

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเล็กทริกแอซิดด้วยยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิด  
น้ำหนักโมเลกุลต่ำ

นางสาวอภิษา เทพธวัช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

PROPERTY IMPROVEMENT OF POLY(LACTIC ACID) BY MALEATED  
NATURAL RUBBER-g-LOW MW POLY(LACTIC ACID)

Miss Apicha Thepthawat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology  
Department of Materials Science  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2012  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติของพอลิเล็กทริกแอซิดด้วย

ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิด

น้ำหนักโมเลกุลต่ำ

โดย นางสาวอภิษา เทพธวัช

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษา แสงวัฒนาโรจน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

อภิชาติ เทพรวัช : การปรับปรุงสมบัติพอลิแล็กติกแอซิดด้วยยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ. (PROPERTY IMPROVEMENT OF POLY(LACTIC ACID) BY MALEATED NATURAL RUBBER-g-LOW MOLECULAR WEIGHT POLY(LACTIC ACID) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.กาวิ ศรีภูถกิจ , 144 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ได้ปรับปรุงความเหนียวของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการผสมด้วยยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (โคพอลิเมอร์) เตรียมที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในระบบสารละลายโทลูอีน ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ 80 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติมาเลเอตปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความถี่ 1778 และ 1853  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบสมมาตรและอสมมาตรของหมู่คาร์บอนิลบนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ แต่ความถี่ช่วงการสั่นแบบอสมมาตรไม่ปรากฏในโคพอลิเมอร์ เนื่องจากปฏิกิริยาการกราฟต์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิแล็กติกแอซิดและวงมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ จากนั้นผสมพอลิแล็กติกแอซิดและโคพอลิเมอร์ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และขึ้นรูปด้วยการอัดแบบตามรูปร่างมาตรฐาน พบว่า ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลงจาก 59 องศาเซลเซียส เป็น 56.99 และ 56.54 องศาเซลเซียส โดยการเติมโคพอลิเมอร์ที่มีร้อยละ 40 ในพอลิเมอร์ผสม และมีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ตามลำดับ เนื่องจากยางธรรมชาติมาเลอิกในพอลิเมอร์ผสมทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีความสามารถในการเคลื่อนไหวยของสายโซ่เพิ่มขึ้น และค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการเคลื่อนไหวยของสายโซ่พอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งทำให้ความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุง ดังแสดงในลักษณะการแตกหักของพอลิเมอร์ผสม ค่าความทนแรงกระแทกและร้อยละการยืดของพอลิเมอร์ผสม

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....

KEYWORDS: PLA/ PLA/NATURAL RUBBER BLENDS/ MALEATED NATURAL RUBBER/ TOUGHENED PLA/ BIODEGRADABLE POLYMER

APICHA THEPTHAWAT: PROPERTY IMPROVEMENT OF POLY(LACTIC ACID) BY MALEATED NATURAL RUBBER-g-LOW MOLECULAR WEIGHT POLY(LACTIC ACID) ADVISOR: ASSOC. PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph. D., 144 pp.

In this research, the toughness properties of PLA were improved by blending with maleated natural rubber-g-low molecular weight PLA (MNR-g-PLA). MNR-g-PLA was prepared by grafting the maleated natural rubber (MNR) with low molecular weight PLA in toluene solution at temperature of 80 °C. In this study, two types of MNR10 and MNR20 having 10 % wt and 20 %wt maleate moiety based on NR, respectively, were employed. FTIR spectroscopy confirmed the structure of MNR as evidenced by observing the absorption peaks at 1778 cm<sup>-1</sup> and 1853 cm<sup>-1</sup> which corresponded to symmetric and asymmetric of MA carbonyl vibrations. These peaks disappeared from the spectra of MNR-g-PLA as a result of grafting reaction between PLA hydroxyl group and maleate anhydride group on NR, producing MNR-g-PLA. Then, blending of PLA with MNR-g-PLA at various contents using twin-screw extruder was carried-out and followed by compression molding to standard sample shapes. It was found that the glass transition temperature (T<sub>g</sub>) of PLA in the polymer blends, in all cases, decreased from 59 °C to 56.99 and 56.54 °C by the addition of 40 wt% of MNR-g-PLA synthesized from MNR10 and MNR20, respectively, indicating that PLA chain mobility tended to be flexible in the presence of MNR. In accordance, the degradation temperature (T<sub>d</sub>) decreased in a similar manner, arising from the increasing mobility of PLA phase in the blends. This led to an improvement in the ductibility of the blends as evidenced by SEM fracture image, impact strength value and percent elongation.

Department : Material Science..... Student's Signature .....

Field of study: Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's Signature.....

Academic Year: 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุคืบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้ คือ

1. รศ. ดร. กาวี ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และกรุณาในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านงานวิจัย
3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบคุณมารดา น้องสาว และเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุน ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 พอลิเล็กทริกแอซิด.....	4
2.2 ขงธรรมชาติ.....	10
2.3 การปรับปรุงให้พอลิเมอร์เหนียว.....	14
2.4 พอลิเมอร์ผสม.....	15
2.5 กระบวนการอัดรีดพลาสติก.....	18
2.6 กระบวนการอัดแบบ.....	24
2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี.....	25
2.7.1 เทคนิคฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	25

บทที่	หน้า	
2.7.2	เทคนิคนิวเคลียร์โปรตอนแมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี .....	32
2.8	การหาปริมาณกรดด้วยเทคนิคไตเตรต.....	37
2.9	สมบัติทางความร้อน.....	38
2.10	เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบเจล.....	43
2.11	สมบัติเชิงกล.....	43
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	52
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	56
3.1	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	56
3.2	วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	57
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	59
3.4	ขั้นตอนการวิจัย.....	61
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	72
4.1	วิเคราะห์อย่างธรรมชาติมาเลเดต.....	72
4.1.1	วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี.....	72
4.1.2	วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี.....	75
4.1.3	วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิคดีพีเพอเรนเชียล	



บทที่	หน้า	
	สแกนนิ่งแคลอริมิทรี.....	76
4.2	วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักรโม่เลกุลต่ำ	77
4.2.1	วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี.....	77
4.2.2	วิเคราะห์หาร้อยละการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	79
4.2.3	วิเคราะห์น้ำหนักรโม่เลกุลของพอลิเล็กทิกแอซิด และพอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักรโม่เลกุลต่ำด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแอนาไลเซอร์แบบเจล.....	80
4.2.4	วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....	81
4.2.4.1	วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิทรี.....	81
4.2.4.2	วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค เทอร์โมกราวิเมทรีแอนาไลซิส.....	81
4.3	วิเคราะห์พอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลเอต กราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักรโม่เลกุลต่ำ.....	83
4.3.1	วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....	83
4.3.1.1	วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิค ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี.....	83
4.3.1.2	วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค	

บทที่	หน้า	
	เทอร์โมกราวิเมตรีแอนาลิซิ	ส..... 84
4.3.2	วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา และความสามารถในการกระจายตัว ของอนุภาคยาง.....	86
4.4	ทดสอบพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์ พอลิเอทิลีนทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	89
4.4.1	ทดสอบความทนแรงดึง.....	89
4.4.2	ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด.....	92
5	สรุปผลการทดลอง.....	95
	รายการอ้างอิง.....	97
	ภาคผนวก.....	102
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	144

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเล็กทริกแอซิดที่มีโครงสร้างต่างกัน .....	7
ตารางที่ 2.2 สมบัติยางธรรมชาติ .....	13
ตารางที่ 2.3 ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด.....	28
ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเล็กทริกแอซิดเกรด 2003D.....	57
ตารางที่ 3.2 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	58
ตารางที่ 3.3 สมบัติของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์.....	59
ตารางที่ 3.4 สูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทริกแอซิด/ยางธรรมชาติ	
มาเลอิกกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	62
ตารางที่ 3.5 เวลาที่ใช้สำหรับการอัดแบบ.....	64
ตารางที่ 3.6 ภาวะการทดสอบด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	69
ตารางที่ 3.7 ภาวะการทดสอบความต้านแรงดึง.....	70
ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติมาเลอิต.....	77
ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทริก	
แอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอิกกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	84
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทริก	
แอซิด/ยางธรรมชาติมาเลอิกกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	85

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างที่จัดเรียงตัวต่างกันของเล็กทิกแอซิด.....	6
รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์พอลิเล็กทิกแอซิดแบบต่าง ๆ.....	6
รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พอลิเล็กทิกแอซิดแบบเปิดวง.....	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิดและ พอลิวิตินซัคซิเนต โดยที่เติม (a) เคลย์ และ (b) เคลย์ที่ดัดแปร.....	10
รูปที่ 2.5 โครงสร้างยางธรรมชาติ 1,4-polyisoprene.....	11
รูปที่ 2.6 การปรับปรุงยางธรรมชาติ.....	13
รูปที่ 2.7 กลไกการแตกหักของพอลิเมอร์แบบเปราะที่ปรับปรุงให้เหนียว.....	14
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดพลาสติก.....	19
รูปที่ 2.9 ลักษณะของสกรู.....	20
รูปที่ 2.10 กลไกการหลอมและผลึกน้ำพลาสติกออกสู่หัวตาย.....	21
รูปที่ 2.11 กลไกการหลอมของเม็ดพลาสติกในช่องเกลียวของสกรู.....	21
รูปที่ 2.12 ลักษณะการหมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดสกรูคู่.....	22
รูปที่ 2.13 ความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูที่หมุนคนละทิศทาง.....	23
รูปที่ 2.14 ความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน.....	23
รูปที่ 2.15 กระบวนการอัดแบบ.....	24
รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์...	25

รูปที่ 2.17 กระบวนการแมกเนติกเรโซแนนซ์.....	33
รูปที่ 2.18 แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี.....	34
รูปที่ 2.19 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม.....	35
รูปที่ 2.20 วิธีการไทเทรตกรด.....	37
รูปที่ 2.21 การดูดหรือคายความร้อนในเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	42
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงแบบฮิสเทอริซิสและถาวร.....	44
รูปที่ 2.23 การรับแรงดึงของวัสดุ.....	45
รูปที่ 2.24 พฤติกรรมของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเค้นและความเครียด.....	46
รูปที่ 2.25 ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์.....	48
รูปที่ 2.27 กราฟระหว่างแรงเค้นและความเครียด.....	49
รูปที่ 2.28 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก.....	50
รูปที่ 2.29 การทดสอบชิ้นงานแบบชาร์ปี.....	51
รูปที่ 2.30 การทดสอบชิ้นงานแบบไอซอด.....	51
รูปที่ 2.31 ลักษณะการแตกหักจากการกระแทก.....	52
รูปที่ 2.32 ปฏิกริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางธรรมชาติกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	53
รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน.....	57
รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	58

## หน้า

รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	58
รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์.....	58
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดรีดสกรูคู่.....	63
รูปที่ 3.6 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก.....	64
รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์สำหรับการอัดแบบ.....	65
รูปที่ 3.8 เครื่องอัดแบบ.....	65
รูปที่ 3.9 เครื่องฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปีเทอร์โมสแตติก ยี่ห้อ thermo scientific.....	66
รูปที่ 3.10 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer.....	66
รูปที่ 3.11 เครื่องโครมาโทกราฟีแอนาไลเซอร์ แบบเจลยี่ห้อ SHIMADZU.....	67
รูปที่ 3.12 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo.....	68
รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Joel.....	69
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 100K.....	70
รูปที่ 3.15 ชั้นทดสอบสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง.....	70
รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ยี่ห้อ GOTECH.....	71
รูปที่ 3.17 ชั้นทดสอบความทนแรงกระแทก.....	71
รูปที่ 4.1 ปฏิบัติการสังเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลอิดโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวริเริ่ม.....	73
รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติมาเลอิด.....	74

รูปที่ 4.3 ค่าเคมีคัลซิฟท์ของยางธรรมชาติมาเลเอต.....	75
รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตร้าของยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	78
รูปที่ 4.5 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	79
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดย น้ำหนัก ของยางธรรมชาติ .....	82
รูปที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด และยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำในสัดส่วน ต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) พอลิเล็กทิกแอซิด, (b) พอลิเล็กทิกแอซิด/ ยางธรรมชาติ, (c) พอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิก แอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (MA 10%wt), และ (d) พอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติ มาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (MA 10%wt) โดย 1, 2, 3 และ 4 แทนสัดส่วนของปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก.....	88
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดผสม.....	91
รูปที่ 4.10 ระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดผสม.....	92

รูปที่ 4.11 ค่าความทนแรงกระทำของพอลิเล็กทริกแอซิดและพอลิเล็กทริกแอซิดผสม.....	94
---	----



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้งานพลาสติกอย่างแพร่หลาย ทั้งบรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์การแพทย์ เครื่องเรือนต่าง ๆ อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น แต่พลาสติกเหล่านั้นส่วนมากผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี ซึ่งยากต่อการกำจัดและย่อยสลาย จึงก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ดังนั้นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงได้รับความสนใจ ตัวอย่างเช่น พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน พอลิแล็กติกแอซิด และ พอลิเอสเตอร์ เป็นต้น

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ยั่งยืนสำหรับทดแทนพลาสติกจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี และกำลังเป็นที่สนใจสำหรับพลาสติกชนิดพอลิเอสเตอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจาก พอลิแล็กติกแอซิดผลิตจากการหมักผลิตผลทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย เป็นต้น กรดแล็กติกที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์จากการหมักวัตถุดิบดังกล่าว จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการเกิด พอลิเมอร์แบบควบแน่น และกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบเปิดวง ซึ่งทั้ง 2 วิธีได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุล และการจัดเรียงโครงสร้างที่ต่างกัน พอลิแล็กติกแอซิดนั้นมีสมบัติเชิงกลและทางกายภาพที่ดี ผลิตภัณฑ์ที่สลายตัวออกมาไม่เป็นพิษ สามารถเข้ากันได้และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่พอลิแล็กติกแอซิดมีข้อเสียคือ เปราะ ยืดตัวต่ำ และมีความเป็นผลึกต่ำ ดังนั้น การปรับปรุงข้อด้อยเหล่านี้ของพอลิแล็กติกแอซิดมี 3 วิธีด้วยกัน คือ การเติมสารเสริมสภาพพลาสติก กระบวนการเกิดพอลิเมอร์ร่วม และการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ซึ่งการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเป็นวิธีที่ง่าย แต่มักจะประสบปัญหาสมบัติทนแรงดึงลดลง โดยหลักการแล้วการปรับปรุงความเปราะของพอลิแล็กติกแอซิดก็คือการทำให้พอลิเมอร์สามารถยืดตัวได้มากขึ้น โดยการผสมกับพอลิเมอร์ที่สามารถยืดตัวได้ดี เช่น พอลิเอสเตอร์ เป็นต้น พอลิเอสเตอร์ยังทำหน้าที่ดูดซับและกระจายพลังงาน เพื่อยับยั้งการแตกหัก และถ้าพอลิเอสเตอร์มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสที่ติระหว่างพอลิเอสเตอร์กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ก็ยิ่งช่วยเพิ่มความคงทนต่อแรงกระแทก พอลิเอสเตอร์เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถทดแทนได้ มีสมบัติคือ เหนียว ยืดหยุ่น สามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ และราคาถูก หลายงานวิจัยทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเอสเตอร์

โดยตรงในหลากหลายวิธี ได้พอลิเล็กทริกแอซิดที่ยึดตัวเพิ่มขึ้นในปริมาณของยางธรรมชาติที่เหมาะสม แต่ ยางธรรมชาติก็เข้ากันไม่ได้กับพอลิเล็กทริกแอซิด เนื่องจากยางธรรมชาติมีเอนโทรปีและเอนทาลปีต่างกับพอลิเมอร์อื่น ๆ ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค ดังนั้นมอดูลัสของยังและความทนทานต่อแรงดึงจึงลดลง เพื่อให้ยางธรรมชาติเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกอื่น ๆ จึงต้องมีการดัดแปร ยางธรรมชาติโดยการเติมหมู่ฟังก์ชันเข้าไปใน โมเลกุลของยาง เช่น หมู่มาเลอิก แอนไฮไดรด์ หรือ หมู่อีพอกไซด์ ซึ่งปริมาณการเติมหมู่ฟังก์ชันนั้นมีจำกัด มิเช่นนั้นปริมาณการเติมหมู่ฟังก์ชันที่มากเกินไปจะทำให้ยางธรรมชาติดัดแปรไม่เกิดประสิทธิผล ดังเช่นงานวิจัยการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบนยางธรรมชาติ และมีงานวิจัยหลายชิ้นที่พยายามปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยใช้ยางธรรมชาติดัดแปรที่มีหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ เกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์มีซัวอื่น ๆ ทำให้อนุภาคของยางกระจายตัวได้ดีขึ้นในพอลิเมอร์เมทริกซ์เหล่านั้น เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลตผสมยางธรรมชาติมาเลอเดต และพอลิคาโพลีเอทิลีนผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ พอลิเมอร์ผสมกับยางธรรมชาติดัดแปรเหล่านี้สามารถดูดซับพลังงานสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การกราฟต์กับพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมเข้าด้วยกันก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยม โดยยางธรรมชาติดัดแปร ทำปฏิกิริยาเชื่อมต่อกับพอลิเมอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสม ได้เป็นยางธรรมชาติกราฟต์ เช่น พอลิคาโพลีเอทิลีนกราฟต์ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ซึ่งการกราฟต์ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับยางธรรมชาติดัดแปร ทำให้มอดูลัสของยังและความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าการผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์กับยางธรรมชาติดัดแปรโดยตรง หรือ การเติมยางกราฟต์พอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมเข้าด้วยกันเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ในระบบพอลิเมอร์ผสม แรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์และอนุภาคของยางจะเพิ่มขึ้นและการยึดตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์จะเพิ่มขึ้น เช่น การใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิโพลีเอทิลีน อีลาสโตเมอร์กราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิดเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ระหว่างการผสมพอลิเล็กทริกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติก พอลิโพลีเอทิลีน อีลาสโตเมอร์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมยางธรรมชาติมาเลอเดตในสัดส่วนต่าง ๆ หลังจากนั้นทำการกราฟต์ยางธรรมชาติมาเลอเดตกับพอลิเล็กทริกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในระบบตัวทำละลายโทลูอีน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อการกราฟต์ยางธรรมชาติมาเลอเดตกับพอลิเล็กทริกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และผสมยางธรรมชาติดัดแปรดังกล่าวกับพอลิเล็กทริกแอซิดในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ซึ่ง

ยางธรรมชาติมาเลเอด กราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีสภาพเข้ากันได้ดีขึ้นกับพอลิเล็กทิกแอซิด โดยอาศัยส่วนของพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่อยู่ในยางธรรมชาติ ซึ่งคาดว่า พอลิเล็กทิกแอซิดมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

##### 2.1.1 บทนำ

ในปัจจุบัน มีการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียมประมาณ 140 ล้านตันต่อปี ทำให้ปัญหาที่ตามมา คือ การกำจัดขยะพลาสติกเหล่านั้น เนื่องจากพลาสติกจากปิโตรเลียมสามารถทนต่อการทำลายของจุลินทรีย์ และจุลินทรีย์มีวงจรชีวิตที่สั้น ทำให้โครงสร้างของพลาสติกไม่ถูกทำลาย ดังนั้น พลาสติกชีวภาพจึงมีบทบาทสำคัญที่จะนำมาใช้แทนพลาสติกจากปิโตรเลียม เนื่องจากพลาสติกชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [1]

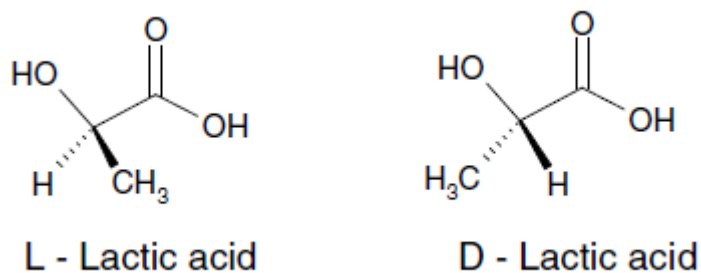
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นการแก้ปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียม พอลิแล็กติกแอซิด เป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่งที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมอนอเมอร์ตั้งต้นสามารถผลิตได้จากการหมักผลิตผลทางการเกษตร จำพวกที่มีคาร์โบไฮเดรต ด้วยแบคทีเรีย ได้แล็กติกแอซิดที่มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวต่าง ๆ กัน [1]

การผลิตแล็กโทมอนอเมอร์ และพัฒนาเป็นพอลิแล็กติกแอซิดเริ่มในปี 1893 โดย Bischoff และ Walden และถูกพัฒนาต่อมาเรื่อย ๆ ซึ่งการใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิดส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับทางการแพทย์ และบรรจุภัณฑ์ โดยพอลิแล็กติกแอซิดมีจุดเด่น คือ (1) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลิตได้จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งทำให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ รีไซเคิลได้ และผลิตภัณฑ์ที่สลายตัวออกมาไม่เป็นพิษ หรือสารก่อมะเร็งที่จะส่งผลร้ายต่อเนื้อเยื่อ (2) สามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่สลายตัวออกมาไม่เป็นพิษ หรือสารก่อมะเร็งที่จะส่งผลร้ายต่อเนื้อเยื่อ (3) สามารถเข้าสู่กระบวนการผลิตได้หลายวิธี เหมือนพอลิเมอร์ทางการค้าทั่วไป และทนต่อความร้อนมากกว่าพอลิเมอร์ทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ และ (4) ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าพลาสติกจากปิโตรเลียม แต่พอลิแล็กติกแอซิดยังมีข้อจำกัดมากมาย เช่น (1) มีความเหนียว (toughness) ที่ต่ำ หรือเป็นพอลิเมอร์ที่เปราะ แม้ว่าจะมีความทนแรงดึง (tensile strength) และความ

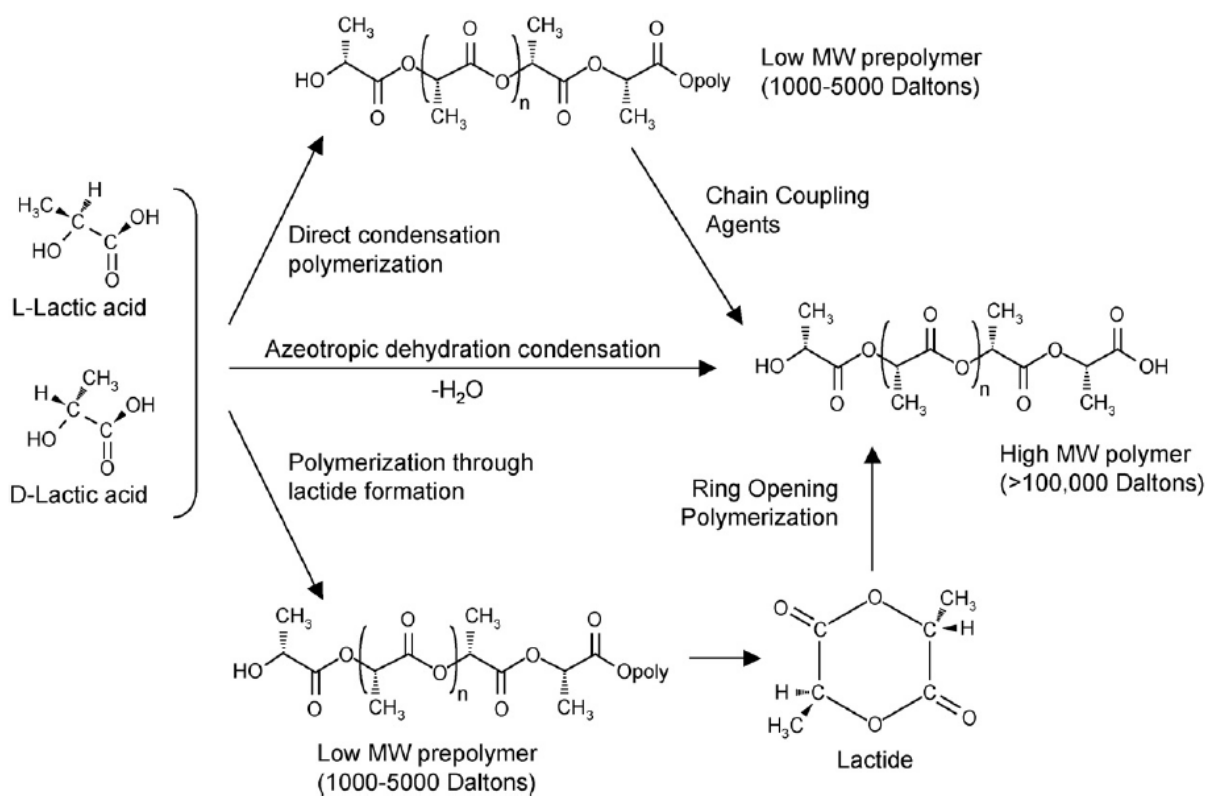
ต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (elastic modulus) ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate)) (2) มีอัตราการสลายตัวช้า ซึ่งขึ้นอยู่กับความเป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล อัตราการแพร่ผ่านของน้ำสู่พอลิเมอร์ และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมี (3) ไม่ชอบน้ำ ทำให้มีการยึดเกาะของเซลล์ที่ต่ำ และ (4) ไม่มีหมู่ข้างเคียงที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดความท้าทายในการปรับปรุงพอลิเล็กติกแอซิดที่ผิว หรือกลุ่มพอลิเมอร์ โดยการตัดแปรพอลิเล็กติกแอซิดแบบเป็นกลุ่ม จะมุ่งเน้นที่การปรับปรุงความเหนียว และอัตราการสลายตัว และการตัดแปรที่พื้นผิวของพอลิเล็กติกแอซิด จะมุ่งเน้นที่การควบคุม ความชอบน้ำ ความเหนียว และการเหนียวทำให้เกิดหมู่ว่องไว การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเล็กติกแอซิดมีความจำเป็นต่อการนำไปใช้งานหลายอย่าง และการปรับปรุงความชอบน้ำและการเหนียวทำให้เกิดหมู่ว่องไวของพอลิเล็กติกแอซิดนั้น จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานทางการแพทย์ [2] ดังนั้น วิธีการสังเคราะห์สมบัติ และการปรับปรุงพอลิเล็กติกแอซิด มีความสำคัญในการศึกษาต่อไป

### 2.1.2 โครงสร้างและสมบัติ

แล็กติกแอซิด (Lactic acid (2-hydroxy propanoic acid)) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์พอลิเล็กติกแอซิด ที่ได้จากการหมักผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจำพวก ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ด้วยแบคทีเรีย โดยที่แล็กติกแอซิดมีการจัดเรียงตัว 2 แบบ คือ L-Lactic acid และ D-Lactic acid ดังรูปที่ 2.1 และการเตรียมพอลิเล็กติกแอซิดสามารถเตรียมได้ 3 วิธี คือ (1) การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) (2) การควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิกดีไฮเดรทีฟ (Azeotropic dehydrative condensation) และ (3) การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวง ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งวิธีสังเคราะห์พอลิเล็กติกแอซิดที่ต่างกัน ทำให้ได้คุณสมบัติของพอลิเล็กติกแอซิดที่ต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับหมู่เมทิลบนอะตอมคาร์บอนที่ตำแหน่งอัลฟา ดังตารางที่ 2.1 [3-4]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างที่จัดเรียงตัวต่างกันของแล็กติกแอซิด [4]



รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดแบบต่าง ๆ [4]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีโครงสร้างต่างกัน [5]

สมบัติ	PLLA	PDLA	PDLLA
ความเป็นผลึก	กึ่งผลึก		อสัณฐาน
อุณหภูมิหลอมเหลว (T <sub>m</sub> )	160 -180 °C		-
อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T <sub>g</sub> )	55 – 65 °C		-
ความทนแรงดึง	สูง		ต่ำ
ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	สูง		-
ระยะยืด ณ จุดขาด	ต่ำ		สูง

### 2.1.3 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

#### 2.1.3.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization)

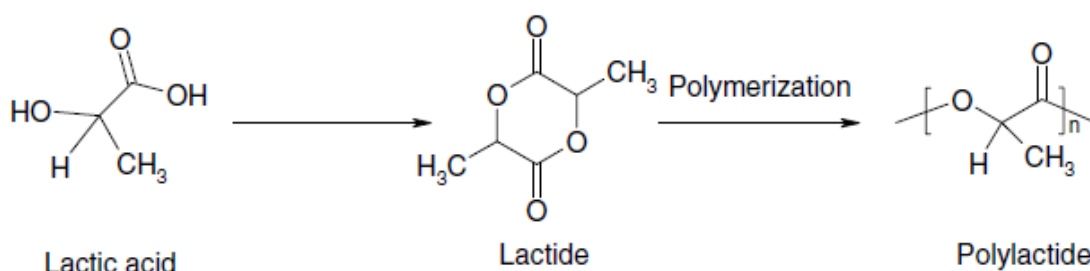
การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น โดยตรงนั้น เป็นวิธีพอลิเมอร์ไรซ์แล็กติกแอซิด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับลดความดัน ซึ่งวิธีนี้น้ำที่เกิดขึ้นจะแยกออกจากกระบวนการยาก ทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และไม่สามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีได้ นอกจากนี้ สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดที่ได้ยังด้อยอีกด้วย [5-6]

#### 2.1.3.2 การควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิกไฮเดรทีฟ (Azeotropic dehydrative condensation)

การควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิกไฮเดรทีฟ เป็นวิธีที่สังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งสามารถแก้ปัญหการกำจัดน้ำได้ [5-6]

### 2.1.3.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวง (Ring opening polymerization)

การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวง เป็นวิธีที่สามารถควบคุมโครงสร้างทางเคมีได้ ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง โดยเตรียมเม็ดพลาสติกด้วยการแคร์กพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วยความร้อน และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [5-7] ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์พอลิเล็กทิกแอซิดแบบเปิดวง [5]

### 2.1.4 การดัดแปรพอลิเล็กทิกแอซิด (Poly(lactic acid) Modification)

การดัดแปรพอลิเล็กทิกแอซิดมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติ และลดราคาการผลิต ซึ่งมี 3 วิธี คือ (1) การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม (2) การเติมสารเติมแต่ง และ (3) การผสม โดยวิธีเหล่านี้จะช่วยเพิ่มระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเล็กทิกแอซิด แต่ค่าความทนแรงดึง และความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเล็กทิกแอซิดจะลดลง [3] และพอลิเล็กทิกแอซิดที่ดัดแปรแล้ว ควรสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

#### 2.1.4.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม (Copolymerization)

การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันของเล็กทิกแอซิด หรือ แล็กไทด์กับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น (เช่น โพรตีน แป้ง คาร์โบเล็ก โดน และพอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น) ช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง ความเหนียว ความชอบน้ำ และควบคุมการสลายตัวของพอลิเล็กทิกแอซิด



พอลิเมอร์ร่วมของพอลิเล็กทิกแอซิดสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแอนไอออนิก แคทไอออนิก และแบบเปิดวงโดยใส่มอนอเมอร์ร่วมลงไป เป็นต้น

การกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดอื่นกับพอลิเล็กทิกแอซิดก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อเพิ่มสภาพเข้ากันได้ระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น โดยสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟต์ดีกว่าการผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นโดยตรง เช่น การกราฟต์แป้งลงบนพอลิเล็กทิกแอซิด เป็นต้น [8-9]

#### 2.1.4.2 การเติมสารเติมแต่ง (Additives)

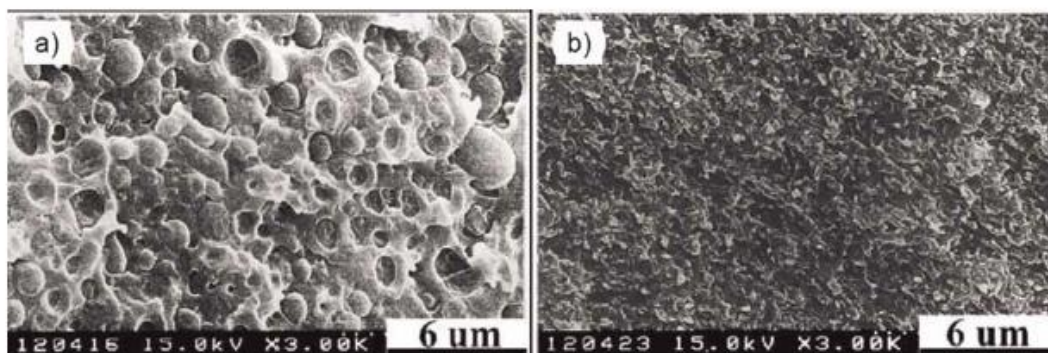
การเติมสารเติมแต่งในพอลิเมอร์มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงสมบัติลักษณะทางกายภาพ และคงสภาพพอลิเมอร์ให้นานขึ้น เช่น สารหน่วงไฟ สารปรับปรุงความทนแรงกระแทก สารเพิ่มความนิ่ม เป็นต้น [8-9]

การเติมพลาสติกไซเซอร์ลงในพอลิเล็กทิกแอซิดไม่ได้ช่วยเรื่องกระบวนการผลิตเท่านั้น แต่ความยืดหยุ่นของพอลิเล็กทิกแอซิดเพิ่มขึ้น และค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเล็กทิกแอซิดต่ำลงด้วย ซึ่งหมายความว่า พลาสติกไซเซอร์และพอลิเล็กทิกแอซิดสามารถเข้ากันได้ [9-10]

#### 2.1.4.3 การผสม (Blending)

การผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความเหนียวของพอลิเล็กทิกแอซิด และลดราคาต้นทุนของวัสดุ พอลิเมอร์ที่นิยมผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิด ได้แก่ อีลาสโตเมอร์ แป้ง พอลิเอทิลีน ไกลคอล ไตรอะซิติก และไตรบิวทิลซีเตรต และพอลิไฮดรอกซิลแอซิด เป็นต้น [8-9] แต่การผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นต่างกับการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงในพอลิเล็กทิกแอซิด ในกรณีที่พอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันไม่ได้ จะทำให้สมบัติของพอลิเล็กทิกแอซิดต่ำลง ดังนั้น การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม

แบบบล็อก (Block copolymerization) จึงมีบทบาทสำคัญในการผสม เพื่อช่วยเพิ่มสภาพเข้ากันได้กับพอลิเล็กทริกแอซิด และปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น [9-10] เช่น การปรับปรุงพื้นผิวของเคลย์ (clay) ให้มีสภาพเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทริกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมากขึ้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทริกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยที่เติม (a) เคลย์ และ (b) เคลย์ที่ดัดแปร [10]

## 2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

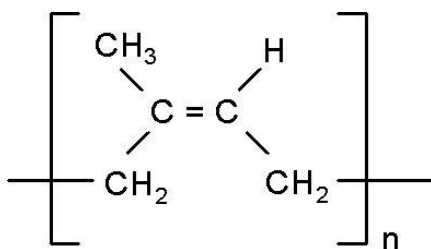
### 2.2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea brasiliensis*) ซึ่งสามารถผลิตน้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางอยู่ประมาณ 30% น้ำยางสด (fresh/field latex) มีลักษณะเป็นของเหลวคอลลอยด์สีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม โดยน้ำยางสดประมาณ 12% ของผลผลิตน้ำยางสดที่ได้ทั้งหมดถูกนำเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำยางข้น (concentrated or high ammonia latex) ซึ่งจะถูกปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นน้ำยางความเร็วสูง จนได้น้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางอยู่ประมาณ 60% และรักษาสภาพน้ำยางไว้โดยการเติมสารละลายแอมโมเนีย แล้วน้ำยางสดที่เหลือจะถูกนำไปผลิตเป็นยางแท่ง

ในยางธรรมชาติมีส่วนที่ไม่ใช่ยางอยู่หลากหลายชนิด จำแนกออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ โปรตีน และกรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และไอออนของโลหะ [11-12]

### 2.2.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์ที่มาจากแหล่งกำเนิดที่สามารถทดแทนได้ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็น 1,4-polyisoprene ดังรูปที่ 2.5 โดยมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง [7] ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงจัดเป็นพอลิเมอร์ไม่อิ่มตัว ที่แสดงลักษณะของความเหนียว ความยืดหยุ่น และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ [12-13]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างยางธรรมชาติ 1,4-polyisoprene [13]

### 2.2.3 สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีสมบัติโดดเด่นหลายประการ แต่ก็ยังมีข้อด้อยหลายประการที่เป็นข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น สีที่เข้มของยางธรรมชาติทำให้ไม่เหมาะที่จะทำผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อน และโปรตีนที่ทำให้เกิดการแพ้ได้

สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ ได้แก่

#### 1) ความยืดหยุ่น (elasticity)

ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อได้รับแรงและปล่อยแรงออก สามารถกลับคืนสู่รูปร่างได้อย่างรวดเร็ว

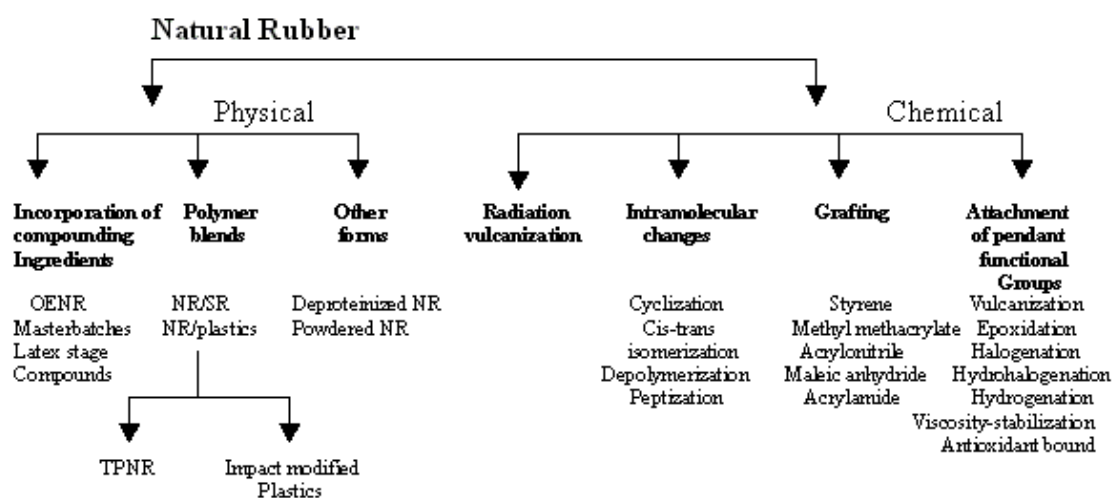
- 2) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)  
ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูง และสามารถเกิดการตกลึกได้เมื่อรับแรงดึง
- 3) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength)  
ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูง เนื่องจากจากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึงนั่นเอง ทำให้ช่วยลดขบวนการฉีกขาดที่เกิดขึ้น
- 4) การกระด้างกระดอง (rebound resilience)  
ยางธรรมชาติมีการกระด้างกระดองที่สูง เนื่องจากมีการสะสมความร้อนและสูญเสียพลังงานที่ต่ำ
- 5) ความทนทานต่อการขัดถู (abrasion resistance)  
ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการขัดถูที่ดี
- 6) ความเหนียวติดกัน (tack)  
ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการคงรูปมีความเหนียวติดกันที่สูง และสามารถยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ และสิ่งทอ เป็นต้น
- 7) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation)  
ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก
- 8) ความทนทานต่อสารเคมี (chemical resistance)  
ยางธรรมชาติไม่สามารถทนทานต่อสารเคมีที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ เนื่องจากโครงสร้างเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้งได้
- 9) สมบัติการเสื่อมสภาพ (aging property)  
ยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน โอโซน และแสงแดด ดังนั้น เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดอายุการใช้งาน ควรเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradant) หรือสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant)
- 10) ความแปรปรวนของยางธรรมชาติ  
สมบัติของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและทางชีวภาพ ซึ่งส่งผลให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่สม่ำเสมอในน้ำยาง [11-13]

ตารางที่ 2.2 สมบัติยางธรรมชาติ [13-14]

ความถ่วงจำเพาะ	0.92
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( $M_w$ )	1 – 2.5 ล้าน
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	0.00062 /°C
อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน	-75 °C

### 2.2.4 การดัดแปรยางธรรมชาติ (Natural rubber modification)

การดัดแปรยางธรรมชาติมี 2 แบบ คือ ทางกายภาพ และทางเคมี ซึ่งสามารถจำแนกได้  
 ดังรูปที่ 2.6 [8]



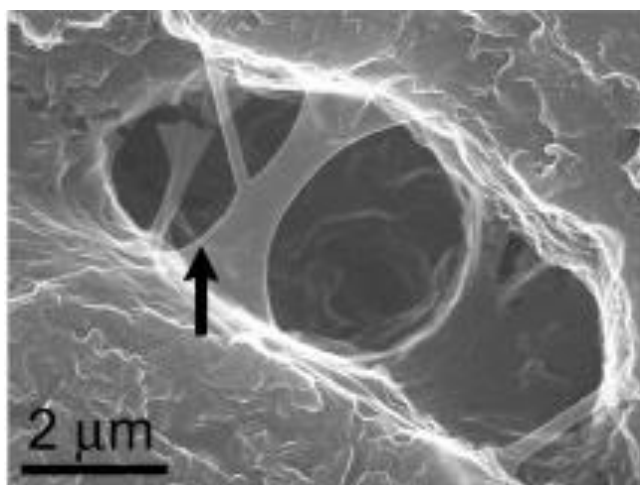
รูปที่ 2.6 การปรับปรุงยางธรรมชาติ [13]

### 2.3 การตัดแปรให้พอลิเมอร์เหนียว (Toughening of polymer)

พอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายแก้ว จะมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน ดังนั้น ปรับปรุงโดยการเติมอนุภาคในวัฏภาคที่สองที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง ทำให้พอลิเมอร์หลักถูกปรับปรุงสมบัติเชิงกล มี 2 วิธีในการปรับปรุงพอลิเมอร์ให้เหนียว คือ 1) ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสภาพเข้ากันไม่ได้และมีลักษณะคล้ายยาง และ 2) ผสมกับพอลิเมอร์ร่วม ซึ่งช่วยให้มีการยึดติดระหว่างพื้นผิวดีขึ้น

การเติมอนุภาคยางในพอลิเมอร์แบบเปราะ ทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก คือ เกิดรอยขาวขุ่นรอบ ๆ อนุภาคยาง และเกิดคอขวด และทำให้มีระยะยืดเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสัดส่วนของอนุภาคยางมากเกินไป จะทำให้อนุภาคยางในพอลิเมอร์หลักอยู่ใกล้กัน และเกิดการรวมตัวกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงพอลิเมอร์ลดลง และระยะยืดลดลง [15]

ลักษณะการแตกหักของพอลิเมอร์แบบเปราะที่ปรับปรุงให้เหนียว เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงเค้น จะดูดซับพลังงานเข้าไปทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ ทำให้เกิดรอยสีขาวขุ่น และเกิดรูที่อนุภาคของยาง และเมื่ออนุภาคของยางปลดปล่อยพลังงานออกมา จะเกิดช่องว่างกว้างขึ้น ดังรูปที่ 2.7 แต่อย่างไรก็ตาม อนุภาคของยางก็ส่งผลต่อความทนแรงกระแทก [16]



รูปที่ 2.7 กลไกการแตกหักของพอลิเมอร์แบบเปราะที่ปรับปรุงให้เหนียว [16]

## 2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer mixtures)

พอลิเมอร์ผสมเกิดจากการผสมพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิด โดยสมบัติของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับปริมาณ และชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ถ้าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีสภาพเข้ากันได้ จะเรียกว่า การผสมแบบเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่วนมากจะผสมในสภาวะหลอมเหลว แต่ถ้าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมเข้ากันได้บางส่วน เรียกว่า การผสมแบบวัฏภาคเดียว และการผสมแบบหลายวัฏภาค เรียกว่า การผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ที่มีสภาพเข้ากันไม่ได้ เช่น การฝังตัวของอนุภาคยางที่มีลักษณะเป็นวงกลมในพอลิพรอพิลีน เป็นต้น [17]

### 2.4.1 สภาพเข้ากันได้ (Compatibility)

สภาพเข้ากันได้ (compatibility) บ่อยครั้งที่อาจหมายถึง ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ พลาสติกไซเซออร์ หรือสารเติมแต่งอื่น ๆ โดยพอลิเมอร์ในวัฏภาคที่สองจะมีการกระจายตัวที่ดี และมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้สมมติได้ว่าองค์ประกอบนั้น ๆ สามารถเข้ากันได้ นอกจากนี้ ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมยังสังเกตได้จากค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่จะมีเพียงค่าเดียว และถ้าพอลิเมอร์ผสมเข้ากันไม่ได้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันจะอยู่ในช่วงกว้างและเลื่อนอุณหภูมิต่ำลง แต่การผสมที่เป็นเนื้อเดียว ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ได้จะอยู่ระหว่างค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันขององค์ประกอบเหล่านั้น สำหรับการผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่มีการกระจายตัวของอนุภาคของวัฏภาคที่สองที่มีขนาดเล็กมาก อาจได้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่กว้างมาก แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความใส นั้นแสดงว่า การผสมนั้นมีสภาพเข้ากันได้ดี บางครั้งสามารถสังเกตสภาพเข้ากันได้จากการละลายพอลิเมอร์ผสมในสารละลายมาตรฐาน ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่มีสภาพเข้ากันได้ดี จะไม่เกิดการแยกเฟส แต่พอลิเมอร์ผสมที่มีสภาพเข้ากันไม่ได้ จะเกิดการแยกวัฏภาคชัดเจน [18-19]

### 2.4.2 ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic theories)

ในทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ ตั้งสมมติฐานว่า สารละลายและของผสมที่มีสภาพเข้ากันได้ จะมีค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) ติดลบ ดังสมการที่ 2.1

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m < 0 \quad \text{.....(2.1)}$$

ซึ่งหมายความว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร หรือ เอนทาลปีในสารละลายอุดมคติ แต่ในสารละลายปกติค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีจะไม่เป็นศูนย์ [18]

### 2.4.3 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมมีบทบาทสำคัญและเป็นที่ยอมรับมากขึ้นในไม่กี่ปีมานี้ การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม และการทำพอลิเมอร์ผสมเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ และการทำพอลิเมอร์ผสมนั้นยังมีต้นทุนที่ต่ำอีกด้วย

ในการผสมที่เสถียรมี 2 ปัจจัยหลัก คือ 1) มีการกระจายตัวที่เหมาะสมของวัฏภาคที่สอง และ 2) ในการดำเนินการต่อไป ไม่เกิดการลดการผสม (demixing)

การป้องกันการลดการผสมมีดังนี้

- 1) ใช้องค์ประกอบที่สามารถเข้ากันได้
- 2) องค์ประกอบที่ผสมควรมีอัตราการแพร่ที่ช้า
- 3) ป้องกันการแยกตัว โดยการทำการเชื่อมขวางทางเคมี หรือองค์ประกอบเกิดการขัดขวางเชิงกลกันเอง (Mechanical interlocking)
- 4) ใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ และที่นิยม คือ การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมเพื่อเพิ่มสภาพการผสมให้เข้ากันได้ดีขึ้น เช่น การทำพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อ (graft copolymerization) หรือแบบกลุ่ม (block copolymerization)

พอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อ (Graft copolymers) อาจแสดงสัญญาณวิทยาออกเป็นสองวัฏภาคซึ่งส่งผลต่อพอลิเมอร์ผสม ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาตรสัดส่วนของสายโซ่หลัก ถ้าเกิดการแยกวัฏภาคระดับไมโคร อาจเกิดจากการเชื่อมขวางทางเคมีระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง และพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อที่เป็นอสังฐาน จะมีลักษณะใส โครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อนั้นมีความซับซ้อน



องค์ประกอบของพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณมาก จะมีลักษณะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมีสมบัติทางกายภาพที่ดี ซึ่งพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อนั้นจะไปลดขนาดอนุภาคที่กระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน และปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาค ซึ่งการนำไปใช้งานหลัก ๆ ของการผสมกับพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อ คือ ปรับปรุงความทนแรงกระแทก [18]

การปรับปรุงพอลิเมอร์ที่มีความเปราะให้เหนียวขึ้น มีลักษณะดังนี้

1) มีการยึดเกาะที่ติระหว่างอีลาสโตเมอร์กับเมทริกซ์ ซึ่งถ้ามีการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวที่ไม่ดีจะเกิดช่องระหว่างอีลาสโตเมอร์กับเมทริกซ์ ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการแตกหัก การทำพอลิเมอร์แบบเชื่อมต่อจะช่วยให้การยึดติดระหว่างพื้นผิวดีขึ้น

2) มีการเชื่อมขวางของอีลาสโตเมอร์ จะช่วยทำให้เพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และลดการเริ่มต้นในการแตกหัก

3) ขนาดของอนุภาคยางกระจายตัวที่เหมาะสม ถ้าขนาดของอนุภาคยางเฉลี่ยในพอลิเมอร์ผสมมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคยางวิกฤต จะส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกต่ำ

พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม ส่งผลต่อการยึดติด และการกระจายตัวที่เสถียรของพอลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกันในพอลิเมอร์อื่น เหมือนกับพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อ ซึ่งพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อนั้นมากสังเคราะห์โดยการใช้อุณหภูมิสูง แต่พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มสังเคราะห์โดยการใส่กระบวนการเคบิตแบบไอออนิกหรือแบบขึ้น

พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มส่วนมากจะแยกตัวเป็นสองวัฏภาค ถ้ามีสายโซ่ที่ยาวมากพอในสถานะของแข็ง แต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีและการเกิดผลึกในแต่ละองค์ประกอบ เนื่องจากเอนทาลปีในแต่ละโมเลกุลในพอลิเมอร์ผสมไม่สูงพอ

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มจะส่งผลต่อสมบัติแบบอีลาสโตเมอร์, กระบวนการหลอม และความเหนียว ในสถานะของแข็ง ซึ่งมีความคาดหวังว่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อ เนื่องจากสามารถแทรกตัวในสายโซ่หลักได้ดีกว่า

พอลิเมอร์ร่วมแบบเชื่อมต่อ ทำให้มีสภาพเข้ากันได้ดี แต่ถ้าในการผสมยาง มีพอลิเมอร์ร่วมตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป อาจไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงความเหนียว เนื่องจากอาจเกิดการเชื่อมขวางกันของยาง [18]

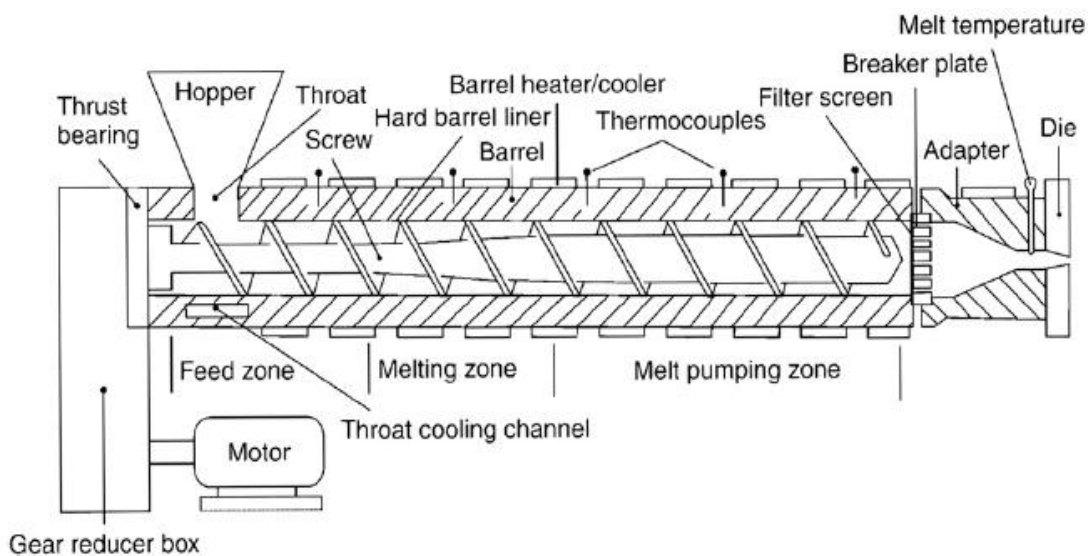
## 2.5 กระบวนการอัดรีดพลาสติก (Extrusion process)

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการที่ถูกรับใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับกระบวนการผลิตพลาสติกที่ทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถหลอมได้ดีที่อัตราสูง และลดปัญหาการหลอมและสลายตัวบางส่วนของเม็ดพลาสติก

เครื่องอัดรีดมี 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว สำหรับกระบวนการผลิตที่ง่าย และต้นทุนต่ำ เครื่องอัดรีดสกรูคู่ สำหรับใช้ในการผสม ซึ่งช่วยให้เกิดการผสมที่ดี และกระบวนการที่ต้องการเวลาสำหรับการระเหยของไอ พอลิเมอร์ที่ว่องไวต่อความร้อน และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการอัดรีด เป็นต้น [20]

กระบวนการอัดรีดพลาสติก ประกอบด้วย เครื่องอัดรีดพลาสติก หัวตาย (die) เครื่องหล่อเย็น อุปกรณ์ดึงพลาสติก เครื่องตัดพลาสติก เป็นต้น ดังรูปที่ 2.8 ส่วนเครื่องอัดรีดพลาสติกนั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วย เครื่องจักร ตัวขับเคลื่อน (มอเตอร์ กล่องเฟือง (gear box) และตลับลูกปืนกันการกระแทก (thrust bearing)) และหน่วยพลาสติก (สกรู บาร์เรล ระบบควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุม)

เครื่องอัดรีดพลาสติกมีหลัก 4 ประเภท ได้แก่ เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวที่มีส่วนป้อนพลาสติกมีลักษณะเรียบ และมีสกรู ส่วน เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวที่มีส่วนป้อนพลาสติกเป็นร่อง และมีสกรูสำหรับผสม เครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนทิศทางเดียวกัน และเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนคนละทิศทาง [21]

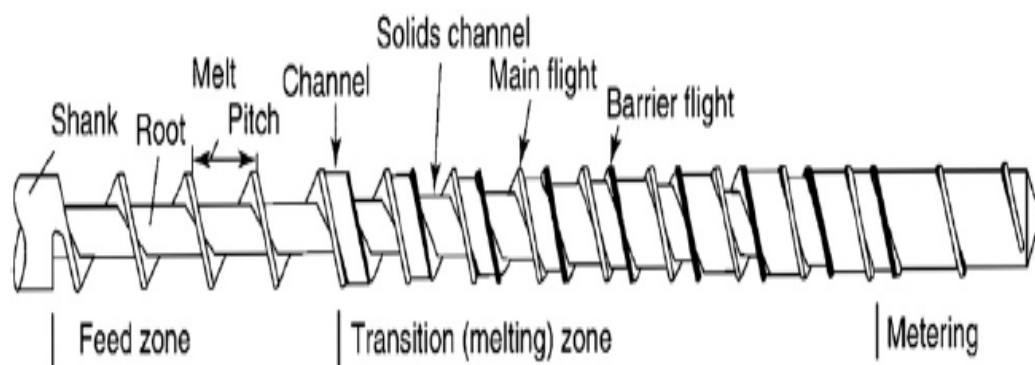


รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดพลาสติก [21]

### 2.5.1 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder)

เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ประกอบด้วย บาร์เรล (barrel) ที่มีลักษณะเป็นช่องทรงกระบอกกลวง ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนติดอยู่ด้านนอก ส่วนด้านในเคลือบด้วยโลหะหนักอย่างซาลอย (Xaloy®) เคลือบเพื่อป้องกันการขัดถูกับสกรู ซึ่งสกรูมีขนาดพอดีกับบาร์เรล การออกแบบสกรู ดังรูปที่ 2.9 จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน สกรูถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อกับเฟืองลดขนาด เพื่อควบคุมกำลังและความเร็วของสกรู ซึ่งมีส่วนช่วยในการหลอมเม็ดพลาสติก และสำหรับการควบคุมอุณหภูมิที่บาร์เรลนั้นจะใช้เครื่องให้ความร้อนไฟฟ้า และการหล่อเย็นด้วยน้ำ

หลักการทำงานของเครื่องอัดรีดสกรู คือ การขนถ่ายน้ำพลาสติก และการฉีดพลาสติก ซึ่งความยาวต่อความกว้างของสกรูก็เป็นอิทธิพลหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการหลอมและขนถ่ายน้ำพลาสติก การขนถ่ายน้ำพลาสติกเกิดจากการขีดเกาะระหว่างน้ำพลาสติกกับผนังบาร์เรล และน้ำพลาสติกกับสกรู โดยส่งต่อจากช่วงหนึ่งไปยังอีกช่วงหนึ่งอย่างสัมพันธ์กัน ซึ่งกลไกนี้ เรียกว่า การไหลแบบลาก (drag flow) และยังเกิดการไหลเนื่องจากความดันอีกด้วย



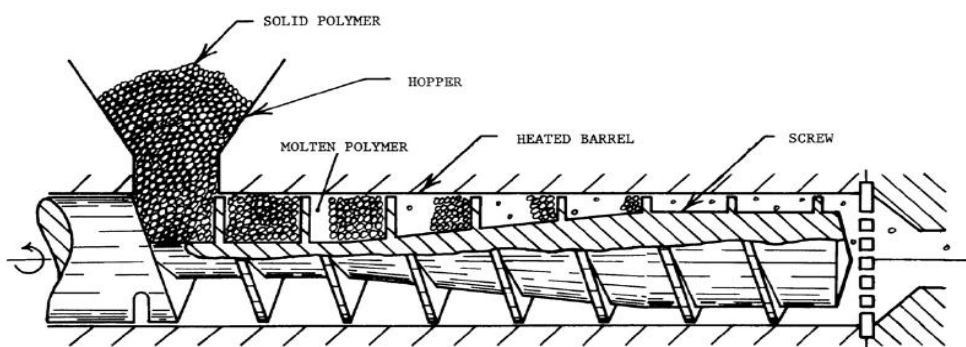
รูปที่ 2.9 ลักษณะของสกรู [21]

สกรูถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนป้อนเม็ดพลาสติก (feed zone) ซึ่งจะดึงเม็ดพลาสติกลงมาจากรูปร่างกรวย และส่งต่อไปยังส่วนถัดไป ส่วนของการอัดหรือการหลอม (compression or transition zone) ซึ่งส่วนนี้จะอัดเม็ดพลาสติกที่ส่งมาจากส่วนป้อนเม็ดพลาสติก และหลอมเข้าด้วยกัน และส่วนสุดท้าย ส่วนของเมเทอร์ริง ( metering zone) ซึ่งส่วนนี้จะหลอมเม็ดพลาสติกเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้ความร้อนจากเครื่องให้ความร้อนมาเป็นตัวช่วย และส่วนนี้ยังมีความดันเกิดขึ้น สำหรับฉีดเม็ดพลาสติกออกไป ซึ่งสกรูจะมีความลึกของช่องสกรูลดลงเรื่อย ๆ จากส่วนของการป้อนเม็ดพลาสติก จนกระทั่งถึงส่วนของการอัด และความลึกของช่องสกรูในส่วนของเมเทอร์ริงจะลึกเท่ากับช่องสุดท้ายของสกรูของส่วนของการอัด [21]

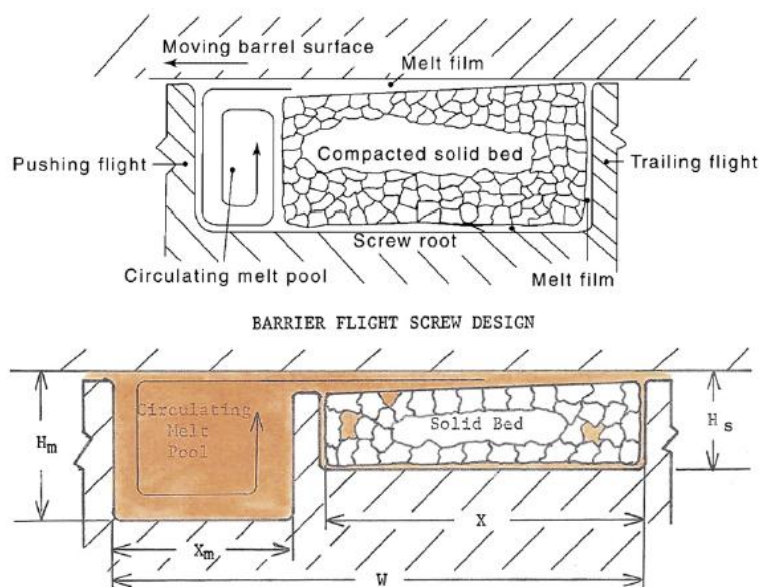
กระบวนการหลอมพลาสติก เกิดโดยเม็ดพลาสติกได้รับความร้อนจากเครื่องอัดรีดพลาสติก และจากแรงเสียดทาน เม็ดพลาสติกที่ติดกับผนัง และส่วนของสกรูจะเกิดการหลอมก่อน จากนั้นน้ำพลาสติกจะถูกผลักไปทางด้านหน้าของช่องสกรู ส่วนเม็ดพลาสติกที่ยังไม่หลอมจะเกิดการหลอมต่อไปในภายหลัง [21]

เม็ดพลาสติกถูกป้อนลงไปในช่วงรูปร่างกรวย แล้วเคลื่อนที่ลงสู่คอของเครื่องอัดรีดเข้าสู่ส่วนของการป้อน (Feed zone) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งเม็ดพลาสติกจะอ่อนนุ่ม เนื่องจากได้รับความร้อนสะสมและแรงดัน จากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดพลาสติกกับผนัง

ของบาร์เรล และความร้อนจากบาร์เรล ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 จากนั้นจะส่งผ่านเม็ดพลาสติกไปยัง ส่วนของการหลอม (Transition zone) ซึ่งที่ส่วนนี้เม็ดพลาสติกจะเกิดการหลอมกลายเป็นน้ำ พลาสติก ด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้นของบาร์เรล และความร้อนจากแรงเสียดทานระหว่างพลาสติกกับ เกลียวที่มีช่องแคบลง แล้วน้ำพลาสติกจะถูกผลักดันคู่ส่วนของเมเทอร์ริง (Metering zone) เพื่อออกจาก หัวคาย (die) ซึ่งส่วนนี้เม็ดพลาสติกจะถูกหลอมและผสม ซึ่งสภาวะในการหลอมนี้จะส่งผลต่อการ เกิดผลึกและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ [20]



รูปที่ 2.10 กลไกการหลอมและผลักดันน้ำพลาสติกออกสู่หัวคาย [20]



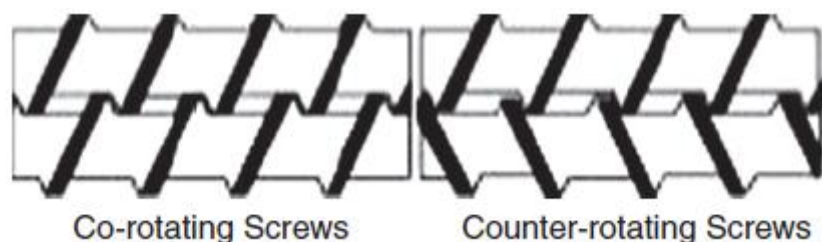
รูปที่ 2.11 กลไกการหลอมของเม็ดพลาสติกในช่องเกลียวของสกรู [20]

เครื่องอัดรีดพลาสติกแบบสกรูเดี่ยวโดยทั่วไป จะมีบาร์เรลที่เรียบ ข้อควรระวังในการใช้เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวแบบนี้ คือ การหลอมของเม็ดพลาสติกในส่วนป้อนเม็ดพลาสติก เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดพลาสติกกับผนังบาร์เรล และเม็ดพลาสติกกับสกรูน้อยเกินกว่าจะสามารถส่งเม็ดพลาสติกไปยังส่วนถัดไปได้ และความดันย้อนกลับที่ทำให้การฉีดน้ำพลาสติกออกจากหัวคายไม่ได้คุณภาพ ดังนั้น การแก้ปัญหาของการป้องกันการหลอม คือ เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวที่มีร่องในส่วนป้อนเม็ดพลาสติก

เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวที่ส่วนป้อนเม็ดพลาสติกมีร่อง ซึ่งเครื่องอัดรีดพลาสติกแบบนี้จะได้อัตราการผลิตพลาสติกที่ฉีดออกมาสูง โดยความดันย้อนกลับ และปัญหาที่ส่วนป้อนเม็ดพลาสติกไม่มีอิทธิพล [20]

### 2.5.2 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีลักษณะการหมุน 2 แบบ คือ แบบหมุนทางเดียวกัน (Co-rotating screw) และแบบหมุนคนละทาง (Counter-rotating screw) ดังรูปที่ 2.12

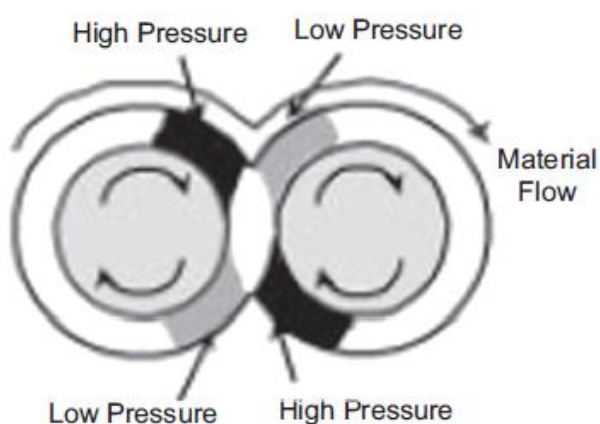


รูปที่ 2.12 ลักษณะการหมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ [20]

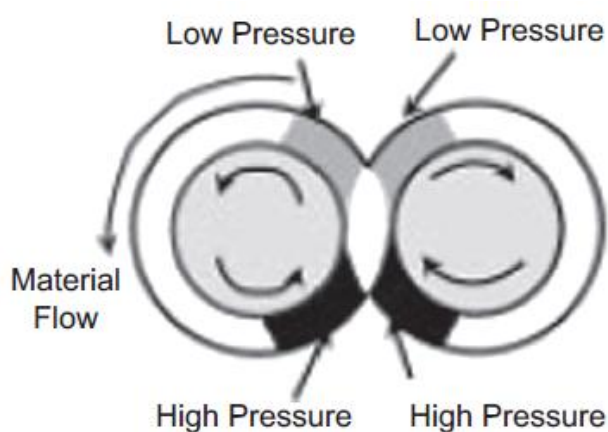
ในการผสมเรซินกับสารเติมแต่ง การระเหยไอของตัวทำละลาย และการทำปฏิกิริยา จะใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่มีการหมุนในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วสูง ในการต้องการควบคุมอุณหภูมิของพลาสติกหรือการทำท่อจะใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่มีการหมุนในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วต่ำ ส่วน

เครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่มีการหมุนในทิศทางตรงกันข้าม ใช้สำหรับผสมพอลิไวนิลคลอไรด์และระบบเรซินอื่น ๆ ซึ่งการใช้งานที่ต่างกัน เนื่องจากทิศทางการหมุนของสกรูคู่จะทำให้เกิดความดันที่ต่างกันที่สกรู ดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 [20-21]

เครื่องอัดรีดสกรูคู่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ 5 ส่วน คือ ส่วนขับเคลื่อน ส่วนป้อน สกรูและบาร์เรล และหัวคาย ดังรูปที่ 2.15 [20-21]



รูปที่ 2.13 ความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูที่หมุนคนละทิศทาง (counter-rotating screw) [20]

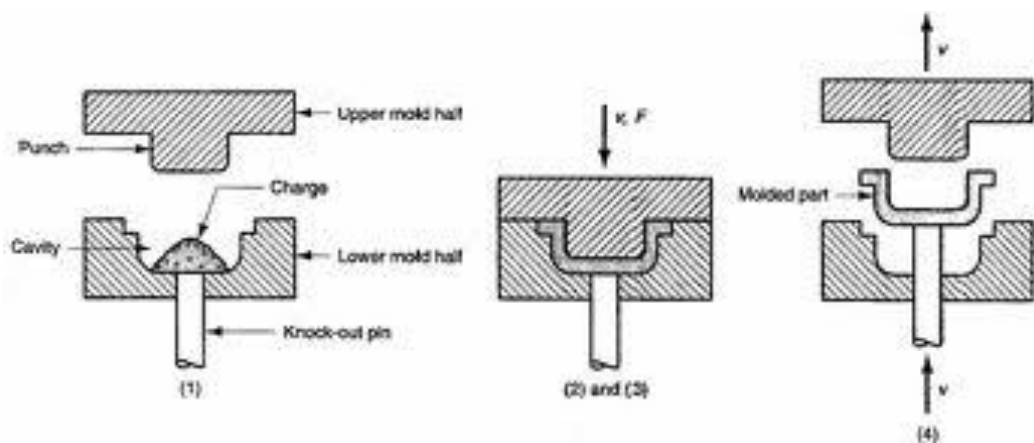


รูปที่ 2.14 ความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน (counter-rotating screw) [20]

## 2.6 กระบวนการอัดแบบ (Compression molding)

กระบวนการอัดแบบ ดังรูปที่ 2.15 มีขั้นตอนดังนี้

- การให้ความร้อนกับเม็ดพลาสติก ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (preheating) ซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทจากแม่แบบสู่เม็ดพลาสติก โดยที่เม็ดพลาสติกจะยังไม่หลอม
- การวัด (metering) และให้แรง (loading) กับแม่แบบ เมื่อเม็ดพลาสติกถูกใส่ลงในแม่แบบ แม่แบบจะถูกปิดประกบด้วยแรงอัดไฮดรอลิก
- การหลอม หลังจากเม็ดพลาสติกได้รับความร้อนเริ่มต้น และถูกอัด จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงสภาวะหลอมเหลว เม็ดพลาสติกจะเกิดการหลอมเหลวกลายเป็นน้ำพลาสติก
- การขึ้นรูป น้ำพลาสติกจะไหลจนเต็มช่องว่างในแม่แบบ
- การบ่ม (curing) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสาร จากนั้นแม่แบบจะเย็นตัวลง
- การผลักออก (ejection) เมื่อแม่แบบเย็นตัวลงจนถึงเวลาที่กำหนด เครื่องอัดแบบจะผลักชิ้นงานออกจากแบบ
- การเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (deflashing) เมื่อชิ้นงานจะเย็นสัมผัสกับอากาศภายนอก ชิ้นงานจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว [22-23]



รูปที่ 2.15 กระบวนการอัดแบบ [22]



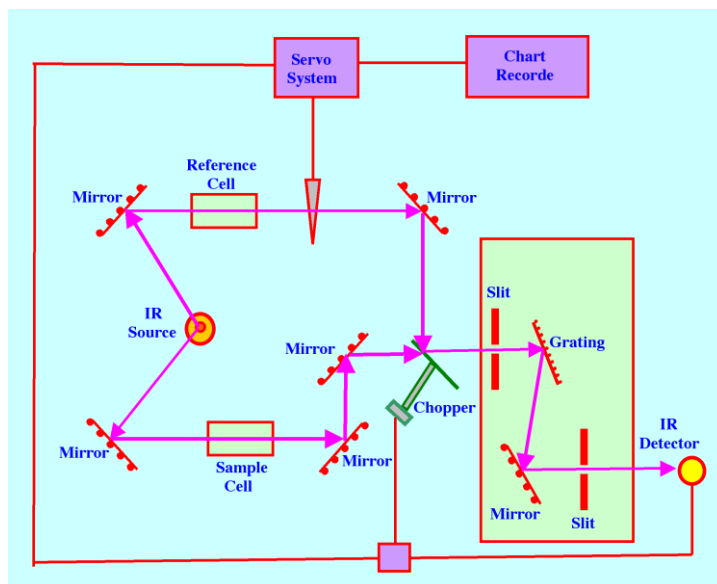
## 2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

### 2.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด

#### สเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy)

ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยการดูการเคลื่อนที่ของรังสีอินฟราเรดของวัสดุ ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและหมุน โดยแต่ละโมเลกุลมีค่าการดูดกลืนรังสีเฉพาะตัว รังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ รังสีใกล้อินฟราเรด (Near IR) อยู่ในช่วง  $13300 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น, รังสีกลางอินฟราเรด (Mid IR) อยู่ในช่วง  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งทำให้โมเลกุลเกิดการหมุน และรังสีไกลอินฟราเรด อยู่ในช่วง  $400 - 20 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งทำให้โมเลกุลเกิดการหมุนเช่นเดียวกับรังสีกลางอินฟราเรด

#### 2.7.1.1 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ( Fourier transform infrared spectrophotometer)



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [24]

องค์ประกอบของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ มีดังนี้ แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด อุปกรณ์แยกรังสี และอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี ดังรูปที่ 2.16

### แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด

แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด เป็นวัสดุทนไฟที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง ส่วนมากจะใช้นิกเกิล และ โครเมียม โดยรังสีอินฟราเรดจะปล่อยออกมาในรูปของความร้อน ดังนั้น จำเป็นควบคุมอุณหภูมิให้มีความเสถียร

*โกลบาร์ (Globar)* คือ แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ถูกเผาในช่วงอุณหภูมิ 750 – 1200 องศาเซลเซียส แต่โกลบาร์เป็นวัสดุที่ถูกออกซิเดชันได้ง่าย ทำให้ได้ช่วงรังสีอินฟราเรดที่ต่ำ ( $9000-50\text{ cm}^{-1}$ )

*เนิร์นสต์ (Nernst)* คือ หลอดเซอร์โคเนียมและอิทเทรียมที่ได้รับความร้อนประมาณ 1750 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้มีความเข้มข้นรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น แต่อายุการใช้งานลดลง

*เอเวอร์ โกล (Ever glo)* คือ แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดในช่วง  $9600 - 50\text{ cm}^{-1}$

*ลาวดทั้งสเดน* เป็นวัสดุที่ใช้บ่อย และให้รังสีอินฟราเรดในช่วง  $15000 - 8000\text{ cm}^{-1}$

### อุปกรณ์แยกรังสี (Beam splitters)

อุปกรณ์แยกรังสี เป็นกระจกเงาที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งรังสีกระทบจะไปรบกวนกระจกแล้วแปลงเป็นรหัสสัญญาณในโปรแกรมอินเตอร์เฟอโรแกรมของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม โดยมีสัญญาณเลเซอร์เป็นมาตรฐานเทียบสัญญาณอื่น ๆ ของวัสดุ อุปกรณ์แยกรังสีที่สำคัญ มีดังนี้  
ควอตซ์ แคลเซียมไดฟลูออไรด์ โพรแทสเซียมโบรไมด์ เจอร์เมเนียมบนโพแทสเซียมโบรไมด์  
เจอร์เมเนียมบนซีเซียมไอโอไดด์ และไมลาร์

### อุปกรณ์ตรวจวัดรังสี

อุปกรณ์ตรวจวัดรังสีมีหน้าที่บันทึกรังสีที่ตัวอย่างดูดซับเข้าไป ซึ่งมีตัวตรวจวัดที่สำคัญ ดังนี้  
คิวทีเรดไตรกลีซีนซัลเฟตในโพแทสเซียมโบรไมด์, คิวทีเรดไตรกลีซีนซัลเฟตในซีเซียมไอโอไดด์  
คิวทีเรดไตรกลีซีนซัลเฟตในพอลิเอทิลีน และเมอร์คิวรีแคดเมียมเทลลูไรด์

### 2.7.1.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด

เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด ขึ้นอยู่กับ ชนิดตัวอย่าง ข้อมูลที่ต้องการ ขนาดตัวอย่าง การวิเคราะห์ที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตราย เวลา และราคา

#### การส่องผ่าน (Transmission)

การส่องผ่านเป็นเทคนิคที่ง่ายของเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม โดยตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมา แล้วรังสีที่ส่องผ่านไปนี้จะถูกตรวจวัด และตัวอย่างพวกฟิล์มหรือแผ่นสามารถสัมผัสรังสีได้โดยตรง แต่ตัวอย่างที่เป็นผงควรใช้ผงใส่เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ หรือตัวอย่างที่เป็นของเหลว ควรใช้กระจกใส

ตัวอย่างของแข็ง ควรบดให้ละเอียดพร้อมกับผงใส โดยผสมลงไปประมาณร้อยละ 0.1 – 2.0 โดยน้ำหนักของผงใส โดยปกติใช้โพรแทสเซียมโบรไมด์ หรือเตรียมได้ ดังนี้

- มูล (Mull) เป็นเทคนิคที่นำตัวอย่างที่บดแล้วไปยกลงน้ำมันใสอย่าง นูจอล (Nujol) หรือ ฟลูออลูบ (Fluorolube) (เป็นชื่อทางการค้า) ซึ่งเป็นสารเคลือบฟิล์ม โดยนำตัวอย่างไปละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตัวทำละลายระเหย แล้วนำแผ่นฟิล์มมาวิเคราะห์โดยตรง
- อัดฟิล์ม โดยนำเทอร์โมพลาสติกและสารเติมแต่งไปอัดเป็นฟิล์ม แล้วจึงนำไปวิเคราะห์
- ฟิล์มมาตรฐานอิสระ ซึ่งฟิล์มที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีลักษณะเป็นแผ่นอยู่แล้ว

ตัวอย่างของเหลว สามารถวัดได้โดยตรงโดยใช้กระจกใส หรืออาจเตรียมได้โดย

- ป้ายลงโพรแทสเซียมโบรไมด์ โพรแทสเซียมคลอไรด์ หรือโซเดียมคลอไรด์ โดยตัวทำละลายที่ใช้ควรเป็นอะซิโตน โทลูอีน ไซโคลเฮกเซน เฮกเซน หรือเมทิลีนคลอไรด์
- ป้ายลงซิลเวอร์คลอไรด์ โดยตัวทำละลายที่ใช้คืออะซิโตน หรือน้ำ

- ป้ายลงซิงค์ซัลไฟด์
- ป้ายลงพอลิเอทิลีน [24]

ตารางที่ 2.3 ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด [24]

กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm <sup>-1</sup> )	หมายเหตุ
แอลิฟาติก (aliphatic)		
-CH <sub>3</sub>	1952-2972	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H
	2862-2882	การยืดแบบสมมาตรของ C-H
	1430-1480	การงอแบบไม่สมมาตรของ C-H
	1370-1380	การงอแบบสมมาตรของ C-H
-CH <sub>2</sub> -	2920-2930	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H
	2848-2858	การยืดแบบสมมาตรของ C-H
	1450-1480	การงอของ C-H
	1150-1350	การบิดของ C-H
	700-1000	สมดุขของ C-H
-CH<	2880-2900	การยืดของ C-H
-(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -	720-740	กรณี n ≥ 4, การสั่นบนสายโซ่ -CH <sub>2</sub> -
-CH(CH <sub>3</sub> )-	1110-1140	การสั่นบนสายโซ่ -CH <sub>2</sub> -
-CH=CH-	967	ไวบิลิตินแบบไม่อิ่มตัว

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด [24]

กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมายเหตุ
แอมโรมาติก (aromatic)		
-CH	3000-3125	การยืดของ C-H บนวงแอมโรมาติก
	1650-2000	การงอออกจากระนาบของ CH-
	1575-2000	การสั่นของวงแอมโรมาติก
	1520-1480	
	700-800	การงอของวงแอมโรมาติก
แอลิฟาติก C=C		
-C=CH <sub>2</sub>	3070-3090	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H
	2983-3005	การยืดแบบสมมาตรของ C-H
-CH=CH-(trans)	3010-3040	การยืดของ C-H
	960-970	การเบี่ยงออกของ C-H
>C=C<	1615-1670	การยืดของ C=C ที่ไม่คอนจูเกต
>C=C<	1600-1590	การยืดของ C=C ที่คอนจูเกต
-CH <sub>2</sub> -CH=CH <sub>2</sub>	955	แอลลิติกไม่เสถียร
-CH=CH <sub>2</sub>	990 และ 908	ไวนิลไม่เสถียร
>C=CH <sub>2</sub>	888	ไวนิลิตินไม่เสถียร
พันธะสาม		
-C≡CH <sub>2</sub>	3310-3200	การยืดของ C-H
-C≡C-	2150-2250	การยืดของ C≡C
R-C≡N	2260-2240	การยืดของ C≡N
แอลกอฮอล์ O-H		
-OH	3200-3400	การยืดของ O-H (กว้างและแข็งแรง)
-CO	1050-1150	การยืดของ C-O (แข็งแรง)
-OH	1310-1410	การงอของ OH

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด [24]

กลุ่ม โครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมายเหตุ
เอไมด์ (Amides)		
R(CO)NH <sub>2</sub>	3420-3550	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H
	3450-3320	การยืดแบบสมมาตรของ C-H
	1650-1690	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
	1600-1640	การงอของ NH <sub>2</sub>
	1605-1420	การยืดของ N-H
R(CO)NHR	3440	การยืดของ C-N
	1640-1680	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
	1530-1570	การงอของ NH <sub>2</sub>
	1300-1260	การยืดของ N-H
R(CO)NR <sub>2</sub>	1650	ไม่มีหมู่ N-H
เอสเทอร์ (Esters)		
-C=O	1735	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
-COC-	1185-1275	การยืดของ C-O-C แบบไม่สมมาตร
-COC-	1050-1160	การยืดของ C-O-C แบบสมมาตร
กรด, เปอร์ออกไซด์ และแอนไฮไดรด์		
-C=O	1750-1765	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
-OH	3550	การยืดของ O-H (กว้างและแข็งแรง)
-OH	1420	การงอของ OH
-CO	1250	การยืดของ C-O
OOH	860-900	การงอออกจากระนาบของ -OH
Peroxides	1780-1820	การยืดของแบบไม่สมมาตร -C=O -(CO)OO(CO)-
	1750-1770	การยืดแบบสมมาตรของ -C=O -(CO)OO(CO)-

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด [24]

กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm <sup>-1</sup> )	หมายเหตุ
แอนไฮไดรด์ (Anhydrides)		
	820-890	อ่อนมาก (-COOC-)
	1810-1830	การยืดของแบบไม่สมมาตร -C=O
		-(CO)O(CO)-
	1750-1770	การยืดแบบสมมาตรของ -C=O
		-(CO)O(CO)-
แอลดีไฮด์ (Aldehydes)		
-C=O แอลิฟาติก	1715-1725	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
-C=O แอโรมาติก	1700	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
คีโตน (Ketones)		
-C=O แอลิฟาติก	1710-1720	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
-C=O แอโรมาติก	1690	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
-C(CO)C-	1100	การงอของ -C(CO)C-
อีเทอร์ (Ethers) และ อีพอกไซด์ (Epoxides)		
-COC- แอลิฟาติก	1070-1150	การยืดแบบไม่สมมาตรของ -COC-
-COC- แอโรมาติก	1200-1275	การยืดแบบไม่สมมาตรของ -COC-
	1020-1075	การยืดแบบสมมาตรของ -COC-
แอซีทัล (Acetals)	1116-1103	เอกลักษณ์ของแอซีทัล (-COCOC-)
เอมีน (Amines)		
RNH <sub>2</sub>	1735	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H
RNH <sub>2</sub>	3450-3320	การยืดแบบสมมาตรของ C-H
	1560-1640	การงอเข้าระนาบของ NH-
	1030-1230	การยืดของ C-N
	650-900	การงอออกจากระนาบของ -NH (อ่อน)

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด [24]

กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm <sup>-1</sup> )	หมายเหตุ
R <sub>2</sub> NH	3310-3450	การยืดของแบบไม่สมมาตร C-H
	1490-1580	การงอออกจากระนาบของ NH- (อ่อน)
	1100-1150	การยืดของ C-N
R <sub>3</sub> NH	1030-1230	การยืดของ C-N (2 กลุ่ม)

### 2.7.2 เทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่สามารถบ่งบอกสภาพแวดล้อมของนิวเคลียสได้ โดยการทำอันตรกิริยาระหว่างรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าและนิวเคลียสบางชนิดในสนามแม่เหล็ก [25-26]

#### 2.7.2.1 ปรากฏการณ์ของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

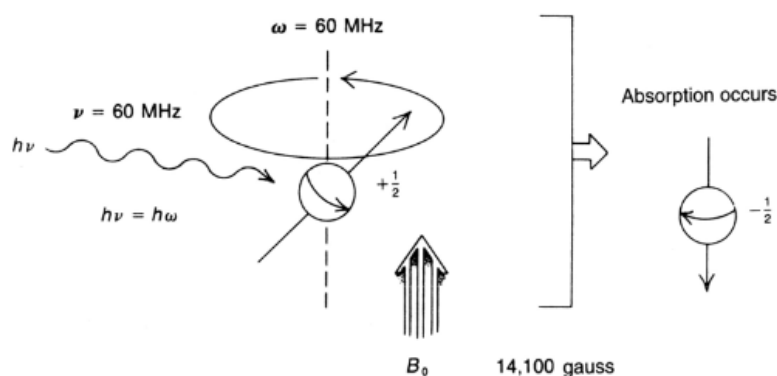
ประจุในนิวเคลียสสามารถหมุนรอบตัวเองได้ หรือที่เรียกว่า สปิน (spin) เมื่อประจุในนิวเคลียสเกิดการสปิน ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเกิดขึ้นตามแกนนิวเคลียส และโปรตอนที่สปินตัวจะประพฤติตัวเป็นแท่งแม่เหล็กขนาดเล็กที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก ซึ่งเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้โปรตอนสามารถจัดวางตัวได้สองแบบ คือ มีทิศตามสนามแม่เหล็กภายนอก และทิศต้านสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งการจัดวางตัวของโปรตอนด้านสนามแม่เหล็กภายนอกใช้พลังงานสูงกว่า

ปรากฏการณ์ของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ เป็นสถานะที่โปรตอนสปินตัวทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำให้ดูดพลังงาน และสปินตัวในทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก เพื่อศึกษาการเปลี่ยนสถานะการสปินของโปรตอน ซึ่งการสปินของโปรตอนนั้นถูก



เปรียบเทียบกับ การหมุนของลูกข่าง ที่เรียกว่า precession โดยโปรตอนจะหมุนด้วยความถี่เชิงมุมที่มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

ถ้าโปรตอนที่สปินตัวอยู่ ได้รับความถี่คลื่นวิทยุเดียวกับความถี่ที่โปรตอนกำลังสปินตัว โปรตอนจะดูดกลืนพลังงาน แล้วสปินตัวต้านทิศสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กระบวนการแมกเนติกเรโซแนนซ์ [25]

นิวเคลียสที่สามารถเกิดนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ได้ ต้องมีเลขควอนตัมสปิน ( $I$ ) มากกว่า 0 ซึ่ง  $I$  จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอม และเลขมวล โดยที่เลขอะตอมและเลขมวลที่เป็นเลขคู่จะไม่เกิดปรากฏการณ์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ จำนวนสปินที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

$$\text{จำนวนสภาวะสปิน} = 2I + 1 \quad \dots\dots(2.2)$$

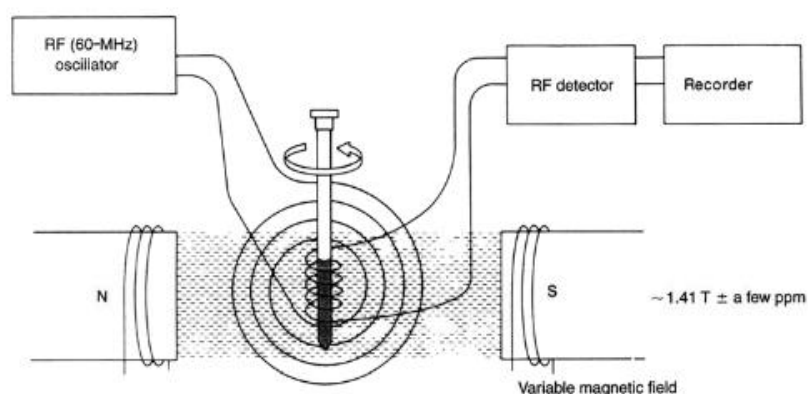
ซึ่งถ้าจำนวนสภาวะสปินเป็นเลขจำนวนเต็ม แสดงว่า เกิดการสปินตัวในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าจำนวนสภาวะสปินเป็นเลขทศนิยม แสดงว่า เกิดการสปินตัวในทิศต้านกับสนามแม่เหล็ก โดยความแตกต่างของพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไประหว่างสองสภาวะ หาได้จากสมการที่ 2.3

$$\Delta E = \gamma \frac{h}{2\pi} B_0 = h\nu \quad \dots\dots (2.3)$$

ดังนั้น ความถี่ที่ดูดกลืนเข้าไปจากสถานะพื้นสู่สถานะเร้า คือ  $\nu = \gamma \frac{B_0}{2\pi}$

### 2.7.2.2 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear magnetic resonance spectrometer)

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ดังรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยแท่งแม่เหล็กที่ให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ เครื่องส่งความถี่วิทยุ และเครื่องตรวจวัดความถี่วิทยุ โดยความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่วิทยุดังสมการ 2.3 การทดสอบมักเตรียมตัวอย่างในรูปสารละลายหรือของเหลว เพื่อให้ได้สัญญาณที่คมชัด ของแข็งและของเหลวความหนืดสูงให้ความเข้มของสัญญาณในช่วงกว้าง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้



รูปที่ 2.18 แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี [26]

### 2.7.2.3 ข้อมูลที่ได้จากโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม

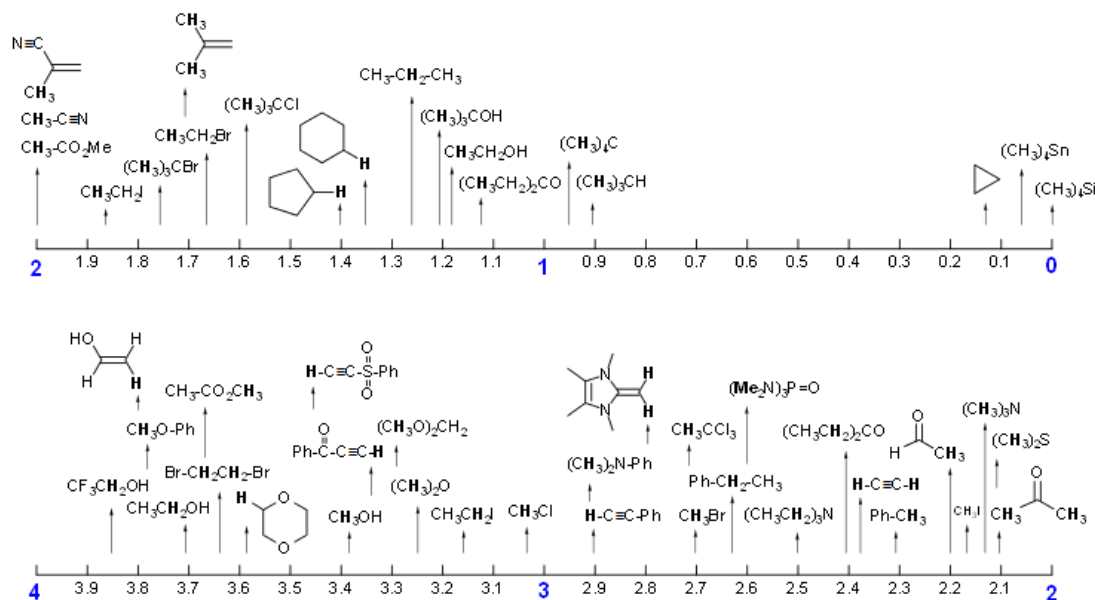
ข้อมูลที่ได้จากโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม มี 4 ประเภท

1. การเลื่อนตำแหน่งทางเคมี (Chemical shift,  $\delta$ , ppm) ซึ่งจะบอกตำแหน่งสัญญาณของโปรตอนเทียบกับสารอ้างอิงอย่างเตตระเมทิลไซเลน (TMS, tetramethylsilane) ดังรูปที่ 2.19 โดยสารอแกนิกทั่วไปจะมีค่าเคมีคัลชิฟท์อยู่ในช่วง 0 – 10 ที่บ่งบอกสภาวะแวดล้อมของการเกิดเรโซแนนซ์ของโปรตอนที่ต่างกัน

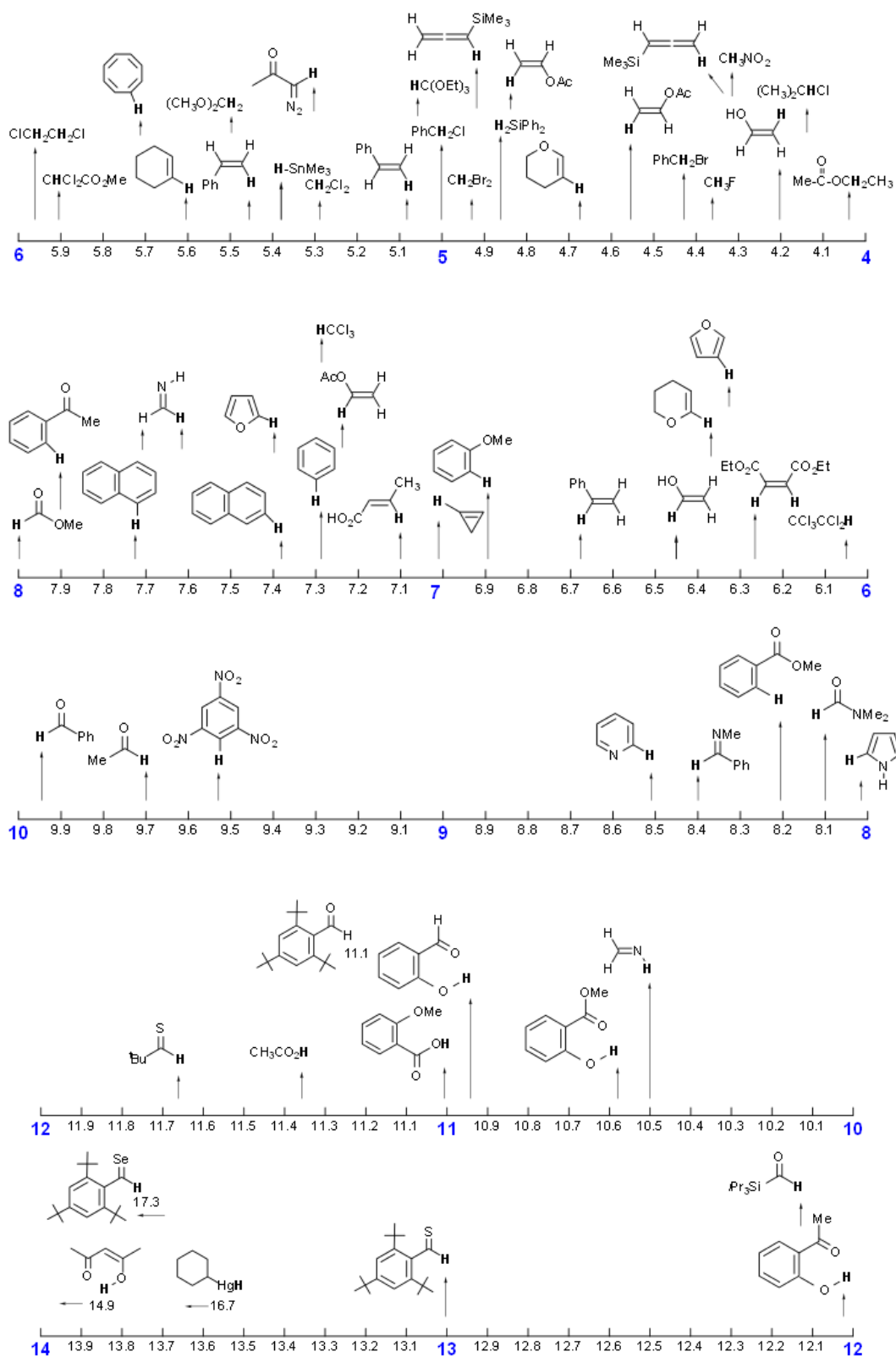
2. อินทิเกรชัน (Integration) สัญญาณปรากฏในรูปของพีค ซึ่งพื้นที่ใต้พีคหาได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในเครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีเตอร์ ได้เป็นเส้นที่มีความสูงกำกับไว้ที่แต่ละสัญญาณ ซึ่งความสูงขึ้นอยู่กับความเข้มสัญญาณและบ่งบอกถึงปริมาณโปรตอน โดยถ้าทราบปริมาณโปรตอนทั้งหมด ก็สามารถหาจำนวนโปรตอนของแต่ละสัญญาณได้

3. การแยกการสปิน (Spin-spin splitting) เนื่องจากอันตรกิริยาของการสปินตัวของโปรตอนที่เคียงข้างกัน อันตรกิริยานี้เรียกว่า การจับคู่ (coupling)

4. ค่าคงที่การจับคู่ (Coupling constant) สามารถอ่านได้จากสเปกตรัมโดยตรงในช่วงห่างระหว่างพีคของแต่ละสัญญาณ โปรตอนที่จับคู่กันจะมีช่วงห่างระหว่างพีคเท่ากัน [26]



รูปที่ 2.19 นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม [27]



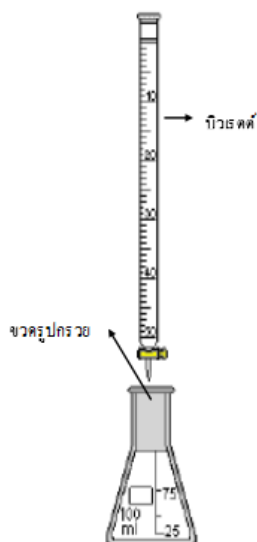
รูปที่ 2.19 (ต่อ) นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม [27]

## 2.8 การหาปริมาณกรดด้วยเทคนิคไทเทรต

การไทเทรต หมายถึง การหาปริมาณสารโดยใช้สารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนเข้าทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง โดยทำปฏิกิริยาพอดีกัน ทำให้สามารถคำนวณหาความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตัวอย่างได้

วิธีการไทเทรตกรด คือ นำสารละลายกรดที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ มาทำการไทเทรตด้วยสารละลายเบสมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน แล้วปริมาณของสารละลายเบสที่เข้าทำปฏิกิริยาพอดีกับสารตัวอย่าง สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณของสารตัวอย่างได้

สารละลายมาตรฐานจะบรรจุอยู่ในบิวเรต และสารตัวอย่างจะบรรจุอยู่ในขวดรูปชมพู่ โดยสารตัวอย่างจะผสมอินดิเคเตอร์ประมาณ 2-3 หยด เพื่อการสังเกตได้ง่ายเมื่อสารละลายมาตรฐานและสารตัวอย่างทำปฏิกิริยากันจนถึงจุดยุติ สารละลายมาตรฐานจะหยดลงมาช้า ๆ ด้วยการไขก๊อกเปิด-ปิด ที่บิวเรต ดังรูปที่ 2.20 และเมื่อถึงจุดยุติ อินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนสี ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานที่ใช้จะนำไปคำนวณหาปริมาณของสารตัวอย่าง [28]



รูปที่ 2.20 วิธีการไทเทรตกรด [28]

การคำนวณหาปริมาณสารตัวอย่าง ดังสมการที่ 2.4

$$M_a V_a = \frac{m}{n} (M_b V_b) \quad \dots\dots(2.4)$$

โดยที่  $M_a, M_b$  คือ ความเข้มข้นของกรดและเบส ตามลำดับ

$V_a, V_b$  คือ ปริมาตรของกรดและเบส ตามลำดับ

$m, n$  คือ จำนวน โมลของกรดและเบส ตามลำดับ [28]

## 2.9 สมบัติทางความร้อน

การถ่ายเทความร้อนของวัสดุสามารถหาได้จากค่าการนำความร้อน ( $K$ ) แต่พอทลิเมอร์ตอบสนองต่อการให้ความร้อนเริ่มต้น ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน คือ ความหนาแน่น ( $\rho$ ) และค่าความจุความร้อน ( $C_p$ ) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถหาค่าการแพร่ความร้อนได้ ( $\alpha$ ) ดังสมการที่ 2.5 [29]

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad \dots\dots(2.5)$$

### 2.9.1 การนำความร้อน

ค่าการนำความร้อน ( $K$ ) ใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุ โดยการถ่ายเทพลังงานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วเสียง ดังสมการที่ 2.6

$$k \approx C_p \rho l \quad \dots\dots(2.6)$$

โดยที่  $u$  คือความเร็วเสียง และ  $l$  คือการแยกโมเลกุล

ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ในพอลิเมอร์อสัณฐาน และที่เหนืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ค่าการนำความร้อนลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณผลึกในเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึก ซึ่งจะมีค่าการนำความร้อนในสภาวะของแข็งสูงกว่าสภาวะหลอมเหลว และในสภาวะหลอมเหลวค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกจะต่ำกว่าพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มความดันให้กับพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก ค่าการนำความร้อนในสภาวะหลอมเหลวเพิ่มขึ้น และการเติมสารเติมแต่งที่เป็นอนินทรีย์ลงในพอลิเมอร์อสัณฐาน ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยค่าการนำความร้อนวัดด้วยมาตรฐานการทดสอบ ASTM C177 และ DIN52612 [29]

### 2.9.2 ความร้อนจำเพาะและเอนทาลปีจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะ (C) คือ พลังงานที่ทำให้วัสดุมวลหนึ่งหน่วยเปลี่ยนอุณหภูมิไปหนึ่งหน่วย และเอนทาลปีจำเพาะคือพลังงานของมวลหนึ่งหน่วยที่อุณหภูมิจำเพาะ ความร้อนจำเพาะวัดที่ความดันคงที่ ( $C_p$ ) หรือปริมาตรคงที่ ( $C_v$ ) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้น จึงสมมติได้ว่า ความร้อนจำเพาะที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ มีค่าเท่ากัน ในเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึกค่าความร้อนจำเพาะในการหลอมผลึกไม่เป็นปริมาณที่ต่อเนื่อง เนื่องจากขึ้นอยู่กับปริมาณผลึกในพอลิเมอร์นั้น จึงเรียกว่า ความร้อนของการหลอม (heat of fusion) ซึ่งการวัดความร้อนจำเพาะนี้ จะได้ค่าความร้อนทั้งหมดที่สามารถนำไปใช้ทำนายความร้อนที่จะใช้ในกระบวนการต่าง ๆ [29]

### 2.9.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นจะสัมพันธ์กับปริมาณจำเพาะ ดังนั้น ในพอลิเมอร์จึงใช้ปริมาตรจำเพาะแทนความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ซึ่งปริมาตรจำเพาะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ และปริมาตรจำเพาะส่งผลต่อความดัน ทำให้มีการวาดกราฟในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ ซึ่งปริมาตรจำเพาะของการหลอมเหลวและสภาวะแก้วของพอลิเมอร์อสัณฐานจะแยกกันชัดเจน ทำให้สามารถบ่งบอกค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันได้ [29]

#### 2.9.4 การแพร่ความร้อน

กระบวนการแพร่ความร้อนของวัสดุไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ในเทอร์โมพลาสติกแบบอสัณฐานการแพร่ความร้อนลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เมื่อถึงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ค่าการแพร่ความร้อนจะกระโดดเล็กน้อย เนื่องจากความจุความร้อนที่อุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลง และในเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึก ค่าการแพร่ความร้อนจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ แต่เมื่อถึงจุดหลอมเหลว ค่าการแพร่ความร้อนจะต่ำสุด ซึ่งค่าการแพร่ความร้อนของเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึกนั้นขึ้นกับปริมาณผลึก อัตราการเกิดผลึก และความเร็วในการเย็นตัวของพอลิเมอร์ แต่สำหรับเทอร์โมพลาสติกทั่วไปไม่สามารถวัดค่าการแพร่ความร้อนในรูปของอุณหภูมิได้ เนื่องจากปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการแพร่ความร้อนได้มาจากสภาวะที่แตกต่างกัน [29]

#### 2.9.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเป็นส่วนสำคัญ โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของพอลิเมอร์ โดยจะแสดงในลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิ ซึ่งสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสามารถใช้ทำนายค่ามอดูลัสยืดหยุ่นได้ [29]

#### 2.9.6 การวิเคราะห์ทางความร้อนและเครื่องมือวัด

##### 2.9.6.1 เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC)

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี เป็นเทคนิคทางความร้อนที่วัดการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี และแสดงออกมาในรูปของอุณหภูมิกับเวลา ซึ่งได้จากการดูดหรือคายความร้อนของเหตุการณ์ทางความร้อนหลาย ๆ เหตุการณ์ ได้แก่ อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน การหลอมเหลว การเกิดผลึก การเชื่อมขวาง ปฏิกิริยาเคมี, การระเหย และการสลายตัวทางเคมี เทคนิคนี้สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -180 – 600 องศาเซลเซียส และเตรียมตัวอย่างปริมาณน้อยกว่า 20 มิลลิกรัม [29]



**อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน** เป็นสมบัติของพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน และกิ่งผลึก ซึ่งที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันการเคลื่อนไหวของสายโซ่จะต่ำมาก ซึ่งเป็นช่วงที่พอลิเมอร์มีลักษณะแข็งเกร็งและเปราะ โดยจะคำนวณจากอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนจำเพาะเพียงครั้งหนึ่ง [29]

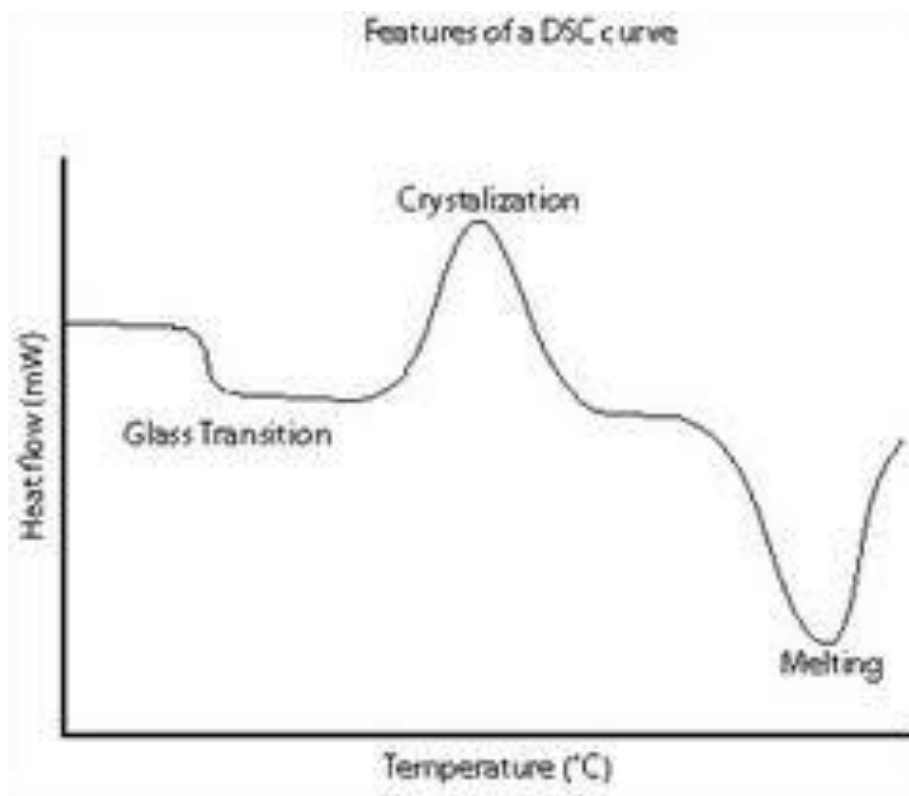
**อุณหภูมิลอมเหลว** เป็นสมบัติของพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่ได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ซึ่งผลึกจะถูกแยกออกและกลายเป็นของไหลหนืด อุณหภูมิลอมเหลวจะปรากฏในลักษณะของพีคการดูดกลืนความร้อน [29]

**อุณหภูมิการเกิดผลึก** เมื่อพอลิเมอร์แบบกิ่งผลึกเย็นตัวลง จะเกิดการจัดเรียงตัวของผลึกและได้พอลิเมอร์แบบผลึก โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดผลึกจะมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว ทำให้แสดงในลักษณะของพีคการคายความร้อนในเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี [29]

พอลิเมอร์ไม่สามารถเกิดผลึกได้ 100% และสามารถวัดระดับการเกิดผลึกได้ดังสมการที่ 2.7

$$\chi = \frac{\Delta H_{SC}}{\Delta H_C} \quad \dots (2.7)$$

รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการดูดหรือคายความร้อนในเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี ซึ่งสังเกตจากทางซ้ายไปขวา การเบี่ยงเบนออกจากเส้นพื้นฐานครั้งแรก คือ ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ถัดมาพื้นที่ใต้พีค เป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ทำให้เกิดผลึก และสุดท้ายพื้นที่ใต้พีคลำดับที่สอง บอกลักษณะการหลอมเหลว หรือปริมาณความร้อนสำหรับการหลอมผลึก [29]



รูปที่ 2.21 การดูดหรือคายความร้อนในเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี [29]

ค่าความร้อนจำเพาะหาได้จากเทคนิคนี้ โดยการวัดความต่างของความร้อนระหว่างสถานะที่มีตัวอย่างกับสถานะอ้างอิงที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งวิธีนี้ใช้ทดสอบความบริสุทธิ์ของสารได้ ส่วนการสลายตัวทางความร้อนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สังเกตจากการคายความร้อน หรือ เกิดการเชื่อมขวางแทน แล้วสุดท้ายสายโซ่ก็ขาด [29]

#### 2.9.6.2 เทคนิคเทอร์โมกราวิเมทรี (Thermogravimetry, TGA)

เทคนิคเทอร์โมกราวิเมทรี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความร้อนที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างภายใต้สภาวะของอุณหภูมิกับเวลาโดยอาศัยหลักสมดุล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอาจเกิดจาก การระเหยของความชื้น การระเหยของสารเติมแต่ง การสลายตัวของพอลิเมอร์ และสารเติมแต่ง การสลายตัวของสี และการสลายตัวของแร่ธาตุที่เติมเข้าไป โดยเทคนิคนี้สามารถบอกความเสถียรทางความร้อนได้ [29]

## 2.10 เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบเจล (Gel permeation chromatography)

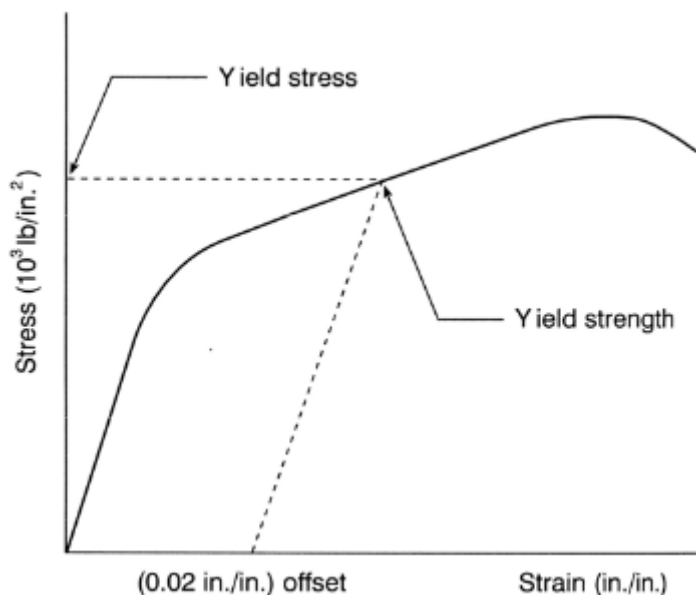
เทคนิคการซึมผ่านแบบเจลใช้สำหรับวิเคราะห์หาการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล โดยอาศัยหลักการแยกขนาดโมเลกุล โมเลกุลขนาดเล็กจะซึมผ่านรูของช่วงคอลัมน์แบบแพ็คเกจออกมาได้ช้า เนื่องจากสามารถแพร่เข้าไปในรูได้ แต่โมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูได้ จึงออกมาได้ก่อน [30]

## 2.11 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลสามารถบอกถึงสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมีของพอลิเมอร์ สำหรับการนำไปใช้งานได้ ปัจจัยทางโครงสร้างที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล การเชื่อมขวาง และกิ่ง การเกิดผลึก และลักษณะของผลึก การเกิดพอลิเมอร์ร่วม การพลาสติกไซเซชัน การจัดเรียงตัวของโมเลกุล สารตัวเติม การผสม การแยกเฟสและการจัดเรียงตัวในพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มแบบเชื่อมต่อ และการผสม เป็นต้น ปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ความถี่ อัตราการให้แรงเค้นหรือความเครียด ความดัน แอมพลิจูดของแรงเค้นและความเครียด ชนิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ประวัติทางความร้อน และสภาวะแวดล้อม เป็นต้น [31]

### 2.11.1 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานอย่างหนึ่งของวัสดุ ซึ่งจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานภายใต้การให้แรงดึงหรือการยืดด้วยอัตราคงที่ โดยจะมีมาตรฐานการทดสอบดังนี้ D412 สำหรับวัสดุยาง D638 สำหรับพลาสติก D897 สำหรับวัสดุแก้ว D987 สำหรับวัสดุกระดาษ D2343 สำหรับเส้นใย และ E8 สำหรับโลหะ การวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานคือ การวัดความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับขนาดของชิ้นงานเริ่มต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมี 2 แบบ คือ แบบยืดหยุ่นและแบบถาวร ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นและถาวร [32]

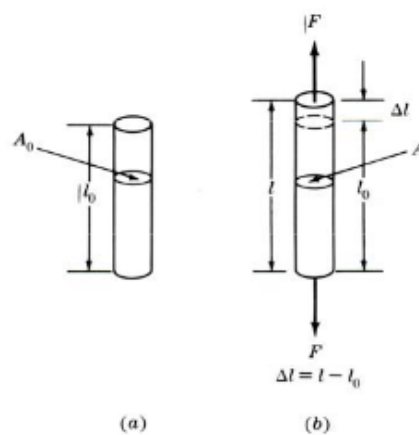
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น คือ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในทิศเดียวกับทิศทางของแรง และเมื่อนำแรงออก ชิ้นงานนั้นสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้ เนื่องจาก โมเลกุลของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงเล็กน้อย ดังนั้น เมื่อนำแรงออก โมเลกุลจึงสามารถกลับมาจัดเรียงตัวแบบเดิมได้ ซึ่งจากรูปที่ 2.22 คือ ในช่วงที่กราฟระหว่างแรงเค้นและความเครียดเป็นสัดส่วนของเส้นตรง และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร คือ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึง และเมื่อนำแรงดึงออก ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร หรือ คือ ช่วงที่วัสดุได้รับแรงสูงกว่าจุดคราก (Yield stress)

แรงเค้น (stress,  $\sigma$ ) สามารถหาได้จาก แรงดึงที่ชิ้นงานทดสอบทนได้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด ดังสมการที่ 2.8 โดยแรงดึงแทนด้วยสัญลักษณ์  $F$  และพื้นที่หน้าตัดแทนด้วยสัญลักษณ์  $A$  หน่วยของแรงเค้น คือ ปาสคาล (Pa)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots \quad (2.8)$$

ความเครียด (strain,  $\varepsilon$ ) เกิดจากเมื่อวัสดุได้รับแรงดึงในทิศทางเดียวดังรูปที่ 2.23 วัสดุจะเกิดการยืดตัว (elongation) ออกตามทิศทางของแรงดึง ดังนั้น ความเครียดจึงหาได้จาก สัดส่วนระหว่างระยะยืดต่อความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ ดังสมการที่ 2.9

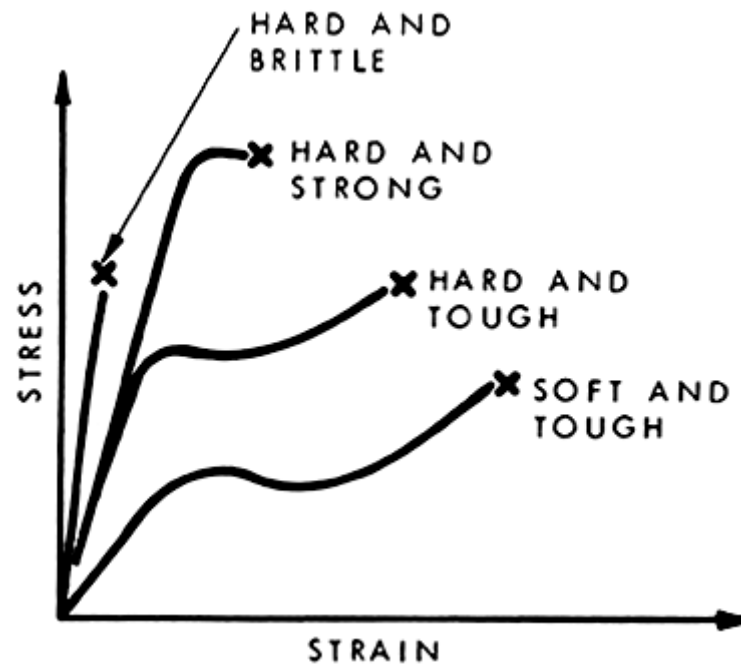
$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \dots\dots(2.9)$$



รูปที่ 2.23 การรับแรงดึงของวัสดุ [32]

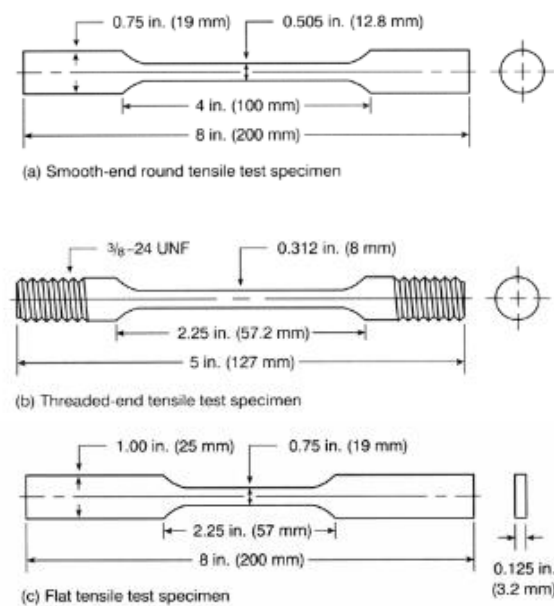
มอดุลัสของยัง (Young's modulus,  $E$ ) หรือมอดุลัสยืดหยุ่น เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรง (stiffness) ของวัสดุ หรือความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงเค้นต่อความเครียด ดังสมการที่ 2.10 หรือความชันของกราฟในรูปที่ 2.22 ช่วงที่เป็นสัดส่วนของเส้นตรง ทำให้สามารถจำแนกพฤติกรรมของพอลิเมอร์ได้ 4 แบบ ดังรูปที่ 2.24 [31-32]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \dots\dots(2.10)$$

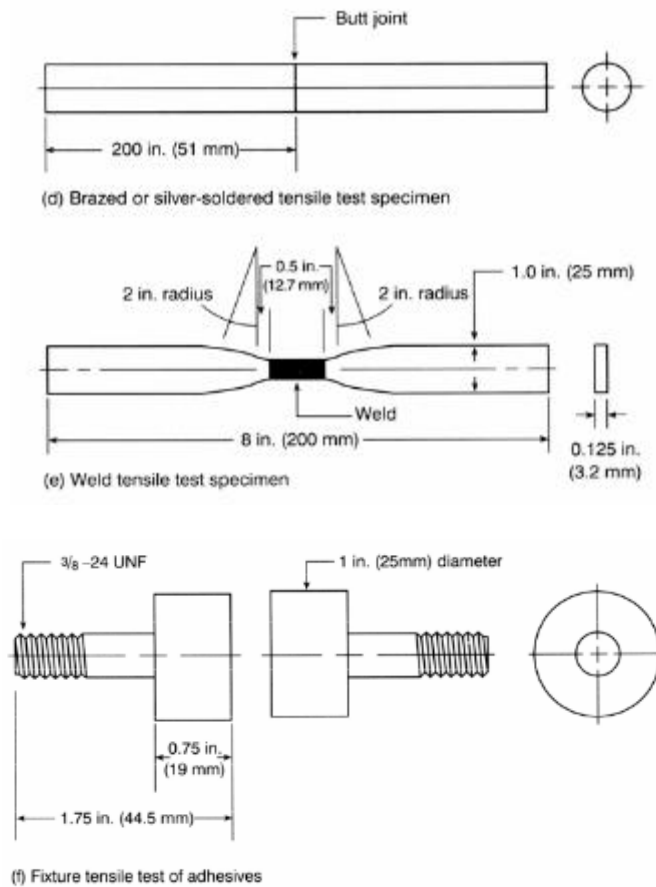


รูปที่ 2.24 พฤติกรรมของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงเค้นและความเครียด [32]

ชิ้นงานสำหรับทดสอบมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับมาตรฐานการทดสอบ และประเภทชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ลักษณะชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 2.25 [32]



รูปที่ 2.25 ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ [32]



รูปที่ 2.25 ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ [32]

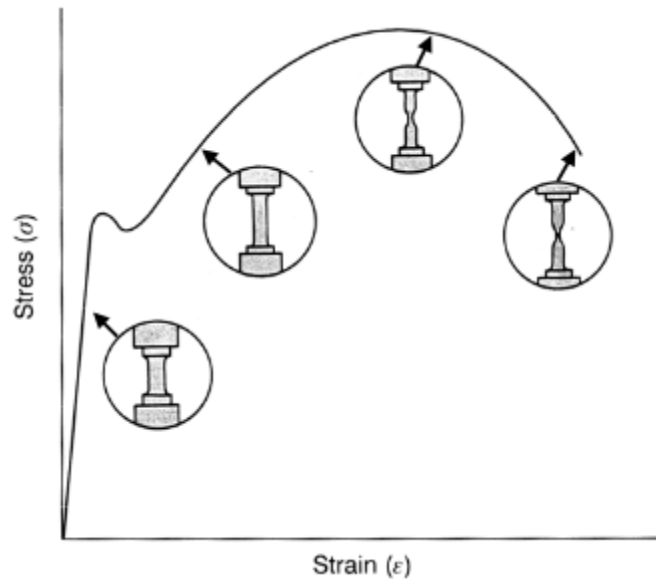
เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Univesal testing machine) ดังรูปที่ 2.26 เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ทดสอบแรงเค้นและความเครียด โดยมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้ ตัวเครื่อง โหลดเซลล์ (load cell) หัวจับชิ้นงาน และคอมพิวเตอร์ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์มีหลักการทำงาน ดังนี้ ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกจับด้วยหัวจับ จากนั้นโหลดเซลล์จะออกแรงกระทำต่อชิ้นงาน แล้วอุปกรณ์ตรวจวัดในโหลดเซลล์จะแปลงค่าเป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่คอมพิวเตอร์ต่อไป [33]



รูปที่ 2.26 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ [33]

กราฟระหว่างแรงเค้นกับความเครียด ที่ได้จากการทดสอบความทนแรงดึงของ ดังรูปที่ 2.27 โดยในช่วงแรกความเครียดมีค่าน้อย และเมื่อให้แรงเค้นเพิ่มขึ้น ความเครียดจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงตามแรงเค้น ซึ่งช่วงนี้เรียกว่า ulyas elastic region) หลังจากนี้ความเครียดจะเริ่มเบนออกจากเส้นตรง จุดแรกที่มีความเครียดเบนออก เรียกว่า จุดจำกัดแบบยืดหยุ่น (proportional limit) ซึ่งจุดนี้สายโซ่ของโมเลกุลจะเกิดการคลายตัว และจัดเรียงตัวใหม่ แรงเค้นจึงมีค่าลดลง จนกระทั่งสายโซ่โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวชิดกัน ทำให้แรงเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลมีอันตรกิริยาระหว่างกันมากขึ้น และเกิดรอยสีขาวขุ่นที่วัสดุ ขณะยืดตัว จากนั้นเมื่อวัสดุได้รับแรงเค้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเกิดคอคอดที่วัสดุ และขาดในที่สุด



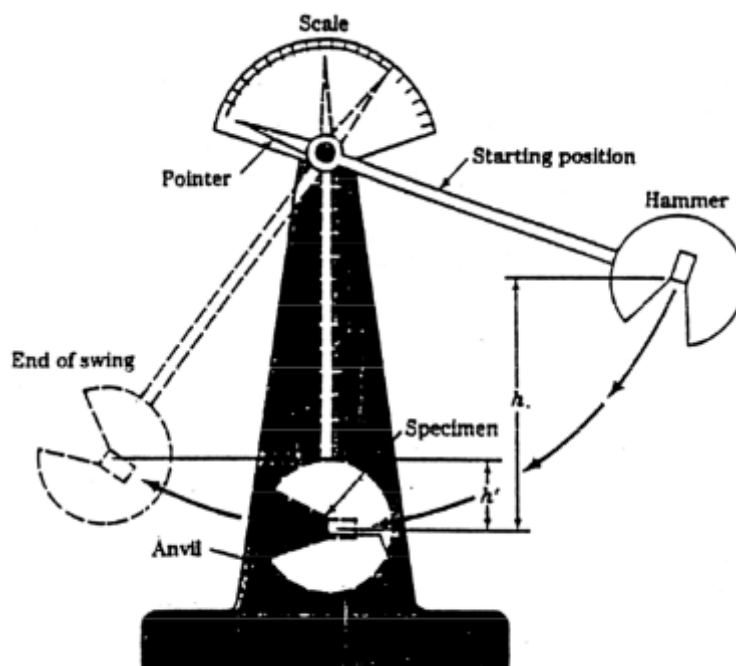


รูปที่ 2.27 กราฟระหว่างแรงเค้นและความเครียด [32]

ในทางปฏิบัติ แรงเค้นแท้จริง มีค่าเป็นไปตามทฤษฎี จนกระทั่งถึงช่วงบริเวณที่เกิดคอบอด แรงเค้นแท้จริงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดลดลง แต่สำหรับทางทฤษฎี ค่าแรงเค้นมีค่าลดลง เนื่องจากคำนวณจากค่าพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น [32]

### 2.11.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact test)

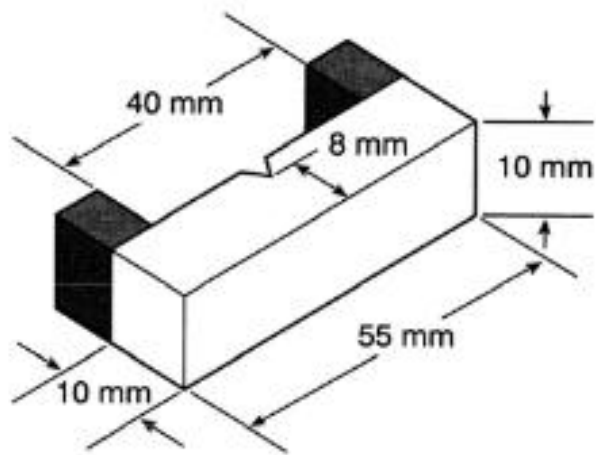
การทดสอบความทนแรงกระแทก เป็นการทดสอบการแตกหักแบบฉับพลัน โดยจะวัดพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก ซึ่งคำนวณได้จากพลังงานจลน์ที่สูญเสียไปของลูกตุ้มที่ใช้สำหรับการกระแทกชิ้นงาน โดยจะทราบค่าน้ำหนักลูกตุ้มแน่นอน [33-34] ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก [35]

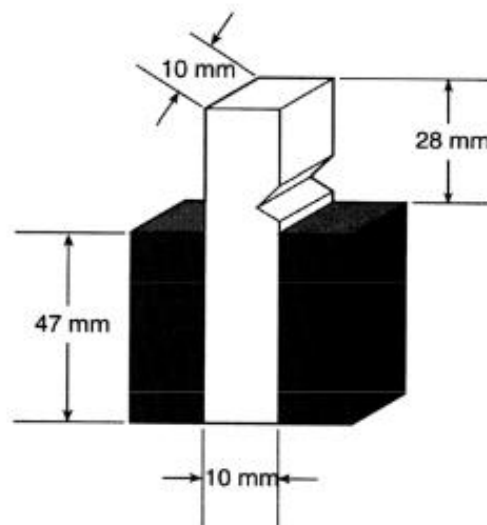
สมบัติความทนแรงกระแทกของวัสดุสัมพันธ์กับความแกร่ง (toughness) ซึ่งความเหนียวและความแข็งแรงมีอิทธิพลต่อความแกร่งของวัสดุ ดังนั้น การทดสอบความทนแรงกระแทกจึงบอกถึงความแกร่งของวัสดุได้

การทดสอบมี 2 แบบ คือ แบบชาร์ปี และแบบไอซอด โดยชิ้นงานจะมีรอยบากและขนาดเล็ก ซึ่งจะถูกระแทกด้วยแรงเหวี่ยงจากลูกตุ้ม ในการทดสอบแบบชาร์ปี จะยึดชิ้นงานในลักษณะคานเดี่ยว ดังรูปที่ 2.29 และตีกระแทกบริเวณด้านหลังของรอยบาก และในการทดสอบแบบไอซอด จะยึดชิ้นงานในลักษณะคานโยก ดังรูปที่ 2.30 และตีกระแทกที่ปลายด้านหน้ารอยบาก ซึ่งบริเวณรอยบาก จะเป็นจุดที่ดูดซับพลังงานไว้ที่จุดเดียว เพื่อป้องกันการเกิดการคดงอมากกว่าการแตกหัก เนื่องจากการไม่มีรอยบาก แรงคั้นจะกระจายไปทั่วชิ้นงาน ลักษณะการแตกหักที่เกิดจากการกระแทกแสดงดังรูปที่ 2.31 [34]



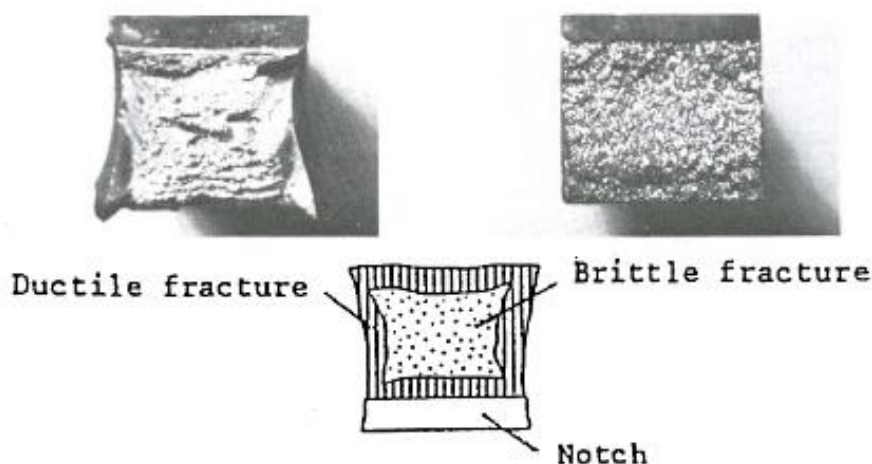
Charpy test specimen

รูปที่ 2.29 การทดสอบชิ้นงานแบบชาร์ปี [35]



Izod test specimen

รูปที่ 2.30 การทดสอบชิ้นงานแบบไอซอด [35]

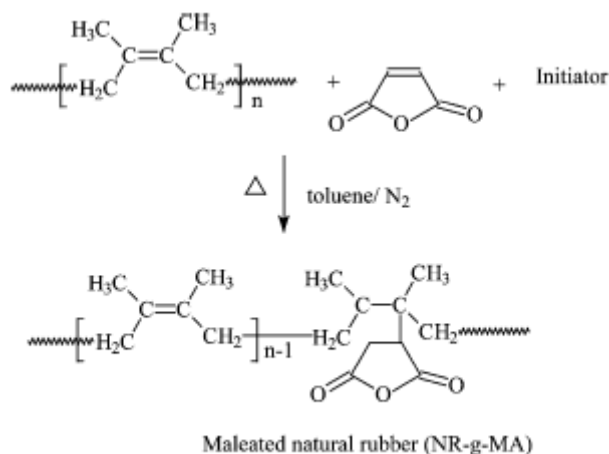


รูปที่ 2.31 ลักษณะการแตกหักจากการกระแทก [35]

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bitinis และคณะ [41] ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของพอลิเล็กทิกแอซิดผสมกับยางธรรมชาติ โดยทำการผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับยางธรรมชาติด้วยเครื่องอินเทอร์นอลมิกเซอร์ แล้วอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดสกรู จากนั้นขึ้นรูปด้วย เครื่องอัดแบบ จึงได้ชิ้นตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา และทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งพบว่า ยางธรรมชาติทำให้สีและความโปร่งแสงของพอลิเล็กทิกแอซิดเปลี่ยนไป คือ มีสีเหลืองและโปร่งแสงลดลงเนื่องจากการเข้ากันได้ไม่ดีเพียงพอ ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่า มีการแยกวัฏภาคกัน โดยอนุภาคของยางจะกระจายตัวเป็นหยดเล็ก ๆ และมีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำกับพอลิเล็กทิกแอซิด การกระจายตัวขนาดของยางธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกันที่ปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเล็กทิกแอซิด แต่ที่ปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีขนาดของยางธรรมชาติที่กระจายตัวอยู่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคยาง และเมื่อเติมยางธรรมชาติทำให้พอลิเล็กทิกแอซิดเปลี่ยนจากการแตกหักแบบเปราะเป็นการแตกหักแบบเหนียว แต่ลดมอดูลัสของยังและความทนทานต่อแรงดึง เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นส่วนที่ดูดซับแรง และเกิดการแตกออกของพันธะที่บริเวณระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคยางธรรมชาติและพอลิเมอร์เมทริกซ์

Nakason และคณะ [36] ศึกษาผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติมาเลเอต โดยนำยางธรรมชาติกราฟต์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในระบบตัวทำละลายโทลูอีน และมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา แล้วทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน ปริมาณการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และสมบัติทางความร้อน พบว่า ยางธรรมชาติกราฟต์แสดงการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดช่วง  $1780 - 1784 \text{ cm}^{-1}$  และแสดงพีกที่ตำแหน่ง  $1854 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอนิล โดยความเข้มของพีกจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ และมีความเข้มสูงสุดเมื่อใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ เมื่อเพิ่มปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์มากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก กลับพบว่า ความเข้มของพีกลดลงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกราฟต์ลดลงเนื่องจากเกิดการย้ายสายโซ่ (chain transfer) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบนยางธรรมชาติไม่ควรเกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ



รูปที่ 2.32 แสดงปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางธรรมชาติกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [36]

Nakason และคณะ [37] ศึกษาสมบัติทางความร้อน การไหล และสถานะวนวิทยาของยางธรรมชาติมาเลเอต และยางธรรมชาติมาเลเอตผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยเตรียมยางธรรมชาติมาเลเอต และผสมยางธรรมชาติมาเลเอตกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในเครื่องอินเทอร์นอล

มิกเซอร์ จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา พบว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีการกระจายตัวที่ดี เมื่อเพิ่มปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในยางธรรมชาติมาเลอเดต เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปรับปรุงความเป็นขี้ของยางธรรมชาติมาเลอเดต ทำให้สามารถทำอันตรกิริยากับหมู่ที่มีขี้ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้ และค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและค่าการดูดซับพลังงานพลวัตของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ และการทำอันตรกิริยาทางเคมีของยางธรรมชาติมาเลอเดตในพอลิเมอร์ผสม

Ho และคณะ [39] ศึกษาความเข้ากันได้และศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเทอร์โมพลาสติก พอลิโอฟีน อีลาสโตเมอร์ (ทีพีโอ) กับพอลิเล็กทิกแอซิด โดยมีพอลิเล็กทิกแอซิดผสมกับทีพีโอ (ทีพีโอกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด) เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมทำได้โดย นำยางธรรมชาติมาเลอเดตมาละลายในระบบตัวทำละลายโทลูอีน แล้วผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิด จากนั้นตกตะกอนพอลิเมอร์ผสม แล้วนำมาผสมกับทีพีโอและพอลิเล็กทิกแอซิดในเครื่องอินเทอร์นอลมิกเซอร์ ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ ทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบ พบว่า ทีพีโอกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดมีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่  $1758\text{ cm}^{-1}$  เท่านั้น และการทดสอบความเข้ากันได้ด้วยวิธีโมลา (molau) พบว่า ทีพีโอผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดมีการแยกวัฏภาคเกิดขึ้น แต่ทีพีโอผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดที่มีทีพีโอกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ มีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์สีขาวขุ่น ซึ่งทีพีโอผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดนั้น มีขนาดอนุภาคของทีพีโอที่กระจายตัวอยู่ในพอลิเล็กทิกแอซิดใหญ่กว่า ทีพีโอผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดที่มีทีพีโอกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ และช่วยลดความตึงระหว่างผิวสัมผัส (interfacial tension) มอดูลัสของยังและความทนทานต่อแรงดึงของทีพีโอผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดทั้งที่มีและไม่มีทีพีโอกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด พบว่า มีค่าต่ำกว่าพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ เนื่องจากทีพีโอผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ และพอลิเมอร์ผสมทั้งสองมีมอดูลัสของยังและความทนทานต่อแรงดึงเท่ากัน เนื่องจากระดับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสไม่มีผลต่อการปรับปรุงความทนทานต่อแรงดึงที่ต่ำ แต่พอลิเมอร์ร่วมที่มีสารเสริมสภาพเข้ากันได้

สามารถยึดได้มากขึ้น เนื่องจากทีฟิโอกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิดช่วยดูดซับพลังงานในการแตกหัก และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสระหว่างทีฟิโอและพอลิเล็กทริกแอซิด

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้กำหนดไว้ 5 ขั้นตอนหลัก และแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 3.1.1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

3.1.1.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และสืบค้นรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.1.2 วางแผนงานของการวิจัย กำหนดขั้นตอน และวิธีการทดลอง

3.1.1.3 จัดหาวัสดุคิบบสารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.2 เตรียมพอลิเมอร์ผสมและชิ้นงานทดสอบ

3.1.2.1 เตรียมยางธรรมชาติมาเลเอต

3.1.2.2 เตรียมยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.1.2.3 ผสมพอลิเล็กทิกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วยเครื่องอัลตราซอกรู

3.1.2.4 อัดแบบรูปชิ้นทดสอบ

##### 3.1.3 วิเคราะห์และทดสอบ

3.1.3.1 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลเอต

3.1.3.1.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

3.1.3.1.2 วิเคราะห์หาโครงสร้างทางเคมี

3.1.3.1.3 วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว

3.1.3.2 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.1.3.2.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

3.1.3.2.2 วิเคราะห์หาร้อยละการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

3.1.3.2.3 วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเล็กทิกแอซิด และพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.1.3.2.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

3.1.3.3 วิเคราะห์พอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.1.3.3.1 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

3.1.3.3.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา และความสามารถในการ



### กระจายตัวของอนุภาคยาง

3.1.3.4 ทดสอบพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์  
พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.1.3.4.1 ทดสอบความทนแรงดึง (Universal test)

3.1.3.4.2 ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Impact test)

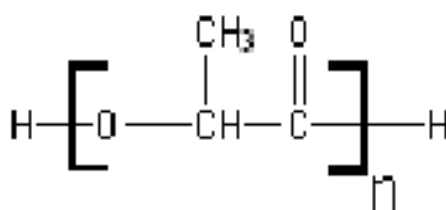
3.1.4 วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลงานวิจัย

3.1.5 เสนอผลงานวิทยานิพนธ์

## 3.2 วัสดุดิบและสารเคมี

วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

3.2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ของ NatureWorks ชื่อทางการค้า Ingeo™ เกรด 2003D จาก บริษัท บีซี โพลีเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด (ประเทศไทย) โดยมีโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 3.1 และสมบัติดังตารางที่ 3.1

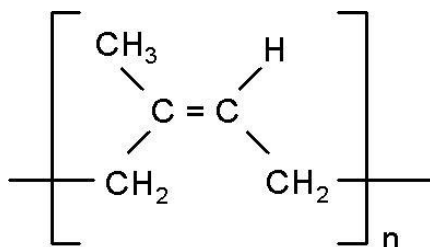


รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเกรด 2003D

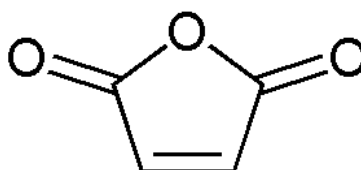
สมบัติ	หน่วย	มาตรฐานการทดสอบ	2003D
ความถ่วงจำเพาะ	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792	1.24
อัตราการไหลของมวลขณะหลอมเหลว	g/10min	ASTM D1238	6
ความต้านแรงดึง	MPa	ASTM D882	60
ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	%	ASTM D882	6.0
ความทนแรงกระแทกแบบไอซอด	J/m	ASTM D256	16
อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน	°C	ASTM E2092	55

3.2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) จาก บริษัท สักคารุงเรืองกิจ จำกัด มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

3.2.3 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) เกรด 99% จากบริษัท เอส.เอ็ม. เคมีคอล ซัพพลาย จำกัด (ประเทศไทย) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.3 และสมบัติดังตารางที่ 3.2

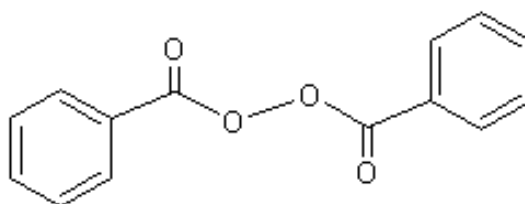


รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ตารางที่ 3.2 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

สมบัติ	หน่วย	MA
น้ำหนักโมเลกุล	AMU	98.06
จุดหลอมเหลว	°C	52
ความบริสุทธิ์	%	99

3.2.4 เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, BPO) เกรด 98% จาก บริษัท เพนรีแอก จำกัด (สหภาพยุโรป) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.4 และสมบัติดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 3.3 สมบัติของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

สมบัติ	หน่วย	DCP
น้ำหนักโมเลกุล	g/mol	242.23
จุดวาบไฟ (closed cup)	°C	80
ลักษณะ	-	ผลึกสีขาว
ปริมาณ active oxygen	%wt	~6
ความหนาแน่น	g/mL	0.53
จุดหลอมเหลว	°C	105
ความบริสุทธิ์	%	98

3.2.5 โทลูอีน (Toluene) แอซีโตน (Acetone) และเมทานอล (Methanol, MeOH) จาก ห้างหุ้นส่วนจำกัด สภาพร กรู๊ป (ประเทศไทย)

3.2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) และฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) จาก บริษัท อาแจ็กซ์ ไลน์เค็ม จำกัด (ประเทศเบลเยียม)

3.2.7 เตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) จาก บริษัท เอส.เค. เคมีคอล จำกัด (ประเทศเกาหลี)

3.2.7 โพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide, KBr) จาก บริษัท อนาลาร์ จำกัด (ประเทศอังกฤษ)

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมยางธรรมชาติมาเลเอต และยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิแล็กติก แอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.3.1.1 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่งยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT (Greifensee, Switzerland)

3.3.1.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7

3.3.1.3 บีกเกอร์ขนาด 500, 1000 และ 2000 มิลลิลิตร

3.3.1.4 แท่งแก้วคน

3.3.1.5 บิวเรต

3.3.1.6 ผ้าขาวบาง

3.3.1.7 ตู้ดูดควัน

### 3.3.1.8 ตู้อบสารเคมี

3.3.1.9 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ของบริษัท เทอร์โม ปรินซ์ จำกัด รุ่น TSE-16-TC (New Hampshire, USA) ใช้สำหรับเตรียมพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักรีดต่ำ

3.3.1.10 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Pellitizer) ของบริษัท เทอร์โม ปรินซ์ จำกัด รุ่น TSE-16-TC (New Hampshire, USA)

### 3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิดกับยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักรีดต่ำ

3.3.2.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ของบริษัท เทอร์โม ปรินซ์ จำกัด รุ่น TSE-16-TC (New Hampshire, USA) ใช้สำหรับผสมพอลิเมอร์ผสมของทุกสูตร

3.3.2.2 เครื่องอัดแบบ (compression mold) ของบริษัท แล็บเทคเอ็นจิเนียริง จำกัด รุ่น V508-18-CX (สมุทรปราการ, ประเทศไทย)

### 3.3.3 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลต

3.3.3.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ thermo scientific รุ่น Nicolet 6700 (Madison, USA)

3.3.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกสเปกโตรมิเตอร์ (Proton nuclear magnetic spectrometer, NMR) ยี่ห้อ Varian รุ่น UNITY INOVA 500 (Vernon Hills, USA)

3.3.3.3 วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC (Massachusetts, USA)

### 3.2.4 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักรีดต่ำ

3.2.4.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo scientific รุ่น Nicolet 6700 (Madison, USA)

3.2.4.2 วิเคราะห์หาร้อยละการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักรีดต่ำตามมาตรฐาน ASTM D180

3.2.4.3 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเล็กทิกแอซิด และพอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแอนาไลเซอร์แบบเจล ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น SIL-10AD (Kyoto, Japan)

3.2.4.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC (Massachusetts, USA) และเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 (Columbus, Ohio)

**3.2.3 วิเคราะห์พอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์ พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ**

3.2.3.1 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC (Massachusetts, USA) และเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 (Columbus, Ohio)

3.2.3.2 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาคอย่างด้วกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ( scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ Joel รุ่น JSM-6480LV (Tokyo, Japan)

**3.2.4 ทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ**

3.2.4.1 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR 100K (Bognor Regis, UK)

3.3.4.2 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Tester) ยี่ห้อ GOTECH (Taichung City, Taiwan)

### 3.4 ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.4.1 เตรียมยางธรรมชาติมาเลอเด

เตรียมยางธรรมชาติมาเลอเด โดยการผสมยางธรรมชาติ 25 กรัม กับ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในระบบตัวทำละลายโทลูอีน 500 มิลลิลิตร ที่สัดส่วนปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ และใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมกวนตลอดเวลา

### 3.4.2 เตรียมยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.4.2.1 เตรียมพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยนำเม็ดพอลิเล็กทิกแอซิด หลอมอัดรีด 2 รอบ ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ โดยมีอุณหภูมิในการหลอมอัดรีดคือ 180, 180, 170, 160 และ 135 องศาเซลเซียส

3.4.2.2 เตรียมยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยการกราฟต์ยางธรรมชาติมาเลอเตกับพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในสัดส่วน 1:1 ในระบบ ตัวทำละลายโทลูอีน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พร้อมกวน ตลอดเวลา เมื่อของผสมเกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปตกตะกอนในสารละลายเมทานอล แล้วกรองเอาสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก จากนั้นระเหยเอาตัวทำละลายออกโดยตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควัน จนกว่าสารละลายจะระเหยหมด แล้วนำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.4 สูตรการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติ มาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

สูตร	ร้อยละของมาเลอิกูแอนไฮไดรด์ (เทียบกับน้ำหนักของยางธรรมชาติ)	ยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ [ยางธรรมชาติมาเลอเต (กรัม) : พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (กรัม)]	พอลิเมอร์ผสม [พอลิเล็กทิกแอซิด : ยางธรรมชาติ มาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ]
MNR1	10	1:1	90:10 80:20 70:30 60:40
MNR2	20	1:1	90:10 80:20 70:30 60:40
Blank	-	-	PLA95:NR5 PLA90:NR10 PLA85:NR15 PLA80:NR20
PLA 100%	-	-	100

\*PLA คือ โพลีแล็กติกแอซิด, MNR คือ ยางธรรมชาติมาเลเอต และ NR คือ ยางธรรมชาติ

### 3.4.3 การผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

ทุกๆสูตรตามตารางที่ 3.4 จะถูกผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ดังรูปที่ 3.5 และใช้อุณหภูมิในการผสมดังนี้ 180, 180, 170, 160 และ 135 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และทำการตัดเส้นพอลิเมอร์ที่ถูกอัดรีดออกมาเป็นเม็ดพลาสติก ด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติกดังรูปที่ 3.6 ความเร็วรอบสกรู 120 rpm



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดรีดสกรูคู่

### 3.4.5 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมใส่ลงแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.7 ที่มีแผ่นไมล่ำปิดประกบ จากนั้นเข้าเครื่องอัดแบบ ดังรูปที่ 3.8 โดยใช้อุณหภูมิในการอัดแบบ 180 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้สำหรับการอัดแบบ ดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.6 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก

ตารางที่ 3.5 เวลาที่ใช้สำหรับการอัดแบบ

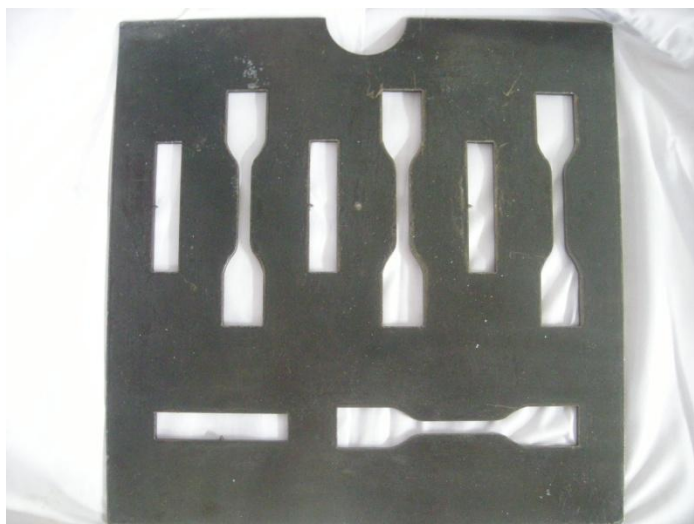
การดำเนินการ	เวลา (s)
Pre-Heating time	300
Pressing before pre-heating time	5
Final pressing time	200
Cooling time	200

### 3.4.6 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลเอต

3.4.6.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปี (Fourier transform spectroscopy, FTIR)

นำสารละลายยางธรรมชาติมาเลเอตที่มีสัดส่วนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ป้ายลงบนแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วนำไปอบให้ตัวทำละลายระเหยหมดในตู้อบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปียี่ห้อ thermo scientific รุ่น Nicolet 6700 ดังรูปที่ 3.9





รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์สำหรับการอัดแบบ



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดแบบ

3.4.6.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic spectroscopy,  $^1\text{H-NMR}$ )

3.4.6.3 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการวัดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปีชื่อ thermo sciencetific



รูปที่ 3.10 เครื่องดีพีเอฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ชื่อ Perkin Elmer

### 3.4.7 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กติกแอซิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำ

#### 3.4.7.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปี

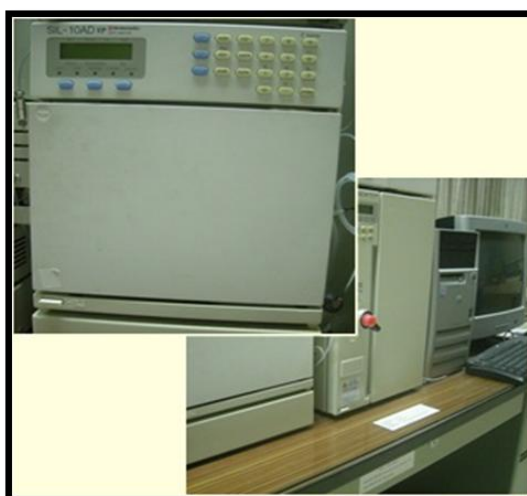
(Fourier transform spectroscopy, FTIR)

นำยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กติกแอซิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นวงกลม จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรสโกปียี่ห้อ thermo scientific รุ่น Nicolet 6700

#### 3.4.7.2 วิเคราะห์หาร้อยละการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

นำยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กติกแอซิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำ 1 กรัม ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมกวนตลอดเวลา จากนั้นเติมตัวทำละลายเอซีโตนปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในสารละลายยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กติกแอซิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำ ที่อุณหภูมิห้อง พร้อมกวนตลอดเวลา เพื่อละลายมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก แล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายระเหยหมด แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำตะกอนที่แห้งแล้วละลายในตัวทำละลายโทลูอีนอีกครั้ง แล้วนำไปวิเคราะห์หาร้อยละการกราฟต์ตามมาตรฐาน ASTM D180

3.4.7.3 วิเคราะห์น้ำหนักรโมเลกุลของพอลิเล็กติกแอซิด และพอลิเล็กติกแอซิดน้ำหนักรโมเลกุลต่ำด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแอนาไลเซอร์ แบบเจลยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น SIL-10AD ดังรูปที่ 3.11 โดยนำพอลิเล็กติกแอซิดทั้งสองละลายในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟuran จากนั้นนำไปกรอง ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.11 เครื่องโครมาโทกราฟีแอนาไลเซอร์ แบบเจลยี่ห้อ SHIMADZU

3.4.7.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการวัดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC และวัดอุณหภูมิการสลายตัว ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo

### 3.4.8 วิเคราะห์พอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทริกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.4.8.1 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการวัดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC โดยใช้สภาวะดังตารางที่ 3.6 และวัดอุณหภูมิการสลายตัว ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 ในช่วงอุณหภูมิ 25-950 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.4.8.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา และการกระจายตัวอนุภาคของ พอลิเล็กทริกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทริกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยการสังเกตพื้นผิวบริเวณที่แตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ( scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ Joel รุ่น JSM-6480LV ดังรูปที่ 3.13 โดยใช้ชั้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแล้วในการส่องดูพื้นผิวที่เกิดการแตกหัก โดยทำการเคลือบชั้นทดสอบด้วยทองคำก่อนการส่องดูพื้นผิว และใช้กำลังขยาย 200 เท่า

ตารางที่ 3.6 ภาวะการทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

สภาวะที่ใช้	อัตราการให้ ความร้อน (°C/min)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แก๊สที่ใช้
Dynamic	10	-	30 - 200	N <sub>2</sub>
Isothermal	-	3	200	N <sub>2</sub>
Dynamic	10	-	200 - -20	N <sub>2</sub>
Isothermal	-	3	-20	N <sub>2</sub>
Dynamic	10	-	-20 - 200	N <sub>2</sub>



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Joel

### 3.4.9 ทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติ มาเลอเทกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.4.9.1 ทดสอบความต้านแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 100K ดังรูปที่ 3.13 โดยใช้ชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.14 และใช้ภาวะการทดสอบดังตารางที่ 3.7 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบเนกประสงคื้ห้อ LLOYD รุ่น LR 100K

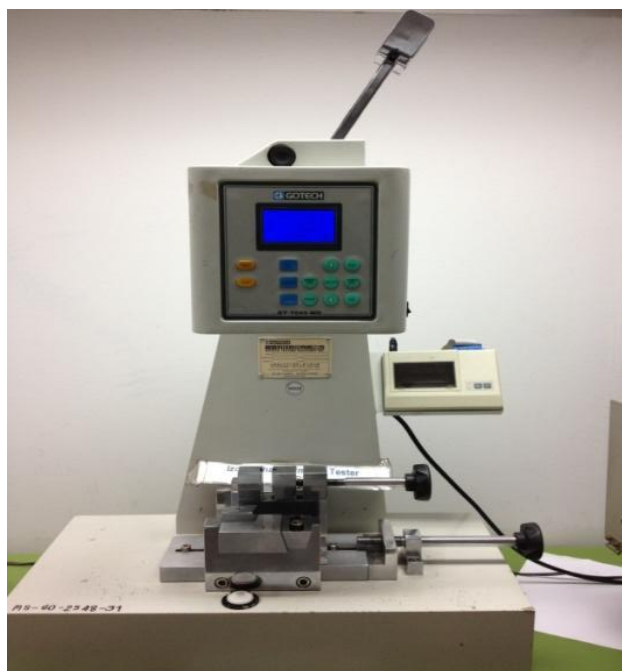


รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง

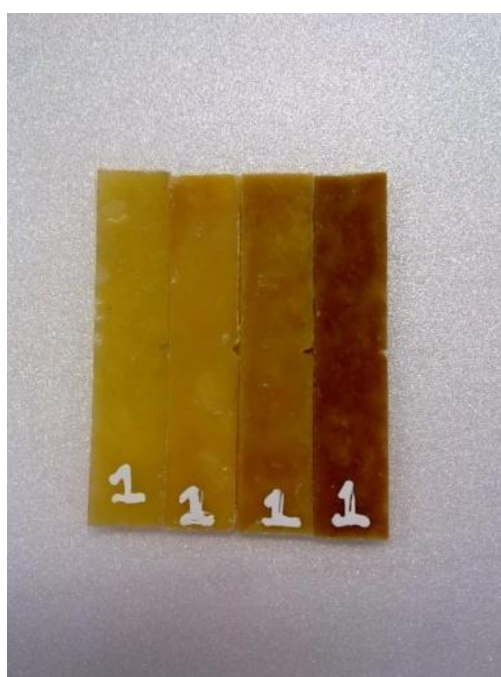
ตารางที่ 3.7 ภาวะการทดสอบความต้านแรงดึง

ภาวะการทดสอบ	แรง/ระยะ/ความเร็ว/เวลา
โหลดเซลล์ (load cell)	100 kN
ระยะหัวจับชิ้นทดสอบ	115 mm
ความเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ	50 mm/min

3.4.9.2 ทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Tester) ยี่ห้อ GOTECH ดังภาพที่ 3.15 โดยชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบความทนแรงกระแทกดังรูปที่ 3.16 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ยี่ห้อ GOTECH



รูปที่ 3.17 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทก

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ได้ปรับปรุงความเหนียวของพอลิเล็กทิกแอซิด โดยการผสมกับยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์กับพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เพื่อเพิ่มสภาพเข้ากันได้กับพอลิเล็กทิกแอซิด ยางธรรมชาติมาเลเอตสังเคราะห์โดยนำยางธรรมชาติ (ยางแผ่นรมควัน) กราฟต์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ หลังจากนั้นจึงนำยางธรรมชาติมาเลเอตทำปฏิกิริยากับพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ที่เตรียมจากกระบวนการหลอมอัดรีดในเครื่อง twin screw 1 รอบ) ในอัตราส่วน 1:1 ได้ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งโครงสร้างของยางธรรมชาติมาเลเอต และยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสมบัติทางความร้อนได้นำไปวิเคราะห์ก่อนจะนำไปทำกระบวนการต่อไป จากนั้นนำยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดในอัตราส่วนต่าง ๆ และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งผลของปริมาณยางธรรมชาติและปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในยางธรรมชาติดัดแปรที่มีผลต่อพอลิเมอร์ผสมจะได้รับการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ลักษณะพื้นฐานวิทยาและทดสอบสมบัติเชิงกล ดังแสดงไว้ดังในบทนี้

#### 4.1 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลเอต

##### 4.1.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

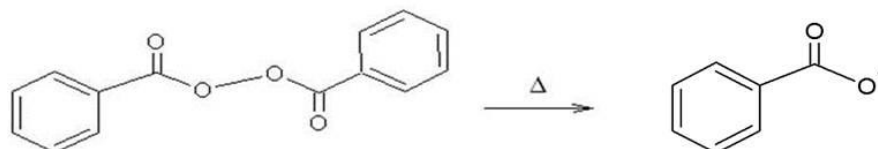
##### (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

ยางธรรมชาติมาเลเอต เตรียมโดยนำยางธรรมชาติในรูปยางแผ่นรมควันมาทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในสัดส่วนปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ปฏิบัติการดำเนินการในตู้ทำละลายโทลูอีนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา จากนั้นนำสารละลายยางธรรมชาติมาเลเอตเทลงบนกระดาษฟิวส์แห้งให้แห้งจนตัวทำละลายระเหยหมด แล้วนำไปอบให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม

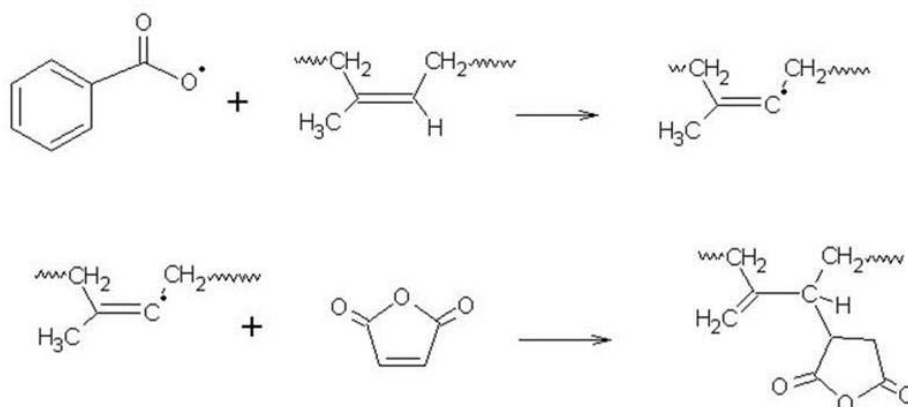


อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่สนใจคือหมู่มาเลตคาร์บอนิล ( maleate carbonyl,  $-C=O$ ) ที่คาดว่าจะปรากฏอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติมาเลต จากปฏิกิริยาการกราฟต์ ดังรูปที่ 4.1 [36-37] และสเปกตรัมของยางธรรมชาติมาเลตแสดงไว้ ดังรูปที่ 4.2

Initiation :



Propagation :

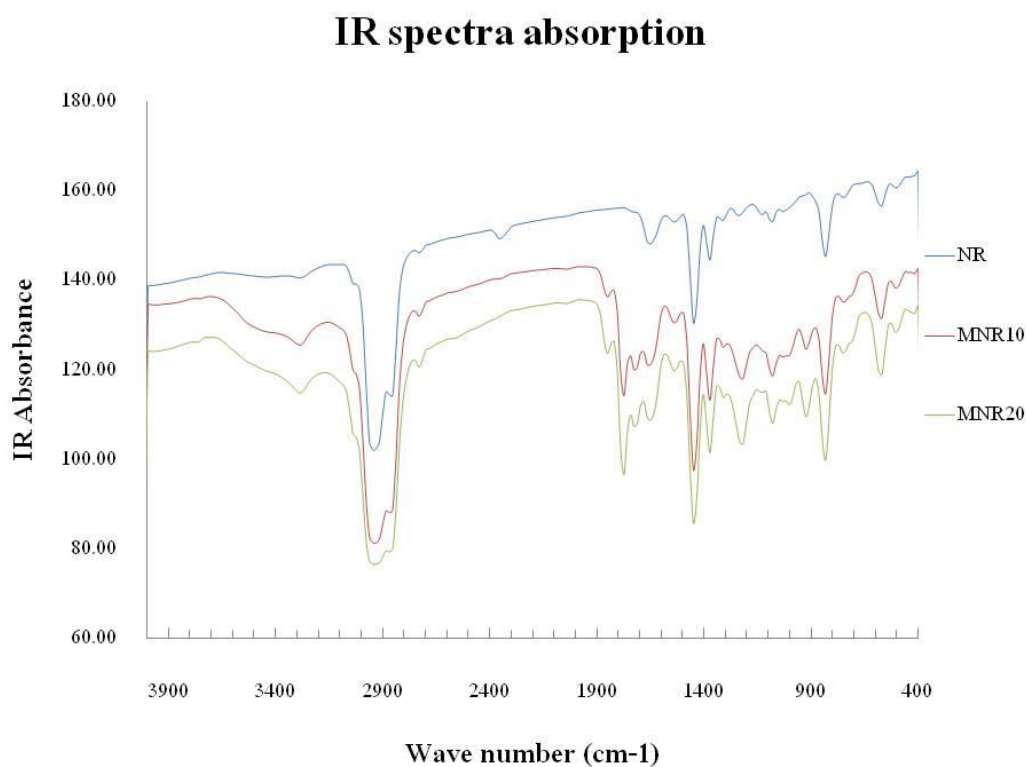


รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลตโดยใช้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเริ่ม

เมื่อนำตัวอย่างยางธรรมชาติมาเลตที่มีปริมาณหมู่มาเลตร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเทอร์มิสโก้ thermo scientific รุ่น Nicolet 6700 ได้ผลแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติมาเลต ดังรูปที่ 4.2 พบว่า ยางธรรมชาติมาเลตมีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่  $1778$  และ  $1853\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอยู่ในช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่คาร์บอนิลที่มีการสั่นแบบสมมาตร และอสมมาตรของวงมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [36-37] ในขณะที่ยางธรรมชาติจะไม่ปรากฏช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดดังกล่าว ดังนั้น จากรูปที่ 4.2 สามารถ

ยืนยันได้ว่า เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์กับยางธรรมชาติ และได้เป็นยางธรรมชาติมาเลอิต

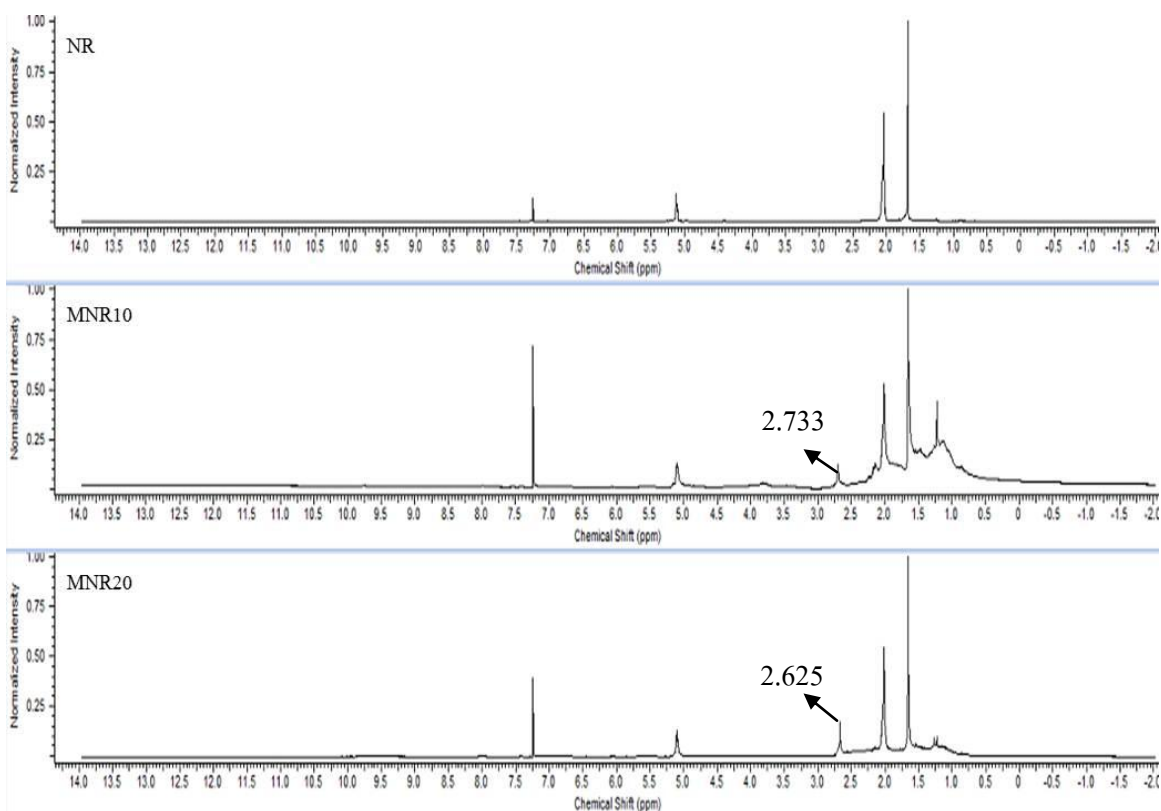
นอกจากนี้ ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีผลต่อความเข้มของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะสังเกตได้ดังรูปที่ 4.2 พบว่า ยางธรรมชาติมาเลอิตที่มีสัดส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ มีความเข้มของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสูงกว่ายางธรรมชาติมาเลอิตที่มีสัดส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า ยางธรรมชาติมาเลอิตที่มีปริมาณมาเลอิตสูง เป็นผลมาจากเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์มากกว่ายางธรรมชาติมาเลอิตที่มีปริมาณมาเลอิตต่ำ



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติมาเลอิต

#### 4.1.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy, $^1\text{H-NMR}$ )

โปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่บ่งบอกถึงสภาพของโปรตอนในสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยอาศัยการทำอันตรกิริยากันระหว่างรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าและนิวเคลียส (โปรตอน) ในบริเวณสนามแม่เหล็ก ดังนั้น การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติมาเลเอตจึงสามารถแยกความแตกต่างได้ด้วยเครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ดังแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่า ยางธรรมชาติมาเลเอตที่มีปริมาณมาเลเอตร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ปรากฏค่าเคมีคัลชิฟท์ของโปรตอนที่ตำแหน่ง 2.733 และ 2.625 ppm ซึ่งอยู่ในช่วงเคมีคัลชิฟท์ของโปรตอนในวงแหวนแอนไฮไดรด์ (ที่โดยทั่วไปจะมีค่าเคมีคัลชิฟท์ในช่วง 2.3 – 2.8 ppm) [38] ดังนั้น จึงยืนยันได้ว่า เกิดปฏิกิริยาการกราฟระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์กับยางธรรมชาติ ได้เป็นยางธรรมชาติมาเลเอต



รูปที่ 4.3 ค่าเคมีคัลชิฟท์ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติมาเลเอต

#### 4.1.3 วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

##### (Differential scanning calorimetry, DSC)

ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) พบได้อย่างชัดเจนในพอลิเมอร์ไม่มีผลึก (amorphous polymer) เช่น ยางธรรมชาติ จุด  $T_g$  บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่สายโซ่พอลิเมอร์เริ่มมีการเคลื่อนไหวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน การเติมหมู่มาเลอเดตเข้าไปในโมเลกุลยางคาดว่า ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางมีความกะกะจืดเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี โดยในการวิเคราะห์ครั้งนี้ จะทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -20 – 200 องศาเซลเซียส มีสถานะดำเนินการ 5 สถานะ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 ช่วงสองขั้นตอนแรกเป็นการลบประวัติทางความร้อนของยางธรรมชาติมาเลอเดต ขั้นตอนที่ 3 เป็นการทำให้พอลิเมอร์เย็นตัวลง ด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ ซึ่งที่ขั้นตอนนี้ จะสังเกตเห็นอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ และขั้นตอนที่ 5 เป็นการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ ด้วยอัตราการให้ความร้อนคงที่ ซึ่งจะสังเกตเห็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และอุณหภูมิการหลอมเหลว

ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติมาเลอเดต แสดงดังตารางที่ 4.1 และค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาตินั้น ได้มาจากข้อมูลในบทที่ 2 แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งพบว่า ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาตินั้นมีค่า -75 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติมาเลอเดตที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮโดรคีย์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ มีค่า 55.05 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีค่าเพิ่มขึ้นจากยางธรรมชาติ เนื่องจากการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮโดรคีย์บนยางธรรมชาติ ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ ด้วยวงแหวนมาเลอเดตที่อยู่บนยางธรรมชาติมาเลอเดต [36] แต่สำหรับยางธรรมชาติมาเลอเดตที่มีปริมาณมาเลอเดทร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาตินั้น ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันไม่ปรากฏ อาจเนื่องจากสภาวะอุณหภูมิที่ใช้งานมีค่าต่ำไม่พอกับอุณหภูมิการเคลื่อนไหวของสายโซ่ของยางธรรมชาติมาเลอเดตที่มีปริมาณมาเลอเดทร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ซึ่งจากรายงานของงานวิจัยที่ผ่านมามีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติมาเลอเดตที่

สัดส่วนนี้ มีค่า -58.78 องศาเซลเซียส [36] หรือส่วนของยางธรรมชาติมาเลตที่ทดสอบไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์

ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติมาเลต

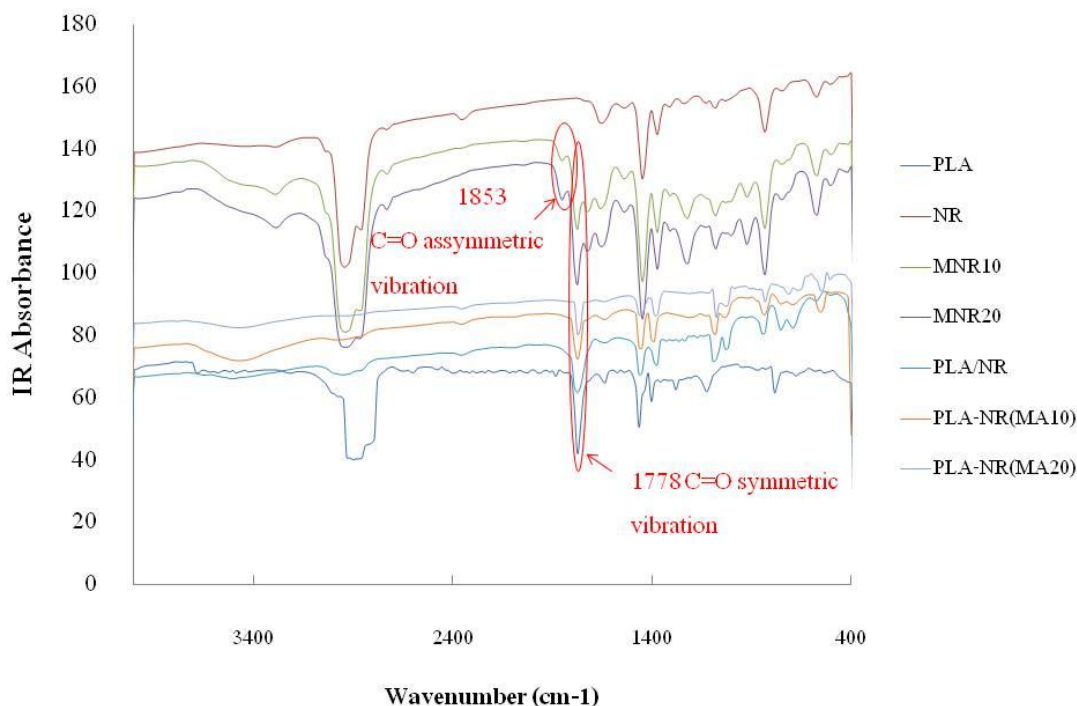
วัสดุ	ยางธรรมชาติ [13-14]	ยางธรรมชาติมาเลต ที่มีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 10	ยางธรรมชาติมาเลต ที่มีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 20
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	-75	ไม่ปรากฏ	55.05

## 4.2 วิเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

### 4.2.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

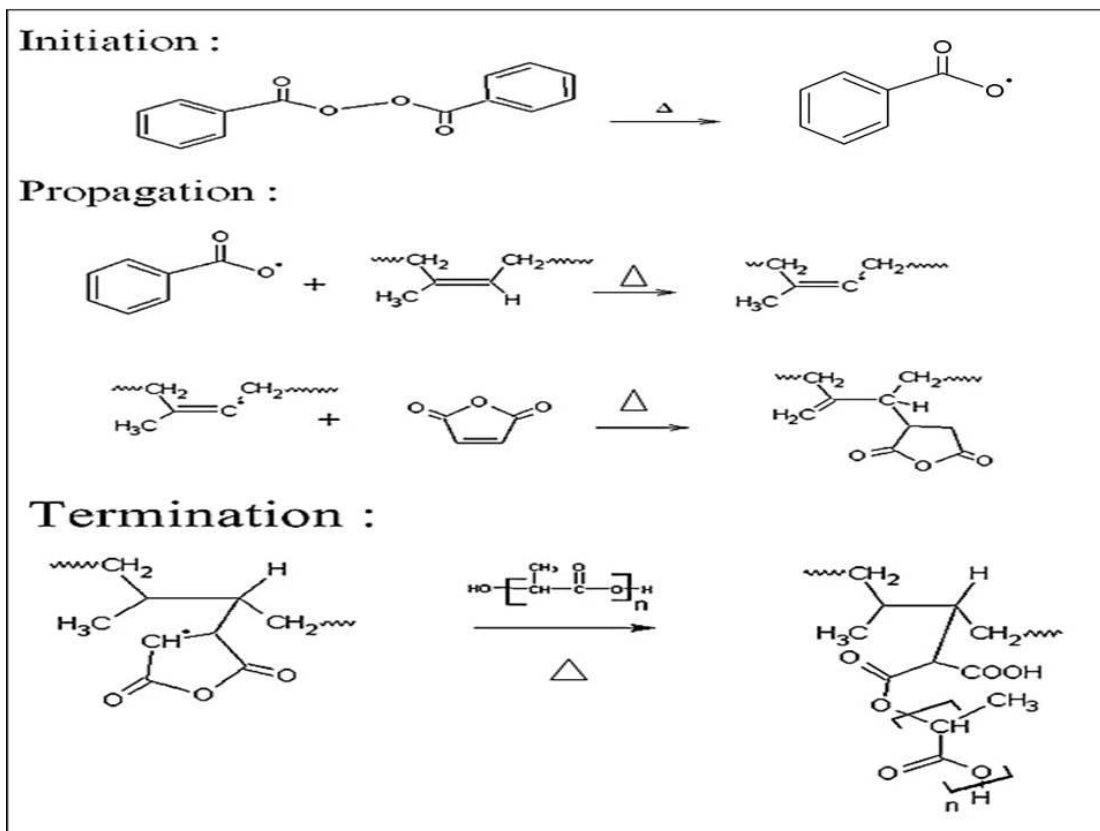
ได้เตรียมยางธรรมชาติมาเลตที่มีสัดส่วนปริมาณมาเลตร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสถานะเดียวกับขั้นตอนที่กล่าวไปแล้วข้างต้น จากนั้นเติมพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ได้จากการหลอมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ 2 รอบ ในสัดส่วน 1:1 กับยางธรรมชาติ ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 8 ชั่วโมง จากนั้นตกตะกอนในเมทานอล แล้วกรองส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายระเหยหมด จึงนำไปอบแห้ง 24 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันที่ยืนยันลักษณะการกราฟต์ของพอลิเล็กทิกแอซิดกับยางธรรมชาติด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4

### IR spectra absorption



รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ยางธรรมชาติมาเลตแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 1778 และ 1853  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนรังสีของหมู่คาร์บอนิลของวงแหวนมาเลตที่มีการสั่นแบบสมมาตรและอสมมาตร แต่เมื่อนำยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 1853  $\text{cm}^{-1}$  ไม่ปรากฏ ซึ่งที่การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดความถี่นี้สอดคล้องกับการสั่นแบบอสมมาตรของหมู่คาร์บอนิลบนวงมาเลต ดังนั้น จึงยืนยันได้ว่า ยางธรรมชาติมาเลตและพอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์กัน ได้ยางธรรมชาติไปแล้ว ทำให้วงแหวนมาเลตหายไป ผลผลิตจากปฏิกิริยา คือ ยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [39] และมีปฏิกิริยาการกราฟต์ของยางธรรมชาติมาเลตและพอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่คาดว่าจะเป็นไปได้ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

#### 4.2.2 วิเคราะห์หาร้อยละการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ในการทดลองนี้ได้เตรียมยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักร้อยละต่ำที่มีสัดส่วนปริมาณมาเลอเตร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ แล้วนำมาปฏิกิริยากับพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักร้อยละต่ำในอัตราส่วน 1:1 การหาปริมาณการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักร้อยละต่ำนั้น ทำได้โดยนำพอลิเมอร์ร่วมดังกล่าวละลายในโทลูอีน แล้วนำไปตกตะกอนในอะซิโตน จากนั้นกรองเอาส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก แล้วตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายระเหยหมด จึงนำไปอบแห้ง 24 ชั่วโมง แล้วนำมาละลายในโทลูอีนอีกครั้ง จากนั้นสกัดหมู่คาร์บอกซิลิกที่อยู่ในยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักร้อยละต่ำด้วยน้ำ จากนั้นเติมอินดิเคเตอร์ลงไป แล้วจึงไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน แล้วนำมาคำนวณดังสมการที่ 4.1

$$\% \text{ grafted} = \frac{(\text{Vol. NaOH} * [\text{NaOH}])}{W_s} * 100 \quad \dots\dots(4.1)$$

โดย %grafted คือ ร้อยละปริมาณการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

Vol. NaOH คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

[NaOH] คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบ

Ws คือ น้ำหนักของตะกอน

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ร้อยละปริมาณการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 10.56 เป็นร้อยละ 25.08 โดยการเติมปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ตามลำดับ เนื่องจากมีการเกิดอนุภาคอิสระบนยางธรรมชาติมากขึ้น จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ได้มากขึ้น [39] ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด โดยยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีสัดส่วนมาเลอิกแอนไฮไดรด์สูง มีความเข้มข้นการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสูง

#### 4.2.3 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเล็กทิกแอซิด และพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแอนาไลเซอร์ แบบเจล

พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีน้ำหนักโมเลกุล 42739 กรัมต่อโมล ซึ่งลดลงจาก 139151 กรัมต่อโมล ของพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ โดยเกิดจากการนำเม็ดพอลิเล็กทิกแอซิดหลอม 2 รอบ ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ด้วยผลจากแรงเฉือนและความร้อน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเล็กทิกแอซิดสั้นลง ดังนั้น จึงวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเล็กทิกแอซิดและ



พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยนำมาละลายในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูราน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีแอนาไลเซอร์ แบบเจลยี่ห่อ SHIMADZU รุ่น SIL-10AD พบว่า พอลิเล็กทิกแอซิดที่ผ่านการหลอมอัดรีด 2 รอบ มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเมื่อดพอลิเล็กทิกแอซิดที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ

#### 4.2.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

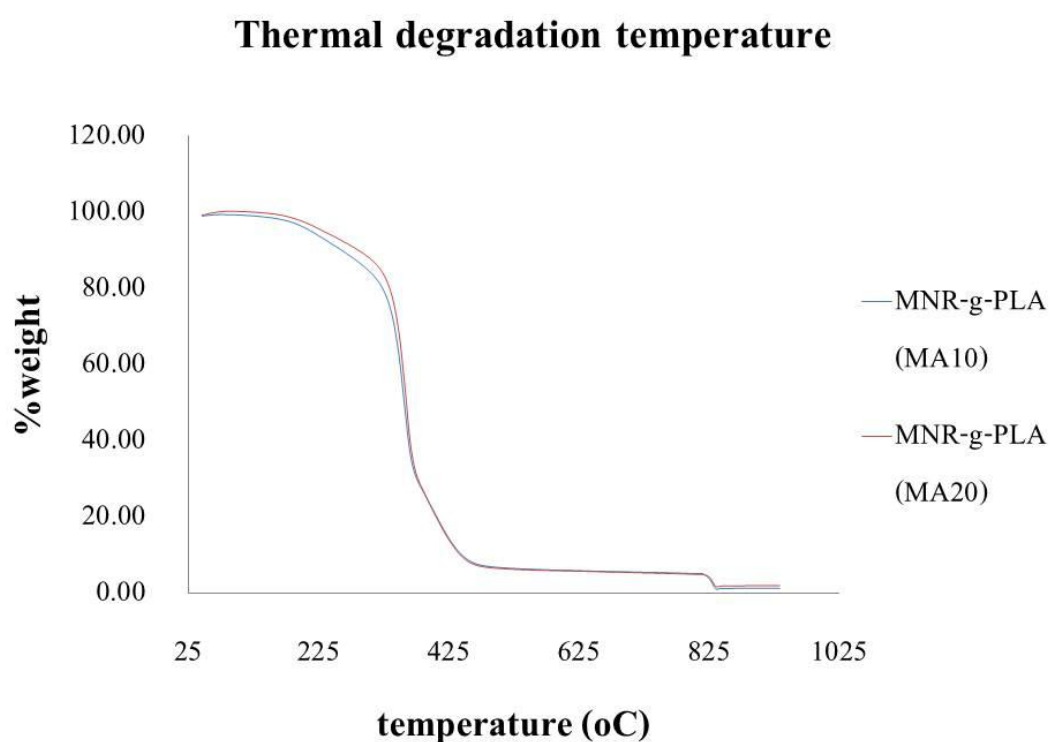
##### 4.2.4.1 วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล แคลอริเมทรี สแกนนิ่ง

วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลเอตร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Diamond DSC พบว่า ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพิ่มขึ้นจาก 53.24 องศาเซลเซียส เป็น 57.06 องศาเซลเซียส ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ (คั่งรูปเทอร์โมแกรมในภาคผนวก ข) ตามลำดับ เนื่องจากการอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างสายโซ่ [37]

##### 4.2.4.2 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทรี แอนาไลซิส

ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลเอตร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ วิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 ในช่วงอุณหภูมิ 25 -950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ค่าอุณหภูมิ การสลายตัวทางความร้อน เริ่มต้น ( $T_d$  onset) ของยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 104 องศาเซลเซียส เป็น 154 องศาเซลเซียส

และค่าการสลายตัวทางความร้อน ( $T_d$ ) ของยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพิ่มขึ้นจาก 357 องศาเซลเซียส เป็น 360 องศาเซลเซียส ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ตามลำดับ ดังรูป 4.6 แสดงว่า ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้น [37]



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

#### 4.3 วิเคราะห์พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอ็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเทกราฟต์พอลิเอ็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

##### 4.3.1 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

##### 4.3.1.1 วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรี

ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสามารถบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยสังเกตจากการเลื่อนระดับอุณหภูมิเข้าหากันระหว่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสมทั้งสอง ถ้าเข้ากันได้ดีจะปรากฏค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงค่าเดียว [18-19] จากการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรี ดังตารางที่ 4.2 (รูปเทอร์โมแกรมแสดงในภาคผนวก ข) พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอ็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ ปรากฏค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่มีลักษณะไม่เป็นแนวโน้มในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของวัฏภาคของยางธรรมชาติ ทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่แสดงไม่ใช่สัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอ็กทิกแอซิดและยางธรรมชาติดังตาราง และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [40] แสดงค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่แยกกันชัดเจน ซึ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันไม่ได้ระหว่างพอลิเอ็กทิกแอซิดและยางธรรมชาติ สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอ็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเทกราฟต์พอลิเอ็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำปรากฏค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเอ็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ที่มีค่า 59.05 องศาเซลเซียสเซียส ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งบ่งบอกได้ว่า การเติมยางธรรมชาติมาเลอเทกราฟต์พอลิเอ็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถช่วยลดความเปราะของพอลิเอ็กทิกแอซิดได้ด้วยพฤติกรรมความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติ ที่ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่ของพอลิเอ็กทิกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น [43]

ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติ  
มาเลอเดกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

Glass transition temperature (°C)			
NR content	PLA/NR	PLA/NR-g-PLA (MA10)	PLA/NR-g-PLA (MA20)
0	59.05	-	-
5	59.8	59.09	59.44
10	51.4	58.73	59.37
15	53.5	57.82	58.48
20	55.98	56.99	56.54

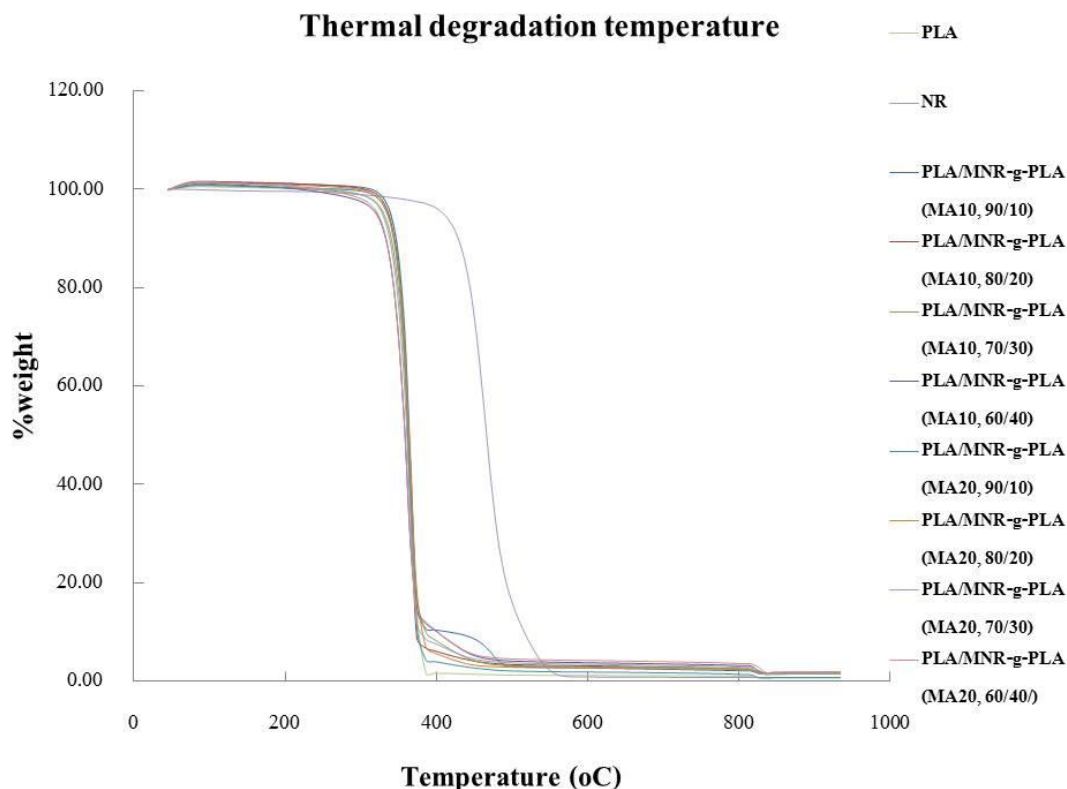
#### 4.3.1.2 วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตรี แอนาไลซิส

ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ วิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851 ในช่วงอุณหภูมิ 25 -950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติเริ่มต้นสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 308 องศาเซลเซียส ( $T_d$  on set) และสลายตัวหมดที่อุณหภูมิ 390 และ 450 องศาเซลเซียส ( $T_d$  end set) ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่า 375 องศาเซลเซียส ( $T_d$ ) เมื่อผสมพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติเข้าด้วยกัน พอลิเมอร์ผสมเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำลงที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ( $T_d$  on set) และค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนมีค่าลดลง ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของยางธรรมชาติ จนกระทั่งมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนต่ำสุด 348.1 องศาเซลเซียส ( $T_d$ ) ที่สัดส่วนการผสมพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ 85:15 เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ ทำให้ความต่อเนื่องในวัฏภาคของพอลิแล็กติกแอซิดลดลง เมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ดังนั้น ความสามารถในการเคลื่อนไหวยของสายโซ่จึงมากขึ้น เมื่อได้รับความร้อน สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด

น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ จะมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางธรรมชาติ มาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลอเด กราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ (350 องศาเซลเซียส ( $T_d$ ), สัดส่วน 80:20) มีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิก ไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ (359 องศาเซลเซียส ( $T_d$ ), สัดส่วน 80:20) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอันตรกิริยาทางเคมีและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

Decomposition temperature (°C)			
NR content	PLA/NR	PLA/NR-g-PLA (MA10)	PLA/NR-g-PLA (MA20)
0	375.0	-	-
5	350.0	360.0	370.0
10	351.7	355.0	363.0
15	348.1	352.0	361.0
20	363.0	350.0	359.0
100	375.0	-	-

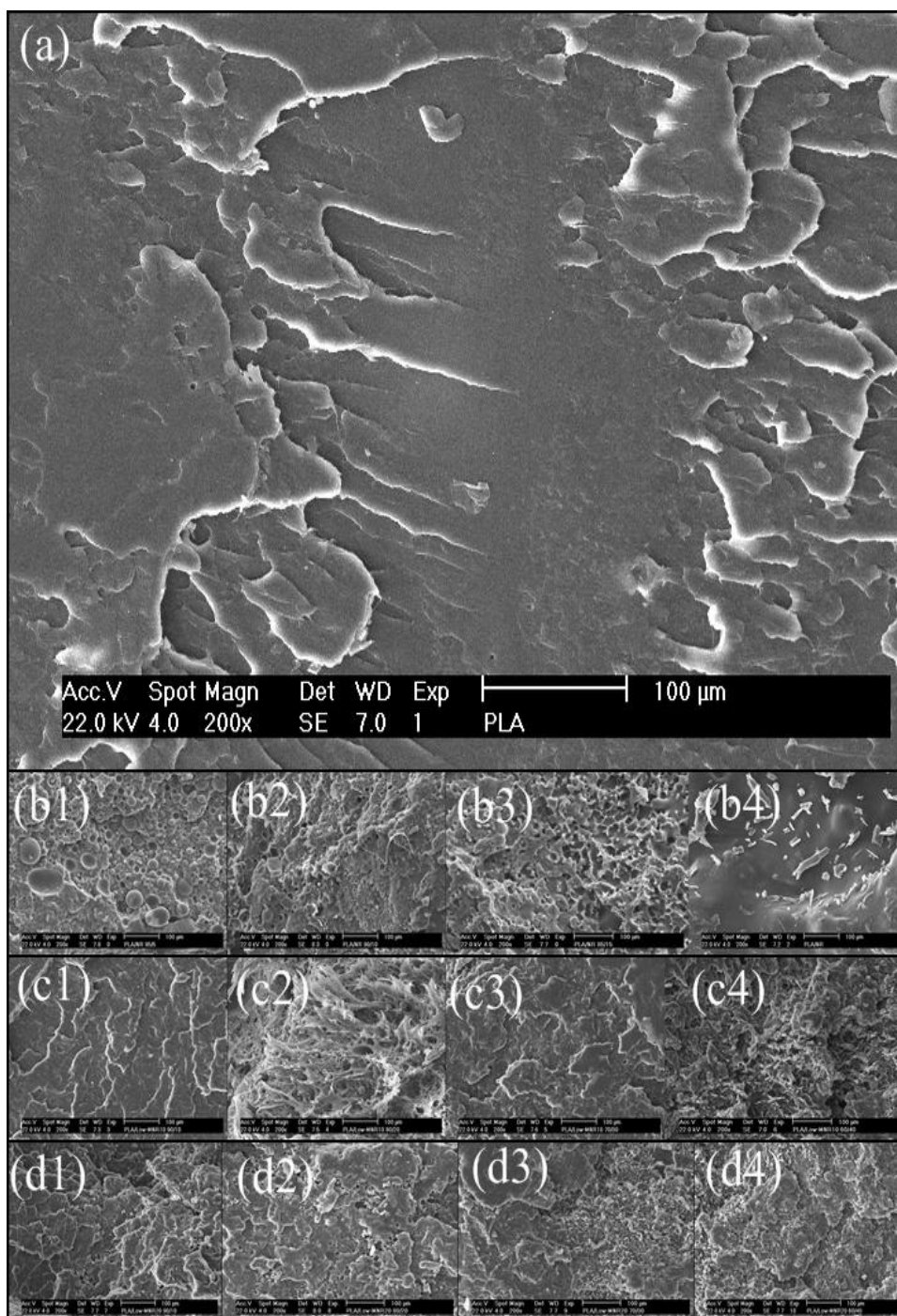


รูปที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลเดตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำในสัดส่วนต่าง ๆ

#### 4.3.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา และความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคยาง

ลักษณะพื้นฐานวิทยาสามารถบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพอลิเมอร์ และลักษณะความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติ และพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติ มาเลเดตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Joel รุ่น JSM-6480LV แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดมีการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งมีลักษณะเรียบกว่าชิ้นงานอื่น แต่เมื่อเติมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ มาเลเดตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงไป ลักษณะการแตกหักของพอลิเมอร์ผสม มีลักษณะผิวที่ขรุขระซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักแบบเหนียว ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมจึงมีความเหนียวที่มากกว่า ในกรณีพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติจะสังเกตการแยกวัฏภาค

ที่ชัดเจน ซึ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ที่ดี สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ มาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีสภาพเข้ากันได้ดี และมีลักษณะเป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง และมีการกระจายตัวของอนุภาคยางที่ดี เนื่องจากการเพิ่มระดับของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติมาเลอเตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำในพอลิเมอร์ผสม ลักษณะพื้นผิวที่แตกหักก็มีความขรุขระเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) พอลิแล็กติกแอซิด, (b) พอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติ, (c) พอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (MA 10 %wt), และ (d) พอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (MA 20 %wt) โดย 1, 2, 3 และ 4 แทนสัดส่วนของปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก



#### 4.4 พอลิเมอร์ผสมของพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักร้อยละ 10

##### 4.4.1 ความทนแรงดึง

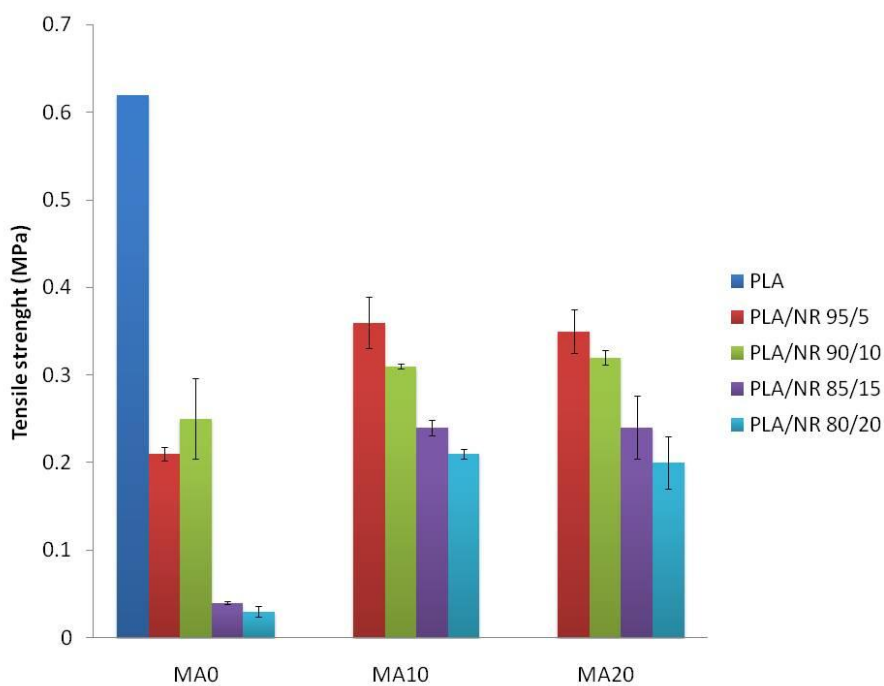
การทดสอบพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ สามารถนำไปทำนายการนำไปใช้งาน โดยการกำหนดสภาวะและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมความเค้นและความเครียดนั้น ๆ

การปรับปรุงพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ให้เหมาะกับการนำไปใช้งาน มี 2 ลักษณะ คือ การเติมอนุภาคยางลงในพอลิเมอร์แบบเปราะ เพื่อปรับปรุงความเหนียวและระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์แบบเปราะ และการเติมวัสดุที่แข็งเกร็งลงในวัสดุของยาง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ในงานวิจัยนี้ อนุภาคของยางธรรมชาติถูกเติมลงในพอลิเล็กทิกแอซิด เพื่อปรับปรุงความเหนียว ซึ่งพอลิเล็กทิกแอซิดมีสมบัติเปราะ ทำให้มีความทนแรงดึงสูง และมีระยะยืด ณ จุดขาดที่ต่ำ ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 เนื่องจากเมื่อออกแรงดึง สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของแรงดึง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีอันตรกิริยาระหว่างกันเพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงดึงจึงสูง และระยะยืด ณ จุดขาด จึงต่ำ [39] แต่ยางธรรมชาติและพอลิเล็กทิกแอซิดมีความเข้ากันไม่ได้ [40] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเพิ่มสภาพเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและพอลิเล็กทิกแอซิด โดยการนำยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์กับพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักร้อยละ 10 จึงนำมาผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิด พบว่า พอลิเล็กทิกแอซิดผสมที่ปริมาณยางธรรมชาติสัดส่วนร้อยละ 10 ของพอลิเมอร์ผสม และปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ มีความทนแรงดึง 0.32 เมกะพาสคาล (MPa) ซึ่งต่ำกว่าพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ ที่มีความทนแรงดึง 0.62 เมกะพาสคาล ปริมาณ ร้อยละ 48.39 และมีระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเล็กทิกแอซิดผสมยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักร้อยละ 10 ของพอลิเมอร์ผสม และปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ร้อยละ 39.92 ซึ่งสูงกว่าพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ที่มีระยะยืด ณ จุดขาด ร้อยละ 12.64 ปริมาณร้อยละ 215.82 เนื่องจากความยืดหยุ่นของสายโซ่ยางธรรมชาติมาเลอเดกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักร้อยละ 10 และการเกิดรูระหว่าง

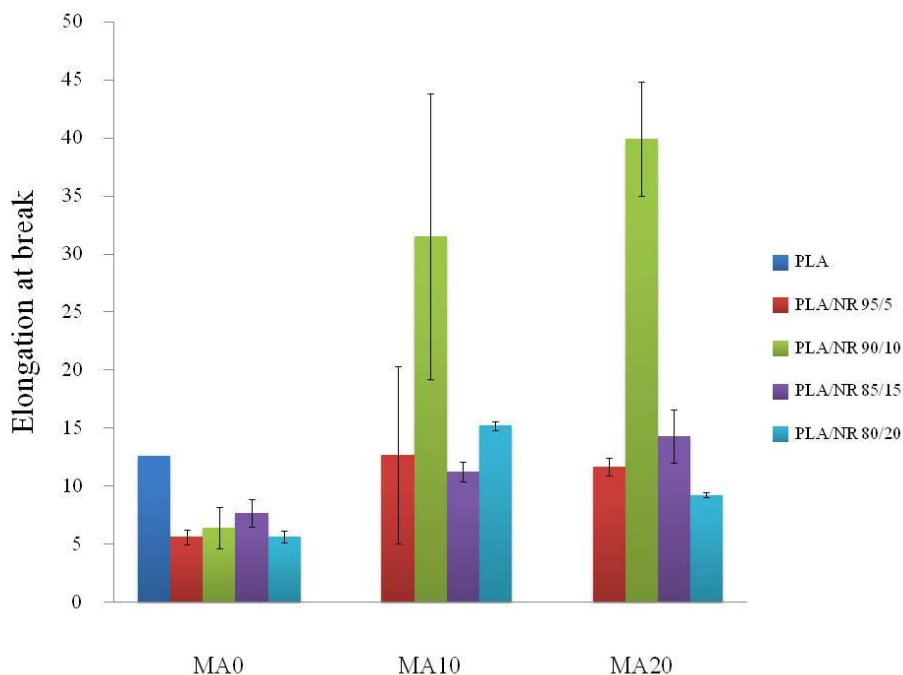
กระบวนการ ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก [40] สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติ และพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำนั้น พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีค่า 0.32 เมกะพาสกาล ซึ่งสูงกว่าความทนแรงดึงของ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ ที่มีค่า 0.25 เมกะพาสกาล ประมาณร้อยละ 28 และมีระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ร้อยละ 39.92 ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติ ที่มีค่าร้อยละ 6.44 ประมาณร้อยละ 519.86 ซึ่งเปรียบเทียบที่ปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 10 ของพอลิเมอร์ผสม และปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 0 และ 20 ของปริมาณยางธรรมชาติ เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสที่ดีกว่า หรือเกิดอันตรกิริยาทางเคมีระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสอง [38-39]

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ พบว่า ค่าความทนแรงดึงลดลงตามปริมาณของยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากสัดส่วนปริมาณความยืดหยุ่นของสายโซ่ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำเพิ่มขึ้น [40] และระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำมีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ถ้าสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำในพอลิเมอร์ผสมมากกว่าร้อยละ 10 ระยะยืด ณ จุดขาด จะลดลง เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสที่ดี ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคยางในวัฏภาคที่สอง ดังนั้น จึงไม่มีผลต่อการเพิ่มระยะยืด ณ จุดขาด [38-39] และผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิเมอร์ร่วมที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม พบว่า ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิเมอร์ร่วมร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และระยะยืด ณ จุดขาดที่มีความไม่คงที่ ซึ่งไม่สามารถสรุปได้ ซึ่งแสดงว่า ผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิเมอร์ร่วมที่มีต่อค่าความทนแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจาก

แรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลที่ดี ทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ค่าความทนแรงดึงควรเพิ่มขึ้น และระยะยืด ณ จุดขาด ควรต่ำลง [39]



รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสม



รูปที่ 4.10 ระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสม

#### 4.4.2 ความทนแรงกระแทกแบบไอซอด

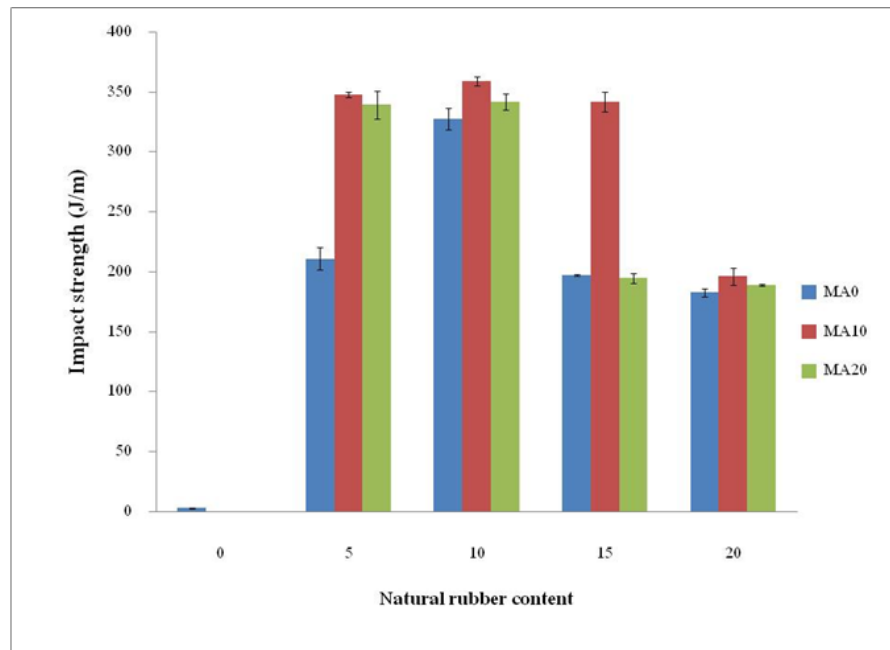
การทดสอบความทนแรงกระแทก สามารถบอกถึงความแข็งแรง หรือความเหนียวของวัสดุได้ โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ยี่ห้อ GOTECH

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติ และพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเดตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติ มีค่า 327.56 จูลต่อเมตร และความทนแรงกระแทกของ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเดตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีค่า 358.9 จูลต่อเมตร ที่สัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติร้อยละ 10 ของพอลิเมอร์ผสม และปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ตามลำดับ ซึ่ง สูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ที่มีความทนแรงกระแทก 3.038 จูลต่อเมตร ประมาณ 106.82 และ 117.14 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากวัฏภาคที่สองของยางธรรมชาติ

เป็นส่วนช่วยในการกระจายพลังงาน [41] และความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน /ยางธรรมชาติ มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ประมาณ 0.10 เท่า โดยเปรียบเทียบที่สัดส่วนของยางธรรมชาติร้อยละ 10 ของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำ [42] ดังรูปที่ 4.11

ผลของปริมาณยางธรรมชาติที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม ดังรูปที่ 4.11 พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ปริมาณยางธรรมชาติมีสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม และที่การเติมปริมาณยางธรรมชาติมากกว่าสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน /ยางธรรมชาติ และสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสที่ดี จึงทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี จนกระทั่งมีผลต่อความทนแรงกระแทกที่ต่ำ [42]

ผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังรูปที่ 4.11 พบว่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิเมอร์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ มีค่า 341.7 จูลต่อเมตร ซึ่งต่ำกว่าความทนแรงกระแทกของ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิเมอร์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ที่มีค่า 358.9 จูลต่อเมตร ประมาณ 0.05 เท่า โดยเปรียบเทียบที่สัดส่วนของยางธรรมชาติร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัส และการกระจายตัวที่ดี ทำให้มีผลต่อค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำ [42]



รูปที่ 4.11 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดผสม

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

1. การเตรียมยางธรรมชาติมาเลเอต ทำได้โดยนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ในสารละลายโทลูอินที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยมีเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และวิเคราะห์โครงสร้างมาเลเอตด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี พบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงคลื่นของการสั่นแบบสมมาตร และอสมมาตรของหมู่คาร์บอนิลในวงมาเลเอตแอนไฮไดรด์ และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค โปรตอน นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี พบค่าเคมีคัลชิฟท์ของโปรตอนในวง แอนไฮไดรด์
2. การเตรียมยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำได้โดยการ กราฟต์ยางธรรมชาติมาเลเอตกับพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในสารละลายโทลูอินที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี พบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงคลื่นของการสั่นแบบสมมาตรของหมู่ คาร์บอนิลในวงมาเลเอตแอนไฮไดรด์เท่านั้น
3. การเติมยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ในพอลิเล็กทิกแอซิด ทำให้พื้นผิวการแตกหักของพอลิเล็กทิกแอซิดเปลี่ยนจากผิวเรียบ ซึ่งเป็น การแตกหักแบบเปราะ เปลี่ยนเป็นผิวขรุขระ ซึ่งเป็นการแตกหักแบบเหนียว และลักษณะ สันฐานวิทยาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ มีการแยกวัฏภาคของยาง ธรรมชาติชัดเจน แต่พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์ พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีการกระจายตัวของ อนุภาคยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ดี เนื่องจากแรงยึด เกาะระหว่างผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น
4. ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ และพอลิเล็กทิก แอซิด/ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ต่ำกว่าความทน

- แรงดึงของพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ แต่ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำสูงกว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติ
5. ระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ และพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สูงกว่าระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ และระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สูงกว่าระยะยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติ
6. ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ และพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สูงกว่าความทนแรงกระแทกของพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์ และความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สูงกว่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติ
7. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด /ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 มีความเหนียวน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิด/ยางธรรมชาติมาเลเอตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 เนื่องจากการสูญเสียความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติ โดยการกราฟต์กับพอลิเล็กทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้พันธะคู่ของยางธรรมชาติมีปริมาณลดลง และเนื่องจากมีปริมาณการกราฟต์ที่สูงกว่า ทำให้มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสที่ดีกว่า จึงมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเล็กทิกแอซิด และมีขนาดอนุภาคที่เล็ก ทำให้ไม่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม



## รายการอ้างอิง

- [1] K. M. Namphoothiri, N. R. Nair, and R. P. John. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. Bioresource technology 101 (2010): 8493-8501.
- [2] J. Ren. Introduction., Biodegradable Poly (lactic acid): synthesis, modification, processing and Application, pp. 1-3, Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [3] L. jiang, and J. Zhang. Biodegradable and biobased polymer., Applied plastic engineering handbook, pp. 149-150, USA: Elsevier Inc, 2012.
- [4] L.-T. Lim, R. Auras, and M. Rubino. Processing technologies of Poly(lactic acid). Progress in Polymer science 33 (2008): 820-852.
- [5] J. Ren. Lactic acid., Biodegradable Poly(lactic acid): synthesis, modification, processing and Application, pp. 3-11, Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [6] A. P. Gupta, and V. Kurma., New emerging trends in synthetic biodegradable polymers- Polylactide: A critique. European polymer journal 43 (2007): 4053-4074.
- [7] A. J. R. Lasprilla, G. A. R. Martinez, B. H. Lunelli, J. E. J. Figueroa, A. L. Jardini, R. M. Filho. Synthesis and characterization of Poly (lactic acid) for use in biomedical field, Brazil: University city “Zeferino Vaz”.
- [8] J. Ren. Modification of PLA., Biodegradable Poly (lactic acid): synthesis, modification, processing and Application, pp. 38-104, Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [9] A. Sodergard, and M. Stolt. Properties of lactic acid based polymers and correlation with composition. Progress in polymer science 27 (2002): 1123-1163.
- [10] K. S. Anderson, K. M. Schrek, and E. M. A. Hillmyer., Toughening polylactide., Polymer reviews 48: 85-108, 2008.

- [11] จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. เทคโนโลยียางธรรมชาติ, ประเทศไทย: บริษัท เทคโนโลยีนิช คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด, 2553.
- [12] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี, ประเทศไทย: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2552
- [13] Rubber board. Processing. [online]. 2002. Available from :  
<http://rubberboard.org.in/ManageCultivation.asp?Id=194> : rubberboard.org.in, [2013, February 10]
- [14] G. Day, and J. S. Dick., General purpose Elastomers and blends, Rubber Technology: compounding and testing for performance (2<sup>nd</sup> ed), pp 141-144, Germany: Publications munich, 2009
- [15] R. J. Young, and P.A. Lovell., Toughened polymer, Introduction to polymers (2<sup>nd</sup> ed), pp. 417-424, UK: Cambridge university press, 1991.
- [16] L. H. Sperling., Fracture behavior of multiphase polymeric materials, Introduction to physical polymer science (4<sup>th</sup> ed), pp. 437-440, Canada: John wiley & sons, 2006.
- [17] W. Michaeli., Copolymers and polymer blends. Plastics processing an introduction, pp. 18-19, Germany: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [18] R. W. Emerson., Polymer mixtures, The elements of polymer science & engineering, pp. 231-274, 2013.
- [19] L. H. Sperling., The glass transition of polymer blends, Introduction to physical polymer science (4<sup>th</sup> ed), pp. 693-696, Canada: John wiley & sons, 2006.
- [20] E. M. Mount., Extrusion process, Plastics engineering handbook, pp. 227-266, USA: Elsevier Inc., 2011.

- [21] W. Michaeli., Extrusion. Plastics processing an introduction, pp. 84-96, Germany: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [22] W. Michaeli., Compression molding. Plastics processing an introduction, pp. 132-137, Germany: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [23] Z. Tadmor, and C. G. Gogos., Compression molding. Principles of polymer processing (2<sup>nd</sup> ed.), Canada: John Wiley&Sons Inc., 2006.
- [24] A. Naranjo, M. del P. Noriega, T. Osswald, A. Roldán-Alzate, and J. D. Sierra., Fourier transform infrared spectroscopy, Plastics testing and characterization industrial application, pp. 7-17, USA: Hanser Gardner Publications Inc., 2008.
- [25] A. Naranjo, M. del P. Noriega, T. Osswald, A. Roldán-Alzate, and J. D. Sierra., Magnetic properties, Plastics testing and characterization industrial application, pp. 338-339, USA: Hanser Gardner Publications Inc., 2008.
- [26] โปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
<http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-11.pdf>, [24 กุมภาพันธ์ 2556].
- [27] นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
<http://www.chem.wisc.edu/areas/reich/handouts/chem343-345/345-nmr-handout.pdf>, [24 กุมภาพันธ์ 2556].
- [28] การไทเทรตกรด. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
<http://www.nmp.ac.th/eclassroom/krutew/concept/11%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%84%E0%B8%97%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%A3%E0%B8%95.pdf>, [24 กุมภาพันธ์ 2556].

- [29] A. Naranjo, M. del P. Noriega, T. Osswald, A. Roldán-Alzate, and J. D. Sierra., Thermal properties, Plastics testing and characterization industrial application, pp. 75-126, USA: Hanser Gardner Publications Inc., 2008.
- [30] S.R. Holding. Gel permeation chromatography. Endeavour Vol. 8 (1984) : pp. 17-20.
- [31] L. E. Nielsen, and R. F. Landel., Stress-strain test, Mechanical properties of polymer and composites (2<sup>nd</sup> ed.), pp. 6-9, USA: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [32] การทดสอบแรงดึง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
<http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318%2851%29/MY318-6.pdf>, [25 กุมภาพันธ์ 2556]
- [33] เครื่องทดสอบอเนกประสงค์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
<http://www.sc.kku.ac.th/office/research/ins/file/instruments/utm.pdf>, [25 กุมภาพันธ์ 2556].
- [34] L. E. Nielsen, and R. F. Landel., Impact test, Mechanical properties of polymer and composites (2<sup>nd</sup> ed.), pp. 307-310, USA: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [35] การทดสอบการกระแทก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
<http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318%2851%29/MY318-8.pdf>, [25 กุมภาพันธ์ 2556].
- [36] C. Nakason, A. Kaesaman, and P. Supasanthitikul., The grafting of maleic anhydride on natural rubber., Polymer testings 23 (2004): 35-41.
- [37] C. Nakason, S. Saiwaree, S. Tatun, and A. Kaesaman., Rheological, Thermal and morphologies properties of maleated natural rubber and its reactive blending with poly(methyl methacrylate), Polymer testings 25 (2006): 656-667.

- [38] K. D. Kumar, and B. Kothandaraman., Modification of (DGEBA) epoxy resin with maleated depolymerised natural rubber, eXPRESS polymer letters 2 (2008) : 302-311.
- [39] C.-H. Ho, C.-H. Wang, C.-I Lin, and Y.-D. Lee., Synthesis and characterization of TPO-PLA copolymer and its behavior as compatibilizer for PLA/TPO blends, Polymer 49 (2008): 3902-3910.
- [40] L. E. Nielsen, and R. F. Landel., Stress-strain behavior and strength, Mechanical properties of polymer and composites (2<sup>nd</sup> ed.), pp. 283-295, USA: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [41] N. Bitinis, R. Verdijo, P. Cassangau, and M.A. Lopez-Manchado., Structure and properties of polylactide/natural rubber blends, Materials chemistry and physics 129 (2011): 823-821.
- [42] L. E. Nielsen, and R. F. Landel., Impact strength of polymer blends, Mechanical properties of polymer and composites (2<sup>nd</sup> ed.), pp. 315-317, USA: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [43] Z. Lui, X. Zhu, L. Wu, Z. Qi, C. Choy, and F. Wang., Effect of interfacial adhesion on rubber toughening of poly(vinyl chloride) part. 1 Impact tests, Polymer 42 (2001): 737-746.
- [44] L. E. Nielsen, and R. F. Landel., Effect of plasticization and copolymerization, Mechanical properties of polymer and composites (2<sup>nd</sup> ed.), pp. 283-284, USA: Marcel Dekker Inc., 1994.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ร้อยละการกราฟต์ของยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

NR-g-PLA			
MA10		MA20	
ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการกราฟต์	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการกราฟต์
0.02	7.921	0.06	23.768
0.02	7.921	0.07	27.723
0.04	15.842	0.06	23.762
ค่าเฉลี่ย	10.5611		25.084
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.573		2.285

### สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน

1. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนทิกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนทิกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สัดส่วน 95 : 5

1.1 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชิ้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดูลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.207	5.378	7.334	205.490
2	0.219	6.346	5.480	201.580
3	0.201	4.918	8.560	210.440
4	0.203	5.943	7.932	226.080
5	0.208	5.646	7.327	210.230
ค่าเฉลี่ย	0.208	5.646	7.327	210.764
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.007	0.5429	1.329	9.316



## 1.2 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชั้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.393	12.135	6.119	346.090
2	0.331	10.655	4.761	348.830
3	0.347	15.892	4.183	348.020
4	0.381	14.740	4.760	350.740
5	0.363	13.356	4.956	344.740
ค่าเฉลี่ย	0.363	13.356	4.956	347.684
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.025	2.070	0.712	2.344

## 1.3 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชั้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.373	11.261	5.602	347.820
2	0.376	11.615	5.560	326.510
3	0.332	10.750	5.171	353.720
4	0.347	12.672	4.736	338.460
5	0.32	12.295	4.162	328.410
ค่าเฉลี่ย	0.350	11.719	5.046	338.984
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.0247	0.775	0.605	11.863

2. โพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนทิกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเอทิลีนทิก

แอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สัดส่วน 90 : 10

2.1 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชั้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุด ขาด (%)	มอดูลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.252	4.475	7.038	322.170
2	0.191	6.409	7.673	315.950
3	0.293	8.771	7.816	335.960
4	0.282	6.104	7.727	336.470
5	0.254	6.440	7.563	328.230
ค่าเฉลี่ย	0.254	6.440	7.563	327.7560
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.040	1.534	0.308	8.861

2.2 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชั้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.306	14.186	4.175	357.190
2	0.304	44.047	3.818	362.050
3	0.306	42.660	3.773	363.630
4	0.308	27.080	2.975	357.480
5	0.301	29.627	3.089	354.150
ค่าเฉลี่ย	0.305	31.520	3.566	358.900
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.003	12.296	0.513	3.866

2.3 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชั้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.315	42.853	3.895	336.180
2	0.319	36.185	3.534	345.520
3	0.331	36.391	4.216	336.140
4	0.329	47.170	4.499	339.760
5	0.314	37.005	4.545	351.010
ค่าเฉลี่ย	0.322	39.921	4.138	341.722
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.008	4.901	0.426	6.450

### 3. โพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนแอกซีดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเอทิลีน

แอกซีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สัดส่วน 85 : 15

#### 3.1 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชิ้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.820	6.536	6.439	196.010
2	0.711	7.715	5.533	197.650
3	0.646	9.377	5.029	197.630
4	0.848	7.365	6.599	197.640
5	0.029	7.748	5.900	196.810
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>0.611</b>	<b>7.748</b>	<b>5.900</b>	<b>197.148</b>
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.335	1.033	0.647	0.731

3.2 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชิ้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.237	12.181	3.719	332.550
2	0.249	10.238	4.032	332.550
3	0.239	11.077	3.99	346.630
4	0.233	10.895	3.242	345.380
5	0.255	12.145	3.575	349.800
ค่าเฉลี่ย	0.243	11.307	3.712	341.382
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.009	0.841	0.324	8.222

### 3.3 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชั้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.192	13.671	2.651	197.970
2	0.215	16.978	2.885	199.210
3	0.249	14.879	2.928	194.290
4	0.235	15.192	2.562	191.030
5	0.287	10.791	4.240	190.030
ค่าเฉลี่ย	0.236	14.302	3.053	194.506
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.036	2.292	0.681	4.071



4. โพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนแอกซีดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเอทิลีน

แอกซีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สัดส่วน 80 : 20

4.1 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชิ้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.036	5.515	4.760	179.350
2	0.045	5.735	2.697	184.250
3	0.033	5.104	5.165	186.570
4	0.045	5.695	1.890	182.810
5	0.049	6.459	2.922	179.060
ค่าเฉลี่ย	0.042	5.702	3.487	182.408
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.007	0.492	1.408	3.219

## 4.2 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรไร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชิ้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.213	11.124	3.615	196.060
2	0.206	13.949	2.712	199.220
3	0.212	11.355	3.395	205.440
4	0.201	14.561	2.884	193.420
5	0.215	25.114	3.500	186.280
ค่าเฉลี่ย	0.209	15.221	3.221	196.084
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.006	5.737	0.399	7.081

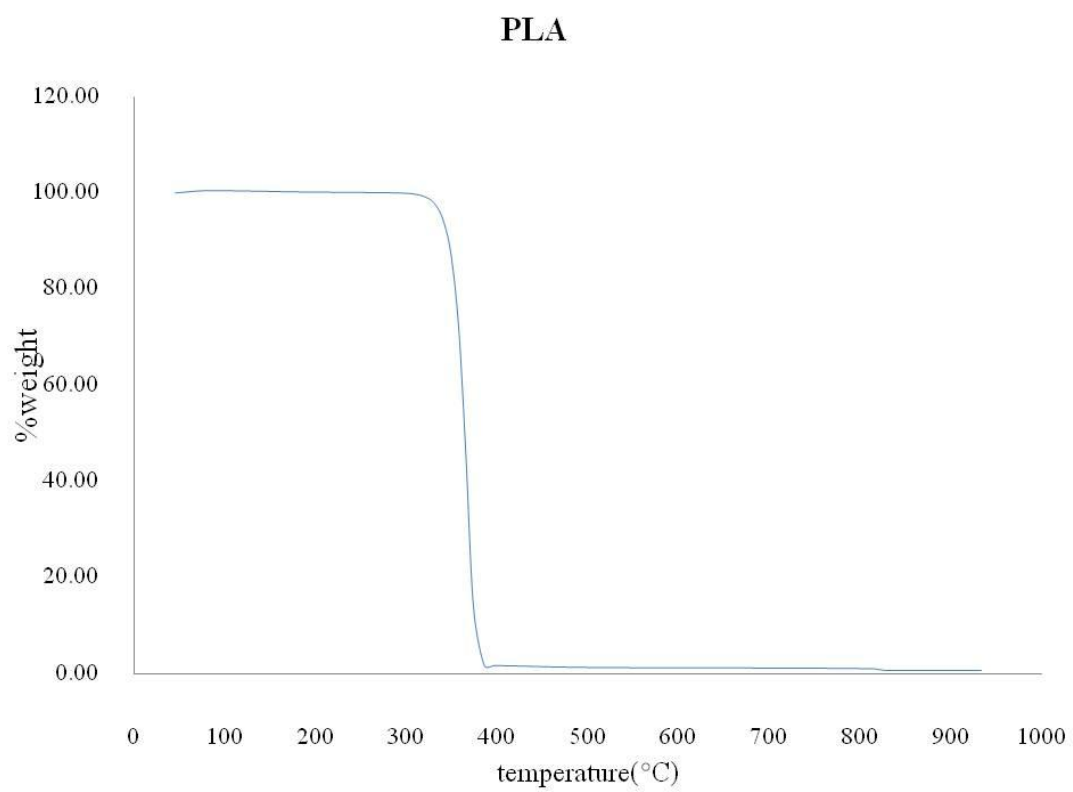
## 4.3 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรไร้อยู่ละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ

ชั้นงาน	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	มอดูลัสดึง (MPa)	ค่าความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.186	10.899	3.397	183.030
2	0.160	8.079	3.263	190.000
3	0.194	9.072	3.292	189.100
4	0.230	9.452	3.709	189.010
5	0.231	8.828	3.292	193.840
ค่าเฉลี่ย	0.200	9.266	3.391	188.996
ค่าเบี่ยงเบน				
มาตรฐาน	0.030	1.042	0.185	3.875

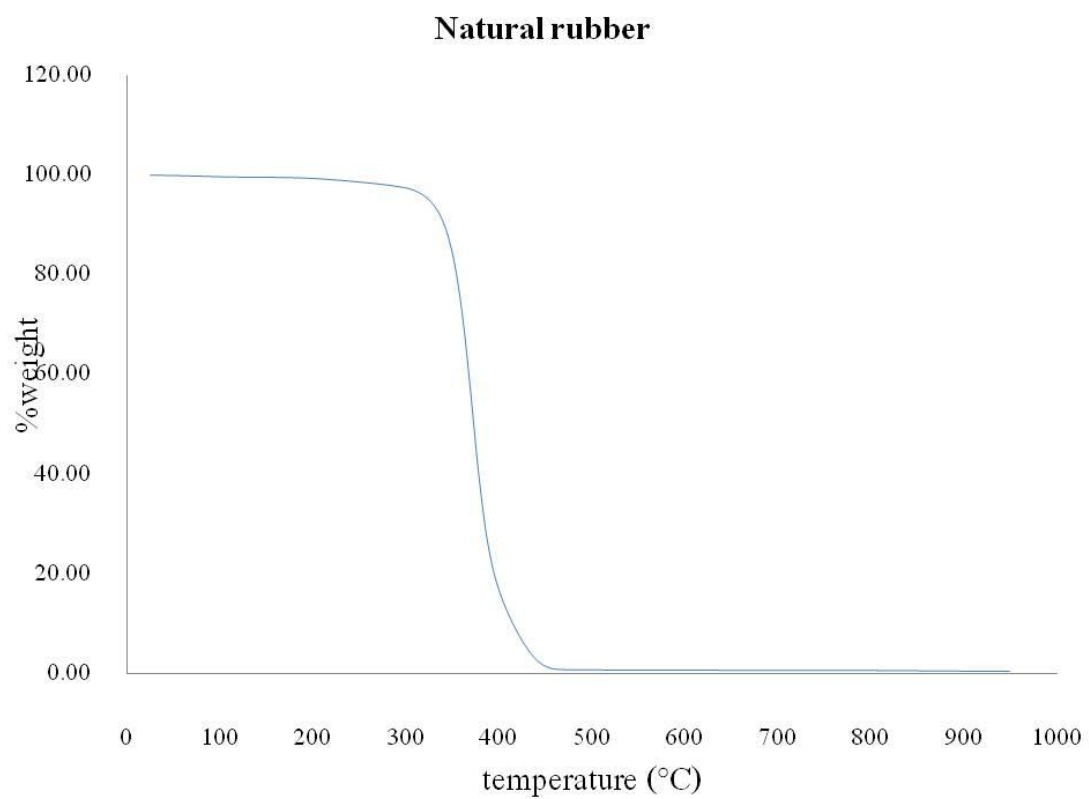
ภาคผนวก ข

### TGA Thermogram

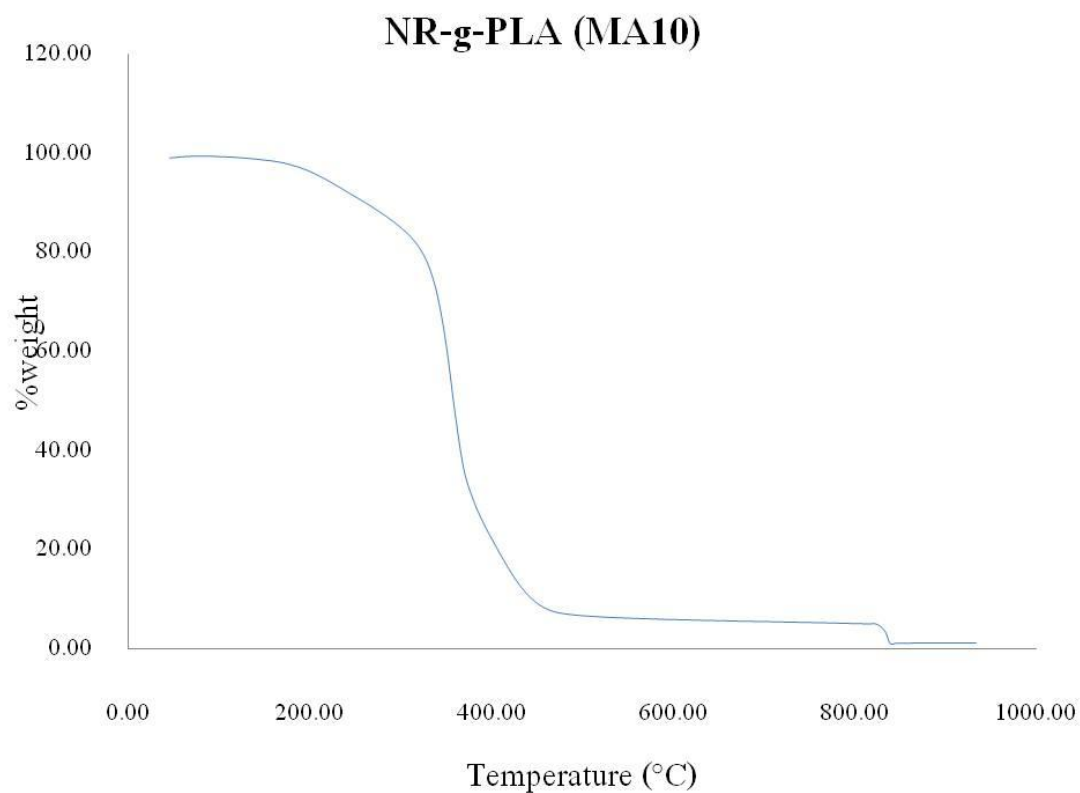
#### 1. พอลิแล็กติกแอซิด



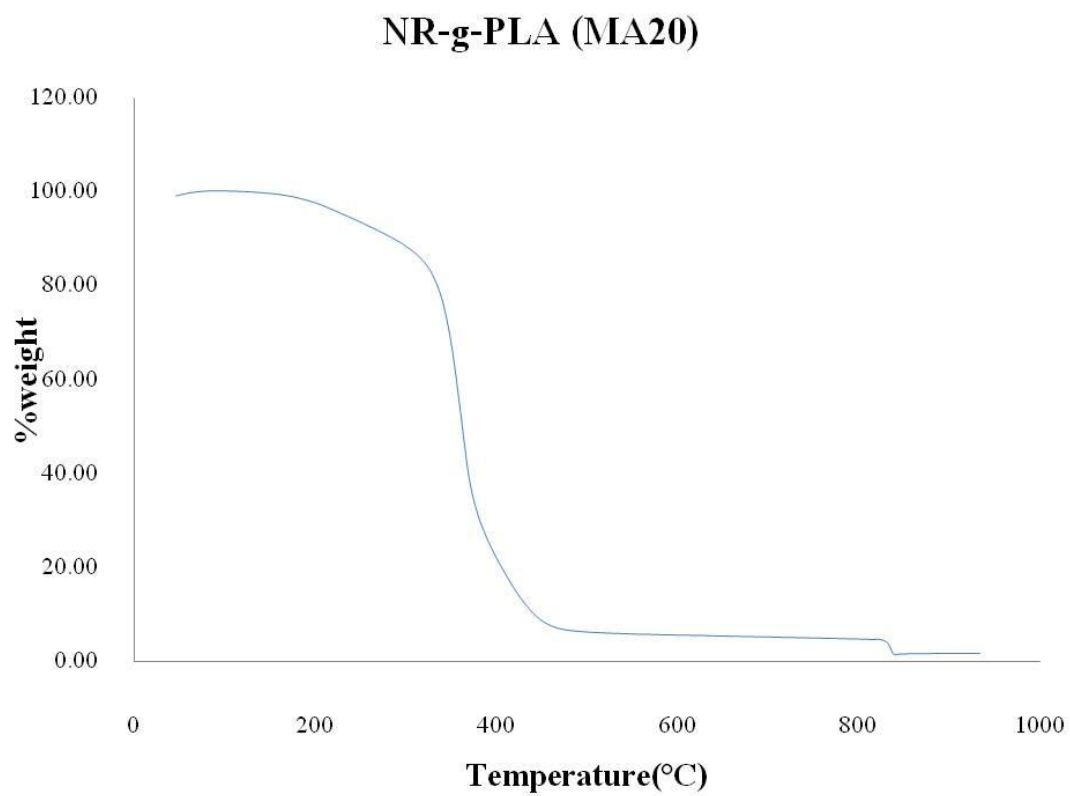
## 2. ยางธรรมชาติ



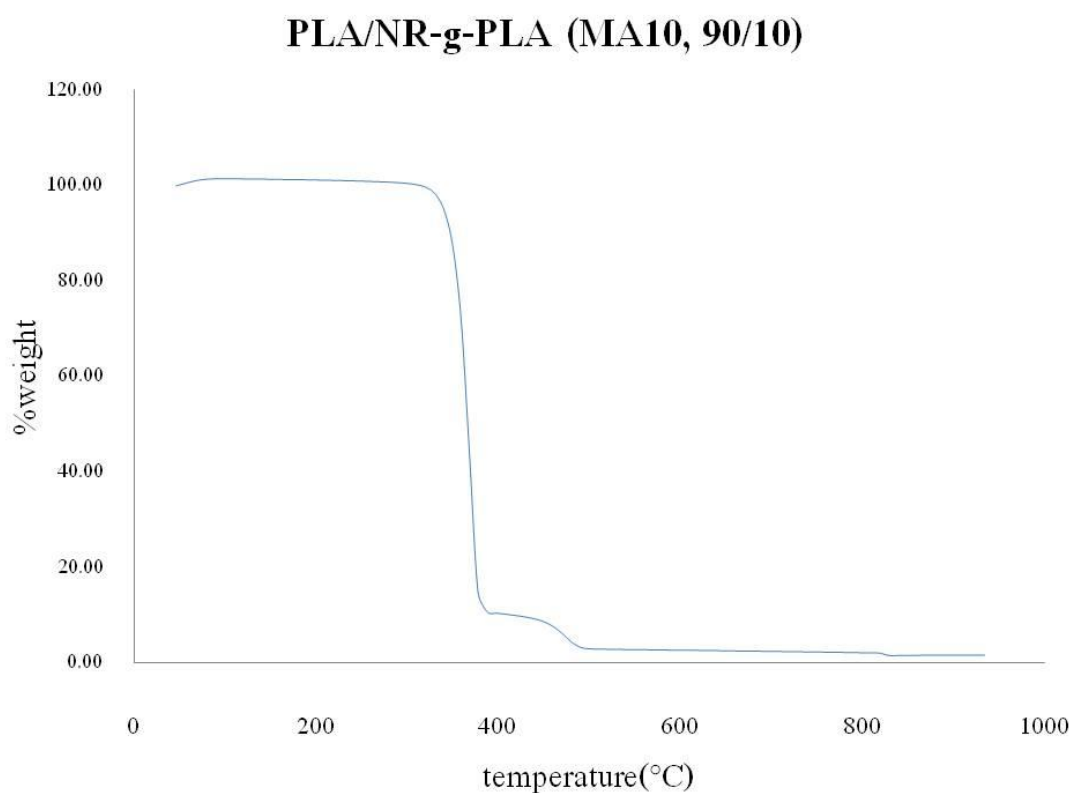
3. ยางธรรมชาติมาเลเดคกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิก  
แอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ



4. ยางธรรมชาติมาเลเดคกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ



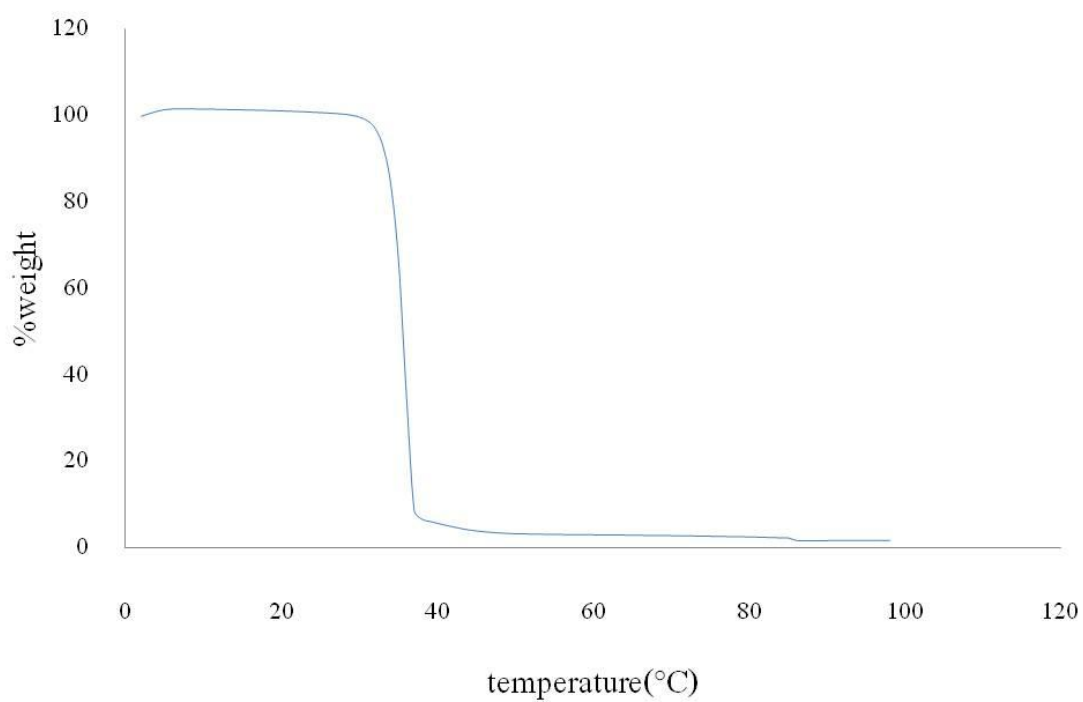
5. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติในสัดส่วน 95 : 5 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)





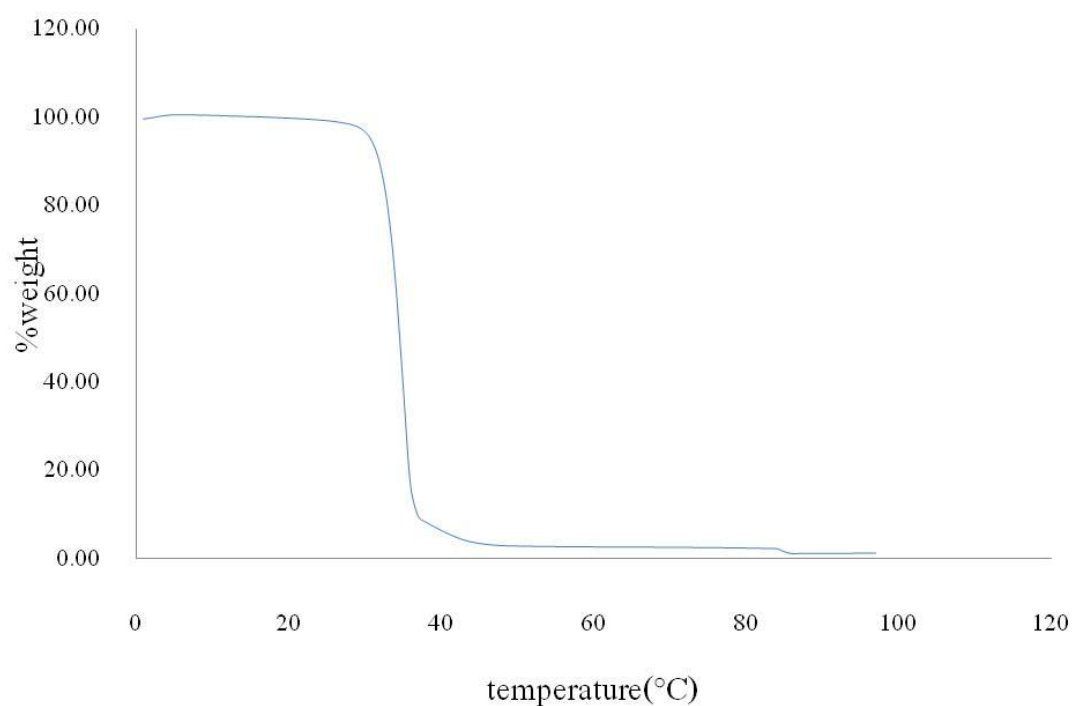
6. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติในสัดส่วน 90 : 10 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)

### PLA/NR-g-PLA (MA10, 80/20)

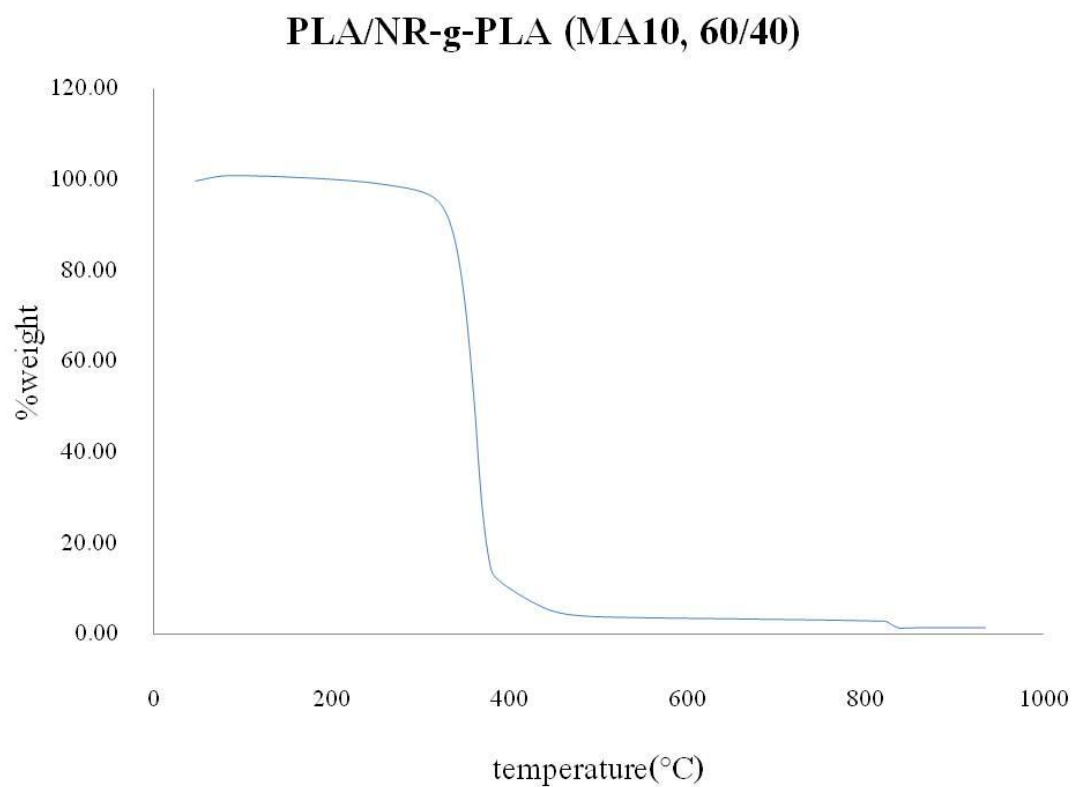


7. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 85 : 15 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)

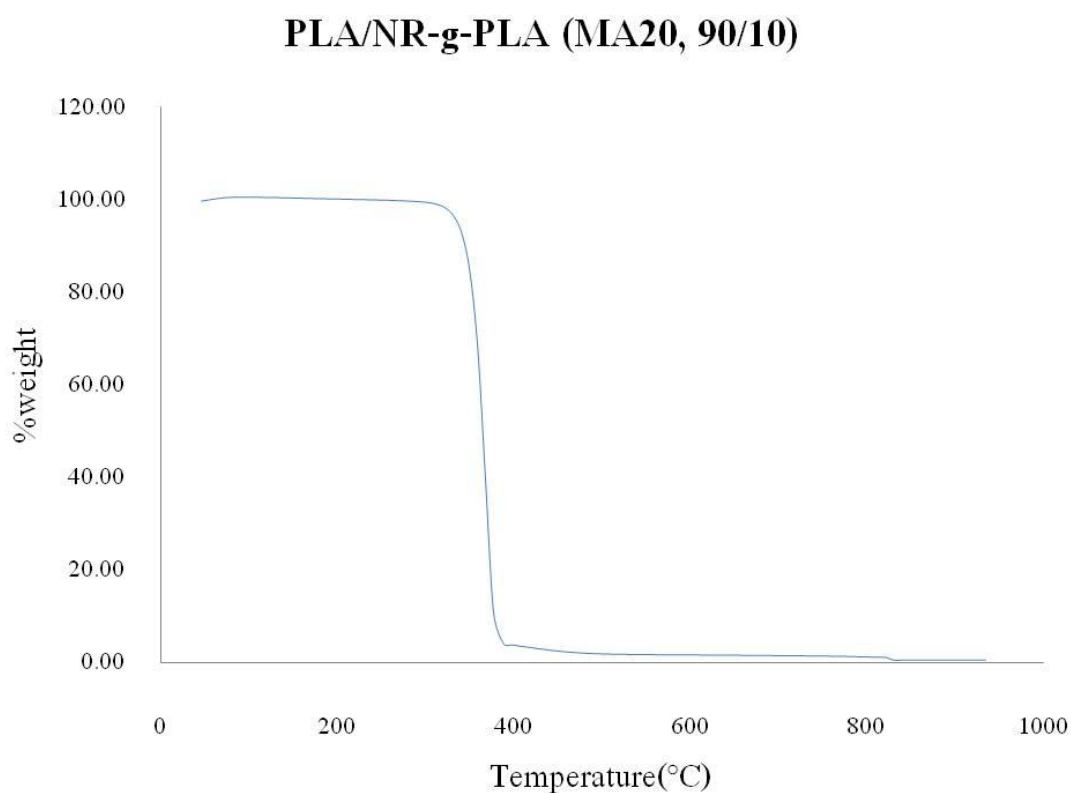
### PLA/NR-g-PLA (MA10, 70/30)



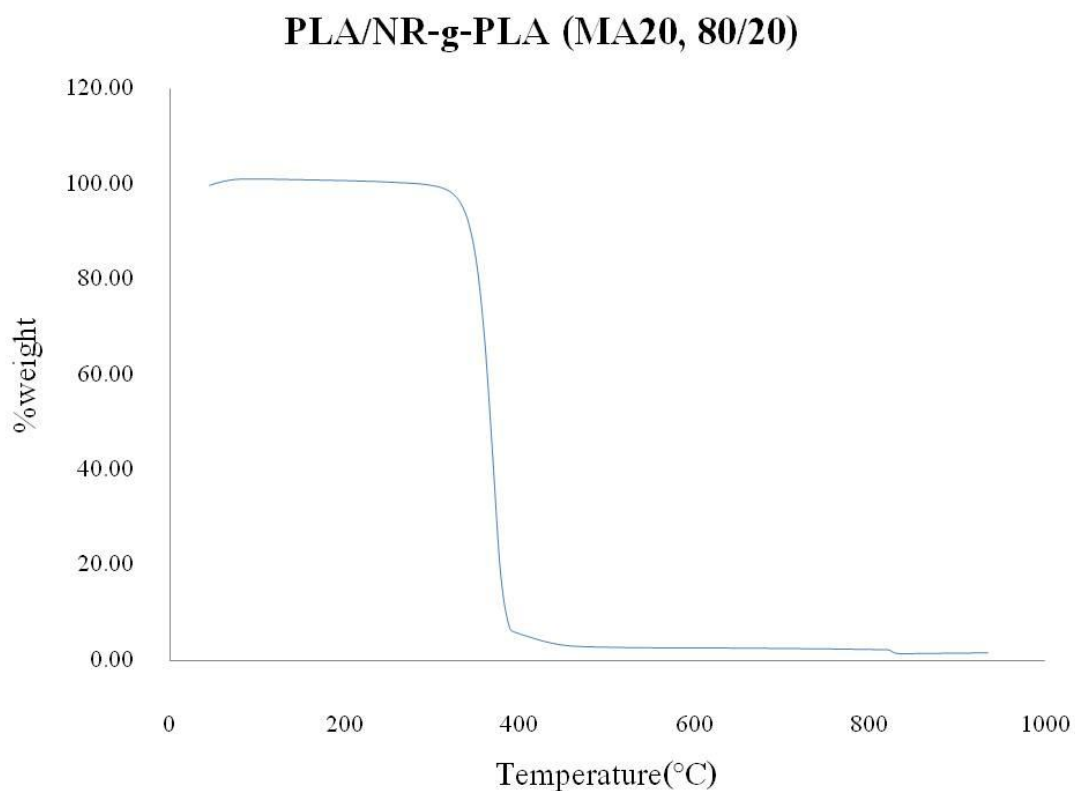
8. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติในสัดส่วน 80 : 20 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



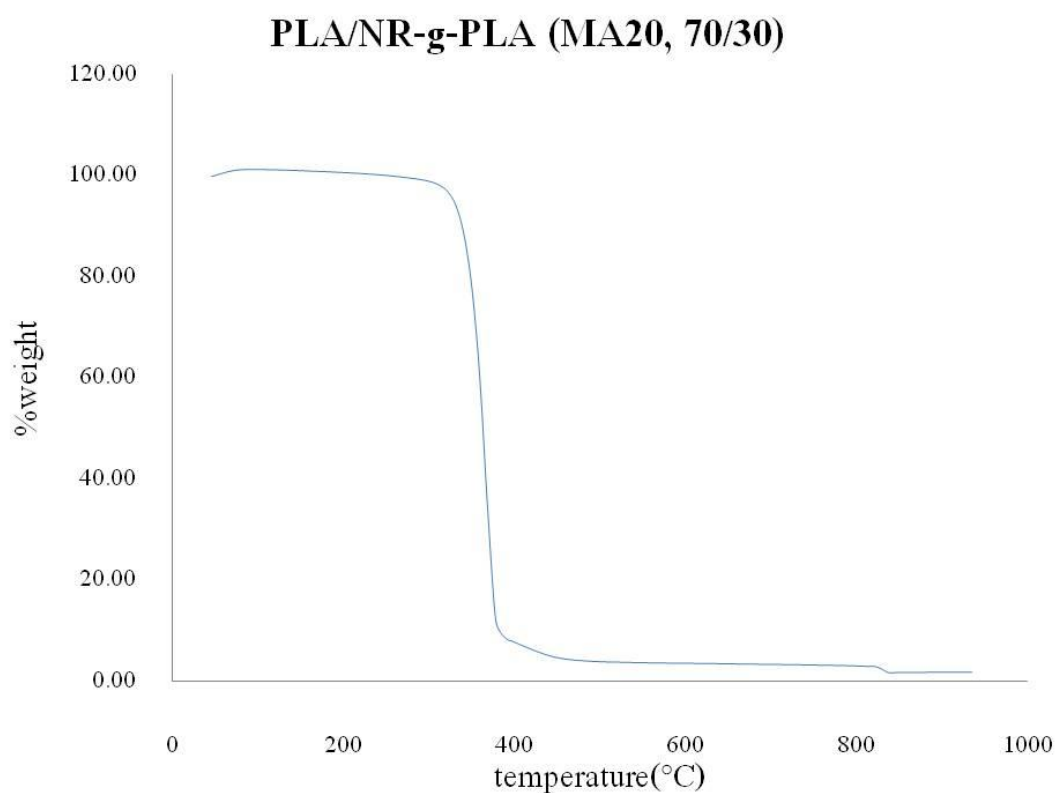
9. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติในสัดส่วน 95 : 5 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



10. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติในสัดส่วน 90 : 10 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)

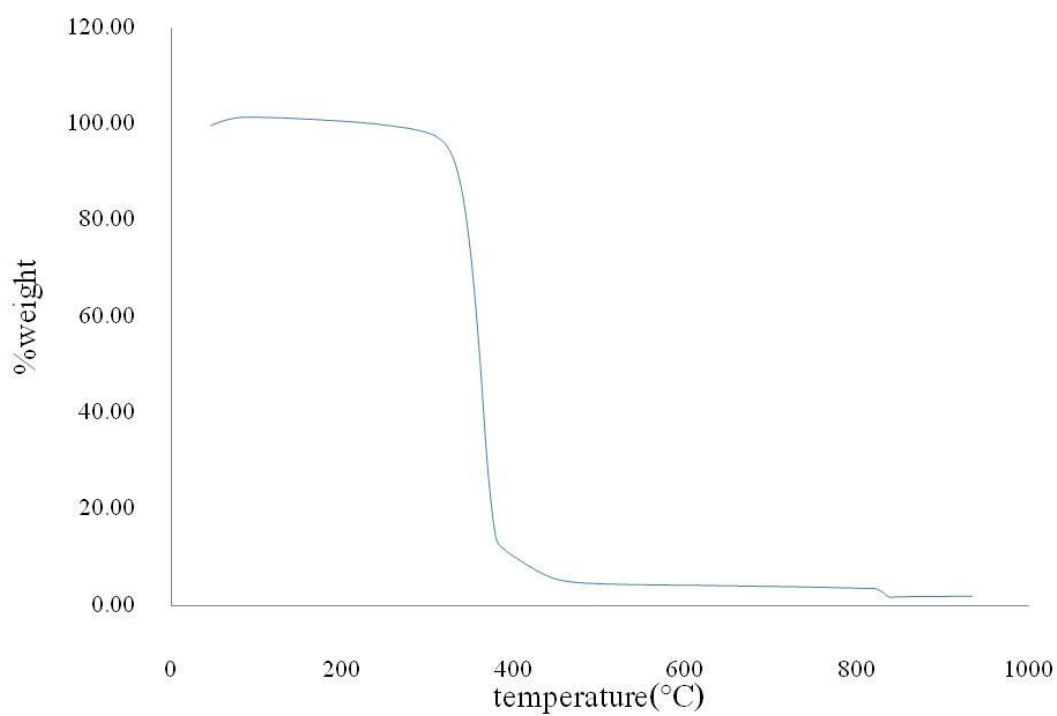


11. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติในสัดส่วน 85 : 15 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



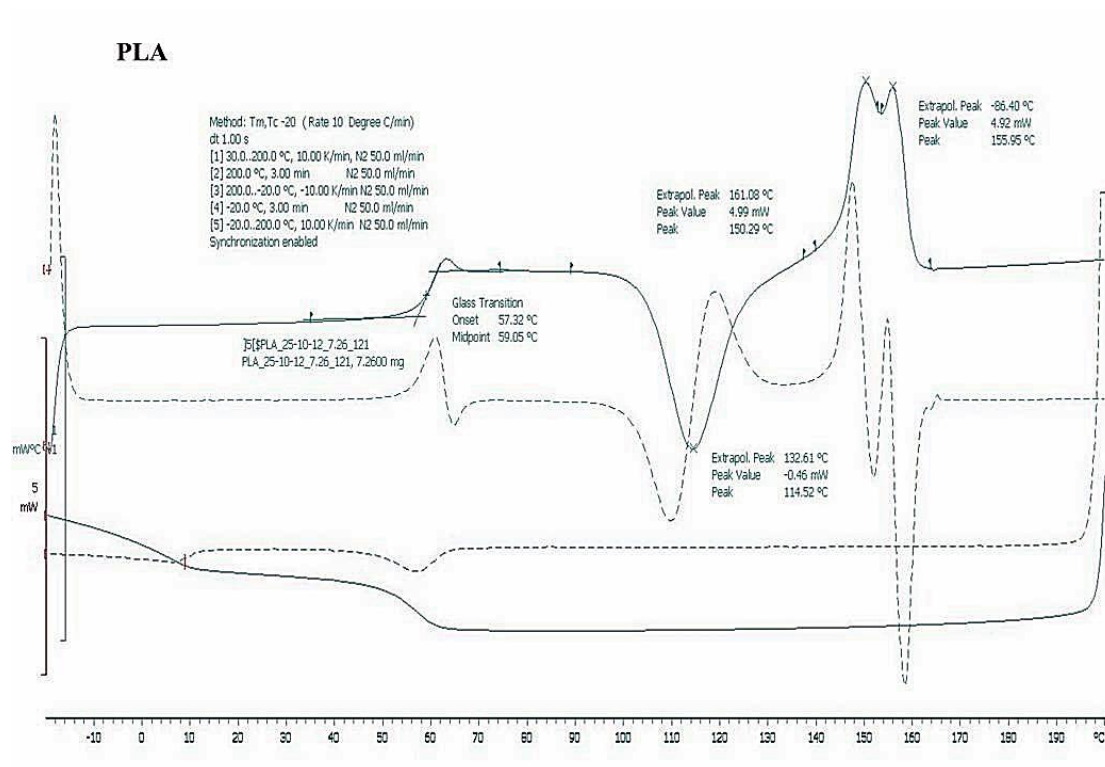
12. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติในสัดส่วน 80 : 20 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)

### PLA/NR-g-PLA (MA20, 60/40)



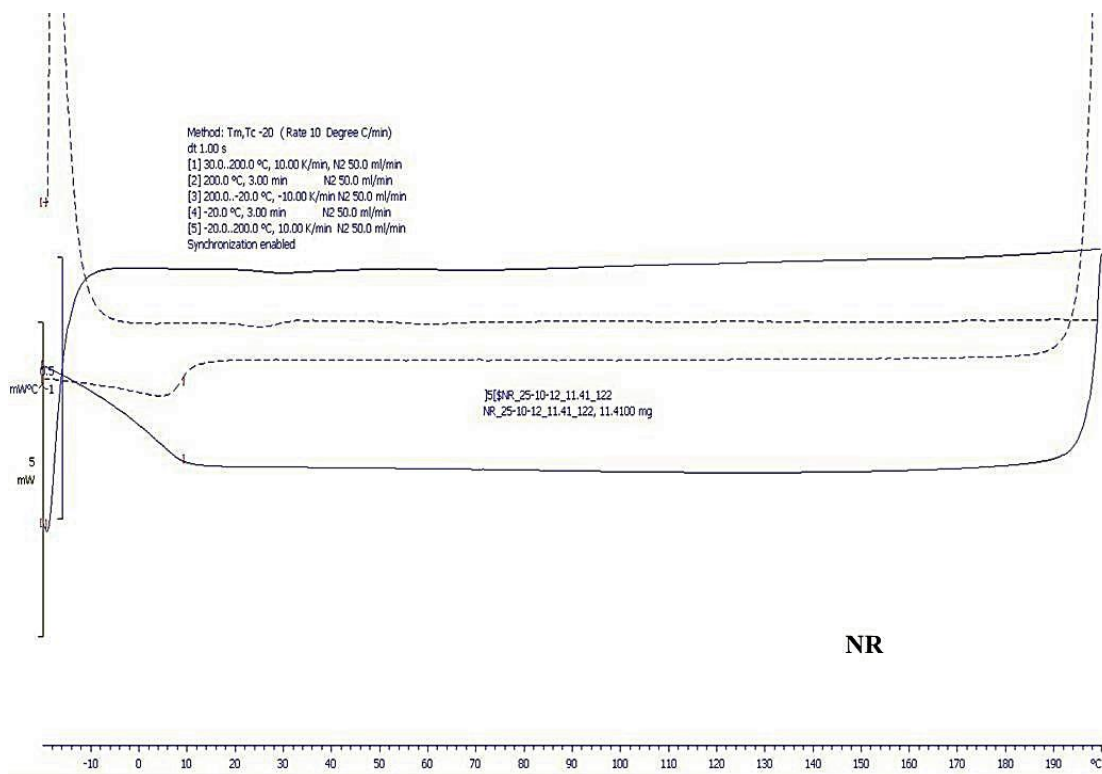
## DSC Thermogram

### 1. พอลิแล็กติกแอซิด

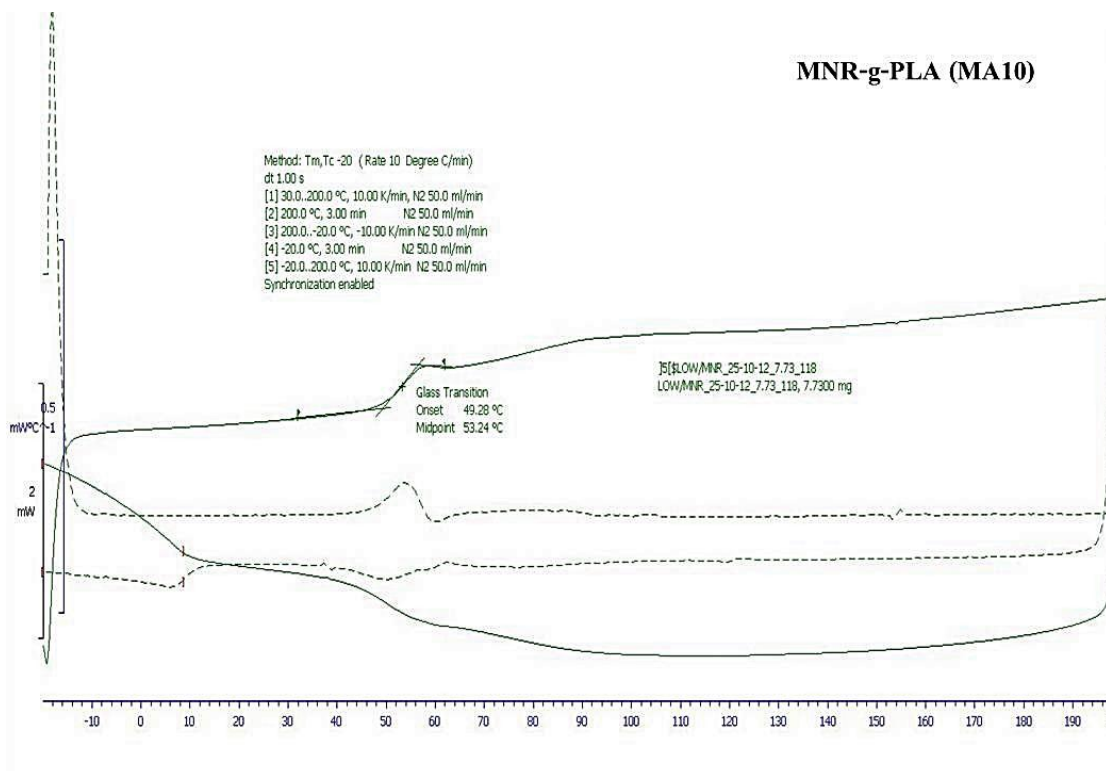




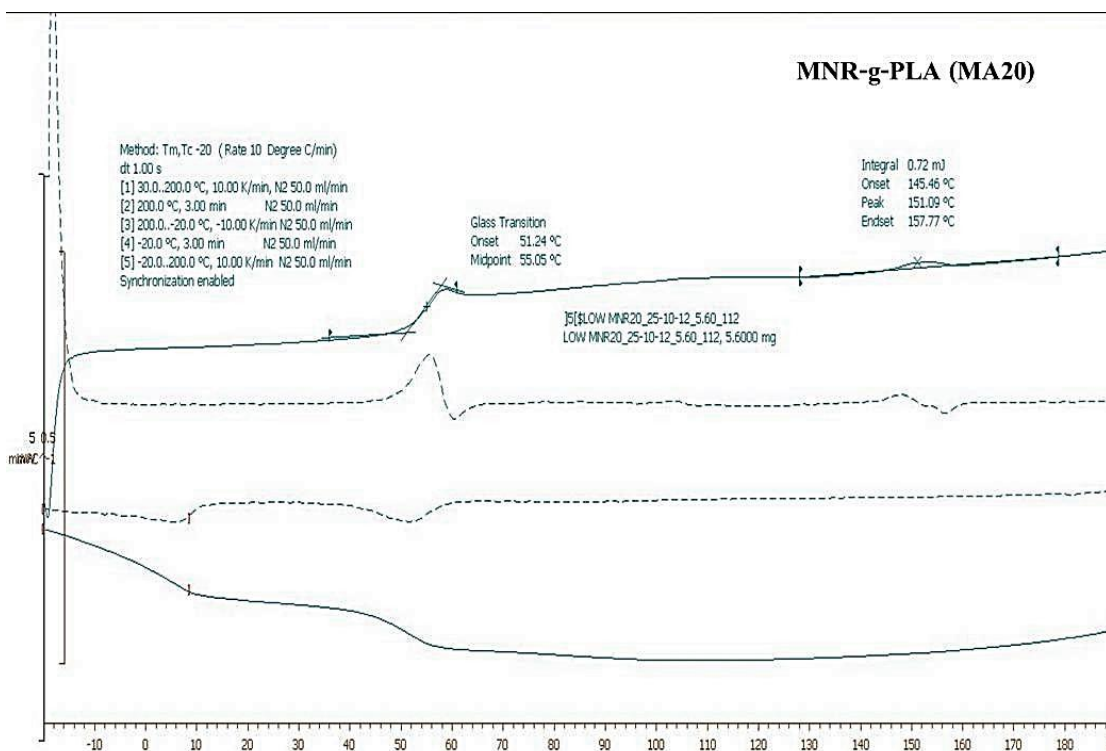
## 2. ขงกรรมชาติ



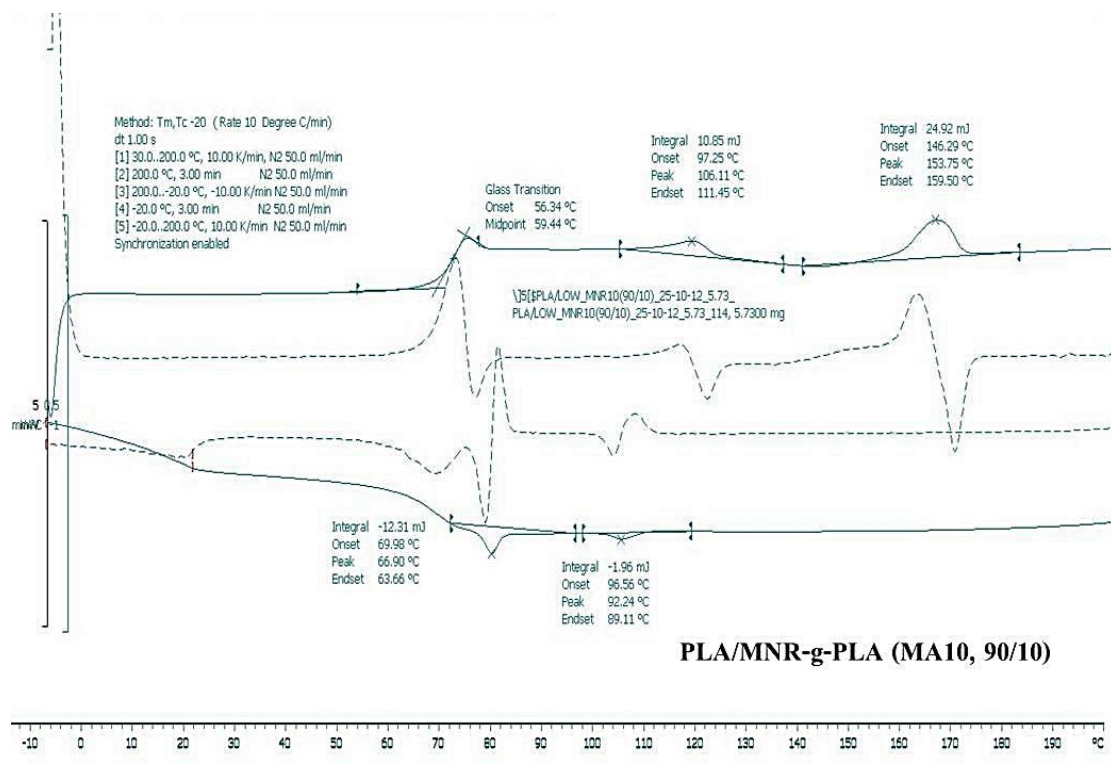
3. ขงธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอสิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิก  
แอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของขงธรรมชาติ



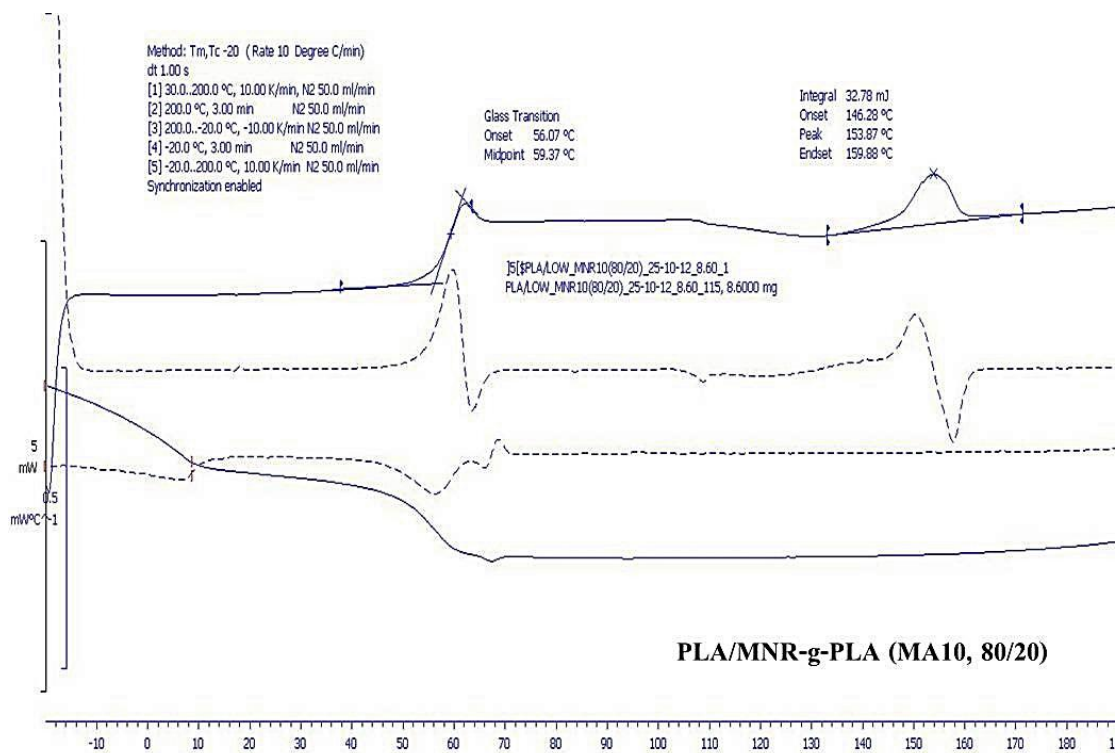
4. ขงธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิเล็กทิกแอสิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลอิก  
แอนไฮไดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของขงธรรมชาติ



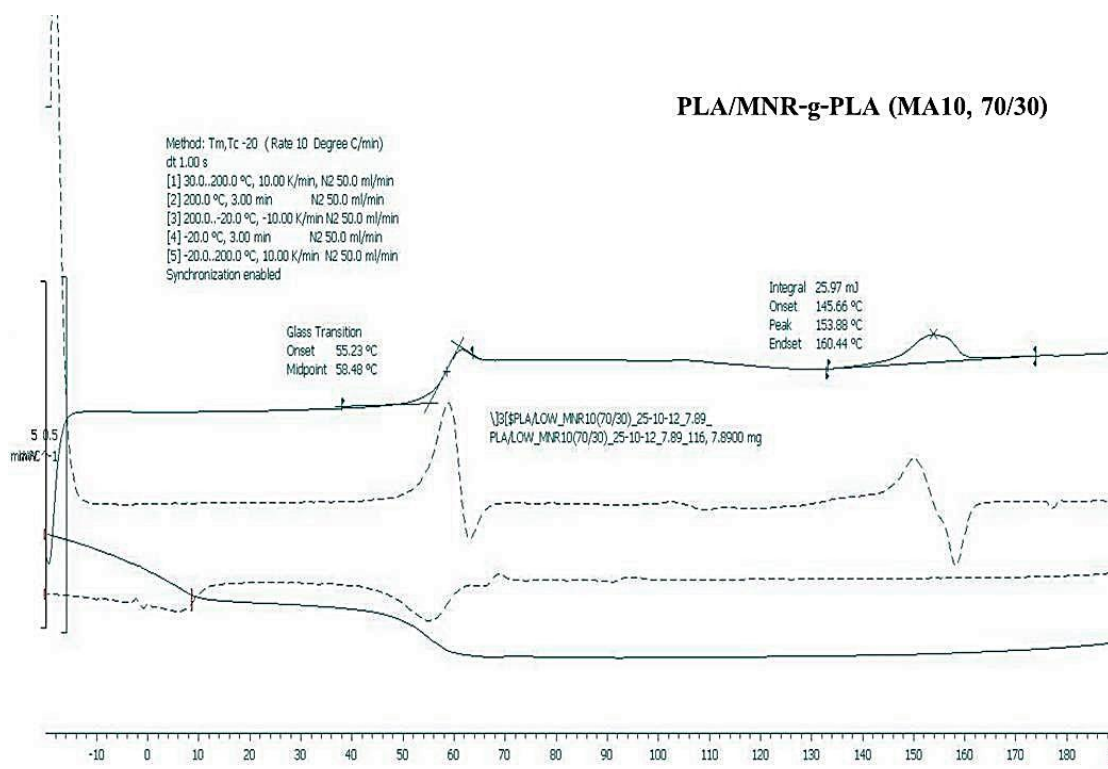
5. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮโดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 95 : 5 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



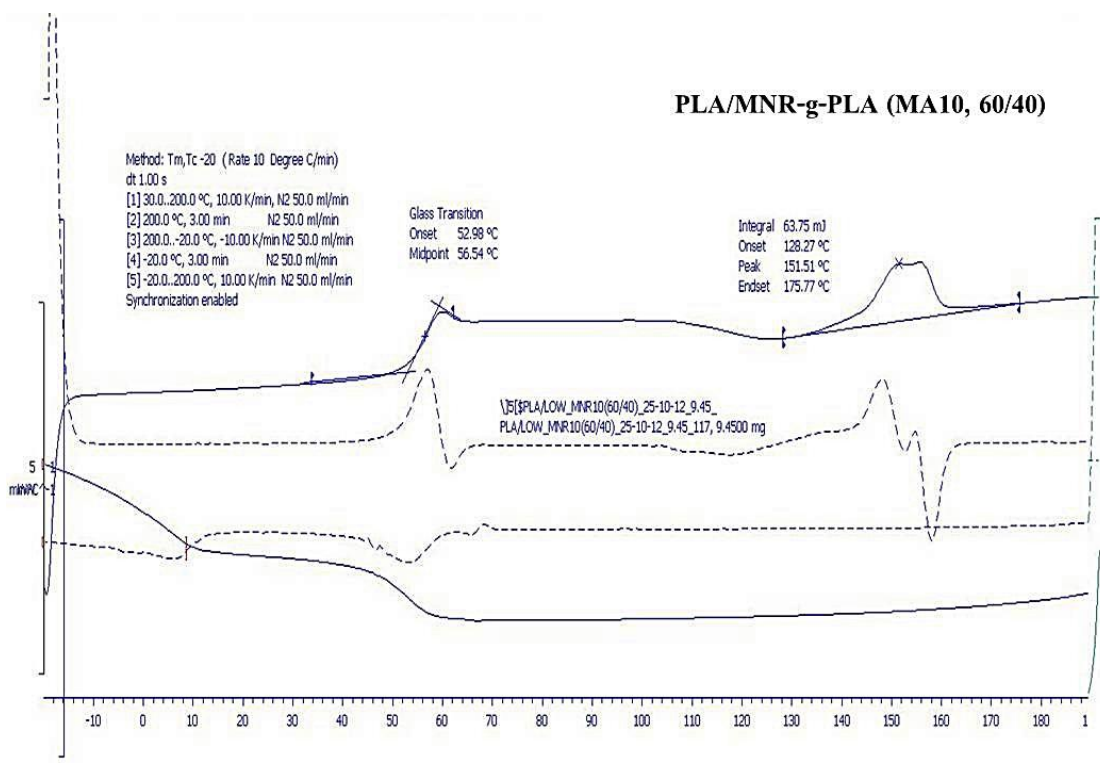
6. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮโดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 90 : 10 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



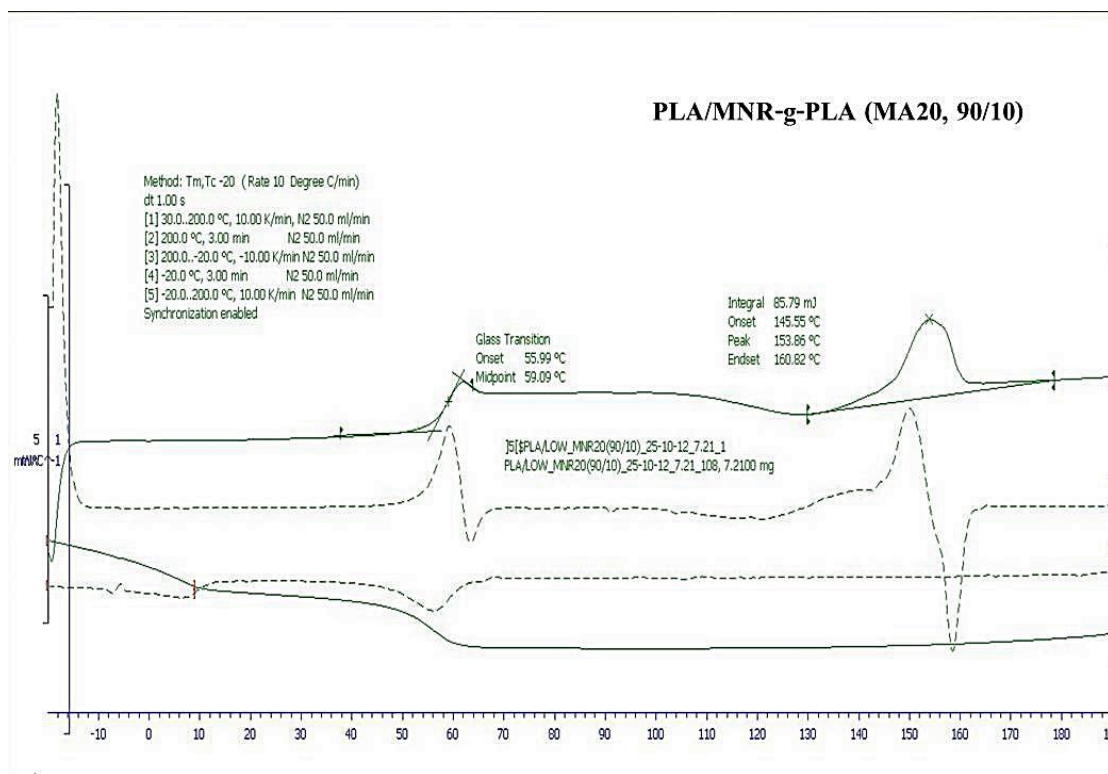
7. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮโดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 85 : 15 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



8. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 80 : 20 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)

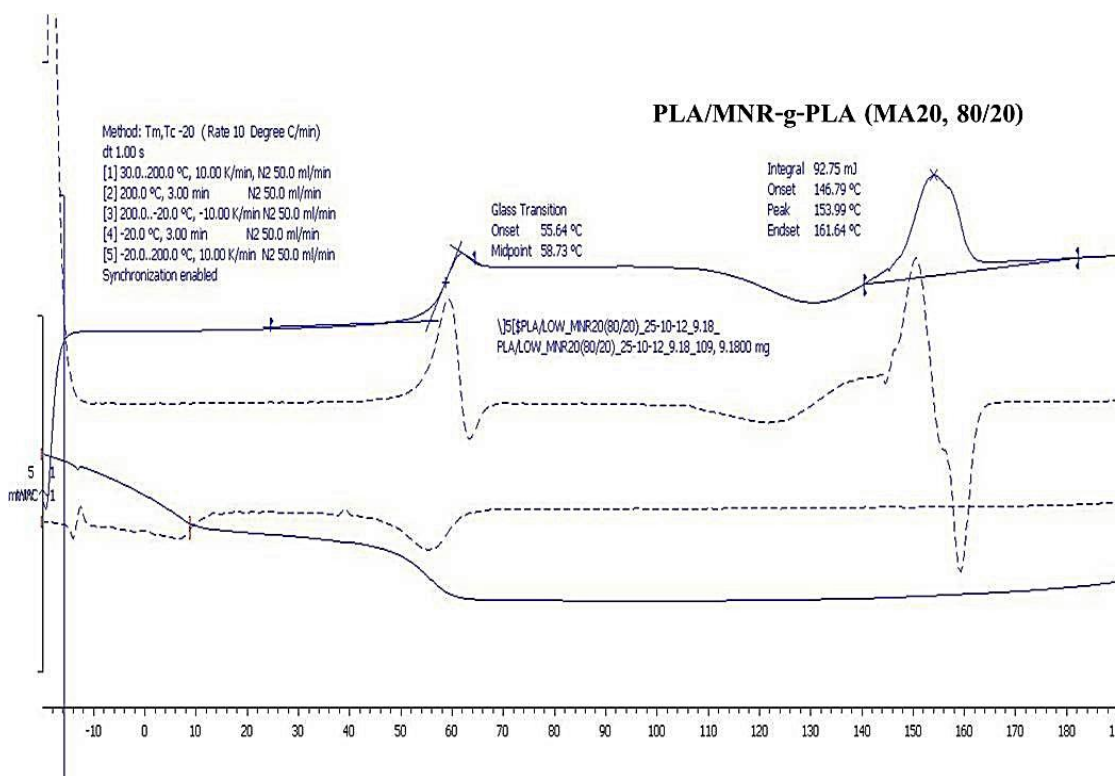


9. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮโดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 95 : 5 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)

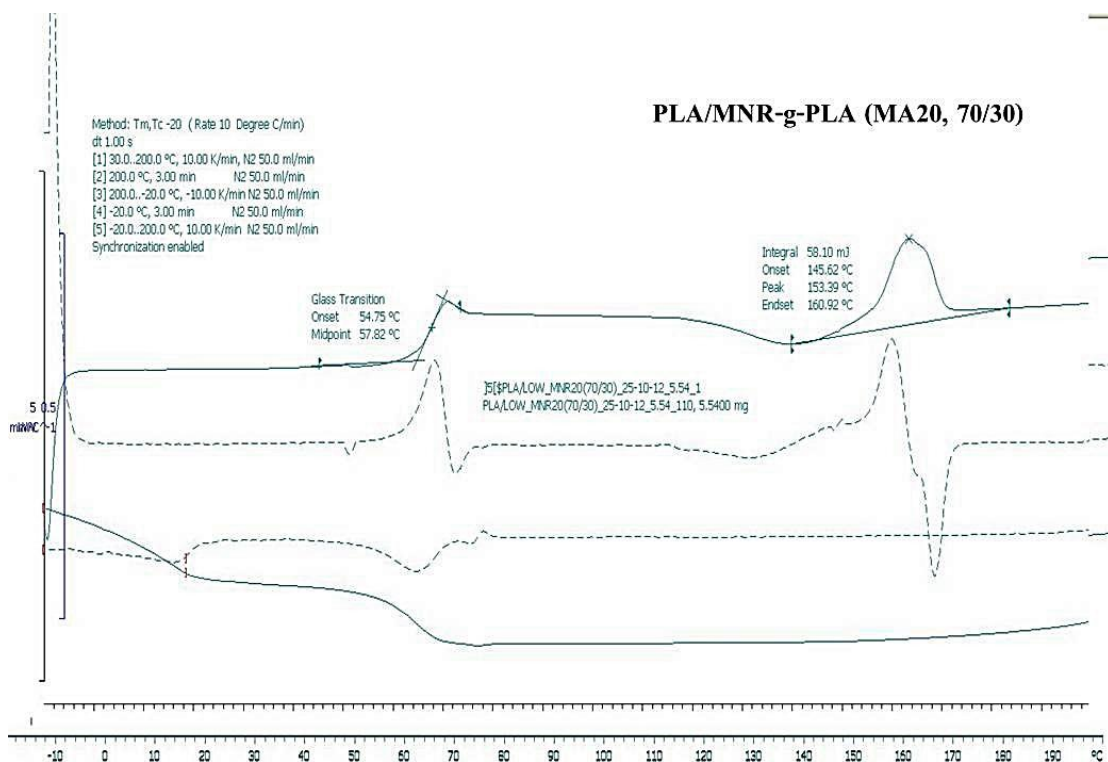




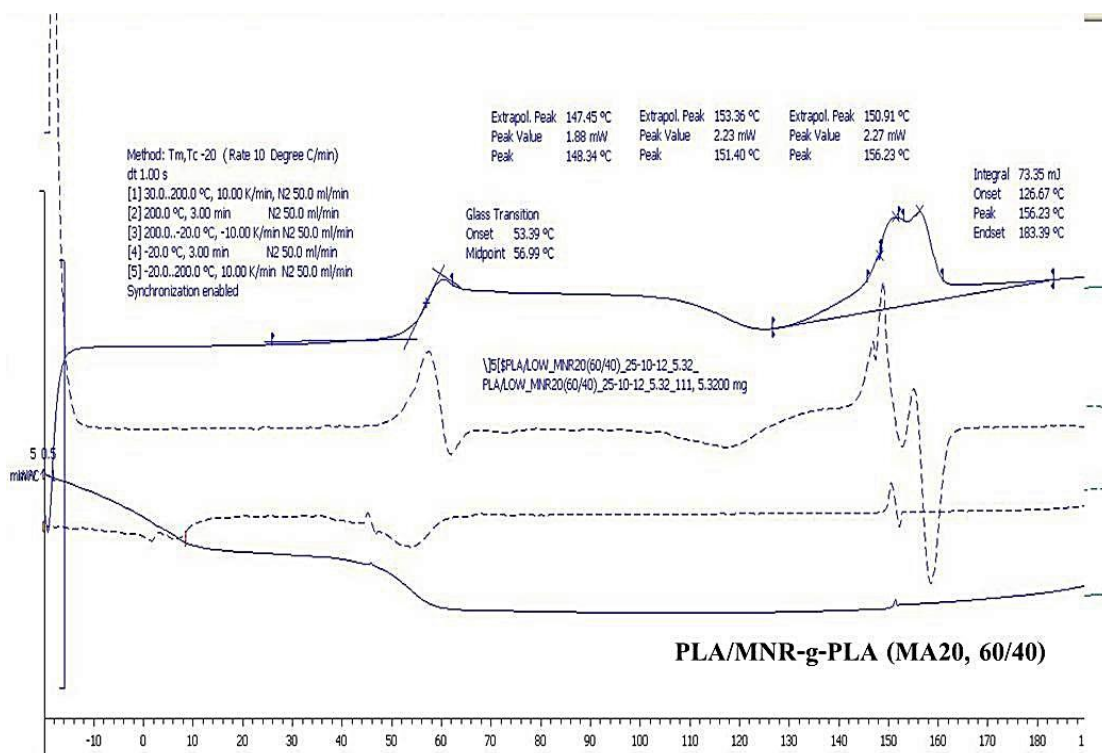
10. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮโดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 90 : 10 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



11. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮโดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ ในสัดส่วน 85 : 15 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)

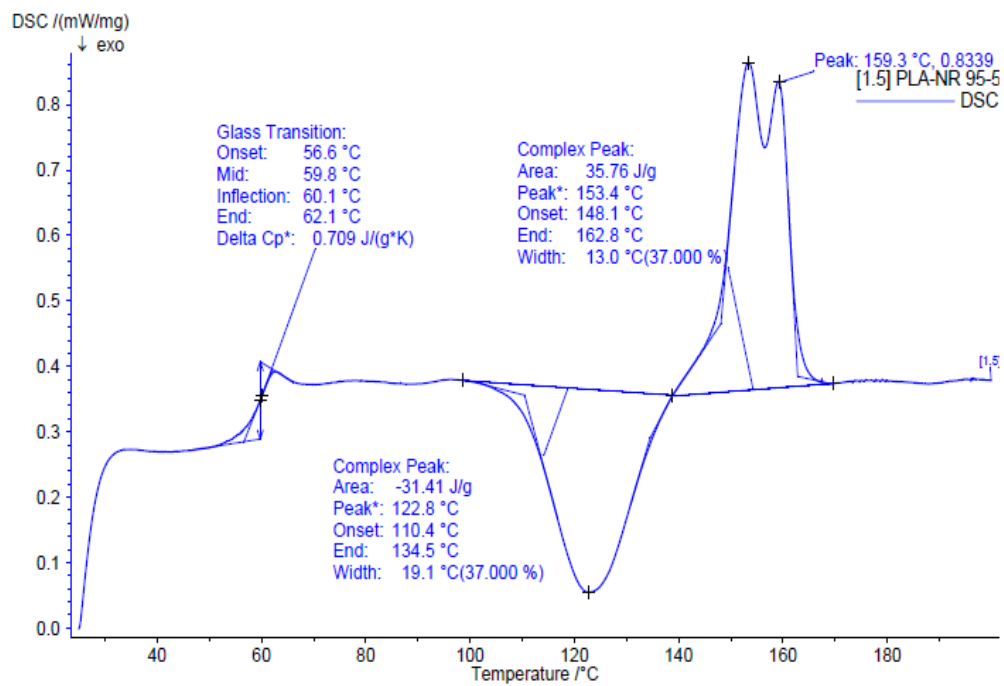


12. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติมาเลตกราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด  
 แอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีปริมาณมาเลกแอนไฮโดรด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ  
 ในสัดส่วน 80 : 20 (เทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ)



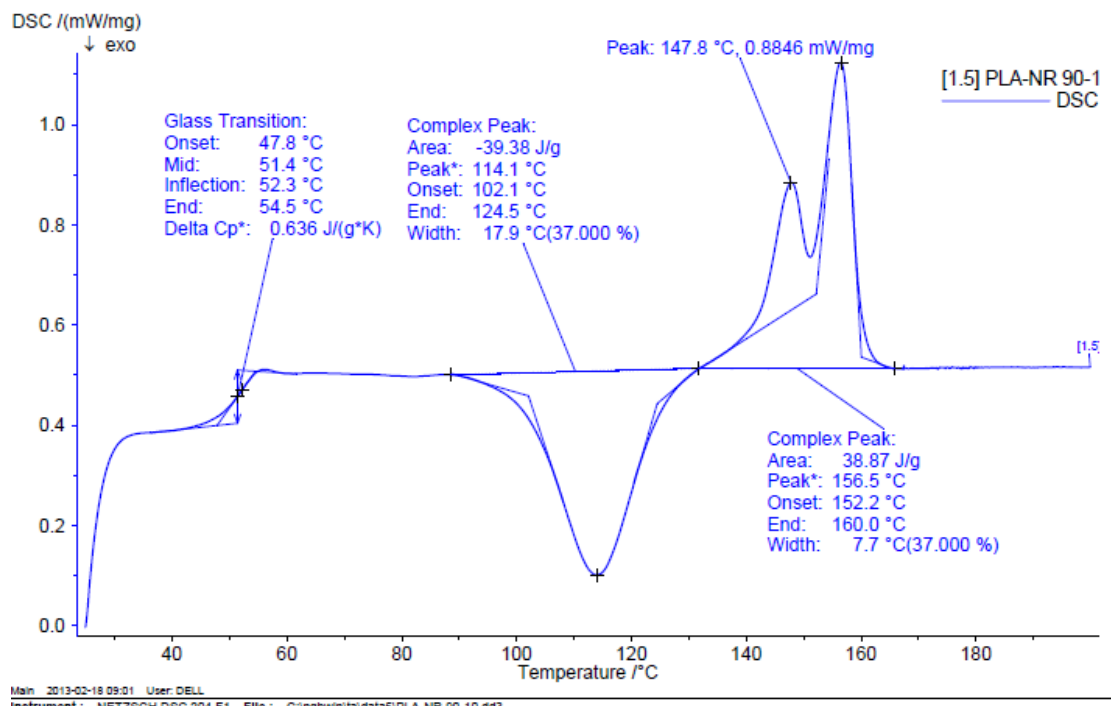
13. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติ ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติร้อยละ

ละ 5 ของพอลิเมอร์ผสม



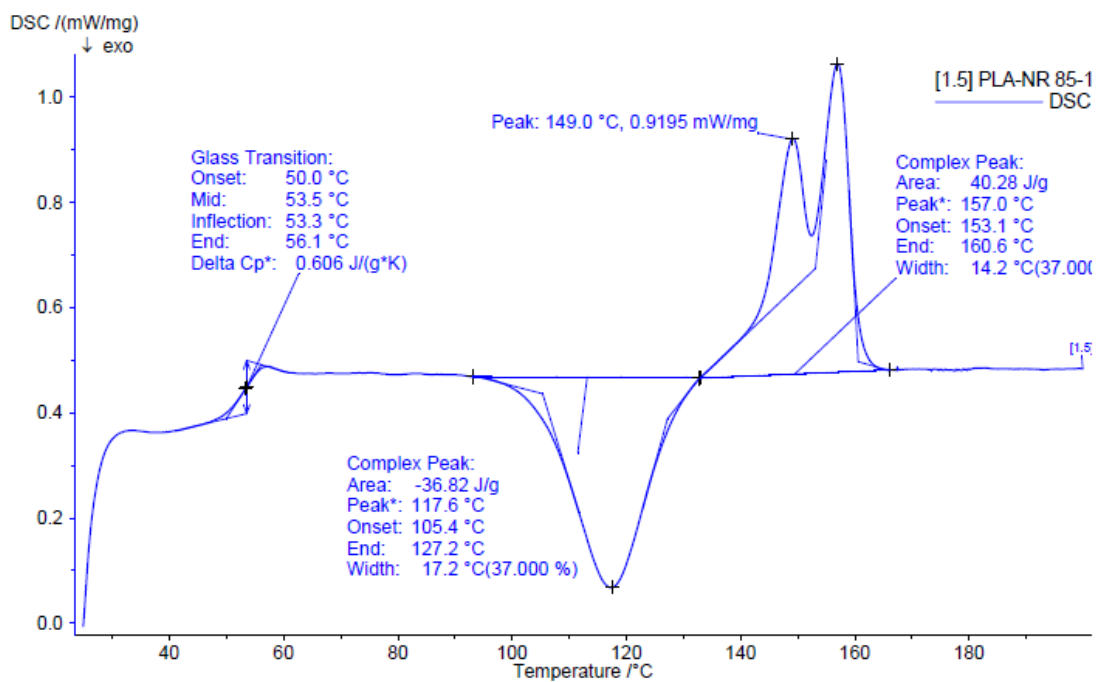
14. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติ ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติร้อยละ

ละ 10 ของพอลิเมอร์ผสม



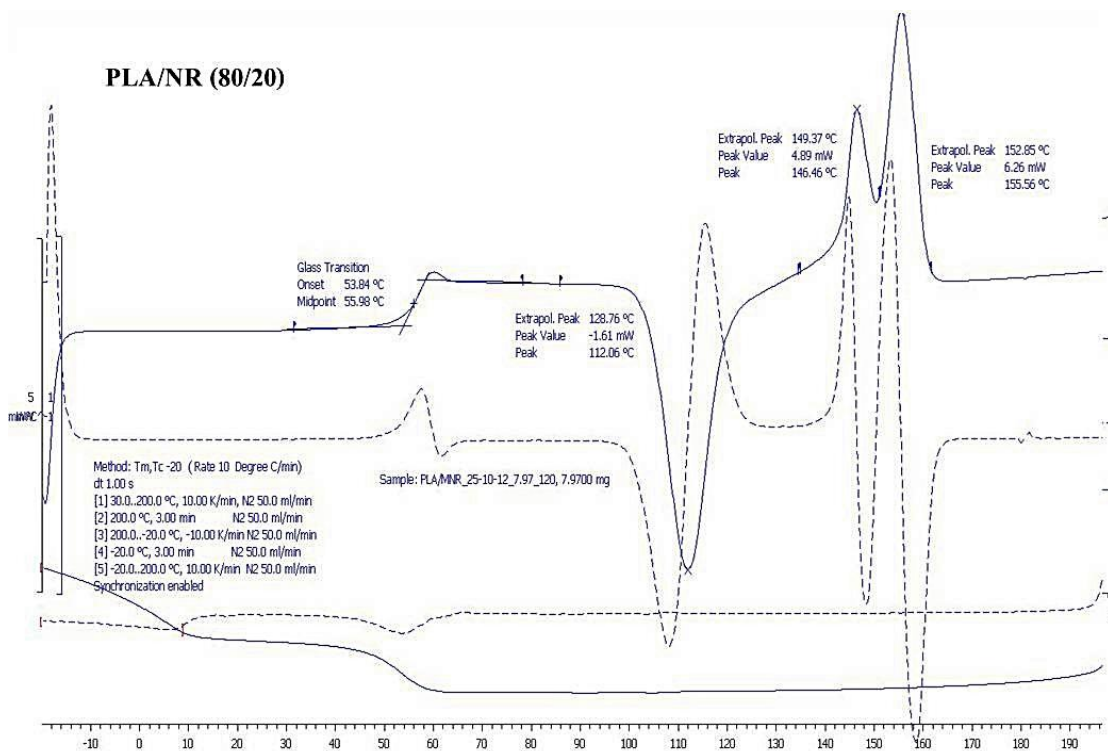
15. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติ ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติร้อยละ

ละ 15 ของพอลิเมอร์ผสม



16. พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/ยางธรรมชาติ ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติร้อยละ

ละ 20 ของพอลิเมอร์ผสม



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอภิชา เทพธวัช เกิดวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ที่ จ. นครสวรรค์ จบการศึกษา  
ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการ  
และวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปี  
การศึกษา 2553 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิ  
เมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 และสำเร็จ  
การศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2555