



อิทธิพลของหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีต่อการ
ปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพ

Influence of Epoxide Group in Epoxidized Natural
Rubber on Improvement of Properties in Bioplastic

โดย

ผศ.ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล

ผศ.ดร.ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

ผศ.ดร.วิไลวรรณ ลีนะกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้
ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๓ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่มีอยู่บนโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (ENR) ที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยในงานวิจัยได้มีการเลือกใช้ยาง ENR จำนวน 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมยาง ENR ตั้งแต่ 0 ถึง 30 %โดยน้ำหนัก PLA และยาง ENR ถูกนำมาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด และทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแรงดัน สำหรับผลของปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในยาง ENR และปริมาณยาง ENR ที่มีต่อสมบัติของ PLA ถูกประเมินโดยการทดสอบแรงดึง และแรงกระแทก และเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) จากผลการทดลอง พบว่า การเติมยาง ENR มีผลทำให้สมบัติความทนแรงดึงลดลง แต่เพิ่มความต้านทานแรงกระแทก ยาง ENR25 มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงแรงกระแทกมากกว่ายาง ENR50 สำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมยาง ENR50 มีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการหลอมเหลว และเปอร์เซ็นต์ของผลึกของ PLA มีแนวโน้มลดลง และลดลงมากกว่ากรณีการเติมยาง ENR25 การมีอยู่ของยาง ENR ไปขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA

คำสำคัญ: พอลิแลคติกแอซิด/ยางธรรมชาติ/อิพอกไซด์/สมบัติทางกล/สมบัติทางความร้อน

Abstract

This research work aimed to study the effect of the epoxide group in epoxidized natural rubber (ENR) molecules on the improvement of properties of polylactic acid (PLA). ENR25 and ENR50 were two grades of ENR chosen in this work and varied from 0 to 30 wt%. PLA and ENR were melt-blended by using an internal mixer and then sheet-formed by a compression molding machine. The influences of the epoxide group on ENR and rubber content on the properties of PLA were estimated by tensile and impact testings and Differential Scanning Calorimetry (DSC) technique. The result revealed that the addition of ENR led to a decrease in tensile properties but enhanced impact resistance. ENR25 was effective for improving the impact strength of more than ENR50. For thermal properties, the addition of ENR50 induced the decreases in glass transition temperature, melting point, and percentage crystallinity of PLA and more than that of ENR25. The presence of ENR might be interrupting the crystallization of PLA.

Keywords: Polylactic acid/natural rubber/epoxidized/mechanical properties/thermal properties

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้ทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือวิจัย

คณะวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บัญชีตาราง	จ
บัญชีรูป	ฉ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พอลิแลกติกแอซิด	3
2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์	8
2.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	12
3. วิธีดำเนินการวิจัย	144
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	14
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	15
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	16
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	24
4.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง	24
4.2 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก	27
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	28
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	29
เอกสารอ้างอิง	30
ประวัตินักวิจัย	32

บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการเติมเขม่าดำ	10
2	เปรียบเทียบผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยเขม่าดำและซิลิกา	10
3	ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สของยางชนิดต่างๆ	12
4	สมบัติทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ที่มีปริมาณ หมู่อีพอกไซด์ 25 และ 50 %mol ณ ปริมาณยาง ENR ที่ 0 10 และ 30 %โดยน้ำหนัก	28

บัญชีรูป

รูปที่	หน้า
1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลกติกแอซิด	3
ihj2 โครงสร้างของกรดแลกติก รูปแบบดี- และแอล-ไอโซเมอร์	4
3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง	6
4 ปฏิกริยาอ็อกซิเดชันที่ตัดแปรงธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR ด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก	8
5 การเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกจากการทำปฏิกริยาระหว่างกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ไซด์	9
6 ปฏิกริยาอ็อกซิเดชันที่เกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างยางธรรมชาติและกรดเปอร์แอซิดิก	9
7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกริยาอ็อกซิเดชัน 50 %mol	11
8 ความทนต่อน้ำมันของยาง ENR-25 ENR-50 ยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน และยางไนไตรล์ เมื่อถูกแช่ในน้ำมัน 1, 2 และ 3 ตามมาตรฐาน ASTM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเวลา 70 ชั่วโมง	11
9 เม็ดพอลิแลกติกแอซิด เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC	14
10 ยางธรรมชาติอ็อกไซด์ ของบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด	15
11 สารเชื่อมโยงไดคีมิวเพอร์ออกไซด์ ของบริษัท Sigma-Aldrich	15
12 แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอ็อกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด	16
13 เครื่องผสมแบบระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด	17
14 เครื่องอัดด้วยความดัน รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometechnic ประเทศไทย	17
15 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง	19
16 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	19
17 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus	20
18 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน	21
19 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน	21
20 เครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2	25
21 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P	22
22 เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH	23

รูปที่		หน้า
23	ผลของปริมาณการเติมยาง ENR และปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีต่อค่ามอดุลัส ความต้านทานแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างพอลิแลกติก แอซิดและยาง ENR	24
24	ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่าง พอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมยาง ENR25 หรือ ENR50 ปริมาณต่างๆ กัน	25
25	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมยาง ENR25 หรือ ENR50 ปริมาณต่างๆ กัน	26
26	ผลของการปรับปรุงแรงกระแทกของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน และปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่แตกต่างกัน	27

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย

ปัจจุบันปริมาณขยะจากพลาสติกได้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว และได้ส่งผลกระทบต่อสถานะแวดล้อมอย่างรุนแรง สหประชาชาติได้ประเมินว่าขยะพลาสติกที่ถูกปล่อยทิ้งลงสู่มหาสมุทรมีปริมาณมากถึง 5-13 ล้านตันต่อปี และได้สำรวจพบเศษพลาสติกในระบบทางเดินอาหารของนก และสัตว์เลี้ยงเลที่อยู่บริเวณทะเลและมหาสมุทร [1] ซึ่งถ้าเรานำสัตว์เหล่านั้นมาบริโภคจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายเราไปด้วย นอกจากนี้ขยะพลาสติกส่วนใหญ่เป็นขยะที่ย่อยสลายได้ยาก จึงทำให้แต่ละประเทศต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจัดการ ปัจจุบันทั่วโลกจึงเกิดกระแสลดปริมาณการใช้พลาสติกและนำวัสดุชนิดอื่นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาใช้ทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable) จึงควรถูกนำมาใช้ทดแทนพลาสติกทางการค้า (commodity plastics) ที่สังเคราะห์มาจากน้ำมันปิโตรเลียม พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจาก PLA เป็นพลาสติกชีวภาพที่มีความแข็งแรง และมีความคงรูปสูง [2] แต่อย่างไรก็ตาม PLA มีข้อเสียในเรื่องของความเปราะ ทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ และมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงความเหนียว และความทนแรงกระแทกของ PLA ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น การเติมสารพลาสติกไซเซอร์ [3-5] การนำ PLA มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น [6-7] และการเติมฟล็กของยาง [8-10] สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการเลือกใช้อย่างธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber, ENR) มาทำการปรับปรุงสมบัติความเปราะและความทนแรงกระแทกของ PLA เนื่องจากยาง ENR เป็นยางที่ได้มาจากการดัดแปรยางธรรมชาติซึ่งมีปริมาณมากในประเทศไทย และคาดว่าหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide Group) ในยาง ENR สามารถกันได้ดีกับ PLA จึงช่วยทำให้ยาง ENR และ PLA สามารถเข้ากันได้ดี และทำการศึกษาค้นคว้าของหมู่อีพอกไซด์ที่มีอยู่ในยาง ENR ว่ามีส่วนช่วยเสริมความเข้ากันได้ระหว่างยาง ENR และ PLA อย่างไร

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าของปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีอยู่ในยาง ENR และปริมาณของยาง ENR ที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยทำการประเมินผลจากการทดสอบแรงดึง แรงกระแทก และตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีอยู่ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีต่อสมบัติทางกล และทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด

1.2.2 เพื่อปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิดด้วยการใช้อย่างธรรมชาติอีพอกไซด์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 วัตถุประสงค์หลักที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย พอลิแลกติกแอซิด และยางธรรมชาติอีพอกไซด์
- 1.3.2 เครื่องมือที่ใช้การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เครื่องผสมระบบปิด และเครื่องอัดความดันสูง
- 1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และปริมาณของยางธรรมชาติอีพอกไซด์
- 1.3.4 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้
 - สมบัติทางกล ตามมาตรฐาน ASTM
 - สมบัติทางความร้อน

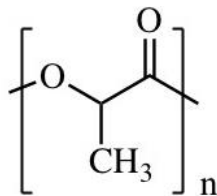
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – การพัฒนาแนวทางการปรับปรุงสมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพโดยการใช้วัสดุธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรภายในประเทศไทย ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างความรู้และทักษะทางการวิจัยให้กับนักวิจัยไทย
- 1.4.2 ด้านสิ่งแวดล้อม – ส่งเสริมให้เกิดการใช้พลาสติกชีวภาพเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 1.4.3 ด้านวิชาการ – เผยแพร่องค์ความรู้เชิงวิชาการในรูปแบบการประชุมวิชาการ ภายหลังการเสร็จสิ้นโครงการวิจัย

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแลกติกแอซิด

พอลิแลกติกแอซิดเป็นหนึ่งในพลาสติคชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ หรือด้วยวิธีการฝังดิน โดยจัดอยู่ในตระกูลของพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) พอลิแลกติกแอซิดมีสูตรโครงสร้างเคมี ดังรูปที่ 1 พอลิแลกติกแอซิดสามารถสังเคราะห์ได้จากกรดแลกติก (Lactic acid) ซึ่งเกิดได้จากการนำแป้งหรือน้ำตาลจากพืช เช่น แป้งข้าวโพด หรือแป้งมันสำปะหลัง ข้าวสาลี หรืออ้อยมาผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์จนกระทั่งเกิดการย่อยกลายเป็นกรดแลกติก [9] พอลิแลกติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อยู่ในช่วง 55-59 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 174-184 องศาเซลเซียส พอลิแลกติกแอซิดมีค่าความแข็งแรงทางกลและค่ามอดุลัสสูง แต่มีความเหนียวต่ำ สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกระบวนการขึ้นรูปทั่วไปที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติค เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection moulding) กระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding) เป็นต้น [2,9]



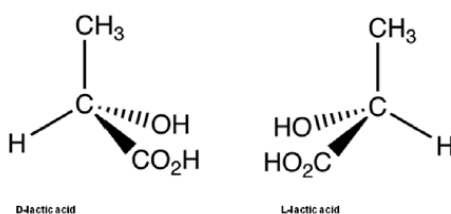
รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลกติกแอซิด [8]

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 วิธีการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิแลกติกแอซิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การปรับลดจุดหลอมเหลวให้ลดลงโดยการทำให้เกิดแลคไต์ไดอีนันซีโอเมอร์ (Lactide enantiomers) จำนวนเล็กน้อยภายในโครงสร้างให้มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม การลดลงของจุดหลอมเหลวเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของปริมาณผลึก และ

อัตราการเกิดผลึก พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสมบัติที่คล้ายคลึงกับพอลิสไตรีน (PS) คือ เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใสไม่มีสี มีความแข็งแรง และคงรูปร่าง พอลิแลกติกแอซิดมีอายุการใช้งานที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว และเมื่อถูกกำจัดทิ้งอย่างเหมาะสมจะเกิดการไฮโดรไลซิสไปเป็นสารธรรมชาติที่ไม่อันตราย พอลิแลกติกแอซิดสามารถเกิดผลึกได้ในสภาวะที่ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ หรือทำการบ่ม ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือการทำให้เกิดผลึกโดยการดัดยัด [8]

การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิด

พอลิแลกติกแอซิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากกรดแลกติก หรือกรดอัลฟาไฮดรอกซี (α -Hydroxy acids) กรดแลกติกสามารถถูกผลิตขึ้นจากการหมักสารคาร์โบไฮเดรต หรือการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ปัจจุบันวิธีการหมักได้รับความนิยมมากกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี การหมักจะทำการเปลี่ยนจากน้ำตาลหรือแป้งให้กลายเป็นกรดแลกติกโดยใช้แบคทีเรีย [10-11] กรดแลกติกมีชื่อทางเคมี คือ 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอนิกแอซิด (2-Hydroxy propionic acid) เป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งของกรดอัลฟาไฮดรอกซี กรดแลกติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดี และแบบแอล ดังรูปที่ 2 โดยทั้งแบบดี และแอลไอโซเมอร์ (enantiomers) มีความว่องไวต่อแสงแตกต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีที่เหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในสามมิติแตกต่างกัน และบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่ในธรรมชาติพบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์ หรือพบในรูปแบบของผสมระหว่างแอล- และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่า ของผสมราซิมิก (Racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือสารประกอบมีโซ (meso-compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ พอลิแลกติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงที่ดี ถูกผลิตได้จากการหมักสารคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นกรดแลกติกโดยการหมัก [9]

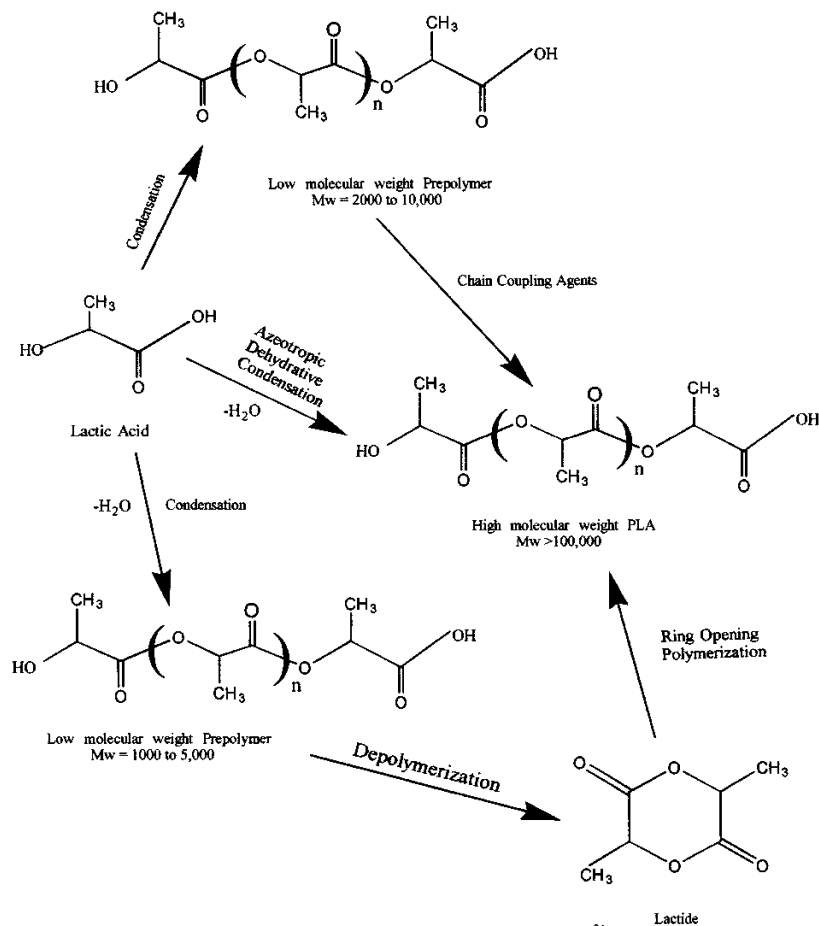


รูปที่ 2 โครงสร้างของกรดแลกติก รูปแบบดี- และแอล-ไอโซเมอร์ [9]

การสังเคราะห์กรดแลกติกให้กลายเป็นพอลิแลกติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน 3 วิธีแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ได้แก่ ปฏิกริยาการควบแน่นแบบโดยตรง (Direct condensation) และการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) และ/หรือการสังเคราะห์โดยผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide formation) และการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดผ่านปฏิกิริยาควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (Azeotropic dehydrative condensation)

- การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรง กรดแลกติกจะถูกสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการควบแน่นจนกระทั่งได้เป็นพอลิเมอร์สมบัติคล้ายแก้วที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งมีเสถียรภาพต่ำ ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำได้โดยใช้สารคู่ควบ (coupling agent) สาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเนื่องมาจากการมีอยู่ของน้ำ สารปนเปื้อน และการมีหมู่ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ำ [8-9]
- การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดโดยผ่านการเกิดแลคไทด์ คือ การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดเป็นพรีพอลิเมอร์ (Prepolymer) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นำพรีพอลิเมอร์ไปผ่านกระบวนการแตกตัวย้อนกลับ (Depolymerization) ทำให้เกิดเป็นแลคไทด์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น จากนั้นทำให้แลคไทด์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเปิดวง (Ring opening polymerization) เกิดเป็นพอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง ($M_w > 100,000$) วิธีการสร้างแลคไทด์เป็นวิธีการเดียวเท่านั้นที่ทำให้ได้พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและความบริสุทธิ์สูง [8-9]
- การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดผ่านปฏิกิริยาควบแน่นแบบอะซิโโทริก คิดค้นโดย บริษัท Mitsui Toatsu Chemical เพื่อใช้ในการสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดในทางการค้า โดยการใช้กรดแลกติกและตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนการควบแน่น และการกำจัดน้ำออก (dehydration) ภายใต้อุณหภูมิและความดัน จนกระทั่งได้พอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่า 300,000 [8-9]

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) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอิมานชิโอเมอร์แอล หรือดี, แอล โครงสร้างแบบแอลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดสามารถหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงสร้างเบต้าหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส [9]



รูปที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [8]

สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด [9]

ปริมาณแอล-ไอโซเมอร์ และ ดี-ไอโซเมอร์ในสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดมีผลต่อสมบัติทางกล ทางความร้อน และสมบัติความต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier properties) รวมถึงปริมาณการเกิดผลึก พอลิแลคติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีอุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูง ในขณะที่พอลิแลคติกแอซิดที่มีดี-ไอโซเมอร์ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้สัดส่วนความเป็นผลึกลดลง อุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วย ดังนั้นการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดให้มีสัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกัน มีผลทำให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดจึงสามารถปรับโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิดเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการนำไปใช้งาน

- สมบัติด้านการละลาย

ความสามารถในการละลายของพอลิแลคติกแอซิด ขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่พอลิแลคติกแอซิด และระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) พอลิแลคติกแอซิดไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน

(Hexane) และเฮปเทน (Heptane) ตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิแลกติกแอซิด กรณีพอลิแอล-แลกติกแอซิด สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอรีเนตและฟลูออรีเนต (Chlorinated or fluorinated organic solvents) ไดออกเซน (Dioxane) ไดออกโซเลน (Dioxolane) และฟูเรน (Furane) ส่วนราซิมีคพอลิแลกติกแอซิดสามารถละลายได้ดีในกลุ่มตัวทำละลายข้างต้นแล้ว ยังสามารถละลายได้ดีในอะซิโตน (Acetone) ไพริดีน (Pyridine) เอทิลแลกเตต (Ethyl lactate) เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ไกซีน (Xylene) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide) เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (N,N- dimethylformamide) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl ethyl ketone)

- สมบัติทางกล

กรณีพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่ผ่านการดัดยัดมีความคงรูป และความแข็งแรงสูง แต่มีความเปราะค่อนข้างมาก แต่เมื่อนำพอลิแลกติกแอซิดไปผ่านการดัดยัด พอลิแลกติกแอซิดมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต แต่ดีกว่าพอลิสไตรีนที่ผ่านการดัดยัด ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงและแรงดัด (Tensile and flexural moduli) ของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอรัชนิดอื่นๆ

- สมบัติความต้านทานการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจนผ่านได้ของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าน้อยกว่าพอลิสไตรีน แต่สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ส่วนการยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกันกับพอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต นอกจากนี้พอลิแลกติกแอซิดยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของสารประกอบอินทรีย์ เช่น เอทิลอะซิเตต และดี-ไลโมนีน (D-limonene) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต

การเสื่อมสภาพของพอลิแลกติกแอซิด [9]

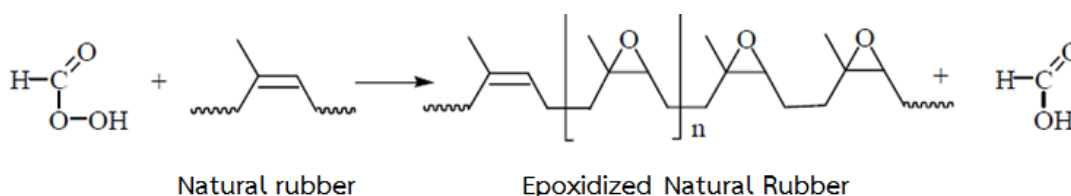
การเสื่อมสภาพของพอลิแลกติกแอซิดส่วนใหญ่เกิดจากการขาดออกของสายโซ่ เนื่องจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การเสื่อมสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (เอนไซม์) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพด้วยแสงหรือด้วยรังสี ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิแลกติกแอซิดมีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ระดับความเป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล ความบริสุทธิ์ สภาพแวดล้อมความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแลกติกแอซิดมักเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ถ้าไม่นำพอลิแลกติกแอซิดไปอบไล่ความชื้นก่อนการนำมาขึ้นรูปพอลิแลกติกแอซิดจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำ ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปทำให้เกิดกรดแลกติก ส่วนการเสื่อมสภาพของพอลิแลกติกแอซิดด้วยการย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากเอนไซม์ที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์ ได้แก่ เอนไซม์กลุ่มเอสเทอร์เรส (Esterase) โปรติเอส (Protease) และไลเปส (Lipase) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์สามารถถูกดูดซึมได้โดยจุลินทรีย์ เช่น เห็ด รา และแบคทีเรีย

2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

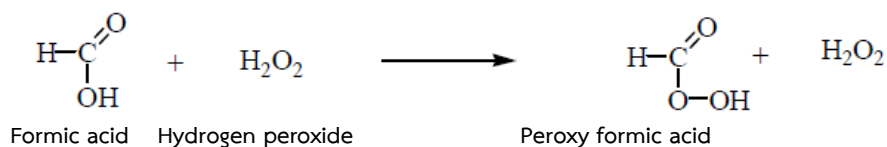
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ถูกสร้างขึ้นจากการดัดแปรน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) เพื่อปรับปรุงสมบัติความทนต่อน้ำมันให้สูงขึ้น เพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของแก๊สให้ดีขึ้น และมีสมบัติยืดหยุ่นรับแรงและกระจายแรง (Damping) ที่ดีขึ้น แต่ยังรักษาสมบัติการรับแรงทางกลได้ดีของยางธรรมชาติเอาไว้ โดยสามารถเกิดผลึกในขณะการได้รับแรงดึงเช่นเดียวกับกรณียางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปร สมบัติของยางธรรมชาติที่ถูกปรับปรุงด้วยกระบวนการอีพอกซิเดชันจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ ดีกรีของการเกิดอีพอกไซด์ ในทางการค้ายาง ENR มีอยู่ด้วยกัน 2 เกรด คือ ยาง ENR ที่เกิดอีพอกไซด์ 25 และ 50 %mol (ENR25 และ ENR50) [12-13]

การสังเคราะห์อย่างธรรมชาติอีพอกไซด์

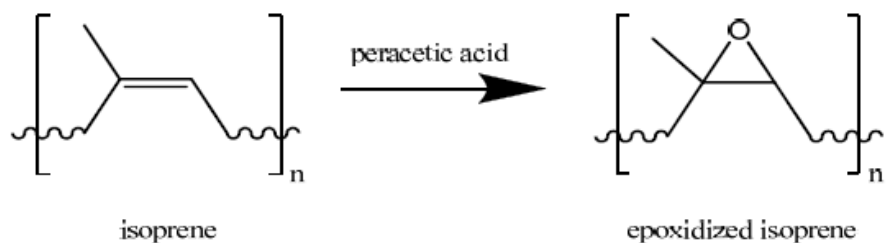
ยาง ENR ถูกผลิตจากการนำน้ำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับกรดเปอร์ฟอร์มิก (Performic acid) ดังรูปที่ 4 กรดเปอร์ฟอร์มิกถูกเตรียมโดยการทำปฏิกิริยาของกรดฟอร์มิกกับไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ ดังแสดงใน รูปที่ 5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยาง ENR เรียกว่า ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation reaction) เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดหมู่อีพอกไซด์ หรือวงแหวนออกซิเรน (Epoxide group หรือ Oxirane ring) ตรงบริเวณตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ ซึ่งในการทำปฏิกิริยาต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ควบคุมความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนของหมู่อีพอกไซด์ (Ring opening reaction) เพราะมีผลต่อสมบัติของยาง ENR หมู่อีพอกไซด์กระจายตัวอยู่บนสายโซ่ของยางธรรมชาติแบบสุ่ม [12,14] นอกจากการใช้กรดเปอร์ฟอร์มิกในการเตรียมยาง ENR ยังสามารถใช้กรดเปอร์แอซิด (Peracid) และกรดเปอร์ออกซี (Peroxy acid) รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยการใช้กรดเปอร์แอซิดิก (peracetic acid) เข้าทำปฏิกิริยา ณตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ ในการเตรียมยาง ENR ทางการค้าสามารถปรับเปลี่ยนชนิดกรีของการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันได้ เช่น หน่วยของไอโซพรีนบนสายโซ่ของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน 25, 50 และ 75 %mol จะถูกเรียกว่า ENR-25, ENR-50 และ ENR-75 ตามลำดับ รูปที่ 7 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน 50 %mol [13]



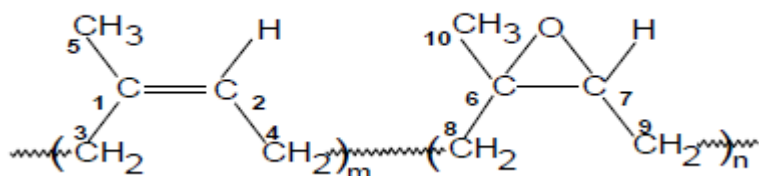
รูปที่ 4 ปฏิกริยาอ็อกซิเดชันที่ดัดแปรยางธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR ด้วยกรดเปอร์ฟอร์มิก [12]



รูปที่ 5 การเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ไซด์ [12]



รูปที่ 6 ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและกรดเปอร์แอซิดิก [13]



รูปที่ 7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน 50 %mol [13]

สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

การดัดแปรยางธรรมชาติให้กลายเป็นยาง ENR มีผลทำให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

- อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว [12-14]

ด็กิริอีพอกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นประมาณ 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 [14] ยาง ENR จึงถูกนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

ทั้งในส่วนของชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องสัมผัสกับอาหาร รองเท้า พื้นยาง ท่อทางด้านในจักรยาน กาว และวัสดุเชื่อมรอยต่อ (Sealant) [13] ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างสารเสริมแรงซิลิกา และเขม่าดำกับยาง ENR เป็นดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ยาง ENR ทั้งยาง ENR-25 และ ENR-50 สามารถเข้ากันได้กับสารเสริมแรงของยางทั้งซิลิกา และเขม่าดำ โดยการเกิดแรงกระทำระหว่างกันของหมู่อีพอกไซด์บนโมเลกุลของยาง ENR กับผิวของสารเสริมแรง ดังนั้นยาง ENR ที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกา และเขม่าดำจึงเหมาะสมที่จะนำมาทำดอกยาง [14]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการเติมเขม่าดำ [14]

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

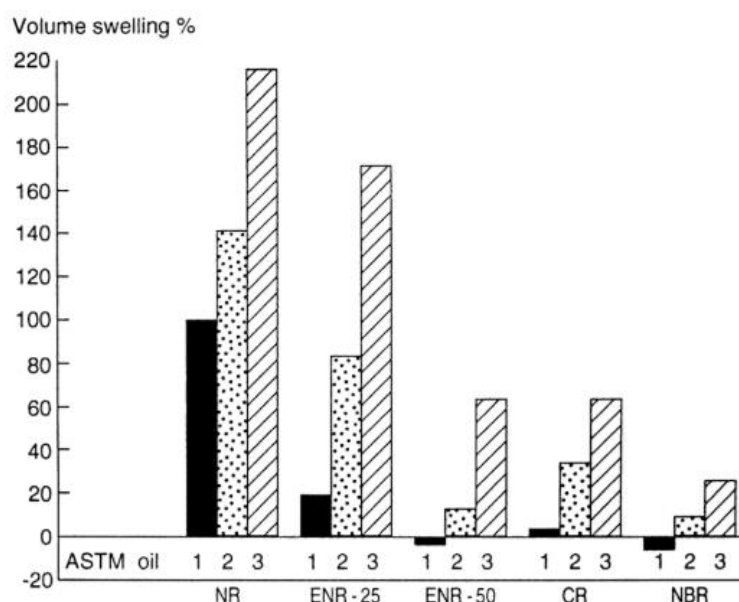
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยเขม่าดำและซิลิกา [14]

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,	7	7	23	19

- สมบัติทางเคมี [14]

จากรูปที่ 8 แสดงความทนต่อน้ำมันของยาง ENR-25 ENR-50 ยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน (Polychloroprene rubber) และยางไนไตรล์ (Nitrile rubber) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง จากกราฟแสดงให้เห็นว่า กระบวนการอีพอกซิเดชันช่วยปรับปรุง

ความทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายให้กับยางธรรมชาติ ยาง ENR-25 มีความทนน้ำมันดีกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นยาง ENR-25 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นยางที่ทำหน้าที่สเปรย์น้ำมัน ส่วนยาง ENR-50 มีความทนต่อน้ำมันสูงมาก และมากกว่ายางธรรมชาติ ENR-25 และยางพอลิคลอโรพรีน แต่มีค่าทนน้ำมันใกล้เคียงกับยางไนไตรล์ จึงสามารถนำยาง ENR-50 มาใช้งานแทนยางไนไตรล์ เช่น ซีลป้องกันน้ำมันรั่ว และท่อน้ำมัน เป็นต้น



รูปที่ 8 ความทนต่อน้ำมันของยาง ENR-25 ENR-50 ยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน และยางไนไตรล์ เมื่อถูกแช่ในน้ำมัน 1, 2 และ 3 ตามมาตรฐาน ASTM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเวลา 70 ชั่วโมง [14]

- ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส [14]

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

ตารางที่ 3 ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สของยางชนิดต่างๆ [14]

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

2.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Nampitch, T. และ Magaraphan, R. (2010) [15] ได้ทำการศึกษาผลของการนำยาง ENR มาฉายรังสีก่อนการนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิด ในอัตราส่วนพอลิแล็กติกแอซิด: ยาง ENR คือ 90:10 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะรังสีทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ในเฟสของยาง ENR เพิ่มขึ้น แต่มีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากรังสีมีผลทำให้ยาง ENR เกิดการขาดของสายโซ่ จึงเกิดการสลายตัวได้ง่าย

Zhang, C. และคณะ (2011) [16] ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือนด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (internal mixer) โดยได้มีการปรับเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อนและแรงเฉือน 0, 5 และ 10 นาที และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของยางธรรมชาติที่ 0, 1, 3, 5 และ 10 %โดยน้ำหนัก จากงานวิจัย พบว่า กรณิพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือน 10 นาที ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงการยึดตัว ณ จุดขาด และความเหนียวได้สูงที่สุด และมีการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะการให้ความร้อนและแรงเฉือนกับยางมีผลทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง และเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ขึ้นซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำกับหมู่เอสเทอร์ในพอลิแล็กติกแอซิด จึงเสริมการยึดเกาะระหว่างเฟส

Bitinis, N. และคณะ (2012) [17] ได้ทำการศึกษากลไกการเสียรูปของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยางธรรมชาติและนาโนเคลย์ (nanoclays) จากการศึกษาพบว่า การเติมยางธรรมชาติมีส่วนทำให้การแตกหักของพอลิแล็กติกแอซิด เปลี่ยนแปลงจากการแตกหักแบบเปราะไปเป็นการแตกหักแบบเหนียว ในขณะที่การเติมนาโนเคลย์ทำหน้าที่ขัดขวางการเกิดช่องว่าง (cavities) ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและเฟสของยาง โดยนาโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าว (craze nucleation sites) ณ ความเข้มข้นของนาโนเคลย์ 1 %โดยน้ำหนัก รอยร้าวถูกสร้างขึ้นและพัฒนากลายเป็นช่องว่างเล็กที่มี

ความเสถียรซึ่งสามารถทำให้การแผ่ขยายและจัดเรียงตัวไปตามแนวการดึงยึด เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Giita Silverajah, V.S. และคณะ (2012) [4] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันปาล์มที่ผ่านการอีพอกไซด์ (Epoxidized palm olein, EPO) ที่มีต่อสมบัติพอลิแลกติกแอซิด พบว่า การเติม EPO มีส่วนช่วยทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น และพบว่าพอลิแลกติกแอซิด ที่มีการเติม EPO มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่ากรณีที่ไม่เติม นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม EPO 1 %โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง แรงดัด และแรงกระแทก

Wahit, M.U. และคณะ (2105) [18] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิดโดยการเติมยาง ENR-50 ในปริมาณที่ต่างกัน จากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิด สามารถเกิดขึ้นเมื่อเติมยาง ENR-50 ปริมาณตั้งแต่ 20 %โดยน้ำหนักขึ้นไป ในขณะที่การเติมยาง ENR-50 มีผลทำให้ค่าความมอดุลัสและความทนต่อแรงดึง และแรงดัดลดลงทันทีที่มีการเติมยาง ENR-50

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด โดยการปรับเปลี่ยนเกรดของยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์แตกต่างกัน ทั้งหมด 2 เกรด คือ เกรด ENR25 และ ENR50 และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 30 %โดยน้ำหนัก ทำการผสมพอลิแลกติกแอซิดกับยาง ENR ด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด และทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดความดันสูง หลังจากนั้นนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมาทำการทดสอบสมบัติทางกล และทางความร้อน

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เม็ดพอลิแลกติกแอซิด เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC (USA) ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เม็ดพอลิแลกติกแอซิด เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC

3.1.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เกรด ENR25 และ ENR50 ซึ่งเป็นเกรดยางธรรมชาติถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน 25 และ 50 %mol ตามลำดับ ผลิตโดยบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 10

3.1.3 ไดควิมิวเพอร์ออกไซด์ ดังรูปที่ 11 ของบริษัท Sigma-Aldrich (USA) ใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยง



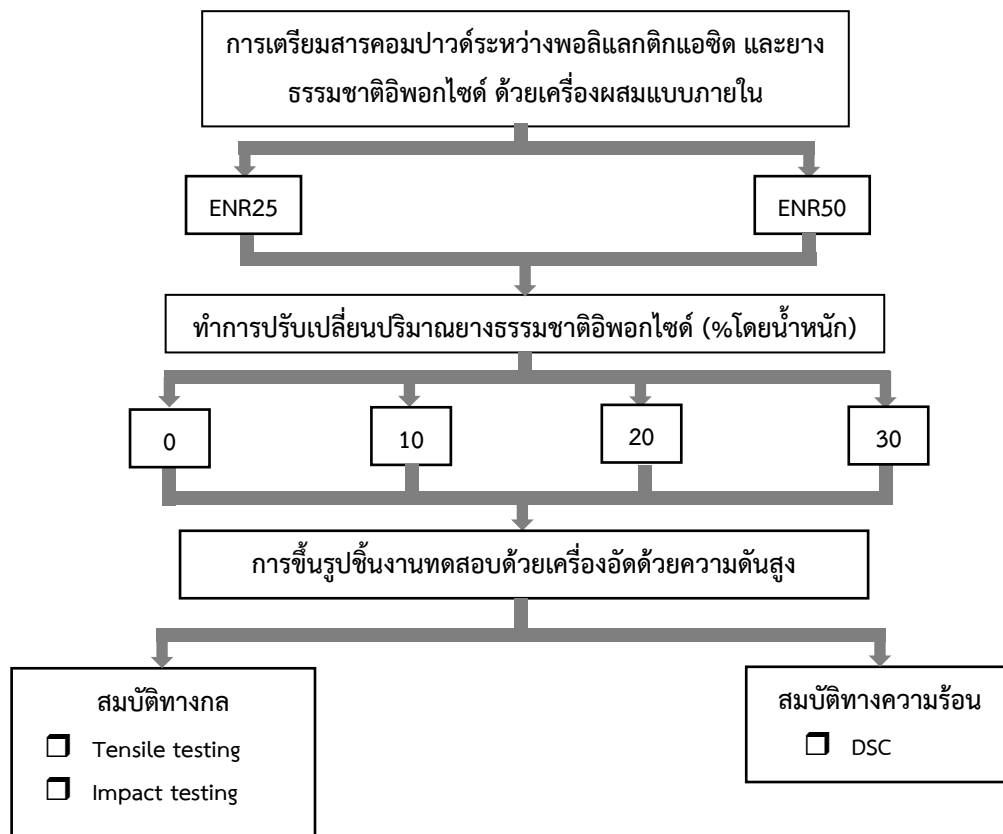
รูปที่ 10 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ของบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด



รูปที่ 11 สารเชื่อมโยงไดคิวมิวเพอร์ออกไซด์ ของบริษัท Sigma-Aldrich

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังรูปที่ 12 เริ่มต้นจากขั้นตอนการเตรียมสารคอมพาวด์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ด้วยเครื่องผสมระบบปิด โดยมีการปรับเปลี่ยนเกรดยาง ENR และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 30 %โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำสารคอมพาวด์มาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดความดันสูง และสุดท้ายนำชิ้นงานทดสอบมาทำการทดสอบแรงดึง และแรงกระแทก และทำการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์



รูปที่ 12 แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาหาปริมาณยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารคอมปาวด์ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic vulcanizate, TPV) ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยางธรรมชาติอิพอกไซด์

- นำยาง ENR เกรด ENR25 และ ENR50 มาทำการบดลดขนาดโมเลกุล (mastication) ด้วยการใช้เครื่องผสมแบบระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยทำบดผสมยางที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วของโรเตอร์ 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงนำยางที่มีความหนืดที่ลดลงมาทำการผสมกับพอลิแลกติกแอซิด
- ขั้นตอนการผสมพอลิแลกติกแอซิด ยาง ENR และสารเชื่อมโยงไดคิควิวเพอร์ออกไซด์เพื่อเตรียมสารคอมปาวด์ TPV เริ่มต้นจากนำเม็ดพอลิแลกติกแอซิดที่ผ่านการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มาบดผสมด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วของโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการเติมยาง ENR ที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุลแล้วลงไปผสม โดยมีการ

ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 30 %โดยน้ำหนัก และใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์เป็น 70 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ทำการผสมสารคอมปาวด์เป็นเวลา 10 นาที สุดท้ายทำการเติมสารเชื่อมโยงไดควิมิวเพอร์ออกไซด์ และทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 13 เครื่องผสมแบบระบบปิด รุ่น MX75-TQ ของบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด

3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

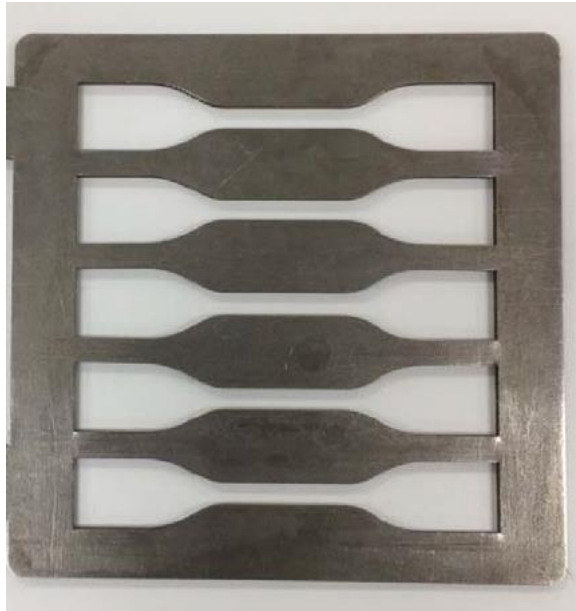
1. นำสารคอมปาวด์ TPV ระหว่างพอลิแลกติกและยาง ENR มาทำการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. จากนั้นทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความดัน โดยนำสารคอมปาวด์แต่ละสูตรมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T ของบริษัท Comotech ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 14 โดยใช้แม่พิมพ์ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง แบบ Type IV อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 638 และชิ้นงานทดสอบ

แรงกระแทก อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 256 เป็นดังรูปที่ 15 และ 16 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 14 เครื่องอัดด้วยความดัน รุ่น QC-601T ของบริษัท Comotech ประเทศไทย



รูปที่ 15 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง

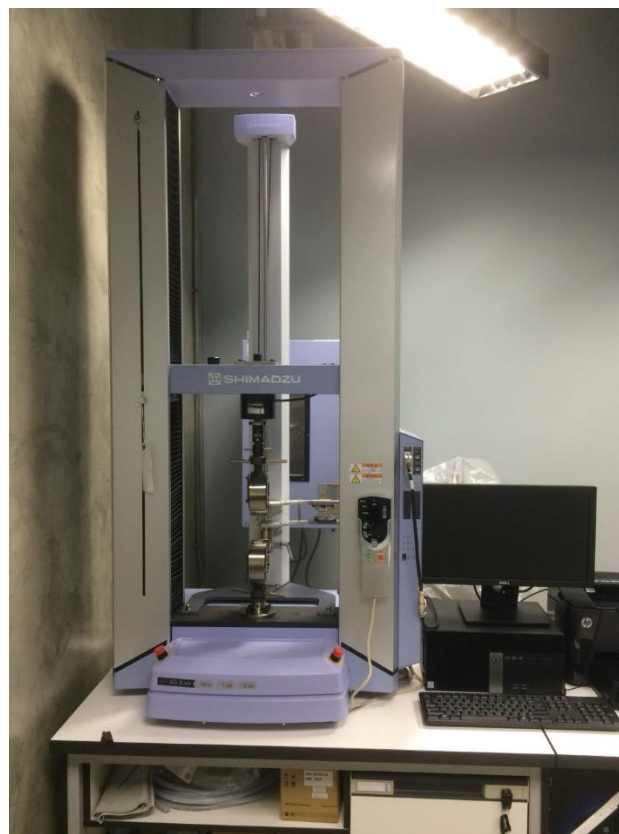


รูปที่ 16 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก

3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติ

- การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบความต้านทานแรงดึงทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638 ชิ้นงานทดสอบ แบบ Type IV มีลักษณะชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 17 มีความยาวเกจ 25 มิลลิเมตร และใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus ของบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 18 ความเร็วในการเคลื่อนของหัวจับชิ้นงาน 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง (Tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break)



รูปที่ 17 เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-x plus



รูปที่ 18 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงดิ่งของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน

- การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact testing)

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 เป็นการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่ผ่านการทำรอยบาก มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 19 มีขนาดชิ้นงาน 13 x 64 x 3 มิลลิเมตร³ ชิ้นงานทดสอบถูกทำรอยบากด้วยเครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2 ของบริษัท Gotech TESTING MACHINES INC. ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 20 ในการทดสอบแรงกระแทกทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P ดังรูปที่ 21 จำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละสูตร คือ 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบเป็นค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักต่อความหนาชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 19 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกของ TPV ของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 20 เครื่องทำรอยบาก แบบ V notch ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7016-A2



รูปที่ 21 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Zwick Roell รุ่น Hit5.5P

- การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนทำการตรวจวัดด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ โดยใช้เครื่อง DSC ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 22 สภาพที่ใช้ในการทดสอบ 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) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 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^0 คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว สำหรับกรณี PLA ที่มีปริมาณผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 97.2 J/g [19]

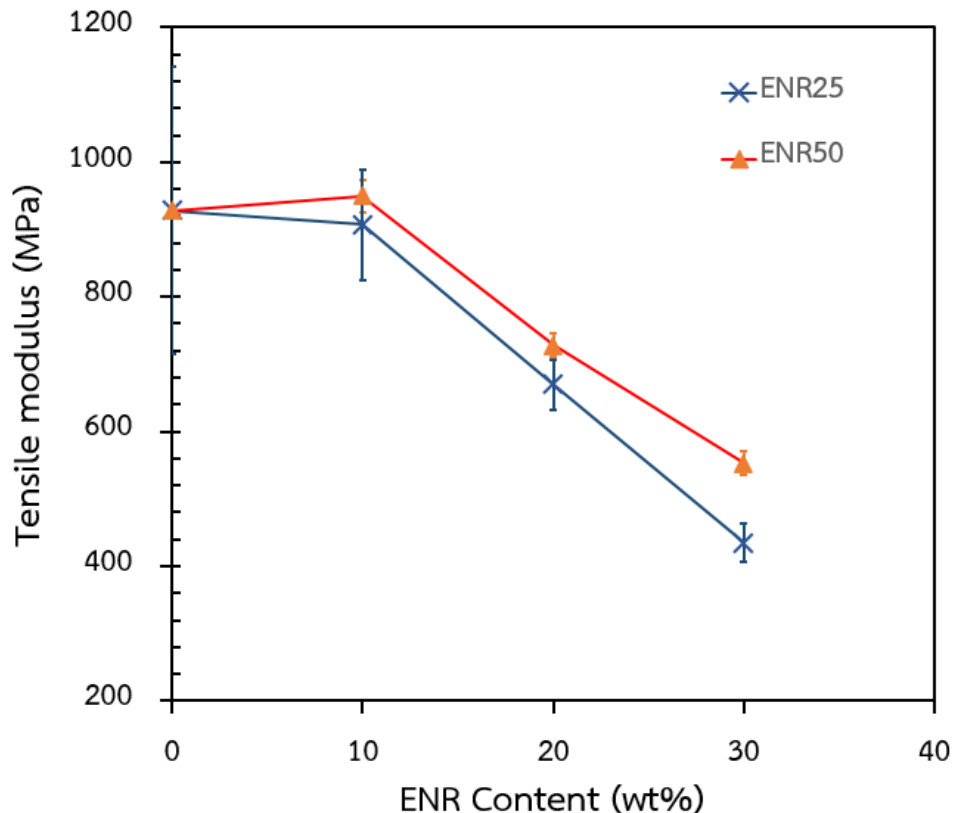
w_{PLA} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด



รูปที่ 22 เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

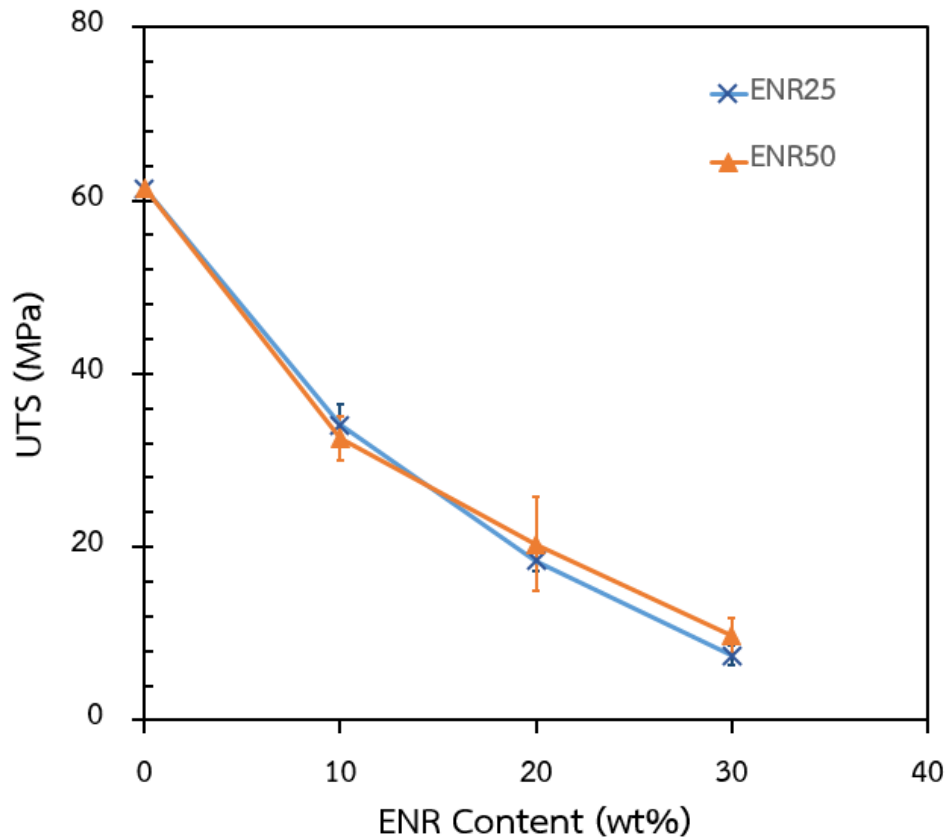
4.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง



รูปที่ 23 ผลของปริมาณการเติมยาง ENR และปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR

รูปที่ 23 แสดงผลของการเติมยาง ENR เกรด ENR25 และ ENR50 ที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิด โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมยาง ENR ตั้งแต่ 0 ถึง 30 % โดยน้ำหนัก จากผลการทดลอง พบว่า การเติมยาง ENR มีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง การลดลงของค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงเนื่องมาจากยาง ENR เป็นวัสดุที่มีความคงรูปน้อยกว่าพอลิแลกติกแอซิด สำหรับผลของเกรดยาง ENR พบว่า เมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยาง ENR มีมากขึ้น (จาก 25 เป็น 50 %mol) มีผลทำให้การลดลงของค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง จากกราฟค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของกรณีการเติมยาง ENR50 มีค่ามากกว่ากรณีการเติมยาง ENR25 โดยเห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อเติมยาง ENR เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะยาง

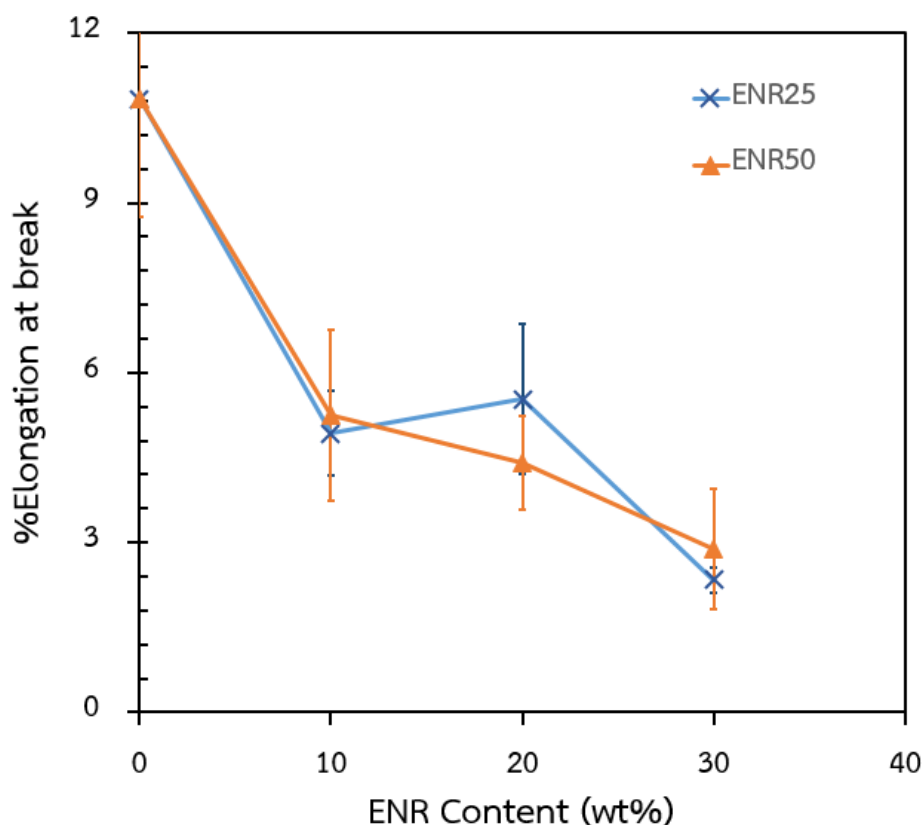
ENR ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์มากจะค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่ากรณียาง ENR ที่มีหมู่อีพอกไซด์น้อย จึงทำให้ยาง ENR50 มีสมบัติความคงรูปมากกว่ายาง ENR25 [20]



รูปที่ 24 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมยาง ENR25 หรือ ENR50 ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 24 แสดงผลของการเติมยาง ENR ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของพอลิแลกติกแอซิด จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณยาง ENR ถูกเติมปริมาณมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่ามอดุลัสแรงดึง ส่วนผลของเกรดยาง ENR พบว่า กราฟที่ได้มีลักษณะแตกต่างจากกรณีค่ามอดุลัสแรงดึง คือ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของยาง ENR25 และ ENR50 มีแนวโน้มค่าไม่แตกต่างกัน โดยปกติแล้วการเติมยาง ENR50 ลงในพอลิแลกติกแอซิดควรมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงกว่ากรณีการเติมยาง ENR25 เนื่องจากความมีขี้ข่วนของยาง ENR50 มีมากกว่ายาง ENR25 จึงทำให้เข้ากันได้กับพอลิแลกติกแอซิดมากกว่า โดยสามารถเกิดแรงกระทำทางเคมีระหว่างหมู่วงแหวนออกซิเรน (oxirane ring) ในยาง ENR และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของพอลิแลกติกแอซิด [21] แต่จากผลการทดลองนี้พบว่า การเติมยาง ENR ทั้ง 2 เกรด มีแนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

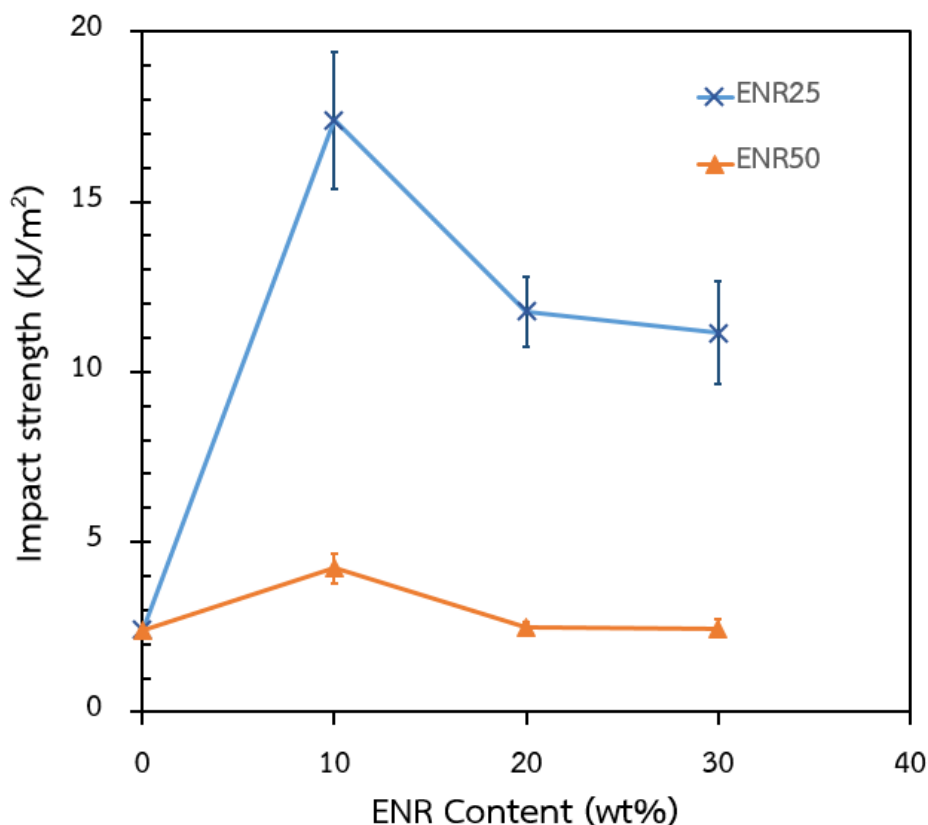
ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยาง ENR ส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง จากการเกิดผลึกในระหว่างการได้รับแรงดึงมีลดลง



รูปที่ 25 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและยาง ENR ที่มีการเติมยาง ENR25 หรือ ENR50 ปริมาณต่างๆ กัน

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR 25 และยาง ENR50 ปริมาณต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า การเติมยาง ENR มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง และผลของเกรดยาง ENR มีผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งแนวโน้มของกราฟคล้ายคลึงกับกรณีความต้านทานแรงดึงสูงสุด

4.2 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 26 ผลของการปรับปรุงแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ปริมาณต่างๆ กัน และปริมาณหมู่เอพอกไซด์ที่แตกต่างกัน

สำหรับผลของการปรับปรุงแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยการเติมยาง ENR มีผลเป็นแสดงในรูปที่ 26 จากผลการทดลองพบว่า การเติมยาง ENR มีส่วนช่วยในการปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิด โดยสามารถเห็นผลได้ชัดเจนในกรณียาง ENR25 โดยเฉพาะที่ปริมาณยาง ENR ที่ 10 %โดยน้ำหนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่ายาง ENR25 มีความยืดหยุ่นมากกว่ายาง ENR50 และปริมาณยาง ENR 10 %โดยน้ำหนักให้ผลค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ดีที่สุดนั้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะยาง ENR มีความหนืดค่อนข้างสูง เมื่อเติมยางปริมาณมากขึ้นมีโอกาสที่ยางจะรวมตัวกันและกระจายตัวไม่ดีมีมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแรง และช่วยกระจายแรงได้ลดลงเมื่อปริมาณยาง ENR มากกว่า 10 %โดยน้ำหนัก

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 4 สมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการเติมยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ 25 และ 50 %mol ณ ปริมาณยาง ENR ที่ 0 10 และ 30 %โดยน้ำหนัก

ปริมาณยาง ENR (wt%)	T _g (°C)		T _c (°C)		T _m (°C)		%Crystallinity	
	ENR25	ENR50	ENR25	ENR50	ENR25	ENR50	ENR25	ENR50
0	58.10	58.10	121.8	121.80	152.10	152.10	23.34	23.34
10	56.60	54.40	129.40	129.20	152.40	150.40	10.33	5.03
30	55.20	54.20	127.90	126.60	151.30	149.10	8.30	4.77

ผลของปริมาณยาง ENR และปริมาณของหมู่ไอพอกไซด์ในยาง ENR ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด มีรายละเอียดดัง**ตารางที่ 4** สำหรับผลของการเพิ่มปริมาณยาง ENR พบว่า ทั้งกรณียาง ENR25 และ ENR50 มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเฟสยางที่แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิแลกติกแอซิดช่วยให้สายโซ่พอลิแลกติกแอซิดอยู่ห่างกันมากขึ้น จึงสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ส่วนผลปริมาณยางที่มีต่อการเกิดผลึก พบว่า การเติมยาง ENR ทั้งกรณียาง ENR25 และ ENR50 มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) มีค่าสูงกว่ากรณีไม่เติมยาง ENR และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และเปอร์เซ็นต์ของผลึก พบว่า มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการเติมยาง ENR ปริมาณเพิ่มมากขึ้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การมีอยู่ของยาง ENR ไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด ส่วนผลของเกรดยาง ENR พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณหมู่ไอพอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ยางกระจายตัวในพอลิแลกติกแอซิดได้ดียิ่งขึ้น และพบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อปริมาณหมู่ไอพอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่วนอุณหภูมิการหลอมเหลว และเปอร์เซ็นต์ของผลึกมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่ไอพอกไซด์มากยิ่งทำให้กระจายตัวในพอลิแลกติกแอซิดดียิ่งขึ้น จึงอาจไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเกรดยาง ENR และปริมาณยาง ENR ที่มีต่อสมบัติทางกลและทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สำหรับสมบัติความต้านทานแรงดึง พบว่า การเติมยาง ENR มีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ส่วนผลของเกรดยาง พบว่า การเติมยาง ENR 25 มีสมบัติความต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่ากรณียาง ENR50 แต่แตกต่างกันไม่มากนัก
- สำหรับสมบัติความต้านทานแรงกระแทก พบว่า การเติมยาง ENR มีส่วนช่วยในการปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทก โดยปริมาณยาง 10 %โดยน้ำหนักปรับปรุงแรงกระแทกได้ดีที่สุด ส่วนผลของเกรดยาง พบว่า ยาง ENR25 มีส่วนช่วยในการปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกได้มากกว่ากรณียาง ENR50
- สมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมยาง ENR มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง แต่การมีอยู่ของยาง ENR ขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด ส่วนผลของเกรดยาง พบว่า ยาง ENR 50 มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการหลอมเหลว และเปอร์เซ็นต์ของผลึกมีแนวโน้มมีการลดลงมากกว่ากรณียาง ENR 25

เอกสารอ้างอิง

1. ไทยร่วมกับ 3 ชาติเอเชียจับมือลดขยะพลาสติกในมหาสมุทร สืบค้นข้อมูลจาก <https://www.bbc.com/thai/amp/international-40199329>
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Broz, M. E., VanderHart, D.L. and Washburn, N.R., 2003, "Structure and Mechanical Properties of Poly(D,L-lactic acid)/Poly(ϵ -caprolactone) Blends", **Biomaterials**, Vol. 24, pp. 4181-4190.
7. Ostafinska, A., Fortelny, I., Nevoralova, M., Hodan, J., Kredatusova, J. and Slouf, M., 2015, "Synergistic Effects in Mechanical Properties of PLA/PCL Blends with Optimized Composition, Processing, and Morphology", **RSC Advances**, Vol. 120, pp. 98971-98982.
8. Garlotta, D., 2001, "A Literature Review of Poly(Lactic Acid)", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 9, pp. 63-84.
9. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2554, "พอลิแลกติกแอซิด: พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้", **วิศวกรรมสารมก.**, ฉบับที่ 77, หน้า 99-110.
10. 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.
11. Gupta, B., Revagade, N. and Hilborn, J., 2007, "Poly(lactic acid) Fiber: An Overview" **Progress in Polymer Science**, Vol. 34, pp. 455-482.

12. De, S.K. and White, J.R., 2001, **Rubber Technologist's Handbook**, Shropshire, UK, Rapra Technology Limited.
13. 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.
14. Bhowmick, A.K. and Stephens, H., 2001, **Handbook of Elastomers**, New York, Marcel Dekker, Inc
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Kinasih, N.A., Fathurrohman, M.I. and Winarto, D.A., 2017, "Swelling Behaviour in n-pentane and Mechanical Properties of Epoxidized Natural Rubber with Different Epoxide Content", **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, Vol. 223.
21. Pongtanayut, K., Thongpin, C. and Santawitee, O., 2013, "The Effect of Rubber on Morphology, Thermal Properties and Mechanical Properties of PLA/NR and PLA/ENR Blends", **Energy Procedia**, Vol. 34, pp. 888-897.

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. Chaochanchaikul, K., 2019, "Improvement of Mechanical Properties and Water Absorption in Wheat Gluten by Epoxidized Natural Rubber", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 891, pp. 163-168.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Pulngern, T., Choocheepsakul, S., Padyenchuan, 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.ปิยะพงษ์ ปานแก้ว
(ภาษาอังกฤษ) Asst.Prof.Dr.Piyapong Pankaew

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02-8363016
E-mail : piyapong.p@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปร.ด. (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วท.บ.(ฟิสิกส์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Bioceramic
Biopolymers
Nanomaterials
Material Fabrication

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Pankaew, P. and White, P., 2020, "Crystallization of Calcium Deficient Hydroxyapatite Nanocrystals on Woven Silk Fibroin Fabric via Precipitation Process", **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 20, pp. 81-86.

2. Klumdoung, P., Hassadeeb, A. and Pankaew, P., 2019, "Effect of Nickel Ferrite Addition on Characteristics of Nanostructured Nickel Ferrite/Hydroxyapatite Ceramic", **Materials Today: Proceedings**, Vol. 17, pp. 1752–1760.
3. White, P., Chooprajong, S. and Pankaew, P., 2019, "Study of Sericin-Thunbergia Laurifolia Electrospun Fibre for Wound Healing Applications", **Key Engineering Materials**, Vol. 798, pp. 53-58.
4. Klumdoung, P. and Pankaew, P., 2017, "The Development of Electrospinning Apparatus to Fabricate Nanofiber for Future Material Applications", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 244-47.
5. Pankaew, P. and Klumdoung, P., 2015, "Structural and Magnetic Characterizations of Nano Sized Grain Zinc Ferrite/hydroxyapatite Ceramic Prepared by Solid State Reaction Route", **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 15, pp. 9281-86.
6. Klumdoung, P., Pukjaroon, S. and Pankaew, P., 2015, "Fabrication of 2 wt% NiFe_2O_4 /HAp Composite Ceramic for Future Heavy Metal Removal Applications", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 291-94.
7. Pankaew, P., Klumdoung, P. and Naemchanthara, K., 2015, "Processing of Elastic Silk Sericin/gelatin Composite Film for Future Cosmetic Applications", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 171-74.
8. Klumdoung, P. and Pankaew, P., 2015, "Preparation of 2 wt% ZnFe_2O_4 /HAp ceramic for Future Biomedical Applications", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 167-70.
9. Pankaew, P., Klumdoung, P. and Naemchanthara, K., 2015, "A Study of the Preparation of Silk Sericin/chitosan Composite Film for Future Wound Dressing Applications", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 179-82.
10. Klumdoung, P. and Pankaew, P., 2015, "Effect of Temperature on the Structural and Magnetic Properties of $\text{Co}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Ceramic Prepared from Solid State Reaction", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 38-41.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.วิไลวรรณ ลีณะกุล
(ภาษาอังกฤษ) Asst.Prof.Dr.Wilaiwan Leenakul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02-8363016
E-mail : wilaiwan.l@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.ด. (วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วศ.ม. (วิศวกรรมพลังงาน) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วท.บ. (วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Ceramic and Glass
Biomaterials

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Leenakul, W., Jetsada, R., and Pengpat, K., 2020, "Phase Formation Study of BaFe₁₂O₁₉ in Bioactive Glass by Modified Processing Technique" **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 20, pp. 222-228.
2. Kanthachan, J., Eitssayeam, S., Duangphet, S., Intatha, U., Leenakul, W. and Tunkasiri, T., 2019, "The Study of Synthesis Parameters of Synthesis Ni-Rich of LiNi_{0.75}Mn_{0.15}Co_{0.10}O₂

- Powder by Co-Precipitation Method”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 891, pp. 206-213.
3. Thurakitseree, T. and Leenakul, W., 2018, “Conductivity Modification of Carbon-based Nanocomposites”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 879, pp. 41-46.
 4. Tunkasin, T., Tontrakoon, J., Rujijanagul, G., Intatha, U., Pengpat, K., Sutjarittangtham, K., Leenakul, W. and Eitssayeam, S., 2018, “The Acoustic Impedance and Other Properties of (1-3) Piezoceramics Polymer Composite. **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 879, pp. 51-56.
 5. Kruea-In, C., Inthong, S. and Leenakul, W., 2018, “Effects of Rate-controlled Sintering on Phase Formation, Dielectric and Ferroelectric Properties of Cobalt Oxide Doped BNKT Ceramic”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 879, pp. 57-61.
 6. Intawin, P., Leenakul, W., Jantaratana, P., Eitssayeam, S., Rujijanagul, G. and Pengpat, K., 2017, “Synthesis, Structural and Electrical Properties of Granular BT-NZF Nanocrystals in Silicate Glass”, **Ceramics International**, Vol. 43, pp. 258-64.
 7. Kruea-In, C., Inthong, S., Boonchoo, T., Intawin, P. and Leenakul, W., 2017, “Fabrication and Characterization of BNLT-BHF Lead-free Ceramics”, **Ferroelectrics**, Vol. 511, pp. 114-18.
 8. Kruea-In, C., Inthong, S. and Leenakul, W., 2017, “Effect of NiO Nanoparticles on Physical and Mechanical Properties of BNKT Lead-free Ceramics”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 282-86.
 9. Kytae, T., Sutjarittangtham, K., Thurakitseree, T. and Leenakul, W., 2017, “Phase Transition and Electrical Properties of $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ Comparison of Different Preparation Techniques”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 287-90.
 10. Intawin, P., Leenakul, W., Yongsiri, P., Jantaratana, P., Eitssayeam, S., Rujijanagul, G. and Pengpat, K., 2016, “Fabrication and Characterization of $\text{BaTiO}_3\text{-Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-SiO}_2$ Multiferroic Glass Ceramics”, **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 16, pp. 12866-70.
 11. Boonchoo, T., Intawin, P. and Leenakul, W., 2016, “Effect of MnFe_2O_4 and the Heat Treatment Temperature on the Bioactive Glass Properties”, **Key Engineering Materials**, Vol. 690, pp. 137-42.
 12. Leenakul, W., Tunkasiri, T., Tongsir, N., Pengpat, K. and Ruangsuriya, J., 2016, “Effect of Sintering Temperature Variations on Fabrication of 45S5 Bioactive Glass-ceramics Using

- Rice Husk as a Source for Silica”, **Materials Science and Engineering C**, Vol. 61, pp. 695–704.
13. Kruea-In, C., Intawin, P., and Leenakul, W., 2015, “Preparation of Ferroelectric KNbO_3 Based Borate Glass System”, **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Vol. 15, pp. 9256–60.