ผลของสารเพิ่มความเข้ากันได้เตทตระบิวทิลไททาเนตที่มีต่อความเข้ากันได้ของฟิล์มเบลนด์ของพอลิแลค ติก แอซิด/พอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอเรฟทาเรท)ที่สอดคล้องกับศักยภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์*

The effect of TBT-compatibilizer on miscibility of Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) blend film relevant the potential as packaging materials

วินิตา บุณโยดม (Winita Punyodom)**
สุธินี เกิดเทพ (Sutinee Girdthep)***

บทคัดย่อ

ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีพอลิ(แลคติก แอซิด) (พีแอลเอ) พอลิ (บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอเรฟทาเรท) (พีบีเอที) เป็นตัวเพิ่มความยืดหยุ่น โดยเติมเตทตระบิวทิล ไททาเนต (ทีบีที) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์พีแอลเอ/พีบีเอที (0/100 ถึง 100/0, %wt/%wt) และพีแอลเอ/พีบีเอที/ทีบีที (ทีบีที 4-6 phr) ได้ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีหล่อจากสารละลาย ลักษณะปรากฏทางกายภาพที่ดี ความใสและสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้นเมื่อเติมทีบีที เนื่องจากทำให้เพิ่มความสามารถในการเชื่อมกันระหว่างพีแอลเอและพีบีเอที โดยการเหนี่ยวนำให้เกิดพีแอลเอ-พีบีเอที โคพอลิเมอร์ผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันในระหว่างการผสมซึ่งยืนยันจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดและดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ นอกจากนี้สูตรที่เหมาะสมที่ถูกเลือก (แอลเอ/พีบีเอที/ทีบีที (70/30/5)) ถูกนำไปใช้ประเมินในเรื่องความสามารถในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ แอลเอ/พีบีเอที/ทีบีที (70/30/5) ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับทำเป็นถุงพลาสติกในเรื่องของสมบัติเชิงกลโดยแสดงถึงศักยภาพในการเป็นต้นแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยสามารถใช้แทนพลาสติกที่ไม่ย่อยสลายได้

---

* บทความจากผลงานวิจัย

** ห้องวิจัยทางพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่
Polymer Research Laboratory, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai Universitry, Chiang Mai, 50200, Thailand Corresponding author: Sutinee Girdthep, email: S.Girdthep@gmail.com

*** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อ.เมือง จ.นครปฐม
Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn Universitry, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University
Volume 3 Number 5 September– October2016 (ISSN 2408 – 1248)

Abtract

The biodegradable films of poly(lactic acid) (PLA)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) were prepared in the presence of tetrabutyl titanate (TBT) as a compatibilizer for use in biodegradable packaging applications. The PLA/PBAT (0/100 to 100/0, %wt/%wt) and PLA/PBAT/TBT blend films (4-6 phr of TBT) were prepared using solution casting (). Good physical appearance, transparency and mechanical properties of PLA/PBAT blend films increased with TBT incorporation, demonstrating good compatibility between PLA and PBAT via transesterification during mixing process as revealed by scanning electron micrographs and differential scanning calorimeter. Furthermore, a selection of an optimal film composition (PLA/PBAT/TBT (70/30/5)) has been implemented and discussed the main purpose for use as packaging materials. The PLA/PBAT/TBT (70/30/5) film also complied with standards for food plastic bag in the mechanical properties, showing its potential in an effective eco-friendly package prototype for foods that support sustainability of polymer material uses.

บทนำ

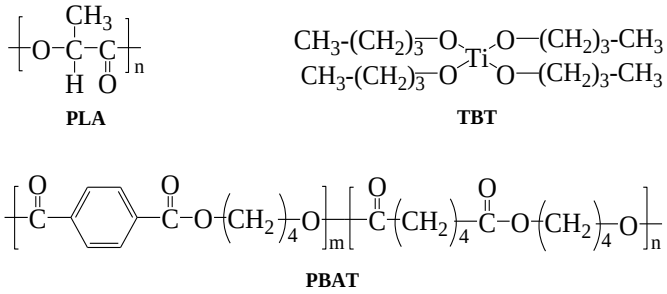
ปัจจุบันการใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ก่อปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการใช้พลาสติกบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้ครั้งเดียวทิ้ง ไม่ใช้ซ้ำจึงทำให้มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมทั้งพลาสติกส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ หรือถ้าย่อยสลายได้ก็ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนาน (J. Zeng et al., 2009: 1706-1711) นอกจากนี้ยังผลิตจากวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความพยายามที่จะหาพอลิเมอร์ตัวใหม่ที่สามารถทดแทนพลาสติกที่เป็นผลผลิตจากปิโตรเคมี ซึ่งเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic) และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และใช้วัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิเมอร์จากแหล่งวัตถุดิบมูลค่าต่ำที่มีในประเทศ สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ไม่มีวันสิ้นสุด เพื่อทดแทนปิโตรเลียม โดยมุ่งเน้นที่จะพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เพื่อประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์เป็นหลัก โดยพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยนี้คือพอลิแลคติก แอซิด (poly(lactic acid) , PLA) ซึ่งเป็นพอลิเอสเทอร์แบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากย่อยการสลายไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม PLA ผลิตจากกรดแลกติก (Lactic acid) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี หรือกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวสาลี หัวบีท และขยะทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้ไม่มีสิ้นสุด (Sodergard A and Stolt M., 2002: 1123–1163) แต่เนื่องจากความเปราะของ PLA จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมกับการประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์ด้วยการทำการผสม (blending) หรือการเบลนด์กับพอลิเมอร์อื่น เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้

การเบลนด์กับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่มีลักษณะความยืดหยุ่นสูงอย่างพอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอเรฟทาเรท (Poly(butylene adipate-*co*-terephthalate), PBAT ยังคงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอยู่มาก (S. Lin et al., 2012: 604-608, S. Girdthep et al., 2015: 115-123) แต่ด้วยความเข้ากันไม่ได้ระหว่าง PLA และ PBAT

จึงทำให้สมบัติต่างๆ ไม่ได้ถูกปรับปรุงโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยการเติมสารเพิ่มความเข้ากัน (compatibilizer) เพื่อจะพัฒนาพอลิเมอร์ฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาสูตรการผลิตพอลิเมอร์เบลนด์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลทางการเกษตรโดยมี PLA และ PBAT เป็นองค์ประกอบหลัก โดยผสมกับ TBT เพื่อปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ดังรูปที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และประเมินศักยภาพด้านการเป็นบรรจุภัณฑ์เทียบกับพอลิเมอร์ทางการค้าพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP)



รูปที่ 1 องค์ประกอบของพอลิเมอร์เบลนด์และโครงสร้างทางเคมีของแต่ละองค์ประกอบพอลิแลคติก แอซิด (Poly(lactic acid), PLA) พอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอเรฟทาเรท(Poly(butyleneadipate-*co*-terephthalate), PBAT) และเตทตระบิวทิล ไททาเนต (Tetrabutyl titanate, TBT)

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ของ PLA/PBAT และ PLA/PBAT/TBT

เตรียมฟิล์มของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PBAT และ PLA/PBAT/TBT ด้วยวิธีการหล่อจากสารละลาย (Solvent casting technique) โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย ชั่งพอลิเมอร์ให้มีอัตราส่วนของ PLA/PBAT ดังนี้ 100/0, 85/15, 75/25, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 25/75, 15/85 และ 0/100 %wt/wt สำหรับ PLA/PBAT/TBT จะเติม TBT ปริมาณ 4-6 phr (parts per hundred resin) ที่เป็นปริมาณที่เหมาะสมจากงานวิจัยก่อนหน้า (S. Girdthep et al., 2014: 6776-6788) ลงในทุกอัตราส่วนของ PLA/PBAT ดังนี้ 100/0/5, 85/15/5, 75/25/5, 70/30/5, 60/40/5, 50/50/5, 40/60/5, 30/70/5, 25/75/5, 15/85/5 และ 0/100/5 %wt/wt/phr จากนั้นเติมตัวทำละลายคลอโรฟอร์มพร้อมทั้งคนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ที่อุณหภูมิ 50 ± 5 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว เทสารละลายพอลิเมอร์เบลนด์ลงในแม่พิมพ์ที่แห้งและสะอาด ปิดฝาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ตัวทำละลายค่อยๆระเหยออก เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเพื่อไล่ตัวทำละลายออก จะได้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการ

สำหรับการเตรียมฟิล์มของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ถูกเลือก คือ PLA/PBAT (70/30) ที่มีค่าสมบัติเชิงกลใกล้เคียงพอลิเมอร์ฟิล์มทางการค้า PP มากที่สุด จะถูกเตรียมเป็นฟิล์มโดยมีปริมาณของ TBT ที่แตกต่างกัน (4, 5 และ 6 phr) เพื่อศึกษาอิทธิพลของ TBT ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT (70/30)

2. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์

2.1 ลักษณะปรากฏทางกายภาพ (Physical appearance) และความใส (Transparency)

ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะถูกถ่ายรูปบันทึกลักษณะปรากฏด้วยกล้องบันทึกภาพถ่าย นอกจากนี้ความใสของฟิล์มถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (UV-Visible spectrometer) ที่ความยาวคลื่นช่วง 600 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นของแสงที่มองเห็น โดยความใสของฟิล์มที่ได้จะรายงาน %T (% Transmittance) ที่ได้จากเครื่อง

2.2 สมบัติเชิงกล

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal tensile testing machine) โดยตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 1 x 5 ตารางเซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D-882 ผลการทดสอบแรงดึงของฟิล์มที่ได้จะถูกบันทึกเป็นรูปกราฟของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด โดยรายงานค่าของค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break, TS) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break, TS) และค่ายังมอดูลัส (Young's modulus)

2.3 ความเข้ากันได้ (Misibility)

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์โดยอาศัยสมบัติทางความร้อนที่ได้จากเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทตรี (Differential scanning calorimetry, DSC) โดยให้ความร้อนแก่ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Scanning rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 0 - 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

นอกจากนี้ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ได้ถูกนำไปศึกษาความเข้ากันได้ของด้วยการส่งผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

2.4 การศึกษาศักยภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์

เปรียบเทียบศักยภาพของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์สูตรที่ดีที่สุดกับฟิล์มพอลิเมอร์ทางการค้า PP ในด้านต่างๆ สำหรับนำไปเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

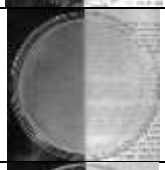
ลักษณะปรากฏ (Physical appearance) และความใส (Transparency)

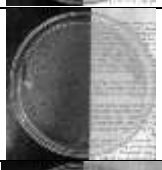
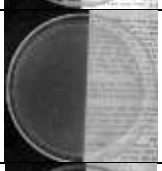
จากการศึกษาลักษณะปรากฏและสมบัติการส่องผ่านแสง (ความใส) ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมทรี ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ได้ค่าความใส (%Transparency) ตามตารางที่ 1 พบว่าฟิล์ม PLA/PBAT แสดงเฟสที่ไม่เข้ากันระหว่าง PLA และ PBAT เนื่องจากความแต่ต่างกันของระดับโมเลกุล (molecular level) (Coltelli et al., 2008: 1250–1262) และ พารามิเตอร์การละลาย (solubility parameter) ที่แตกต่างกันมาก โดยพารามิเตอร์การละลายของ PLA เท่ากับ 10.1 (cal cm^{-3})$^{1/2}$ ในขณะที่ PBAT มีค่าเท่ากับ 22.95 (cal cm^{-3})$^{1/2}$ (S. Girdthep et al., 2015: 203-211)

ความไม่เข้ากันนี้จะแสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีลักษะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะชัดเจนมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PBAT มากขึ้นซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเมื่อมีปริมาณ PBAT ตั้งแต่ 30 - 85 ร้อยละโดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามความไม่เข้ากันระหว่าง PLA และ PBAT ลดลงเมื่อเติม TBT ลงไป โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า (ตารางที่ 1)

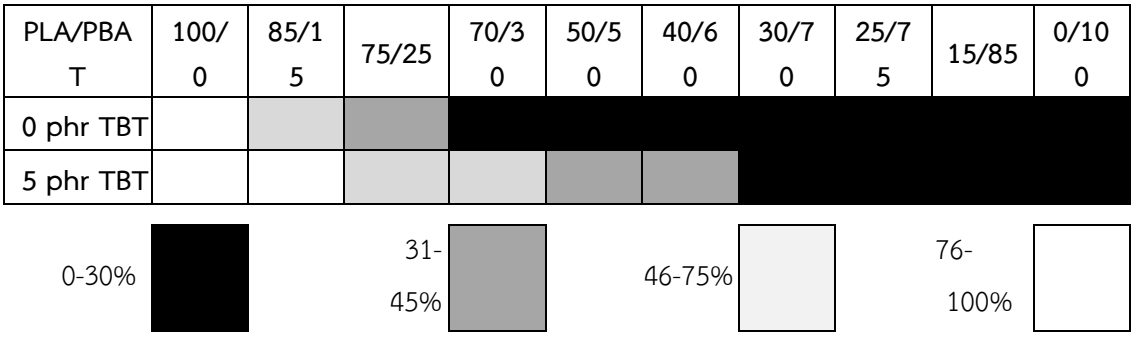
นอกจากนี้ค่าความใสของฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 2 ชี้ให้เห็นว่าเมื่อเติม TBT ลงไปใน PLA/PBAT แล้วฟิล์มมีความใสที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการส่องผ่านของฟิล์มเพิ่มขึ้นเพราะเฟสที่ไม่เข้ากันของ PLA และ PBAT ลดลงส่งผลให้การสะท้อนกลับของแสงลดลงด้วย ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ลักษณะปรากฏของของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT และ PLA/PBAT/TBT ที่อัตราส่วนต่างๆ

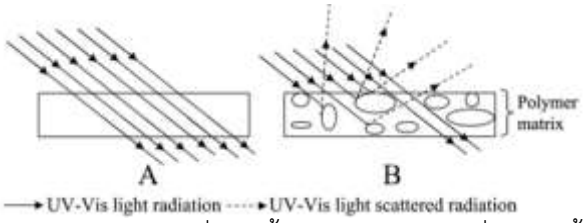
PLA /PBAT	TBT (phr)	
	0	5
Control		
100/0 (PLA)		
85/15		
75/25		
70/30		
60/40		

PLA /PBAT	TBT (phr)	
	0	5
50/50		
40/60		
30/70		
25/75		
15/85		
0/100 (PBAT)		

Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University
Volume 3 Number 5 September– October2016 (ISSN 2408 – 1248)



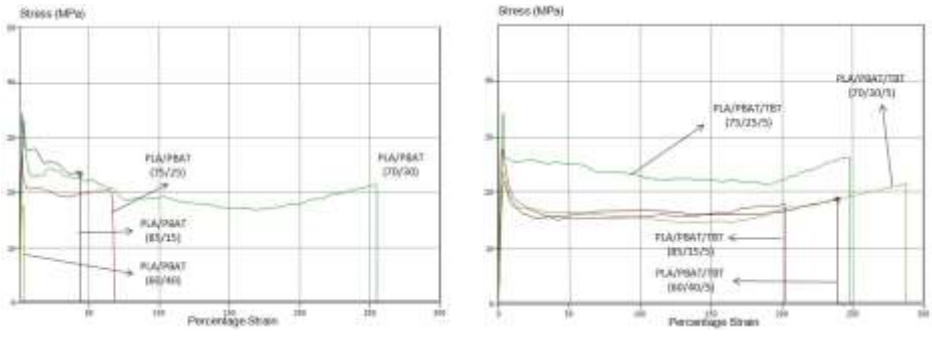
รูปที่ 2 ความใสฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ของ PLA/PBAT และ PLA/PBAT/TBT ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 3 ลักษณะการส่งผ่านของแสงของ A ฟิล์มที่เป็นเนื้อเดียวกันและฟิล์มที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

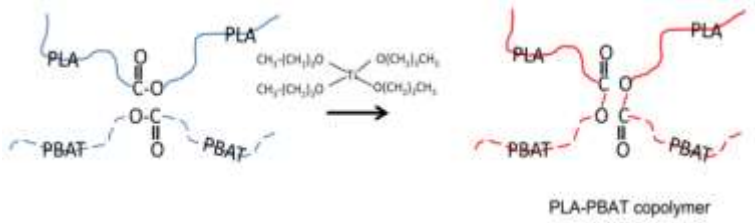
สมบัติเชิงกล

การวัดสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบแรงดึงที่รายงานผลเป็นค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ถูกแสดงผลเป็นกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดของฟิล์ม ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดูลัสของฟิล์ม มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม TBT ไป เป็นผลมาจาก TBT (โครงสร้างตามรูปที่ 1) ที่เป็น reactive compatibilizer ช่วยทำให้เร่งเกิดปฏิกริยาแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ (Tranesterification) ระหว่าง PLA กับ PBAT ในขณะผสมโดยมีความร้อนช่วย ได้เป็น PLA-PBAT copolymer ตามรูปที่ 5 จึงทำให้เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟส PLA และ PBAT (Coltelli et al., 2008: 1250-1262, S. Girdthep et al., 2014: 6776-6788)



(ก) **(ข)**

รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าการทนแรงดึง-การยืดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (ก) PLA/PBAT และ(ข) PLA/PBAT/TBT ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 5 การเกิดปฏิกริยาแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ (transesterification)ของ PLA และ PBAT ผ่าน TBT (S. Girdthep et al., 2014: 6776-6788)

จากความสัมพันธ์ของค่าการทนแรงดึง-การยืดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่า PLA/PBAT/TBT ที่อัตราส่วน 70/30/5 ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดคือมีค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด เป็น 22.97 ± 0.66 MPa ร้อยละการยืด ณ จุดขาด เป็น 297.18 ± 15.33 % ใกล้เคียงพอลิเมอร์ฟิล์มทางการค้า PP มากที่สุด (ผลสมบัติเชิงกลแสดงในหัวข้อ *การศึกษาศักยภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์*) เมื่อเติมปริมาณของ TBT ที่แตกต่างกัน (4, 5 และ 6 phr) ในพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์ม PLA/PBAT (70/30) พบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์ม PLA/PBAT (70/30) ให้ค่าที่ดีที่สุดเมื่อเติม TBT ในปริมาณ 5 phr (ตาราง 2) ทั้งนี้เนื่องจาก TBT มีลักษณะคล้ายตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทำหน้าที่ตัดสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้จึงทำให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดและความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อเติม TBT ไป ดังนั้นการเติม TBT ที่ 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบของพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์ม PLA/PBAT (70/30) ในการขึ้นรูปแบบหล่อจากสารละลาย

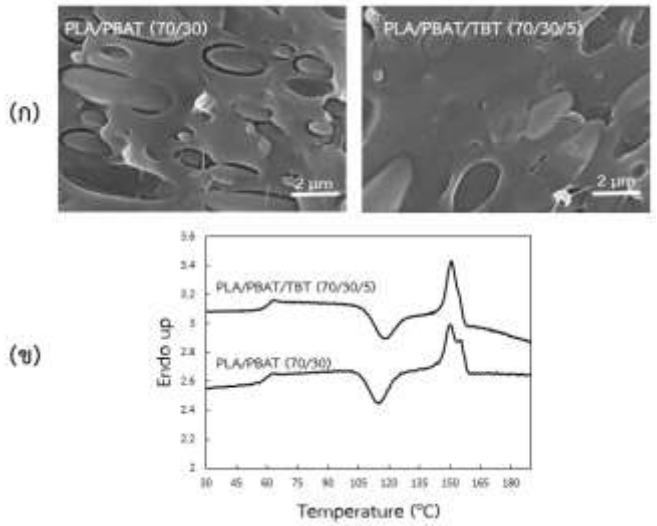
ตารางที่ 2 ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break, TS) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break, TS) และค่ายังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT (70/30) ที่มีปริมาณ TBT ที่แตกต่างกัน

PLA/PBAT/TBT	ความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	ค่ายังมอดูลัส (MPa)
70/30/0	37.88 ± 2.22	250.11 ± 20.77	2,170 ± 294.55
70/30/4	22.64 ± 0.99	50.41 ± 17.51	1,515.66 ± 98.62
70/30/5	22.97 ± 0.66	297.18 ± 15.33	1,397.37 ± 82.60
70/30/6	23.98 ± 0.61	95.30 ± 10.93	1,446.67 ± 161.85

ความเข้ากันได้ (Misibility)

จากภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT (70/30) ที่ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดและใกล้เคียงพอลิเมอร์ฟิล์มทางการค้า PP มากที่สุด ชี้ให้เห็นถึงมีการแยกเฟสกันระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองอย่างชัดเจน (รูปที่ 6 (ก)) โดยแสดงเฟสทั้งสองจะมีขนาดใหญ่ มีขอบเขตของการแยกกันชัดเจน ผลการทดลองเช่นนี้สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลข้างต้น นอกจากนี้ เมื่อเติม TBT พบว่าเฟสที่แยกกันทั้งสอง มีการแยกเฟสลดลง แต่ละเฟสมีขนาดเล็กลง และมีขอบเขตที่ชัดเจนลดลง (รูปที่ 6 (ข)) แสดงถึงความเข้ากันได้มากขึ้นของ PLA และ PBAT ด้วย เป็นผลมาจาก PLA-PBAT copolymer จากTBT ปฏิกิริยา tranesterification ในขณะผสมโดยมีความร้อนช่วย

นอกจากนี้การยืนยันผลของความเข้ากันระหว่าง PLA และ PBAT ในระบบ PLA/PBAT (70/30) และ PLA/PBAT/TBT (70/30/5) ด้วยการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาวะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์เลนด์ลดลงเมื่อเติม TBT จาก 61.5 องศาเซลเซียส(PLA/PBAT (70/30)) เป็น 56.5 PLA/PBAT (70/30/5) องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาวะคล้ายแก้วในอุดมคติสำหรับระบบ PLA/PBAT (70/30) ที่เท่ากับ 44.0 องศาเซลเซียส ตามความสัมพันธ์ของ Fox equation (Abdelwahab et al., 2012: 1822–1828) นอกจากนี้พีคของอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ (Melting temperature, T_m) ตำแหน่งพีคประมาณ 150 องศาสเซลเซียส) พบว่าการเติม TBT ทำให้ผลึกในพอลิเมอร์เบลนด์มีความสมบูรณ์ของผลึกแบบเดี่ยว (Homogeneous crystals) เป็นพีคเดียวในขณะที่ PLA/PBAT (70/30) แสดงลักษณะสองพีคซ้อนทับกันคล้ายไหล่พีค (Sholder peak) แสกงถึงการเกิดมีความสมบูรณ์ของผลึกแตกต่างกันสองแบบอันเนื่องมาจากความไม่เข้ากันของ PLA และ PBAT



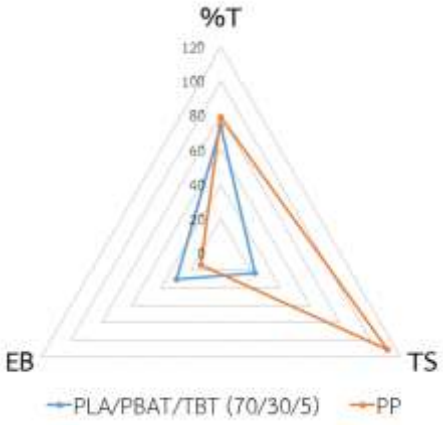
รูปที่ 6 (ก) ภาพส่องภาคตัดขวาง SEM และ (ข) เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT (70/30) และ PLA/PBAT/TBT (70/30/5)

การศึกษาศักยภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์

การศึกษาศักยภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์จะทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์สูตรที่ดีที่สุด (PLA/PBAT/TBT (70/30/5)) ซึ่งมีความเข้ากันได้ดีระหว่าง PLA และ PBAT กับฟิล์มพอลิเมอร์ทางการค้า PP ในเทอมของสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด, TS และ ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด, EB) และความใสของฟิล์ม (Transmittance, %T) ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยพบว่าความใสของ PLA/PBAT/TBT (70/30/5) มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (EB = 297.18 ± 15.33 %) ที่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ทางการค้า PP (EB = 133.75 ± 11.44 %) แต่ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดของ PLA/PBAT/TBT (70/30/5) (TS = 22.97 ± 0.66 MPa) มีค่าต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ทางการค้า PP (111.81 ± 4.07 MPa)

ถึงแม้ว่าค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดของ PLA/PBAT/TBT (70/30/5) ที่เท่ากับจะมีค่าที่ต่ำกว่า PP แต่ฟิล์ม PLA/PBAT/TBT (70/30/5) ผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “ถุงพลาสติกสำหรับ

บรรจุอาหาร” มาตรฐานเลขที่ มอก. 10271-2534 โดยกำหนดความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาดของพลาสติกที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ซึ่งระบุไว้ว่าต้องมีค่า ความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 11.8 MPa และ ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่มากว่าหรือเท่ากับ 150 %



รูปที่ 7 แผนภูมิเทียบศักยภาพของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT/TBT (70/30/5) กับฟิล์มพอพิลีนทางการค้า (PP)*

***หมายเหตุ** %T = ค่าความใส (%); EB = ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด × 10 (%); TS = ความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาพลาสติกชีวภาพชนิดใหม่ สำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA PBAT และ TBT ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยวิธีหล่อจากสารละลาย โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ จะแสดงความไม่เข้ากันเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PBAT เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและการวัดค่าความใสของแผ่นฟิล์ม และเมื่อเติม TBT ลงไปพบว่า TBT ช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่าง PLA และ PBAT ด้วย PLA-PBAT copolymer ผ่านปฏิกริยาแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ (transesterificatio) ขณะกวนผสมโดยใช้ความร้อน สามารถยืนยันความเข้ากันได้ด้วยเทคนิค SEM และ DSC นอกจากนี้การเติม TBT ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ PLA/PBAT โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์ คือ PLA/PBAT/TBT (70/30/5)

จากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า PLA/PBAT/TBT (70/30/5) มีศักยภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ซึ่งนอกจากจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังให้สมบัติเชิงกลและความใสที่ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ทางการค้า PP นอกจากนี้ฟิล์ม PLA/PBAT/TBT (70/30/5) ยังผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร” มาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ 10271-2534 ในเรื่องข้อกำหนดของความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาดของพลาสติกที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากรและห้องวิจัยทางพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

"ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร พ. ศ. 2553." (2552). ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127, ตอนพิเศษ 126ง (9 พฤษจิกายน): หน้า 16-35.

ภาษาต่างประเทศ

Abdelwahab M.A. et al. (2012). "Thermal, mechanical and morphological characterization of plasticized PLA–PHB blends." **Polymer Degradation and Stability**, 97: 1822–1828.

Coltelli M-B et al.(2008). "Poly(lactic acid) properties as a consequence of poly(butylenes adipato-co-terephtalate) blending and acetyl tributyl citrate plasticization." **Journal of Applied Polymer Science**, 110: 1250–1262.

Girdthep S. et al. (2014). "Biodegradable nanocomposite blown films based on poly(lactic acid) containing silver-loaded kaolinite: A route to controlling moisture barrier property and silver ion release with a prediction of extended shelf life of dried longan." **Polymer**, 55: 6776-6788.

_____. (2015). "Formulation and characterization of compatibilized poly(lacticacid)-based blends and their nanocomposites with silver-loaded kaolinite." **Polymer International**, 64: 203-211.

_____. (2015). "Effect of plate-like particles on properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend: A comparative study between modified montmorillonite and graphene nanoplatelets." **Composites Science and Technology**, 119: 115-123.

Lin S. et al. (2012). "Mechanical properties and morphology of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends compatibilized by transesterification." **Materials and Design**, 36: 604-608.

Sodergard A. and Stolt M. (2002). "Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition." **Progress in Polymer Science**, 27: 1123–1163.

Zeng J. et al. (2009). "Synthesis and Properties of Poly(Ester Urethane)s Consisting of Poly(L-Lactic Acid) and Poly(Ethylene Succinate) Segments." **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 48: 1706-1711.