

## ผลการเติมพลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทีลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท

### The Effect of Adding Plasticizer on the Properties of Polylactic acid and Polybutylene adipate-co-terephthalate Blended Films

ภาลัดดา เนื่องแก้ว<sup>1</sup>, ยศฐา ศรีเทพ<sup>2</sup>, เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป<sup>3</sup>

Paladda Neangkaew<sup>1</sup>, Yottha Srithep<sup>2</sup>, Keartisak Sriprateep<sup>3</sup>

Received: 19 April 2019 ; Revised: 23 August 2019 ; Accepted: 18 September 2019

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเหนียวและความยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ในปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักผสมพอลิบิวทีลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเติมพลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) ที่ปริมาณการเติม 2, 5, 10 และ 15 phr ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (solvent casting) โดยใช้คลอโรฟอร์ม จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน อัตราการไหลของพลาสติก และลักษณะทางสัณฐานวิทยา จากการศึกษาสมบัติทางกล พบว่า การเติมพลาสติกไซเซออร์ส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึกแบบเย็น ( $T_c$ ) และอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลง ( $T_m$ ) ชิ้นงานที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 148.52 องศาเซลเซียส เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ 15 phr อุณหภูมิการหลอมเหลวเหลือ 139.86 องศาเซลเซียส การเติมพลาสติกไซเซออร์ส่งผลให้อัตราการไหลของพลาสติกหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ในผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของฟิล์มมีความเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และการทดสอบสมบัติทางกลที่ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 10 phr ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่ไม่ได้เติมพลาสติกไซเซออร์มีการยืดตัว ณ จุดขาด 195 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ 10 phr ทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 216 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ 15 phr ทำให้ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเป็น 120 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นที่ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ 10 phr ฟิล์มจะมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากที่สุด

**คำสำคัญ:** พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทีลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท พลาสติกไซเซออร์ พลาสติกเบลน

#### Abstract

This research aims to increased toughness and flexibility of polylactic acid at a concentration of 80 percent by weight blended with 20 percent by weight of polybutylene adipate-co-terephthalate by adding plasticizer at the amount of 2 5 10 and 15 phr. The films were formed by a solvent casting process using chloroform as the solvent. The films were examined for their mechanical, thermal, melt flow index and morphology properties. It was found that the addition of plasticizers reduced glass transition temperature ( $T_g$ ), cold crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting temperature

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท, <sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, <sup>3</sup> รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>1</sup> Graduate students, <sup>2</sup> Asst. Prof., <sup>3</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand.

\* Corresponding author; Asst. Prof. Yottha Srithep, Ph.D., Faculty of Engineering Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand. E-mail: yottha.s@msu.ac.th

( $T_m$ ). The sample that did not contain plasticizer showed a melting temperature ( $T_m$ ) of 148.52°C but  $T_m$  decreased to 139.86°C with addition plasticizer at 15 phr. Moreover, adding plasticizer increased melt flow rates of the polymer. The increase in plasticizer concentration improved the cross-sectional area of the film which was smooth and homogeneous. The addition of plasticizers from 2 to 10 phr increased tensile strength and elongation at break. The sample that did not have plasticizers showed elongation at break of 195% and adding 10 phr of plasticizers the elongation at break increased to 216%. However, adding plasticizers 15 phr reduced the tensile strength and elongation at break to 120%. Therefore, the amount of plasticizer 10 phr films had highest toughness and elasticity.

**Keywords:** Biodegradable plastic, Polylactic acid, Polybutylene adipate-co-terephthalate, Plasticizer, Plastic blend

## บทนำ

พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นพอลิเอสเทอร์แบบกึ่งผลึกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในปัจจุบันมีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดเป็นแผ่น การเป่าเป็นฟิล์ม การเทอร์โมฟอร์ม การปั้นหลอมเส้นใย การนำมาใช้งานด้านเส้นใย สิ่งทอ PLA ยังมีสมบัติที่สามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ จึงเหมาะสำหรับงานทางการแพทย์ และงานด้านบรรจุภัณฑ์ถูกนำมาใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่ของและอาหาร รวมไปถึงการผลิตขวดบรรจุภัณฑ์

การนำ PLA ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ จะต้องนำไปผสมกับสารเติมแต่งหรือพลาสติกชนิดอื่นเนื่องจาก PLA มีความเปราะสูง หากจะนำไปประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นเช่น การขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติกจำเป็นจะต้องปรับปรุงสมบัติก่อน จากการศึกษาที่ผ่านมาของภาลัดดา และยศฐา<sup>1</sup> ได้มีการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยนำไปผสมกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) ในการเป่าขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติก เพราะ PBAT เป็นพลาสติกที่มีสมบัติความเหนียวและยืดหยุ่นสูงแต่มีราคาสูงกว่า PLA ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การผสมพลาสติกเบลนระหว่าง PLA กับ PBAT ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก; 80:20 ให้ค่าแรงและระยะยืดเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากในการตัดสินใจต้องคำนึงถึงต้นทุนในการผลิต แต่คุณสมบัติที่ได้ยังไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับถุงพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบัน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาสมบัติความเหนียวและความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA/PBAT โดยจากการศึกษาของ Natalia Herrera และคณะ<sup>2</sup> ได้มีการนำพลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) ชนิด Glycerol triacetate (GTA) มาผสมกับ PLA และพลาสติกไซเซออร์อื่นอีก 2 ชนิด ที่สัดส่วนการเติม GTA 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการเป่าขึ้นรูปถุงพลาสติก แต่งานวิจัยยังเป็นเพียงการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวัสดุผสมอ้างอิงกับวัสดุผสมระดับนาโนเท่านั้น ยังไม่มีการคิดค้นหรือนำมาพัฒนาใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้

นำพลาสติกไซเซออร์ชนิด Glycerol triacetate (GTA) มาปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของฟิล์มพลาสติกเบลน เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปพัฒนาและต่อยอดใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบในการทดลองมีดังต่อไปนี้ เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เกรด 4043D บริษัท NatureWorks จำกัด มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 1.24 ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) 4.0 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) หรือชื่อทางการค้า ECOFLEX® เกรด F Blend C1200 บริษัท BASF จำกัด พลาสติกไซเซออร์ (plasticizers) ชนิด Triacetin – 99% (FCC,FG) บริษัท ซิกม่า-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด มีจุดวาบไฟ (flash point) 138°C ความหนาแน่น 1.16 g/mL ที่ 25°C และตัวทำละลาย ชนิดคลอโรฟอร์ม (chloroform: CHCl<sub>3</sub>) ชนิดที่มีความเสถียรด้วยเอทานอลประมาณ 0.6% มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 61°C ความหนาแน่น 1.498 g/mL

### การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก

งานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกโดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (solvent casting) คลอโรฟอร์มที่อัตราส่วนคลอโรฟอร์ม 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พลาสติก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมพลาสติกไซเซออร์ในปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr (part per hundred) โดยใช้เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ในการทำละลายใช้เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำการศึกษาที่อัตราส่วนผสมดัง Table 1 เมื่อละลายส่วนผสมจนเป็นของเหลว จากนั้นนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยการเทของเหลวดังกล่าวลงถาดแก้วที่ปริมาณ 6 mL ปล่อยให้แห้งแล้วลอกออกก็จะได้ฟิล์มพลาสติกที่จะใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ

**การทดสอบสมบัติทางกล**

สมบัติทางกลเป็นการทดสอบเพื่อหาความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพลาสติกด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyzer) ยี่ห้อ Stable Micro System รุ่น TA.XT Plus ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 15 mm ความยาว 45 mm และความหนา 0.25 mm จำนวนตัวอย่างละ 3 ชิ้นงานทดสอบ โดยใช้ความเร็วในการดึง 2 mm/min ระยะห่างของหัวจับเท่ากับ 15 mm ทำการดึงจนชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน

**Table 1** Formula PLA/PBAT/Plasticizer blends

Specimen	PLA (wt%)	PBAT (wt%)	Plasticizer (phr)
1. 100/0/0	100	0	0
2. 0/100/0	0	100	0
3. 80/20/0	80	20	0
4. 80/20/2			2
5. 80/20/5			5
6. 80/20/10			10
7. 80/20/15			15

**หมายเหตุ** phr (parts per hundred parts of resin) หมายถึง ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่ต่อ 100 ส่วนของ PLA/PBAT โดยมวล

**การทดสอบสมบัติทางความร้อน**

สมบัติทางความร้อนทำการทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยใช้เครื่อง DSC-4000 ยี่ห้อ PerkinElmer ในการทดสอบจะตัดชิ้นงานทดสอบให้มีน้ำหนัก 3 - 5 mg บรรจุในภาดอลูมิเนียม จากนั้นให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบตั้งแต่ -10°C ถึง 200°C ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 3 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงจาก 200°C จนไปถึง -10°C ที่อุณหภูมิ -10°C เป็นเวลา 3 นาที และให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบอีกครั้ง โดยใช้อัตราในการให้ความร้อน (heating rate) 10 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T<sub>g</sub>) อุณหภูมิการเกิดผลึกแบบเย็น (T<sub>cc</sub>) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T<sub>m</sub>) ของชิ้นงานทดสอบหาได้จากการพิจารณา Thermogram ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (X<sub>c</sub>) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$x_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{(f \times \Delta H_m^c)} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

$\Delta H_m^c$  เป็นค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของผลึก PLA 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 93 J/g และ  $f$  เป็นสัดส่วนน้ำหนักในการผสมของ PLA

**การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา**

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพลาสติกเบลน เช่น ลักษณะพื้นผิวภายนอก ร่องรอยของการแยกตัวกันของสารประกอบแต่ละชนิด การแยกเฟสกันของส่วนผสมในกรณีที่มีส่วนผสมหลายอย่างรวมกัน เป็นต้น โดยจะทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Desktop Scanning Electron Microscopes: MiniSEM) ยี่ห้อ SEC รุ่น SEC-4500M

**การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก**

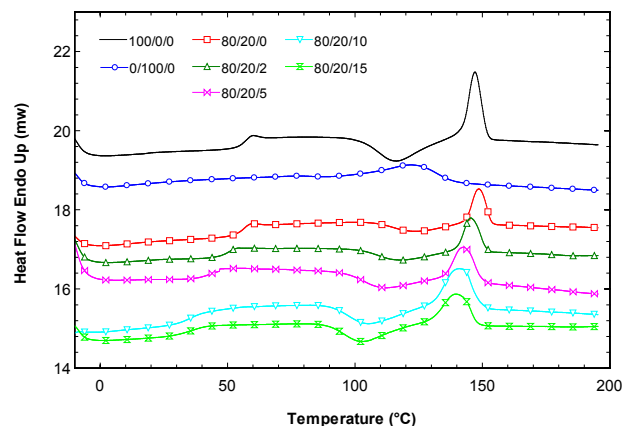
อัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Index, MFI) เป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติการไหลตัวของพลาสติกเหลวจำพวก Thermoplastics เนื่องจากค่า MFI เป็นตัวบ่งชี้ถึงสมบัติของพลาสติกในการนำไปใช้งานแต่ละประเภท และค่า MFI ยังเป็นค่าพื้นฐานสำหรับการควบคุมคุณภาพของเม็ดพลาสติกอีกด้วย ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1238 ด้วยเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก Melt Flow Indexer ยี่ห้อ Tinius Olsen รุ่น MP1200 ซึ่งการทดสอบจะคล้ายกับกระบวนการ Extrusion คือเป็นการหลอมเหลวพลาสติกในกระบอกทดสอบที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกดที่ 2.16 กิโลกรัม กดลงบนแท่งกด โดยให้แท่งกดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ พลาสติกเหลวจะไหลผ่านหัวดายน์ออกมา และทำการตัดทุก 10 วินาที ตัดจนพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบไหลออกมาหมด ทำการชั่งน้ำหนักพลาสติกที่ไหลออกมาเทียบกับเวลา 10 นาทีก็จะได้ค่า MFI ของพลาสติก ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม /10 นาที (g/10min)<sup>3,4</sup>

**ผลการทดลอง**

**ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน**

จากTable 2 และFigure 1 แสดงกราฟ DSC ของฟิล์ม PLA/PBAT/Plasticizer พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของ PLA บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 56.06°C เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่า  $T_g$  ลดลงเล็กน้อยที่ 55.63 °C จากนั้นเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr จะมีค่า  $T_g$  คือ 49.86 43.73 37.20 และ 35.83°C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกไซเซอร์เช่นเดียวกับอุณหภูมิการเกิดผลึกแบบเย็น และอุณหภูมิการหลอมเหลว พบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกแบบเย็น ( $T_{cc}$ ) ของ PLA บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 116.22°C PLA ผสมกับ PBAT ค่า  $T_{cc}$  เพิ่มขึ้นเป็น 122.88°C เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr จะมีค่า  $T_{cc}$  คือ 117.55 111.24 105.20 และ 102.88°C ตามลำดับ และอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของ PLA บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 147.18°C และ PBAT บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 122.20°C เมื่อผสม PLA เข้ากับ PBAT ทำให้ค่า  $T_m$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ 148.52°C เมื่อทำการเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr พบว่าค่า  $T_m$  เท่ากับ 145.53 142.54 141.00 และ 139.86°C ตามลำดับ

ดังนั้นจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนสามารถสรุปได้ว่า PLA และ PBAT เข้ากันได้ดีมากยิ่งขึ้น เป็นผลมาจากพลาสติกไซเซอร์ช่วยให้โมเลกุลเกิดการขยับตัวได้ง่ายขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์ไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเข้าไปเพิ่มที่ว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดต่ำลง และยังส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกแบบเย็นและอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงด้วยเช่นกัน<sup>5</sup>



**Figure 1** DSC thermograms of PLA/PBAT/plasticizer from 2<sup>nd</sup> heating curves

**Table 2** Thermal properties of PLA/PBAT/Plasticizer film

Specimen (PLA/PBAT/Plasticizer)	$T_g$ (°C)	Crystallization		Melting point		$X_c$ (%)
		$\Delta H_{cc}$ (J/g)	$T_{cc}$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$T_m$ (°C)	
100/0/0	56.06	-18.58	116.22	17.67	147.18	0.98
0/100/0	-	-	-	13.80	122.20	14.84
80/20/0	55.63	-5.82	122.88	7.39	148.52	2.10
80/20/2	49.86	-7.56	117.55	9.92	145.53	3.18
80/20/5	43.73	-9.42	111.24	11.91	142.54	3.35
80/20/10	37.20	-13.12	105.20	15.82	141.00	3.64
80/20/15	35.83	-12.06	102.88	11.89	139.86	0.23

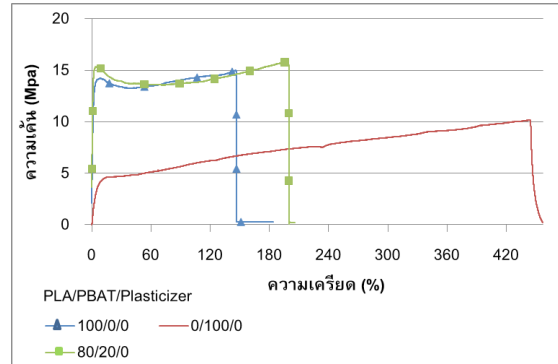
**ผลการทดสอบสมบัติทางกล**

ผลการทดสอบแรงดึงแสดงดัง Table 3 Figure 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่า ค่าความเค้นแรงดึง (tensile strength) ที่ใช้ในการดึง PBAT บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 4.65 เมกะปาสคาล (MPa) และ PLA บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 14.21 MPa เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 14.37 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PLA บริสุทธิ์ จากนั้นทำการเติมพลาสติกไซเซออร์ 2 5 10 และ 15 phr พบว่าความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 14.67 15.18 16.39 และ 10.00 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ 2 5 และ 10 phr ค่าความเค้นแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ 15 phr ค่าความเค้นแรงดึงลดลง

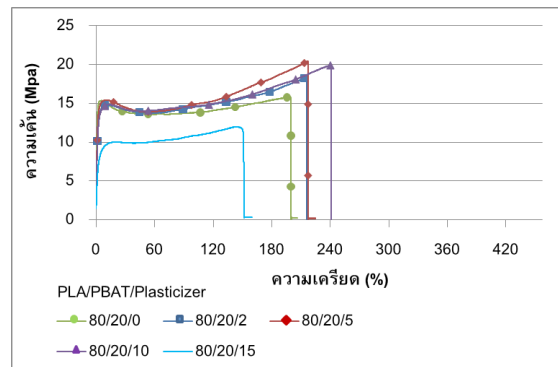
พิจารณาการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) พบว่า PBAT บริสุทธิ์มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมากกว่า 444 เปอร์เซ็นต์ (ในการทดสอบชิ้นงานทดสอบไม่ขาดออกจากกัน เนื่องจากหมดระยะที่เครื่องมือทดสอบสามารถยืดออกได้) ส่วน PLA บริสุทธิ์มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 146 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 198 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการเติมพลาสติกไซเซออร์ 2 5 10 และ 15 phr การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 200 216 245 และ 144 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ 2 ถึง 10 phr การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ 15 phr ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง อาจเกิดจากการเกาะตัวเข้าด้วยกันของพลาสติกไซเซออร์

เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัส (modulus) พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสสูงที่สุดเท่ากับ 102.77 กิโลปาสคาล (kPa) แสดงให้เห็นว่า PLA มีความแข็งแรงสูง แต่เปราะและเกิดการแตกหักได้ง่าย ที่ PBAT บริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสน้อยที่สุดคือ 22.94 kPa หมายความว่า PBAT มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง เมื่อผสม PLA เข้ากับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่ามอดูลัสเท่ากับ 79.95 kPa ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างค่ามอดูลัสของ PLA และ PBAT เป็นผลจากการนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแตกต่างกันทั้งสองชนิดมาผสมเข้าด้วยกัน ทำให้ฟิล์มมีทั้งความเหนียวและความแข็งแรง จากนั้นเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr ค่ามอดูลัสเท่ากับ 94.84 94.45 81.95 และ 82.99 kPa ตามลำดับ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า พลาสติกไซเซออร์มีผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเติมไม่เกิน 10 phr ซึ่งเป็นผลมา

จากพลาสติกไซเซออร์เข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด (PLA/PBAT) ทำให้โมเลกุลขยับตัวได้ง่ายส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น



**Figure 2** Stress - stress relationship graphs of films PLA, PBAT and PLA/PBAT: 80/20



**Figure 3** Stress - stress relationship graphs of film PLA/PBAT/Plasticizer

**ผลการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก**

จาก Table 4 ผลการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) เท่ากับ 8.34 g/10 min และ PBAT บริสุทธิ์ค่า MFI เท่ากับ 35.16 g/10 min เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่า MFI เท่ากับ 8.59 g/10 min จากนั้นเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr MFI มีค่าเท่ากับ 10.47 12.17 20.11 และ 25.49 g/10 min ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพลาสติกไซเซออร์ส่งผลต่ออัตราการไหลของฟิล์มพลาสติกในสถานะหลอมเหลว เนื่องจากสมบัติของพลาสติกไซเซออร์ที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติกทั้งสองชนิด ทำให้โมเลกุลขยับตัวได้ง่ายขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์<sup>6</sup>

**Table 3** Tensile test of plastic films PLA/PBAT/Plasticizer

Specimen PLA/PBAT/Plasticizer	Tensile Strength (MPa)	Modulus (kPa)	Elongation at break (%)
100/0/0	14.21±1.20	102.77±1.69	146±2.00
0/100/0	4.65±0.37	22.94±1.65	444±0.96
80/20/0	14.37±2.56	79.95±8.66	198±8.65
80/20/2	14.67±0.32	94.84±4.82	200±8.31
80/20/5	15.18±1.49	94.45±5.26	216±1.17
80/20/10	16.39±0.95	81.95±4.25	245±5.88
80/20/15	10.00±1.10	82.99±9.69	144±7.27

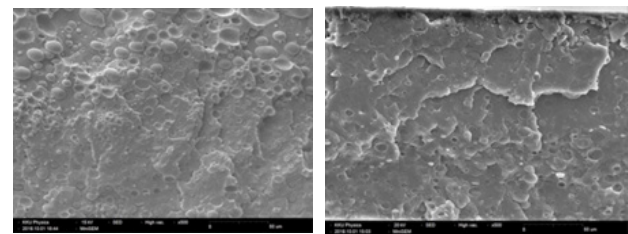
**Table 4** Melt flow index of PLA/PBAT/Plasticizer

Specimen (PLA/PBAT/Plasticizer)	Melt Flow Index (g/10 min)
100/0/0	8.34
0/100/0	35.16
80/20/0	8.59
80/20/2	10.47
80/20/5	12.17
80/20/10	20.11
80/20/15	25.49

#### ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

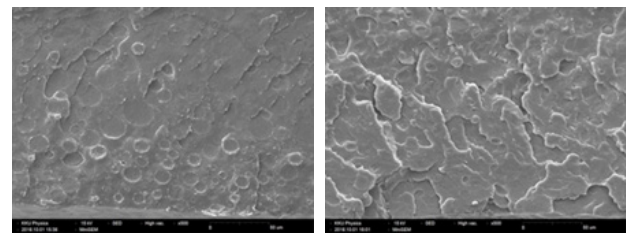
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า ที่อัตราส่วน PLA/PBAT/Plasticizer: 80/20/0 ดัง Figure 4 (a) จะเห็นโครงสร้างภายในมีลักษณะขรุขระ เป็นผลมาจากพลาสติกทั้งสองชนิดยังเข้ากันได้ไม่ดี และเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr ดัง Figure 2 (b-e) ตามลำดับ พบว่า ลักษณะของพื้นที่หน้าตัดมีความเรียบขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ ที่ปริมาณการเติม 15 phr โครงสร้างภายในมีลักษณะเกาะกันเป็นแผ่นใหญ่ มีความเรียบเนียน แสดงให้เห็นว่าพลาสติกไซเซออร์มีผลต่อความเข้ากันได้ของฟิล์มพลาสติกเบลน ส่งผลให้พลาสติกมีความเหนียว

ความนิ่มมากขึ้น และยังช่วยให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น



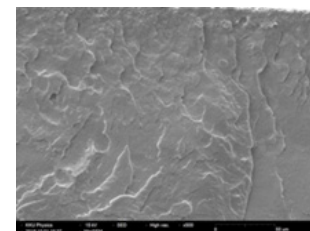
(a) 80/20/0

(b) 80/20/2



(c) 80/20/5

(d) 80/20/10



(e) 80/20/15

**Figure 4** SEM cross - sectional area images of film PLA/PBAT/Plasticizer

## สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซอรันในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PLA/PBAT) จากการทดสอบสมบัติทางกลจะเห็นว่าที่ PLA/PBAT: 80/20 เปอร์เซ็นต์ ความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 14.37 MPa และ 198 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเติมพลาสติกไซเซอรันที่ 10 phr ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 16.39 MPa และ 245 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อัตราการไหลเป็นตัวบ่งชี้สมบัติของพลาสติกในการนำไปใช้งาน การเติมพลาสติกไซเซอรันส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสติกไซเซอรันที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติกทั้งสองชนิด ทำให้โมเลกุลขยับตัวได้ง่ายขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT ที่เติมพลาสติกไซเซอรันทำให้ทราบว่าการเติมพลาสติกไซเซอรันส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึกแบบเย็น ( $T_{cc}$ ) และอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ลดลง เนื่องจากโมเลกุลของพลาสติกไซเซอรันไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเข้าไปเพิ่มที่ว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุล ลักษณะทางสัญญาณวิทยาสารบอกถึงความเข้ากันได้ดีของฟิล์มเมื่อเติมพลาสติกไซเซอรัน เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มมีความเรียบขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซอรัน จากการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซอรันทำให้ทราบว่า พลาสติกไซเซอรันจะช่วยเพิ่มสมบัติความเหนียวและยืดหยุ่นของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ ซึ่งสามารถนำผลการศึกษากิจงานวิจัยนี้ไปพัฒนาและต่อยอดในการผลิตถุงพลาสติกชีวภาพในเชิงอุตสาหกรรมได้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท ขอนแก่นพลาสติก ประชาสโมสร จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการขึ้นรูปถุงพลาสติก บุคลากรและสถานที่ในการทำวิจัย และได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ในโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) จึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

## เอกสารอ้างอิง

1. ภาลัดดา เนื่องแก้ว และ ยศฐา ศรีเทพ. การผลิตถุงพลาสติกชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและสารเพิ่มความยาวสายโซ่. In: การประชุมวิชาการ “มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 13.” 2560. p. 187–196.
2. Herrera N, Roch H, Salaberria AM, Pino-Orellana MA, Labidi J, Fernandes SCM, et al. Functionalized blown films of plasticized polylactic acid/chitin nanocomposite: Preparation and characterization. Mater Des [Internet]. 2016;92: p. 846–852. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.83>
3. สรวีย์ มีศักดิ์สยาม. การทดสอบ. In: ผลกระทบของการเติมเส้นใยทะเลลายปาล์มในพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิด และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่อสมบัติเชิงกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2559. p. 54–55.
4. อาสลิท ทิพย์ไกรสร และ วิภู ศรีสืบสาย. การทดลองศึกษาอัตราการไหลของพลาสติก Polycarbonate(PC)/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene(ABS) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black). คลังความรู้ดิจิทัล มก. 2556; p. 1–8.
5. อุษารัตน์ รัตนคำนวน. ผลของพลาสติกไซเซอรันที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเตอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด. In สาขาวิทยาศาสตร์เคมีและเภสัช คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2015. Available from: <https://programming.cpe.ku.ac.th/AgrInformatics/viewProject.php?itemID=4912>
6. Vieira MGA, Da Silva MA, Dos Santos LO, Beppu MM. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. European Polymer Journal (Internet). 2011; 47(3): p. 254–263. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011>