภายในประเทศไทย ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างความรู้และทักษะทางการวิจัยให้กับนักวิจัยไทย
- 1.4.2 ด้านสิ่งแวดล้อม – ส่งเสริมทำให้เกิดการใช้พลาสติกชีวภาพเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 1.4.3 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์ – ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ
- 1.4.4 ด้านวิชาการ – เผยแพร่องค์ความรู้เชิงวิชาการในรูปแบบของการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการ และ/หรือการประชุมวิชาการ ภายหลังจากเสร็จสิ้นโครงการวิจัย
- 1.4.5 หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ – กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ และ/หรือกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกชีวภาพ

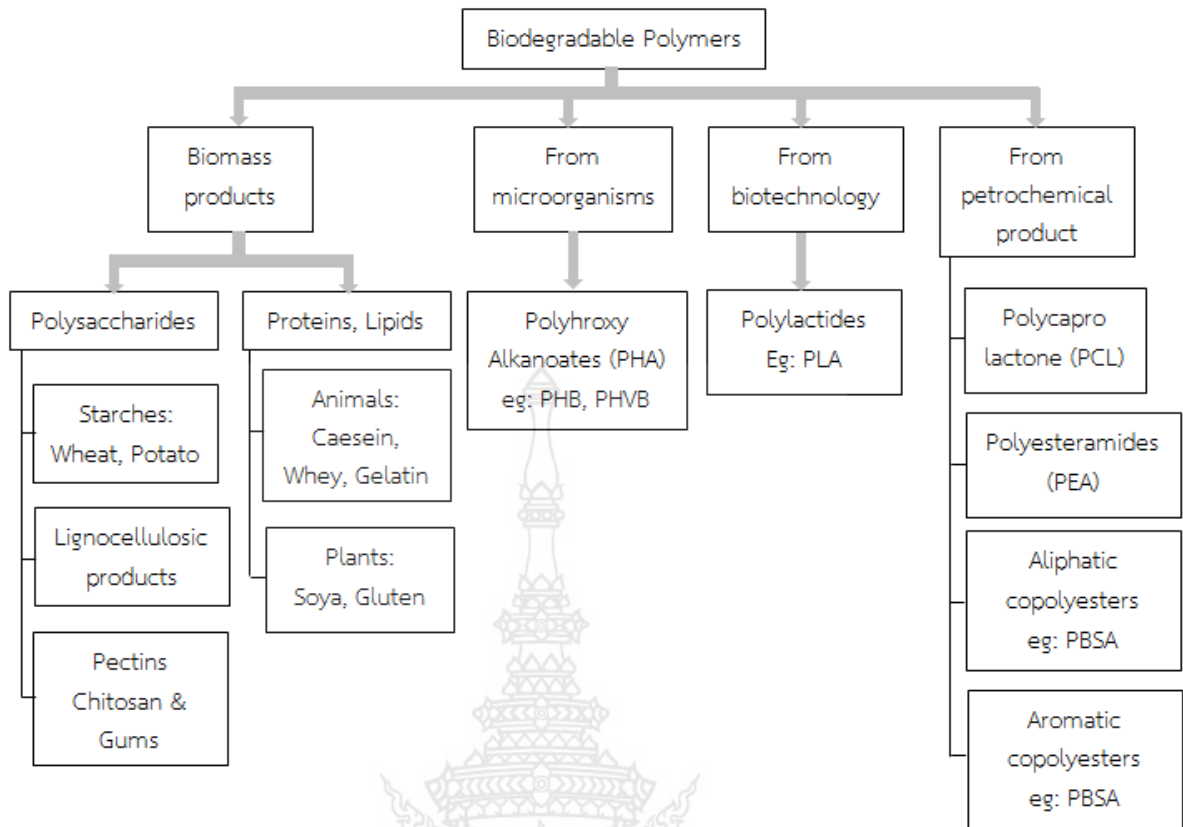
พลาสติกชีวภาพ อาจหมายถึงพลาสติกที่สังเคราะห์หรือผลิตได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น น้ำตาล แป้งมันฝรั่ง เซลลูโลสจากต้นไม้ ข้าวสาลี ข้าวโพด หรืออ้อย เป็นต้น และ/หรือสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ [11]

พลาสติกชีวภาพ [11] จึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ

1. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตหรือสังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติบางส่วนหรือทั้งหมดและไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิพรอพิลีน (PP) หรือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)
2. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ เช่น พอลิแลกติกแอซิด พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (PHA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนท (PBS) เป็นต้น
3. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตมาจากฟอสซิลหรือปิโตรเคมีและสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เช่น พอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทเรฟทาเลต (PBAT)

สำหรับพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable polymer) [12] สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 1

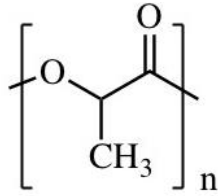
1. พอลิเมอร์ที่ได้จากวัสดุทางการเกษตร (Agro-polymer) เช่น แป้ง เซลลูโลสที่ได้จากวัสดุทางการเกษตร โปรตีนจากสัตว์และจากพืช และไขมัน เป็นต้น
2. พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยการหมักสารชีวมวลด้วยจุลินทรีย์ เช่น PHA เป็นต้น
3. พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยการสังเคราะห์โมโนเมอร์จากสารชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น พอลิแลกติกแอซิด เป็นต้น
4. พอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์โดยกระบวนการปิโตรเคมี เช่น พอลิคาโพรแลกโตน (PCL) พอลิเอสเทอร์อะไมด์ (PEA) โคพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ (Aliphatic copolyester) และโคพอลิเอสเทอร์แบบอะโรมาติก (Aromatic copolyester) เป็นต้น



รูปที่ 1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ [12]

2.2 พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดเป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ หรือด้วยวิธีการฝังดิน โดยจัดอยู่ในตระกูลของพอลิเอสเตอร์แบบสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) พอลิแลคติกแอซิดมีสูตรโครงสร้างเคมี ดังรูปที่ 2 พอลิแลคติกแอซิดสามารถสังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งเกิดได้จากการนำแป้งหรือน้ำตาลจากพืช เช่น แป้งข้าวโพด หรือแป้งมันสำปะหลัง ข้าวสาลี หรืออ้อยมาผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์จนกระทั่งเกิดการย่อยกลายเป็นกรดแลคติก [14] พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อยู่ในช่วง 55-59 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 174-184 องศาเซลเซียส พอลิแลคติกแอซิดมีค่าความแข็งแรงทางกลและค่ามอดุลัสสูง แต่มีความเหนียวต่ำ สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกระบวนการขึ้นรูปทั่วไปที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection moulding) กระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding) เป็นต้น [14-15]



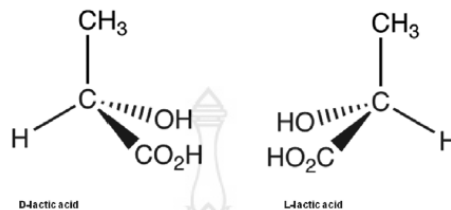
รูปที่ 2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลกติกแอซิด [13]

พอลิแลกติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ของพันธะเอสเทอร์ และไม่จำเป็นต้องมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการสลายตัวของพอลิแลกติกแอซิด ขึ้นอยู่กับ ขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน อัตราส่วนระหว่างแอล- และดี-ไอโซเมอร์ และอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พอลิแลกติกแอซิดสามารถเกิดการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป พอลิแลกติกแอซิดอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 185-190 องศาเซลเซียส ณ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว พอลิแลกติกแอซิดจะเกิดปฏิกิริยาการเปิดออกของซิป (unzipping) และการขาดของสายโซ่ (Chain scission) นำไปสู่การสูญเสียน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด ดังนั้นพอลิแลกติกแอซิดจึงมีช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แคบ วิธีการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิแลกติกแอซิดที่ใช้น้อย่างกว้างขวาง คือ การปรับลดจุดหลอมเหลวให้ลดลงโดยการทำให้เกิดแลคไทด์ไอแนนซีโอเมอร์ (Lactide enantiomers) จำนวนเล็กน้อยภายในโครงสร้างให้มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม การลดลงของจุดหลอมเหลวเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของปริมาณผลึก และอัตราการเกิดผลึก พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสมบัติที่คล้ายคลึงกับพอลิสไตรีน (PS) คือเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใสไม่มีสี มีความมันเงา และคงรูปร่าง พอลิแลกติกแอซิดมีอายุการใช้งานที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว และเมื่อถูกกำจัดทิ้งอย่างเหมาะสมจะเกิดการไฮโดรไลซิสไปเป็นสารธรรมชาติที่ไม่อันตราย พอลิแลกติกแอซิดสามารถเกิดผลึกได้ในสภาวะที่ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ หรือทำการบ่ม ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือการทำให้เกิดผลึกโดยการดึงยืด [13]

การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิด

พอลิแลกติกแอซิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากกรดแลคติก หรือกรดอัลฟาไฮดรอกซี (α -Hydroxy acids) กรดแลคติกสามารถถูกผลิตขึ้นจากการหมักสารคาร์โบไฮเดรต หรือการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ปัจจุบันวิธีการหมักได้รับความนิยมมากกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี การหมักจะทำการเปลี่ยนจากน้ำตาลหรือแป้งให้กลายเป็นกรดแลคติกโดยใช้แบคทีเรีย [16-17] กรดแลคติกมีชื่อทางเคมี คือ 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอนิกแอซิด (2-Hydroxy propionic acid) เป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งของกรดอัลฟาไฮดรอกซี กรดแลคติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดี และแบบแอล ดังรูปที่ 3 โดยทั้งแบบดี และแอลไอแนนซีโอเมอร์ (enantiomers) มีความว่องไวต่อแสงแตกต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีที่เหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในสามมิติแตกต่างกัน และบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางที่ต่างกัน ส่วนใหญ่ในธรรมชาติพบใน

รูปแบบแอล-ไอโซเมอร์ หรือพบในรูปของผสมระหว่างแอล- และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่า ของผสมราซิมิก (Racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือสารประกอบมีโซ (meso-compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ พอลิแลกติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงที่ดี ผลิตได้จากการหมัก สารคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นกรดแลกติกโดยการหมัก [14]



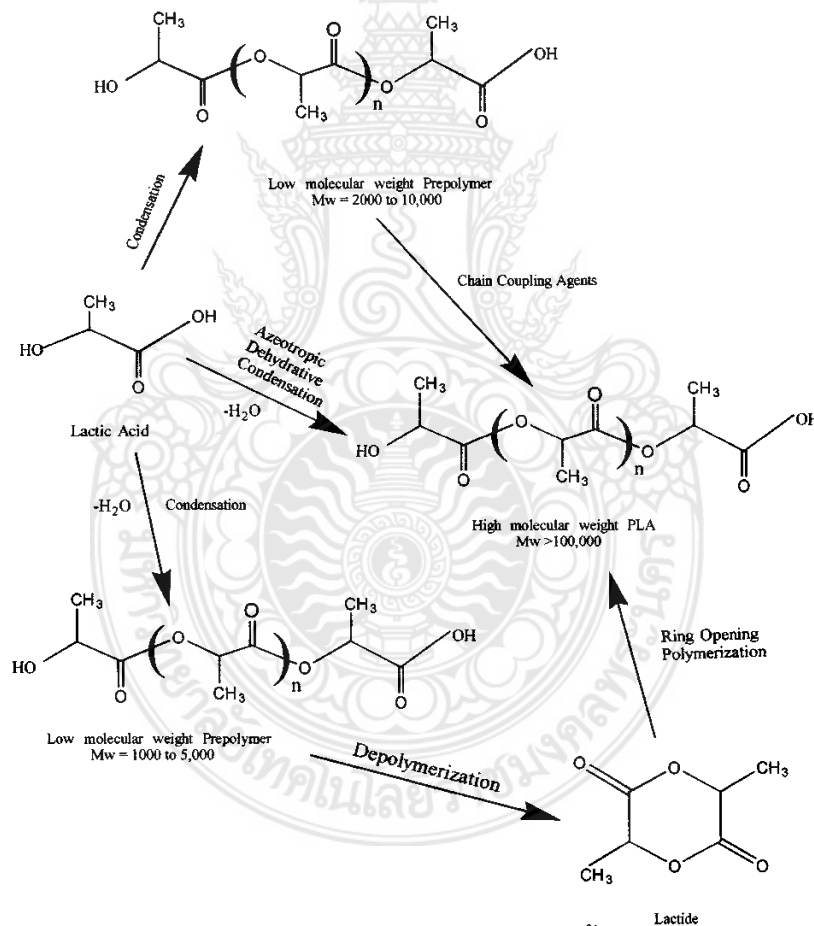
รูปที่ 3 โครงสร้างของกรดแลกติก รูปแบบดี- และแอล-ไอโซเมอร์ [14]

การสังเคราะห์กรดแลกติกให้กลายเป็นพอลิแลกติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถสังเคราะห์ได้จาก กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน 3 วิธีแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ได้แก่ ปฏิกริยาการควบแน่นแบบ โดยตรง (Direct condensation) และการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) และ/หรือการสังเคราะห์โดย ผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide formation) และการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดผ่านปฏิกิริยาควบแน่น แบบอะซิโตรีปิค (Azeotropic dehydrative condensation)

- การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรง กรดแลกติกจะถูกสังเคราะห์โดยปฏิกิริยา การควบแน่นจนกระทั่งได้เป็นพอลิเมอร์สมบัติคล้ายแก้วที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งมีเสถียรภาพต่ำ ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำโดยการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) สาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการ ควบแน่นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเนื่องมาจากการมีอยู่ของน้ำ สารปนเปื้อน และการมีหมู่ที่มีความ ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ำ [13-14]
- การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดโดยผ่านการเกิดแลคไทด์ คือ การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เกิดเป็นพรีพอลิเมอร์ (Prepolymer) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นำพรีพอลิเมอร์ไปผ่านกระบวนการ แตกตัวย้อนกลับ (Depolymerization) ทำให้เกิดเป็นแลคไทด์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น จากนั้นทำ ให้แลคไทด์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเปิดวง (Ring opening polymerization) เกิด เป็นพอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง ($M_w > 100,000$) วิธีการสร้างแลคไทด์เป็น วิธีการเดียวเท่านั้นที่ทำให้ได้พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและความบริสุทธิ์สูง [13-14]
- การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดผ่านปฏิกิริยาควบแน่นแบบอะซิโตรีปิค คิดค้นโดย บริษัท Mitsui Toatsu Chemical เพื่อใช้ในการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดในทางการค้า โดยการใช้ กรดแลกติกและตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนการควบแน่น และการกำจัดน้ำออก (dehydration)

ภายใต้สภาวะลดความดัน จนกระทั่งได้พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่า 300,000 [13-14]

กรดแลกติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดี และแบบแอล ดังนั้นพอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากโมโนเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (พอลิแอล-แลกติกแอซิด (PLLA)) หรือประกอบขึ้นจากโมโนเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิก (พอลิดีแอล-แลกติกแอซิด (PDLLA)) ในปัจจุบันการผลิตดี-ไอโซเมอร์ของกรดแลกติกที่บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ดังนั้นการผลิตพอลิแลกติกแอซิดที่มีสายโซ่หลักประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ชนิด ดี หรือพอลิดี-แลกติกแอซิด (PDLA) ในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่เกิดขึ้น พอลิแลกติกแอซิดมีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ ได้แก่ แอลฟา (α) เบตา (β) และแกมมา (γ) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอีนานซีโอเมอร์แอล หรือดี,แอล โครงสร้างแบบแอลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดสามารถหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงสร้างเบต้าหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส [14]



รูปที่ 4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [13]

สมบัติของพอลิแลกติกแอซิด [14]

ปริมาณแอล-ไอโซเมอร์ และ ดี-ไอโซเมอร์ในสายโซ่พอลิแลกติกแอซิดมีผลต่อสมบัติทางกล ทางความร้อน และสมบัติความต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier properties) รวมถึงปริมาณ

การเกิดผลึก พอลิแลกติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์ กึ่งผลึก มีอุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูง ในขณะที่พอลิแลกติก แอซิดที่มีดี-ไอโซเมอร์ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้สัดส่วนความเป็นผลึกลดลง อุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วย ดังนั้น การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดให้มีสัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกัน มีผลทำให้ได้พอลิแลกติกแอซิดที่มี สมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดจึงสามารถปรับโครงสร้างของพอลิแลกติก แอซิดเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการนำไปใช้งาน

- สมบัติด้านการละลาย

ความสามารถในการละลายของพอลิแลกติกแอซิด ขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่เป็น องค์ประกอบในสายโซ่พอลิแลกติกแอซิด และระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) พอลิแลกติกแอซิดไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (Hexane) และเฮปเทน (Heptane) ตัวทำละลายที่ดีที่สุดสำหรับพอลิแลกติกแอซิด กรณียพอลิแอล-แลกติกแอซิด สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอริเนตและฟลูออริเนต (Chlorinated or fluorinated organic solvents) ไดออกเซน (Dioxane) ไดออกโซเลน (Dioxolane) และฟูเรน (Furane) ส่วนราซิมิกพอลิแลกติกแอซิดสามารถละลายได้ดีในกลุ่มตัวทำละลายข้างต้นแล้ว ยังสามารถละลายได้ดี ในอะซิโตน (Acetone) ไพริดีน (Pyridine) เอทิลแลกเตต (Ethyl lactate) เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ไชลีน (Xylene) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide) เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N- dimethylformamide) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl ethyl ketone)

- สมบัติทางกล

กรณียพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่ผ่านการดึงยึดมีความคงรูป และความแข็งแรงสูง แต่มีความเปราะ ค่อนข้างมาก แต่เมื่อนำพอลิแลกติกแอซิดไปผ่านการดึงยึด พอลิแลกติกแอซิดมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แต่ดีกว่าพอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยึด ค่ามอดุลัสความ ต้านทานแรงดึงและแรงดัด (Tensile and flexural moduli) ของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิ เอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

- สมบัติความต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจนผ่านได้ของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าน้อยกว่าพอลิสไตรีน แต่สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ส่วนการยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่า ใกล้เคียงกันกับพอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต นอกจากนี้พอลิแลกติกแอซิดยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของสารประกอบอินทรีย์ เช่น เอทิลอะซิเตต และดี-ไลโมนีน (D-limonene) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิด [14]

การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดส่วนใหญ่เกิดจากการขาดออกของสายโซ่ เนื่องจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การเสื่อมสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (เอนไซม์) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพด้วยแสงหรือด้วยรังสี ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดมีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ระดับความเป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล ความบริสุทธิ์ สภาพแวดล้อมความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแล็กติกแอซิดมักเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ถ้าไม่นำพอลิแล็กติกแอซิดไปอบไล่ความชื้นก่อนการนำมาขึ้นรูปพอลิแล็กติกแอซิดจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำ ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปทำให้เกิดกรดแล็กติก ส่วนการเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยการย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากเอนไซม์ที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์ ได้แก่ เอนไซม์กลุ่มเอสเทอร์เรส (Esterase) โปรตีเอส (Protease) และไลเปส (Lipase) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์สามารถถูกดูดซึมได้โดยจุลินทรีย์ เช่น เห็ด รา และแบคทีเรีย

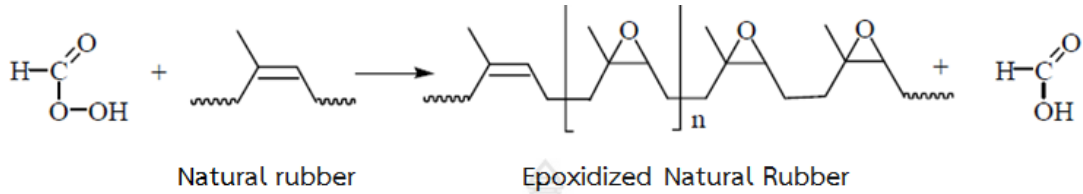
2.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ถูกสร้างขึ้นจากการดัดแปรน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) เพื่อปรับปรุงสมบัติความทนต่อน้ำมันให้สูงขึ้น เพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของแก๊สให้ดีขึ้น และมีสมบัติยืดหยุ่นรับแรงและกระจายแรง (Damping) ที่ดีขึ้น แต่ยังคงรักษาสมบัติการรับแรงทางกลได้ดีของยางธรรมชาติเอาไว้ โดยสามารถเกิดผลึกในขณะการได้รับแรงดึงเช่นเดียวกับกรณียางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปร สมบัติของยางธรรมชาติที่ถูกปรับปรุงด้วยกระบวนการอีพอกซิเดชันจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ ดีกรีของการเกิดอีพอกไซด์ ในทางการค้ายาง ENR มีอยู่ด้วยกัน 2 เกรด คือ ยาง ENR ที่เกิดอีพอกไซด์ 25 และ 50 %mol (ENR25 และ ENR50) [18-19]

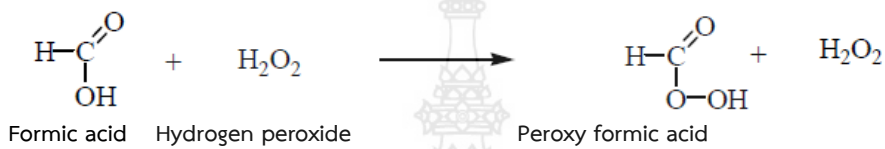
การสังเคราะห์ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยาง ENR ถูกผลิตจากการนำน้ำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิก (Performic acid) ดังรูปที่ 5 กรดเปอร์ฟอร์มิกถูกเตรียมโดยการทำปฏิกิริยาของกรดฟอร์มิกกับไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ ดังแสดงใน รูปที่ 6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยาง ENR เรียกว่า ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation reaction) เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดหมู่อีพอกไซด์ หรือวงแหวนออกซิเรน (Epoxide group หรือ Oxirane ring) ตรงบริเวณตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ ซึ่งในการทำปฏิกิริยาต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ควบคุมความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนของหมู่อีพอกไซด์ (Ring opening reaction) เพราะมีผลต่อสมบัติของยาง ENR หมู่อีพอกไซด์กระจายตัวอยู่บนสายโซ่ของยางธรรมชาติแบบสุ่ม [18, 20] นอกจากการใช้กรดเปอร์ฟอร์มิกในการเตรียมยาง ENR ยังสามารถใช้กรดเปอร์แอซิด (Peracid) และกรดเปอร์ออกซี (Peroxy acid) รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยการใช้กรดเปอร์แอซิดิก (peracetic acid) เข้าทำปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ ในการเตรียมยาง ENR ทางการค้าสามารถปรับเปลี่ยนดีกรีของการ

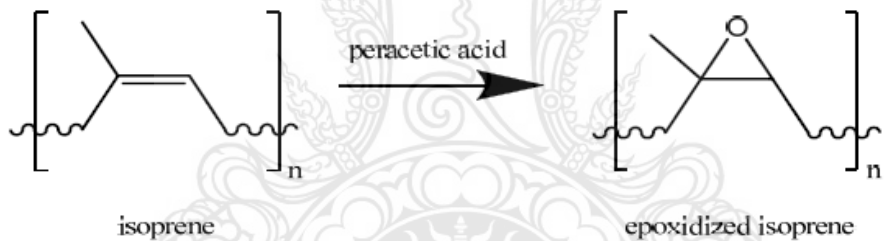
เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เช่น หน่วยของไอโซพรีนบนสายโซ่ของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน 25, 50 และ 75 %mol จะถูกเรียกว่า ENR-25, ENR-50 และ ENR-75 ตามลำดับ **รูปที่ 8** แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน 50 %mol [19]



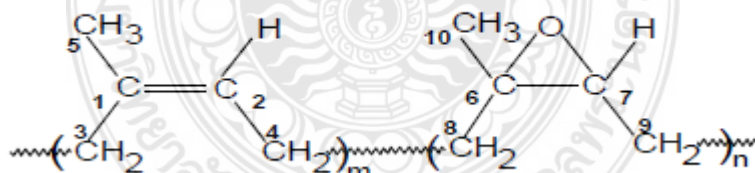
รูปที่ 5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดัดแปรยางธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR ด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก [18]



รูปที่ 6 การเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ [18]



รูปที่ 7 ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและกรดเปอร์แอซิดิก [19]



รูปที่ 8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน 50 %mol [19]

การวัลคาไนซ์ยาง ENR ด้วยระบบกำมะถันแบบดั้งเดิม (Conventional cure system) ที่มีกำมะถัน 2.5 phr และซัลฟิनाไมด์ (Sulfenamide) 0.5 phr มีผลทำให้ยาง ENR มีสมบัติเมื่อผ่านการสภาวะแวดล้อมที่ด้อยกว่ายางธรรมชาติ โดย Gelling และ Morrison ได้รายงานว่ายาง ENR เมื่อผ่านสภาวะแวดล้อมมีสมบัติที่ด้อยกว่ายางธรรมชาติ เพราะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารซัลไฟด์และหมู่ฟอกไซด์ในยาง ENR ทำให้เกิดการเปิดออกของวงแหวนและส่งผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการนำยาง ENR ไปใช้งานที่ต้องเผชิญกับสภาวะควรเลือกใช้

ระบบกำมะถันแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient cure system) และประสิทธิภาพ (Efficient cure system) [20]

สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

การดัดแปรยางธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR มีผลทำให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

- อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว [18-20]

ดีกรีอีพอกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่อ 1 mol% ของการเกิดอีพอกซิเดชัน และมีผลทำให้สมบัติการกระดอน (Resilience) ลดลงด้วย

- สมบัติทางกล

จากตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกลของยาง ENR-25 และ ENR-50 ที่มีการเติมเขม่าดำเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ พบว่า เมื่อระดับการเกิดอีพอกซิเดชันสูงขึ้น ยิ่งทำให้ค่าการกระดอนของยางลดลง และเกิดการสะสมความร้อน (Heat build-up) ที่สูงขึ้น แต่ถ้าอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว มีผลทำให้สมบัติการกระดอนกลับไปทิศทางที่ดีขึ้น ยางธรรมชาติที่เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันไม่เกิน 50 %mol ยังคงรักษาความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับการดึงยืดเช่นเดียวกับยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปร ดังนั้นยาง ENR จึงมีความต้านทานแรงดึง ค่ามอดุลัส และความสามารถในการยืดตัวใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ [20] ยาง ENR จึงถูกนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในส่วนของชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องสัมผัสกับอาหาร รองเท้า พื้นยาง ท่ออย่างดำนในจักรยาน กาว และวัสดุเชื่อมรอยต่อ (Sealant) [19] ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างสารเสริมแรงซิลิกา และเขม่าดำกับยาง ENR เป็นดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ยาง ENR ทั้งยาง ENR-25 และ ENR-50 สามารถเข้ากันได้ดีกับสารเสริมแรงของยางทั้งซิลิกา และเขม่าดำ โดยการเกิดแรงกระทำระหว่างกันของหมู่อีพอกไซด์บนโมเลกุลของยาง ENR กับผิวของสารเสริมแรง ดังนั้นยาง ENR ที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกา และเขม่าดำจึงเหมาะสมที่จะนำมาทำดอกยาง [20]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอโฟกไซด์ที่มีการเติมเขม่าดำ [20]

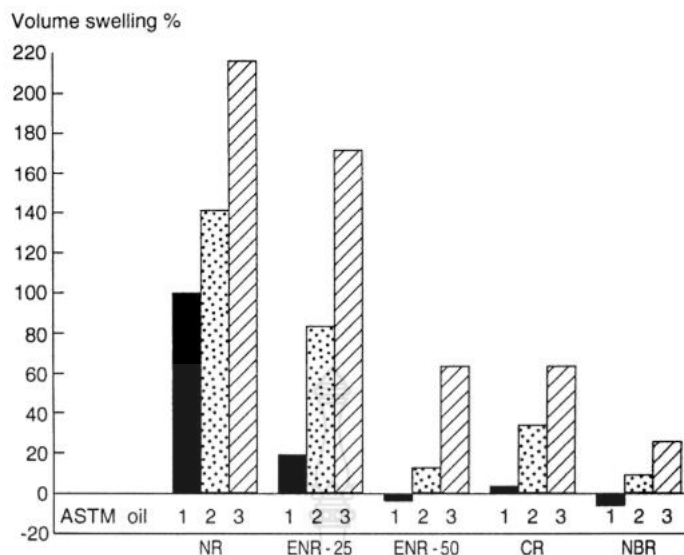
Properties	Black filled		
	NR	ENR-25	ENR-50
Tensile strength (MPa)	28	27	25
Elongation at break (%)	560	530	520
Modulus at 300 % (MPa)	13	13	12
Hardness, IRHD	65	66	68
Resilience at 23 °C (%)	61	44	26
Heat build-up (°C)	18	20	27

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติอโฟกไซด์ด้วยเขม่าดำและซิลิกา [20]

Properties	ENR-25		ENR-50	
	C Black	Silica	C Black	Silica
Hardness, IRHD	69	67	73	68
Modulus at 300%, MPa	12.4	12.8	13.5	12.6
Tensile strength, MPa	25.4	21.0	24.5	22.4
Elongation at break, %	435	405	500	435
Abrasion, Akron, Vol loss, mm ³ /500	14	15	11	14
Goodrich heat build-up from 100 °C, °C	7	7	23	19

- สมบัติทางเคมี [20]

จากรูปที่ 9 แสดงความทนต่อน้ำมันของยาง ENR-25 ENR-50 ยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน (Polychloroprene rubber) และยางไนไตรล์ (Nitrile rubber) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง จากกราฟแสดงให้เห็นว่า กระบวนการอโฟกซิเดชันช่วยปรับปรุงความทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายให้กับยางธรรมชาติ ยาง ENR-25 มีความทนน้ำมันดีกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นยาง ENR-25 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นอย่างที่ทำหน้าที่สเปรย์น้ำมัน ส่วนยาง ENR-50 มีความทนต่อน้ำมันสูงมาก และมากกว่ายางธรรมชาติ ENR-25 และยางพอลิคลอโรพรีน แต่มีค่าทนน้ำมันใกล้เคียงกับยางไนไตรล์ จึงสามารถนำยาง ENR-50 มาใช้งานแทนยางไนไตรล์ เช่น ซิลป้องกันน้ำมันรั่ว และท่อน้ำมัน เป็นต้น



รูปที่ 9 ความทนต่อน้ำมันของยาง ENR-25 ENR-50 ยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน และยางไนไตรล์ เมื่อถูกแช่น้ำมัน 1, 2 และ 3 ตามมาตรฐาน ASTM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเวลา 70 ชั่วโมง [20]

- ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส [20]

ยาง ENR มีความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สต่ำ โดยมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรอย่างชัดเจน ดังตารางที่ 3 และพบว่า ยาง ENR-50 มีสมบัติด้านความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สใกล้เคียงกับยางบิวทิล (Butyl rubber) ที่นิยมนำมาใช้ทำยางในรถ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยเขม่าดำและซิลิกา [20]

Rubber type	Air permeability
Natural rubber	100
ENR-25	32
ENR-50	8
SBR	48
Butyl	6
Nitrile (34% ACN)	4

2.4 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ [21]

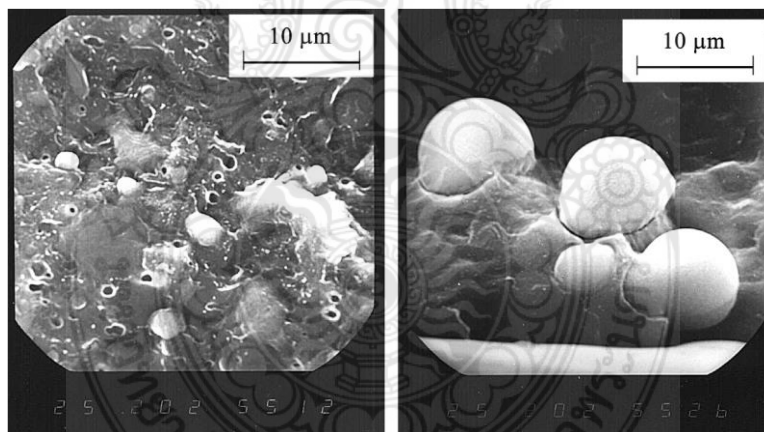
สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ถูกใช้ในการปรับปรุงสมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติเข้ากันไม่ได้ โดยสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทำหน้าที่เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสและลดขนาดอนุภาคของเฟสที่กระจายตัวให้มีขนาดเล็กส่งผลทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมถูกปรับปรุง

สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ อาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม

1. สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ (*Non-reactive compatibilizer*) เป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างแบบ amphiphilic คือในโครงสร้างมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เป็นโคพอลิเมอร์แบบกลุ่ม (Block copolymer) ส่วนปลายด้านหนึ่งเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ชนิดที่หนึ่ง และปลายอีกด้านหนึ่งเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ชนิดที่สอง นอกจากโคพอลิเมอร์แบบกลุ่มแล้ว สารประกอบน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีโครงสร้างแบบ amphiphilic หรือไอโอโนเมอร์ (ionomer) หรือพอลิเมอร์ชนิดที่สามที่สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สองได้บางส่วนอาจถูกใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้แบบกลุ่มที่ไม่เกิดปฏิกิริยา สำหรับกรณีการเพิ่มความเหนียวให้กับไบโอพอลิเมอร์อาจใช้การเติมเฟสของอีลาสโตเมอร์ ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิดโดยผสมกับพอลิคาโพรแลกโตน (polycaprolactone: PCL) ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการยึดตัวได้ดีและทนแรงกระแทกได้สูง แต่พอลิแลกติกแอซิดและพอลิคาโพรแลกโตนเข้ากันไม่ได้ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิคาโพรแลกโตนได้หลากหลายวิธี เช่น การเติมโคพอลิเมอร์แบบกลุ่ม (Block copolymer) เช่น PCL-PLA ที่เป็นลักษณะไดบล็อก (diblock) หรือไตรบล็อก (triblock) หรือโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random copolymer), โคพอลิเมอร์ของ PCL-PEG และไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ของ PEO-PPO-PEO นอกจากนี้ยังมีความพยายามที่จะปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างการผสมพอลิเมอร์ทางการค้าเข้ากับไบโอพอลิเมอร์ด้วยโคพอลิเมอร์แบบกลุ่ม ตัวอย่างเช่น การนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาผสมกับพอลิแลกติกแอซิดเพื่อลดต้นทุน และปรับปรุงความเหนียวจำเป็นต้องมีการเติมโคพอลิเมอร์แบบกลุ่มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาผสมกับพอลิแลกติกแอซิดเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาผสมกับพอลิแลกติกแอซิด

2. สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ (*Reactive compatibilizer*) การเติมสารประกอบชนิดหนึ่งที่สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งในพอลิเมอร์ผสมและสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันนัลของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งนำไปสู่การเกิดโคพอลิเมอร์แบบกิ่ง (Grafted copolymer) หรือแบบกลุ่มขึ้นซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ โดยการเกิดโคพอลิเมอร์นี้จะเกิดขึ้นในระหว่างการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยความร้อน วิธีการทำให้เกิดความเข้ากันได้ของ

พอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ เพราะสามารถควบคุมได้ทั้งโครงสร้าง และสมบัติที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ผสม โดยการเลือกสารเคมีที่มีความเหมาะสมในการเข้าทำปฏิกิริยา สัดส่วนของการผสม และสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ตัวอย่างการทำให้พอลิเมอร์ผสมกลุ่มไบโอพอลิเมอร์เกิดความเข้ากันได้โดยการเกิดปฏิกิริยา เช่น ในงานวิจัยของ Hassouna และคณะได้สังเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบกลุ่มโดยการใช่มาลีอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) กราฟท์กับ PLA และพอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol, PEG) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEG อีกหนึ่งตัวอย่างคือการใช้พอลิพรอพิลีนที่ถูกกราฟท์ด้วยมาลีอิกแอนไฮไดรด์ (MA grafted polypropylene or MAPP) มาปรับปรุงการผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนและเทอร์โมพลาสติคสเตรช (Thermoplastic starch, TPS) การเติม MAPP มีส่วนช่วยทำให้ขนาดอนุภาคของ TPS มีขนาดเล็กกลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม MAPP ดังแสดงในรูปที่ 10 และปรับปรุงสมบัติทางกลและความแข็งแรงระหว่างเฟส นอกจากการใช้ MA ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมแล้วนั้นยังมีการนำหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ เช่น หมู่อีพอกซี (epoxy) หรือหมู่ไอโซไซยานต (isocyanate) มาใช้ในการปรับปรุงการผสมของไบโอพอลิเมอร์อีกด้วย



รูปที่ 10 ภาพทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างระหว่างพอลิพรอพิลีนและเทอร์โมพลาสติคสเตรชที่มีการเติม MAPP และไม่มีการเติม [21]

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Nampitch, T. และ Magaraphan, R. (2010) [6] ได้ทำการศึกษาผลของการนำยาง ENR มาฉายรังสีก่อนการนำไปผสมกับพอลิแลกติกแอซิด ในอัตราส่วนพอลิแลกติกแอซิด: ยาง ENR คือ 90:10 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะรังสีทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ในเฟสของยาง ENR เพิ่มขึ้น

ขึ้น แต่มีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากรังสีมีผลทำให้ยาง ENR เกิดการขาดของสายโซ่ จึงเกิดการสลายตัวได้ง่าย

Zhang, C. และคณะ (2011) [5] ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิด โดยการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือนด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (internal mixer) โดยได้มีการปรับเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อนและแรงเฉือน 0, 5 และ 10 นาที และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของยางธรรมชาติที่ 0, 1, 3, 5 และ 10 %โดยน้ำหนัก จากงานวิจัย พบว่า กรณีพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือน 10 นาที ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงการยึดตัว ณ จุดขาด และความเหนียวได้สูงที่สุด และมีการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะการให้ความร้อนและแรงเฉือนกับยางมีผลทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง และเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ขึ้นซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำกับหมู่เอสเทอร์ในพอลิแลกติกแอซิด จึงเสริมการยึดเกาะระหว่างเฟส

Bitinis, N. และคณะ (2012) [8] ได้ทำการศึกษากลไกการเสถียรของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติและนาโนเคลย์ (nanoclays) จากการศึกษาพบว่า การเติมยางธรรมชาติมีส่วนทำให้การแตกหักของพอลิแลกติกแอซิด เปลี่ยนแปลงจากการแตกหักแบบเปราะไปเป็นการแตกหักแบบเหนียว ในขณะที่การเติมนาโนเคลย์ทำหน้าที่ขัดขวางการเกิดช่องว่าง (cavities) ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและเฟสของยาง โดยนาโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าว (craze nucleation sites) ณ ความเข้มข้นของนาโนเคลย์ 1 %โดยน้ำหนัก รอยร้าวถูกสร้างขึ้นและพัฒนากลายเป็นช่องว่างเล็กที่มีความเสถียรซึ่งสามารถทำให้การแผ่ขยายและจัดเรียงตัวไปตามแนวการดึงยึด เพอร์เซ็นต์การยึดตัวของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Giita Silverajah, V.S. และคณะ (2012) [3] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันปาล์มที่ผ่านการอีพอกไซด์ (Epoxydized palm olein, EPO) ที่มีต่อสมบัติพอลิแลกติกแอซิด พบว่า การเติม EPO มีส่วนช่วยทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น และพบว่าพอลิแลกติกแอซิด ที่มีการเติม EPO มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่ากรณีที่ไม่เติม นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม EPO 1 %โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง แรงดัด และแรงกระแทก

Wahit, M.U. และคณะ (2105) [7] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิดโดยการเติมยาง ENR-50 ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิด สามารถเกิดขึ้นเมื่อเติมยาง ENR-50 ปริมาณตั้งแต่ 20 %โดยน้ำหนักขึ้นไป ในขณะที่การเติมยาง ENR-50 มีผลทำให้ค่าความมอดูลัสและความทนต่อแรงดึง และแรงดัดลดลงทันทีที่มีการเติมยาง ENR-50

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติพอลิแลกติกแอซิด และเมื่อได้สูตรพอลิแลกติกแอซิดที่เติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ปริมาณที่เหมาะสมแล้ว จึงเลือกนำสูตรดังกล่าวมาดำเนินการงานวิจัยในส่วนที่ 2 คือ การศึกษาหาปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่เติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เม็ดพอลิแลกติกแอซิด เกรด 4043D สำหรับผลิตฟิล์มแบบจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (Biaxially oriented films) จากบริษัท Nature Works LLC (USA) ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เม็ดพอลิแลกติกแอซิด เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC

3.1.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เกรด ENR50 ซึ่งเป็นเกรดยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน 50 %mol ผลิตโดยบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 12

3.1.3 ไดคิมิวเพอร้ออกไซด์ ดังรูปที่ 13 ของบริษัท Sigma-Aldrich (USA) ใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยง

3.1.4 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ที่มีหมู่อีพอกซิปริมาณสูงในโครงสร้าง มีชื่อทางการค้า คือ Joncryl ® ADR-4300 ของบริษัท BASF (USA) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เมอริท โซลูชั่น จำกัด มีลักษณะดังรูปที่ 14



รูปที่ 12 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เกรด ENR50 ของบริษัท เมืองใหม่กัตทรี จำกัด



รูปที่ 13 สารเชื่อมโยงไดควิมิวเพอร์ออกไซด์ ของบริษัท Sigma-Aldrich



รูปที่ 14 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ Joncryl ® ADR-4300 ของบริษัท BASF

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

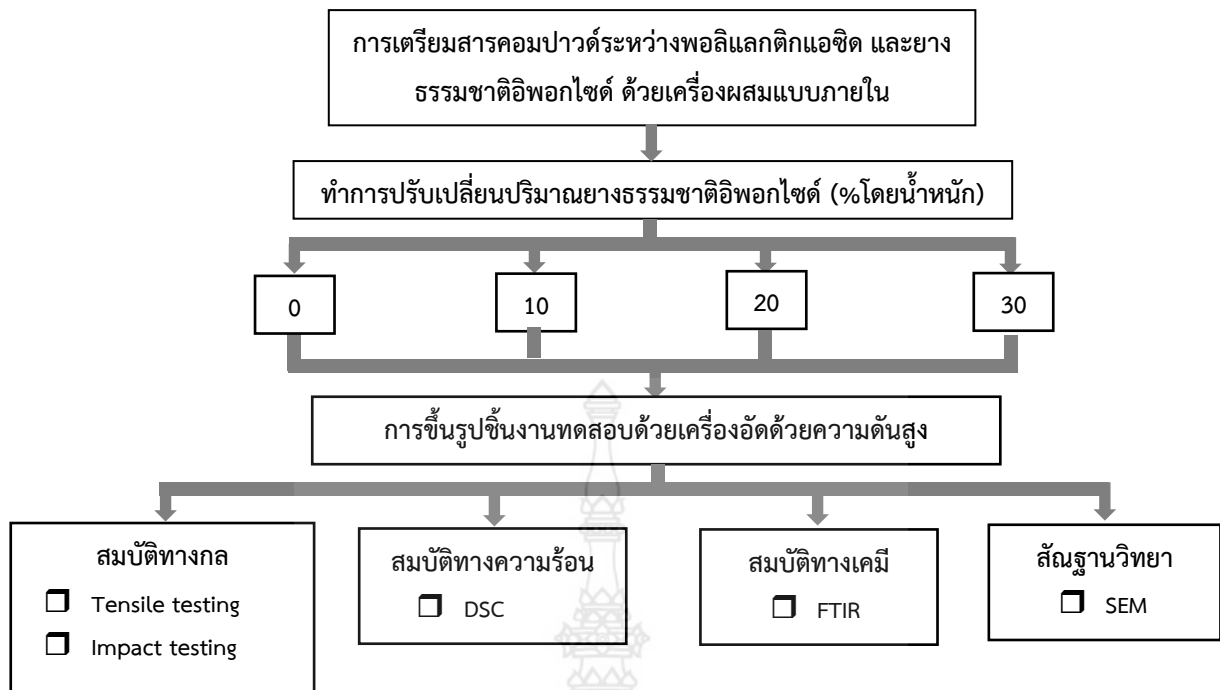
แผนการดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.2.1 การศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

ทำการเตรียมสารคอมพาวด์ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติม DCP เป็นสารเชื่อมโยง ด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของยาง ENR ปริมาณตั้งแต่ 0 – 30 %โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารคอมพาวด์ที่ได้มาทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องอัดด้วยความดัน นำชิ้นงานทดสอบมาทำการทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางเคมี และตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 15

3.2.2 การศึกษาหาปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

จากหัวข้อ 3.2.1 ทำการวิเคราะห์ผลเพื่อเลือกสูตร TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR สูตรที่ดีที่สุดมาทำการศึกษาปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดยาง ENR และสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ สำหรับขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานทดสอบและทดสอบสมบัติ มีรายละเอียดเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.2.1



รูปที่ 15 แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 วิธีการดำเนินการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

สำหรับการดำเนินการศึกษาหาปริมาณยาง ENR ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินการเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

- ขั้นตอนการเตรียมสารคอมพาวด์ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR
- ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
- ขั้นตอนการทดสอบสมบัติ

ขั้นตอนการเตรียมสารคอมพาวด์ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์

1. นำยาง ENR มาทำการบดลดขนาดโมเลกุล (mastication) ด้วยการใช้อุปกรณ์ผสมแบบภายใน รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยทำบดผสมยางที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วของโรเตอร์ 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงนำยางที่มีความหนืดที่ลดลงมาทำการผสมกับพอลิแลกติกแอซิด

- นำเม็ดพอลิแลกติกแอซิดที่ผ่านการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มาผสมกับยาง ENR ที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องผสมแบบภายใน โดยทำการผสมกับยาง ENR ที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล โดยมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 30 %โดยน้ำหนัก และใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์เป็น 70 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ทำการผสมสารคอมปาวด์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้ TPV ที่มีส่วนผสมที่ผสมเข้ากันดี



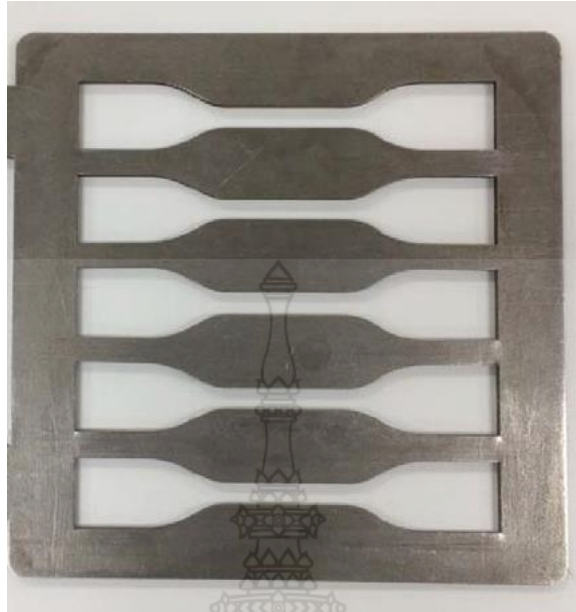
รูปที่ 16 เครื่องผสมแบบระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด

ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

1. นำสารคอมปาวด์ TPV ระหว่างพอลิแลกติกและยาง ENR มาทำการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. จากนั้นทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความดัน โดยนำสารคอมปาวด์แต่ละสูตรมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 17 โดยใช้แม่พิมพ์ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง แบบ Type IV อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 638 และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 256 เป็นดังรูปที่ 18 และ 19 ตามลำดับ สำหรับสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป มีรายละเอียดดังนี้
 - ขั้นตอนการอุ่นให้ความร้อน (preheat) โดยนำสารคอมปาวด์อุ่นให้ความร้อนในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
 - ขั้นตอนการอัดด้วยความดัน (compression) โดยทำการปิดแม่พิมพ์ด้วยความดัน 500 psi ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
 - ขั้นตอนการหล่อเย็น (cooling) ชิ้นงานทดสอบ ทำการหล่อเย็นแม่พิมพ์ด้วยน้ำหล่อเย็นเป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นทำการถอดชิ้นงานทดสอบออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 17 เครื่องอัดด้วยความดัน รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน



รูปที่ 18 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 19 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

ขั้นตอนการทดสอบสมบัติ

1. สมบัติทางกล

- การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบความต้านทานแรงดึงทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638 ชิ้นงานทดสอบ แบบ Type IV มีลักษณะชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 20 มีความยาวเกจ 25 เซนติเมตร และใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus ของบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 21 ความเร็วในการเคลื่อนของหัวจับชิ้นงาน 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตรคือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง (Tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break)



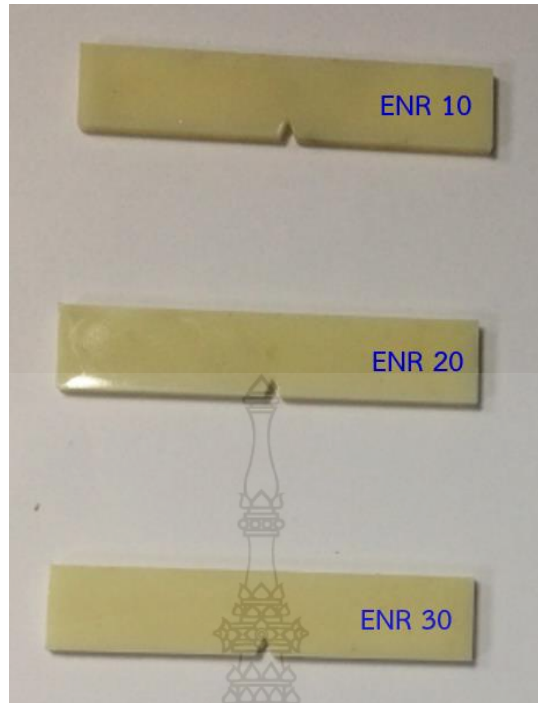
รูปที่ 20 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus



รูปที่ 21 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงดิ่งของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน

- การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact testing)

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 เป็นการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่ผ่านการทำรอยบาก มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 22 มีขนาดชิ้นงาน 13 x 64 x 3 มิลลิเมตร³ ชิ้นงานทดสอบถูกทำรอยบากด้วยเครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2 ของบริษัท Gotech TESTING MACHINES INC. ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 23 ในการทดสอบแรงกระแทกทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P ดังรูปที่ 24 จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบเป็นค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักต่อความหนาชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 22 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 23 เครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2



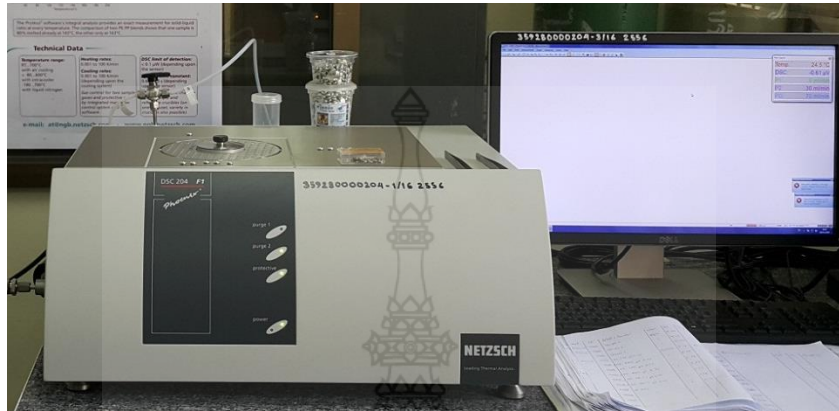
รูปที่ 24 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P

2. สมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนทำการตรวจวัดด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 25 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ทำการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน และมีการให้ความร้อน 2 ครั้ง การให้ความร้อนครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิจาก 200 ถึง 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นนำกราฟให้ความร้อนครั้งที่ 2 มาทำการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว จุดหลอมเหลว (Melting temperature) และปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน สำหรับการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percentage crystallinity, X_c) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 1

$$X_c = \frac{H_m}{H_m^0} \times \frac{100}{w_{PLA}} \quad (1)$$

โดยที่ H_m คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว (Melting enthalpy) ของชิ้นงานทดสอบ
 H_m° คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว สำหรับกรณี PLA ที่มีปริมาณผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ
97.2 J/g [22]
 W_{PLA} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิด



รูปที่ 25 เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH

3. สมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดำเนินการโดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared (FTIR) spectrometer) รุ่น Spectrum One ของบริษัท Perkin Elmer จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 26 เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันนัล โดยการค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสง (%Transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 4000 cm^{-1}



รูปที่ 26 เครื่อง FT-IR spectrometer รุ่น Spectrum One ของบริษัท Perkin Elmer จำกัด

4. สัณฐานวิทยา

ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 27 ที่ความต่างศักย์ 15 kv โดยในการทดสอบได้นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทกมาทำการตรวจวิเคราะห์ ก่อนการตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบต้องถูกนำมาทำการเคลือบผิวด้วยทองคำด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง (sputtering) เพื่อป้องกันการเกิดการชาร์จของประจุที่ผิวชิ้นงาน



รูปที่ 27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6610LV

3.3.2 วิธีการดำเนินการศึกษาหาปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

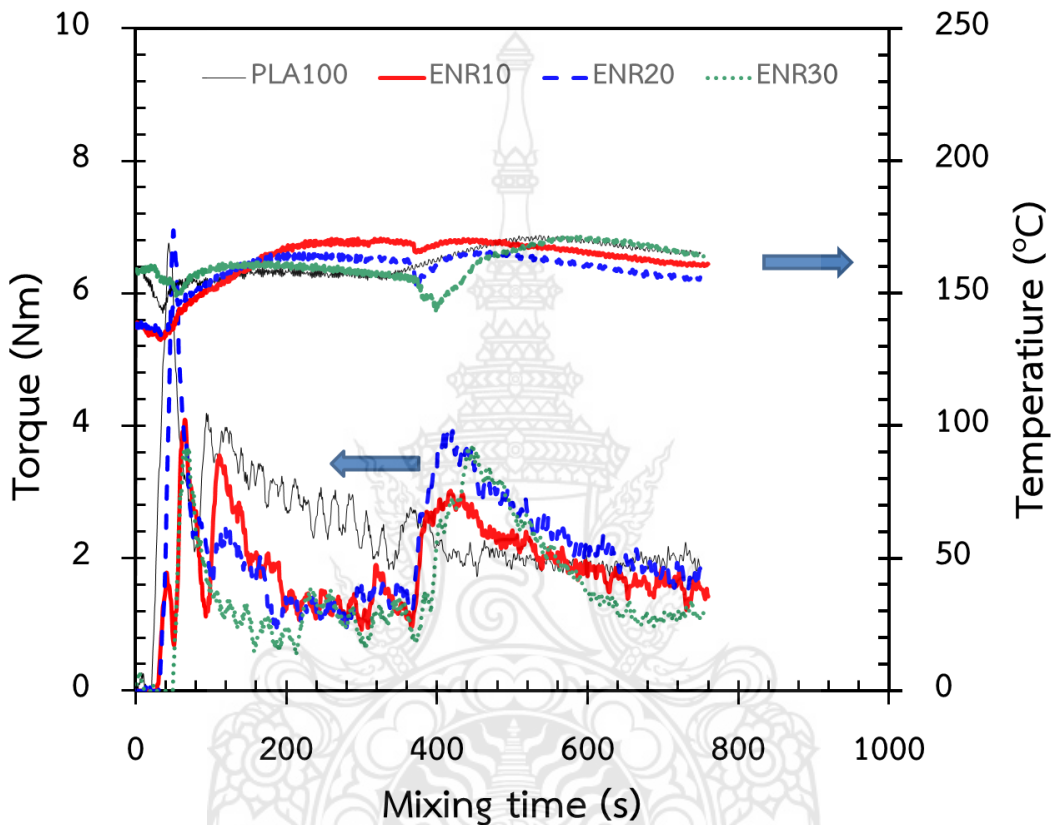
การดำเนินการในส่วนนี้จะเลือกสูตร TPV ของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ในปริมาณที่เหมาะสมมาทำการศึกษา โดยพิจารณาเลือกจากสูตรที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวและความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดได้ดีที่สุดมาทำการศึกษาผลของปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จากงานวิจัยในหัวข้อ 3.2.1 พบว่า สูตร TPV ของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนักเป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด สำหรับสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่โครงการวิจัยนี้เลือกใช้ คือ Joncryl® ADR-4300 ของบริษัท BASF (USA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ที่มีหมู่อีพอกซีปริมาณสูง สำหรับทำหน้าที่เป็นสารช่วยขยายสายโซ่ให้กับพอลิแล็กติกแอซิด และทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยาง ENR การมีอยู่ของหมู่อีพอกซีปริมาณสูงจึงช่วยส่งเสริมให้ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้กับยาง ENR โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของ Joncryl® ADR-4300 ตั้งแต่ 0 ถึง 2 %โดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิด สำหรับขั้นตอนการดำเนินการ

มีรายละเอียดเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.2.1 คือ ขั้นตอนการเตรียมสารคอมพาวด์ ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบสมบัติ



บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

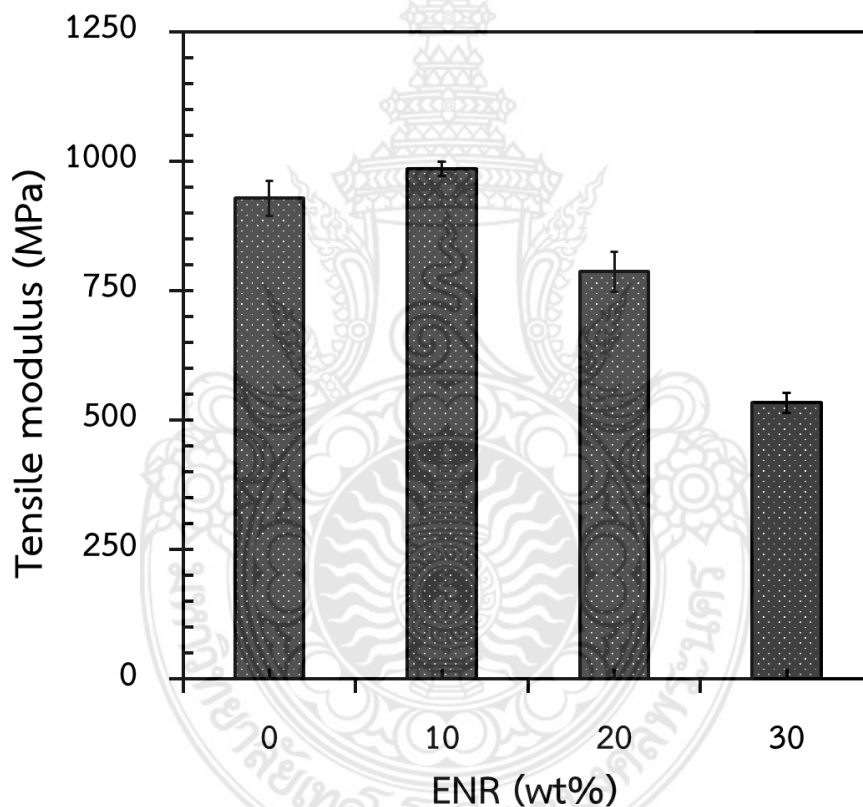
4.1 ผลการศึกษาการหาปริมาณยางธรรมชาติฟอกไซต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด



รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผสมและแรงบิดที่เกิดขึ้น รวมถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการผสมพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่เติม DCP ด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด

ในขั้นตอนการผสม TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่เติม DCP เป็นสารเชื่อมโยงด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิดสามารถวัดค่าแรงบิด และอุณหภูมิการผสมที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงในรูปที่ 28 พบว่า ค่าแรงบิดในช่วงเริ่มต้นมีค่าสูงและเริ่มลดลง เนื่องจากช่วงแรกของการผสมได้เติมเฉพาะพอลิแลกติกแอซิดในเครื่องผสม การปั่นผสมของโรเตอร์ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้พอลิแลกติกแอซิดเริ่มหลอมเหลวจึงทำให้ค่าแรงบิดลดลง และเมื่อหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ค่าแรงบิดจะมีค่าคงที่ หลังจากนั้นได้ทำการเติมยาง ENR ที่ผ่านการเติม DCP ลงในเครื่องผสมจึงส่งผลทำให้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และเริ่มมีค่าแรงบิดลดลงอีกครั้งที่เวลาการผสม 440 วินาที ยาง ENR เริ่มอ่อนตัวเนื่องจากแรงกระทำของโรเตอร์และความร้อนที่ได้รับ เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณยาง ENR ที่มีค่าแรงบิด พบว่า ค่าแรงบิดที่ลดลงในช่วงแรกที่เป็นผลมาจากพอลิแลกติกแอซิดหลอมเหลวมีค่าลดลง

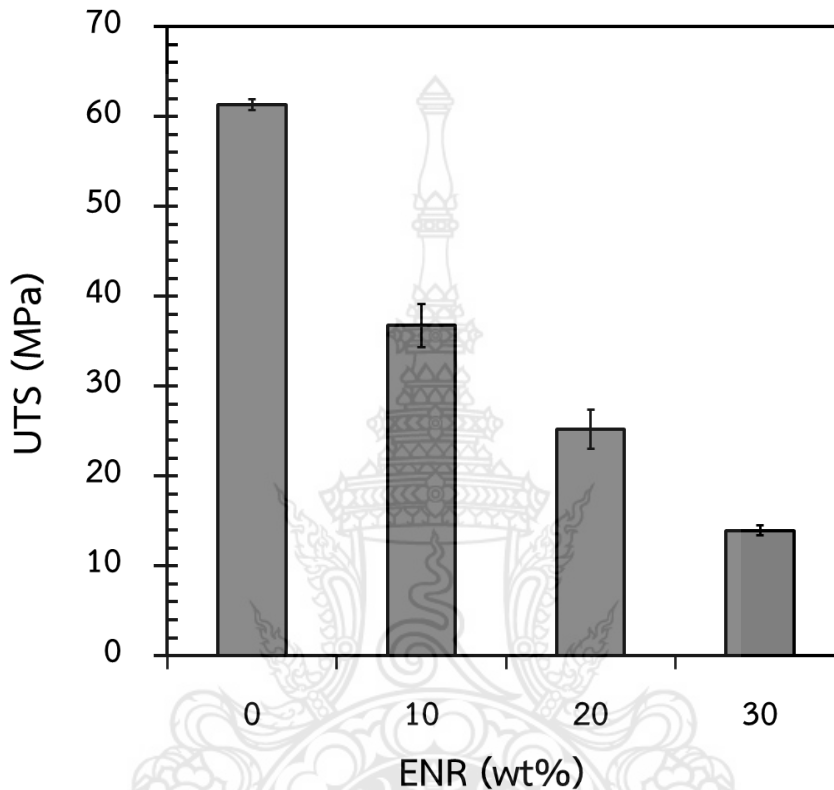
เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณยาง ENR ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณพอลิแลกติก แอซิดมีปริมาณลดลงจึงทำให้ค่าแรงบิดในระหว่างผสมลดลง ส่วนค่าแรงบิดในช่วงการเติมยาง ENR พบว่า ค่าแรงบิดที่ลดลงจนกระทั่งเริ่มคงที่เนื่องจากการผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวมีค่าแรงบิดไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก ค่าแรงบิดช่วงที่คงที่มีค่าต่ำกว่ากรณีสูตรอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องจากยาง ENR มีปริมาณมากพอที่ส่งผลทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง สำหรับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการผสม พบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงมีค่าต่ำกว่า อุณหภูมิที่ตั้งเครื่องผสม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความร้อนถูกสูญเสียไปในการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวหรือเปลี่ยนสถานะ โดยจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่ามีการลดลงของอุณหภูมิอย่างชัดเจนในช่วงที่พอลิแลกติก แอซิดเริ่มหลอมเหลว และช่วงที่ยาง ENR เริ่มหลอมเหลว ณ เวลาการผสมที่ 40 และ 400 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 29 ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน

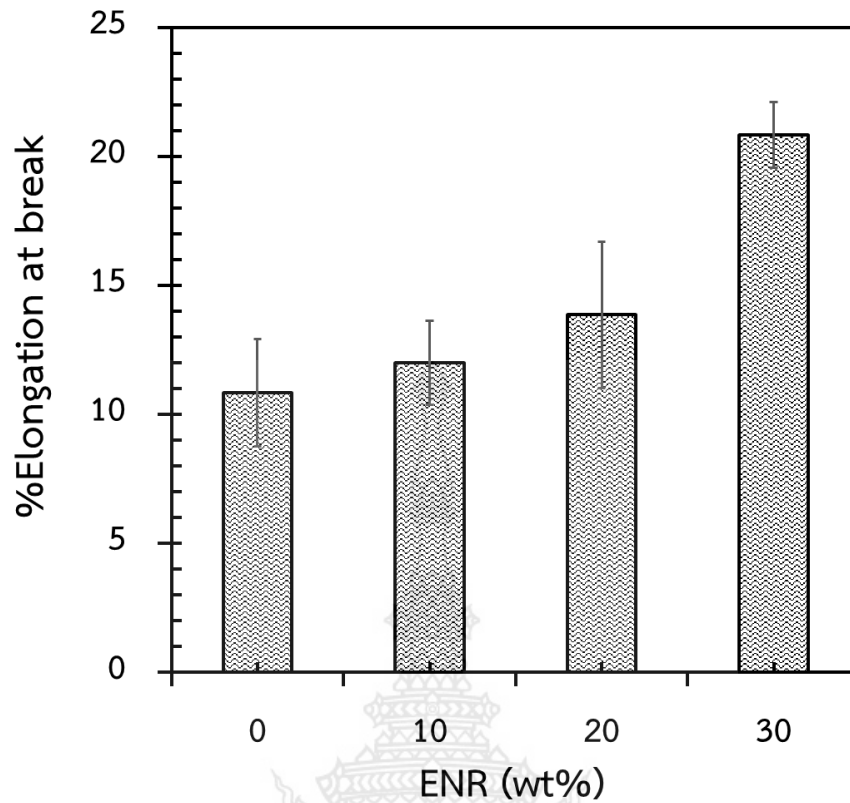
รูปที่ 29 แสดงค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR จากผลการทดลองพบว่า การเติมยาง ENR มีผลทำให้ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง โดยสังเกตพบค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงเริ่มลดลงเมื่อเติมยาง ENR ตั้งแต่ 20 %โดยน้ำหนัก และการลดลงของค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อเติมยาง ENR 30 %โดย

น้ำหนัก คือ มีค่าลดลงประมาณ 42.5 % เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามอดูลัสของพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่มีการเติมยาง ENR การลดลงของค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง เนื่องมาจากยาง ENR เป็นยางจึงมีความคงรูปต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิด [7]



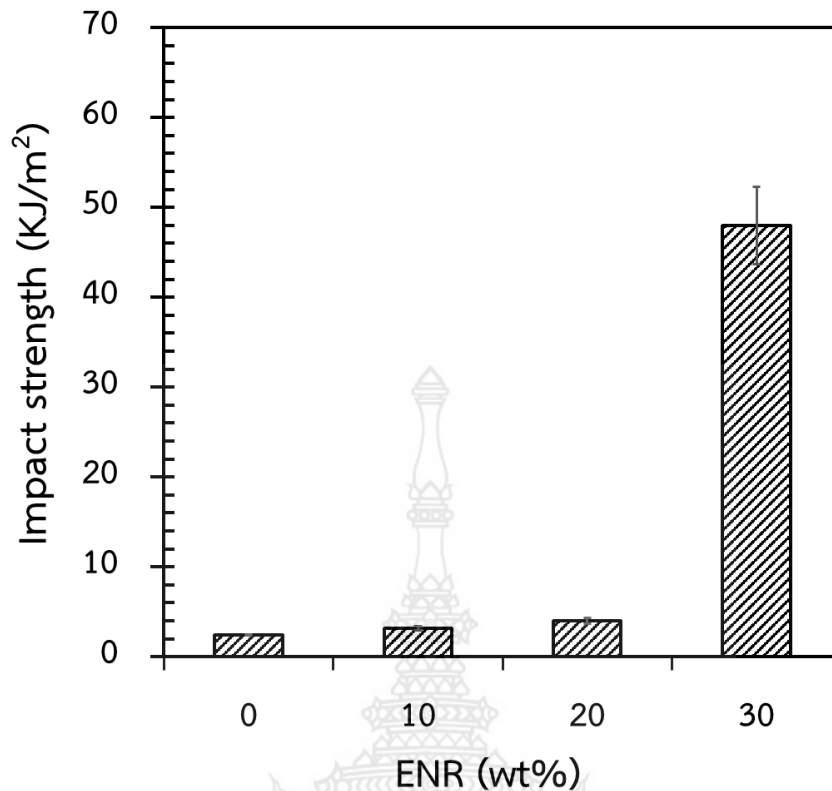
รูปที่ 30 ผลของปริมาณยาง ENR ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR

ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน เป็นดังแสดงในรูปที่ 30 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มมากขึ้น โดยมีการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเมื่อเติมยาง ENR ปริมาณ 30 %โดยน้ำหนัก โดยมีค่าลดลงประมาณ 77.25% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่มีการเติมยาง ENR ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเติมยาง ENR เพื่อปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิดมีผลกระทบทำให้สมบัติความต้านทานแรงดึงลดประสิทธิภาพลง [7, 23]



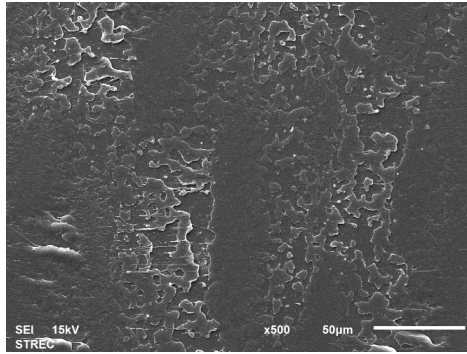
รูปที่ 31 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 31 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของ TPV ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณยาง ENR มีผลทำให้ค่าความสามารถในการยืดตัวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น กรณีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก มีผลทำให้พอลิแลกติกแอซิดสามารถยืดตัวได้มากที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่ามากกว่ากรณีพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่มีการเติมยาง ENR ประมาณ 92.07 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมยาง ENR ช่วยปรับความยืดหยุ่น (Flexible) ของพอลิแลกติกแอซิด

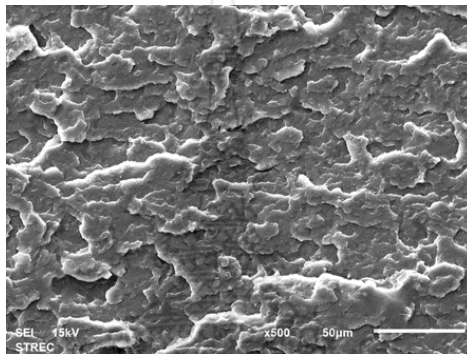


รูปที่ 32 ผลของการปรับปรุงแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยวิธีการผสมแบบกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์

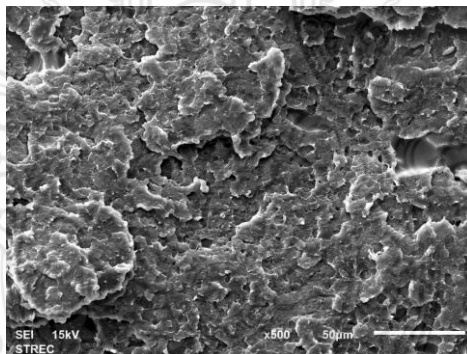
การปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยการใช้ยาง ENR และผสมด้วยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ เป็นดังแสดงในรูปที่ 32 ซึ่งพบว่า มีการปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนไกลคอลอย่างชัดเจน โดยการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นถึง 1,882.55 %เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ไม่มีการเติมยาง ENR และพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทกไม่เกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ สำหรับกรณีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และจากภาพสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีการเติมยาง ENR ที่ 0, 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 33 พบว่า รูปที่ 33(a) ชิ้นงานพอลิเอทิลีนไกลคอลมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ เนื่องจากผิวชิ้นงานบริเวณรอยแตกมีผิวเรียบ ส่วนกรณีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีการเติมยาง ENR 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก เป็นดังแสดงในรูปที่ 33(b) และ 33(c) มีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว เนื่องจากลักษณะพื้นผิวบริเวณรอยแตกมีความขรุขระ และสังเกตพบกรณีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก มีบางบริเวณของรอยแตกเกิดการยึดตัวของเนื้อพลาสติกลักษณะคล้ายเป็นเส้นใยซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน



(a) PLA



(b) ENR 10 wt%



(c) ENR 30 wt%

รูปที่ 33 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิดที่เติมยาง ENR ภายหลังจากทดสอบแรงกระแทก

- (a) พอลิแลกติกแอซิด
- (b) พอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 10 %โดยน้ำหนัก
- (c) พอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก

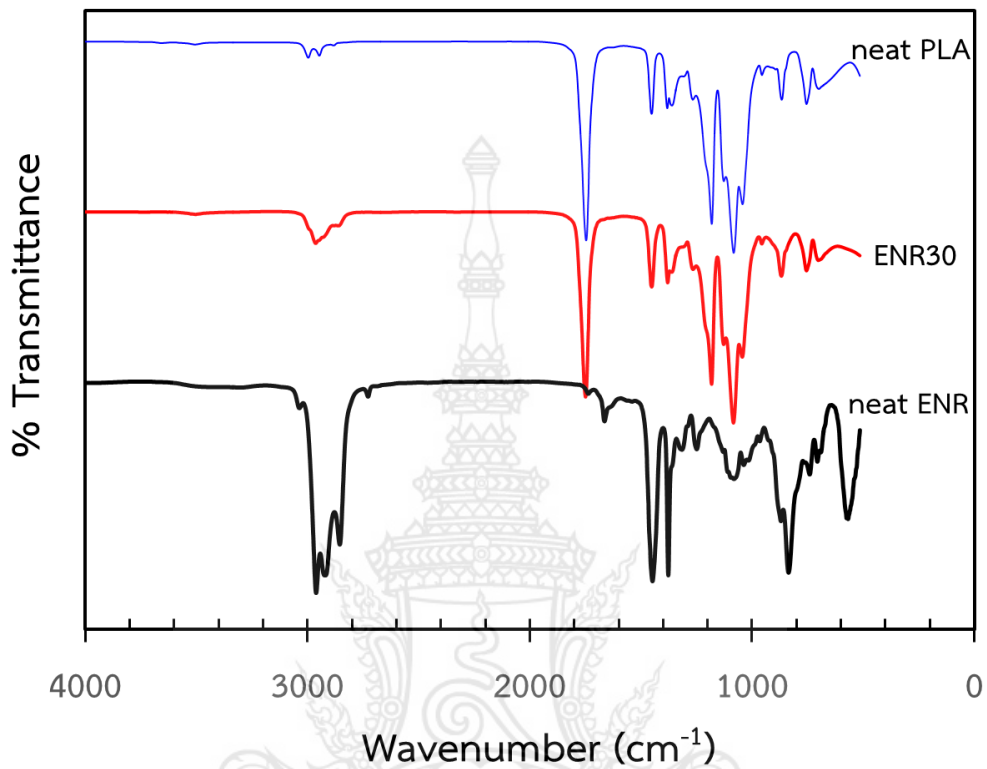
ตารางที่ 4 สมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดที่ผสมกับยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์

ปริมาณยาง ENR ในพอลิเมอร์ผสม (%)	Tg (°C)	Tm (°C)	H _m (J/g)	%Crystallinity
0	58.1	152.1	22.69	23.34
10	55.1	151.0	12.63	14.44
30	56.1	151.1	12.34	18.14

ผลของสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน ทำการผสมด้วยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ ถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC ผลเป็นดังแสดงในตารางที่ 4 จากผลการตรวจสอบพบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าลดลงเมื่อเติมยาง ENR ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเติมยาง ENR จะมีการผสม DCP เป็นสารเชื่อมโยงของยางลงไปด้วย 1.5 %โดยน้ำหนักของยาง ENR สาร DCP สามารถทำให้พอลิแลกติกแอซิดเกิดการเชื่อมโยง (crosslink) หรือเกิดการสร้างกิ่ง (branching) บางส่วน [24] จึงอาจส่งผลทำให้สายโซ่ของพอลิแลกติกแอซิดมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (Free volume) มีเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR มีค่าต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิด ส่วนปริมาณการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด พบว่า พอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR มีค่าเปอร์เซ็นต์การผลึกต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิด ทั้งนี้มีเหตุผลเช่นเดียวกับกรณีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว คือ การที่สายโซ่พอลิแลกติกแอซิดเกิดการเชื่อมโยง หรือเกิดกิ่งบางส่วนส่งผลทำให้การจัดเรียงตัวเป็นผลึกเกิดได้ยากมากขึ้น ส่วนจุดหลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อเติมยาง ENR ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดที่มีแนวโน้มลดลง

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงเมื่อนำพอลิแลกติกแอซิดมาผสมกับยาง ENR ที่มีการเติม DCP ด้วยวิธีการผสมแบบกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 34 ซึ่งเป็นกราฟแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิด และสเปกตรัมของยาง ENR ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป พบว่า กราฟของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟของสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิด แต่สามารถสังเกตเห็นพีค C=O ที่ช่วงเลขคลื่น 1750 cm⁻¹ มีการขยับไปทางซ้ายเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพอลิแลกติกแอซิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพอลิแลกติกแอซิดอาจเกิดแรงกระทำระหว่างเฟสกับยาง และเมื่อเปรียบเทียบกราฟสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR กับสเปกตรัมของยาง ENR พบว่า พอลิเมอร์ผสมไม่พบพีคที่ช่วงเลขคลื่น 1640 เหมือนกับยาง ENR ซึ่งพีคดังกล่าว คือ

C=C ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยาง ENR ในพอลิเมอร์ผสมได้ถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันโดย DCP ไปแล้ว



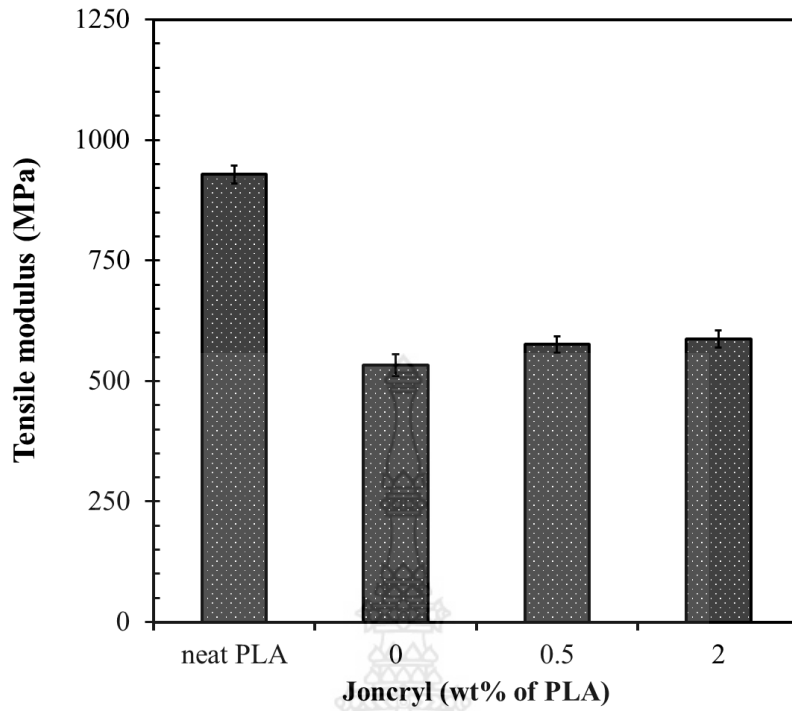
รูปที่ 34 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิด พอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และยาง ENR

4.2 ผลการศึกษาการหาปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซค์

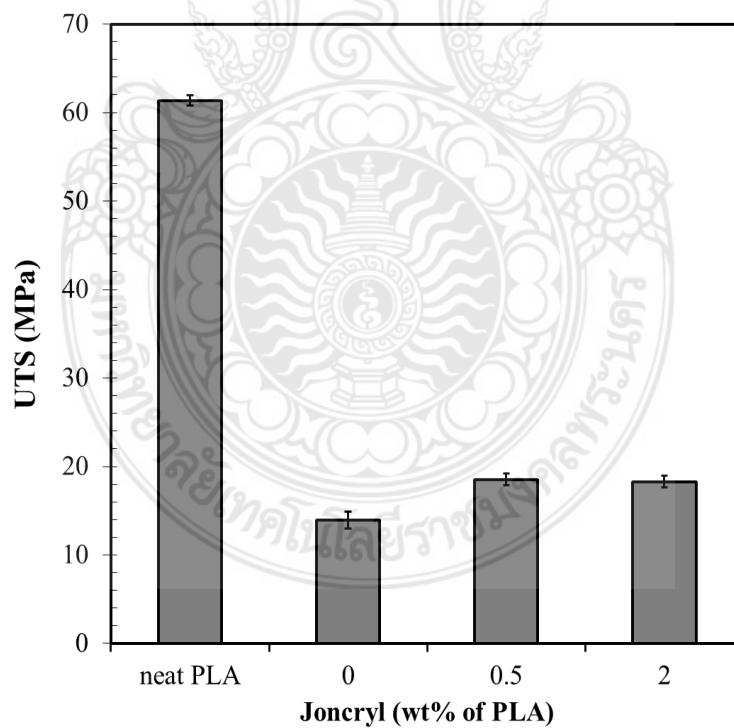
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 พบว่า สูตรพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR สูตรที่มีการปรับปรุงค่าความเหนียว และความยืดหยุ่นได้ดีที่สุด คือ สูตรพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 % โดยน้ำหนัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกสูตรดังกล่าวมาทำการปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากการเติมยาง ENR มีผลทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง ในงานวิจัยส่วนนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Joncryl ® ADR-4300 ซึ่งสามารถหน้าที่เป็นทั้งสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ที่มีหมู่อีพอกซีปริมาณสูง จึงคาดว่าจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มความต้านทานแรงดึง เนื่องจากในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปพอลิแลกติกแอซิดอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับความชื้นส่งผลทำให้สายโซ่ของพอลิแลกติกแอซิดเกิดการขาด (Chain scission) การเติม Joncryl ® ADR-4300 จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพอลิแลกติกแอซิดแบบกิ่ง (grafting) ช่วยทำให้พอลิแลกติกแอซิดมีน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มสูงขึ้น และอาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงขึ้นด้วย [25] นอกจากนี้การมีอยู่ของหมู่อีพอกซีปริมาณสูงจึงถูกคาดว่าเป็นช่วยในการส่งความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และยาง ENR ทำให้การส่งผ่านแรงมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 35 แสดงผลของการใช้ Joncryl ® ADR-4300 ในการปรับปรุงค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 % โดยน้ำหนัก พบว่า การเติม Joncryl ® ADR-4300 มีส่วนช่วยทำให้ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ประมาณ 7.92 และ 10.07 % เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเติม Joncryl ® ADR-4300 ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR และช่วยเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลกติกแอซิดที่เกิดการสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป แต่เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงกับพอลิแลกติกแอซิดยังคงพบว่ามีต่ำกว่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะการเติมเฟสยางมีอิทธิพลต่อการทำให้ค่ามอดูลัสมีการลดลงที่มากกว่า

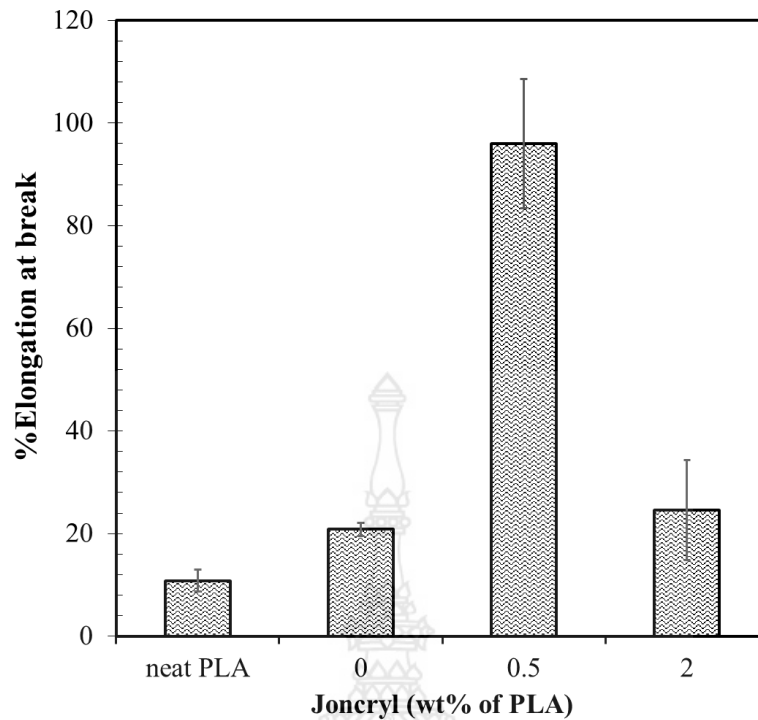
สำหรับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 % โดยน้ำหนัก และมีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ปริมาณต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 36 พบว่า ผลของการเติม Joncryl ® ADR-4300 มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 32.78 และ 31.11 % เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีมีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ทั้งนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกันกับกรณีค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดกับพอลิแลกติกแอซิดยังคงมีค่าต่ำกว่ามาก ทั้งนี้เป็นเพราะสมบัติของตัวยาง ENR เองมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดค่อนข้างมาก



รูปที่ 35 ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และมีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ปริมาณต่างๆ กันเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด

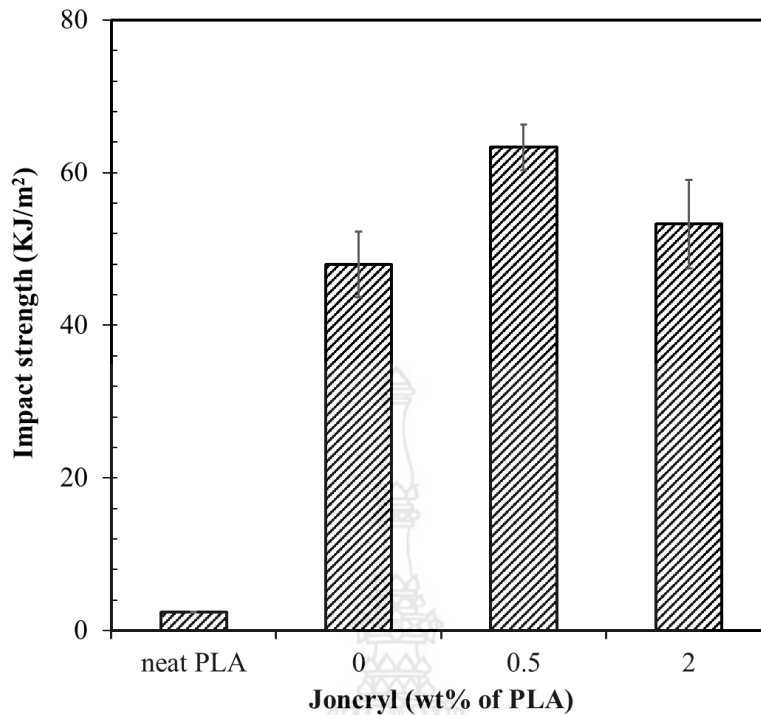


รูปที่ 36 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และมีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ปริมาณต่างๆ กันเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด



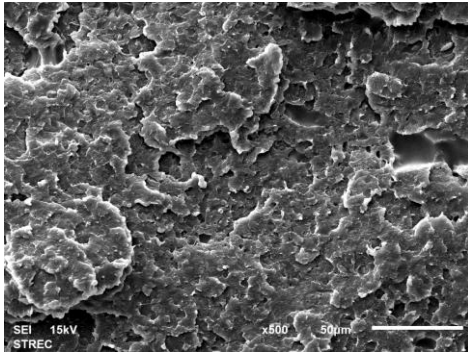
รูปที่ 37 ผลของการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ Joncryl ® ADR-4300 ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก

รูปที่ 37 แสดงผลของการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ Joncryl ® ADR-4300 ที่มีต่อความสามารถในยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม จากผลการทดลองพบว่า การเติม Joncryl ® ADR-4300 มีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการยืดตัวมากขึ้น โดยมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติม Joncryl ® ADR-4300 0.5 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความสามารถในการเข้ากันระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และยาง ENR มีมากขึ้นส่งผลทำให้สามารถยืดตัวได้มาก ก่อนที่จะเกิดการเสียรูป ส่วนกรณีการเติม Joncryl ® ADR-4300 2.0 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดไม่แตกต่างจากกรณีไม่เติม Joncryl ® ADR-4300 มากนัก อาจเนื่องมาจากปริมาณ Joncryl ® ADR-4300 ที่เติมปริมาณมากขึ้นยังมีผลทำให้พอลิแลกติกแอซิดเกิดการเกิดกึ่ง และเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้การจัดเรียงเป็นผลึกของพอลิแลกติกแอซิดยิ่งลดลง จึงอาจไปขัดขวางความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และยาง ENR

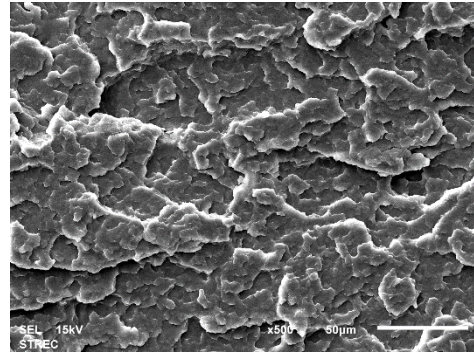


รูปที่ 38 ผลของการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก ที่มีการเติม Joncryn ® ADR-4300 ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 38 แสดงผลของการเติมสารเพิ่มเข้ากันได้ และสารช่วยขยายสายโซ่ที่มีต่อสมบัติความต้านทานแรงกระแทกของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมยาง 30 %โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า การเติม Joncryn ® ADR-4300 มีส่วนช่วยทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มสูง โดยมีการปรับปรุงแรงกระแทกมากที่สุดสำหรับกรณีการเติม Joncryn ® ADR-4300 0.5 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด โดยมีค่ามากกว่า 32.03 และ 2516.19 % เมื่อเปรียบเทียบกับ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR และพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่มีการเติมยาง ENR ตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกับค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง



(a) ENR 30 wt%



(b) ENR 30 wt% + Joncryl 2.0%

รูปที่ 39 ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิดที่เติมยาง ENR ภายหลังจากทดสอบแรงกระทำ

(a) พอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก

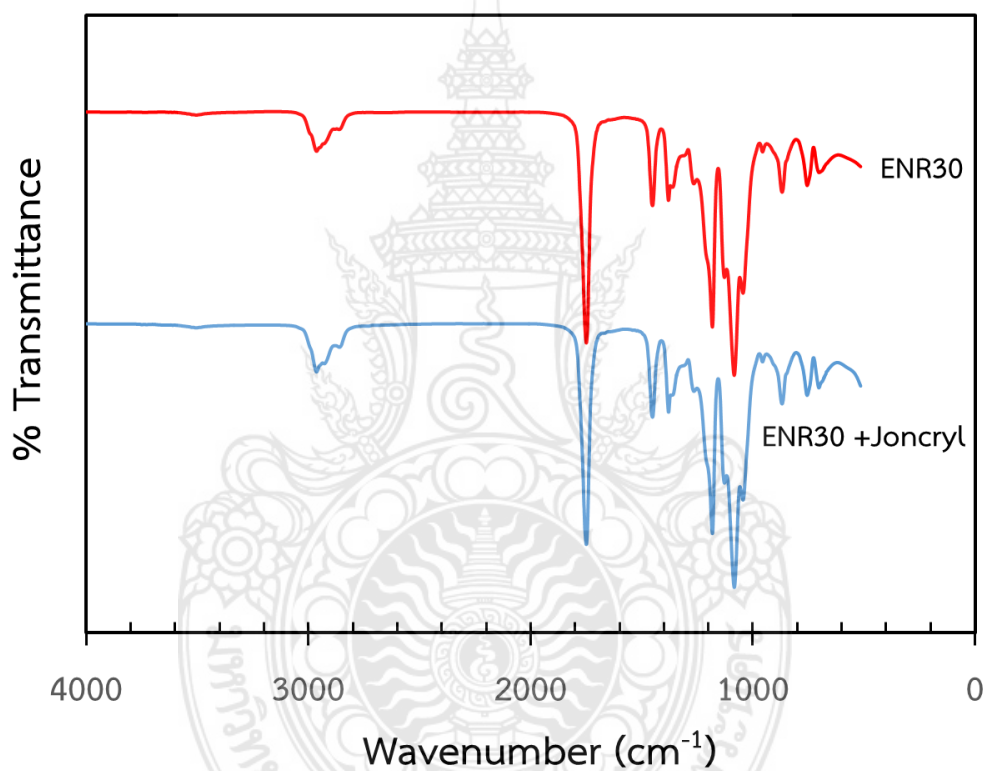
(b) พอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และ Joncryl ® ADR-4300 2.0 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด

ลักษณะรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และ Joncryl ® ADR-4300 2.0 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด ที่ได้จากการทดสอบแรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 39(b) มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ แสดงถึงการแตกหักแบบเหนียวเช่นเดียวกับกรณีพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก แต่ไม่มีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ดังแสดงในรูปที่ 39(a) แต่กรณีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ไม่สามารถสังเกตเห็นการยืดตัวออกคล้ายเส้นใย เหมือนกับกรณีที่ไม่มีการเติม Joncryl ® ADR-4300 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพอลิแลกติกแอซิดบางส่วนเกิดการเชื่อมโยงจึงอาจทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นการยืดตัวออกเป็นเส้นใย

ตารางที่ 5 แสดงผลของสมบัติทางความร้อนของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเติม Joncryl ® ADR-4300 จากผลการทดลองพบว่า การเติม Joncryl ® ADR-4300 ไม่มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดเกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างจากกรณี TPV ของพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่ากรณีพอลิแลกติกแอซิด และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณผลึก พบว่า การเติม Joncryl ® ADR-4300 มีผลทำให้ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Joncryl ® ADR-4300 มีผลทำให้พอลิแลกติกแอซิดเกิดการสร้างกิ่ง และอาจเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ขึ้นด้วย จึงมีผลทำให้พอลิแลกติกแอซิดเกิดการจัดเรียงเป็นผลึกได้ยากขึ้น และนั่นนำไปสู่การลดลงของจุดหลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดเมื่อมีการเติม Joncryl ® ADR-4300

ตารางที่ 5 สมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิแลกติกแอซิดสำหรับกรณีการเติมยาง ENR และการเติม Joncryl ® ADR-4300 เปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่มีการเติมสาร

สูตร	Tg (°C)	Tm (°C)	H _m (J/g)	%Crystallinity
Neat PLA	58.1	152.1	22.69	23.34
ENR 30%	56.1	151.1	12.34	18.14
Joncryl 2%	56.0	149.70	1.58	2.33



รูปที่ 40 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมและไม่เติม Joncryl ® ADR-4300 2.0 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด

จากสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมและไม่เติม Joncryl ® ADR-4300 ดังแสดงในรูปที่ 40 มีลักษณะของสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน ไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่าง 2 สเปกตรัม

จากผลงานวิจัยทั้ง 2 ส่วน สามารถสรุปได้ว่า สูตรพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเหนียวและความทนแรงกระแทกได้ดีที่สุด คือสูตรพอลิแลกติกแอซิดที่มีเติมยาง ENR 30 %โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากัน และสารช่วยขยายสายโซ่ Joncryl ® ADR-4300 0.5 %โดยน้ำหนักของ

พอลิแลกติกแอซิด มีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด และค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าพอลิแลกติกแอซิด เท่ากับ 785.88 % และ 2516.19 % ตามลำดับ



บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

5.1 การศึกษาการหาปริมาณยางธรรมชาติพอกไซต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณยาง ENR เกรด ENR50 ตั้งแต่ 0 – 30 % โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งมีการเติม dcp และทำการผสมด้วยวิธีการผสมแบบกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ ที่มีต่อสมบัติทางกล ทางความร้อน การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และสัณฐานวิทยา จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สมบัติทางกล พบว่า ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุเพราะยาง ENR เป็นพลาสติกที่มีความคงรูปต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิด แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าพอลิแลกติกแอซิด และสามารถผสมเข้ากันได้กับพอลิแลกติกแอซิดโดยพิจารณาจากภาพสัณฐานวิทยา จึงมีส่วนช่วยในการดูดซับแรงที่ได้รับในระหว่างการทดสอบแรงกระแทก
- สมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมพลาซิง ENR มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ปริมาณการเกิดผลึก และจุดหลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการมีอยู่ของสาร DCP มีผลทำให้พอลิแลกติกแอซิดเกิดการสร้างกิ่ง และเกิดการเชื่อมโยงบางส่วนของสายโซ่ จึงส่งผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น และการมีกิ่งของสายโซ่พอลิแลกติกแอซิดยังไปขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของพอลิแลกติกแอซิด
- การเปลี่ยนแปลงทางเคมี พบว่า จากการสังเกตผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FTIR สามารถสังเกตพบว่า พีค C=O ในพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR มีการขยับตำแหน่งไปเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด อาจเนื่องมาจากพอลิแลกติกแอซิดเกิดแรงกระทำระหว่างพลาสติกกับยาง ENR

5.2 การศึกษาการหาปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติพอกไซต์

จากงานวิจัยในส่วนที่ 1 ทางคณะวิจัยได้เลือกสูตรพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 30 % โดยน้ำหนัก มาทำการปรับปรุงสมบัติด้วยสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ เนื่องจากเป็นสูตรที่มีความเหนียวและความทนแรงกระแทกมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การเติมยาง ENR ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สามารถทำหน้าที่เป็นสายช่วยขยายสายโซ่ให้กับพอลิแลกติกแอซิดด้วย เพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในเรื่องของการรับแรงให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเลือกใช้ Joncryl

๑ ADR-4300 มาทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ 0.0 – 2.0 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด จากการผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

- สมบัติทางกล พบว่า การเติม Joncryl ® ADR-4300 มีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางกล ทั้งค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความต้านทานแรงกระแทก โดยปริมาณการเติม Joncryl ® ADR-4300 0.5 %โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด มีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด
- สมบัติทางความร้อน พบว่า การเติม Joncryl ® ADR-4300 ไม่มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่มีผลทำให้ปริมาณผลึก และจุดหลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดเกิดการลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Joncryl ® ADR-4300 มีผลทำให้พอลิแลกติกแอซิดเกิดการสร้างกิ่ง และการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ จึงอาจไปขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของพอลิแลกติกแอซิดทำให้เกิดได้ยากมากขึ้น
- การเปลี่ยนแปลงทางเคมี พบว่า จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR ไม่สามารถพบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมและไม่เติม Joncryl ® ADR-4300



เอกสารอ้างอิง

1. Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M. and Tsuji, H., 2010, **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**, John Wiley & Sons, Inc.
2. Boonfaung, P., Wasutchanon, P. and Somwangthanaroj, A., 2011, “Development of Packaging Film from Bioplastic Polylactic Acid (PLA) with Plasticizers”, **PACCON2011 (Pure and Applied Chemistry International Conference 2011)**, Bangkok, Thailand, pp. 621-624.
3. Giita Silverajah, V.S., Ibrahim, N.A., Zainuddin, N., Wan Yunus, W.M.Z. and Hassan, H.A., 2012, “Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Poly(lactic acid)/Epoxidized Palm Olein Blend”, **Molecules**, Vol. 17, pp. 11729-11747.
4. Ašhabi, L., Jafari, S.H., Khonakdar, H.A., Hüssler, L., Wagenknecht, U. and Heinrich, G., 2013, “Non-isothermal Crystallization Behavior of PLA/LLDPE/nanoclay Hybrid: Synergistic Role of LLDPE and Clay”, **Thermochimica Acta**, Vol. 565, pp. 102-113.
5. Zhang, C., Huang, Y., Luo, C., Jiang, L. and Dan, Y., 2011, “Enhanced Ductility of Polylactide Materials: Reactive Blending with Pre-hot Sheared Natural Rubber”, **Journal of Polymer Research**, Vol. 20, pp. 1-9.
6. Nampitch, T. and Magaraphan, R., 2010, “The Properties of Polymer Blends between Poly(lactic) Acid and Epoxidized Natural Rubber Irradiated in the Rubber Phase”, **Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging**, China.
7. Wahit, M. U., Hassan, A., Ibrahim, A.N., Zawawi, N.A. and Kunasegeran, K., 2015, “Mechanical, Thermal and Chemical Resistance of Epoxidized Natural Rubber Toughened Polylactic Acid Blends”, **Sains Malaysiana**, Vol. 44, pp. 1615–1623.
8. Bitinis, N., Sanz, A., Nogales, A., Verdejo, R., Lapez-Manchado, M.A. and Ezquerro, T.A., 2012, “Deformation Mechanisms in Polylactic Acid/Natural Rubber/Organoclay Bionanocomposites as Revealed by Synchrotron X-ray Scattering”, **Soft Matter**, Vol. 8, pp. 8990-8997.
9. Thongpin, C., Kuttanate, N., Kumpuang, K. and Suwanwanit, N., 2012, “Study of Dynamic Vulcanized PLA/ENR TPV Filled with Various Organic Modified MMT (OMMT)”, **Journal of Metals, Materials and Minerals**, Vol. 22, pp. 105-117.

10. Huang, Y., Zhang, C., Pan, Y., Wang, W., Jiang, L. and Dan, Y., 2013, "Study on the Effect of Dicumyl Peroxide on Structure and Properties of Poly(Lactic Acid)/ Natural Rubber Blend", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 21, pp. 375-387.
11. Chen, Y.J., 2014, "Bioplastics and Their Role in Achieving Global Sustainability", **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, Vol. 6, pp. 226-231.
12. John, M.J. and Thomas, S., 2008, "Biofibres and Biocomposites", **Carbohydrate Polymers**, Vol. 71, pp. 343-364.
13. Garlotta, D., 2001, "A Literature Review of Poly(Lactic Acid)", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 9, pp. 63-84.
14. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2554, "พอลิแลกติกแอซิด: พอลิเอสเตอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้", **วิศวกรรมสารมก.**, ฉบับที่ 77, หน้า 99-110.
15. Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M. and Tsuji, H., 2010, **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**, John Wiley & Sons, Inc.
16. Adsul, M. G., Varmab, A. J. and Gokhale, D. V., 2007, "Lactic Acid Production from Waste Sugarcane Bagasse Derived Cellulose", **Green Chemistry**, Vol. 9, pp. 58-62.
17. Gupta, B., Revagade, N. and Hilborn, J., 2007, "Poly(lactic acid) Fiber: An Overview" **Progress in Polymer Science**, Vol. 34, pp. 455-482.
18. De, S.K. and White, J.R., 2001, **Rubber Technologist's Handbook**, Shropshire, UK, Rapra Technology Limited.
19. Hamzah, R., Bakar, M.A., Khairuddean, M., Mohammed, I.A. and Adnan, R., 2012, "A Structural Study of Epoxidized Natural Rubber (ENR-50) and Its Cyclic Dithiocarbonate Derivative Using NMR Spectroscopy Techniques", **Molecules**, Vol. 17, pp. 10974-10993.
20. Bhowmick, A.K. and Stephens, H., 2001, **Handbook of Elastomers**, New York, Marcel Dekker, Inc
21. Imre, B. and Pukánszky, 2013, "Compatibilization in Bio-based and Biodegradable Polymer Blends", **European Polymer Journal**, Vol. 49, pp. 1215-1233.
22. Vasanthan, N. and Ly, O., 2009, "Effect of Microstructure on Hydrolytic Degradation Studies of Poly(l-lactic acid) by FTIR Spectroscopy and Differential Scanning Calorimetry", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 94, pp. 1364-1372.
23. Ebadi-Dehaghani, H., Khonakdar, H.A., Barikani, M. and Jafari, S.H., 2015, "Experimental and Theoretical Analyses of Mechanical Properties of PP/PLA/clay Nanocomposites", **Composites Part B: Engineering**, Vol. 69, pp. 133-144.

24. Wang, Y., Chen, K., Xu, C. and Chen, Y., 2014, “Supertoughened Biobased Poly(lactic acid)-Epoxidized Natural Rubber Thermoplastic Vulcanizates: Fabrication, Co-continuous Phase Structure, Interfacial in Situ Compatibilization, and Toughening Mechanism”, **The Journal of Physical Chemistry B**, Vol. 119, pp. 12138-12146.
25. Rathi, S.R., Coughlin, E.B., Hsu, S.L., Golub, C.S., Ling, G.H. and Tzivanis, M., 2014, “Maintaining Structural Stability of Poly(lactic acid): Effects of Multifunctional Epoxy based Reactive Oligomers”, **Polymers**, Vol. 6, pp. 1232-1250.



ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล
(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Kantima Chaochanchaikul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02 836 3000
E-mail : kantima.c@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วัสดุศาสตร์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Wood/Natural Fiber Plastic Composites
Polymer Composites
Polymer Degradation
Bioplastics

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Hachana, N., Wongwanchai, T., Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2017, "Influence of Crosslinking Agent and Chain Extender on Properties of Gamma-Irradiated PLA", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 25, pp. 323-333.
2. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, "Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.
3. Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul, K., 2015, "Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 25-29.
4. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
5. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2013, "Photodegradation and UV Penetration Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering", **Express Polymer Letters**, Vol. 7, No. 2, pp. 146-160.
6. Chaochanchaikul, K., Jayaraman, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2012, "Influence of Lignin Content on Photodegradation in Wood/HDPE Composites under UV Weathering", **BioResources**, Vol. 7, No. 1, pp. 38-55.
7. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2011, "Structural and Thermal Stabilizations of PVC and Wood/PVC Composites by Metal Sterates and Organotin", **BioResources**, Vol. 6, No. 3, pp. 3115-3131.
8. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, "Stabilizations of Molecular Structures and Mechanical Properties of PVC and Wood/PVC Composites by Tinuvin and TiO₂ Stabilizers", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 51, No. 6, pp. 1354-1365.
9. Pattamasattayasonti, N., Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of UV-Weathering Aging and CeO₂ Based Coating Layer on Mechanical and Structural Changes in Wood/PVC Composites", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 17, No. 1, pp. 9-16.

10. Pulngern, T., Choocheepsakul, S., Padyenchean, C., Rosarpitak, V., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of Cross-section Design and Loading Direction on Creep and Fatigue Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 42-49.
11. Sombatsompop, N., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K., Pulngern, T. and Rosarpitak, V., 2010, "Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 33-41.
12. Chaochanchaikul, K., Kositchaiyong, A., and Sombatsompop, N., 2009, "Blending Techniques Affecting Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/LDPE and CaCO₃/LDPE Composites", **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 17, No. 5, pp. 281-290.
13. Sombatsompop, N., Taptim, K., Chaochanchaikul, K., Thongpin, C. and Rosarpitak, V., 2008, "Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite", **Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry**, Vol. 45, No. 7, pp. 534-541.
14. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "Mechanical Characterization of E-Chopped Strand Glass Fiber Reinforced Wood/PVC Composites", **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, No. 6, pp. 535-550.
15. Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "On Adhesion Mechanisms and Interfacial Strength in ABS/Wood Sawdust Composites", **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Vol. 27, No. 8, pp. 669-678.
16. Sombatsompop, N., Uawongsuwan, P. and Chaochanchaikul, K., 2007, "Effect of Molecular Structure on Extrudate Swell Behavior for Different Thermoplastic Melts in an Electro-magnetized Die", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 47, No. 3, pp. 270-280.
17. Prachayawarakorn, J., Kumsri, J., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2006, "Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol.102, No. 1, pp. 598-606.

18. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2005, "Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of PVC/Sawdust Composites with Different Silane Coupling Agents", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 96, No. 1, pp. 213-221.
19. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 53, No. 9, pp. 1210-1218.
20. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C. and Thongsang, S., 2003, "Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 52, No. 12, pp. 1847-1855.

