การศึกษาสมบัติพอลิแลคติกแอซิดเมื่อใช้น้ำมันละหุ่งเป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติก

Study Poly(lactic acid) properties in using of castor oil as a plasticizers

วริศชยา รุ่งเรือง[1] กุลวดี สังข์สนิท[1*]
[1,2*]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี
อีเมล์: kullawadee.s@en.rmutt.ac.th[*]

Waritchaya Rungrueng[1] Kullawadee Sungsanit[1*]
[1,2*] Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani
E-mail: kullawadee.s@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติพอลิแลคติกแอซิดเมื่อใช้น้ำมันละหุ่งเป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติก ในปริมาณการผสม น้ำมันละหุ่งที่ 0 5 10 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ จากนั้นทำการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการหลอมเหลว การทนต่อแรงกระแทก การต้านทานการโก่งงอ และการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการศึกษาพบว่า การผสมน้ำมันละหุ่งลงไปในพอลิแลคติกแอซิด ไม่ส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดสำหรับสมบัติเชิงกล กล่าวคือ สามารถปรับปรุงค่าการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า อีกทั้งค่าการต้านทานการเสียรูปแบบโก่งงอ จากผลดังกล่าวสามารถยืนยันการปรับปรุงพฤติกรรมการแตกหักของพอลิแลคติกเมื่อผสมกับน้ำมันละหุ่ง ได้ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ที่พบการยืดตัวก่อนขาดและโพรงเล็กๆ ขนาดประมาณ ไมโครเมตรที่ทำหน้าที่เหมือนตัวดูดซับแรง กระจายไป 2-1 วนผสมทั่วพื้นที่ผิวแตกหัก จากงานวิจัยนี้ ส่ที่เหมาะสมที่สุด คือ ปริมาณน้ำมันละหุ่ง 10 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิด

คำหลัก พอลิแลคติกแอซิด น้ำมันละหุ่ง สารเพิ่มสภาพพลาสติก

Abstract

The research aims to study the properties of Poly (lactic acid) in using of Castor oil as a plasticizers. Castor oil was blended with Poly)lactic acid (in various contents (0 5 10 15 and 20 phr) by using twin screw extruder and samples were prepared by injection molding. A range of characterization techniques were used to investigate the glass transition temperature, melting temperature, impact strength, flexural strength and morphological properties. The results of this study found that the addition of castor oil in Poly)lactic acid(slightly lowered glass transition temperature. However, this investigation has significant effect on impact strength and flexural strength. Due to the ductile fracture and the distribution of micro voids as the energy absorber were observed by SEM micrograph. Therefore the addition of castor oil has adility to a plasticizer in Poly(lactic acid) and the optimum content should be 10 parts per hundred parts of resin.

Keywords: Poly)lactic acid(Castor oil Plasticizer

1. บทนำ

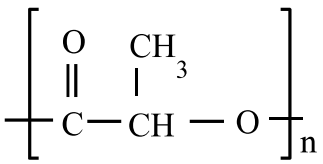
ในปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อพัฒนาคิดค้นการผลิตพลาสติกใหม่ๆ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องมาจากพลาสติกที่ผลิตใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ที่สังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ จึงเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณขยะเพิ่มมากขึ้นในทุกๆ ปี พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติก พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีการศึกษาผลิตเป็นพลาสติกในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ เช่น พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) หรือพอลิแลกไทด์ (Polylactide) จึงมีความน่าสนใจในการนำมาใช้งานแทนพลาสติกชนิดทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีน(polyethylene) หรือ พอลิโพรพิลิน (polypropylene) Polylactic acid,(PLA) เป็นพอลิเมอร์ ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ และมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสนใจที่เพิ่มมากขึ้นในเรื่องการรักษาสิ่งแวดล้อมและใช้ทดแทนพอลิเมอร์ที่มาจากปิโตเคมี นอกจากนี้การใช้งานในอุตสาหกรรม รวมถึง ยานยนต์,สิ่งทอ,บรรจุภัณฑ์ชนิดใช้แล้วทิ้ง, บรรจุภัณฑ์อาหารและอุตสาหกรรมเครื่องใช้เกี่ยวกับไฟฟ้า PLA ถูกใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพในทางการแพทย์ เช่น เนื้อเยื่อปลูกฝัง,อวัยวะเทียม,ศัลยกรรมทางปาก,ศัลยกรรมทางกระดูก[1-4] PLA มีความเปราะ มีความทนต่อแรงกระแทกและการบิดงอที่ต่ำ ดังนั้น การแตกหักแบบเปราะจึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน[5-6] งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาสมบัติของ PLA ที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์เชิงชีวภาพ เพื่อศึกษาว่าพลาสติไซเซอร์เชิงชีวภาพสามารถปรับปรุงสมบัติทำให้ PLA มีสมบัติด้านความเหนียวดีขึ้น

โดยใช้น้ำมันพืชเป็นส่วนผสมที่ใช้ในการปรับปรุง ซึ่งน้ำมันพืชที่ใช้ คือ น้ำมันละหุ่ง (Castor Oil) เนื่องจากน้ำมันละหุ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตเรซิน (Resin) และเส้นใยเทียม พลาสติก หนังเทียม และน้ำมันผสมสี ฉนวนไฟฟ้า ขี้ผึ้งเทียม น้ำยารักษาหนัง น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเบรกรถยนต์ หมึกพิมพ์ และมีข้อดีในเรื่องของการหล่อลื่นที่ดี ทนต่อความร้อนสูง ช่วยระบายความร้อนได้ดี [5-6]

2.วัสดุและวิธีการทดลอง

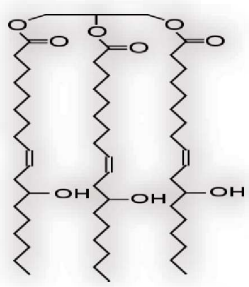
2.1 วัตถุดิบและการผสม

พอลิแลคติกแอซิด (PLA เกรด 4043 D จากบริษัท NatureWorks.)



รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด[3]

น้ำมันละหุ่ง)Castor Oil จากบริษัทไทยคาสเตอร์ออยส์ จำกัด)



รูปที่ 2 สูตรโครงสร้างของน้ำมันละหุ่ง[9]

จากสูตรโครงแสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดกับน้ำมันละหุ่งมีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์เหมือนกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่นำมาผสมกันตามอัตราส่วนดังตารางที่ 1

ตารางที่1 แสดงอัตราส่วนผสมพลาสติกคอมปาวด์ของ PLA และ Castor Oil

PLA)phr(	Castor Oil) phr(
100	0
100	5
100	10
100	15
100	20

การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่)Twins Screw - Extruder, CHAREON TUT CO.,LTD) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสแล้วนำเม็ด

พลาสติกคอมปาวด์ที่ได้ไปเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป)Injection Molding,ARBURG 470 C)

2.2 การเตรียมพลาสติกคอมปาวด์

ชั่งน้ำหนักของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PLA และ น้ำมันละหุ่งที่อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 1 นำเม็ดพลาสติก PLA มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12-15 ชั่วโมง ทำการหลอมผสมพลาสติกคอมปาวด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยอุณหภูมิการผสมจาก Hopper ถึงหัว Die เท่ากับ 180 °C และ 190 °C ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบสกรู เท่ากับ 80 รอบ/นาที นำพลาสติกคอมปาวด์ที่ผสมกันแล้วมาตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก นำเม็ดพลาสติกคอมปาวด์ที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PLA และน้ำมันละหุ่ง มาขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการฉีด 190 °C เวลาหล่อเย็น 30 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ โดยทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และทำการทดสอบสมบัติเชิงกล และ การวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.3 สมบัติทางความร้อน

ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PLA และ น้ำมันละหุ่งด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอรีเมทรี [7] โดยเตรียมตัวอย่างประมาณ 5-15 mg นำตัวอย่างที่เตรียมใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียม (Pan) แล้วนำไปอัดปิดฝาตั้งค่าช่วงอุณหภูมิที่ 0-200 °C พลังงานที่วัดออกมาจะเป็น mW สามารถวัดหาพื้นที่ได้รูปที่เรียกว่า “Heat Flux” โดยแปรตามลักษณะพฤติกรรมทางความร้อน

2.4 สมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบการทนแรงกกระแทก (Impact Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยชิ้นทดสอบมีความหนา 3 mm ความกว้าง 12.7 mm ความยาว 63.5 mm รอยบากตรงกลางลึก 2.45 mm และน้ำหนักค้อน 2.0 J ชิ้นทดสอบจะจับยึดไว้โดย clamp ในแนวตั้งและถูกตีด้วยลูกตุ้มน้ำหนักตามแรงเหวี่ยง ณ ตำแหน่งระหว่างจุดที่จับชิ้นทดสอบและเส้นกึ่งกลางของรอยบากที่อยู่ด้านเดียวของรอยบาก

ทำการสอบการต้านทานการโก่งงอ (Flexural Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยการทดสอบเป็นแบบกด 3 จุดที่ความเร็วของหัวกดชิ้นงาน 1.3 mm/min ความยาวของ support span 96.0 mm

2.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

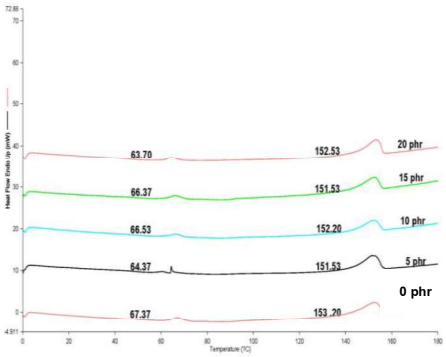
การวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning electron microscopy, SEM) โดยนำชิ้นงานจากการทดสอบการทนแรงกระแทก นำชิ้นงานบริเวณที่หักไปทำการเคลือบทองก่อนจะทำการ ศึกษาลักษณะพื้นผิวการแตกหักของตัวอย่าง

3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 2สมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ระหว่าง PLA:น้ำมันละหุ่ง ที่อัตราส่วนต่างๆด้วยเทคนิค DSC

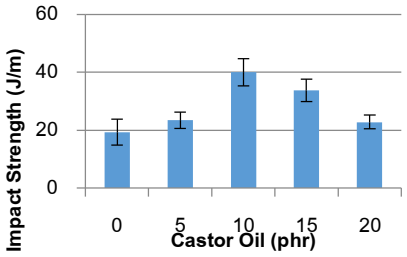
PLA:Castor Oil (phr)	T_g (C)	T_m (C)	Delta H (J/g)	%Crystallinity
100:0	67.37	153.20	17.36	19%
100:5	64.37	151.53	19.58	21%
100:10	66.53	152.20	20.05	21%
100:15	66.37	151.53	15.95	17%
100:20	63.70	152.53	15.40	16%



รูปที่ 3 เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ระหว่าง PLA : Castor oil

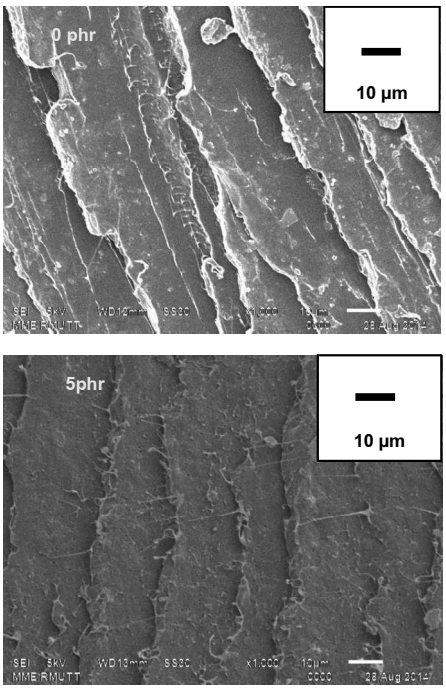
จากตารางที่ 2 และ รูปที่ 3 แสดงสมบัติทางความร้อนของพลาสติกคอมปาวด์ที่ปริมาณน้ำมันละหุ่ง 0 5 10 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว มีค่าอยู่ในช่วง 63.70-66.37°C คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนอยู่ที่ 4.1 % และอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าอยู่ในช่วง 151.53-153.20°C คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนอยู่ที่ 1.1% ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจาก PLA มีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรงลักษณะสายโซ่ยาว ทำให้เกิดการซ้อนทับกันภายในสายโซ่ จึงส่งผลให้อุณหภูมิคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าพลาสติกคอมปาวด์ตัวอื่นๆที่มีการเติมน้ำมันละหุ่ง นอกจากนี้ ยังสรุปได้ว่าน้ำมันละหุ่งที่เติมลงไป ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างสายโซ่ PLA ได้มากนัก จึงไม่ทำให้ค่า T_g และ T_m เปลี่ยนแปลง

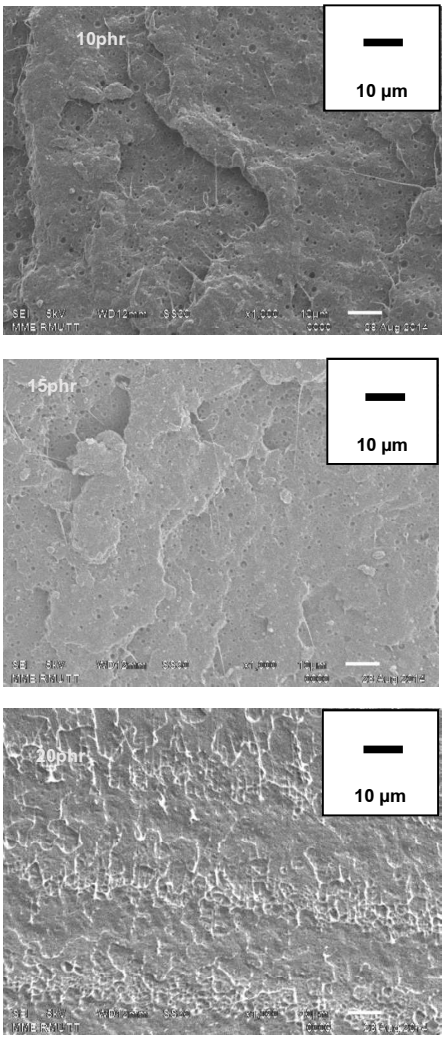
3.2 ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก Impact Strength



รูปที่ 4 ค่าการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod impact strength)

จากรูปที่ 4 การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทกของ PLA และ น้ำมันละหุ่งลงที่ 0 5 10 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนัก พบว่า PLA ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งใดๆ มีความทนทานต่อแรงกระแทกที่ 20.3 J/m และเมื่อทำการผสมน้ำมันละหุ่งทำให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นสูงถึง 40 J/m เมื่อผสมน้ำมันละหุ่งที่ 10 phr และมีแนวโน้มที่ค่าความทนทานแรงกระแทกลดลงอีก เมื่อผสมน้ำมันละหุ่งมากเกิน 10 phr ทั้งนี้ เนื่องจาก PLA มีหมู่ฟังชันเอสเทอร์เหมือนกับในโครงสร้างของน้ำมันละหุ่งที่มีเอสเทอร์เช่นกัน จึงทำให้น้ำมันละหุ่งบางส่วนสามารถเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่บริเวณที่เป็นอสัณฐานของ PLA ได้ และ สามารถแสดงพฤติกรรมคล้ายการเติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก จึงทำให้ PLA สามารถต้านแรงกระแทกได้สูงขึ้น ซึ่งสามารถปรับปรุงพฤติกรรมการแตกหักจากเปราะเป็นแบบเหนียว สามารถยืนยันได้จากภาพถ่าย SEM ดังรูปที่5

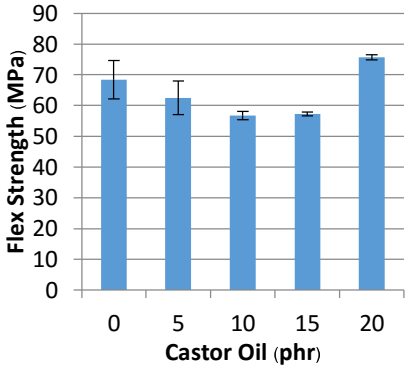




รูปที่ 5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:Castor Oil ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 5 จากการศึกษาพบว่าทั้ง PLA ที่ไม่ได้เติมน้ำมันละหุ่งและที่เติม 5 phr มีรอยการแตกหักที่คล้ายคลึงกัน เป็นลักษณะคลื่นเรียงขนานกัน ซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักแบบเปราะ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันละหุ่งเป็น 10 และ 15 phr สามารถพบรอยแตกหักเป็นลักษณะพื้นผิวขรุขระและมีลักษณะรอยเส้นขาว และลักษณะการยืดตัวขณะแตกหักเกิดขึ้นชัดเจนทั่วบริเวณพื้นผิว ซึ่งเป็นลักษณะเริ่มเกิดการแตกหักจากเปราะเป็นแบบเหนียว ส่วนรอยแตกหักที่ 20 phr ก็จะคล้ายกับที่ 0 และ 5 phr คือเป็นลักษณะการแตกหักแบบเปราะและเป็นลักษณะคลื่นอีกครั้ง นอกจากนี้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงกระแทก ยังพบเห็นลักษณะของโพรงอากาศเล็กๆ (Microvoid) ขนาดประมาณ 1-3 µm ตรงบริเวณพื้นผิว ทั้งนี้บริเวณดังกล่าวแสดงถึงลักษณะ Rubbery Phase ที่มีอยู่ในพลาสติก PLA เห็นได้ชัดดังรูปที่ 5 ที่อัตราส่วน 10 และ 15 phr ตามลำดับ คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Yongqing Zhao และคณะ [8] ซึ่งโพรงอากาศที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจาก โมเลกุลของน้ำมันได้แทรกตัวเข้าไปอยู่ภายในระหว่างเฟสของ PLA จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีลักษณะยืดหยุ่นจนเกิดการแตกหักแบบเหนียวขึ้นได้

3.3 ผลการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ (flexural Strength) ของพอลิเมอร์ระหว่าง PLA : Castor Oil



รูปที่ 6 ค่าการทดสอบการต้านทานการโก่งงอ)Flexural Strength (ของพอลิเมอร์ระหว่าง PLA : Castor Oil

จากรูปที่ 6 ผลการทดสอบการต้านทานการโก่งงอของ PLA และ น้ำมันละหุ่งลงที่ 0 5 10 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนัก พบว่า PLA มีการต้านทานต่อการโก่งงอ 68.4±5 MPa มากกว่า PLA ที่ผสมน้ำมันละหุ่งที่ 10 phr จะให้ค่าการต้านทานการโก่งงอต่ำสุด56.7 ±5 MPa แสดงว่าน้ำมันละหุ่งเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างพื้นที่ ที่เป็นอสัณฐานจึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น มีผลทำให้การรับแรงกดลดลง แต่ค่าการต้านทานแรงโก่งงอเพิ่มขึ้น เมื่อเติมน้ำมันละหุ่งที่ 15 และ 20 phr ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความสามารถในการแทรกตัวอยู่ในสายโซ่ ที่ลดลง เพราะถ้าเติมในปริมาณมากเกินไปความสามารถในการผสมเข้าไปในเนื้อพลาสติกของน้ำมันละหุ่งจะลดลง แต่จะแสดงพฤติกรรมเป็นสารหล่อลื่นแทน ซึ่งทำให้ไม่สามารถ

เป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติกที่จะส่งผลต่อการลดความสามารถในการรับแรงแบบโก่งงอ

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติพอลิแลคติกแอซิดเมื่อใช้น้ำมันละหุ่งเป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติก ในปริมาณการผสมน้ำมันละหุ่งที่ 0 5 10 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนักโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่จากนั้นทำการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการหลอมเหลว การทนต่อแรงกระแทก การต้านทานการโก่งงอ และการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการศึกษาพบว่า การผสมน้ำมันละหุ่งลงไปใน พอลิแลคติกแอซิด ไม่ส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดสำหรับสมบัติเชิงกล กล่าวคือ สามารถปรับปรุงค่าการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า อีกทั้งค่าการต้านทานการเสียรูปแบบโก่งงอ จากผลดังกล่าวสามารถยืนยันการปรับปรุงพฤติกรรมการแตกหักของ พอลิแลคติกแอซิดเมื่อผสมกับน้ำมันละหุ่ง ได้ด้วยภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ที่พบการยืดตัวก่อนขาดและโพรงเล็กๆ ขนาดประมาณ 1-2 ไมโครเมตรที่ทำหน้าที่เหมือนตัวดูดซับแรง กระจายไปทั่วพื้นที่ผิวแตกหักจากงานวิจัยนี้ ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ ปริมาณน้ำมันละหุ่ง10ส่วนต่อร้อยส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานรหัสโครงการ (.วช)คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 81286 และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] K.L.G. Ho,A.L. Pometto,P.N. Hinz,J.1999. Polymer Environ,7:83.

[2] T.Takayama, M.Todo, J. 2006. Mater. Sci,15:4989.

[3] E.A.J. Al-Mulla, N.A.B. Ibrahim. Poly)lactic acid (as a Biopolymer-based Nano-composite,Products and Applications of Biopolymers, InTech, Rijrka.2012.doi:10.5772/32993.

[4] E.A.J. Al-Mulla, Adv.2012. Mater. Res, 364:81

[5] R.M. Rasal, A.V. Janorkar, D.E. Hirt, Prog. 2010. Polymer. Sci, 33:338.

[6] E.A.J. Al-Mulla. 2011. Polymer. Sci. Ser, A53:149.

[7] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุลง. 2545. “การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์.” กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรามคำแหง

[8] Yongqing Zhao, Jinping Qu, Yanhong Feng, Zhenghuan Wu, Fuquan Chen , Hailong Tang. 2011. Polymers for Advanced Technologies, 23: 632–638.

[9] เอกสารประกอบการสอนวิชา พืชน้ำมัน, ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์บางพระ (สุรินทร์) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตสุรินทร์.