



**การศึกษาสมบัติเชิงกลและความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
พอลิบิวทีลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท พอลิแลคติกแอซิด
และยางธรรมชาติอีพอกไซด์
ธาริณี นามพิชญ์^{a*} และ รัตนวรรณ มกรพันธุ์^b**

**Mechanical and Thermal Properties of Biodegradable Films from Blends of
Poly (butylene adipate-co-terephthalate), Polylactic acid
and Epoxidized Natural Rubber
Tarinee Nampichth^{a*} and Rathanawan Magaraphan^b**

^aภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

^bวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

^aDepartment of Packaging and Materials, Faculty Agro-Industry, Kasetsart University.

^bThe Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University.

*Corresponding Author. E-mail address: fagitnn@ku.ac.th

Received 20 October 2011; accepted 3 September 2012

บทคัดย่อ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของปัญหาในการกำจัดของเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติก จึงได้มีการออกแบบและพัฒนาพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพยังคงมีข้อจำกัด เช่น ค่าใช้จ่ายสูง ในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาการลดต้นทุนของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ และปรับปรุงคุณสมบัติโดยการใช้อย่างธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นพอลิเมอร์ที่สองในการผสมพอลิเมอร์ ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่มีสามองค์ประกอบ คือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิบิวทีลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) ได้ถูกศึกษาโดยผสมในเครื่องอัดรีดเกลียวท่อนคู่ ตามด้วยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มและเครื่องเป่าฟิล์มเพื่อผลิตฟิล์มที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ในการผสมพอลิเมอร์สามชนิด จะทำการผสม ENR ในอัตราส่วนคงที่ที่ 10% โดยน้ำหนัก ส่วน PLA และ PBAT จะผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน และมีการเติม Irganox และ Uvinul เพื่อเพิ่มความเสถียรทางความร้อนและแสงยูวี ตามลำดับ สมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนรวมถึงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ความหนาและค่าสีของฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ถูกตรวจสอบ โดยสีจะสว่างขึ้นและให้สีเขียวและสีฟ้ามากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PBAT ในแผ่นฟิล์ม นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณ PBAT จะลดการต้านทานแรงดึงแต่จะเพิ่มระยะยืดให้กับฟิล์ม ส่วนการเติมคาร์บอนแบล็คนอกจากจะช่วยดูดซับและลดความเข้มแสง และยังช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสและเสริมแรงอีกด้วย

คำสำคัญ: พลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ พอลิเมอร์ผสม พอลิแลคติกแอซิด ยางธรรมชาติอีพอกไซด์
พอลิบิวทีลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท

Abstract

Accumulating problems with disposal of domestic waste, particularly of plastic, have brought about development of a new class of polymers to produce biodegradable plastic. However, one limitation found with biodegradable plastic is that its production is costly. In this research, methods to lower the production cost of biodegradable plastic and improvement of some of its properties by using epoxidized natural rubber as secondary polymer for polymer blend were studied. First in order to prepare biodegradable film, the ternary blends of epoxidized natural rubber (ENR), poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) were studied and prepared by using a twin-screw extruder followed by chill roll cast and blown film extruders. The concentration of ENR in the ternary blend was fixed at 10 wt%, with the rest being PLA and PBAT. In some productions of film, Irganox and Uvinul were introduced to increase thermal and UV stabilizers. The mechanical and thermal properties including the thickness, color and water vapor permeability (WVP) of the biodegradable film were evaluated. The film became slightly greener and bluer with increased PBAT content in the blend. Consequently, the tensile strength of the blend decreased, while the elongation at break increased. Finally, with addition of carbon black in the blend, the light energy was absorbed and the intensity of the light reduced, while the film modulus and strength were increased.

Keywords: biodegradable plastics, polymer blends, poly (lactic acid), epoxidized natural rubber, poly (butylene adipate-co-terephthalate)

บทนำ

ในปัจจุบันได้มีพลาสติกจำนวนมากมายหลากหลายชนิด ที่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuels)

โดยพลาสติกพวกนี้ได้ถูกใช้และถูกทิ้งซึ่งก่อให้เกิดปัญหาแกสิ่งแวดล้อมเนื่องจากพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านี้จะถูกกำจัดโดยการเผาให้เป็นเถ้าซึ่งจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

และก๊าซที่เป็นพิษจำนวนมาก ด้วยเหตุผลนี้เองจึงจำเป็นต้องอย่างมากที่ต้องผลิตและพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ที่ไม่มีการใช้ส่วนประกอบที่เป็นพิษหรือเป็นอันตรายในกระบวนการผลิตและสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและความร้อนของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) โดยใช้ PBAT เป็นส่วนผสมหลักเนื่องจากต้องการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางซึ่งการเติม PLA เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและการเติม ENR เป็นการเพิ่มความเหนียวให้แก่แผ่นฟิล์ม โดยยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการค้าซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีหลายด้าน เช่น ให้คุณสมบัติด้านความต้านแรงดึง (tensile strength) และคุณสมบัติความล้า (fatigue properties) ที่ดีและให้การซึมผ่านของก๊าซที่ต่ำ มีความต้านทานต่อน้ำมันและสามารถย่อยสลายได้โดยการใช้เอนไซม์จากจุลินทรีย์ โดยหมู่ออกซิเรน (oxirane groups) ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ถูกพบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพในพอลิเมอร์ที่นำมาผสมด้วย นอกจากนี้การเลือกใช้อย่างธรรมชาติเป็นส่วนผสม นอกจากจะให้คุณสมบัติที่ดีแก่พอลิเมอร์ผสมแล้วยังยางธรรมชาติ (NR) มีคุณสมบัติที่เป็นข้อดีเหนืออย่างสังเคราะห์หลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่นสูง กระดองสูง ความทนต่อการยืดดึงสูง สะสมความร้อนต่ำ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีข้อดี คือ เป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติ ดังนั้น ในการผลิตจะลดการทำลายสิ่งแวดล้อมสามารถผลิตฟิล์มชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติโดยยางธรรมชาติสามารถนำไปพัฒนาเป็นฟิล์มบางที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านการกำจัดขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ซึ่งเป็นการลดปริมาณขยะประเภทฟิล์มที่ไม่สามารถย่อยสลายทางธรรมชาติและเป็นการลดต้นทุนจากการผลิตฟิล์มชีวภาพ เนื่องจากฟิล์มที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีส่วนผสมของยางพารา ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศไทย เนื่องจากยางพารามีราคาต้นทุนที่ถูกกว่าพลาสติกชีวภาพที่นำเข้าจากต่างประเทศ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุทดลองดังต่อไปนี้ พอลิแลคติกแอซิดเกรด PLA 4042D จากบริษัท ทานตะวัน อุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) มีอัตราการไหล (Melt flow index) และความหนาแน่น 64.8 กรัม/10 นาที่ (ที่ 190 องศาเซลเซียส และ 2.16 กิโลกรัม) และ 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (Ecoflex®) จากบริษัทสูงสุดที่มีอัตราการไหล

2.7 – 4.9 กรัม/10 นาที่ (190 องศาเซลเซียสและ 2.16 กิโลกรัม) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีระดับการเกิดอีพอกซิเดชันร้อยละ 50 จาก บริษัท เมืองใหม่ กัททรี จำกัด (มหาชน) น้ำหนักโมเลกุล 6.4×10^5 สารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน (Irganox® B215) สารเพิ่มความเสถียรทางแสงยูวี (Uvinol® 5050 H) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ส่วนอุปกรณ์และเครื่องที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพ ประกอบด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (LabTech engineering company, Model LTE 20-40) ที่มีขนาดสกรู 20 mm เครื่องตัดเม็ดพลาสติก เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม LabTech engineering company Model LE 25-30/CV Single screw ขนาดสกรู 25 mm เครื่องเป่าฟิล์ม LabTech engineering company Model LE20-30/C Single screw ขนาด 20 mm สำหรับวิธีการในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ขั้นตอนผสมพอลิบิวทิลีน อะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทและพอลิแลคติกแอซิดกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่ความเร็ว 40 รอบต่อนาทีและอุณหภูมิ 160–205 องศาเซลเซียส แล้วนำไปอบแห้งเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ได้มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็ว 60 รอบต่อนาที และเครื่องเป่าฟิล์มที่อุณหภูมิ 160–170 °C ความเร็ว 26 รอบต่อนาที จากนั้นนำฟิล์มที่ผลิตได้มาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ อันประกอบด้วย ทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง โดยเครื่อง Testometric รุ่น Micro0350 ตามมาตรฐาน ASTM D882 ทดสอบความต้านทานแรงกระแทกโดยเครื่องทดสอบความต้านแรงกระแทกของบริษัท Intro enterprise co., Ltd. (No. 220 Dart Impact Tester) ยี่ห้อ Yasuda ตามมาตรฐาน ASTM D1709 ทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำโดยเครื่อง Permatran – W Model 398 ยี่ห้อ MOCON ตามมาตรฐาน ASTM E398 วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน โดยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC, model DSC 822) ตามมาตรฐาน ASTM D3418 และทดสอบเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิซิส (TGA, ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น Pyris Diamon) นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ค่าสีโดยเครื่อง UltraScan XE ยี่ห้อ HUNTER และวัดความหนาของฟิล์ม โดยเครื่องวัดความหนา ยี่ห้อ Mitutoyo

ตารางที่ 1 แสดงชื่อวัสดุ สัดส่วนต่าง ๆ และกระบวนการผลิต

รหัสวัสดุ	วัสดุ	กระบวนการผลิต
Eco50/P40/E10 (R, U)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม
Eco60/P30/E10 (R, U)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม
Eco70/P20/E10 (R, U)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม
Eco80/P10/E10 (R, U)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม
Eco70/P20/E10 (R, U, CB)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul + carbon black	เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม
Eco50/P40/E10 (R, U, B)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องเป่าฟิล์ม
Eco60/P30/E10 (R, U, B)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องเป่าฟิล์ม
Eco70/P20/E10 (R, U, B)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องเป่าฟิล์ม
Eco80/P10/E10 (R, U, B)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul	เครื่องเป่าฟิล์ม
Eco80/P10/E10 (R, U, CB, B)	Eco/PLA/ENR + 0.1% rich + 1% uvinul + carbon black	เครื่องเป่าฟิล์ม

* Eco คือ พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) หรือ Ecoflex

* rich คือ Irganox® B215 เป็น thermal stabilizer

* uvinul คือ Uvinul® 5050 H เป็น UV stabilizer

ผลการศึกษา

การทดสอบการวัดค่าสีและความหนา

จากตารางที่ 2 แสดงการทดสอบค่าสีและความหนาของฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มสำหรับ Eco60/P30/E10 (R, U, B) เนื่องจากมีขนาดเล็กไม่สามารถทำการวัดค่าสีได้ เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท ในฟิล์มพบว่าค่า L^* , a^* และ b^* จะลดลงจาก 42.38 ถึง 9.30, 3.29 ถึง 0.75 และ 17.18 ถึง 3.02 ตามลำดับ ซึ่งจากผลข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มของปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-

เทเรพทาเลท ในฟิล์มจะทำให้สีเข้มขึ้นซึ่งแสดงได้จากค่า L^* ลดลง ฟิล์มเขียวมากขึ้นซึ่งแสดงได้จากค่า a^* ลดลง และมีสีฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงได้จากค่า b^* ลดลง ขณะที่การเติมคาร์บอนแบล็คในฟิล์มจะทำให้ฟิล์มมีสีดำซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่า L^* เข้าสู่ค่า 0.03

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าความหนาของฟิล์มที่ผลิตโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มจะน้อยกว่าฟิล์มที่ผลิตโดยใช้เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มอย่างมาก นอกจากนั้นพบว่าฟิล์มที่ถูกผลิตโดยใช้เครื่องเป่าฟิล์มจะให้ค่าที่สว่างกว่าเนื่องจากค่า L^* ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 แสดงค่าสีและความหนาของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	สี			ความหนา (มิลลิเมตร)
	L^*	a^*	b^*	
Eco50/P40/E10 (R, U)	42.38	3.29	17.18	0.166 ± 0.03
Eco60/P30/E10 (R, U)	10.07	2.53	5.93	0.473 ± 0.05
Eco70/P20/E10 (R, U)	10.35	1.98	4.63	0.864 ± 0.08
Eco80/P10/E10 (R, U)	9.30	0.75	3.02	0.395 ± 0.03
Eco70/P20/E10 (R, U, CB)	0.03	0.00	-0.01	0.463 ± 0.06
Eco50/P40/E10 (R, U, B)	45.09	4.53	20.64	0.189 ± 0.07
Eco70/P20/E10 (R, U, B)	61.42	3.27	20.88	0.055 ± 0.007
Eco80/P10/E10 (R, U, B)	67.83	1.7	14.67	0.055 ± 0.01
Eco80/P10/E10 (R, U, CB, B)	20.78	4.93	16.13	0.067 ± 0.007

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

จากผลการทดสอบเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มที่ผลิตจากเครื่องเป่าฟิล์มจะลดลงตามการเพิ่มในปริมาณของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท จาก 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเนื่องจากพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะนุ่มเป็น plastomeric phase ที่จะช่วยลดความเปราะในฟิล์ม (Jiang et al.,

2006) นอกจากนี้เมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการยืดตัวสูงสุดของฟิล์มเพิ่มขึ้น

ในฟิล์มที่ผลิตโดยใช้เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึง ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีแนวโน้มลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงตามการเพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-

เทรฟทาเลท ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยพบว่า ค่าการยึดตัวของฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม จะมีแนวโน้มที่แตกต่างจากฟิล์มที่ถูกรีดขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์มเนื่องจากความหนาของฟิล์มที่ผลิตได้แตกต่างกัน

นอกจากนี้ได้เติมคาร์บอนแบล็คในฟิล์ม เนื่องจากคาร์บอนแบล็ค (CB) ถูกใช้เป็นสารให้สีดำและช่วยให้ความเสถียรต่อการเกิด photodegradation ด้วยวิธี screening method ซึ่งถือได้ว่าคาร์บอนแบล็คเป็นสารดูดซับแสง ซึ่งคาร์บอนแบล็คในกรณีนี้จะช่วยดูดซับพลังงาน

แสงและช่วยลดความเข้มของการทำปฏิกิริยาของแสงกับพอลิเมอร์ (Shlyapintokh, 1984) นอกจากนี้คาร์บอนแบล็คสามารถช่วยในการปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุโดยใช้เป็นสารเสริมแรง จากการทดลองพบว่า การเติมคาร์บอนแบล็คในปริมาณ 0.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใน Eco80/P10/E10 (R, U, CB, B) และ Eco70/P20/E10 (R, U, CB) ตามลำดับ จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากอิทธิพลการเสริมแรงของคาร์บอนแบล็ค

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติการทนแรงดึงของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

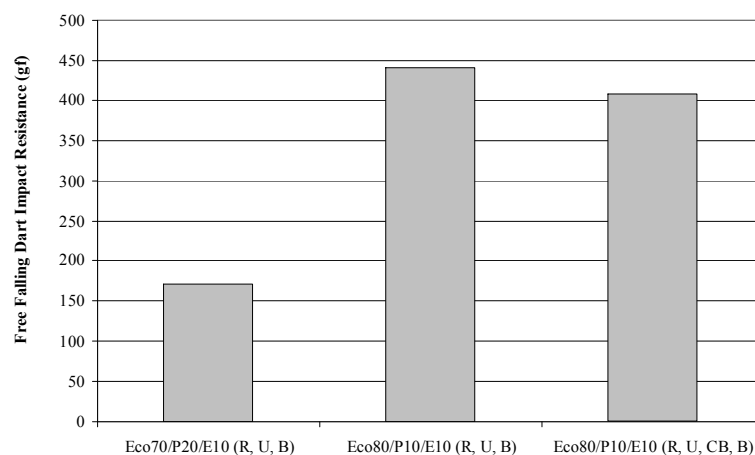
วัสดุ	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	ความสามารถในการยืดตัวสูงสุด (%)
Eco50/P40/E10 (R, U)	0.75	27.22
Eco60/P30/E10 (R, U)	7.81	144.86
Eco70/P20/E10 (R, U)	2.84	463.58
Eco80/P10/E10 (R, U)	4.48	472.84
Eco70/P20/E10 (R, U, CB)	3.31	164.01
Eco50/P40/E10 (R, U, B)	7.39	373.28
Eco70/P20/E10 (R, U, B)	6.68	300.09
Eco80/P10/E10 (R, U, B)	4.89	310.40
Eco80/P10/E10 (R, U, CB, B)	9.37	560.75

หมายเหตุ: สูตร Eco60/P10/E10 (R, U, B) ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้

สมบัติในการทนแรงกระแทก (impact properties)

แสดงผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1 โดย แกน y แสดงค่า Free falling dart impact resistance มีหน่วยเป็น gf คือ กรัมแรง ซึ่งเป็นน้ำหนักเป็นกรัมที่ทำให้ตัวอย่างแตก ส่วนแกน x แสดงชนิดของสารตัวอย่างชนิดต่างๆ เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลท จาก 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไป 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในฟิล์มที่ถูกรีดขึ้นด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม มีค่า Free Falling Dart Impact Resistance เพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทรฟทาเลท มีโครงสร้างเป็น แอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyesters) ที่มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ที่ต่ำ ดังนั้น เมื่อรวมตัวกับพอลิแลคติกแอซิด จะ

สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลต้านความเหนียว (ductility) และสมบัติในการทนแรงกระแทก (impact properties) แต่เมื่อเติมสารคาร์บอนแบล็คเพิ่มลงในฟิล์มชีวภาพพบว่า ค่า Free Falling Dart Impact Resistance มีค่าต่ำลงเนื่องจากการเติมสารคาร์บอนแบล็คซึ่งถือเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ (inorganic filler) ชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคซึ่งจะไปลดพลังงานที่ถูกต้องการเพี้ยนและทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ catastrophic crack ที่อุณหภูมิธรรมดา (Manson and Sperling, 1976) โดยคาร์บอนแบล็คจะทำหน้าที่เป็น stress concentrator ซึ่งทำให้เกิดจุดที่ทำให้เกิด crack growth โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าระหว่าง เมทริกซ์ (matrix) กับคาร์บอนแบล็คไม่เกิดพันธะกัน



รูปที่ 1 แสดงผลการทดสอบค่า Free Falling Dart Impact Resistance ของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

จากตารางที่ 4 แสดงค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ โดยพบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท เนื่องจากค่าการซึมผ่านไอน้ำของ พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท จะให้ค่าที่สูงกว่าค่าของพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้ในฟิล์ม Eco80/P10/E10 (R, U, CB, B) จะทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ต่ำกว่า Eco80/P10/E10 (R, U, B) เนื่องจากการเติมคาร์บอนแบล็คจะทำให้เกิด tortuous path สำหรับน้ำจะผ่านไปได้ (Kristo and Biliaderis, 2007)

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

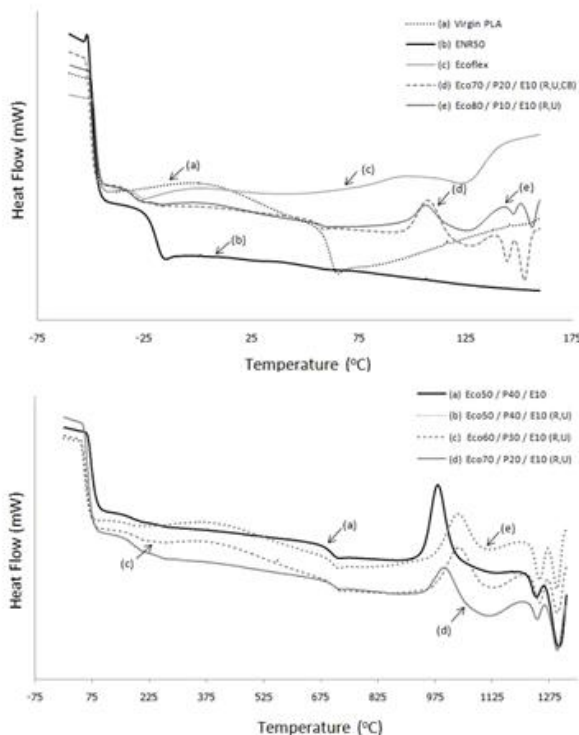
จากรูปที่ 2 แสดง DSC thermograms ของฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

สมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มที่ได้จากเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มที่ปริมาณสารตั้งต้นต่าง ๆ ถูกตรวจสอบโดยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่แสดงผลการทดสอบโดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจากนั้นทำให้เย็นและให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอีกครั้งในช่วงเดียวกัน พบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m)

ตารางที่ 4 แสดงค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	Water vapor permeation (g.mil/m ² .day)
Eco50/P40/E10 (R, U, B)	408.89
Eco70/P20/E10 (R, U, B)	426.99
Eco80/P10/E10 (R, U, B)	566.13
Eco80/P10/E10 (R, U, CB, B)	428.65

* สูตร Eco60/P10/E10 (R, U, CB, B) ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้



รูปที่ 2 แสดง DSC thermograms ของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

ของ ENR จะไม่มี ขณะที่เมื่อผสม ENR กับ PBAT และ PLA พบว่าเกิดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PLA เกิดขึ้นใน DSC thermograms ของ Eco50/P40/E10, Eco60/P30/E10 และ Eco70/P20/E10 ซึ่งค่า T_g อยู่ที่ประมาณ 55.55 °C, 58.10 °C และ 56.96 °C ตามลำดับ เมื่อให้ปริมาณ ENR คงที่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าค่า T_g ของ ENR จะไม่ปรากฏใน DSC thermograms เนื่องจากใช้ปริมาณ ENR ที่น้อยในฟิล์มผสม ใน DSC thermograms ของ Eco50/P40/E10 พบว่าเกิด cold crystallization ของ PBAT และเกิดการหลอมที่ช่วง 80–130 °C และช่วง 140–160 °C ตามลำดับ ขณะที่ DSC thermograms ของ Eco60/P30/E10 และ Eco70/P20/E10 ก็แสดงการ cold crystallization ของ PBAT และ melting peak ของ PBAT และ PLA ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการผสมที่ไม่เข้ากัน เนื่องจากเกิด melting peak สองอัน

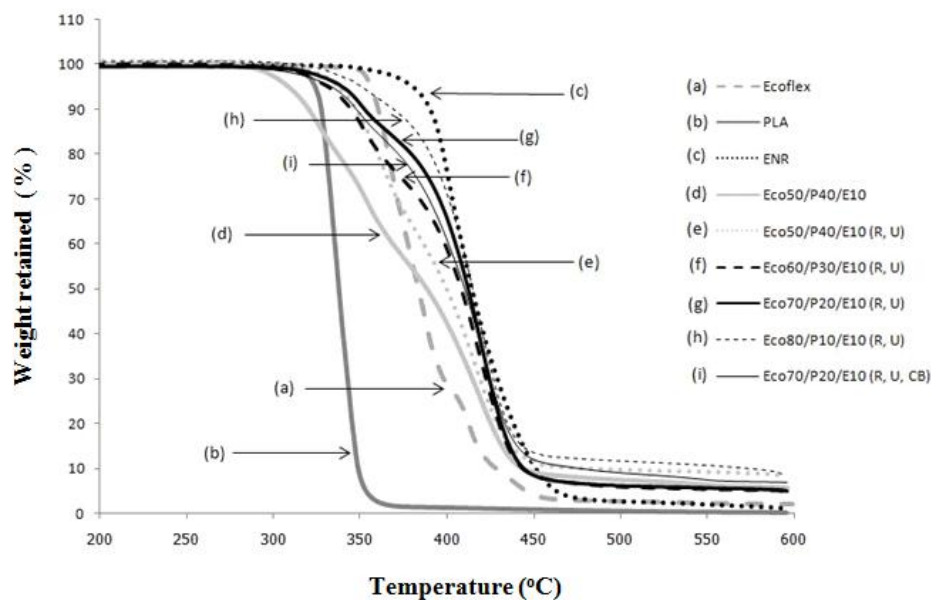
นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณ PBAT จนถึง 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในฟิล์ม peak ของ cold crystallization จะค่อย ๆ หายไป นอกจากนี้การเติมคาร์บอนแบล็ค, Irganox (R) B215 และ Uvinul ในฟิล์มจะไม่เกิดอิทธิพลใดๆ ใน DSC thermograms เนื่องจากถูกเติมในปริมาณที่น้อย

การทดสอบด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analysis (TGA)

เมื่อทดสอบฟิล์มตัวอย่างด้วยเครื่อง TGA พบว่าสาร ENR มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า PBAT และ PLA เนื่องจากค่าอุณหภูมิที่วัสดุเริ่มสลายตัว (T_d) ของสาร ENR มีค่าสูงกว่า PBAT และ PLA เมื่อผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT, PLA และ ENR พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของ Eco50/P40/E10 จะให้ค่า T_d ที่ต่ำกว่าสาร PBAT ที่ยังไม่ได้ผสมกับสารอื่นเนื่องจากการผสมกับ PLA ที่มีค่าความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำกว่าจะทำให้เกิดการลดลงของค่า T_d โดยรวมโดยอิทธิพลของ ENR ที่มีต่อการทดสอบชิ้นงานด้วย TGA ไม่มากนักเนื่องจากมีปริมาณในการเติมในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในปริมาณที่น้อย โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของ PBAT เพิ่มมากขึ้นในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ค่า T_d สูงขึ้นเนื่องจากค่า T_d ของ PBAT มีค่ามากกว่า T_d ของ PLA นอกจากนี้การเติมสาร Irganox® B215 และ Uvinul® 5050H ซึ่งเป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อนและแสงยูวีจะทำให้แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความคงทนต่อความร้อนมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติในการเพิ่มความเสถียรทางความร้อนของสารดังกล่าว และจากการเติมสารคาร์บอนแบล็คเข้าไปผสมในแผ่นฟิล์มพบว่าไม่ส่งผลต่อการทดสอบ TGA

ตารางที่ 5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ T_d กับชนิดสารตัวอย่างต่าง ๆ

ชนิดของสารตัวอย่าง	T_d (°C)
PBAT	355.5
PLA	325.2
ENR	386.2
Eco50/P40/E10	305.2
Eco50/P40/E10 (R,U)	336.7
Eco60/P30/E10 (R,U)	329.0
Eco70/P20/E10 (R,U)	331.4
Eco80/P10/E10 (R,U)	386.1
Eco70/P20/E10 (R,U,CB)	327.3

หมายเหตุ T_d หมายถึงอุณหภูมิที่วัสดุเริ่มสลายตัว

รูปที่ 3 แสดงผลการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนรวมถึงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ความหนาและค่าสีของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ PBAT, PLA และ ENR ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้เครื่องผสมอัดรีดเกลียวหนอนคู่ และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มและเครื่องเป่าฟิล์ม จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ความหนา และค่าสีของฟิล์ม จากการทดสอบค่าสีและความหนาของฟิล์มที่ผลิตด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มพบว่า การเพิ่มของ PBAT ให้สีที่สว่างขึ้นและให้สีเขียวและสีฟ้ามากขึ้น ส่วนฟิล์มที่ผลิตด้วยเครื่องเป่าฟิล์มจะให้ความหนาที่น้อยกว่าฟิล์มที่ผลิตด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มเนื่องจากใช้สภาวะและกระบวนการผลิตที่ต่างกัน สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าในฟิล์มที่ผลิตด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม เมื่อเพิ่มปริมาณ PBAT จะลด

การต้านทานแรงดึงลงแต่จะเพิ่มระยะยืดให้กับฟิล์ม ส่วนการเติมคาร์บอนแบล็กนอกจากจะช่วยดูดซับ และลดความเข้มของแสงให้แก่ฟิล์มชีวภาพยังช่วยเสริมแรงและเพิ่มค่าโมดูลัสอีกด้วย จากการผลิตฟิล์มชีวภาพด้วยการผสมพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะช่วยลดต้นทุนการผลิตฟิล์มที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่มีต้นทุนสูงให้ถูกลงและยังช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ยางพาราที่ผลิตได้ภายในประเทศไทยอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) ในการให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ตลอดจนภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกด้านสถานที่และการติดตั้งเครื่องมือ ชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Jiang, L., Wolcott, M. P. & Zhang, J. (2006). Study of biodegradable polylactide / poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends. *Biomacromolecules*, 7, 199 – 207.

Kristo, E. & Biliaderis, C.G. (2007). Physical properties of starch nanocrystal reinforced pullulan films. *Carbohydrate Polymer*, 68, 146 – 158.

Manson, J.A. & Sperling, L.H. (1976). *Polymer blends and composites*. New York: Plenum Press.

Shlyapintokh, V. (1984). *Photochemical Conversion and Stabilization of Polymers*. New York: Hanser.