



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาอุปกรณ์ย่อยสลายได้จากพอลิแลกติกแอซิด
และยางธรรมชาติดัดแปร”
(RDG5920044)

ผศ.ดร.ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุฬไพศิษฏ์ และคณะ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การพัฒนาอุปกรณ์ชนิดย่อยสลายได้จากพอลิแล็กติกแอซิด
และยางธรรมชาติดัดแปร”

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | | |
|--------------------|----------------|----------------------------------|
| 1. ผศ.ดร.ช.วยากรณ์ | เพ็ชฌุฬไพศิษฐ์ | คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 2. รศ.ดร.ปราณี | ภิญโญชีพ | คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 3. นายวิวัฒน์ | หว่าปัญญากุล | คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ การพัฒนาถุงปลูกชนิดย่อยสลายได้จากพอลิแล็กติกแอซิด และยางธรรมชาติดัดแปร
Development of biodegradable planting bag prepared from poly(lactic acid)
/modified NR

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฐ์

หน่วยงาน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ที่อยู่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

โทรศัพท์/โทรสาร (055) 963401

E-mail: chorwayakronp@gmail.com

ผู้ร่วมวิจัย : รศ.ดร.ปราณี ภิญโญชีพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

นักศึกษาผู้ร่วมโครงการ : นายวิทวัส หว่าปัญญากุล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

งบประมาณทั้งโครงการ 957,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 18 เดือน ตั้งแต่วันที่ 14 มิถุนายน 2559 ถึงวันที่ 14 ธันวาคม 2560
ขอขยายเวลาครั้งที่ 1 ถึงวันที่ 14 เมษายน 2561

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ในแต่ละปีมีการใช้ถุงดำในการเพาะปลูกทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ไม่ต่ำกว่า 30 ล้านใบต่อปี โดยเฉพาะช่วงการเตรียมต้นกล้า หรือการปลูกพืชระยะสั้น ซึ่งถุงดังกล่าวเตรียมจากพลาสติกที่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่นพอลิเอทิลีน (PE) ทำให้หลังการใช้งานถุงดังกล่าวกลายเป็นขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ก่อให้เกิดปัญหาขยะและมลพิษตามมา จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาพลาสติกชีวภาพขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนพลาสติกที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี พอลิแล็กติก แอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ ชีวภาพตัวหนึ่งที่มีความสนใจในการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจาก PLA ผลิตจากพืชที่สามารถปลูกทดแทนได้ มีสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถย่อยสลายได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PLA ที่ค่อนข้างสูง ทำให้ในสภาวะการใช้งานจริง PLA ทนต่อแรงดึงได้ดี แต่มีการยืดตัวออกได้น้อย ทั้ง PLA ยังมีการย่อยสลายที่รวดเร็วเกินไปสำหรับการใช้งานเป็นถุงปลูกทางการเกษตร ซึ่งการใช้งานเป็นถุงปลูกดังกล่าวต้องไม่เกิดการปริแตกขณะใช้งานเพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำปุ๋ยที่รดให้กับพืช โดยทั่วไปถุงดังกล่าวจะมีอายุการใช้งานอยู่ระหว่าง 3-5 เดือน ขึ้นกับชนิดของพืชที่ปลูก ทั้งถุงที่ใช้ต้องมีการยืดตัวออกได้ดีพอสมควรเนื่องจากต้องรองรับการขยายตัวของรากและลำต้นที่เจริญเติบโตขึ้นของพืช งานวิจัยนี้สนใจปรับปรุงสมบัติด้านการยืดตัวออกและอายุการใช้งานของฟิล์ม PLA เพื่อประยุกต์ใช้เป็นถุงปลูกทางการเกษตร โดยใช้ยางธรรมชาติดัดแปรอีพอกซีไดไฮดรอกซิล (HENR) ซึ่งยางดังกล่าวมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากในโครงสร้าง จึงคาดหวังว่าน่าจะเกิดการฟอร์มพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ HENR กับหมู่คาร์บอนิลของ PLA ได้ จึงน่าจะส่งผลให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ทั้ง

การรับแรง และการยืดตัวของฟิล์ม ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของงานวิจัยครั้งนี้ที่ต้องการถุงปลูก ที่สามารถรับแรงกดจากดิน หรือสภาวะในการปลูกได้ดีขึ้นกว่าการใช้เพียง PLA บริสุทธิ์ และสามารถใช้งานได้เทียบเคียงกับถุงปลูกที่เตรียมจาก PE

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อให้ได้ถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA ที่คงสภาพอยู่ได้ไม่น้อยกว่า 5 เดือน และสามารถย่อยสลายได้หลังการใช้งาน โดยมียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ

ผลการดำเนินงาน

1. การเตรียมและการวิเคราะห์ยางดัดแปรอีพอกไซด์ไฮดรอกซิล (Hydroxyl epoxidized NR, HENR)

งานวิจัยนี้ได้เตรียมยางธรรมชาติดัดแปรอีพอกไซด์ไฮดรอกซิล (HENR) ผง ที่มีความแตกต่างของปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลและอีพอกไซด์ 3 ตัว เพื่อผสมร่วมกับ PLA ในการเตรียมเป็นถุงปลูกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและอายุการใช้งานให้กับถุงปลูก จากการศึกษาพบว่าปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อีพอกไซด์บนโซ่พอลิไอโซพรีนที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถเตรียมยางผงได้ง่ายขึ้น แต่อย่างมีความแข็งแรงมากขึ้นเช่นกันเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโซ่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า T_g ของยางเพิ่มขึ้น HENR ที่มีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่มากเกินไปจะช่วยให้การเป่าฟิล์ม PLA ย่างขึ้นเท่านั้น แต่ไม่ได้ช่วยเรื่องการยืดตัวของฟิล์ม ในขณะที่ HENR2 และ HENR3 ซึ่งมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่น้อยกว่า และมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มากกว่าพบว่ามีความยืดหยุ่นมากกว่า ผงที่ได้หลังสิ้นสุดปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า แต่การผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมพบว่าสามารถช่วยเพิ่มค่าการยืดตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ดี

2. สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA:HENR ที่ลดขนาด HENR ด้วย Ball mill และลดขนาดด้วย ใบมีด

จากที่กล่าวไปในหัวข้อ 1. ยาง HENR2 และ HENR3 มีขนาดที่หลากหลาย* เพื่อการควบคุมขนาดผู้วิจัยจึงเลือกใช้เครื่องมือ 2 รูปแบบในการลดขนาด และร่อนคัดขนาดด้วย sieve ที่กำหนด จากผลการทดลองพบว่ายางที่ลดขนาดด้วย ball mill มีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากกว่า แต่วิธีนี้ใช้เวลานาน (2 วัน/500 กรัม) ในขณะที่การลดขนาดด้วยเครื่องปั่นหรือการใช้ใบมีด ยางที่ได้มีขนาดที่หลากหลายกว่า แต่วิธีนี้ใช้เวลาที่สั้นกว่าค่อนข้างมาก (20 นาที/500 กรัม) ผลการนำ HENR ไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมพบว่า HENR ที่เตรียมโดยการลดขนาดด้วยใบมีดให้สมบัติในด้านต่างๆ ดีกว่าการลดขนาดด้วย ball mill เล็กน้อย โดยพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีความนิ่มมากกว่า ขึ้นรูปง่ายขึ้น มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มากกว่า แต่มีค่าความต้านทานแรงดึง ค่ามอดุลัส สันฐานวิทยา การการปริแตกของถุงหลังการใช้งานใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้ผลการทดลองในส่วนนี้ยังพบว่า HENR2 และ HENR3 สามารถช่วยให้ถุงปลูกสามารถคงสภาพถุงได้ตลอดการทดลองปลูกเบื้องต้นนาน 4 เดือน (มีการบรรจุวัสดุปลูก และรดน้ำปุ๋ย แต่ไม่มีการปลูกจริง) แม้จะเกิดการปริแตกของถุงเกิดขึ้น ในขณะที่ถุงที่เตรียมจาก PLA เพียงอย่างเดียว ถุงเกิดการปริแตก มีการหลุดออกเป็นชิ้นขนาดเล็ก ไม่สามารถคงสภาพถุงได้หลังการใช้งานเพียง 1 เดือน ซึ่งการปริแตกของถุงส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณที่มีการกดทับ และการซังของน้ำปุ๋ย ซึ่งอาจเกิดจากสมบัติด้านการยืดตัวของถุงที่ลดลงอย่างทันทีทันใดหลังการใช้งานเนื่องจากน้ำปุ๋ยทำลายอันตรกิริยา (H-bonding) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ HENR กับหมู่คาร์บอนิลของ PLA

* ยาง HENR2 และ HENR3 หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้เป็นผงขนาดเล็กใกล้เคียงกัน แต่ในขั้นตอนการทำให้ยางแห้ง หากวางยางใกล้กันขณะเป่าลมก่อนทำให้แห้ง ยางมีโอกาสรวมตัวและใหญ่ขึ้น ทำให้ยางผงที่ได้มีขนาดที่หลากหลาย แต่หลังจากทำให้ผิวแห้งด้วยไมโครเวฟแล้ว ยางจะไม่กลับมารวมตัวกันอีก ในขณะที่ HENR1 จะไม่เกิดปัญหานี้

3. การทดสอบการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ และการทดสอบการย่อยสลายเบื้องต้น

เนื่องจากการใช้ HENR เพียงอย่างเดียวยังคงเกิดการปริแตก และมีปัญหาเรื่องการยึดตัวของฟิล์มหลังการใช้งาน ผู้วิจัยจึงได้เติมสารตัวเติมโดยในขั้นต้นผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานว่าหากลดการขาดของโซ่ของ PLA ขณะกระบวนการผลิตได้ ถุงที่ได้น่าจะเกิดการปริแตกน้อยลง สารเคมีที่ใช้ในช่วงที่ 1 จึงเน้นเพิ่มเสถียรภาพของ PLA ระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีการผสม PBAT ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์ที่มีค่า T_g ต่ำร่วมกับ PLA/HENR โดยคาดหวังว่าจะช่วยเรื่องการยึดตัวของฟิล์มขณะใช้งานได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสารเคมีที่เลือกใช้ช่วยให้ถุงมีความแข็งแรงมากขึ้น การลดลงของอันตรกิริยาระหว่าง HENR กับ PLA ช้าลง ทำให้ถุงยังคงยึดตัวได้บ้าง แต่มีค่าลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถุงทุกสูตรยังคงเกิดการปริแตก (แม้ว่าการปริแตกที่เกิดขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิต และคุณภาพของมะเขือเทศที่ได้รับเมื่อเทียบกับถุงปลูก PE)

การทดลองช่วงที่ 2 จึงได้เพิ่มสารเติมแต่ง (Talc, TiO_2 , Irgarox และ Bio100) พบว่าการเติมสารเคมีในกลุ่มของการลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเอสเตอร์ (Bio100) ถุงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น ถุงที่มีเฉพาะ HENR จะเกิดการปริแตกช้าลง ในขณะที่ถุงที่ผสมร่วมกันระหว่าง PLA/HENR/PBAT ไม่เกิดการปริแตกตลอดระยะเวลาการทดสอบปลูกมะเขือเทศ (5 เดือน)

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเพิ่มเติมในสูตร PLA ที่มีการเติมสารเติมแต่ง และสูตร PLA/PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง พบว่าทั้ง 2 สูตรยังคงพบการปริแตกของถุง และการลดลงของค่าการยึดตัวออกของถุง จึงอาจจะกล่าวได้ว่า HENR มีส่วนสำคัญในการเพิ่มอายุการใช้งาน และป้องกันการแตกของถุงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และรักษาสสมบัติด้านการยึดตัวของ PBAT ในถุงทดสอบได้ตลอดระยะเวลาของการใช้งานจริง

ศึกษาการย่อยสลายเบื้องต้นของถุงปลูก พบว่าถุงที่มีพอลิเมอร์ผสมร่วมกัน 3 ชนิดคือ PLA/HENR/PBAT จะเกิดการย่อยได้เร็วที่สุด เมื่อทำการทดสอบการย่อยสลายที่อุณหภูมิ $37^{\circ}C$ ในขณะที่อุณหภูมิสูง ($58^{\circ}C$) ผลที่ได้ยังไม่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการตายของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอัตราเร็วในการย่อยสลายจากผลการทดลองผู้วิจัยคาดว่าถุงปลูกที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถย่อยสลายได้หมด** ภายในระยะเวลา 3-5 ปี เมื่อทำการฝังกลบ/ย่อยสลายที่อุณหภูมิ $37^{\circ}C$ และใช้เวลาประมาณ 1-2 ปี เมื่อใช้อุณหภูมิ $58^{\circ}C$

** ทั้งนี้จากการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าในสภาวะการทดสอบการย่อยสลายเดียวกัน ยาง HENR สามารถเกิดการย่อยสลายได้เช่นกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าถุงปลูกที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบหลักที่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด ทั้ง PLA HENR และ PBAT

สรุปผลการวิจัย

ถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA/HENR/PBAT ผสมสารเติมแต่ง ให้ถุงปลูกที่ไม่ปริแตก และมีสมบัติเชิงกลที่ดีคงที่ตลอดการใช้งานนาน 5 เดือน เช่นเดียวกับถุงปลูกที่เตรียมจากพอลิเอทิลีน โดยมีสมบัติเชิงกลค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสของยัง สูงกว่าฟิล์มที่เตรียมจากพอลิเอทิลีน แต่มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ต่ำกว่า ให้ผลผลิตมะเขือเทศจากการทดลองปลูกที่ไม่ต่างกัน แต่ถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA/PBAT/HENR สามารถย่อยสลายได้ ในขณะที่ถุงปลูกที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนไม่สามารถย่อยสลายได้

ตาราง 1 ค่าการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (PLA/PBAT/HENR) และฟิล์มพอลิเอทิลีนก่อนและหลังการใช้งาน 3 เดือน

Sample	Tensile strength	ระยะเวลาใช้งาน (เดือน)				
		0	0.5	1	2	3
PLA/H2/ PBAT-20(2)	TS, TD (MPa)	36.69 ± 2.96	45.97 ± 3.19	40.78 ± 3.12	36.34 ± 2.54	33.46 ± 2.45
	TS, MD (MPa)	35.99 ± 1.61	40.82 ± 1.83	39.34 ± 2.03	36.72 ± 5.23	34.86 ± 4.85
PE	TS, TD (MPa)	12.07 ± 0.89	12.96 ± 1.52	12.67 ± 1.81	14.05 ± 1.47	12.52 ± 1.18
	TS, MD (MPa)	12.76 ± 0.68	11.83 ± 1.51	11.39 ± 1.56	12.64 ± 1.63	10.40 ± 1.27

ตาราง 2 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (PLA/PBAT/HENR) และฟิล์มพอลิเอทิลีนก่อนและหลังการใช้งาน 3 เดือน

Sample	Elongation at break	ระยะเวลาใช้งาน (เดือน)				
		0	0.5	1	2	3
PLA/H2/ PBAT-20(2)	Eb, TD (%)	214.88 ± 16.64	206.25 ± 36.07	246.00 ± 12.62	245.50 ± 12.93	240.25 ± 28.25
	Eb, MD (%)	240.43 ± 13.60	219.71 ± 30.02	213.71 ± 19.02	180.14 ± 16.75	171.43 ± 28.93
PE	Eb, TD (%)	473.50 ± 42.79	502.38 ± 44.44	489.80 ± 58.26	471.40 ± 38.09	485.70 ± 51.51
	Eb, MD (%)	463.50 ± 37.37	395.50 ± 59.04	388.29 ± 69.32	461.80 ± 57.06	293.43 ± 60.55

ตาราง 3 ค่ามอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (PLA/PBAT/HENR) และฟิล์มพอลิเอทิลีนก่อนและหลังการใช้งาน 3 เดือน

Sample		ระยะเวลาใช้งาน (เดือน)				
		0	0.5	1	2	3
PLA/H2/ PBAT-20(2)	Modulus, TD	1931 ± 62	1537 ± 97	1953 ± 104	1672 ± 63	1932 ± 107
	Modulus, MD	1962 ± 98	1489 ± 43	1366 ± 73	2105 ± 93	2001 ± 112
PE	Modulus, TD	201 ± 21	213 ± 5	213 ± 9	241 ± 17	237 ± 21
	Modulus, MD	221 ± 17	234 ± 14	221 ± 12	226 ± 28	230 ± 15

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมยางธรรมชาติดัดแปรผงบและใช้เป็นสารเพิ่มอายุการใช้งาน และเพิ่มการยึดตัวของฟิล์มพอลิแล็กติก แอซิด (PLA) โดย PLA และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ไฮดรอกซิล (HENR) ถูกผสมในสถานะหลอมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นจึงทำการเป่าโดยเครื่องเป่าฟิล์ม ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของ HENR และการเติมสารตัวเติมต่อโครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติทางความร้อน และสมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/HENR พบว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระ และสังเกตเห็นการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กในเมทริกซ์ของ PLA ที่ไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตามหลังจากเป่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม ซึ่งอนุภาคนี้น่าจะมีขนาดเล็กกว่าขนาดของยางผงบเริ่มต้น ซึ่งการรวมกันระหว่าง HENR ที่เข้ากันได้กับ PLA และอนุภาค HENR ที่เหลืออยู่ส่งผลส่งเสริมกันในการเพิ่มการยึดตัวของฟิล์ม PLA ในขณะที่สมบัติการทนต่อแรงดึงพบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.8% เป็น 60-230% และค่าการทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงจาก 59 MPa เป็น 32-40 MPa หลังจากผสม 15-20% โดยน้ำหนักของ HENR ซึ่งค่าที่แน่นอนขึ้นกับชนิดและปริมาณของ HENR ที่ใช้ นอกจากนี้ยังพบการปรากฏค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) 2 ค่า และมีค่าต่ำกว่าค่า T_g ของ PLA บริสุทธิ์ จึงอาจกล่าวได้ว่า HENR ในพอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้บางส่วน และเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์ม PLA ได้ การเติมสารตัวเติมเสริมแรง (เคลย์) และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Ti_2O และ Irgarox) ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/HENR มีสมบัติการทนต่อแรงดึงลดลง ในขณะที่การผสมร่วมกับ PBAT (PLA/HENR/PBAT) พบว่าช่วยเพิ่มค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เป็น 215-240% และเมื่อนำไปทดสอบใช้งานพบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/HENR มีค่าลดลงจาก 45-114% เหลือน้อยกว่า 10% เมื่อผ่านการใช้งานนาน 3 เดือน ในขณะที่สูตร PLA/HENR/PBAT ยังคงมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดระหว่าง 170-240% หลังการใช้งานนาน 3 เดือน จึงอาจสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของ PLA : HENR : PBAT ในการเตรียมเป็นถุงปลูกทางการเกษตรคือ 60 : 20 : 20 %โดยน้ำหนัก

ABSTRACT

In this work, modified natural rubber powder was prepared and used to increase the durability and the elongation of poly(lactic acid) (PLA) film. PLA and hydroxyl epoxidized natural rubber (HENR) was blended via a melt mixing process using twin screw extruder and film blowing machine. The influences of types and amounts of HENR and the addition of additives on the microstructure, thermal and tensile properties have been investigated. The morphology of PLA/HENR blend showed coarse surface with obvious particles of HENR dispersed in the PLA matrix. After blowing, the dispersion of small particles of HENR in the substrate was seen. The size of the remaining HENR particles was smaller than that of the starting powder. The compatibility of HENR and the remaining rubber particles may synergistically contribute to the improvement of the elongation at break of PLA films. The tensile strength, elongation at break of PLA film increased from 2.8% to 60-230% while the tensile strength decrease from 59 MPa to 32-40 MPa after blending with 15-20% by wt. of HENR. On the other hand, all blends exhibited 2 glass transition temperatures with lower values than that of pure PLA films. It can be concluded that the blend is partially compatible and may help the flexibility of PLA films. The addition of reinforcing additive (clay) and heat stabilizer (Ti_2O and Irgarox) reduced the tensile properties of the PLA/HENR blend films. In addition, blending with PBAT (PLA/HENR/PBAT) enhance the elongation at break to 215-240%. During field aging, the elongation of PLA/HENR blend film was decreased from 45-114% to less than 10% after 3 months of usage except the PLA/HENR/PBAT formulation that retained 170-240% elongation at break after 3 months. It was concluded that the suitable ratio of PLA, HENR and PBAT in preparation of agricultural planting bag is 60, 20 and 20% by weight.

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร	
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียม PLA ผสม	3
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	7
3.2 วัสดุอุปกรณ์	7
3.3 การเตรียมยางธรรมชาติดัดแปร	8
3.4 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับใช้เป็นถุงปลูก	8
3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์	8
3.4.2 การเป่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	10
3.4.3 การเตรียมถุงปลูก และการจำลองสภาวะการใช้งานถุงปลูกขั้นต้น	10
3.4.4 การเตรียมถุงปลูก และการทดสอบการใช้งานเป็นถุงปลูก มะเขือเทศที่โครงการหลวง	11
3.4.5 การทดสอบการย่อยสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้น	12
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของ สารตั้งต้น เม็ดพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	12
3.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-IR Spectroscopy	12
3.5.2 การตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องสเทอริโอ	13
3.5.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดพอลิเมอร์ผสมและฟิล์ม พอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค SEM	13
3.5.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและฟิล์ม พอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค DSC	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.5 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ด้วยเทคนิค TGA	14
3.5.6 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถุงปลูก	14
3.5.7 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile properties)	14
 บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การเตรียมและการวิเคราะห์ยางดัดแปรอีพอกซีไดไฮดรอกซีล	15
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของ ยางธรรมชาติดัดแปร	15
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิแลคติก แอซิด และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	18
4.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA:HENR ที่ลดขนาด HENR ด้วย Ball mill	19
4.2.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนใช้งาน ด้วยสายตา	19
4.2.2 การศึกษาพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องสเตอริโอ	22
4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ด้วยเทคนิค SEM	29
4.2.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วย เทคนิค DSC	33
4.2.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม และ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค TGA	35
4.2.6 น้ำหนักของถุงหลังการทดสอบการใช้งานเบื้องต้น	36
4.2.7 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์	37
4.3 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA:HENR ที่ลดขนาด HENR ด้วย <u>ใบมีด</u>	43
4.3.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และลักษณะพื้นผิว ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ก่อนและหลังใช้การงานเป็นเวลาต่างๆ กัน	43
4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วย เทคนิค SEM	48
4.3.3 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์	48
4.4 ศึกษาการทดสอบการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ และการ ทดสอบการย่อยสลายเบื้องต้น	53
4.4.1 ผลการทดสอบถุงปลูกชุดที่ 1	54
4.4.2 ผลการทดสอบถุงปลูกชุดที่ 2	61
4.4.3 การทดสอบการย่อยสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้น	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป	69
5.1 บทสรุปงานวิจัย	69
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ ชุดที่ 1	
ภาคผนวก ข DSC โครมาโตแกรม	
ภาคผนวก ค ร่างบทความวิจัยสำหรับส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ	
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในแต่ละปีมีการใช้ถุงดำในการเพาะปลูกพืชเป็นจำนวนมาก ไม่ต่ำกว่า 30 ล้านใบต่อปี ซึ่งถุงดังกล่าวหลังจากการใช้งานก็จะกลายเป็นขยะพลาสติกจำนวนมากที่ย่อยสลายได้ยาก พอลิเมอร์ชีวภาพเช่นพอลิแลคติกแอซิด (PLA) จึงได้รับความสนใจจากหลายภาคส่วนในการนำมาพัฒนาใช้ทดแทนถุงปลูกที่ใช้วัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจาก PLA ผลิตจากพืชที่สามารถปลูกทดแทนได้ มีสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถย่อยสลายได้หลังการใช้งาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA ที่ค่อนข้างสูง (ประมาณ 57 – 60 °C) ทำให้ในสภาวะการใช้งานจริง PLA แสดงสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state) ส่งผลให้ PLA ทนต่อแรงดึงได้ดี แต่มีการยืดตัวออกได้น้อย เนื่องจากโมเลกุลของสายโซ่พอลิเอสเทอร์ไม่สามารถขยับได้ ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานเป็นถุงปลูกที่ต้องมีการรับแรงกดอัดของดิน ทั้งยังมีผลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศ และปัจจัยอื่นๆ ระหว่างการใช้งาน ทำให้ถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA อาจเกิดการปริแตกออกของถุง ก่อนครบกำหนดเวลาของการปลูกกล้าไม้ การผสมสารตัวเติมลงไปพัฒนาสมบัติด้านการยืดตัวของถุง PLA เป็นแนวทางหนึ่งที่นักวิจัยหลายท่านนิยมพัฒนา

อีลาสโตเมอร์ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการเพิ่มความเหนียวให้กับพลาสติก โดยเพิ่มการดูดซับพลังงานที่จะทำให้พอลิเมอร์ที่มีความเปราะแตกหักได้ไว ส่งผลให้พอลิเมอร์นั้นๆ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น อีลาสโตเมอร์ที่ใช้ในการเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีหลากหลาย ทั้งอีลาสโตเมอร์ที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่นพอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ และอีลาสโตเมอร์ที่จากธรรมชาติ เช่นยางธรรมชาติ (NR) ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ (ENR) เป็นต้น ซึ่งหากพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ อีลาสโตเมอร์ที่มาจากธรรมชาติก็จะได้รับการยอมรับมากกว่าอีลาสโตเมอร์ที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามปัญหาของอีลาสโตเมอร์ที่มาจากธรรมชาติ เช่น NR หรือ ENR คือสมบัติด้านการติดกันเองสูง (Tack) ทำให้ผสมร่วมกับ PLA ได้ยาก โดยเครื่องอัดรีด (Extrusion) ทำให้ยากต่อการเตรียมเม็ดคอมพาวนด์ และการผลิตในปริมาณมาก งานวิจัยครั้งนี้จะใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ไฮดรอกซิล (HENR) ซึ่งได้มาจากการเปิดวงอีพ็อกไซด์ ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อีพ็อกไซด์จำนวนมากบนโครงสร้างของยาง ซึ่งยาง HENR มีลักษณะเป็นผง จึงง่ายต่อการผสมร่วมกับ PLA นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ X. Shi และคณะ (2014) ซึ่งได้ศึกษาผลของสารพอลิออลต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนไวโนลอะซิเตตที่เสริมแรงด้วยซิลิกา/พอลิแลคติกแอซิด (EVM/PLA, 80:20 wt%) ภายใต้การรับแรงกดแบบไดนามิกส์ (Damping) โดยพอลิออลที่ใช้เป็นพอลิออลแบบกึ่ง มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวน 6 หมู่ มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) 22.1 °C จากผลการทดลองพบว่าพอลิออลช่วยให้ EVM เข้ากับ PLA ได้ดีขึ้น โดยพอลิออลสามารถฟอร์มพันธะไฮโดรเจนร่วมกับหมู่เอสเทอร์ของ PLA ได้ โดยการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA (ประมาณ 57 – 60 °C) ภายใต้แรงกระทำแบบไดนามิกส์ พันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิออลและ PLA สามารถเกิดการเคลื่อนที่ออกจากกัน เกิดการแตกพันธะ และเกิดการฟอร์มพันธะใหม่ได้ (move-break-reconstruction of intermolecular hydrogen bonds) ส่งผลให้มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ลดลง และค่า $\tan\delta$ เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิออลที่เพิ่มขึ้น (10 – 30 phr) [1] ซึ่งงานวิจัยที่เสนอขอทุนในครั้งนี้ใช้ยาง HENR ซึ่งยางดังกล่าวมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากในโครงสร้าง จึงคาดหวังว่าจะเกิดการฟอร์มพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ HENR กับหมู่คาร์บอนิลของ PLA ได้ จึงน่าจะส่งผลให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ทั้งการรับแรง และการ

ยึดตัวออกของฟิล์ม ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของงานวิจัยครั้งนี้ที่ต้องการถุงปลูก ที่สามารถรับแรงกดจากดิน หรือสภาวะในการปลูกได้ดีขึ้นกว่าการใช้เพียง PLA บริสุทธิ์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อให้ได้ถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA ที่คงสภาพอยู่ได้ไม่น้อยกว่า 5 เดือน* และสามารถย่อยสลายได้หลังการใช้งาน โดยมียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ

* ข้อเสนอโครงการระบุว่าไม่น้อยกว่า 6 เดือน แต่ได้ขอปรับเปลี่ยนตามคำแนะนำของโครงการหลวงที่ให้ข้อมูลว่าการทำงานเป็นถุงปลูกสำหรับปลูกมะเขือเทศจะใช้เวลาประมาณ 3-5 เดือน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมยางธรรมชาติอีพอกซีไดไฮดรอกซิล (HENR) ชนิดผง
2. เตรียมเม็ดพลาสติกคอมพาวด์ระหว่าง PLA:HENR โดยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่
3. เป่าถุงพลาสติกด้วยเครื่อง Blow film
4. ทดสอบสมบัติทางเคมี สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile property) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้
5. ทดสอบการใช้งานเป็นถุงปลูกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เทียบกับถุงพลาสติกที่เตรียมจาก PLA บริสุทธิ์ และถุงปลูกที่เตรียมจากพอลิเอทิลีน*
 - 5.1 ทดสอบการใช้งานเป็นถุงปลูกขั้นต้น เป็นเวลา 15 วัน 1, 2, 3 และ 4 เดือน ศึกษาพื้นผิวของฟิล์ม และสมบัติเชิงกลและสมบัติทางสันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเปรียบเทียบกับถุงที่เตรียมจาก PLA บริสุทธิ์ และถุงพอลิเอทิลีน
 - 5.2 เลือกสูตรที่เหมาะสมนำไปศึกษาการใช้งานจริงโดยการทดลองปลูกมะเขือเทศ ณ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่สาใหม่ ต.โป่งแยง อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่
 - 5.3 ทดสอบการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่สนใจตามมาตรฐานการย่อยสลาย (Compostable test)
6. สรุปผลและจัดทำรายงานการวิจัย

หมายเหตุ * - ข้อเสนอโครงการเสนอถุงดำ แต่ได้ขอปรับเปลี่ยนตามคำแนะนำของโครงการหลวงที่ให้ข้อมูลว่าการทำงานเป็นถุงปลูกในปัจจุบันของโครงการหลวงคือถุงปลูกที่เตรียมจากพอลิเอทิลีน
- ถุงปลูกที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนจะศึกษาเปรียบเทียบเฉพาะสมบัติการทนแรงดึง และการปริแตกของถุงเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ถุงปลูกที่สามารถใช้งานได้จริงจากพอลิเมอร์ชีวภาพ (PLA) โดยมียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ
2. เพิ่มแนวทางการใช้ประโยชน์ของยางธรรมชาติในการเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น และสารลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเมอร์ชีวภาพกลุ่มพอลิเอสเทอร์

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียม PLA ผสม

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของยางธรรมชาติดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแลกติกแอซิด เพื่อเป็นแนวทางพัฒนาข้อจำกัดในด้านความแข็งแรงของ PLA เพื่อให้ PLA สามารถใช้งานเป็นถุงปลูกได้ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสม PLA ร่วมกับยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติดัดแปร และสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้

ปี ค.ศ. 2011 C. Zhang และคณะ [2] ได้ศึกษาผลของการนวดยางที่เวลาต่างๆ กัน (0, 5 และ 10 นาที) ด้วยเครื่องบดผสมภายใน ที่อุณหภูมิ 145°C ต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA โดยงานวิจัยนี้ได้ผสม PLA กับยางที่ผ่านการนวดในเวลาต่างๆ กัน (ในอัตราส่วนผสมของ NR 0, 1, 3, 5 และ 10 wt%) ด้วยเครื่องบดผสมภายใน ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 10 นาที นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปสำหรับทดสอบการทนต่อแรงดึง และการทนต่อแรงกระแทก จากผลการทดลองพบว่าการผสม PLA ร่วมกับ NR ที่ผ่านแรงเฉือนเป็นเวลา 10 นาที ในอัตราส่วน 3 wt% ช่วยให้ PLA มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด คือ 196% ในขณะที่ PLA ผสมร่วมกับ NR ที่ผ่านแรงเฉือนเป็นเวลา 10 นาที ในอัตราส่วน 10 wt% ให้ค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงสุด คือ 6.0 kJ/m² ทั้งนี้ความสามารถในการเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA ของยางธรรมชาติ น่าจะเกิดจากความร้อนและแรงเฉือนในขั้นตอนการนวดยาง ส่งผลทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ทั้งยังเกิดหมู่ฟังก์ชันซึ่งเกิดจากการขาดของโซ่พอลิไอโซพรีนเพิ่มขึ้น (หมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิล) ซึ่งหมู่ดังกล่าวน่าจะสามารถเกิดอันตรกิริยาร่วมกับหมู่เอสเทอร์ของ PLA ได้ จึงส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ของ PLA และยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานผสมสามารถแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นซึ่งเกิดจากส่วนของ NR ได้เพิ่มขึ้น

ปี ค.ศ. 2013 K. Pongtanayut และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาผลของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ต่อฐานฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/NR และ PLA/ENR โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสม ในอัตราส่วน 90:10 80:20 และ 70:30 โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) จากนั้นนำมาทำการอัดขึ้นรูป (Compression moulding) ศึกษาฐานฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่าในสูตร PLA/NR ยางธรรมชาติมีลักษณะการกระจายตัวเป็นหยด (Droplet) โดยขนาดของหยดจะใหญ่ตามอัตราส่วนของยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์การรวมตัวของยาง (Coalescence phenomena) ในขณะที่สูตรของ PLA/ENR ไม่พบปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยพบว่า PLA และ ENR สามารถเข้ากันได้ดี โดยปรากฏเฟสเพียงเฟสเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในโครงสร้างของ ENR มีขั้วมากกว่า NR จึงสามารถเข้ากับ PLA ได้ดีกว่า ทดสอบพฤติกรรมการเกิดผลึกพบว่า NR และ ENR สามารถเป็นตัวเหนียวนำกระตุ้นให้ PLA สามารถเกิดผลึกได้ ซึ่ง NR สามารถเป็นตัวเหนียวนำให้เกิดผลึกได้ดีกว่า ENR ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) พบว่าพอลิเมอร์ผสมจะมีอุณหภูมิในการสลายที่ต่ำกว่าสารบริสุทธิ์ประมาณ 30°C ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในกระบวนการผสมโดยใช้เครื่องแบบผสมแบบปิดมีแรงเฉือน ซึ่งอาจจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA เกิดการขาด ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น ทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามอัตราส่วนของยางที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ในขณะที่ค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ PLA/NR ที่อัตราส่วน 90:10 มีค่าร้อยละการยืดสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ถึง 4 เท่า และมีค่า Young's Modulus ในทิศทางเดียวกับค่าความทนต่อแรงดึง

ปี ค.ศ. 2013 C. Zhang และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาผลทางความร้อน สมบัติเชิงกล และพฤติกรรม การไหลของ PLA ที่เพิ่มความเหนียวด้วย ENR โดยใช้ ENR ที่มีปริมาณอีพอกไซด์ต่างกัน 2 ค่า คือ 20% และ 50% epoxide content โดยใช้อัตราส่วนในการผสมของ ENR ตั้งแต่ 1 – 20% ด้วยเครื่องบดผสมภายใน (Haake internal mixer) จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปศึกษาพฤติกรรมต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า PLA/ENR50 ใช้พลังงานในการผสม (Torque) สูงกว่า PLA/ENR20 ซึ่งผู้วิจัยกล่าวว่าหมู่อีพอกไซด์ที่มากกว่า สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของ PLA ได้มากกว่า โดยพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นทำให้ต้องใช้ พลังงานในการผสมที่สูงกว่า ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าการเติม ENR ทั้ง 20% และ 50% epoxide content เพียง 5% ให้พื้นผิวพอลิเมอร์ที่เรียบเนียน ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ (Compatible) ของ PLA และ ENR ซึ่งผลที่ได้ไม่เหมือนกับงานวิจัยของ R. Jaratrotkamjorn ซึ่งอาจเกิดจากการใช้สารตั้งต้น และเทคนิคในการผสมที่แตกต่างกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณ ENR เป็น 20% พบว่า ENR50 แสดงความเข้ากันได้ กับ PLA มากกว่า ENR20 ซึ่งอาจเกิดจากหมู่อีพอกไซด์ที่มากกว่าเหนียวทำให้เกิดอันตรกิริยา และการเกี่ยวพัน กัน (Entanglement) กับ PLA ที่มากกว่า ในส่วนของสมบัติทางความร้อน พบว่า ENR20 ส่งผลให้พอลิเมอร์ ผสมเกิดการสลายตัวเร็วกว่า PLA และ PLA/ENR50 ประมาณ 10°C และการเติม ENR ทั้ง 2 ชนิดในปริมาณ ต่างๆ กัน ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA และ ENR มีส่วนในการ ชัดขวางการเกิดผลึกของ PLA เนื่องจากอันตรกิริยาของ ENR กับ PLA ที่เกิดขึ้น ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง พบว่าค่าความทนต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสของยังลดลงตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการยืดตัวออก ณ จุด ขาด เพิ่มขึ้น โดยการเติม ENR ในปริมาณที่ต่ำกว่า 10% ENR 20 แสดงสมบัติการทนต่อแรงดึง และการยืดตัว ออกดีกว่าการใช้ ENR50 หากแต่เมื่อเพิ่มปริมาณยางเป็น 20% กลับพบว่าการใช้ ENR 50 ให้ค่าการทนต่อแรง ดึงที่สูงกว่าการใช้ ENR 20 ถึงประมาณ 10 MPa ในขณะที่ค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาดของการใช้ ENR20 และ ENR50 มีค่า 32% และ 27% ตามลำดับ

ปี 2013 K. Y. Huang และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาผลของยางธรรมชาติ (NR) ผลต่อการย่อย สลายของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ด้วยน้ำ (hydrolysis degradation) โดยดูการเปลี่ยนแปลงของสัณฐาน วิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/NR โดยทำการศึกษา PLA ที่ทำ การผสมกับ NR ในอัตราส่วน 100:0 99:1 97:3 และ 95:5 โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมในเครื่องบดผสมภายใน (haake internal mixer) ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องกดอัด (compression molding) ทดสอบความมีขั้ว ของพื้นผิวแผ่นฟิล์มด้วยเครื่อง contact angle พบว่าปริมาณ NR ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความมีขั้วของผิว แผ่นฟิล์มลดลง ทดสอบการดูดซับน้ำ (water absorption) แผ่นฟิล์ม พบว่าน้ำเข้าไปภายในชิ้นงานมากขึ้น ตามปริมาณ NR ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะชิ้นงานมีความไม่เข้าของ PLA กับ NR (phase separation) ก่อให้เกิดรู ขนาดเล็กในชิ้นงาน (microvoid) ส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำได้มากขึ้น ทดสอบการย่อยสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ของแผ่นฟิล์ม โดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่าชิ้นงานเกิดพื้นผิวที่ขรุขระ และเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานมากขึ้นตามเวลาในการแช่ที่มากขึ้น และจะเกิดการหายไปของน้ำหนักของ ชิ้นงานเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ที่มากกว่า 25 วัน โดยที่ NR จะไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของชิ้นงานแต่จะส่งผล ต่อการเกิดผลึก โดย NR ทำให้ PLA การเกิดผลึกยากขึ้น

ปี ค.ศ. 2014 C. Xu [6] และคณะศึกษาการผสม PLA ร่วมกับ NR โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด ที่ อุณหภูมิ 150°C โดยปรับอัตราส่วน NR ตั้งแต่ 0 – 40 phr จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีด (Injection molding) จากผลการทดลองพบว่าค่าการทนต่อแรงดกกระทบ (Izod impact strength) และค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Eb) เพิ่มขึ้นตามปริมาณ NR ที่เพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานสามารถยืดตัวออกได้ถึง 70% เมื่อใช้ NR ใน อัตราส่วน 40 phr โดยในอัตราส่วน PLA:NR = 65:35 เมื่อนำชิ้นงานไปสกัดเฟสของ PLA ออกโดยใช้ไดคลอโร

มีเทน พบว่าได้โครงสร้างของ NR แบบร่างแห ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวน่าจะมีส่วนสำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์สมยัตตัวออกได้ดี อย่างไรก็ตามค่าการทนต่อแรงดึง (TS) และค่าความแข็งของชิ้นงานพบว่าลดลงตามปริมาณ NR ที่เพิ่มขึ้น โดยค่า TS มีค่าลดลงจากประมาณ 60 MPa เหลือเพียงประมาณ 15 MPa เมื่อเติม NR 40 phr ซึ่งค่า TS ที่ลดลงดังกล่าวน่าจะเป็นผลจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของ PLA และ NR ส่งผลให้ชิ้นงานทนต่อแรงกระทำได้น้อยลง

ปี ค.ศ. 2014 X. Shi และคณะ [1] ได้ศึกษาผลของสารพอลิออลต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตดที่เสริมแรงด้วยซิลิกา/พอลิแล็กติก แอซิด (EVM/PLA, 80:20 wt%) ภายใต้การรับแรงกดแบบไดนามิกส์ (Damping) โดยพอลิออลที่ใช้เป็นพอลิออลแบบกึ่ง มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวน 6 หมู่ มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) 22.1°C จากผลการทดลองพบว่าพอลิออลช่วยให้ EVM เข้ากับ PLA ได้ดีขึ้น โดยพอลิออลสามารถพอร์มพันธะไฮโดรเจนร่วมกับหมู่เอสเทอร์ของ PLA ได้ โดยการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA (ประมาณ $57-60^{\circ}\text{C}$) ภายใต้แรงกระทำแบบไดนามิกส์ พันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิออลและ PLA สามารถเกิดการเคลื่อนที่ออกจากกัน เกิดการแตกพันธะ และเกิดการพอร์มพันธะใหม่ได้ (move-break-reconstruction of intermolecular hydrogen bonds) ส่งผลให้มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ลดลง และค่า $\tan \delta$ เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิออลที่เพิ่มขึ้น (10–30 phr)

ปี ค.ศ. 2013 Y.X. Weng และคณะ [7] และคณะได้ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีน อะดิเพต-โค-เทเรฟเทเรท (PBAT), PLA และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT/PLA (อัตราส่วน 40:60) ซึ่งเตรียมโดยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ทั้ง 3 สูตรโดยการ casting ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม (ขนาด $5 \times 10 \text{ cm}^2$) ก่อนและหลังการฝังดิน พบว่าสูตรที่มีเฉพาะ PBAT ฟิล์มมีการเปลี่ยนสี เป็นสีขาวทึบแสงมากขึ้น เมื่อฝังชิ้นงานเป็นเวลา 1 เดือน ฟิล์มเริ่มเกิดการฉีกขาดเมื่อผ่านไป 2 เดือน และฟิล์มสามารถย่อยสลายได้ดี โดยเหลือชิ้นส่วนอยู่เพียงเล็กน้อยเมื่อฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน และฟิล์มที่เตรียมจาก PLA เพียงอย่างเดียว ฟิล์มเริ่มเกิดการฉีกขาดเมื่อฝังดินไปเพียง 1 เดือน และสามารถย่อยสลายได้ดีโดยเหลือชิ้นส่วนอยู่เพียงเล็กน้อยเมื่อฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน เช่นเดียวกับฟิล์มที่เตรียมจาก PBAT ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพบว่าฟิล์มเริ่มเปลี่ยนสภาพจากยืดหยุ่นได้ดีเป็นเปราะเมื่อฝังดินไว้ 3 เดือน และเริ่มเห็นการฉีกขาดเมื่อเวลาผ่านไป 4 เดือน ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มก่อนและหลังการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากเฉพาะ PLA และ PBAT หลังการฝังดินพื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น และพบรอยแตกขนาดใหญ่อยู่บนพื้นผิวฟิล์ม ในขณะที่พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแม้ว่าจะมีความขรุขระมากขึ้น แต่ยังไม่พบรอยแตกที่พื้นผิวของฟิล์ม ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าฟิล์มทั้ง 3 สูตรมีการเปลี่ยนแปลงจากก่อนฝังดินไม่มากนัก เช่น พบการเปลี่ยนตำแหน่งของ C-O stretching จากตำแหน่ง 1750 cm^{-1} เป็น 1748 cm^{-1} และการเปลี่ยนตำแหน่งของ CH_3 asymmetric bending จากตำแหน่ง 1457 cm^{-1} เป็น 1455 cm^{-1} ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวผู้วิจัยกล่าวว่าจะเกิดจากการย่อยสลาย (degradation) ของสายโซ่พอลิเอสเทอร์เกิดขึ้น

ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน (DSC) ของฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 3 สูตร หลังการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากฟิล์มเริ่มต้นมากนัก ยกเว้นฟิล์มที่เตรียมจาก PBAT ที่พบว่ามีค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) มีค่าลดลง จาก 80°C เป็น 73°C และค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 120°C เป็น 124°C ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA และพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกันทั้งก่อนและหลังฝังดิน โดยฟิล์มที่เตรียมจาก PLA ยังคงมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (T_g) ที่ 60°C และค่า T_m ที่ 153°C และฟิล์มที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมมีค่า T_g ที่ 60°C มีค่า T_c ที่ 78°C ค่า $T_{m,1}$ และ $T_{m,2}$ ที่ 117°C และ 155°C

ตามลำดับ ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อน (TGA) ของฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 3 สูตร หลังการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากฟิล์มเริ่มต้นมากนัก เช่นเดียวกับผลของ DSC โดยฟิล์มที่เตรียมจาก PBAT มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด โดยมีการสลายตัว 5% 50% และ 95% ที่อุณหภูมิ 364°C 409°C และ 435°C รองลงไปคือฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มที่เตรียมจาก PLA ตามลำดับ โดยการสลายตัว 50% ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบการสลายตัว 2 ช่วงอุณหภูมิคือ 360°C ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของส่วนที่เกิดอันตรกิริยาของ PLA กับ PBAT และ 403°C ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของ PBAT ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA พบการสลายตัว 50% ที่อุณหภูมิ 351°C

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (60%DRC) (High Ammonia Concentrated Natural Rubber Latex) ; Thai Rubber Latex Co., Ltd.
2. เทอร์ริก [Poly(ethylene oxide fatty alcohol), hexadecylether, Terric] ; Commercial, East Asiatic (Thailand) Public Co.,Ltd.
3. ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ชนิด 50% ; Commercial grade
4. กรดฟอร์มิก (98%) ; Analytical reagent grade, Fisher chemical
5. พอลิแลกติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ; 4043 D grade (biaxial oriented film), Nature works
6. พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) ; Ecoflex F blend C1200, Unic technology (Thailand) Co.,Ltd.
7. ทัลคัม (Hydrous magnesium silicate, Talc); Minerals Technology
8. ไททาเนียมไดออกไซด์ ; Ti-Pure R103; DuPont
9. Irganox 1010
10. Biadimide 100 ; Rheinau chemi additives
11. อะซิโตน ; Commercial grade
12. แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์สูง ; บริษัท ไทยอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด มหาชน
13. กรดซัลฟิวริก (98%) ; Analytical reagent grade, Carlo erba reagent

3.2 วัสดุอุปกรณ์

1. รีแอกเตอร์แก้ว ขนาด 2 ลิตร
2. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 250, 500 และ 1,000 mL
3. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 50 และ 100 mL
4. ปิเปต/ไมโครปิเปต (Pipette/micropipate)
5. แม่เหล็กเนติกบาร์ (Magnetic bar)
6. เครื่องปั่นกวน (Mechanical stirrer)
7. ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven); Memmert
8. อ่างควบคุมความเย็น (Temp controller); Elela cool ace ca - 1100
9. ตู้ดูดความชื้น; (Dasiccator)
10. เครื่องชั่งละเอียด 2 และ 4 ตำแหน่ง; Sartorius
11. เครื่องกวนสารละลายแบบใช้มอเตอร์
12. เครื่องให้ความร้อนพร้อมกวนสารละลาย

13. เครื่องฟูรีเออร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Attenuated total reflectance Infrared Spectrometer, ATR-IR); Perkin Elmer system 2000
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM); รุ่น Leo1455VP
15. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope); รุ่น SZ2-ILST T5 SN 1D02459 Olympus Corporation
16. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile test); Instron Model 5965 Universal
17. เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single Screw) Labtech Engineering Co., Ltd. รุ่น LE20-30/C
18. เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw) Labtech Engineering Co., Ltd. รุ่น LTE16-40 FAC
19. เครื่องเป่าฟิล์ม (Blow Film) Labtech Engineering Co., Ltd. รุ่น LF-250
20. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
21. เครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis, TGA)

3.3 การเตรียมยางธรรมชาติดัดแปร

ปั่นกวนน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (NR) ร่วมกับเทอร์ริก (teric) เพื่อให้มีน้ำยางมีความเสถียรมากขึ้น เทส่วนผสมทั้งหมดใส่ลงในรีแอกเตอร์แก้ว ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 60 °C เมื่ออุณหภูมิคงที่ทำการหยดกรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปอย่างช้าๆ ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาทำการลดอุณหภูมิของน้ำยางลง (ประมาณ 40 °C) แล้วจึงเติมกรดลงไป ปรับเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 50 °C เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดทำการหยด H₂O₂ ลงไป ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 6-7 ชั่วโมง ยางที่ได้หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยารเรียกว่ายางธรรมชาติไฮดรอกซิลอีพอกไซด์ (hydroxyl epoxidized natural rubber, HENR) ทั้งนี้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันจะทำให้ได้อัตราส่วนของหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่เอพอกไซด์ที่แตกต่างกัน

3.4 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับใช้เป็นถุงปลูก

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับยางธรรมชาติดัดแปรไฮดรอกซิลอีพอกไซด์ ที่มีสัดส่วนหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่เอพอกไซด์ที่แตกต่างกัน 3 ตัว คือ HENR1 HENR2 และ HENR3

3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์

เตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ระหว่าง PLA:HENR ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตาราง 3.1-3.3 ทั้งนี้ก่อนทำการผสมเม็ด PLA จะทำการอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในขณะที่ HENR จะทำการอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ทั้งนี้การเตรียมเม็ดคอมพาวนด์จะใช้เครื่องมือ 2 ชนิด คือเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว โดยทำการคอมพาวนด์ด้วยอัตราเร็ว 50 รอบต่อนาที จากนั้นทำการผสมอีกครั้งด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ ด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที ทั้งนี้เนื่องจากยางมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ในขณะที่เม็ด PLA มีขนาดที่ใหญ่กว่าทำให้หากใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่โดยตรงจะเกิดการลงที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างยางดัดแปรและเม็ด PLA ใน hopper ของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ ในขณะที่ hopper ของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวจะเติมสารได้ง่ายกว่า นอกจากนี้เนื่องจากเครื่องมือทั้ง 2 ของคณะวิทยาศาสตร์มีขนาดเล็กมาก พอลิเมอร์จึงอยู่ในห้องผสมในเวลาสั้น การผสมโดย 2 เครื่องมือจึงช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และยางดัดแปรได้เพิ่มขึ้น ช่วงอุณหภูมิของเครื่องผสมทั้ง 2 เครื่อง ดังแสดงในตาราง 3.4-3.5

ตาราง 3.1 ปริมาณสารต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดคอมพาวนด์ สำหรับการทดสอบครั้งที่ 1

สูตร	ปริมาณที่ใช้ (wt%)				
	PLA	PE	HENR1	HENR2	HENR3
PLA	100	-	-	-	-
PE*	-	100	-	-	-
PLA/HENR1-10	90	-	10	-	-
PLA/HENR1-15	85	-	15	-	-
PLA/HENR2-10	90	-	-	10	-
PLA/HENR2-15	85	-	-	15	-
PLA/HENR2-20	80	-	-	20	-
PLA/HENR3-10	90	-	-	-	10
PLA/HENR3-15	85	-	-	-	15

* เติม TiO₂ 2 wt%

ตาราง 3.2 ปริมาณสารต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดคอมพาวนด์ สำหรับการทดสอบครั้งที่ 2

สูตร	ปริมาณที่ใช้ (wt%)				
	PLA	PE	HENR1	HENR2	HENR3
PLA/HENR2-15	85	-	-	15	-
PLA/HENR2-20	80	-	-	20	-
PLA/HENR3-15	85	-	-	-	15
PLA/HENR3-20	80	-	-	-	20
PLA/HENR3-25	75	-	-	-	25

ตาราง 3.3 ปริมาณสารต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดคอมพาวนด์ สำหรับทดสอบการใช้ในการปลูกมะเขือเทศ ณ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่สาใหม่

สูตร	ปริมาณที่ใช้ (wt%)								
	PLA	HENR2	HENR3	PBAT	PE	talc	TiO ₂	Irganox	Bio100
ชุดที่ 1									
PLA/H2-20(1)	80	20	-	-	-	3	2	0.2	-
PLA/H3-20(1)	80	-	20	-	-	3	2	0.2	-
PLA/H3/PBAT-20(1)	60	-	20	20	-	3	2	0.2	-
PE(1)	100	-	-	-	-	-	2	-	-
ชุดที่ 2									
PLA/H2-20(2)	80	20	-	-	-	3	2	0.2	2
PLA/H3-20(2)	80	-	20	-	-	3	2	0.2	2
PLA/H2/PBAT-20(2)	60	20	-	20	-	3	2	0.2	2
PE(2)	100	-	-	-	-	-	2	-	-
PLA2	100	-	-	-	-	3	2	0.2	2
PLA/PBAT-20	80	-	-	20	-	3	2	0.2	2

เมื่อ PBAT คือ Polybutylene adipate-co-terephthalate

ตาราง 3.4 อุณหภูมิของบาริลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

Extruder (°C)			
Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
160	170	180	175

ตาราง 3.5 อุณหภูมิของบาริลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

Extruder (°C)				
Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
160	170	175	180	175

3.4.2 การเป่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากข้างต้นมาทำการเป่าถุงด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (blow film machine) ของบริษัท Labtech Engineering Co.,Ltd รุ่น LE20-30/C ด้วยอัตราเร็ว 80 รอบต่อนาที (รูป 3.1) ให้มีความกว้างของถุงตามกำหนด โดยมีความหนาประมาณ 50 ไมครอน ช่วงอุณหภูมิของเครื่องเป่า ดังแสดงในตาราง 3.6



รูป 3.1 เครื่องเป่าฟิล์มขนาดเล็ก (blow film machine)

ตาราง 3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการเป่าฟิล์มของ PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/HENR

Extruder (°C)				
Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5 (Annular)
180	190	190	190	200

3.4.3 การเตรียมถุงปลูก และการจำลองสภาวะการใช้งานถุงปลูกขั้นต้น

นำฟิล์มที่เตรียมได้จากข้อ (3.4.2) มาพับจีบทั้ง 2 ข้าง ได้ถุงที่มีขนาด กว้าง x ยาว หลังพับจีบประมาณ 4 x 9 นิ้ว (เดิมถุงมีความกว้าง 8 นิ้ว จีบเข้ามาด้านละ 2 นิ้ว) ความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ค่า BUR เท่ากับ 4.35 ทำการซีลกันถุงด้วยเครื่องซีลปากถุงขนาดเล็ก ทำการเจาะรูด้านข้างของถุงปลูกด้านละรู โดยกำหนดให้ความสูงของรูที่เจาะให้สูง 4 นิ้วจากรอยซีลกันถุง ซึ่งเมื่อใส่วัสดุปลูกดังกล่าวจะสูงจากพื้นประมาณ 2 นิ้ว

การทดสอบจะใช้ถุงปลูกทั้งหมด 75 ถุงต่อสูตร โดยแต่ละสูตรจะทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 5 ครั้ง คือ 15 วัน 1 เดือน 2 เดือน และ 3 เดือน โดยแต่ละครั้งจะเก็บตัวอย่างจำนวน 15 ถุง

การจำลองสภาวะการใช้งานจะใช้กาบมะพร้าวแบบบดหยาบเป็นวัสดุปลูก ทำการแช่กาบมะพร้าวในน้ำปุ๋ยเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำกาบมะพร้าวใส่ลงในถุงปลูก โดยกำหนดให้กาบมะพร้าวให้มีความสูงประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของถุงปลูก (รูป 3.2) ทำการรดน้ำปุ๋ยทุกวัน วันละ 2 ครั้ง ครั้งละ 200 มิลลิลิตร ซึ่งเมื่อรดน้ำปุ๋ยจะมีน้ำขังอยู่ในบริเวณที่ต่ำกว่ารูที่เจาะ (รูป 3.3) เมื่อครบกำหนดเวลาทำการเก็บตัวอย่างถุงปลูก ทำการล้างให้สะอาด สังเกตรอยแตก/ร้าว ที่ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของถุงเทียบกับน้ำหนักชิ้นงานเริ่มต้นก่อนใส่กาบมะพร้าว

ทั้งนี้ น้ำปุ๋ยที่ใช้เป็นน้ำปุ๋ยสำหรับรดมะเขือเทศของโครงการหลวง มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5.5 ค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 2 ms/cm



รูป 3.2 การทดลองปลูกขั้นต้น



รูป 3.3 ถุงปลูกหลังรดน้ำปุ๋ย

3.4.4 การเตรียมถุงปลูก และการทดสอบการใช้งานเป็นถุงปลูกมะเขือเทศที่โครงการหลวง

นำฟิล์มที่เตรียมได้จากข้อ (3.4.2) มาพับจีบทั้ง 2 ข้าง ได้ถุงที่มีขนาด กว้าง x ยาว หลังพับจีบประมาณ 5x10 นิ้ว (เดิมถุงมีความกว้าง 10 นิ้ว จีบเข้ามาด้านละ 2.5 นิ้ว) ความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ค่า BUR เท่ากับ 5.41 ทำการซีลกันถุงด้วยเครื่องซีลปากถุงขนาดเล็ก ทำการเจาะรูด้านข้างของถุงปลูกด้านละรู โดยกำหนดให้ความสูงของรูที่เจาะให้สูง 4 นิ้วจากรอยซีลกันถุง ซึ่งเมื่อใส่วัสดุปลูกรูดังกล่าวจะสูงจากพื้นประมาณ 2 นิ้ว

ทดสอบการใช้งานฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ โดยเน้นศึกษาความแข็งแรง (การฉีกขาดของถุงปลูกก่อนและหลังการปลูก) และผลกระทบต่อมะเขือเทศที่ทดลอง ณ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่สาใหม่ ต.โป่งแยง อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ ทั้งนี้การทดลองจะมีการดำเนินการใน 2 ช่วงเวลา คือช่วงเดือนกรกฎาคม - ตุลาคม 2560 (ชุดที่ 1) และช่วงเดือนพฤศจิกายน 2560 - มีนาคม 2561 (ชุดที่ 2) โดยเตรียมถุงพอลิเมอร์ผสม (ตามสูตรดังแสดงในตาราง 3.3) ขนาดหลังพับจีบ 5x10 นิ้ว จำนวน 4 กรรมวิธีๆ ละ 5 ซ้ำๆ ละ 10-13 ถุง ดำเนินการปลูกภายใต้โรงเรือนตาข่ายกันแมลงขนาด 6x30 เมตร ปลูกในระบบวัสดุปลูก (substrate culture) ให้น้ำพร้อมปุ๋ยทุกวันในรูปของสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 1.9 ms/cm โดยใช้ระบบน้ำหยด โดยใช้สูตรปุ๋ยสำหรับปลูกมะเขือเทศของมูลนิธิโครงการหลวง การตัดแต่งกิ่ง ตัดแต่งกิ่งแขนงออก ให้เหลือเฉพาะลำต้นหลัก การไว้ผล คัดเลือกผลที่มีขนาดเท่ากันโดยให้เหลือช่อละ 3 ผล ส่วนผลที่มีขนาดเล็กตัดแต่งทิ้ง บันทึกผลทั้งในส่วนของการปลูก ได้แก่ความแข็งแรงของถุงปลูกย่อยสลาย และการย่อยสลายของถุงปลูกย่อยสลาย และในส่วนของการผลิต ได้แก่การเจริญเติบโตทางลำต้น และการให้ดอกของมะเขือเทศ และด้านปริมาณและคุณภาพผลผลิต

3.4.5 การทดสอบการย่อยสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้น

ทดสอบการย่อยสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้น (In-house method) ตามมาตรฐาน ASTM D5338-98: 2003 และ ISO 14855-1:2012 โดยศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ (ศพว.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) โดยการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จากวัตถุทดสอบ ซึ่งได้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทำการบดย่อยให้เป็นผงละเอียดขนาดเล็ก วัตถุอ้างอิงเชิงบวก (Cellulose microcrystalline) และวัตถุอ้างอิงเชิงลบ (พอลิเอทิลีน) ขนาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ผสมร่วมกับปุ๋ยหมัก (ที่มีปริมาณแบคทีเรียรวม 7-8 log CFU ต่อกรัมของปุ๋ยหมัก) ในอัตราส่วน ปุ๋ยหมัก:วัตถุทดสอบ เท่ากับ 99:1 บ่มในสภาวะปิดที่อุณหภูมิ $37 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 49 วัน และที่อุณหภูมิ $58 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 56 วัน ทำ 3 ซ้ำต่อหนึ่งชุดทดสอบ แสดงผลเป็นร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพจากค่าคาร์บอนในวัสดุทดสอบที่เปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นของปุ๋ยหมักที่ใช้ในการทดสอบ ดังสมการ

$$\text{การสลายตัวทางชีวภาพ (\%)} = \left(\text{CO}_{2, \text{ sample}} - \text{CO}_{2, \text{ control}} \right) \times 100$$

เมื่อ $\text{CO}_{2, \text{ sample}}$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาการทดสอบการย่อยสลายของตัวอย่าง

$\text{CO}_{2, \text{ control}}$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาการทดสอบการย่อยสลายในปุ๋ยหมัก

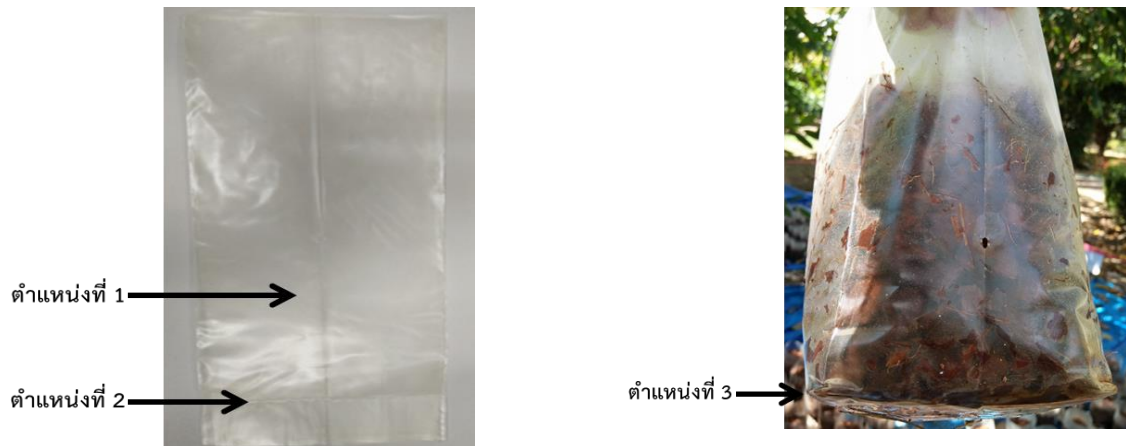
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของสารตั้งต้น เม็ดพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

3.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-IR Spectroscopy

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยาง HENR ด้วยเครื่อง Infrared Spectrophotometer ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX โดยใช้ ATR โหมด ในช่วงการดูดกลืนแสง $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$

3.5.2 การตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องสเตอริโอ

ศึกษาพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม หลังการปลูกตามเวลาที่กำหนด ด้วยกล้องสเตอริโอ ยี่ห้อ Olympus microscope digital camera โดยใช้กำลังขยาย 2 เท่า ทั้งนี้จะแบ่งตำแหน่งที่จะศึกษาออกเป็น 3 ตำแหน่ง คือพื้นผิวทั่วไปในตำแหน่งน้ำขัง (1) รอยซัลของถุง (2) และตำแหน่งกตักจากการใส่วัสดุ (3) ซึ่งตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูป 3.4



รูป 3.4 รูปถ่ายชิ้นงานแสดงตำแหน่งที่กำหนดสำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงของถุงปลูกด้วยกล้องสเตอริโอ

3.5.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค SEM

SEM

ศึกษาพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง SEM : LEO 1455 VP ทั้งนี้ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมจะเก็บในขั้นตอนสุดท้ายของการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยจะเก็บชิ้นงานในลักษณะเส้น ทำการจุ่มชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวจนชิ้นงานแข็ง จากนั้นทำการหักชิ้นงาน ทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการทดสอบ ในขณะที่ตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ จะตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มโดยตรงหลังจากการเคลือบผิวด้วยทอง

3.5.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค DSC

DSC

ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่อง Perkin-Elmer DSC7 โดยชั่งตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัม ลงในถ้วยอะลูมิเนียม (Aluminum pan) พร้อมทั้งทำการปิดผนึก จากนั้นจึงให้ความร้อนกับชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200°C ด้วยอัตราเร็ว 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ทั้งนี้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะศึกษาเพียง 1 cycle การคำนวณปริมาณผลึก ดังแสดงในสมการ (1)

$$X_c (\%) = \left[\left(\frac{(\Delta H_m - \Delta H_{cc})}{\Delta H_m^\circ} \right) \times \frac{1}{\phi_{PLA}} \right] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $\Delta H_{m,PLA}^\circ = 93 \text{ J/g}$ $\Delta H_{m,PE}^\circ = 290 \text{ J/g}$

ϕ_{PLA} = weight fraction of PLA

3.5.5 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค TGA

ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยเครื่อง Mettler Toledo model TGA/DSC1 STAR^c system ในช่วงอุณหภูมิห้อง ถึง 600°C ด้วยอัตราเร็ว 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.5.6 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถุงปลูก

ชั่งน้ำหนักของถุงปลูกหลังการใช้งาน โดยนำวัสดุปลูกออก ล้างทำความสะอาด ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของถุงแห้งเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละถุงก่อนใช้งาน (10-15 ถุง/1 การทดสอบ) หลังจากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้นำมาคำนวณหาน้ำหนักที่เหลืออยู่ของถุงปลูก (residual mass) การคำนวณหาค่าน้ำหนักที่เหลืออยู่ของถุงปลูกดังสมการ (2)

$$\text{Residual mass (\%)} = \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (2)$$

หมายเหตุ W_1 คือ น้ำหนักเริ่มต้น

W_2 คือ น้ำหนักที่เหลืออยู่

3.5.7 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile properties)

ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงปลูกโดยทำการตัดถุงปลูกให้เป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง x ยาว เท่ากับ 10 x 90 มิลลิเมตร โดยให้ระยะจับชิ้นงาน เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยตัดในแนวตั้ง (Machine direction, MD) และแนวนอน (Transverse direction, TD) ของถุง ตามมาตรฐาน ASTM D882 (มาตรฐานฟิล์มบาง) ทำการดึงชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงของบริษัท Instron โดยใช้หัวโหลด 1 kN ด้วยอัตราเร็วคงที่ 50 mm/min ทำการทดสอบสุตรละ 10-15 ชิ้นงาน/แนวที่ต้องการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาถุงปลูกชนิดย่อยสลายได้จากพอลิแลกติกแอซิด และยางธรรมชาติดัดแปร แบ่งการทดลอง ออกเป็น 4 ส่วน ที่สำคัญ ดังนี้

- 4.1 การเตรียมและการวิเคราะห์ยางดัดแปรอีพอกซีไดซ์ไฮดรอกซิล (Hydroxyl epoxidized NR, HENR)
- 4.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA:HENR ที่ลดขนาด HENR ด้วย Ball mill
- 4.3 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA:HENR ที่ลดขนาด HENR ด้วย โม่มีด
- 4.4 ศึกษาการทดสอบการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ และการทดสอบการย่อยสลายเบื้องต้น

4.1 การเตรียมและการวิเคราะห์ยางดัดแปรอีพอกซีไดซ์ไฮดรอกซิล (Hydroxyl epoxidized NR, HENR)

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติดัดแปร

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมยางธรรมชาติดัดแปรที่มีหมู่ไฮดรอกซิลบนโครงสร้างของยางธรรมชาติผ่านปฏิกิริยาการเปิดวงออกซิเรนของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ โดยเตรียมยางธรรมชาติดัดแปรให้มีปริมาณหมู่อีพอกซีไดซ์และหมู่ไฮดรอกซิลต่างกัน 3 ตัว โดย HENR1 ซึ่งเป็นยางธรรมชาติดัดแปรที่มีเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล มีลักษณะแข็ง ได้อนุภาคขนาดเล็กตั้งแต่หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา ทำการคัดขนาด HENR1 ด้วยการร่อนผ่านตะแกรกร่อนขนาด 80 เมช (180 ไมครอน) ในขณะที่ HENR2 และ HENR3 จะมีทั้งหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อีพอกไซด์ ซึ่งการมีหมู่อีพอกไซด์ในสายโซ่พอลิเมอร์จะทำให้ยางมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ยางที่ได้มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก แต่มีขนาดใหญ่กว่า HENR1 ทั้งยังมีความหลากหลายของขนาด

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการลดขนาดของ HENR2 และ HENR3 เพิ่มเติม ทั้งยังจะเป็นการควบคุมให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยการลดขนาดจะกระทำโดย 2 วิธี คือการลดขนาดด้วย Ball mill และการลดขนาดด้วย โม่มีด ซึ่งการลดขนาดด้วย Ball mill จะเป็นการลดขนาดแบบวิธีพื้นฐาน ได้อนุภาคขนาดใกล้เคียงกัน แต่ใช้เวลาในการลดขนาดนาน (ประมาณ 2 วันต่อรอบ 1 ครั้ง) ในขณะที่อนุภาคที่ได้จากการลดขนาดด้วย โม่มีดจะมีความสม่ำเสมอน้อยกว่า แต่ใช้เวลาในการลดขนาดสั้นกว่า (ในปริมาณยางที่เท่ากันวิธีนี้จะใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที) อย่างไรก็ตามหลังการร่อนคัดขนาด ยางที่เตรียมจากทั้ง 2 วิธีพบว่ามีลักษณะทางกายภาพจากการสังเกตด้วยสายตาที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ยาง HENR2 และ HENR3 ที่ผ่านการลดขนาดจะทำการคัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรกร่อนแบ่งเท่านั้น รูปถ่ายยางดัดแปรทั้ง 3 ตัว ดังแสดงในรูป 4.1

รูป 4.2 แสดงลักษณะของยาง HENR เมื่อส่องด้วยกล้องสเตอริโอ กำลังขยาย 2X พบว่า HENR ทั้ง 3 ตัว ที่ลดขนาดด้วย Ball mill มีรูปทรงไม่แน่นอน ค่อนข้างกลม โดย HENR2 และ HENR3 มีขนาดใกล้เคียงกัน และมีขนาดใหญ่กว่า HENR1 ค่อนข้างมาก ในขณะที่ HENR3 ที่ลดขนาดด้วยโม่มีด มีขนาดที่หลากหลายมากกว่าการลดขนาดด้วย Ball mill



(a)

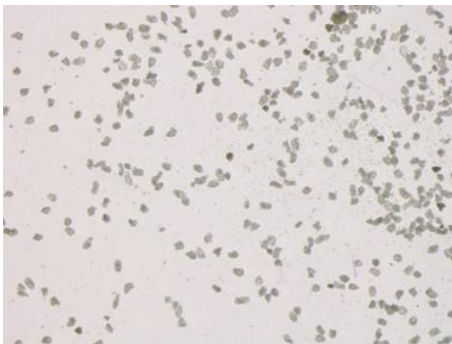


(b)

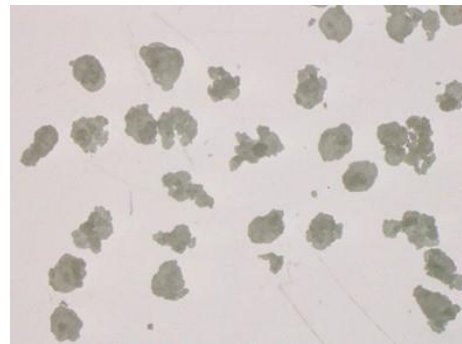


(c)

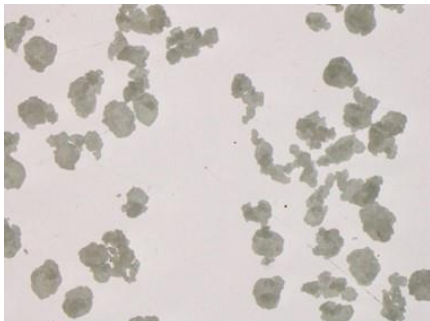
รูป 4.1 รูปถ่าย HENR 3 ตัวที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/HENR เมื่อ
(a) HENR1 (b) HENR2 และ (c) HENR3



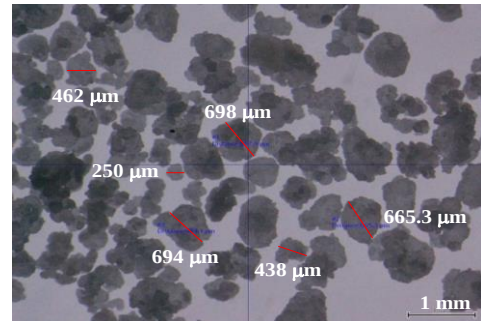
(a)



(b)



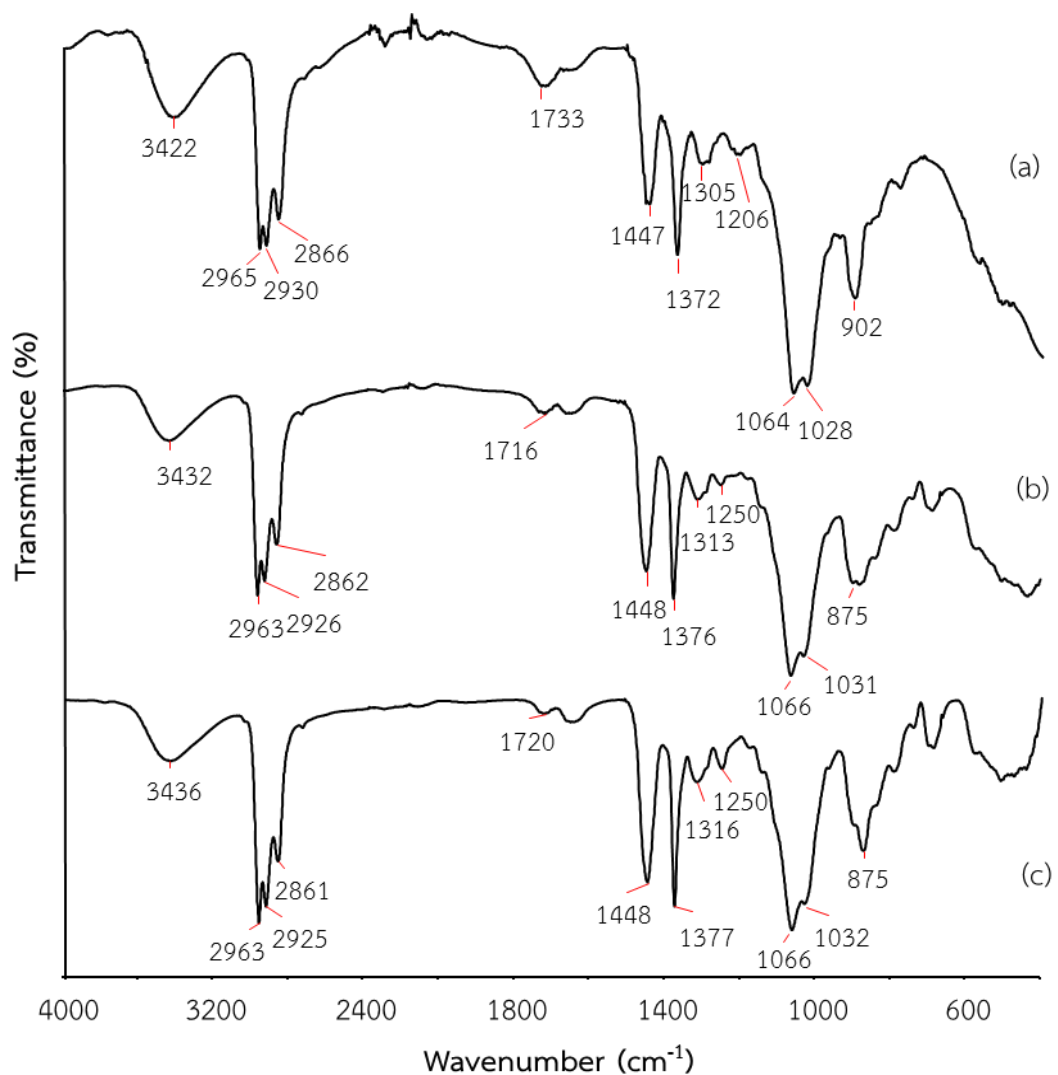
(c)



(d)

รูป 4.2 รูปถ่าย OM กำลังขยาย 2X ของยางธรรมชาติตัดแปรร เมื่อ (a) HENR1 (b) HENR2 และ (c) HENR3
ที่ลดขนาดด้วย Ball mill และ (d) HENR3 ที่ลดขนาดด้วยใบมีด

รูป 4.3 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ HENR ทั้ง 3 ตัว โดย HENR ทั้ง 3 ตัว ปรากฏสเปกตรัมพื้นฐานที่แสดงถึงยางธรรมชาติเหมือนกัน ได้แก่สัญญาณที่ตำแหน่ง 2862 cm^{-1} และ 2926 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ CH_2 CH_3 stretching สัญญาณที่ตำแหน่ง 1448 cm^{-1} และ 1376 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ CH_2 CH_3 deformation นอกจากนั้นยังพบสัญญาณตำแหน่ง 3432 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล และสัญญาณที่ตำแหน่ง 1066 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ C-O stretching ของคาร์บอนที่ติดกับหมู่ไฮดรอกซิล ทั้งนี้ HENR2 และ HENR3 เป็นยางดัดแปรที่มีหมู่เอพอกไซด์เหลืออยู่ จึงปรากฏสัญญาณที่แสดงถึงหมู่เอพอกไซด์ที่ตำแหน่ง 875 cm^{-1} (Asymmetric stretching of epoxide ring) และ 1250 cm^{-1} (Symmetric stretching of epoxide ring) โดย HENR2 จะมีปริมาณหมู่เอพอกไซด์เหลืออยู่น้อยกว่า HENR3 ในขณะที่ HENR1 ซึ่งเป็นยางดัดแปรที่มีเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิลจึงไม่ปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่งดังกล่าว (รูป 4.3(a))



รูป 4.3 ATR-IR สเปกตรัมของ (a) HENR1 (b) HENR2 และ(c) HENR3

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีค (Absorption band ratio) ของสัญญาณ C-O stretching ของคาร์บอนที่ติดกับหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 1066 cm^{-1} เทียบกับสัญญาณของ CH₃ deformation ของยางธรรมชาติ ตำแหน่ง 1376 cm^{-1} และอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของสัญญาณของหมู่ฟอกไซด์ที่ตำแหน่ง 875 cm^{-1} เทียบกับสัญญาณของ CH₃ deformation ของยางธรรมชาติ ของ HENR ทั้ง 3 ชนิด พบว่า HENR1 ซึ่งเป็นยางดัดแปรที่มีเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล มีอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคซึ่งแสดงถึงหมู่ C-O stretching ของคาร์บอนที่ติดกับหมู่ไฮดรอกซิลสูงที่สุด รองลงไปที่ HENR2 และ HENR3 ตามลำดับ โดย HENR3 มีอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของหมู่ฟอกไซด์ต่อหมู่เมทิลของยางธรรมชาติสูงสุด (ตาราง 4.1)

* เนื่องจากยางทั้ง 3 ชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีขั้วสูง ทำให้ยังไม่สามารถหาตัวทำละลายได้ การคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค NMR จึงไม่สามารถกระทำได้

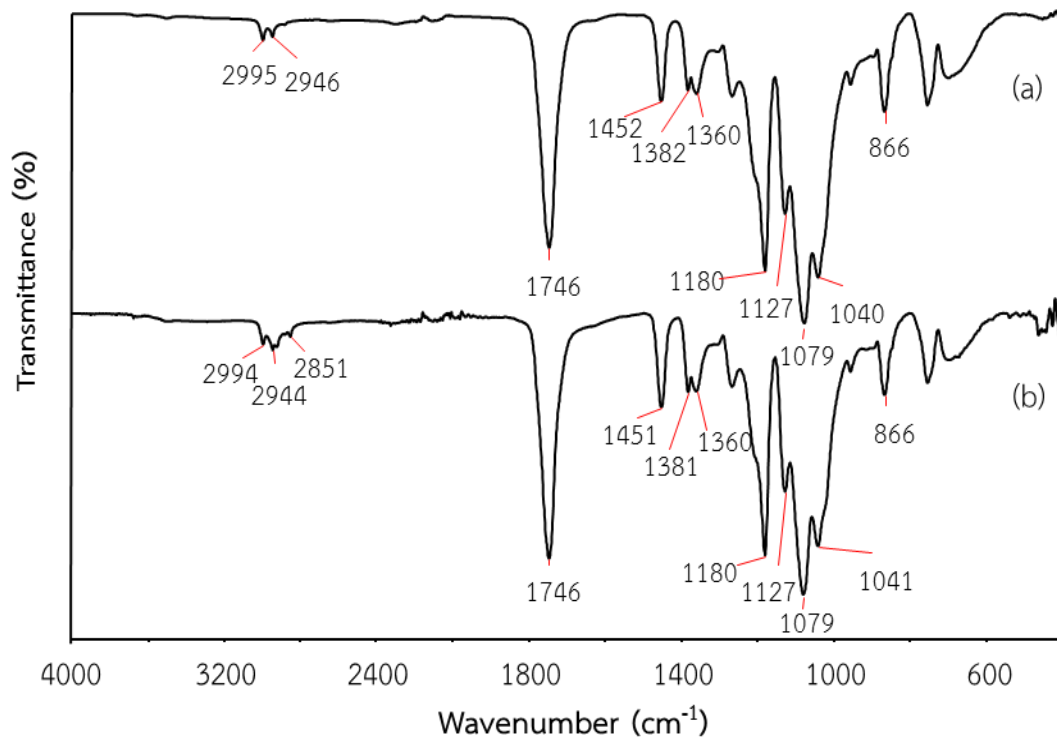
วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติดัดแปรทั้ง 3 ชนิดที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค DSC พบว่า HENR1 ซึ่งมีเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิลน่าจะมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่สูง ทำให้ต้องใช้พลังงานในการขยับของส่วนอสัณฐานมาก ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) สูง และการมีหมู่ฟอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า T_g ของยางธรรมชาติดัดแปรลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติดัดแปรที่มีเพียงหมู่ไฮดรอกซิล ดังนั้น HENR3 ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่น้อยที่สุด และมีหมู่ฟอกไซด์ที่มากกว่า HENR1 และ HENR2 จึงมีค่า T_g ที่น้อยที่สุด (ตาราง 4.1)

ตาราง 4.1 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของหมู่คาร์บอนที่ติดกับหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่ฟอกไซด์ของยางธรรมชาติดัดแปร (HENR) ต่อพื้นที่ใต้พีคของหมู่เมทิลของยางธรรมชาติ

	$\frac{A_{1066}}{A_{1376}}$	$\frac{A_{875}}{A_{1376}}$	$T_{g, \text{midpoint}} (^{\circ}\text{C})$
HENR1	9.30	-	19.54
HENR2	7.15	0.73	-4.80
HENR3	5.31	0.90	-13.32

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิแลกติก แอซิด และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

รูป 4.4 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณ PLA:HENR2 = 80:20 (PLA/HENR2-20) พบว่าทั้ง 2 สเปกตรัมให้สัญญาณที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นสัญญาณของ PLA แม้ว่ารูป 4.4 (b) จะมีปริมาณยางสูงถึง 20% ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าสัญญาณส่วนใหญ่ของทั้ง PLA และ HENR ขึ้นในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน โดยสัญญาณหลักของ PLA จะปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่ง 1746 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ aliphatic C=O stretching สัญญาณที่ตำแหน่ง 1452 cm^{-1} และ 1380 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ CH₂ deformation สัญญาณที่ตำแหน่ง 1180 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ symmetric C-O-C stretching และสัญญาณที่ตำแหน่ง 1079 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ C-O stretching (ester) ทั้งนี้สัญญาณของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ ให้สัญญาณเช่นเดียวกับ PLA/HENR2-20



รูป 4.4 ATR-IR สเปกตรัมของฟิล์ม (a) PLA (b) PLA/HENR2-20

4.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA:HENR ที่ลดขนาด HENR ด้วย Ball mill

4.2.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนใช้งานด้วยสายตา

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับยางธรรมชาติดัดแปรที่มีปริมาณหมู่ อีพอกไซด์และหมู่ไฮดรอกซิลต่างกัน ตาราง 4.2 แสดงรูปถ่ายของฟิล์มพลาสติกที่เตรียมได้จาก PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ ที่มีการตัดเป็นถุงสำหรับการทดลองปลูก จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่เตรียมจากเม็ดพลาสติก PLA เริ่มต้น มีลักษณะใส ไม่ยืดหยุ่น เป่าและพับเก็บได้ยาก มีรอยยับย่นบนแผ่นฟิล์มจำนวนมาก ถุงที่ได้สามารถสังเกตรอยยับย่นได้ง่าย ฟิล์มที่เตรียมจาก PE มีสีขาว ทึบแสง ยืดหยุ่นดี เป่าได้ง่าย ถุงที่เตรียมได้มีลักษณะเรียบ ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA/HENR มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง เป่าได้ง่ายกว่าฟิล์ม PLA โดยฟิล์มที่เตรียมจาก PLA/HENR1 ในทั้ง 2 อัตราส่วน (10 และ 20 wt%) ให้พื้นผิวฟิล์มที่มีลักษณะเรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA/HENR2 และ PLA/HENR3 เห็นการกระจายตัวของยางขนาดเล็กทั่วทั้งผิวฟิล์ม แต่ฟิล์มยังคงมีลักษณะเรียบเนียน ทั้งนี้ถุงที่เตรียมจากยางทั้ง 3 สูตร พบว่ามีรอยยับย่นถุงเล็กน้อย

ตาราง 4.2 รูปถ่ายถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ ที่เตรียมจาก HENR ที่ลดขนาดด้วย Ball mill

Samples	ถุงปลูกก่อนการใช้งาน
PLA	
PE	
PLA-HENR1-10	
PLA-HENR1-15	

ตาราง 4.2 รูปถ่ายถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ (ต่อ)

Samples	ถุงปลูกก่อนการใช้งาน
PLA-HENR2-10	
PLA-HENR2-15	
PLA-HENR2-20	
PLA-HENR3-10	
PLA-HENR3-15	

4.2.2 การศึกษาพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องสเตอริโอ

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม หลังการปลูกเป็นเวลาต่างๆ กัน โดยพิจารณา 3 ตำแหน่ง คือพื้นผิว (1) รอยขีดของถุง (2) และตำแหน่งกดทับจากการใส่วัสดุ (3)

ตาราง 4.3-4.7 แสดงรูปพื้นผิวฟิล์มก่อนและหลังการใช้งาน ด้วยกล้องสเตอริโอ กำลังขยาย 2X โดยก่อนใช้งานจะดูเพียง 2 ตำแหน่ง คือพื้นผิว (1) และ รอยขีดของถุง (2) ในขณะที่หลังใช้งานจะสนใจตำแหน่งกดทับเพิ่มเติม จากผลการศึกษาพบว่ารูปถ่ายฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนใช้งานทุกสูตร ทั้ง 2 ตำแหน่ง ไม่ต่างกันมากนัก โดยพื้นผิว (1) และรอยขีด (2) ของทุกถุงดูเรียบเนียน

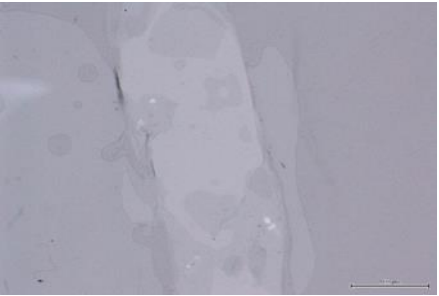
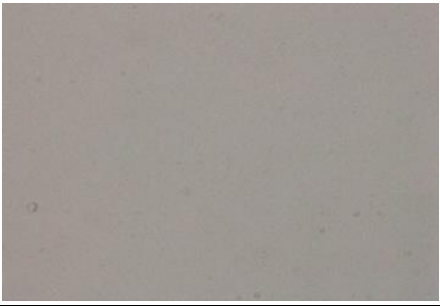
หลังการใช้งาน 15 วัน พบว่าถุงทุกสูตรมีคราบสีน้ำตาลของกาบมะพร้าว และน้ำปุ๋ยเกาะอยู่ที่พื้นผิว ทั้งนี้ถุงสูตร PLA พบว่ามีรอยแตกร้าวทั้ง 15 ใบ โดยรอบแตกทั้งหมดเกิดบริเวณรอยขีดของถุง และรอยกดทับบริเวณขอบของกันถุง นอกจากนี้ยังมีถุงสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ HENR1 ทั้ง 2 อัตราส่วน คือ 10% และ 15% ที่พบการแตกของถุง โดยพบว่าถุงมีการแตก 6 และ 5 ใบ จากทั้งหมดสูตรละ 15 ใบ ตามลำดับ ซึ่งรอยแตกส่วนใหญ่เกิดที่ตำแหน่งรอยขีด และรอยกดทับบริเวณขอบของกันถุงเช่นเดียวกับถุง PLA ในขณะที่ถุงสูตรอื่นๆ (PLA/HENR2 และ PLA/HENR3) ยังไม่พบการแตกร้าวของถุงหลังการใช้งาน 15 วัน

หลังใช้งาน 1 เดือน ถุง PLA มีการปริแตก และเปื่อยยุ่ยออกจากกันมากขึ้น โดยเฉพาะในตำแหน่งของการกดทับ และถุงสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ HENR1 ทั้ง 2 อัตราส่วน คือ 10% และ 15% พบว่ามีจำนวนแตกร้าวเพิ่มขึ้น คิดเป็น 87% และ 67% ตามลำดับ ในขณะที่ถุงสูตรอื่นๆ (PLA/HENR2 และ PLA/HENR3) ยังไม่พบการแตกร้าวของถุง

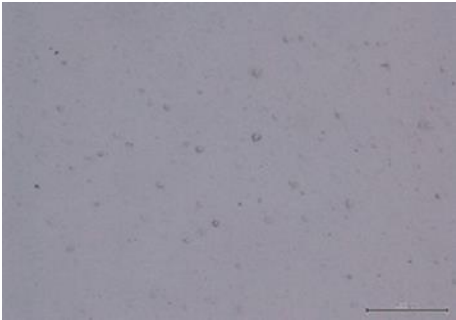
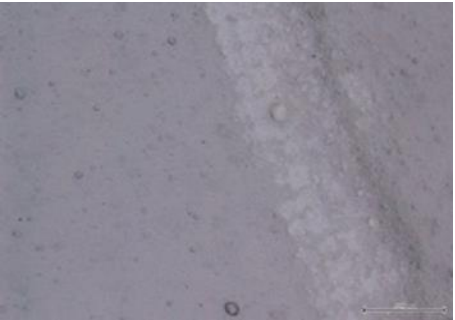
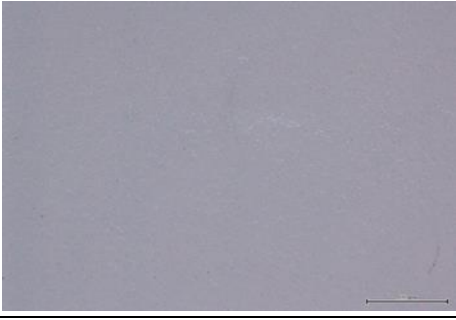
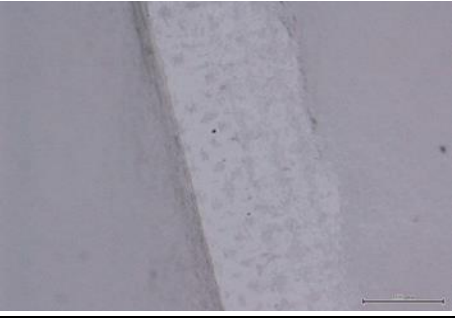
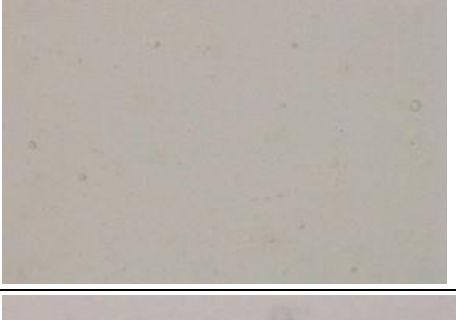
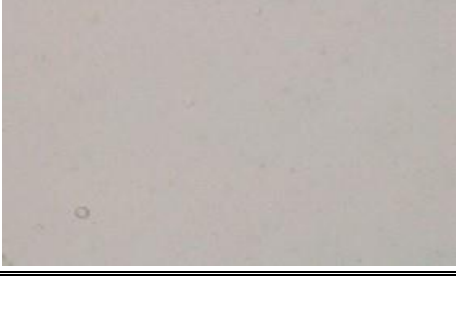
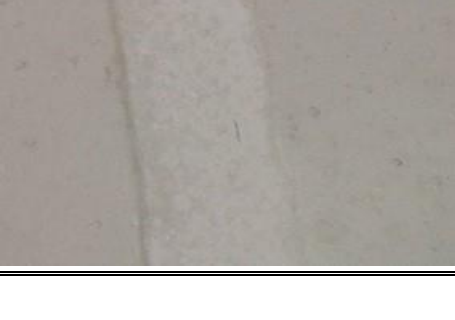
หลังใช้งาน 2 เดือน ถุงสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ HENR1 ทั้ง 2 อัตราส่วน มีการปริแตก 100% และถุงที่เติม HENR2 และ HENR3 ในอัตราส่วน 10 phr พบการปริแตกของถุง 20% ในขณะที่สูตรที่มียาง HENR2 และ HENR3 เป็นส่วนผสม 15 และ 20 phr ยังคงไม่พบการแตกร้าวของถุง อย่างไรก็ตามสูตรดังกล่าวพบว่าการแตกเพิ่มขึ้นเป็น 50% เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลา 3 เดือน และถุงทุกสูตรมีการแตกร้าวของถุง 100% เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลา 4 เดือน ยกเว้นถุงที่เตรียมจากพอลิเอทิลีน

ทั้งนี้ถุงที่เตรียมจาก PLA มีการเปื่อยยุ่ยจนไม่สามารถนำมาถ่ายภาพได้หลังผ่านการใช้งานเป็นเวลา 3 เดือน ในขณะที่เดือนที่ 4 ถุงทุกสูตรมีการแตกร้าว จึงไม่ได้ทำการถ่ายภาพถุงทั้งหมดในเดือนที่ 4

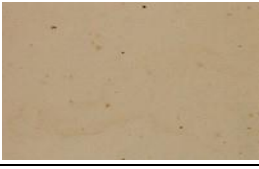
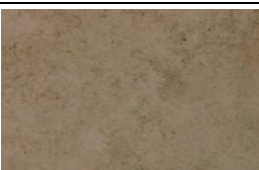
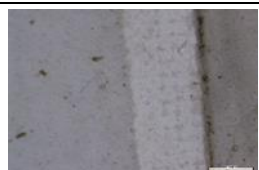
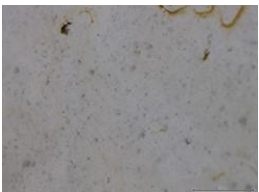
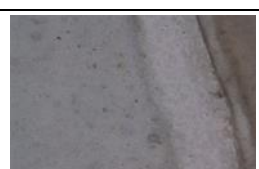
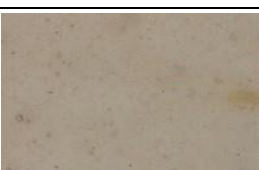
ตาราง 4.3 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ ก่อนการใช้งาน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)
PLA		
PE		
PLA/HENR1-10		
PLA/HENR1-15		
PLA/HENR2-10		

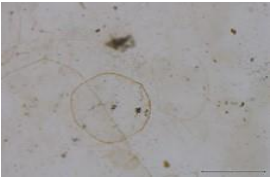
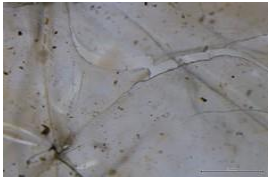
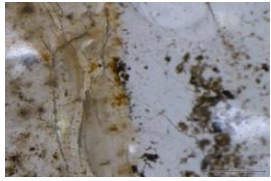
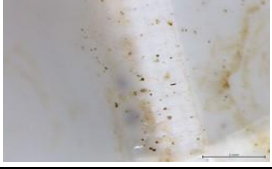
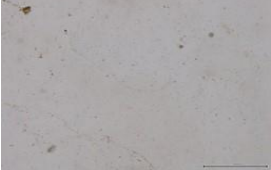
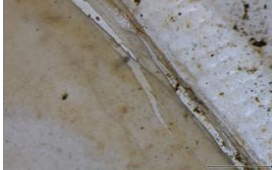
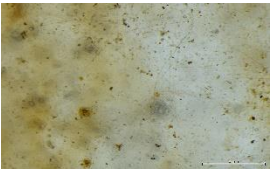
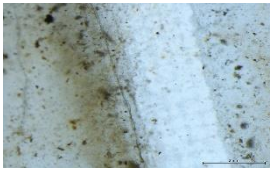
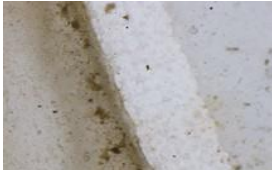
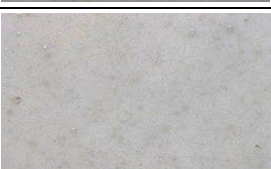
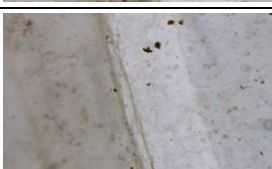
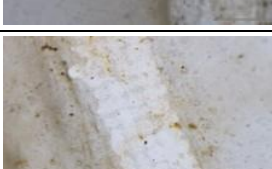
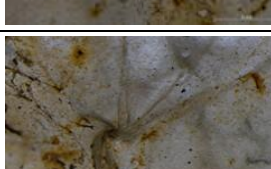
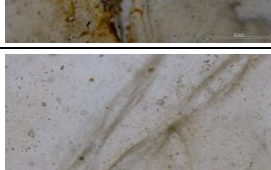
ตาราง 4.3 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ ก่อนการใช้งาน (ต่อ)

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)
PLA/HENR2-15		
PLA/HENR2-20		
PLA/HENR3-10		
PLA/HENR3-15		

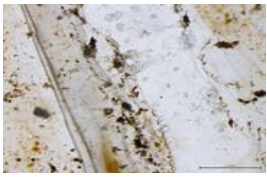
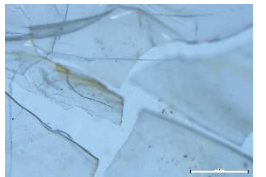
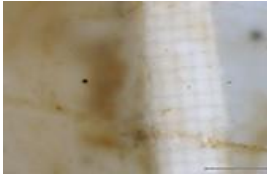
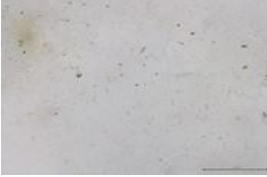
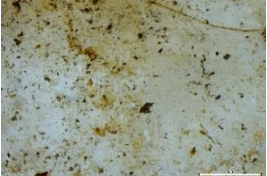
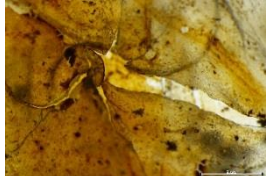
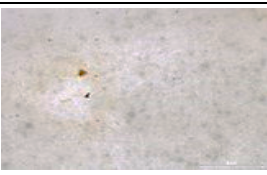
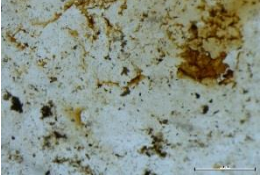
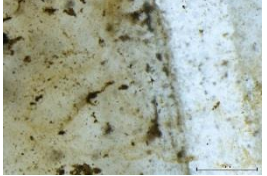
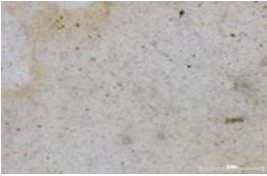
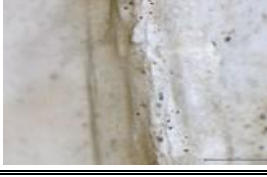
ตาราง 4.4 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 15 วัน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA				15
PE				0
PLA/HENR1-10				6
PLA/HENR1-15				5
PLA/HENR2-10				0
PLA/HENR2-15				0
PLA/HENR2-20				0
PLA/HENR3-10				0
PLA/HENR3-15				0

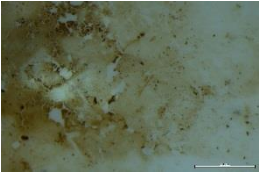
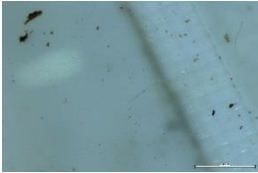
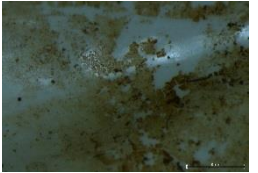
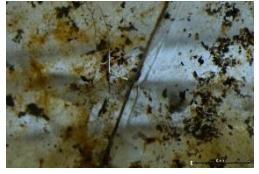
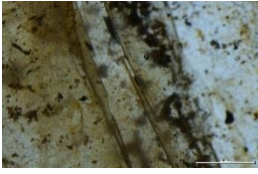
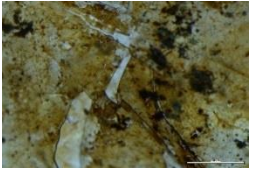
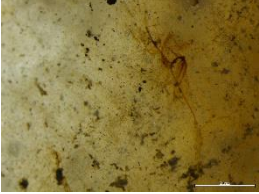
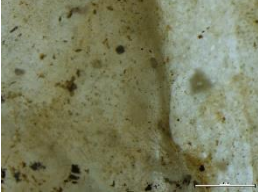
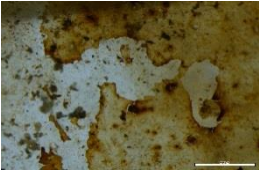
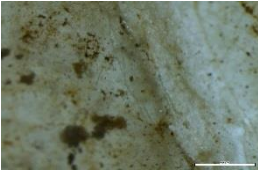
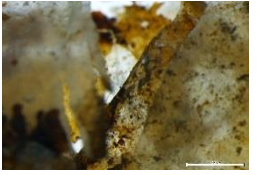
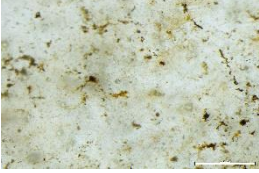
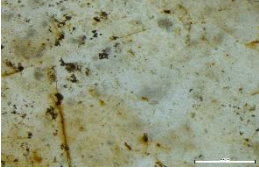
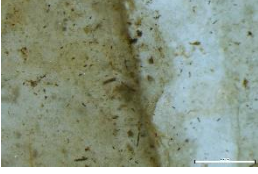
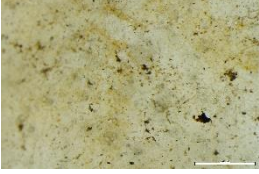
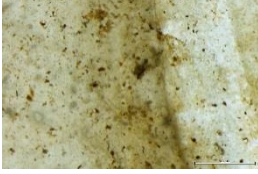
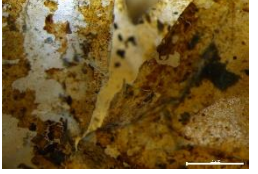
ตาราง 4.5 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 1 เดือน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA				15
PE				0
PLA/HENR1-10				13
PLA/HENR1-15				10
PLA/HENR2-10				0
PLA/HENR2-15				0
PLA/HENR2-20				0
PLA/HENR3-10				0
PLA/HENR3-15				0

ตาราง 4.6 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 2 เดือน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA				15
PE				0
PLA/HENR1-10				15
PLA/HENR1-15				15
PLA/HENR2-10				3
PLA/HENR2-15				0
PLA/HENR2-20				0
PLA/HENR3-10				2
PLA/HENR3-15				0

ตาราง 4.7 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA, PE และ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 3 เดือน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA	-	-	-	15
PE				0
PLA/HENR1-10				15
PLA/HENR1-15				15
PLA/HENR2-10				15
PLA/HENR2-15				8
PLA/HENR2-20				7
PLA/HENR3-10				15
PLA/HENR3-15				8

4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค SEM

ทั้งนี้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA จะใช้เม็ดพลาสติก PLA ในการเป่าฟิล์มโดยตรง ฟิล์มที่เตรียมจาก PE จะทำการผสมเม็ด PE ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดียวก่อนนำไปเป่าฟิล์ม ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะเตรียมจากการคอมพาวนด์ร่วมกันของ PLA และ HENR ตามชนิด และปริมาณของ HENR ที่กำหนด ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดียว และเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ตามลำดับ ก่อนนำเม็ดคอมพาวนด์ที่ได้ไปเป่าฟิล์ม

แต่ทั้งนี้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของ PLA ในส่วนของการหักชิ้นงานจะนำเม็ดพลาสติก PLA มาผ่านเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่เพื่อให้มีลักษณะเป็นเส้น ก่อนนำไปจุ่มแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นจึงทำการหักชิ้นงานเพื่อให้เหมือนกับตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ ที่จะศึกษาสัณฐานวิทยาโดยจะใช้พอลิเมอร์ผสมหลังจากออกจากเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ ซึ่งจะทำให้การเก็บตัวอย่างในลักษณะเส้นเช่นเดียวกัน

ในขณะที่สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ได้มาจากการวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มที่เตรียมจากการนำเม็ดพอลิเมอร์คอมพาวนด์มาเป่าด้วยเครื่องเป่าฟิล์มโดยตรง

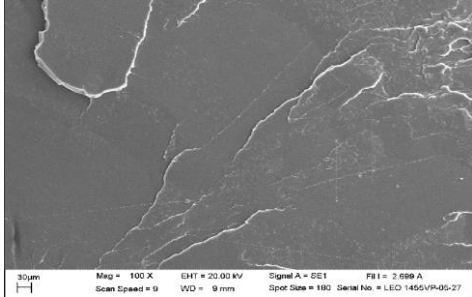
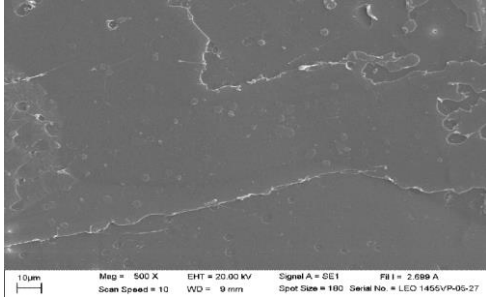
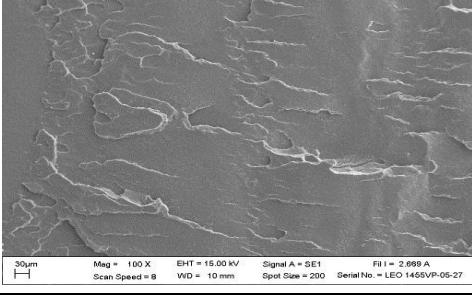
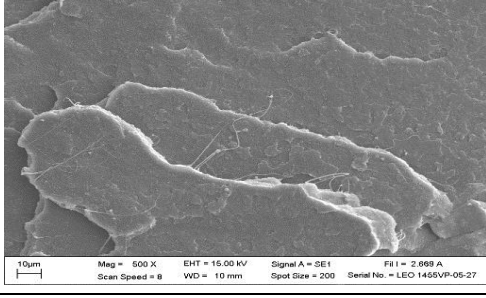
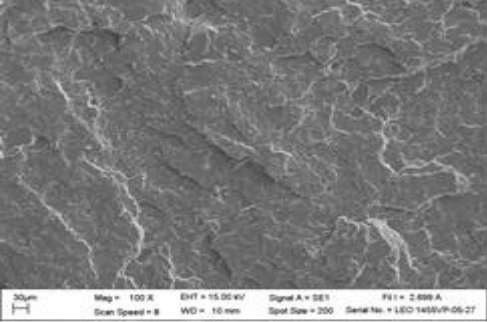
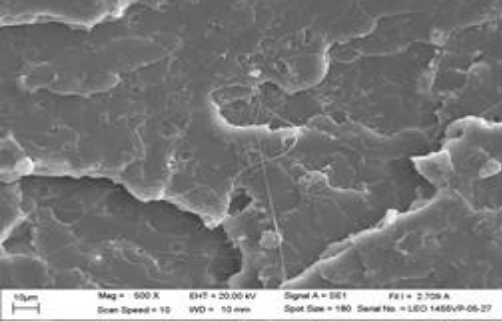
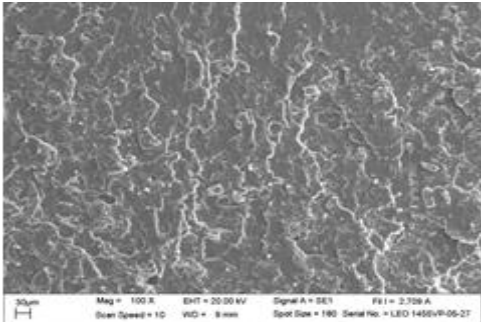
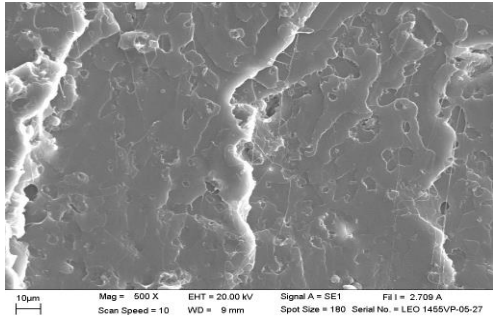
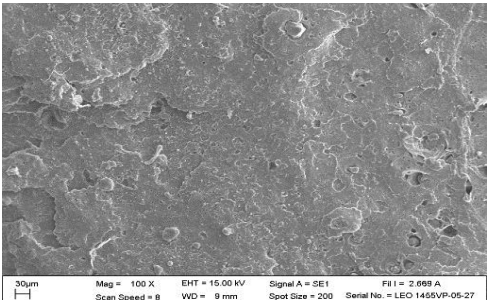
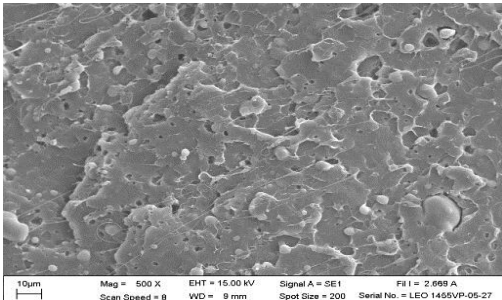
รูป SEM ของพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในตาราง 4.8-4.9

จากรูป SEM ของพอลิเมอร์ผสม (ตาราง 4.8) พบว่า HENR1 ซึ่งมีลักษณะแข็ง เมื่อผสมกับ PLA ในอัตราส่วน PLA:HENR1 = 90:10 ให้ลักษณะการหักของชิ้นงานแบบเปราะ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มกำลังขยายของรูปจะสังเกตเห็นลักษณะการยืดตัวของยางในลักษณะเป็นเส้น (elongate fibrils) ปรากฏแทรกอยู่ตามรอยหักของชิ้นงานบ้างเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณ HENR1 เป็น 15 wt% พบว่าชิ้นงานมีการหักแบบเหนียวเพิ่มขึ้น โดยสังเกตเห็นพื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระมากขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:HENR2 PLA:HENR3 พื้นผิวมีลักษณะขรุขระในทุกอัตราส่วน และมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณยางที่เพิ่มขึ้น

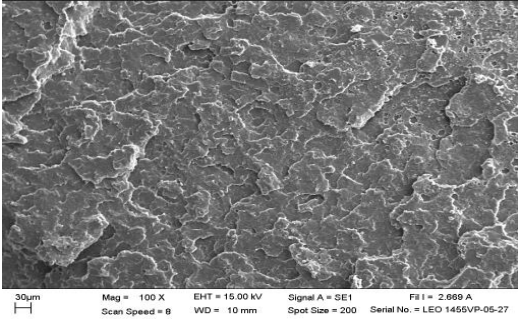
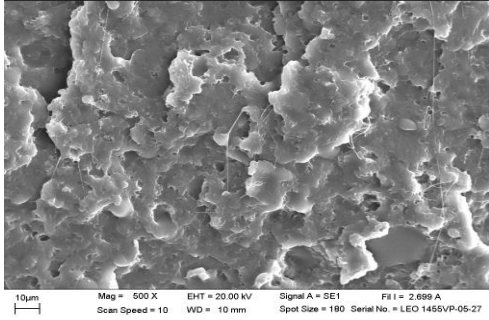
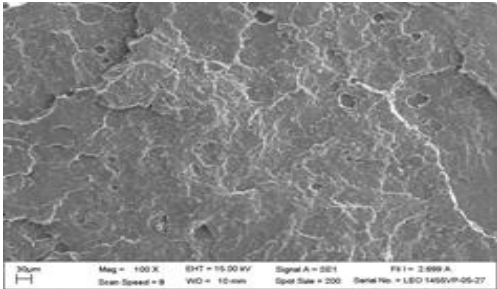
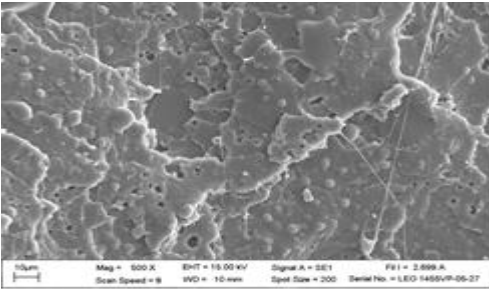
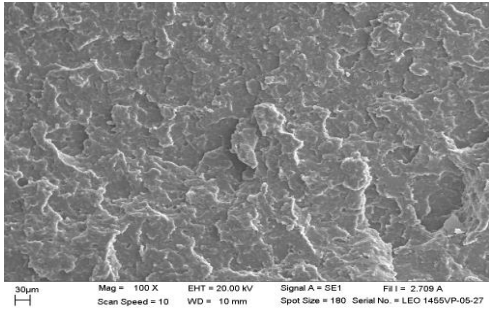
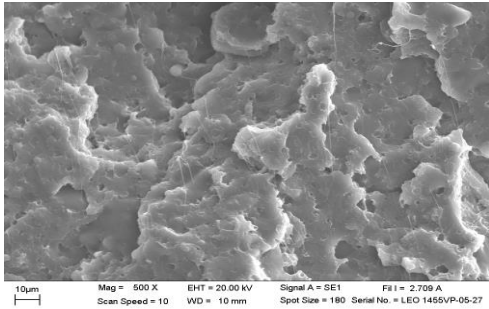
ตาราง 4.9 แสดงรูป SEM ของพื้นผิวฟิล์มที่เตรียมได้จากการเป่า พบว่าพื้นผิวของฟิล์ม PLA และ PE มีลักษณะที่เรียบ มีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 1-5 ไมครอน กระจายอยู่ทั่วไปทั้งชิ้นงาน ในกรณี PLA อนุภาคดังกล่าวอาจเป็นสารเติมแต่งที่บริษัทผู้ผลิตเติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของ PLA เพราะ PLA เกรดที่เลือกใช้เป็นเกรดสำหรับการผลิตถุง ในขณะที่อนุภาคในรูป SEM ของถุง PE น่าจะเป็นไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไปในสูตร

นอกจากนี้ยังพบว่า รูป SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตร (ตาราง 4.9) พบอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งอนุภาคดังกล่าวน่าจะเป็น HENR ในส่วนที่หลอมไม่หมดจากกระบวนการคอมพาวนด์ ทั้งนี้พบว่าสูตรที่มีการเติมยางในอัตราส่วน 10-15 wt% อนุภาคยางที่กระจายตัวดังกล่าวมีขนาดอนุภาคประมาณ 10-20 ไมครอน และพบอนุภาคขนาดใหญ่ (ประมาณ 40 ไมครอน) อยู่ร่วมกับอนุภาคขนาดเล็กเมื่อมีการเติมยางในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (มากกว่า 20 wt%) ซึ่งอนุภาคดังกล่าวมีขนาดเล็กกว่าขนาดของยางเริ่มต้น จึงแสดงให้เห็นว่าสายโซ่พอลิเมอร์ของ HENR บางส่วนสามารถกระจายตัวผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับ PLA ได้ (partially dissolve) แต่กระบวนการผลิตที่ค่อนข้างสั้นทำให้ HENR ไม่สามารถหลอมได้หมด จึงปรากฏ HENR กระจายอยู่ทั่วไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม HENR ที่เหลือดังกล่าวมีขนาดเล็กมาก ฤทธิ์ที่ได้รับในทุกสูตรจึงยังคงมีผิวสัมผัสที่เรียบเนียน

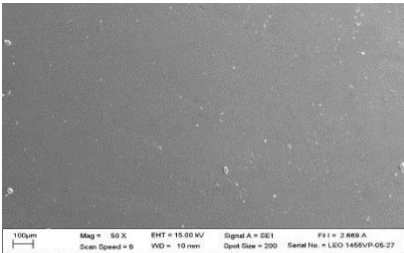
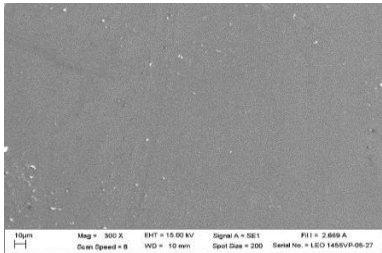
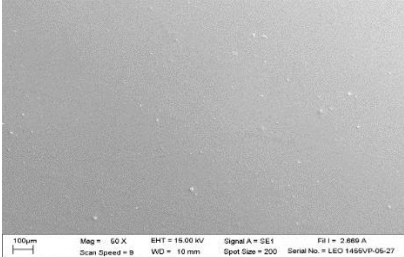
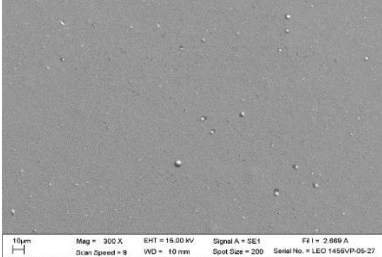
ตาราง 4.8 รูป SEM ของ PLA และพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR) ของผิวหน้าจากการหักชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผสมโดยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ในขั้นตอนสุดท้าย

Samples	100X	500X
PLA	 30µm Mag = 100 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.699 A Scan Speed = 9 WD = 9 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 10µm Mag = 500 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.699 A Scan Speed = 10 WD = 9 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR1-10	 30µm Mag = 100 X EHT = 15.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.699 A Scan Speed = 9 WD = 10 mm Spot Size = 200 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 10µm Mag = 500 X EHT = 15.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.699 A Scan Speed = 8 WD = 10 mm Spot Size = 200 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR1-15	 30µm Mag = 100 X EHT = 15.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.899 A Scan Speed = 8 WD = 10 mm Spot Size = 200 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 10µm Mag = 500 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.739 A Scan Speed = 15 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR2-10	 30µm Mag = 100 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.709 A Scan Speed = 10 WD = 9 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 10µm Mag = 500 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.709 A Scan Speed = 10 WD = 9 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR2-15	 30µm Mag = 100 X EHT = 15.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.699 A Scan Speed = 8 WD = 9 mm Spot Size = 200 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 10µm Mag = 500 X EHT = 15.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.699 A Scan Speed = 8 WD = 9 mm Spot Size = 200 Serial No. = LEO 1455VP-05-27

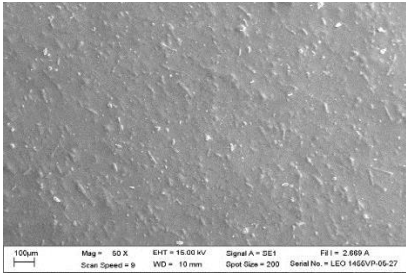
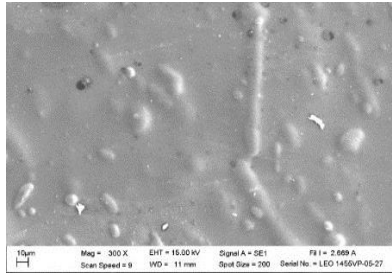
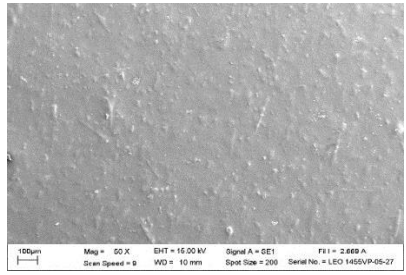
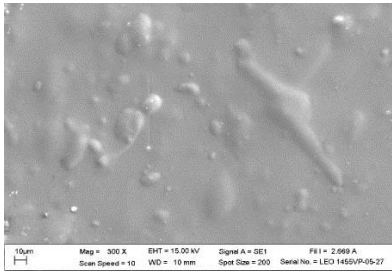
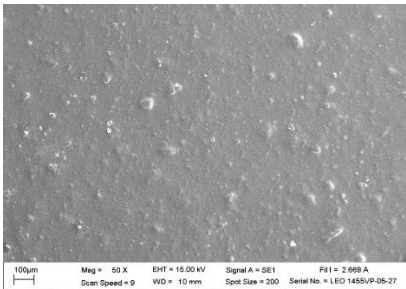
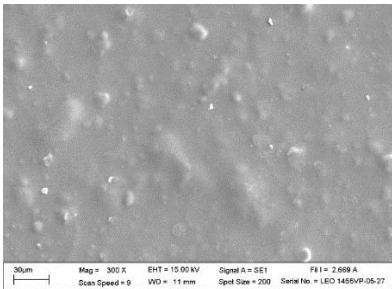
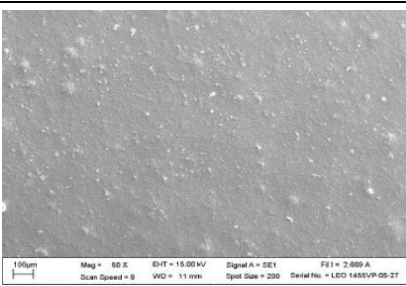
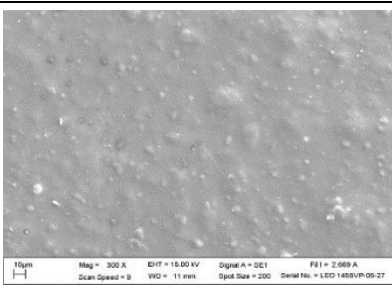
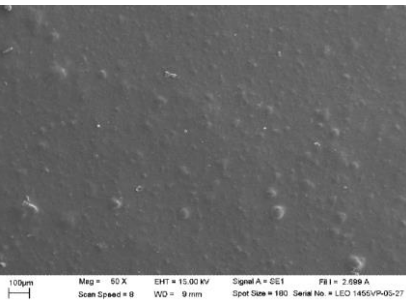
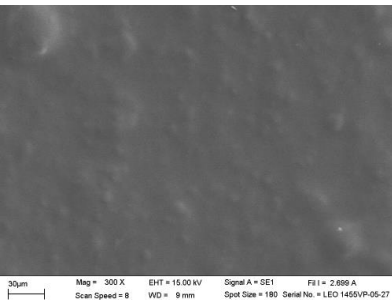
ตาราง 4.8 รูป SEM ของ PLA และพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR) ของผิวหน้าจากการหักชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผสมโดยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ในขั้นตอนสุดท้าย (ต่อ)

Samples	100X	500X
PLA-HENR2-20		
PLA-HENR3-10		
PLA-HENR3-15		

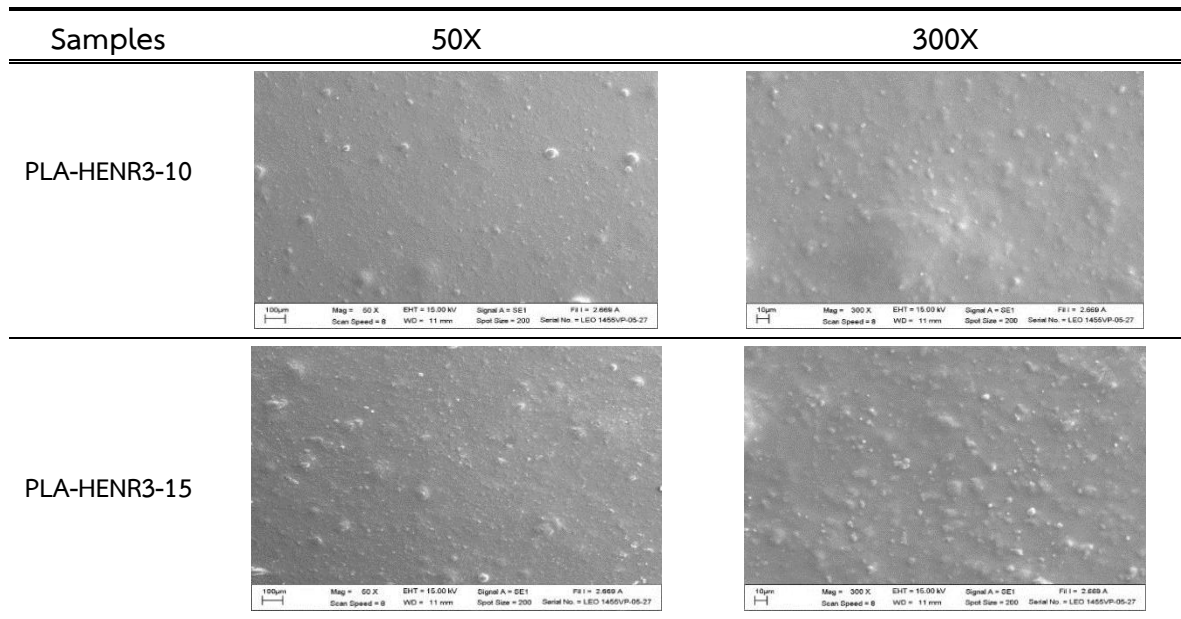
ตาราง 4.9 รูป SEM ของพื้นผิวฟิล์ม PLA, PE และพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR)

Samples	50X	300X
PLA		
PE		

ตาราง 4.9 รูป SEM ของพื้นผิวฟิล์ม PLA, PE และพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR) (ต่อ)

Samples	50X	300X
PLA-HENR1-10		
PLA-HENR1-15		
PLA-HENR2-10		
PLA-HENR2-15		
PLA-HENR2-20		

ตาราง 4.9 รูป SEM ของพื้นผิวฟิล์ม PLA, PE และพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR) (ต่อ)



4.2.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค DSC

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA, PE และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/HENR ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ด้วยเทคนิค DSC (ตาราง 4.10 และ รูป 4.5) พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่า T_g ต่ำกว่าค่า T_g ของฟิล์ม PLA โดยมีค่าต่ำกว่าประมาณ 2-6 °C นอกจากนั้นการผสมร่วมกับ HENR2 และ HENR3 ยังปรากฏ T_g 2 ค่า ซึ่งโดย T_g แรก มีค่าอยู่ระหว่าง T_g ของ HENR และ PLA ซึ่งแสดงถึงการขัดขวางการหมุนของโซ่ของ HENR เนื่องจาก PLA จึงอาจคาดเดาได้ว่า HENR บางส่วนสามารถละลาย (solubilized) เข้ากับ PLA ได้ และอยู่ร่วมกับ PLA แบบ thermodynamic compatible โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนของยางเพิ่มขึ้น [8]

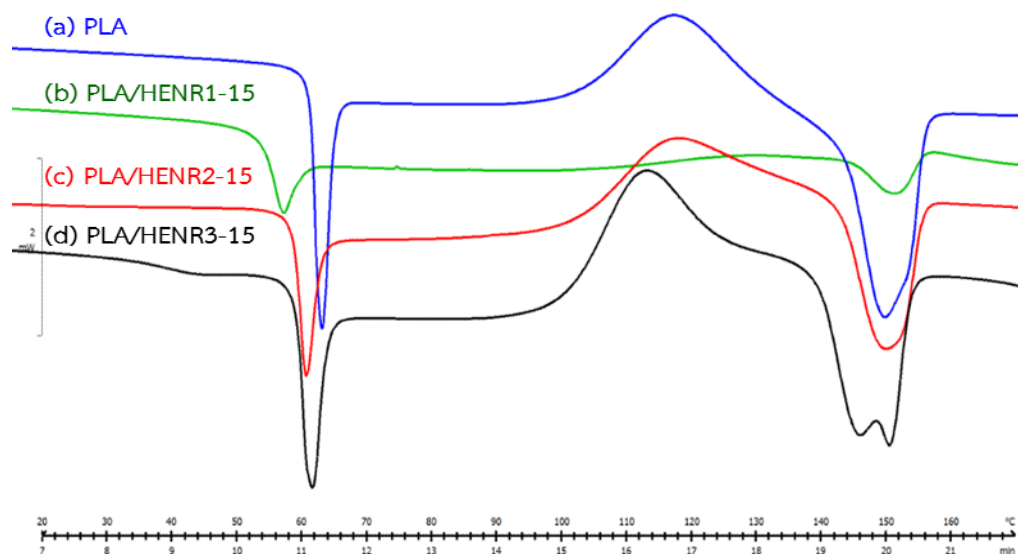
อุณหภูมิการเกิดผลึกแบบ cold crystallization temperature (T_{cc}) ของพอลิเมอร์แสดงถึงการเปลี่ยนสถานะจากอสัณฐานเป็นผลึกในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (heating analysis) ทั้งนี้พบว่า T_{cc} ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจาก T_{cc} ของฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ จึงอาจกล่าวได้ว่าการปรากฏของอนุภาค HENR มีส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกของ PLA ซึ่งผลกระทบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pongtanayut และคณะ [2] ที่พบว่าการผสม PLA ร่วมกับ NR ซึ่งปรากฏการแยกเฟสของ NR ออกจาก PLA ส่งผลต่อการเกิดผลึกของ PLA ในขณะที่ ENR ซึ่งเข้ากับ PLA ได้ดีกว่า (ไม่ปรากฏการแยกเฟส) ไม่พบผลดังกล่าว ซึ่งในงานวิจัยนี้ HENR บางส่วนสามารถละลายเข้ากันได้กับ PLA ในขณะที่ HENR บางส่วนยังคงมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กอยู่ในเมทริกซ์ของ PLA ซึ่งอนุภาคนี้น่าจะมีส่วนสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเกิดผลึกของ PLA นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับการขยับของค่า T_m ซึ่งมีทั้งการปรากฏค่า T_m ที่ลดต่ำลงและการมี T_m 2 ค่า ซึ่งผลดังกล่าวแสดงถึงการเปลี่ยนพอร์มโครงสร้างผลึกของ PLA จาก α พอร์ม เป็นโครงสร้างผสมของ α และ β พอร์ม และการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลกระทบมาจาก HENR ในขั้นตอนการเกิด T_{cc} ของ PLA [9-10]

อย่างไรก็ตามปริมาณผลึกที่คำนวณจากการหักลบกันของ ΔH_m° และ ΔH_{cc}° อาจไม่สามารถใช้ได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโดยทั่วไปยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ซึ่งมีเพียงส่วนอสัณฐานจะปรากฏเพียงค่า T_g (ภาพผนวก ข รูป ผ-2.1 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ -50 – 200°C ของ ENR) ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ HENR ในช่วง -50 – 100°C และรายงานผลเฉพาะค่า T_g ของยาง

HENR (ภาพผนวก ข รูป ผ-2.2) และเมื่อผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพบว่าค่าปริมาณผลึกของ PLA ที่คำนวณตามสมการ 1 ในหัวข้อ 3.5.4 มีค่าติดลบ ซึ่งไม่น่าเป็นไปได้ว่าพลังงานในการเกิดผลึกของ PLA จะมีค่าสูงกว่าพลังงานในการหลอมผลึก ผู้วิจัยจึงนำยาง HENR ไปวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนซ้ำในช่วงอุณหภูมิ $-50 - 200^{\circ}\text{C}$ (ภาพผนวก ข รูป ผ-2.3) พบว่ายาง HENR เกิดพีค exothermic ที่แสดงถึงการสร้างพันธะในช่วงอุณหภูมิ $110 - 200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอาจเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากบนสายโซ่พอลิไอโซพรีนของยาง HENR ซึ่งสัญญาณดังกล่าวอาจบ่งบอกสัญญาณการสร้างผลึก ($\Delta H^{\circ}_{\text{cc}}$) และสัญญาณการหลอมผลึก ($\Delta H^{\circ}_{\text{m}}$) ของ PLA ส่งผลในค่าการคำนวณมีค่าติดลบ

ตาราง 4.10 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA ฟิล์ม PE และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR)

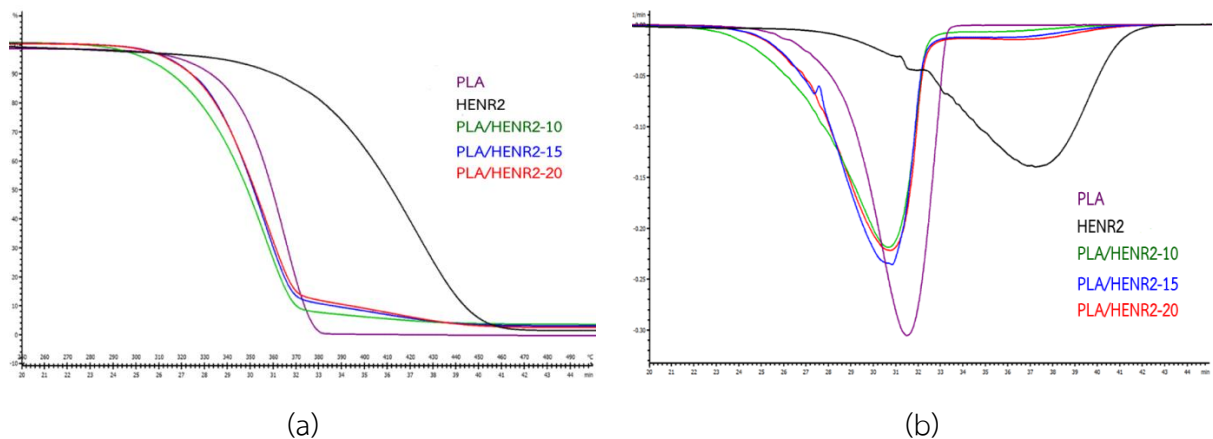
Formulation	$T_{g,\text{midpoint}} (^{\circ}\text{C})$		$T_{\text{cc}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta H^{\circ}_{\text{cc}} (\text{J/g})$	$T_{\text{m}} (^{\circ}\text{C})$		$\Delta H^{\circ}_{\text{m}} (\text{J/g})$	$X_c (\%)$
	$T_{g,\text{minor}}$	$T_{g,\text{main}}$			$T_{\text{m},1}$	$T_{\text{m},2}$		
PLA	-	60.42	117.32	23.28	149.67	-	24.39	1.19
PE	-	-	-	-	106.54	-	75.76	26.12
PLA/HENR1-10	-	58.01	112.16	22.76	147.50	152.34	23.04	0.33
PLA/HENR1-15	-	53.66	127.61	2.38	151.42	-	3.13	0.95
PLA/HENR2-10	31.51	57.05	119.49	25.48	149.22	-	16.39	-10.86
PLA/HENR2-15	21.92	57.87	117.51	24.85	149.91	-	15.52	-11.80
PLA/HENR2-20	2.95	54.41	119.64	14.63	150.68	-	21.17	8.79
PLA/HENR3-10	34.52	57.46	120.33	28.84	149.09	-	15.96	-15.39
PLA/HENR3-15	39.81	58.26	112.83	23.23	145.87	150.36	20.01	-4.07



รูป 4.5 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ $20-170^{\circ}\text{C}$ ของฟิล์มพอลิเมอร์ เมื่อ (a) PLA (b) PLA/HENR1-15 (c) PLA/HENR2-15 และ (d) PLA/HENR3-15

4.2.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค TGA

ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของยางดัดแปรตั้งต้น 3 ชนิด (HENR1 HENR2 และ HENR3) ฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/HENR2 ที่มีปริมาณ HENR2 ต่างๆกัน จากผลการทดลองพบว่าฟิล์ม PLA ปรากฏพีคที่แสดงถึงการลดลงของน้ำหนักเพียงขั้นเดียว (one step of degradation) ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิดเพียงอย่างเดียว โดยมีการสลายตัวเกือบ 100% และมีค่าการสลายตัวเริ่มต้น (T_5) หรือค่าที่แสดงถึงการเกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ไป 5% ที่ 314°C ยางดัดแปรทั้ง 3 สูตร และฟิล์ม PE ปรากฏพีคที่แสดงถึงการลดลงของน้ำหนักเพียงขั้นเดียวเช่นกัน โดยมีค่าอุณหภูมิสลายตัวมากกว่า PLA ประมาณ 50 และ 100°C ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของ PLA/HENR2 ที่มีปริมาณ HENR2 ต่างกัน 3 อัตราส่วน ปรากฏการลดลงของน้ำหนัก 2 ขั้น โดยขั้นแรกเป็นการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 มีอุณหภูมิในการสลายตัวใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ เล็กน้อย ในขณะที่การลดลงของน้ำหนักในขั้นที่ 2 จะเป็นการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ $405 - 415^{\circ}\text{C}$ ซึ่งการสลายตัวในส่วนนี้จะเป็นการสลายตัวของยาง และยางที่เกิดอันตรกิริยาบางส่วนกับ PLA นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการสลายตัวเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ ทั้งนี้จึงอาจกล่าวได้ว่ายางธรรมชาติดัดแปรที่แทรกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA อาจมีส่วนช่วยในการสลายตัวของ PLA ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิที่ต่ำลง (รูป 4.6 และตาราง 4.11)



รูป 4.6 TGA เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ $250-500^{\circ}\text{C}$ เมื่อ (a) TG และ (b) DTG curves ของฟิล์ม PLA และ PLA/HENR ในอัตราส่วนต่างๆ กัน

ตาราง 4.11 ข้อมูลอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์ม PLA, PE และ PLA/HENR ในอัตราส่วนต่างๆ กัน

Samples	On set of degradation temperature, T_5 ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature of degradation ($^{\circ}\text{C}$) and degradation yield (%)		Char at 600°C (%)
		$T_{\text{peak},1}$	$T_{\text{peak},2}$	
PLA	314	359 (99.76%)	-	0.24
PE	420	469.87 (97.71)	-	2.29
HENR1	343	411.58 (98.65)	-	1.35
HENR2	315	415.96 (99.21)	-	0.79

ตาราง 4.11 ข้อมูลอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์ม PLA, PE และ PLA/HENR ในอัตราส่วนต่างๆ กัน (ต่อ)

HENR3	317	406.38 (99.18)	-	0.82
PLA/HENR2-10	292	351 (93.26%)	406 (4.71%)	1.97
PLA/HENR2-15	302	352 (90.02%)	411 (8.44%)	1.44
PLA/HENR2-20	304	351 (88.49)	416 (9.98%)	1.53

4.2.6 น้ำหนักของถุงหลังการทดสอบการใช้งานเบื้องต้น

ซึ่งน้ำหนักของถุงปลูกก่อน และหลังการใช้งาน โดยหลังการใช้งานจะนำวัสดุปลูกออก ล้างทำความสะอาด ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนักของถุงแห้งเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละถุงก่อนนำไปใช้งาน ทั้งนี้ในแต่ละชุดการทดลองจะใช้ตัวอย่างจำนวน 15 ถุง

จากผลการทดลองการเก็บถุงปลูกหลังการใช้งาน 1 เดือน พบว่าบางสูตรมีการลดลงของน้ำหนักถุงไปเล็กน้อย (ตาราง 4.12) ในขณะที่บางสูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก โดยมีค่าน้ำหนักถุงที่เหลืออยู่เฉลี่ย 99.77-100.00% ทั้งนี้แม้ว่าบางสูตรจะเกิดการแตก/ขาดของถุง (สูตร PLA และ PLA/HENR1-10) แต่น้ำหนักของถุงพบว่าเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก จึงอาจกล่าวได้ว่าแม้ว่าถุงปลูกบางสูตรจะเริ่มฉีกขาดเมื่อใช้งานไป 15 วัน – 1 เดือน ซึ่งการฉีกขาดนั้นอาจเกิดจากการกดทับ หรือการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตัดสายโซ่ของ PLA แต่การฉีกขาดหรือการย่อยสลายดังกล่าวยังไม่ส่งผลให้เกิดการหายไปของน้ำหนักของถุงปลูก

ผลดังกล่าวเป็นไปในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ K. Y. Huang และคณะ [4] ซึ่งได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฟิล์ม PLA ที่ผสมยางธรรมชาติ พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PLA ลดลงตั้งแต่ช่วงต้นของการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แต่น้ำหนักของถุงยังคงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และเริ่มสังเกตเห็นการลดลงของน้ำหนักของถุงเมื่อสายโซ่ PLA มีน้ำหนักโมเลกุลเหลือเพียง 20% ของน้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้น

อย่างไรก็ตามหลังการใช้งานมากกว่า 2 เดือน น้ำหนักที่หายไปของถุงพบว่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการหายไปของถุงในขั้นตอนการเก็บและล้างน้ำ ส่งผลให้น้ำหนักที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยลดลง

ตาราง 4.12 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของถุงสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการใช้งาน

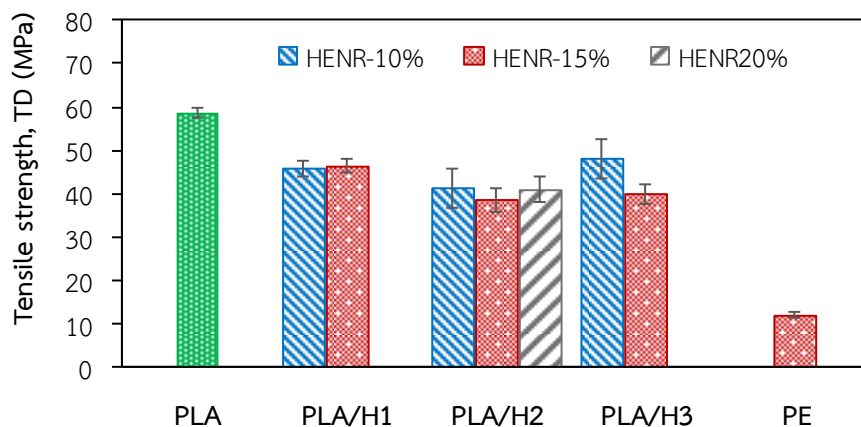
Sample	Residual mass (%)					
	0 day	15 day	1 month	2 month	3 month	4 month
PLA	100.00	99.98 ± 0.08	99.37 ± 0.23	98.85 ± 0.10	97.92 ± 0.45	97.90 ± 0.51
PE	100.00	99.77 ± 0.31	99.12 ± 0.82	98.47 ± 0.53	98.09 ± 0.05	97.91 ± 0.03
PLA/HENR1-10	100.00	99.96 ± 0.07	99.31 ± 0.46	98.48 ± 0.37	97.96 ± 0.72	96.62 ± 0.53
PLA/HENR1-15	100.00	99.86 ± 0.13	99.61 ± 0.35	98.70 ± 0.63	96.86 ± 0.47	95.62 ± 0.33
PLA/HENR2-10	100.00	99.86 ± 0.52	99.14 ± 0.29	98.67 ± 0.49	98.08 ± 0.15	96.54 ± 0.21
PLA/HENR2-15	100.00	100.00 ± 0.00	99.95 ± 0.56	99.81 ± 0.10	98.91 ± 0.48	97.58 ± 0.27
PLA/HENR2-20	100.00	99.85 ± 0.18	99.15 ± 0.53	98.52 ± 0.71	97.62 ± 0.94	96.46 ± 0.12
PLA/HENR3-10	100.00	99.85 ± 0.37	98.95 ± 0.86	98.24 ± 0.72	96.92 ± 0.68	96.21 ± 0.42
PLA/HENR3-15	100.00	100.00 ± 0.00	99.92 ± 0.17	99.24 ± 0.63	98.80 ± 0.52	98.10 ± 0.07

4.2.7 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์

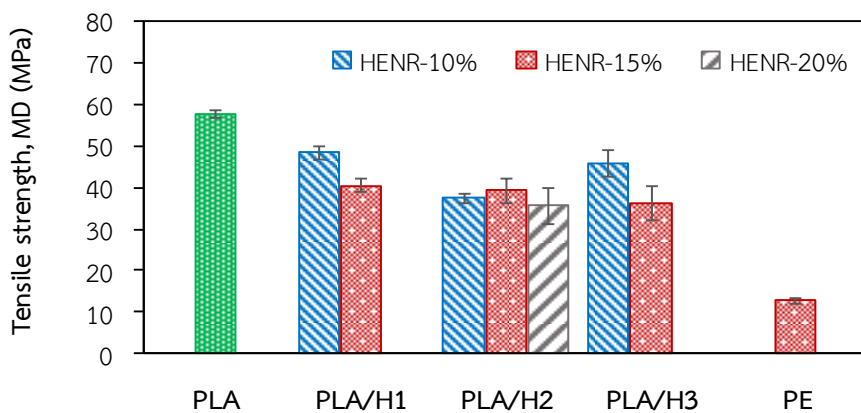
ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงทั้งก่อนและหลังการใช้งานเป็นเวลาต่างๆ กัน โดยตัดชิ้นงานในตำแหน่งที่ต่ำกว่ารอยเจาะ (ส่วนที่เกิดน้ำขังเมื่อทำการรดน้ำ) ทั้งในแนวนอน (Transverse direction, TD) และแนวตั้ง (Machine direction, MD) ของถุงโดยใช้หัวโหลด 1 kN ด้วยอัตราเร็วคงที่ 50 mm/min

รูป 4.7 และตาราง 4.13 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงที่เตรียมจาก PLA, PE และ PLA/HENR ก่อนการใช้งานเป็นถุงปลูก ทั้งนี้ในรูป 4.7 (c) และ (d) ได้ตัดค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของ PE ออกไปเนื่องจากถุงที่เตรียมจาก PE มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงมาก (460-470%) ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของถุงสูตรอื่นๆ เป็นไปได้ยาก

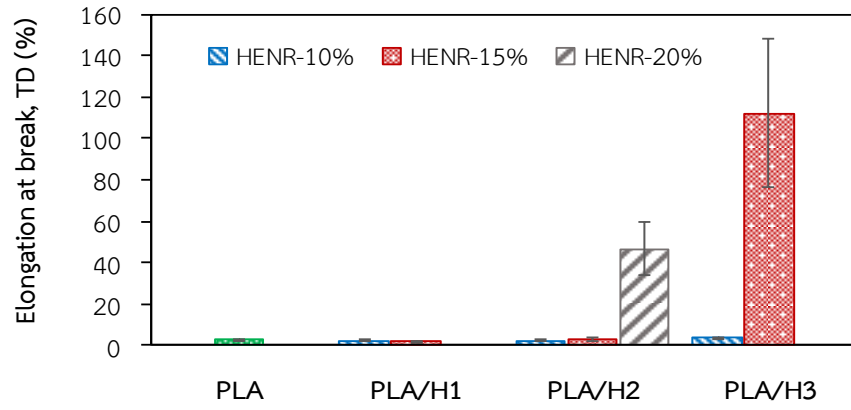
จากผลการทดลองพบว่าการเติมยางดัดแปร HENR ลงไปผสมร่วมกับ PLA ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของถุงมีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงจาก 57-58 MPa เป็น 35-48 MPa ขึ้นกับชนิด และ อัตราส่วนของยาง HENR โดยมีค่ามอดุลัสของยังใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีค่าการทนต่อแรงดึง และมอดุลัสของยังสูงกว่าถุงที่เตรียมจาก PE นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม HENR1 และ HENR2 ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์จำนวนมาก ในอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม 10 wt% และ 15 wt% ไม่ได้มีส่วนช่วยให้ฟิล์มมีการยืดตัวดีขึ้น แต่ HENR 2 ซึ่งมีหมู่เอพอกไซด์ในโครงสร้างผสมอยู่ร่วมกับหมู่ไฮดรอกซิล ในอัตราส่วน 20 wt% และ HENR3 ซึ่งมีหมู่เอพอกไซด์ในโครงสร้างมากที่สุด ในอัตราส่วน 15 wt% พบว่าสามารถช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยืดตัวออกได้ 47-64% และ 112-120% ตามลำดับ



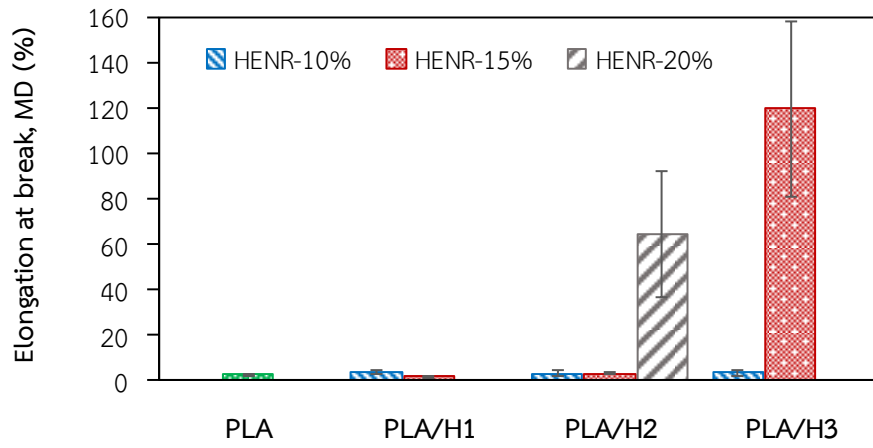
(a)



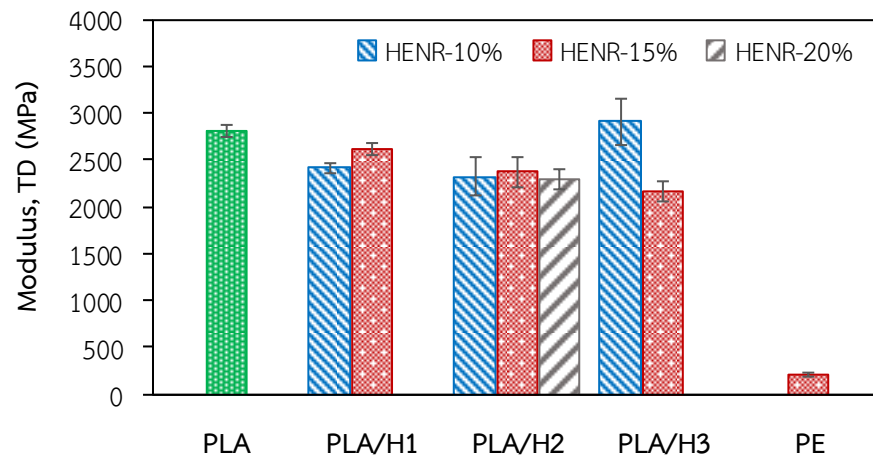
(b)



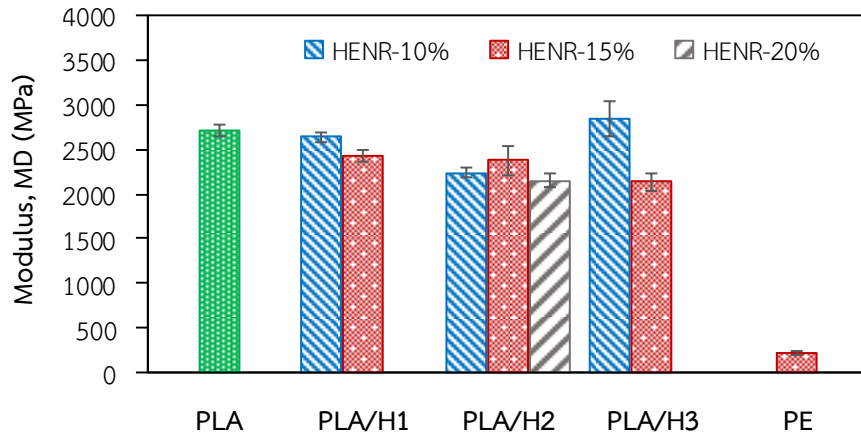
(c)



(d)



(e)



(f)

รูป 4.7 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA, PE และ PLA/HENR ก่อนการใช้งานในทิศ TD และทิศ MD เมื่อ (a), (b) ความต้านทานแรงดึง (c), (d) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ (e), (f) มอดุลัสของยัง

ตาราง 4.13 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA, PE และ PLA/HENR ก่อนการใช้งาน

Sample	Transvers direction, TD			Machine direction, MD		
	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Modulus (MPa)
PLA	58.54 ± 1.10	2.85 ± 0.32	2812 ± 68	57.43 ± 0.89	2.81 ± 0.39	2719 ± 64
PE	12.07 ± 0.89	473.50 ± 42.79	201 ± 21	12.76 ± 0.68	463.50 ± 37.37	221 ± 17
PLA/HENR1-10	45.85 ± 1.80	2.43 ± 0.34	2421 ± 55	48.42 ± 1.55	3.50 ± 1.00	2638 ± 55
PLA/HENR1-15	46.42 ± 1.59	2.06 ± 0.09	2613 ± 72	40.36 ± 1.53	2.08 ± 0.18	2428 ± 57
PLA/HENR2-10	41.38 ± 4.58	2.33 ± 0.23	2322 ± 207	37.36 ± 1.04	3.21 ± 1.33	2234 ± 54
PLA/HENR2-15	38.37 ± 2.70	2.93 ± 0.48	2373 ± 155	39.17 ± 3.05	3.09 ± 0.37	2374 ± 166
PLA/HENR2-20	40.97 ± 2.84	46.59 ± 12.72	2289 ± 113	35.61 ± 4.31	64.11 ± 27.61	2149 ± 77
PLA/HENR3-10	48.01 ± 4.54	3.47 ± 0.62	2909 ± 252	45.56 ± 3.19	3.35 ± 1.21	2843 ± 197
PLA/HENR3-15	39.91 ± 2.30	112.25 ± 36.00	2170 ± 103	36.18 ± 4.16	119.69 ± 28.55	2138 ± 95

ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงหลังการใช้งานเป็นเวลาต่างๆ ดังแสดงในตาราง 4.14 ทั้งนี้การทดสอบในส่วนนี้มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

ในส่วนของถุง PLA พบว่าถุงเริ่มเกิดการปริแตก เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลา 15 วัน และพบการแตกของถุงมากขึ้น ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยในเดือนที่ 3 ไม่สามารถคงลักษณะของถุงได้ จึงไม่สามารถเตรียมตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการทดสอบในส่วนนี้ได้ นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของถุงหลังทดสอบการใช้งาน 15 วัน และ 1 เดือน มีค่าน้อยกว่า 2 เดือนค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในช่วงต้นของการทดลองเครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึงยังติดตั้งไม่แล้วเสร็จ ผู้วิจัยจึงได้เก็บตัวอย่างไว้รอทดสอบ ซึ่งได้ทำการทดสอบในช่วงเดียวกับถุงที่ผ่านการทดสอบการใช้งาน 2 เดือน ซึ่งผู้วิจัยพบว่าถุงที่ผ่านการใช้งาน 2 เดือนแล้วทำการ

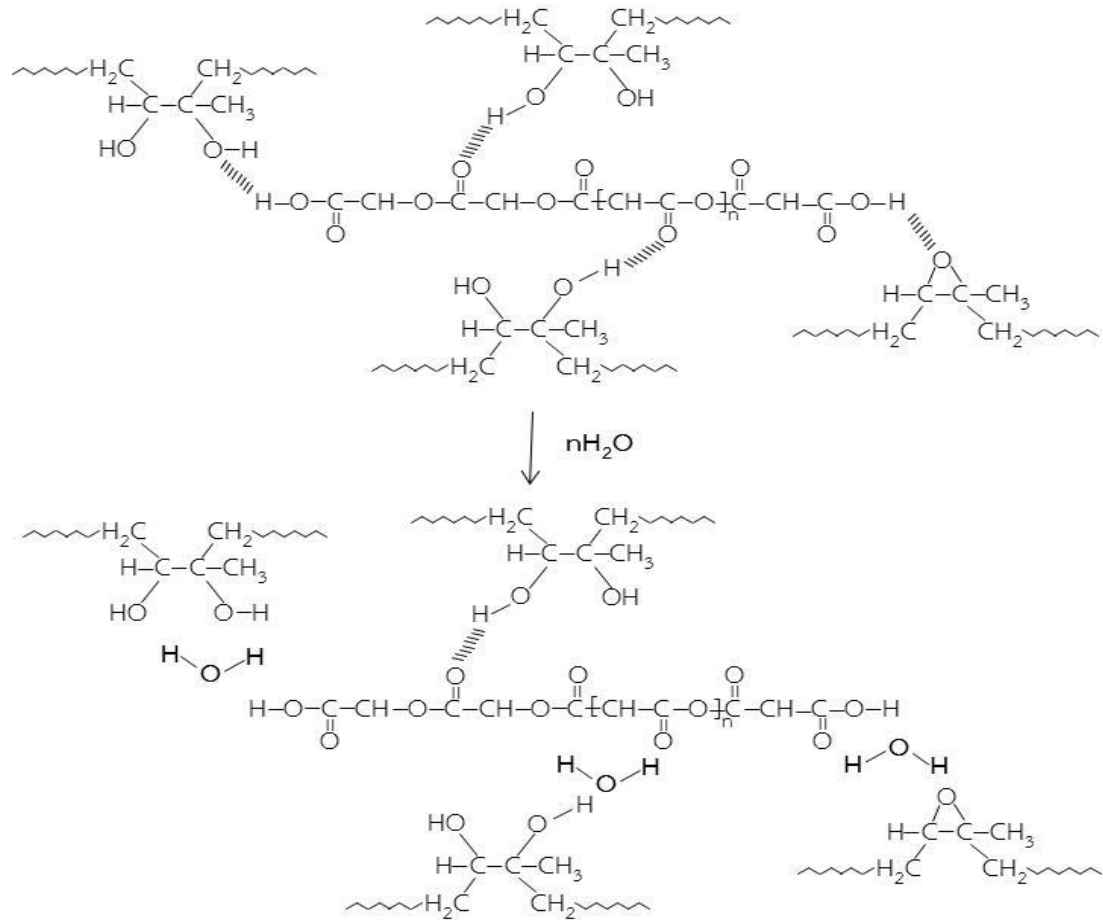
ทดสอบทันที ค่าความต้านทานแรงดึงยังคงมีค่าสูง แต่หลังจากการใช้งาน 15 วัน และ 1 เดือน และมีการเก็บไว้ระยะเวลาหนึ่ง (ประมาณ 1-2 เดือน) ก่อนนำมาทดสอบ กระจกมีลักษณะเปราะมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของกระจกที่ผ่านการใช้งาน 15 วัน และ 1 เดือน ต่ำกว่ากระจกที่ผ่านการใช้งาน 2 เดือน ทั้งนี้ผู้วิจัยไม่ได้ทำการทดลองในส่วนนี้ซ้ำเพราะกระจก PLA ให้สมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ในขณะที่กระจกสูตรอื่นๆ ที่เก็บไว้เช่นเดียวกับกระจก PLA ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมใหม่ทั้งหมด เพื่อลดความผิดพลาดจากการเก็บกระจกไว้นานก่อนการทดสอบ

กระจกที่เตรียมจาก PE พบว่าตลอดระยะเวลาปลูกมีการเปลี่ยนแปลงค่าการทนต่อแรงดึง ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังน้อยมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่า T_g ที่ต่ำ สมบัติที่ย่อยสลายได้ยาก และความไม่ชอบน้ำของโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนสายยาวของ PE จึงทำให้ทนต่อการใช้งาน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระจกขึ้นตลอดระยะเวลาการทดสอบ

กระจกที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR) พบว่ากระจกที่ผสมยาง HENR ที่ผ่านการใช้งาน 15 วัน และ 1 เดือน มีค่าสมบัติการทนต่อแรงดึง ทั้งค่าการทนต่อแรงดึง ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด และโมดูลัสของยัง ไม่ต่างกับค่าการทนต่อแรงดึงของกระจกก่อนปลูกมากนัก ยกเว้นสูตร PLA/HENR2-20 และ PLA/HENR3-15 ที่หลังใช้งานค่าความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกับสูตรอื่น ทั้งนี้จากการสังเกตพบว่ากระจกขณะใช้งานและเปียก กระจกมีการยืดตัวดีพอสมควร แต่เมื่อล้างทำความสะอาด และผึ่งแห้งพบว่ากระจกยืดตัวได้น้อยลงมาก ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าขณะใช้งาน น้ำปุ๋ยซึ่งมีไอออนของสารจำนวนมาก ทั้งยังมีสถานะที่เป็นกรด อาจทำลายแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของยางกับหมู่คาร์บอนิลของ PLA แต่ในขณะที่ใช้งานโมเลกุลยังสามารถขยับได้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PLA และ HENR ทำให้กระจกยังคงใช้งาน และรับแรงกดจากวัสดุปลูกได้ดีกว่าสูตรอื่นๆ ซึ่งดูได้จากการแตกตัวที่น้อยกว่าในตำแหน่งกดทับ ในระยะเวลาการใช้งานที่เท่ากัน แต่เมื่อขึ้นงานแห้ง รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่าง PLA กับ HENR ที่ถูกทำลายไปเนื่องจากน้ำ จึงทำให้ฟิล์มแห้งยืดตัวเหมือนกระจก PLA ปกติที่ยืดตัวออกได้น้อยมาก ทั้งนี้ผลการทดสอบได้รายงานเพียง 3 เดือนเนื่องจากเดือนที่ 4 กระจกมีการปริแตกเกือบทั้งหมด ไม่สามารถทดลองต่อได้

รูป 4.8 แสดงการคาดเดาอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอพอกไซด์ของยางกับหมู่คาร์บอนิลและหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายของ PLA ก่อนและหลังการรดน้ำ ซึ่งก่อนการทดลองปลูก กระจกมีการยืดตัวที่ดีเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่าง PLA กับ HENR แต่เมื่อมีการใช้งาน (รดน้ำ) อันตรกิริยาดังกล่าวบางส่วนถูกทำลายลง ทำให้กระจกไม่สามารถแสดงพฤติกรรมการยืดตัวซึ่งเป็นสมบัติของยางธรรมชาติได้อีก

อย่างไรก็ตามแม้ว่ากระจกที่ผสม HENR จะเกิดการปริแตกทั้งหมด ซึ่งการปริแตกที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเกิดบริเวณรอบพับและรอยกดทับ แต่การคงสภาพของกระจกโดยเฉพาะการผสมร่วมกับ HENR2 และ HENR2 ยังคงสภาพดี กระจกยังมีค่าการทนต่อแรงดึงที่ดี จึงอาจกล่าวได้ว่า HENR สามารถช่วยลดการย่อยสลายตัวของ PLA เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำปุ๋ยได้



รูป 4.8 การคาดเดาอันตรกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อีพอกไซด์ของ HENR กับ หมู่คาร์บอนิลและหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายของ PLA และการเกิดอันตรกิริยาใหม่ร่วมกับน้ำ

ตาราง 4.14 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA, PE และ PLA/HENR ก่อนและหลังการใช้งานเป็นเวลา ต่างๆ กัน

Sample	ระยะเวลาใช้งาน (เดือน)					
		0	0.5	1	2	3
PLA	TS, TD (MPa)	58.54 ± 1.10	28.40 ± 6.90	23.58 ± 9.69	15.08 ± 4.08	-
	TS, MD (MPa)	57.43 ± 0.89	29.20 ± 9.64	27.20 ± 5.97	13.27 ± 3.36	-
	Eb, TD (%)	2.85 ± 0.32	1.55 ± 0.43	0.82 ± 0.35	1.52 ± 0.36	-
	Eb, MD (%)	2.81 ± 0.39	1.24 ± 0.37	1.23 ± 0.50	1.55 ± 0.22	-
	Modulus, TD	2812 ± 68	2980 ± 501	3013 ± 173	2650 ± 237	-
	Modulus, MD	2719 ± 64	2704 ± 591	28312 ± 382	2991 ± 281	-
PE	TS, TD (MPa)	12.07 ± 0.89	12.96 ± 1.52	12.67 ± 1.81	14.05 ± 1.47	12.52 ± 1.18
	TS, MD (MPa)	12.76 ± 0.68	11.83 ± 1.51	11.39 ± 1.56	12.64 ± 1.63	10.40 ± 1.27
	Eb, TD (%)	473.50 ± 42.79	502.38 ± 44.44	489.80 ± 58.26	471.40 ± 38.09	485.70 ± 51.51
	Eb, MD (%)	463.50 ± 37.37	395.50 ± 59.04	388.29 ± 69.32	461.80 ± 57.06	293.43 ± 60.55
	Modulus, TD	201 ± 21	213 ± 5	213 ± 9	241 ± 17	237 ± 21
	Modulus, MD	221 ± 17	234 ± 14	221 ± 12	226 ± 28	230 ± 15

ตาราง 4.14 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA, PE และ PLA/HENR ก่อนและหลังการใช้งานเป็นเวลาต่างๆ กัน (ต่อ)

Sample		ระยะเวลาใช้งาน (เดือน)				
		0	0.5	1	2	3
PLA/HENR1-10	TS, TD (MPa)	45.85 ± 1.80	41.38 ± 4.58	42.96 ± 4.66	37.03 ± 6.82	-
	TS, MD (MPa)	48.42 ± 1.55	44.23 ± 6.17	29.66 ± 5.77	33.56 ± 5.86	-
	Eb, TD (%)	2.43 ± 0.34	2.33 ± 0.23	1.72 ± 0.15	1.83 ± 0.38	-
	Eb, MD (%)	3.50 ± 1.00	2.64 ± 0.50	1.32 ± 0.20	1.51 ± 0.32	-
	Modulus, TD	2421 ± 55	2322 ± 157	2798 ± 220	2660 ± 194	-
	Modulus, MD	2638 ± 55	2644 ± 427	2569 ± 113	2674 ± 169	-
PLA/HENR1-15	TS, TD (MPa)	46.42 ± 1.59	41.16 ± 4.97	29.79 ± 7.05	33.65 ± 4.58	-
	TS, MD (MPa)	40.36 ± 1.53	40.67 ± 2.92	35.00 ± 5.44	34.08 ± 7.49	-
	Eb, TD (%)	2.06 ± 0.09	1.83 ± 0.17	1.91 ± 0.29	1.55 ± 0.22	-
	Eb, MD (%)	2.08 ± 0.18	1.96 ± 0.29	1.85 ± 0.44	2.14 ± 0.68	-
	Modulus, TD	2613 ± 72	2839 ± 313	2123 ± 262	2428 ± 126	-
	Modulus, MD	2428 ± 57	2474 ± 247	2447 ± 260	2504 ± 151	-
PLA/HENR2-10	TS, TD (MPa)	41.38 ± 4.58	40.37 ± 5.37	40.86 ± 4.51	40.44 ± 3.33	24.45 ± 7.08
	TS, MD (MPa)	37.36 ± 1.04	43.14 ± 4.92	39.38 ± 3.98	39.21 ± 4.14	26.87 ± 8.90
	Eb, TD (%)	2.33 ± 0.23	2.37 ± 0.21	2.26 ± 0.22	2.15 ± 0.18	1.43 ± 0.57
	Eb, MD (%)	3.21 ± 1.33	2.39 ± 0.39	3.68 ± 1.14	3.04 ± 0.68	1.36 ± 0.31
	Modulus, TD	2322 ± 207	2359 ± 207	2312 ± 221	2340 ± 199	2746 ± 183
	Modulus, MD	2234 ± 54	2500 ± 298	2184 ± 248	2234 ± 247	2579 ± 232
PLA/HENR2-15	TS, TD (MPa)	38.37 ± 2.70	38.50 ± 3.28	43.88 ± 3.20	39.78 ± 4.67	29.24 ± 4.50
	TS, MD (MPa)	39.17 ± 3.05	39.47 ± 3.32	36.94 ± 6.35	32.84 ± 6.44	35.14 ± 3.43
	Eb, TD (%)	2.93 ± 0.48	2.14 ± 0.12	1.86 ± 0.10	1.88 ± 0.21	1.56 ± 0.18
	Eb, MD (%)	3.09 ± 0.37	2.67 ± 0.31	2.10 ± 0.48	1.62 ± 0.20	1.85 ± 0.15
	Modulus, TD	2373 ± 155	1.86 ± 163	2770 ± 224	2598 ± 247	2347 ± 206
	Modulus, MD	2374 ± 166	2286 ± 137	2391 ± 166	2405 ± 219	2514 ± 250
PLA/HENR2-20	TS, TD (MPa)	40.97 ± 2.84	47.76 ± 3.68	46.26 ± 5.48	28.40 ± 3.03	36.91 ± 3.73
	TS, MD (MPa)	35.61 ± 4.31	38.03 ± 3.91	38.82 ± 4.49	37.83 ± 4.59	35.58 ± 5.06
	Eb, TD (%)	46.59 ± 12.72	2.37 ± 0.27	2.27 ± 0.20	2.45 ± 0.32	2.79 ± 0.41
	Eb, MD (%)	64.11 ± 27.61	1.97 ± 0.23	2.25 ± 0.14	2.41 ± 0.40	2.96 ± 0.92
	Modulus, TD	2289 ± 113	2568 ± 128	2575 ± 172	1813 ± 168	2234 ± 225
	Modulus, MD	2149 ± 77	2428 ± 176	2317 ± 207	2290 ± 184	2060 ± 285
PLA/HENR3-10	TS, TD (MPa)	48.01 ± 4.54	39.49 ± 3.30	39.66 ± 3.08	35.89 ± 5.40	35.63 ± 4.66
	TS, MD (MPa)	45.56 ± 3.19	37.83 ± 3.83	34.82 ± 3.95	32.43 ± 4.19	31.96 ± 4.94
	Eb, TD (%)	3.47 ± 0.62	2.26 ± 0.19	2.08 ± 0.19	2.14 ± 0.38	1.71 ± 0.18
	Eb, MD (%)	3.35 ± 1.21	3.18 ± 0.54	2.63 ± 0.60	1.91 ± 0.44	1.59 ± 0.16
	Modulus, TD	2909 ± 252	2263 ± 179	2390 ± 156	2215 ± 286	2448 ± 228
	Modulus, MD	2843 ± 197	2205 ± 246	2076 ± 172	2386 ± 327	2268 ± 316

ตาราง 4.14 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA, PE และ PLA/HENR ก่อนและหลังการใช้งานเป็นเวลาต่างๆ กัน (ต่อ)

Sample		ระยะเวลาใช้งาน (เดือน)				
		0	0.5	1	2	3
PLA/HENR3-15	TS, TD (MPa)	39.91 ± 2.30	42.78 ± 4.45	42.20 ± 3.66	31.46 ± 4.36	28.18 ± 8.26
	TS, MD (MPa)	36.18 ± 4.16	36.94 ± 6.35	36.87 ± 5.69	36.82 ± 5.66	24.63 ± 3.86
	Eb, TD (%)	112.25 ± 36.00	1.84 ± 0.11	1.86 ± 0.07	1.48 ± 0.20	1.52 ± 0.23
	Eb, MD (%)	119.69 ± 28.55	2.29 ± 0.35	2.10 ± 0.41	2.35 ± 0.34	1.23 ± 0.15
	Modulus, TD	2170 ± 103	2733 ± 214	2753 ± 236	2439 ± 230	2419 ± 334
	Modulus, MD	2138 ± 95	2420 ± 152	2453 ± 130	2421 ± 229	2453 ± 146

4.3 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA:HENR ที่ลดขนาด HENR ด้วย ใบมีด

4.3.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และลักษณะพื้นผิว ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังใช้งานเป็นเวลาต่างๆ กัน

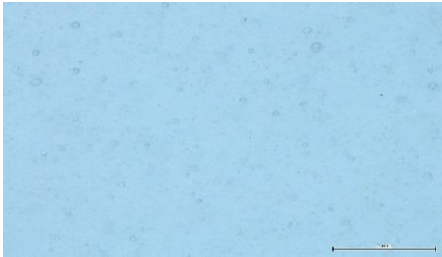
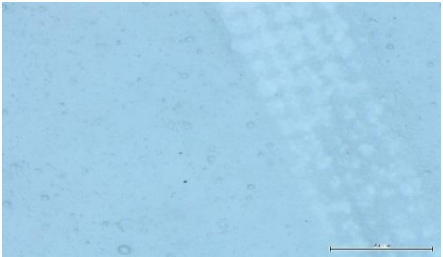
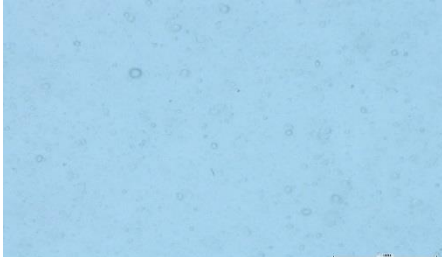
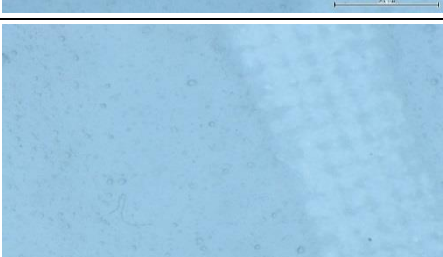
การศึกษาในส่วนนี้เป็นการใช้อย่างตัดแปรร (HENR2 และ HENR3) ที่มีการลดขนาดด้วยใบมีด ด้วยเวลาอันสั้น จากผลการลดขนาดพบว่าการปั่นด้วยใบมีดเป็นเวลาประมาณ 1-2 นาที ต่อครั้ง และประมาณ 5 นาที ต่ออย่างตัดแปรร 100 กรัม พบว่าได้ยางที่มีขนาดเล็ก สามารถร่อนผ่านตะแกรงร่อนได้เช่นเดียวกับการลดขนาดด้วย ball mill ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 วัน นอกจากนี้ยังพบว่ายางที่ได้ยังคงนิ่มกว่ายางที่ลดขนาดด้วย ball mill ส่งผลให้ยางที่เตรียมจากยางที่ลดขนาดด้วยใบมีดมีลักษณะที่นิ่มและเป่าขึ้นรูปได้ง่ายกว่ายางที่เตรียมจากยางที่ลดขนาดด้วย ball mill

ตาราง 4.15-4.19 แสดงรูปพื้นผิวฟิล์มก่อนและหลังการใช้งาน ด้วยกล้องสเตอริโอ กำลังขยาย 2X โดยก่อนใช้งานจะดูเพียง 2 ตำแหน่ง คือพื้นผิว (1) และ รอยขีดของถุง (2) ในขณะที่หลังใช้งานจะสนใจตำแหน่งกดทับเพิ่มเติม จากผลการศึกษาพบว่ารูปถ่ายฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนใช้งานทุกสูตร ทั้ง 2 ตำแหน่ง ไม่ต่างกันมากนัก โดยพื้นผิว (1) และรอยขีด (2) ของทุกถุงมีลักษณะคล้ายอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป

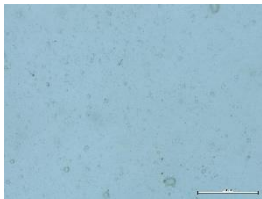
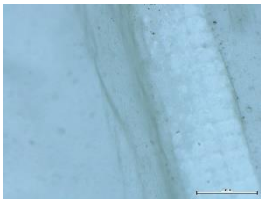
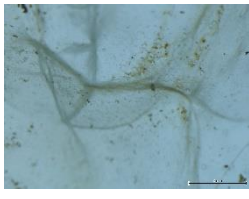
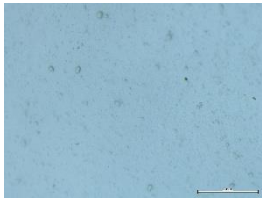
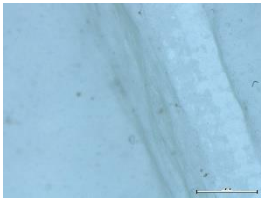
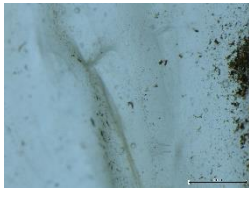
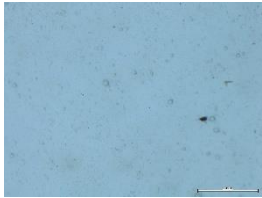
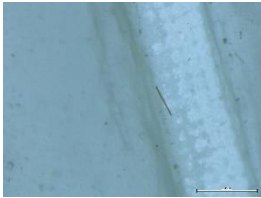
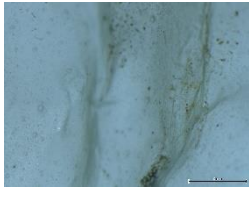
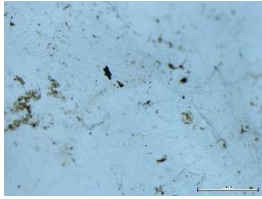
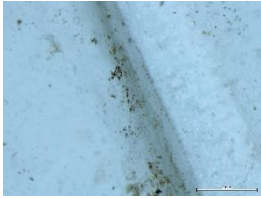
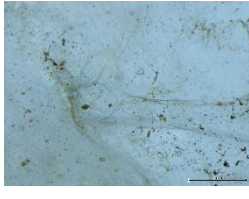
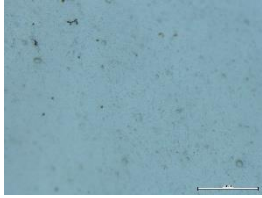
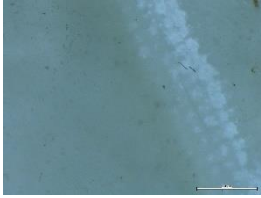
หลังการใช้งาน 15 วัน – 1 เดือน พบว่าถุงทุกสูตร ยังไม่พบการแตกร้าวของถุง (จากถุงทั้งหมด 10 ใบ/สูตร) และเริ่มพบการแตกร้าวของถุง 10% เมื่อผ่านการใช้งานไปนาน 2 เดือนของสูตรที่มี HENR ในปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก ทั้ง HENR2 และ HENR3 ซึ่งการแตกร่วดังกล่าวเกิดบริเวณรอยกดทับของถุง อย่างไรก็ตาม ถุงทุกสูตรพบว่ามี การแตกร้าวเกือบทั้งหมด (70-90%) เมื่อผ่านการใช้งานนาน 3 เดือน

จากผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงคาดเดาว่าสูตรที่มีเฉพาะ HENR แม้ว่าจะช่วยลดการแตกร้าวและย่อยสลายตัวของ PLA จากการใช้งานในสภาวะเปียก (การรดและแช่อยู่ในน้ำปุ๋ย) ได้นั้น แต่ผลดังกล่าวจะไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง จำเป็นต้องมีการเติมสารตัวเติมอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้น ถุงสูตรที่ใช้สำหรับทดลองปลูกจริงที่โครงการหลวงจึงเป็นสูตรที่มีการเติมสารเติมแต่งเพิ่มเติม

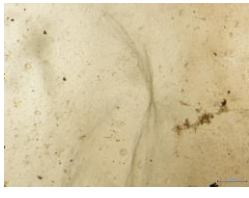
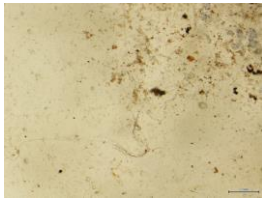
ตาราง 4.15 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA/HENR สูตรต่างๆ ก่อนการใช้งาน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)
PLA-HENR2-15		
PLA-HENR2-20		
PLA-HENR3-15		
PLA-HENR3-20		
PLA-HENR3-25		

ตาราง 4.16 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 15 วัน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA-HENR2-15				0
PLA-HENR2-20				0
PLA-HENR3-15				0
PLA-HENR3-20				0
PLA-HENR3-25				0

ตาราง 4.17 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 1 เดือน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA-HENR2-15				0
PLA-HENR2-20				0

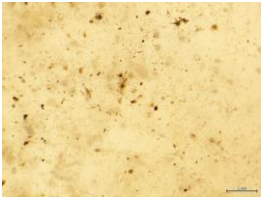
ตาราง 4.17 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 1 เดือน (ต่อ)

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA-HENR3-15				0
PLA-HENR3-20				0
PLA-HENR3-25				0

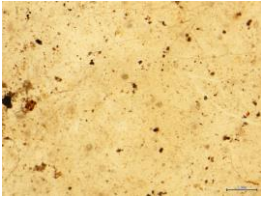
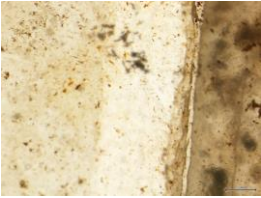
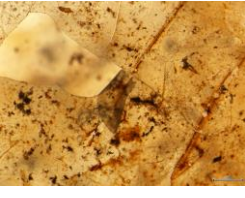
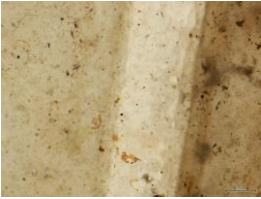
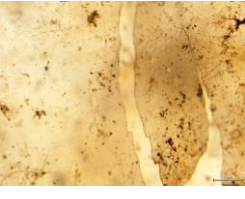
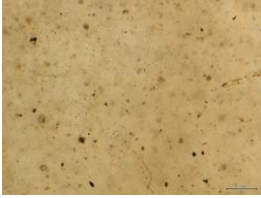
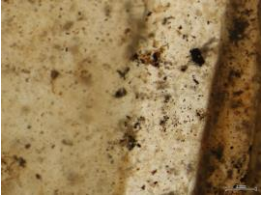
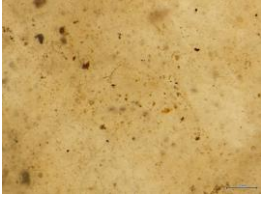
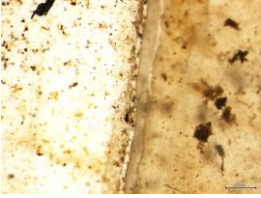
ตาราง 4.18 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 2 เดือน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA-HENR2-15				1
PLA-HENR2-20				0
PLA-HENR3-15				1
PLA-HENR3-20				0

ตาราง 4.18 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 2 เดือน (ต่อ)

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA-HENR3-25				0

ตาราง 4.19 รูปถ่ายพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ของ PLA/HENR สูตรต่างๆ หลังใช้งาน 3 เดือน

สูตร	ตำแหน่งพื้นผิว (1)	ตำแหน่งรอยขีดของถุง (2)	ตำแหน่งกดทับ (3)	จำนวนถุง แตก/รั่ว
PLA-HENR2-15				9
PLA-HENR2-20				7
PLA-HENR3-15				8
PLA-HENR3-20				8
PLA-HENR3-25				9

4.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค SEM

รูป SEM ของพอลิเมอร์ผสม และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในตาราง 4.20-4.21

จากรูป SEM ของพอลิเมอร์ผสม (ตาราง 4.20) พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรพื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระ และสังเกตเห็นการยึดตัวของยางเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะสูตรที่ผสมร่วมกับ HENR3 นอกจากนี้ยังพบว่า ชิ้นงานที่เตรียมจาก HENR ที่ลดขนาดด้วยโม่มีดจะสังเกตเห็นการยึดตัวของเฟสยาง (elongated fibrile) ใน ชิ้นงานเมื่อหักมากกว่าการใช้ HENR ตัวเดียวกัน แต่ลดขนาดด้วย ball mill ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลดขนาด ด้วย ball mill เป็นเวลานาน ทำให้ยางมีการสะสมความร้อน เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทำให้สมบัติ ด้านความยืดหยุ่นของยางเริ่มต้นเสียไป ในขณะที่การลดขนาดด้วยโม่มีดมีผลการทนต่อการเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างน้อยมาก

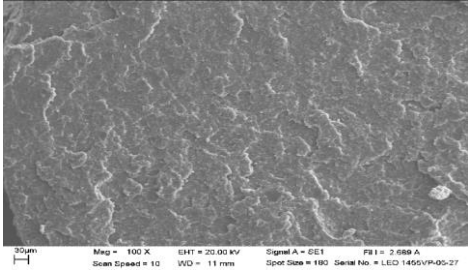
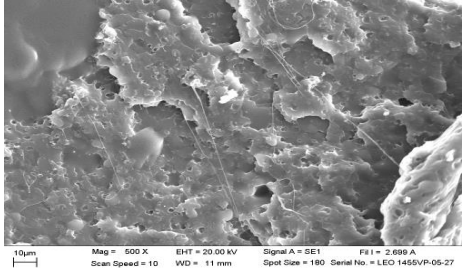
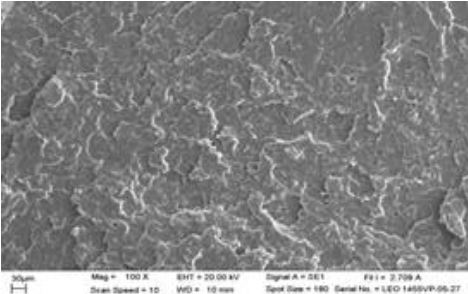
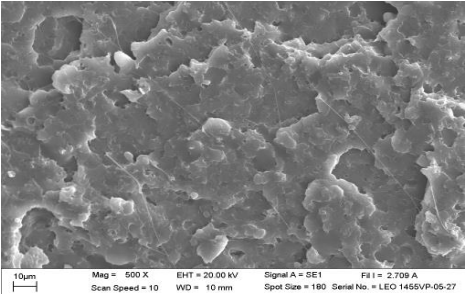
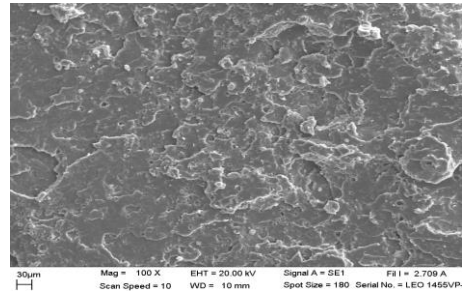
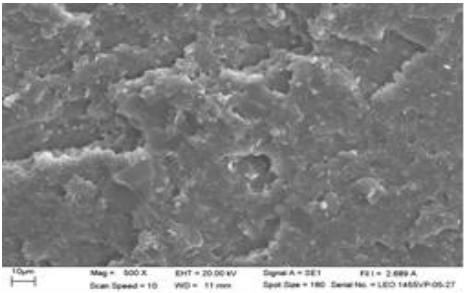
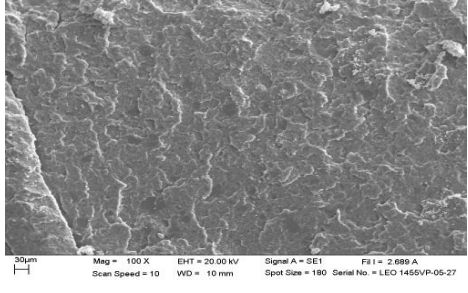
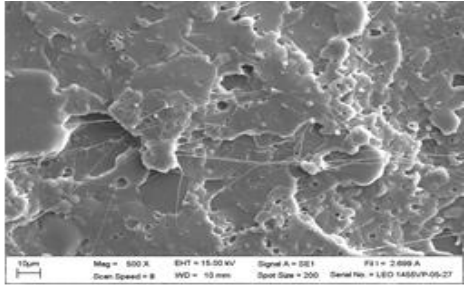
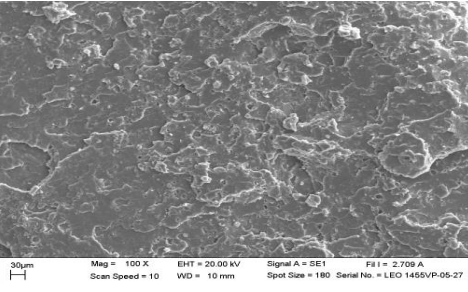
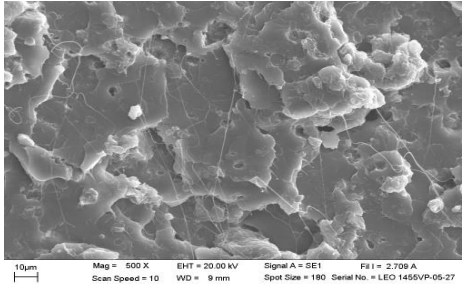
ตาราง 4.21 แสดงรูป SEM ของพื้นผิวฟิล์มที่เตรียมได้จากการเป่า พบว่าพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ ผสมยังคงมีอนุภาคยางขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม โดยอนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อผสมยางในปริมาณ ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม HENR ที่กระจายตัวดังกล่าวมีขนาดเล็กมาก ถูที่ได้รับในทุกสูตรจึงยังคงมีผิวสัมผัสที่ เรียบเนียน

4.3.3 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์

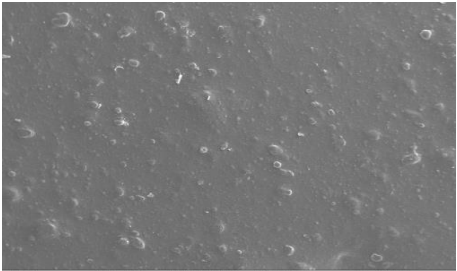
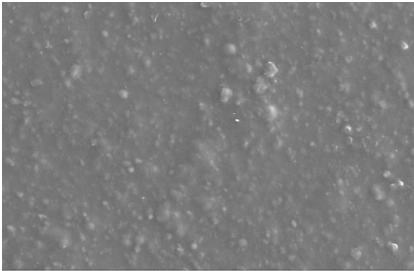
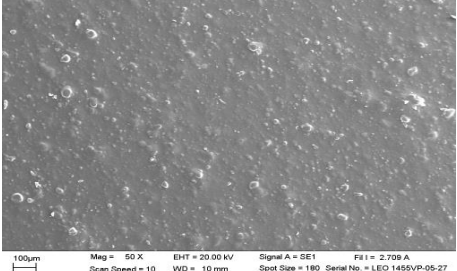
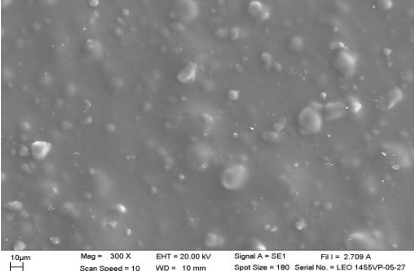
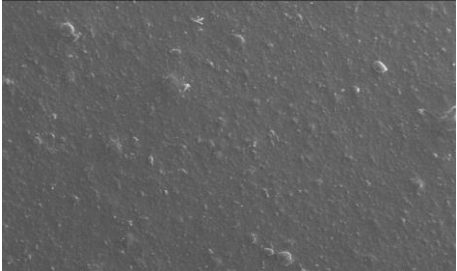
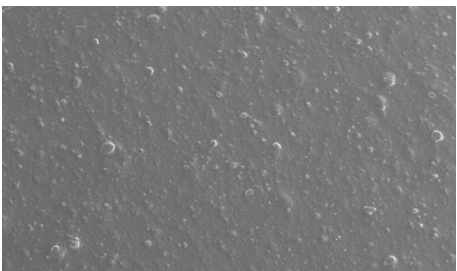
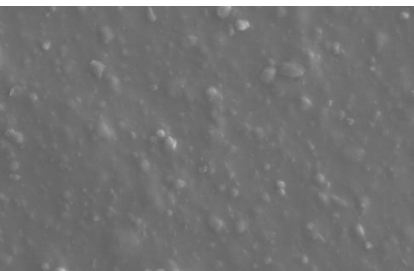
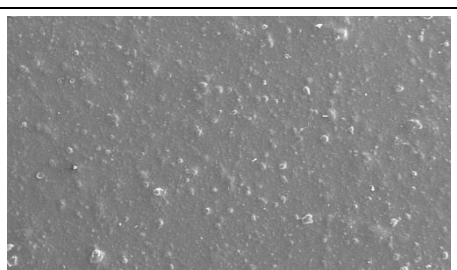
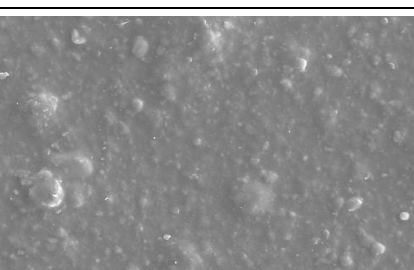
ศึกษาสมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/HENR2 และ PLA/HENR3 ในอัตราส่วน HENR ต่างกัน โดยใช้ HENR ที่ลดขนาดด้วยโม่มีด จากผลการทดลองพบว่าสมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มทุก สูตรในทั้ง 2 ทิศทาง มีค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสของยังใกล้เคียงกัน โดยมีค่าระหว่าง 33-40 MPa และ 1750-2200 MPa ตามลำดับ แต่มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ที่แตกต่างกัน โดยการผสม HENR3 พบว่า ช่วยเพิ่มการยึดตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของ PLA ได้ดีกว่า HENR2 และปริมาณ HENR เพิ่มขึ้น (15-20 wt%) พบว่าฟิล์มมีการยึดตัวได้เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ HENR ที่มากเกินไป (25 wt%) ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ยึดตัวได้น้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณยางส่วนที่ไม่ละลายเข้ากับ PLA บริเวณพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ชิ้นงานเกิดการขาดบริเวณเฟสของยางและ PLA ได้ง่ายขึ้น และฟิล์มในแนวตั้ง (Machine direction, MD) พบว่าสามารถยึดตัวได้ดีกว่าฟิล์มในแนวนอน (Transverse direction, TD) เล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม ที่เตรียมจาก HENR ที่ลดขนาดด้วยโม่มีดมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงกว่าฟิล์มที่เตรียมจาก HENR ที่ลด ขนาดด้วย ball mill (รูป 4.9)

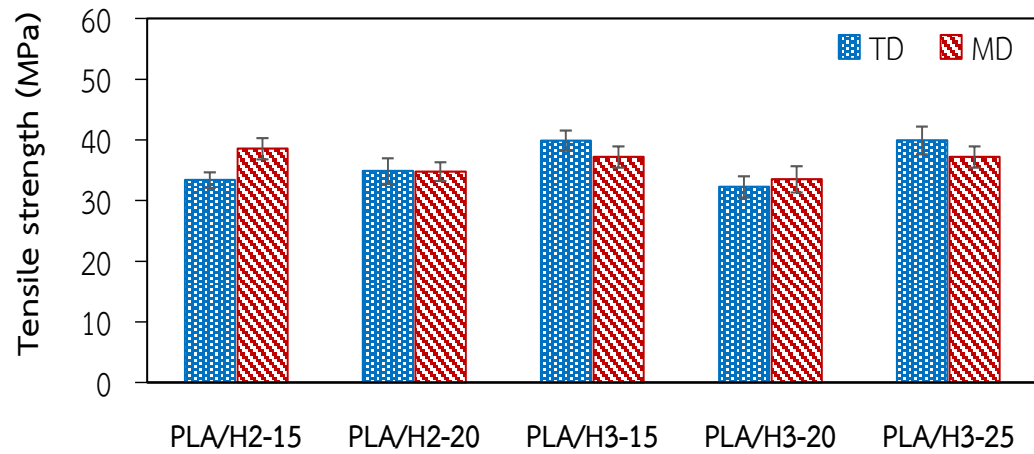
ตาราง 4.22 แสดงสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงหลังการใช้งานเป็นเวลา 15 วัน พบว่าถุงทุกสูตรค่า ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการยึดตัวออกหลังใช้งานน้อยมาก (1.5-3.4%) ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากการทำลายแรงดึงดูระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของยาง กับหมู่คาร์บอนิลของ PLA ส่งผลให้การยึดตัว ที่วัดได้หลังใช้งานเป็นค่าการยึดตัวของเฉพาะ PLA อย่างไรก็ตามถุงทุกสูตรยังคงมีสภาพดีหลังผ่านการทดสอบ การใช้งานเบื้องต้นเป็นเวลา 2 เดือน และคงสภาพถุงได้ แม้เกิดรอยปริแตกเกิดขึ้น หลังใช้งานนาน 3 เดือน โดยมีค่าการทนต่อแรงดึงลดลงประมาณ 15-30% ของค่าเริ่มต้น ในขณะที่มีค่ามอดุลัสของยังไม่เปลี่ยนแปลง มากนัก

ตาราง 4.20 รูป SEM ของ พอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR) ของผิวหน้าจากการหักชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผสมโดยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ในขั้นตอนสุดท้าย

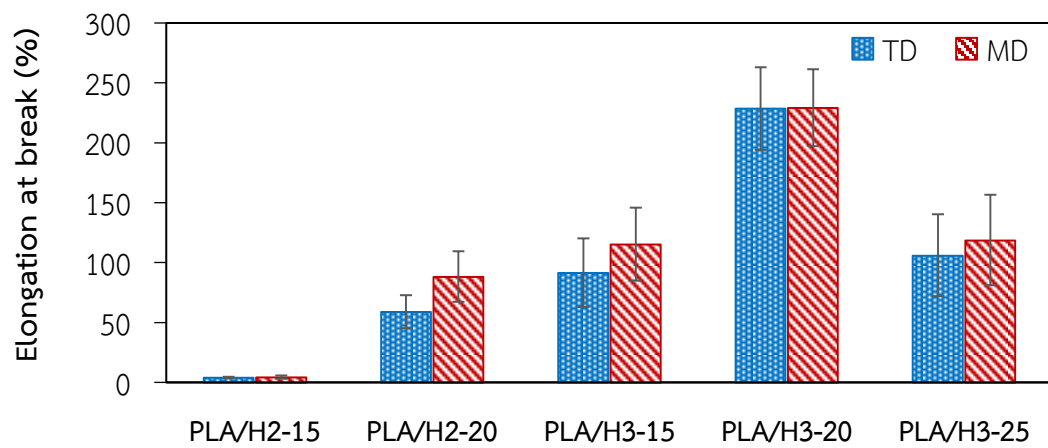
Samples	100X	500X
PLA-HENR2-15		
PLA-HENR2-20		
PLA-HENR3-15		
PLA-HENR3-20		
PLA-HENR3-25		

ตาราง 4.21 รูป SEM ของพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (PLA/HENR)

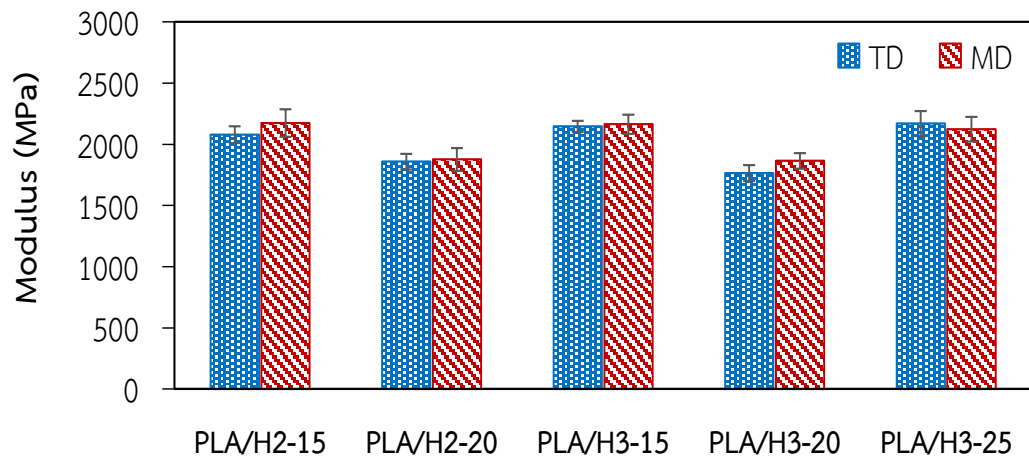
Samples	50X	300X
PLA-HENR2-15	 Mag = 50 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.689 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 Mag = 300 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.689 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR2-20	 Mag = 50 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.709 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 Mag = 300 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.709 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR3-15	 Mag = 50 X EHT = 15.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.689 A Scan Speed = 8 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 Mag = 300 X EHT = 15.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.689 A Scan Speed = 8 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR3-20	 Mag = 50 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.709 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 Mag = 300 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.709 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27
PLA-HENR3-25	 Mag = 50 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.689 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27	 Mag = 300 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 FI I = 2.689 A Scan Speed = 10 WD = 10 mm Spot Size = 180 Serial No. = LEO 1455VP-05-27



(a)



(b)



(c)

รูป 4.9 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA/HENR ก่อนการใช้งานในทิศ TD และทิศ MD เมื่อ (a) ความต้านทานแรงดึง (b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ (c) มอดุลัสของยัง

ตาราง 4.22 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA/HENR ก่อนและหลังการใช้งานเป็นเวลาต่างๆ กัน

Sample		ระยะเวลาใช้งาน (เดือน)				
		0	0.5	1	2	3
PLA/HENR2-15	TS, TD (MPa)	33.38 ± 1.27	31.64 ± 4.49	30.41 ± 5.42	21.19 ± 5.63	25.60 ± 3.99
	TS, MD (MPa)	38.55 ± 1.75	31.43 ± 1.87	14.21 ± 4.59	15.76 ± 6.80	25.49 ± 3.90
	Eb, TD (%)	4.29 ± 0.63	1.54 ± 0.20	1.48 ± 0.19	1.02 ± 0.27	1.59 ± 0.57
	Eb, MD (%)	4.52 ± 1.44	1.75 ± 0.14	0.99 ± 0.27	1.41 ± 0.58	1.44 ± 0.56
	Modulus, TD	2079 ± 67	2632 ± 242	2568 ± 267	2219 ± 111	2234 ± 245
	Modulus, MD	2174 ± 113	2283 ± 107	2208 ± 107	2074 ± 112	2201 ± 297
PLA/HENR2-20	TS, TD (MPa)	34.84 ± 2.12	37.21 ± 1.14	23.59 ± 4.99	23.96 ± 5.20	28.67 ± 2.84
	TS, MD (MPa)	34.75 ± 1.56	34.65 ± 1.36	25.41 ± 2.99	25.61 ± 3.13	29.60 ± 5.45
	Eb, TD (%)	59.15 ± 13.77	2.15 ± 0.38	1.82 ± 0.55	1.86 ± 0.59	2.37 ± 0.22
	Eb, MD (%)	88.37 ± 21.16	3.42 ± 0.44	2.12 ± 0.54	2.14 ± 0.58	2.64 ± 0.86
	Modulus, TD	1859 ± 64	2653 ± 46	1802 ± 139	1800 ± 149	1757 ± 202
	Modulus, MD	1876 ± 93	2424 ± 94	1790 ± 103	1794 ± 110	1762 ± 376
PLA/HENR3-15	TS, TD (MPa)	39.89 ± 1.67	37.67 ± 5.26	28.03 4.41	40.64 ± 8.31	28.85 ± 7.58
	TS, MD (MPa)	37.18 ± 1.77	30.56 ± 4.24	26.37 3.54	39.74 ± 3.35	36.06 ± 5.94
	Eb, TD (%)	91.60 ± 28.64	1.87 ± 0.04	1.89 0.45	2.10 ± 0.35	1.58 ± 0.33
	Eb, MD (%)	115.40 ± 30.35	1.81 ± 0.23	1.78 0.36	2.10 ± 0.22	1.58 ± 0.25
	Modulus, TD	2145 ± 46	2533 ± 147	2053 331	2470 ± 351	2020 ± 689
	Modulus, MD	2163 ± 79	2476 ± 226	2009 130	2362 ± 217	2713 ± 237
PLA/HENR3-20	TS, TD (MPa)	32.26 ± 1.76	38.46 ± 2.61	33.19 ± 3.28	31.93 ± 7.02	33.41 ± 5.50
	TS, MD (MPa)	33.49 ± 2.14	42.17 ± 5.68	28.57 ± 3.88	26.25 ± 9.36	26.37 ± 6.44
	Eb, TD (%)	228.63 ± 34.45	2.35 ± 0.39	2.16 ± 0.19	2.04 ± 0.27	2.18 ± 0.77
	Eb, MD (%)	229.25 ± 32.14	2.11 ± 0.20	2.80 ± 0.53	1.76 ± 0.13	1.99 ± 0.43
	Modulus, TD	1764 ± 65	2468 ± 101	2238 ± 77	2298 ± 120	2244 ± 323
	Modulus, MD	1865 ± 63	2823 ± 270	1776 ± 146	2165 ± 228	2012 ± 239
PLA/HENR3-25	TS, TD (MPa)	39.91 ± 2.30	31.83 ± 1.30	29.63 ± 4.00	36.12 ± 5.33	29.44 ± 6.33
	TS, MD (MPa)	37.18 ± 1.77	30.37 ± 1.64	23.56 ± 6.33	31.19 ± 7.05	29.31 ± 6.61
	Eb, TD (%)	106.14 ± 34.12	1.80 ± 0.13	1.68 ± 0.35	2.73 ± 0.67	1.75 ± 0.54
	Eb, MD (%)	118.79 ± 37.76	2.03 ± 0.27	1.61 ± 0.33	2.55 ± 0.99	2.14 ± 0.54
	Modulus, TD	2170 ± 103	2377 ± 65	2317 ± 56	2169 ± 252	2294 ± 158
	Modulus, MD	2123 ± 101	2358 ± 89	1926 ± 177	2024 ± 242	1968 ± 239

4.4 ศึกษาการทดสอบการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ และการทดสอบการย่อยสลายเบื้องต้น

การศึกษาในส่วนนี้ผู้เตรียมได้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ถุงส่วนที่ 1 จะใส่เฉพาะวัสดุปลูก พร้อมรดน้ำตามกำหนด ส่วนนี้จะทำที่ ม.นเรศวร เพื่อติดตามสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงปลูก และถุงส่วนที่ 2 จะส่งไปยังศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่สาใหม่ ต.โป่งแยง อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ เพื่อใช้เป็นถุงปลูกสำหรับมะเขือเทศ ในส่วนที่ 2 ผู้เชี่ยวชาญของโครงการหลวงจะเป็นผู้ดำเนินการทั้งหมด ตั้งแต่เป็นผู้ทำการทดลองปลูก เก็บข้อมูล และสรุปผลของข้อมูล จากนั้นจึงรายงานผลสรุปการวิจัยมายังผู้ทดลอง

รูป 4.10 แสดงการทดลองปลูกมะเขือเทศ โดยรูป 4.10 (a) แสดงแปลงทดสอบหลังการย้ายกล้ามะเขือเทศจากแปลงปลูกมายังถุงปลูก และรูป 4.10 (b) แสดงรูปแปลงปลูกระหว่างการทดลองในระยะออกผลผลิต



(a)



(b)

รูป 4.10 แปลงปลูกมะเขือเทศที่ปลูกในถุงปลูกย่อยสลายสูตรต่างๆ ณ ศูนย์ฯ แม่สาใหม่

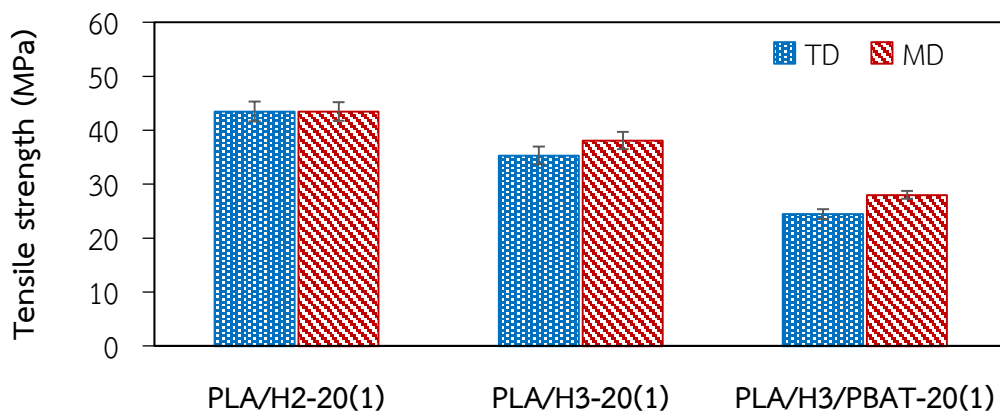
4.4.1 ผลการทดสอบถุงปลูกชุดที่ 1

ถุงปลูกชุดที่ 1 ดำเนินการทดสอบระหว่างเดือนกรกฎาคม ถึง เดือนตุลาคม 2560 โดยที่ ม.นเรศวร จะทำการทดสอบ 3 สูตร คือ PLA/H2-20(1), PLA/H3-20(1) และ PLA/H3/PBAT-20(1) ในขณะที่ถุงที่ส่งโครงการหลวงจะเพิ่มตัวควบคุมคือถุงที่เตรียมจาก PE (PE(1)) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือก HENR3 เป็นสูตรที่ผสมร่วมกับ PBAT เป็นสูตรที่ 3 เพราะผลการวิจัยที่ผ่านมาการผสม PLA ร่วมกับ HENR 3 ให้ค่า E_b สูงกว่าการผสมร่วมกับ HENR 2 และจากข้อจำกัดด้านจำนวนสูตรที่สามารถส่งโครงการหลวงได้เพียง 4 สูตร (รวมตัวควบคุม) ถุงชุดที่ 1 จึงผสม HENR2 1 สูตร และผสม HENR3 2 สูตร

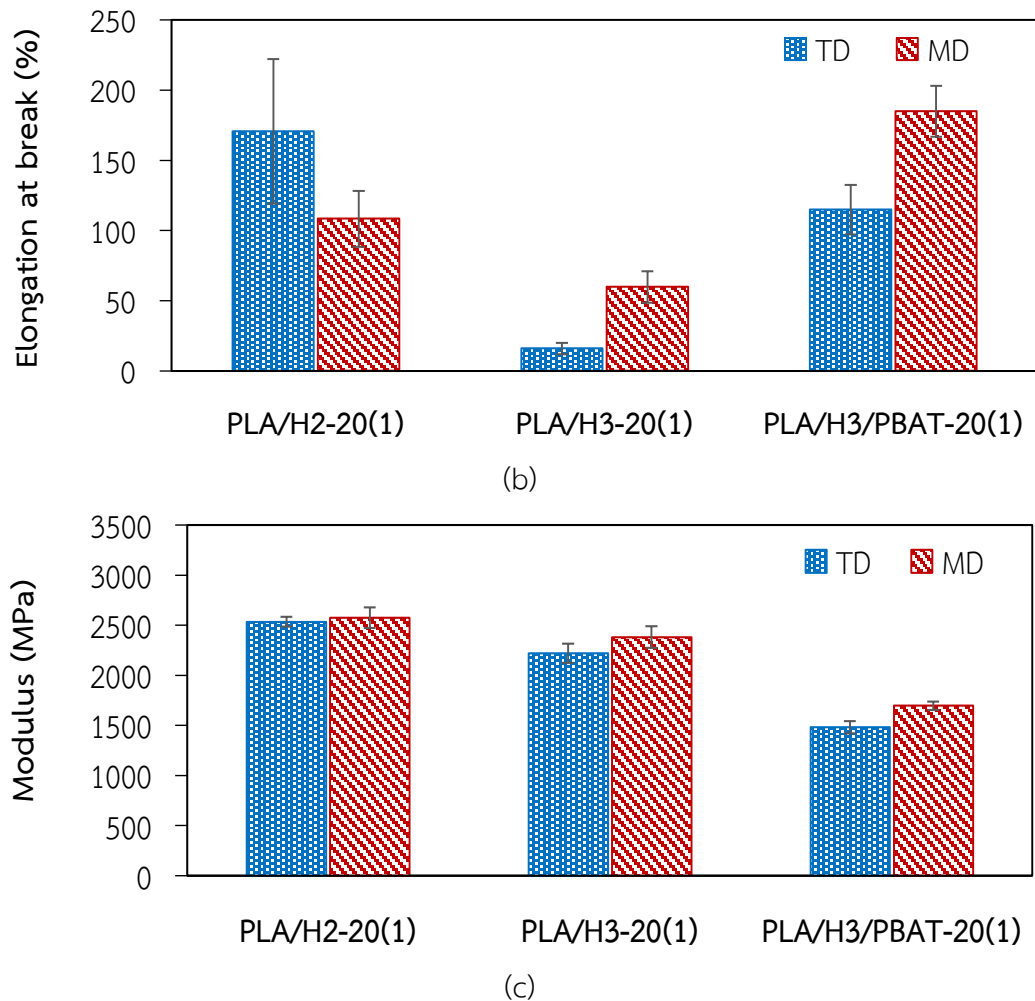
4.4.1.1 สมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงปลูก

ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงปลูกส่วนที่เตรียมสำหรับส่งขึ้นโครงการหลวงชุดที่ 1 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 สูตร โดยสูตรทั้ง 3 มีความแตกต่างจากสูตรก่อนหน้า คือมีการเพิ่มสารเติมแต่ง Talc, TiO_2 และสารต้านการเสื่อมจากออกซิเจน (Irgarox) เพราะจากหลายงานวิจัยกล่าวว่า Talc จะสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึงให้กับฟิล์ม PLA ได้ ทั้ง TiO_2 และ Irgarox ยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับ PLA ทั้งขณะหลอม (คอมพาวนด์และเป่าฟิล์ม) และระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังสนใจเติม PBAT ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์อีกชนิดมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แต่สามารถย่อยสลายได้ โดย PBAT มีความยืดหยุ่นสูงเนื่องจากมีค่า T_g ที่ต่ำ ($-28^\circ C$) จึงน่าจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น

ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาที่จำกัดจึงไม่ได้ทดสอบผลของการเติมสารเติมแต่งล่วงหน้าก่อนเตรียมถุงเพื่อส่งขึ้นโครงการหลวง ผลการทดสอบที่ได้จึงเป็นถุงที่ผลิตขึ้นชุดเดียวกัน และแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือทดสอบที่ ม.นเรศวร และทดสอบที่โครงการหลวง จากผลการทดสอบพบว่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของถุงที่เตรียมได้ในครั้งนี้แตกต่างจากการทดสอบที่ผ่านมาคือถุงพอลิเมอร์ผสมที่ผสม HENR3 มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ต่ำกว่าถุงที่ผสม HENR2 นอกจากนี้ถุงที่ผสม HENR2 ยังมีค่าการยืดตัวที่สูงกว่าสูตรที่ไม่ผสมสารเติมแต่ง ทั้งนี้ผลดังกล่าวอาจเกิดจากหลายสาเหตุ ทั้งผลของการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งอาจช่วยหรือขัดขวางการขยายตัวของ HENR หรือความหนาบางที่ไม่เท่ากันของถุงซึ่งเกิดจากการเป่าถุงให้มีขนาดที่กว้างขึ้น (จากเดิมเตรียมถุงที่มีความกว้างทั้งหมดก่อนพับจีบ 8 นิ้ว เป็นถุงที่มีความกว้าง 10 นิ้ว) ความกว้างดังกล่าวเป็นความกว้างสูงสุดของของเครื่องเป่า ซึ่งการเป่าครั้งนี้เป็นการเป่าครั้งแรกของถุงมีความกว้าง 10 นิ้ว จึงอาจยังควบคุมความหนาบางของถุงได้ไม่ดีมากนัก ส่งผลให้ถุงบางส่วนมีความหนาบางของถุงไม่เท่ากัน แต่เนื่องจากถุงที่เป่าได้มีปริมาณจำกัด จึงต้องใช้ฟิล์มทั้งหมดที่เป่าได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม PBAT ส่งผลให้ถุงมีค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสของยังลดลง ในขณะที่มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น (รูป 4.11)



(a)



รูป 4.11 สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA/HENR ก่อนการใช้งานในทิศ TD และทิศ MD เมื่อ (a) ความต้านทานแรงดึง (b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และ (c) โมดูลัสของยัง

ทั้งนี้เมื่อนำถุงที่เตรียมได้ไปใส่วัสดุปลูกพร้อมรดน้ำปุ๋ยเป็นเวลาต่างๆ กัน (ในส่วนนี้ได้เก็บข้อมูลเพียง 2 เดือน เนื่องจากในเดือนที่ 3 ทางโครงการหลวงได้แจ้งว่าถุงทุกสูตรเกิดการปริแตกทั้งหมด จึงไม่ได้ทดสอบต่อ) พบว่าถุง PLA ที่ผสม HENR ยังคงมีค่าการทนต่อแรงดึง และค่าโมดูลัสของยังเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนปลูก และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของถุงจะมีค่าค่อยๆ ลดลง ตามระยะเวลาที่ใช้งาน ซึ่งต่างจากสูตรที่ไม่เติมสารเติมแต่งที่พบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด จะมีค่าลดลงใกล้เคียงกับถุง PLA บริสุทธิ์ ทันทีหลังใช้งานนาน 15 วัน ในขณะที่การเติมสารเติมแต่งพบว่าช่วยให้ถุงยังคงสภาพยืดหยุ่นได้บ้างหลังการทดสอบนาน 1 เดือน และมีค่าใกล้เคียงกับถุง PLA บริสุทธิ์ หลังการใช้งานในเดือนที่ 2

การเติม PBAT พบว่าถุงยังคงมีค่าความยืดหยุ่นดีตลอดระยะเวลา 2 เดือน โดยมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ลดลงไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพฤติกรรมของ PBAT ที่มี T_g ต่ำ ทั้งยังไม่มีส่วนที่เกิดอันตรกิริยาทางเคมีร่วมกับ PLA ทำให้แม้มีผลของน้ำปุ๋ยหรือความชื้น ก็ไม่ส่งผลต่อการขยายตัวของ PBAT ทำให้ถุงที่เติม PBAT ยังคงมีความยืดหยุ่นที่ดีตลอดระยะเวลาทดสอบนาน 2 เดือน (ตาราง 4.23-4.25)

ตาราง 4.23 ค่าการทนต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับปลูกครั้งที่ 1

Code	Tensile strength (MPa) (before field aging)	Tensile strength (MPa) (after field aging)		
		15 day	1 month	2 month
PLA*	(TD) 58.54 ± 1.10	28.40 ± 6.90	23.58 ± 9.69	15.08 ± 4.08
	(MD) 57.43 ± 0.89	29.20 ± 9.64	27.20 ± 5.97	13.27 ± 3.36
PLA/H2-20(1)	(TD) 43.49 ± 1.86	36.50 ± 1.49	38.66 ± 1.54	34.67 ± 4.34
	(MD) 43.48 ± 1.75	37.38 ± 1.94	40.53 ± 2.93	37.21 ± 4.98
PLA/H3-20(1)	(TD) 35.34 ± 1.64	37.52 ± 2.66	40.08 ± 2.18	31.26 ± 5.93
	(MD) 38.09 ± 1.61	34.51 ± 2.20	42.10 ± 2.51	28.10 ± 3.50
PLA/H3/	(TD) 24.47 ± 0.90	34.05 ± 1.87	35.58 ± 2.02	32.99 ± 1.20
PBAT-20(1)	(MD) 28.02 ± 0.70	32.07 ± 2.79	33.35 ± 4.41	31.67 ± 2.26

* ผลของฟิล์ม PLA เป็นผลของถุง PLA เริ่มต้นที่ไม่เติมสารเติมแต่ง และไม่ได้ส่งขึ้นไปทดลองปลูก

ตาราง 4.24 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับปลูกครั้งที่ 1

Code	Elongation at break (%) (before field aging)	Elongation at break (%) (after field aging)		
		15 day	1 month	2 month
PLA	(TD) 3.39 ± 1.72	1.60 ± 0.81	1.52 ± 0.35	0.82 ± 0.36
	(MD) 2.81 ± 0.39	1.24 ± 0.37	1.23 ± 0.50	1.55 ± 0.22
PLA/H2-20(1)	(TD) 170.63 ± 51.54	94.43 ± 23.26	21.31 ± 8.79	3.44 ± 0.95
	(MD) 108.25 ± 19.92	68.67 ± 19.56	10.78 ± 5.42	3.37 ± 1.54
PLA/H3-20(1)	(TD) 15.84 ± 4.10	10.44 ± 3.38	4.61 ± 1.00	3.02 ± 0.54
	(MD) 59.73 ± 11.15	27.95 ± 8.40	6.42 ± 1.49	2.85 ± 0.96
PLA/H3/	(TD) 114.84 ± 17.74	72.49 ± 11.12	72.80 ± 14.03	72.28 ± 13.53
PBAT-20(1)	(MD) 185.00 ± 18.21	171.88 ± 48.21	149.10 ± 24.54	151.50 ± 17.94

ตาราง 4.25 ค่ามอดุลัสของยังของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

Code	Modulus (MPa) (before field aging)	Modulus (MPa) (after field aging)		
		15 day	1 month	2 month
PLA	(TD) 2812 ± 68	2980 ± 501	3013 ± 173	2650 ± 237
	(MD) 2719 ± 64	2704 ± 591	2831 ± 382	2991 ± 281
PLA/H2-20(1)	(TD) 2536 ± 48	2069 ± 62	2148 ± 83	2133 ± 177
	(MD) 2576 ± 102	2113 ± 141	2364 ± 192	2246 ± 185
PLA/H3-20(1)	(TD) 2220 ± 95	2340 ± 334	2719 ± 247	1910 ± 230
	(MD) 2383 ± 107	2048 ± 135	2897 ± 136	1811 ± 137
PLA/H3/	(TD) 1482 ± 60	1871 ± 87	1899 ± 93	1947 ± 72
PBAT-20(1)	(MD) 1697 ± 42	1792 ± 115	1952 ± 224	1764 ± 143

อย่างไรก็ตามแม้ว่าถุงสูตร PLA/H3/PBAT-20(1) จะยังคงมีความยืดหยุ่นที่ดี แต่การใช้งานจริง (จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป) ถุงยังคงเกิดการปริแตก ซึ่งน่าจะเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั้งของ PLA และ PBAT และการขยายตัวของพีช แม้ว่า HENR จะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ PLA ได้ แต่ก็อาจจะไม่เพียงพอ ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มการทดสอบชุดที่ 2 ซึ่งมีการเติมสารเติมแต่งเพิ่มอีก 1 ตัวคือสารที่จะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.4.2

4.4.1.2 การทดสอบการใช้งานเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ

การทดสอบในส่วนนี้โครงการหลวงจะเก็บข้อมูลทั้งลักษณะทางกายภาพของถุงปลูก และผลผลิตมะเขือเทศที่ได้รับ

การเก็บข้อมูลทั้งลักษณะทางกายภาพจะเป็นการตรวจสอบการฉีกขาดของถุงปลูกจำนวน 3 ครั้ง ได้แก่ 1. หลังรับมอบถุงปลูก 2. ระหว่างกรอแก้วสตุปลูก และ 3. ระหว่างการปลูกในแปลงปลูก พบว่าถุงปลูกหลังรับมอบ และถุงปลูกหลังกรอแก้วสตุปลูกจำนวนทั้ง 50 ถุง ไม่พบการฉีกขาดของถุง (ตาราง 4.26)

ตาราง 4.27 แสดงการเกิดการแตก/ฉีกขาดของถุงหลังการใช้งาน พบว่าสูตรที่มีเฉพาะ HENR ทั้ง HENR2 และ HENR3 ถุงมีรอบปริแตกเกิดขึ้น โดยเกิดการปริแตกทั้งหมดตั้งแต่เดือนแรกของการปลูก โดยรอยแตกส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณรอยพับและกันถุง ในขณะที่สูตรที่เติม PBAT ถุงเกิดการแตกประมาณ 50% เมื่อผ่านการใช้งานไปประมาณ 2 เดือน ซึ่งการแตกที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการขยายตัวของรากและลำต้นของมะเขือเทศ (รูป 4.12) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของขึ้นงานที่พบว่าสูตรที่มีเฉพาะ HENR จะมีค่า E_b ลดลงหลังการใช้งาน ซึ่งอาจเกิดจากน้ำและสารละลายปุ๋ยไปลดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ HENR และหมู่คาร์บอนิลของ PLA ลง ในขณะที่ PBAT แสดงผลของความยืดหยุ่นเนื่องจากค่า T_g ที่ต่ำของตัวมันเองจึงได้รับผลกระทบไม่มากนัก อย่างไรก็ตามแม้ว่าถุงที่เติมเฉพาะ HENR จะมีสมบัติการยืดตัวที่ลดลง แต่การผสม HENR ร่วมกับ PLA และ PBAT ซึ่งมีหมู่เอสเทอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่าย พบว่าช่วยให้ถุงสามารถรักษาสภาพของถุงได้ดีตลอดการทดลอง แม้ว่าจะเกิดการปริแตกเกิดขึ้น ซึ่งต่างจากการทดลองก่อนหน้านี้ที่พบว่าถุงที่มีเฉพาะ PLA จะเกิดการปริแตก/เปื่อยยุ่ย และไม่สามารถคงสภาพถุงได้หลังการใช้งานไป 1 เดือน

ตาราง 4.28 แสดงภาพลักษณะการแตกของถุงปลูกทุกสูตรในชุดที่ 1 นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าเมื่อซึ่งการเปลี่ยนแปลงของถุงปลูกหลังการใช้งานเป็นเวลาที่ต่างกัน ถุงปลูกที่ผสมเฉพาะ HENR จะเริ่มสังเกตเห็นการลดลงของน้ำหนักถุงหลังผ่านการใช้งานไป 1 เดือน โดยมีการลดลงประมาณ 0.5-4% ในขณะที่ถุงที่มีทั้ง HENR และ PBAT จะเห็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน (รูป 4.13) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดถือว่าไม่สูงมากนัก ซึ่งอาจเกิดจากการฉีกขาดของถุง เนื่องจากการกดทับของวัสดุปลูกหรือการแทงรากของต้นมะเขือเทศออกมานอกถุง ทำให้เกิดการหลุดออกของชิ้นส่วนของถุงปลูก ทำให้น้ำหนักที่วัดได้มีค่าลดลง

ตาราง 4.26 การประเมินระดับการฉีกขาดของถุงปลูกจากการสังเกตหลังรับมอบถุง และระหว่างกรอกวัสดุลงถุงปลูก

กรรมวิธี	จำนวนถุงที่ฉีกขาด (ใบ)	
	หลังรับมอบถุง	ระหว่างกรอกถุง
PLA/H2-20(1)	0	0
PLA/H3-20(1)	0	0
PLA/H3/PBAT-20(1)	0	0
PE(1)	0	0

ตาราง 4.27 การประเมินระดับการฉีกขาดของถุงปลูกระหว่างการปลูกในแปลงปลูก

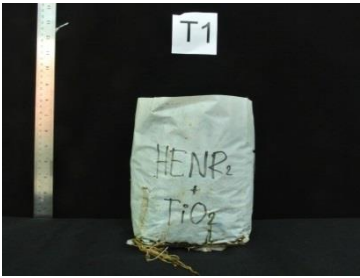
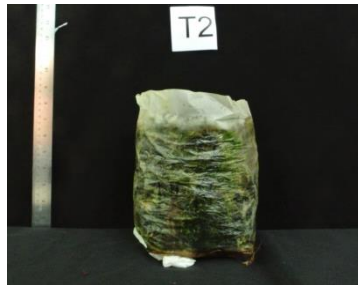
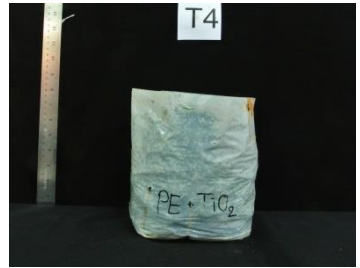
กรรมวิธี	จำนวนเดือนหลังปลูก (เดือน)		
	1	2	3
PLA/H2-20(1)	100.00	100.00	100.00
PLA/H3-20(1)	100.00	100.00	100.00
PLA/H3/PBAT-20(1)	1.82	45.45	100.00
PE(1)	0.00	0.00	0.00
LSD _(0.05)	2.80	7.67	-
CV (%)	4.03	9.07	-

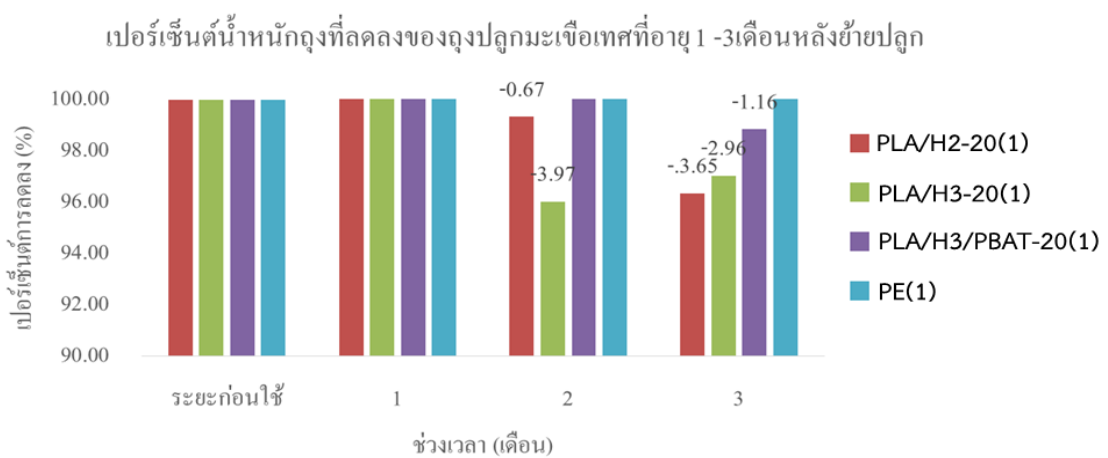
หมายเหตุ หลังปลูก 5 เดือน ถุงปลูกจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีการฉีกขาดทุกใบ



รูป 4.12 ลักษณะต่างๆ ในการแตกของถุงปลูกหลังการใช้งาน

ตาราง 4.28 ลักษณะการฉีกขาดของถุงปลูกเมื่อมะเขือเทศมีอายุ 3 เดือนหลังย้ายปลูก

กรรมวิธี	รูปการทดลอง	รูปในแปลง
PLA/H2-20(1)		
PLA/H3-20(1)		
PLA/H3/PBAT-20(1)		
PE(1)		



รูป 4.13 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักถุงที่ลดลงของถุงปลูกมะเขือเทศที่อายุ 1-3 เดือนหลังการย้ายปลูก

ในส่วนของผลผลิตพบว่าค่าทั้งหมด ไม่ว่าความสูงของต้นมะเขือเทศ จำนวนข้อ จำนวนวันที่เริ่มออกดอกของต้นมะเขือเทศ จำนวนข้อผล ขนาดผลมะเขือเทศโดยเฉลี่ย คุณภาพเกรดของมะเขือเทศ และจำนวนผลผลิตรวมต่อต้น จากถ่วงปลูกทั้ง 4 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงอาจกล่าวได้ว่าการปรับแก้ของถ่วงไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตมะเขือเทศที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

ตาราง 4.29 แสดงการจัดชั้นคุณภาพของมะเขือเทศตามมาตรฐานมูลนิธิโครงการหลวง ตาราง 4.30-4.32 แสดงขนาดผลมะเขือเทศโดยเฉลี่ยหลังเสร็จสิ้นการทดลอง คุณภาพเกรดของมะเขือเทศ และจำนวนผลผลิตรวมต่อต้น ในขณะที่ผลการทดสอบอื่นๆ ดังแสดงในภาพผนวก ก

ตาราง 4.29 การจัดชั้นคุณภาพของมะเขือเทศตามมาตรฐานมูลนิธิโครงการหลวง

เกรด	น้ำหนัก	รายละเอียด
1	130-250 กรัม	มีตำหนิที่เกิดจากโรคและแมลงได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
2	100-129 กรัม	มีตำหนิที่เกิดจากโรคและแมลงได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
U	60-99 กรัม	มีตำหนิที่เกิดจากโรคและแมลงได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

ที่มา : คู่มือการจัดชั้นคุณภาพผักมูลนิธิโครงการหลวง

ตาราง 4.30 ขนาดผลมะเขือเทศที่ได้รับโดยเฉลี่ยหลังการทดลอง

กรรมวิธี	ขนาดผล (เซนติเมตร)	
	กว้าง ^{/ns}	ยาว ^{/ns}
PLA/H2-20(1)	5.87	5.18
PLA/H3-20(1)	5.72	5.32
PLA/H3/PBAT-20(1)	5.86	5.29
PE(1)	5.72	5.09
LSD _(0.05)	-	-
CV(%)	4.75	4.81

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตาราง 4.31 เปอร์เซ็นต์คุณภาพเกรดของมะเขือเทศที่ปลูกในถ่วงสูตรต่างๆ

กรรมวิธี	คุณภาพเกรดของมะเขือเทศ (%)		
	เกรด 1 ^{/ns}	เกรด 2 ^{/ns}	เกรด U ^{/ns}
PLA/H2-20(1)	27.22	19.50	53.46
PLA/H3-20(1)	28.06	18.88	53.06
PLA/H3/PBAT-20(1)	22.56	22.12	55.34
PE(1)	21.84	24.12	54.06
LSD _(0.05)	-	-	-
CV(%)	55.93	64.62	30.71

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตาราง 4.32 น้ำหนักผลผลิตแต่ละเกรด และผลผลิตรวมต่อต้น

กรรมวิธี	น้ำหนักผลผลิตแต่ละเกรด (กรัม/ต้น)			น้ำหนักผลผลิตรวม (กรัม/ต้น) ^{ns}
	เกรด 1 ^{ns}	เกรด 2 ^{ns}	เกรด U ^{ns}	
PLA/H2-20(1)	100.8	65.02	76.02	311.1
PLA/H3-20(1)	116.8	68.22	92.92	308.7
PLA/H3/PBAT-20(1)	116.0	68.06	94.20	309.8
PE(1)	110.3	77.58	79.54	317.0
LSD (0.05)	-	-	-	-
CV(%)	60.32	62.16	35.15	26.86

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.4.2 ผลการทดสอบถุงปลูกชุดที่ 2

ถุงปลูกชุดที่ 2 ดำเนินการทดสอบระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2560 ถึง เดือนมีนาคม 2561 โดยที่ ม.นเรศวรจะทำการทดสอบ 3 สูตร คือ PLA/H2-20(2), PLA/H3-20(2) และ PLA/H2/PBAT-20(2) ในขณะที่ ถุงที่ส่งโครงการหลวงมีการเพิ่มตัวควบคุมคือถุงที่เตรียมจาก PE (PE(1)) และระหว่างเดือนพฤษภาคม – เดือน มิถุนายน 2561 ซึ่งในส่วนนี้จะทำการทดลองเฉพาะที่ ม.นเรศวร จำนวน 2 สูตร คือ PLA2 และ PLA/PBAT-20 ทั้งนี้ครั้งที่ 2 ผู้วิจัยได้เลือก HENR2 เป็นสูตรที่ผสมร่วมกับ PBAT เป็นสูตรที่ 3 เพราะผลการวิจัยของถุง ปลูกชุดที่ 1 ที่มีการเติมสารเติมแต่งพบว่า HENR2 แสดงสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า HENR3 นอกจากนี้ในถุงปลูกชุด ที่ 3 ยังเพิ่มสารเติมแต่งอีก 1 ตัว คือ Bio100 เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารกลุ่มพอลิเอสเทอร์ทั้ง PLA และ PBAT

4.4.2.1 สมบัติการทนต่อแรงดึงของถุงปลูก

ตาราง 4.33-4.35 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงของถุงปลูก 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่ 1 เป็นผลการทดสอบของถุงปลูกเพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับถุงปลูกส่วนที่ 2 ซึ่งมี ทั้งหมด 3 สูตร คือ PLA1 (ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA เพียงชนิดเดียว) PLA2 (ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA ผสมร่วมกับ Talc, TiO₂, Irgarox และ Bio100) และ PLA/PBAT-20 (ฟิล์มที่เตรียมจาก PLA:PBAT = 80:20)

ทั้งนี้ถุงปลูกสูตร PLA2 และ PLA/PBAT-20 เป็นส่วนที่ทดลองเพิ่มเติม จึงมีผลการทดลองเพียง 15 วัน และ 1 เดือน

- ส่วนที่ 2 เป็นผลการทดสอบของถุงปลูกที่ส่งขึ้นโครงการหลวง ซึ่งมีทั้งหมด 3 สูตร คือ PLA/H2-20(2), PLA/H3-20(2) และ PLA/H2/PBAT-20(2)

จากผลการทดลองพบว่า การเติมสารเติมแต่ง (Talc, TiO₂, Irgarox และ Bio100) ให้กับ PLA (PLA2) ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยังของฟิล์ม PLA มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PLA ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และช่วยให้ฟิล์ม PLA มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

การผสม PLA ร่วมกับ PBAT 20% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT-20) ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง แต่ฟิล์มมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก จาก 2-3% เป็น 74-313% แต่การเพิ่มดังกล่าวพบว่าการเพิ่มในทิศขยายตัว (transverse direction, TD) มากกว่าทิศเครื่องจักร (machine direction, MD) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากฟิล์มที่ได้มีลักษณะยืดหยุ่นมากขึ้น การม้วนเก็บสามารถกระทำได้เร็วขึ้น

ส่งผลให้การจัดเรียงตัว (orientation) ของโซ่พอลิเมอร์ในทิศ MD สูงกว่าทิศ TD ส่งผลให้สมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มในทิศ MD มากกว่า แต่มีการยืดตัวออกได้น้อยลง

เมื่อทดสอบการจำลองใช้งานถุงปลูกโดยการรดน้ำปุ๋ยเป็นระยะเวลาตามที่กำหนด พบว่าการเติมสารเติมแต่งช่วยให้ฟิล์ม PLA2 และ PLA/PBAT-20 มีการปริแตกลดลง โดยฟิล์ม PLA ที่ไม่เติมสารเติมแต่งจะเกิดการปริแตก 100% เมื่อทดสอบการปลูกนาน 15 วัน ในขณะที่ฟิล์ม PLA2 และ PLA/PBAT-20 มีการปริแตกเพียง 70% ทั้งฟิล์ม PLA2 และ PLA/PBAT-20 ยังคงมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสของยังที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อผ่านการใช้งานนาน 15 วัน ในขณะที่ฟิล์ม PLA ที่ไม่เติมสารเติมแต่งมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงมากกว่า 50% อย่างไรก็ตามการทดสอบการใช้งานที่นานขึ้น (1 เดือน) พบว่าการเติมสารเติมแต่งให้กับ PLA (PLA2) ให้ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ลดลงไม่ต่างจากสูตรที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (PLA1) มากนัก ในขณะที่สูตรผสม PBAT (สูตร PLA/PBAT-20) ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แม้ว่าจะผ่านการใช้งานนาน 1 เดือน

แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่า PBAT จะแสดงผลของความยืดหยุ่นเนื่องจากค่า T_g ที่ต่ำของตัวเอง แต่การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่ายของโครงสร้างพอลิเอสเทอร์ ทำให้แม้จะเติมสารเติมแต่งที่ลดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้วก็ตาม ถุงยังสามารถเกิดการปริแตกจากการใช้งานได้ และอาจเกิดการขาดของโซ่พอลิเอสเทอร์ได้ด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ถุงปลูกหลังการใช้งานมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ลดลงอย่างรวดเร็ว หลังการใช้งานเพียง 15 วัน

การผสม PLA ร่วมกับ HENR ทั้ง 2 ชนิด (PLA/H2-20(2) และ PLA/H3-20(2)) และการผสม PLA HENR2 ร่วมกับ PBAT (PLA/H2/PBAT-20(2)) โดยทุกสูตรมีการเติมสารเติมแต่ง พบว่าฟิล์มเป่าขึ้นรูปได้ง่าย มีลักษณะนิ่ม ยืดหยุ่นได้ดี เมื่อนำฟิล์มไปเตรียมเป็นถุงปลูกและทดสอบการใช้งานพบว่าสูตรที่เติมเฉพาะ HENR ถุงปลูกยังคงสภาพเดิมแม้ผ่านการทดสอบเป็นเวลา 3 เดือน โดยไม่ปรากฏรอยแตกหรือเกิดขึ้น (ผลการทดสอบที่ ม.นเรศวร ซึ่งเป็นการเติมเพียงวัสดุปลูก และรดน้ำปุ๋ยเท่านั้น) ฟิล์มมีค่าการทนต่อแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ HENR และหมู่คาร์บอนิลของ PLA ถูกขัดขวางโดยโมเลกุลของน้ำจากสารละลายปุ๋ย ทำให้ยางดูดซับพลังงานจาก PLA ได้ลดลง ฟิล์มจึงแสดงพฤติกรรมการยืดตัวออกเนื่องจากยางได้ลดลง

ในขณะที่ฟิล์มสูตรที่เพิ่ม PBAT พบว่าไม่เกิดการฉีกขาดของถุงหลังใช้งานไปเป็นเวลา 3 เดือน เช่นเดียวกับสูตรที่เติมเฉพาะ HENR ทั้งยังมีสมบัติการทนต่อแรงดึง ทั้งค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยังเปลี่ยนแปลงไม่มากนักตลอดระยะเวลาของการทดสอบ นอกจากนี้ยังพบว่าการผสม PBAT ร่วมกับ HENR ช่วยให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในทั้งสองทิศทางมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น เพราะการผสม HENR กับ PLA มีแนวโน้ม (ส่วนใหญ่) ให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มในทิศ MD สูงกว่าทิศ TD แม้ว่าจะเป่าให้ฟิล์มมีขนาดกว้างเท่ากันคือ 10 นิ้ว ในขณะที่การผสม PBAT กับ PLA ให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มในทิศ TD สูงกว่าทิศ MD

จึงอาจกล่าวได้ว่า HENR และ bio100 เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยลดการปริแตกของถุงปลูกที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของฟิล์มมีพอลิเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบหลัก (PLA และ PBAT) ในขณะที่ PBAT เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยด้านความยืดหยุ่นของถุงปลูกตลอดระยะเวลาการทดสอบ แต่ทั้งนี้ PBAT จะแสดงพฤติกรรมด้านความยืดหยุ่นตลอดการใช้งานได้ดีต้องใช้คู่กับ HENR

ตาราง 4.33 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์

Code	Tensile strength (MPa)		Tensile strength (MPa) (after field aging)			
	(before field aging)		15 day	1 month	2 month	3 month
PLA1*	(TD)	58.54 ± 1.10	28.40 ± 6.90	23.58 ± 9.69	15.08 ± 4.08	-
	(MD)	57.43 ± 0.89	29.20 ± 9.64	27.20 ± 5.97	13.27 ± 3.36	-
PLA2**	(TD)	52.24 ± 1.87	48.80 ± 5.98	27.72 ± 3.60	-	-
	(MD)	63.69 ± 3.04	48.38 ± 8.92	25.52 ± 3.02	-	-
PLA/PBAT-20	(TD)	46.36 ± 2.69	57.10 ± 1.57	46.86 ± 2.01	-	-
	(MD)	54.11 ± 3.35	50.88 ± 3.17	32.81 ± 4.17	-	-
PLA/H2-20(2)	(TD)	36.89 ± 1.57	43.57 ± 1.24	37.37 ± 1.28	34.67 ± 3.10	32.56 ± 0.71
	(MD)	30.79 ± 2.14	30.97 ± 3.42	37.18 ± 1.00	36.11 ± 1.75	37.16 ± 2.76
PLA/H3-20(2)	(TD)	37.70 ± 2.03	39.68 ± 1.75	29.37 ± 1.21	33.26 ± 6.94	32.53 ± 2.03
	(MD)	35.63 ± 2.65	35.49 ± 4.08	39.20 ± 5.32	35.94 ± 2.00	39.24 ± 2.65
PLA/H2/ PBAT-20(2)	(TD)	36.69 ± 2.96	45.97 ± 3.19	40.78 ± 3.12	36.34 ± 2.54	33.46 ± 2.45
	(MD)	35.99 ± 1.61	40.82 ± 1.83	39.34 ± 2.03	36.72 ± 5.23	34.86 ± 4.85

PLA* คือฟิล์มที่เตรียมจาก PLA เพียงชนิดเดียว

PLA** คือฟิล์มที่เตรียมจาก PLA ผสมร่วมกับ Talc TiO₂ Irgarox และ Bio100

ตาราง 4.34 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

Code	Elongation at break (%)		Elongation at break (%) (after field aging)			
	(before field aging)		15 day	1 month	2 month	3 month
PLA1*	(TD)	3.39 ± 1.72	1.60 ± 0.81	1.52 ± 0.35	0.82 ± 0.36	-
	(MD)	2.81 ± 0.39	1.24 ± 0.37	1.23 ± 0.50	1.55 ± 0.22	-
PLA2**	(TD)	2.99 ± 0.47	1.73 ± 0.27	1.21 ± 0.62	-	-
	(MD)	3.18 ± 1.22	1.99 ± 0.31	1.82 ± 0.44	-	-
PLA/PBAT-20	(TD)	313.30 ± 16.71	6.75 ± 0.74	5.64 ± 3.10	-	-
	(MD)	74.36 ± 19.50	2.79 ± 0.61	2.16 ± 0.35	-	-
PLA/H2-20(2)	(TD)	44.71 ± 6.02	28.91 ± 10.34	16.90 ± 5.01	14.78 ± 5.63	8.01 ± 4.28
	(MD)	97.14 ± 8.96	43.56 ± 6.60	33.27 ± 5.49	17.14 ± 4.83	9.15 ± 3.87
PLA/H3-20(2)	(TD)	55.93 ± 14.60	30.19 ± 7.16	19.81 ± 3.44	14.48 ± 4.33	8.96 ± 2.42
	(MD)	114.43 ± 11.37	64.81 ± 7.66	26.81 ± 7.76	15.39 ± 3.62	8.84 ± 2.73
PLA/H2/ PBAT-20(2)	(TD)	214.88 ± 16.64	206.25 ± 36.07	246.00 ± 12.62	245.50 ± 12.93	240.25 ± 28.25
	(MD)	240.43 ± 13.60	219.71 ± 30.02	213.71 ± 19.02	180.14 ± 16.75	171.43 ± 28.93

ตาราง 4.35 ค่ามอดุลัสของยังของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

Code	Modulus (MPa)		Modulus (MPa) (after field aging)			
	(before field aging)		15 day	1 month	2 month	3 month
PLA1*	(TD)	2812 ± 68	2980 ± 501	3013 ± 173	2650 ± 237	-
	(MD)	2719 ± 64	2704 ± 591	2831 ± 382	2991 ± 281	-
PLA2**	(TD)	2775 ± 110	3220 ± 61	2102 ± 307	-	-
	(MD)	3306 ± 163	3035 ± 144	2001 ± 404	-	-
PLA/PBAT-20	(TD)	2247 ± 58	2650 ± 98	2356 ± 77	-	-
	(MD)	2516 ± 186	2533 ± 36	1980 ± 60	-	-
PLA/H2-20(2)	(TD)	2071 ± 71	2443 ± 81	2068 ± 42	2092 ± 170	1927 ± 42
	(MD)	1797 ± 106	1719 ± 185	2038 ± 96	2066 ± 135	2129 ± 72
PLA/H3-20(2)	(TD)	2162 ± 158	2344 ± 174	1806 ± 160	2104 ± 90	1967 ± 146
	(MD)	2019 ± 151	2090 ± 39	2043 ± 151	1891 ± 149	2367 ± 157
PLA/H2/ PBAT-20(2)	(TD)	1931 ± 62	1537 ± 97	1953 ± 104	1672 ± 63	1932 ± 107
	(MD)	1962 ± 98	1489 ± 43	1366 ± 73	2105 ± 93	2001 ± 112

4.4.2.2 การทดสอบการใช้งานเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ

การทดสอบในส่วนนี้โครงการหลวงยังไม่ได้จัดส่งข้อมูลในส่วนของการผลผลิตมาให้ มีเพียงผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ รายงานในส่วนนี้จึงขอรายงานเฉพาะส่วนของลักษณะทางกายภาพเท่านั้น

จากผลการตรวจสอบการฉีกขาดของถุงปลูกจำนวน 3 ครั้งของถุงปลูกชุดที่ 2 พบว่าถุงปลูกหลังรับมอบ และถุงปลูกหลังกรอกวัสดุปลูกจำนวนทั้ง 50 ถุง ไม่พบการฉีกขาดของถุง (ตาราง 4.36)

ตาราง 4.37 แสดงการเกิดการแตก/ฉีกขาดของถุงหลังการใช้งาน พบว่าการเติม Bio100 หรือสารกลุ่ม imide พบว่าสามารถช่วยลดการแตกของฟิล์มได้ ซึ่งหมู่ imide ดังกล่าวนอกจากจะสามารถช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์แล้ว หมู่ imide ดังกล่าวน่าจะสามารถเกิดอันตรกิริยาร่วมกับหมู่ไฮดรอกซิลของ HENR ได้ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงเกิดขึ้น ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น และเกิดการปริแตกของถุงเนื่องจากสภาวะการใช้งานลดลง โดยเฉพาะถุงสูตรที่เติม PBAT ที่พบว่าสามารถใช้งานได้นานมากกว่า 5 เดือนโดยไม่เกิดการปริแตก

ตาราง 4.36 การประเมินระดับการฉีกขาดของถุงปลูกจากการสังเกตหลังรับมอบถุง และระหว่างกรอกวัสดุลงถุงปลูก

กรรมวิธี	จำนวนถุงที่ฉีกขาด (ใบ)	
	หลังรับมอบถุง	ระหว่างกรอกถุง
PLA/H2-20(2)	0	0
PLA/H3-20(2)	0	0
PLA/H2/PBAT-20(2)	0	0
PE(1)	0	0

ตาราง 4.37 การประเมินระดับการฉีกขาดของถุงปลูกระหว่างการปลูกในแปลงปลูก

กรรมวิธี	จำนวนเดือนหลังปลูก (เดือน)				
	1	2	3	4	5
PLA/H2-20(2)	52.00	94.00	100.00	100.00	100.00
PLA/H3-20(2)	42.00	96.00	100.00	100.00	100.00
PLA/H2/PBAT-20(2)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PE(2)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LSD _(0.05)	21.35	5.48	-	-	-
CV (%)	65.92	8.38	-	-	-

หมายเหตุ หลังปลูก 5 เดือน ถุงปลูกสูตรที่ 3 (PLA/H2/PBAT-20(2)) และสูตรควบคุมยังไม่เกิดการแตก

4.4.3 การทดสอบการย่อยสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้น

ทดสอบการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 3 สูตร คือ PLA/H2-20(2) PLA/H3-20(2) และ PLA/H2/PBAT-20(2) เทียบกับวัตถุดิบอ้างอิงเชิงบวก (Cellulose microcrystalline) และวัตถุดิบอ้างอิงเชิงลบ (พอลิเอทิลีน) โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 2 สูตรแรกมี PLA:HENR ในอัตราส่วน 80:20 ในขณะที่สูตรสุดท้ายมีอัตราส่วน PLA:HENR:PBAT เท่ากับ 60:20:20 ทำการทดสอบอุณหภูมิ $37 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิ $58 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 49 วัน และ 56 วัน ตามลำดับ หาค่าการสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้นโดยการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายพอลิเมอร์ผสมด้วยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก ค่าการสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้นเมื่อทดสอบเป็นเวลา 49 วัน และ 56 วัน และค่าการสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้นตลอดระยะเวลาของการทดสอบ ดังแสดงในตาราง 4.38 และรูป 4.14

จากผลการทดลองพบว่าวัตถุดิบอ้างอิงเชิงบวก สามารถถูกย่อยสลายได้มากกว่า 90% ด้วยปุ๋ยหมักที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบอุณหภูมิ $37 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 49 วัน และที่อุณหภูมิ $58 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 56 วัน โดยเมื่อพิจารณาอัตราเร็วในการย่อยสลายพบว่าวัตถุดิบอ้างอิงเชิงบวก มีอัตราเร็วในการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 37°C สูงกว่าที่อุณหภูมิ 58°C โดยที่อุณหภูมิ 37°C สามารถสลายตัวได้มากกว่า 50% ภายในระยะเวลา 4 วัน ในขณะที่ที่อุณหภูมิ 58°C ต้องใช้เวลามากกว่า 20 วัน ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 58°C อัตราเร็วในการสลายตัวพบว่าเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านไป 10-15 วัน ซึ่งผลดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากชนิดของจุลินทรีย์ การตายและการเติบโตของจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิในการทดสอบ ทำให้อัตราเร็วในการย่อยสลายของวัสดุในแต่ละช่วงเวลาต่างกัน

จุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักที่มีบทบาทในการย่อยสลายสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง ($25-45^{\circ}\text{C}$) และจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูง ($>45^{\circ}\text{C}$) โดยกลุ่มจุลินทรีย์หลักที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายคือแบคทีเรีย เชื้อรา และแอคทีโนไมซีต ทั้งนี้แบคทีเรียจะเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีมากที่สุด โดยที่อุณหภูมิปานกลาง แบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Cellulomonas* sp., *Flavobacterium* sp., *Micrococcus* sp. และ *Achromobacter* sp. จะเจริญเติบโตได้ดี และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะหยุดการเจริญเติบโต ทั้งอาจตายได้ และจะมีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิสูง เช่น *Bacillus subtilis* และ *Bacillus stearothermophilus* แทน ในขณะที่เชื้อราที่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิปานกลางจะเป็นเชื้อราพวก *Geotrichum candidum* และ *Aspergillus*

fumigatus และเชื้อราที่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิสูงคือ *Cladosporium sp.*, *Aspergillus sp.* และ *Mucor sp.* อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิใกล้ 60°C พบว่าการเจริญเติบโตของเชื้อราจะหยุดลง และเกิดการตายของเชื้อรา หากอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 60°C ในขณะที่แอคทีโนไมซีตเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ค่อนข้างช้า แต่ทนต่ออุณหภูมิได้สูงถึง 75°C แอคทีโนไมซีตจะมีผลต่อการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในช่วงหลังของการย่อย และมีส่วนสำคัญในการย่อยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก

เมื่อพิจารณาวัตถุอ้างอิงเชิงลบ (พอลิเอทิลีน) พบว่าเมื่อหักปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักออก ค่าการสลายตัวทางชีวภาพพบว่าจะเกิดขึ้นได้น้อยมากคือ 2.7% และ 0.0% ที่อุณหภูมิ 37°C และอุณหภูมิ 58°C ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่าจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูงไม่ย่อยสลาย-ย่อยสลายพอลิเอทิลีนได้น้อยมาก

วิเคราะห์การสลายตัวทางชีวภาพในเบื้องต้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 สูตรพบว่าที่อุณหภูมิ 37°C เวลา 49 วัน สูตรที่มี PBAT สามารถเกิดการย่อยสลายได้เร็วที่สุด โดยมีค่าการสลายตัวทางชีวภาพ 11.7% ในขณะที่ PLA ที่ผสมเฉพาะยาง HENR2 และ HENR3 มีการย่อยสลายที่ใกล้เคียงกันคือ 3-6% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหมู่ยึดหยุ่นของ PBAT ทำให้จุลินทรีย์สามารถทำการย่อยสลายพอลิเมอร์ผสมได้ง่ายกว่า ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูง ($58^{\circ}\text{C} \pm 2$) ขึ้น ผลการทดสอบวันที่ 56 การสลายตัวทางชีวภาพของฟิล์มสูตร PLA/H2/PBAT-20(2) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 ซึ่งอาจหมายความว่าไม่เกิดการย่อยสลายเกิดขึ้น แต่เมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา (รูป 4.14) จะเห็นว่าในช่วงต้นมีการย่อยสลายเกิดขึ้น (1-6 วันแรกมีการย่อยสลายสูงกว่าการย่อยสลายที่อุณหภูมิ 37°C) แต่ช่วงท้ายปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายฟิล์มมีค่าน้อยกว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากจุลินทรีย์ย่อยปุ๋ย ส่งผลให้เกิดค่าการคำนวณติดลบ หรือเท่ากับ 0 เกิดขึ้น ทั้งนี้อาจมีได้หลายสาเหตุ เช่น เกิดการหยุดทำงาน หรือตายของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบในชุดนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น

ในขณะที่สูตร PLA/H2-20(2) และ PLA/H3-20(2) มีค่าการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการสลายตัวที่อุณหภูมิ 37°C โดยสูตรที่มียาง HENR3 ซึ่งมีค่า T_g ต่ำกว่า HENR 2 พบว่าการสลายตัวได้ดีกว่า นอกจากนี้จากกราฟร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพ (รูป 4.14) ทั้งการทดสอบที่อุณหภูมิ 37°C และที่อุณหภูมิ 58°C กราฟการสลายตัวทางชีวภาพยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงมีอัตราการเพิ่มขึ้นมากกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวจะสามารถย่อยสลายได้เพิ่มขึ้น หากมีเวลาในการย่อยสลายเพิ่มขึ้น และการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงจะให้ผลดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

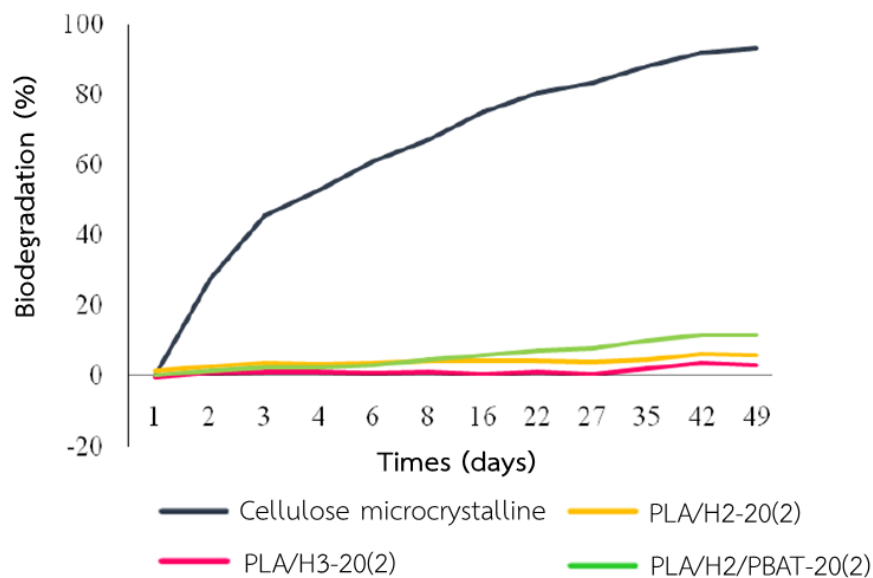
นอกจากนี้จากการทำวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัยที่ได้ส่งเฉพาะยาง HENR1 ซึ่งเป็นยางที่มีขั้วสูงสุดและมีความแข็งแรงสูงสุดในยาง HENR ทั้ง 3 ชนิด ไปทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพโดยสถาบันทดสอบ และมาตรฐานทดสอบเดียวกับงานวิจัยในครั้งนี้ พบว่า HENR1 สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยพบว่า HENR1 สามารถสลายตัวทางชีวภาพที่อุณหภูมิ 58°C ได้ 23% เมื่อใช้เวลาในการสลายตัว 39 วัน แต่มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 37°C ได้น้อยมาก คือ 0.1% เมื่อใช้เวลาในการสลายตัว 24 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่า T_g ของ HENR1 และแรงดึงดูดระหว่างโซ่ที่สูง (H-bonding) ของหมู่ไฮดรอกซิลของ HENR จึงทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายที่อุณหภูมิ 37°C ได้ยาก ทั้งนี้การทดลองนี้เน้น HENR2 และ HENR3 ซึ่งมีค่า T_g ที่ต่ำกว่า และมีแรงดึงดูดระหว่างโซ่ที่น้อยกว่า จึงน่าจะเกิดการย่อยสลายได้เช่นเดียวหรืออาจดีกว่า HENR1 ที่เคยทดสอบ (การทดสอบ HENR1 วัตถุอ้างอิงเชิงบวกมีการสลายตัว 100% และ 97.9% วัตถุอ้างอิงเชิงลบมีการสลายตัว 0% และ 0% ที่อุณหภูมิ 37°C และอุณหภูมิ 58°C เมื่อใช้เวลาทดสอบ 24 วัน และ 39 วัน ตามลำดับ)

จึงอาจกล่าวโดยสรุปในหัวข้อนี้ได้ว่าถุงปลูกที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้สามารถย่อยสลายได้หากทำการฝังดินในสภาวะและเวลาที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM D5338-98: 2003 และ ISO 14855-1:2012

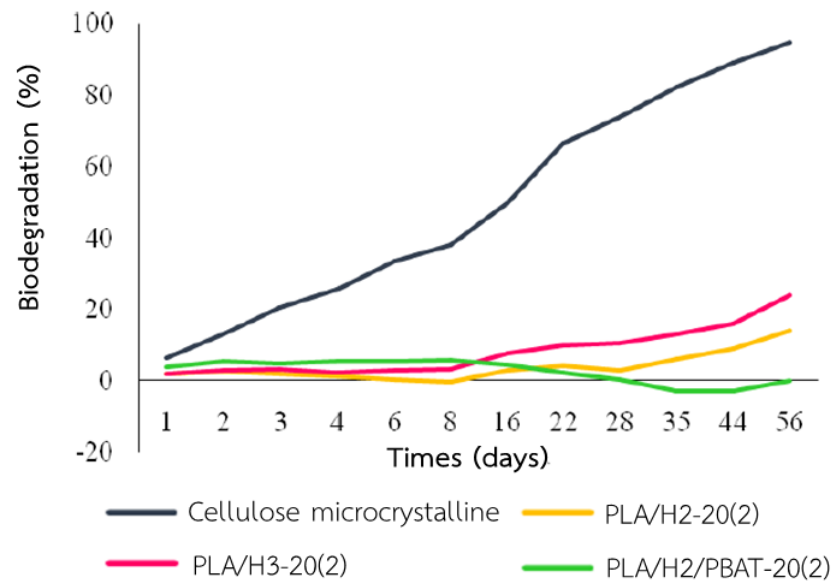
ตาราง 4.38 ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของถุงปลูก วัสดุอ้างอิงเชิงบวก และวัสดุอ้างอิงเชิงลบเทียบกับชุดควบคุม

รหัสตัวอย่าง	การสลายตัวทางชีวภาพ (%)			
	ที่ $37 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 49 วัน		ที่ $58 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 56 วัน	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Control ¹	-	-	-	-
R+ ²	93.2	6.4	94.8	8.2
R- ³	2.7	1.5	0.0	15.7
PLA/H2-20(2) ⁴	5.8	1.2	14.1	19.4
PLA/H3-20(2) ⁴	3.0	3.5	24.0	9.5
PLA/H2/PBAT-20(2) ⁴	11.7	4.8	0.0	4.9

- เมื่อ ¹ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก
- ² ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลาย Cellulose microcrystalline โดยจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก
- ³ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายพอลิเอทิลีนโดยจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก
- ⁴ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายฟิล์มพอลิเมอร์ผสมโดยจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก



(a)



(b)

รูป 4.14 กราฟร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างทดสอบเทียบกับวัสดุอ้างอิงเชิงบวก (Cellulose microcrystalline) เมื่อ (a) ทดสอบที่อุณหภูมิ $37 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และ (b) ทดสอบที่อุณหภูมิ $58 \pm 2^{\circ}\text{C}$

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ทางธรรมชาติดัดแปรไฮดรอกซีไดไซไฮดรอกซิล (HENR) เพื่อเพิ่มการคงสภาพของถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ทั้งชนิดและปริมาณของ HENR ต่อสมบัติในด้านต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นถุงปลูก

จากผลการศึกษาพบว่า HENR1 ซึ่งมีค่าสูงสุด สามารถเตรียมให้เป็นผงขนาดเล็กได้ง่ายตั้งแต่หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา แต่ HENR ที่ได้มีค่า T_g สูง เนื่องจากแรงดึงดูดของหมู่ไฮดรอกซิลบนโซ่พอลิไอโซพรีน ทำให้เมื่อผสมร่วมกับ PLA แม้ว่าจะผสมเข้ากับ PLA และเป่าฟิล์มได้ง่ายกว่าการเป่าฟิล์มที่มี PLA เพียงชนิดเดียว แต่ฟิล์มที่ได้ยังคงไม่สามารถยืดตัวได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม PLA แม้ว่าจะเพิ่มอัตราส่วนของ HENR1

ในขณะที่ HENR2 และ HENR3 หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ผงที่มีขนาดใหญ่กว่า HENR1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมขนาดไม่ให้มีขนาดใหญ่เกินไป ซึ่งขนาดของยางดัดแปรจะมีผลต่อความเข้ากันได้ และการกระจายตัวของอนุภาคยางบนฟิล์มที่เตรียมได้ จากการทดลองลดขนาดด้วย 2 เทคนิค คือการใช้ ball mill และการใช้โม่บด พบว่ายางที่ได้หลังลดขนาดมีลักษณะทางกายภาพจากการสังเกตด้วยสายตาไม่แตกต่างกันมากนัก แต่การลดขนาดด้วย ball mill ใช้เวลาในการลดขนาดที่นานกว่า

เมื่อนำยางทั้ง 2 วิธีไปผสมร่วมกับ PLA เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าฟิล์มที่เตรียมจาก HENR ทั้ง 2 วิธี สามารถขึ้นรูปได้ง่าย โดยฟิล์มที่เตรียมจากยางที่ลดขนาดด้วยโม่บดมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงกว่าฟิล์มที่เตรียมจากยางที่ลดขนาดด้วย ball mill และยาง HENR3 ซึ่งมีค่า T_g ต่ำกว่า มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่สูงกว่ายาง HENR2 และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ HENR3 ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามยางทั้งหมดที่เตรียมได้จากทั้ง 2 วิธี (ball mill และโม่บด) มีค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสของยัง ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งยังมีความทนต่อการใช้งานใกล้เคียงกัน คือสามารถทนต่อสารละลายปุ๋ย และการกดทับของวัสดุปลูกได้ประมาณ 2 เดือน ในขณะที่ถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA เกิดการปริแตกเมื่อผ่านการใช้งานไปเพียง 15 วัน จึงอาจกล่าวได้ว่าทั้ง HENR2 และ HENR3 สามารถช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากน้ำปุ๋ย ส่งผลให้ PLA ซึ่งเป็นพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ทนต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ดีขึ้น โดยพบการปริแตกของถุงที่น้อยลงกว่าถุงที่เตรียมจาก PLA เพียงอย่างเดียว

การผสมสารตัวเติมพบว่าผลกระทบต่อสมบัติด้านการยืดตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยการผสม PBAT ร่วมกับ PLA และยางดัดแปร (PLA:HENR:PBAT = 60:20:20) ช่วยให้ถุงปลูกมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูง (70-250%) ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ทั้งสูตรที่เติม และไม่เติมสารตัวเติมอื่นๆ อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมสารเติมแต่ง (Talc, TiO_2 , Irgarox และ Bio100) ช่วยให้ถุงปลูกไม่เกิดการปริแตกได้ตลอดระยะเวลาของการใช้งานจริง (ปลูกมะเขือเทศนาน 5 เดือน) ในขณะที่สูตรที่ไม่เติมสารเติมแต่งพบการปริแตกของถุงที่เกิดจากการขยายตัวของพืช ทั้งนี้แม้ว่าถุงจะยังคงมีความยืดหยุ่นที่ดี แต่ PLA และ PBAT ยังสามารถเกิดการขาดของโซ่พอลิเอสเทอร์เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ ส่งผลให้เกิดการปริแตกของถุงเกิดขึ้น

ในขณะที่สูตรฟิล์มผสมที่มีเฉพาะ PLA กับยางดัดแปร (PLA:HENR = 80:20) หรือ PLA กับ PBAT (PLA:PBAT = 80:20) ฟิล์มดังกล่าวมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือเพียงประมาณ 2-35% หลังผ่านการใช้งานนาน 1 เดือน โดยสูตรที่ผสมสารเติมแต่ง (Talc, TiO_2 , Irgarox และ Bio100) มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดหลังการใช้งานนาน 1 เดือนที่สูงกว่า ทั้งถุงยังมีการปริแตกที่น้อยกว่า

อย่างไรก็ตามจากผลการเก็บข้อมูลด้านการเจริญเติบโต ปริมาณและคุณภาพของผลผลิตที่ได้ พบว่าแม้ถุงที่ทำการทดสอบจะเกิดการปริแตก แต่การปริแตกนั้นไม่มากนัก ถุงทุกสูตรยังคงสภาพถุงอยู่ได้ตลอดระยะเวลาปลูก และไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งอัตราการเจริญเติบโต ปริมาณและคุณภาพของผลผลิตมะเขือเทศที่ได้รับเมื่อเปรียบเทียบกับถุงปลูกที่เตรียมจาก PE

ศึกษาการย่อยสลายถุงปลูกที่เตรียมได้ พบว่าระบบการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยถุงปลูก PLA ที่มี HENR เป็นองค์ประกอบสามารถย่อยสลายได้ 14-24% เมื่อทำการย่อยที่อุณหภูมิ 58°C เป็นเวลา 56 วัน ในขณะที่ตัวควบคุม (พอลิเอทิลีน) ไม่เกิดการย่อยสลาย (0%) ที่อุณหภูมิที่ทำการทดสอบดังกล่าว จึงอาจกล่าวได้ว่าถุงปลูกที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้สามารถย่อยสลายได้หลังการใช้งานเมื่อเทียบกับถุงที่เตรียมจากพอลิเอทิลีน

บรรณานุกรม

- [1] X. Shi, Q. Li, G. Fu, L. Jia, The effects of polyol on the damping properties of EVM/PLA blend. *Polym. Test.* (2014) 33, 1–6.
- [2] C. Zhang, Y. Huang, C. Luo, L. Jiang, Y. Dan, Enhanced ductility of polylactide materials: Reactive blending with pre-hot sheared natural rubber. *J. Polym. Res.* (2013) 20:121, 1-9.
- [3] K. Pongtanayut, C. Thongpin, O. Santawitee “The effect of rubber on morphology, thermal properties and mechanical properties of PLA/NR and PLA/ENR blends” *Energy Procedia.* (2013) 34, 888-897.
- [4] C. Zhang, W. Wang, Y. Huang, Y. Pan, L. Jiang, Y. Dan, Y. Luo, Z. Peng “Thermal, mechanical and rheological properties of polylactide toughened by epoxidized natural rubber” *Materials and Design.* (2013) 45, 198-205.
- [5] Y. Huang, C. Zhang, Y. Pan, Y. Zhou, L. Jiang, Y. Dan. (2013) Effect of NR on the hydrolytic degradation of PLA. *Polym. Degrad.Stab.* 98: 943-950.
- [6] C. Xu, D. Yuan, L. Fu, Y. Chen “Physical blend of PLA/NR with co-continuous phase structure: preparation, rheology properties, mechanical properties and morphology” *Polym. Test.* (2014) 37, 94-101.
- [7] Y.X. Weng, Y.J. Jin, Q.Y. Meng, L. Wang, M. Zhang, Y.Z. Wang “Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA) and their blend under soil conditions” *Polym. Test.* (2013) 32, 918-926.
- [8] Y. Wang, Z. Wei, Y. Li “Highly toughened polylactide/epoxidized poly(styrene-*b*-butadiene-*b*-styrene) blends with excellent tensile performance” *Eur. Polym. J.* (2016) 85, 92-104.
- [9] L. Mascia, B. Haworth, A. Vignali, R. Megna, D. Acierno, P. Russo “Thermal transitions and solidification kinetics of poly(lactic acid) and blends with epoxidized natural rubber” *Thermochim Acta.* (2016) 633, 82-90.
- [10] H. Gao, X. Fang, H. Chen, Y. Qin, F. Xu, T.Z. Jin “Physiochemical properties and food application of antimicrobial PLA film” *Food Control.* **2017**, 73, 1522-1531.

ภาพผนวก ก

ผลการทดสอบการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ ชุดที่ 1

ภาพผนวก ก

ผลการทดสอบการใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ ชุดที่ 1

1. ด้านการเจริญเติบโต

1.1 ความสูงต้น

ตาราง ผ-1.1 ความสูงของต้นมะเขือเทศที่อายุ 1-11สัปดาห์หลังปลูก

กรรมวิธี	ความสูงต้น (เซนติเมตร)					
	จำนวนสัปดาห์หลังปลูก (สัปดาห์)					
	1 ^{/ns}	3 ^{/ns}	5 ^{/ns}	7 ^{/ns}	9 ^{/ns}	11 ^{/ns}
PLA/H2-20(1)	15.1	55.1	103.6	139.5	181.5	193.5
PLA/H3-20(1)	16.6	55.8	106.1	147.5	189.5	204.6
PLA/H3/PBAT-20(1)	15.9	55.0	107.6	146.9	182.7	197.3
PE(1)	16.2	56.8	104.3	141.3	179.9	197.8
LSD (0.05)	-	-	-	-	-	-
CV(%)	8.62	6.98	5.72	4.29	5.35	5.56

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

1.2 จำนวนข้อต่อต้น

ตาราง ผ-1.2 จำนวนข้อของต้นมะเขือเทศ

กรรมวิธี	จำนวนข้อ (ข้อ)					
	จำนวนสัปดาห์หลังปลูก (สัปดาห์)					
	1 ^{/ns}	3 ^{/ns}	5 ^{/ns}	7 ^{/ns}	9 ^{/ns}	11 ^{/ns}
PLA/H2-20(1)	3.9	8.9	12.3	17.6	20.2	22.7
PLA/H3-20(1)	4.1	8.8	12.5	18.6	21.9	24.2
PLA/H3/PBAT-20(1)	4.1	8.3	12.4	18.4	21.3	23.2
PE(1)	3.9	8.3	12.1	17.6	21.2	22.9
LSD (0.05)	-	-	-	-	-	-
CV(%)	5.49	7.95	8.13	3.63	9.46	7.94

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

1.3 จำนวนวันออกดอก

ตาราง ผ-1.3 จำนวนวันหลังย้ายปลูกที่เริ่มออกดอกของต้นมะเขือเทศ

กรรมวิธี	จำนวนวันออกดอก (วัน)
PLA/H2-20(1)	24.6
PLA/H3-20(1)	24.1
PLA/H3/PBAT-20(1)	24.3
PE(1)	23.9
LSD _(0.05)	ns
CV(%)	3.95

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

1.4 จำนวนข้อผลต่อต้น

ตาราง ผ-1.4 จำนวนข้อผลของต้นมะเขือเทศ

กรรมวิธี	จำนวนข้อผล (ข้อ)			
	จำนวนสัปดาห์หลังปลูก (สัปดาห์)			
	5 ^{/ns}	7 ^{/ns}	9 ^{/ns}	11 ^{/ns}
PLA/H2-20(1)	2.1	6.3	9.9	11.2
PLA/H3-20(1)	2.3	5.9	9.6	11.3
PLA/H3/PBAT-20(1)	2.5	5.8	10.2	12.1
PE(1)	2.1	5.6	9.6	11.1
LSD _(0.05)	-	-	-	-
CV(%)	26.48	18.91	17.00	14.57

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2. ด้านคุณภาพผลผลิต

2.1 จำนวนผลผลิตแยกเกรดและผลผลิตรวมต่อต้น

ตาราง ผ-1.5 จำนวนผลแต่ละเกรด และจำนวนผลผลิตรวมต่อต้น

กรรมวิธี	จำนวนผลผลิตแต่ละเกรด (ผล/ต้น)			จำนวนผลผลิตรวม (ผล/ต้น) ^{/ns}
	เกรด 1 ^{/ns}	เกรด 2 ^{/ns}	เกรด U ^{/ns}	
PLA/H2-20(1)	0.6	0.6	1.1	3.1
PLA/H3-20(1)	0.9	0.6	1.4	3.2
PLA/H3/PBAT-20(1)	0.7	0.7	1.3	2.9
PE(1)	0.8	0.7	0.9	2.9
LSD _(0.05)	-	-	-	-
CV(%)	62.90	63.59	34.17	23.54

^{ns} : ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

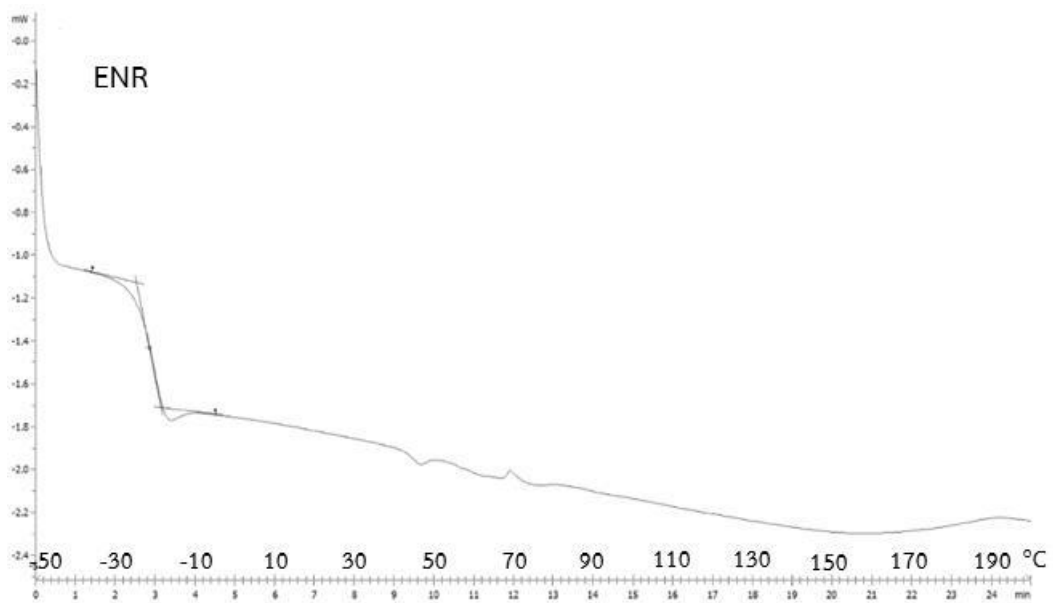
ภาพผนวก ค

ร่างบทความวิจัยสำหรับส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

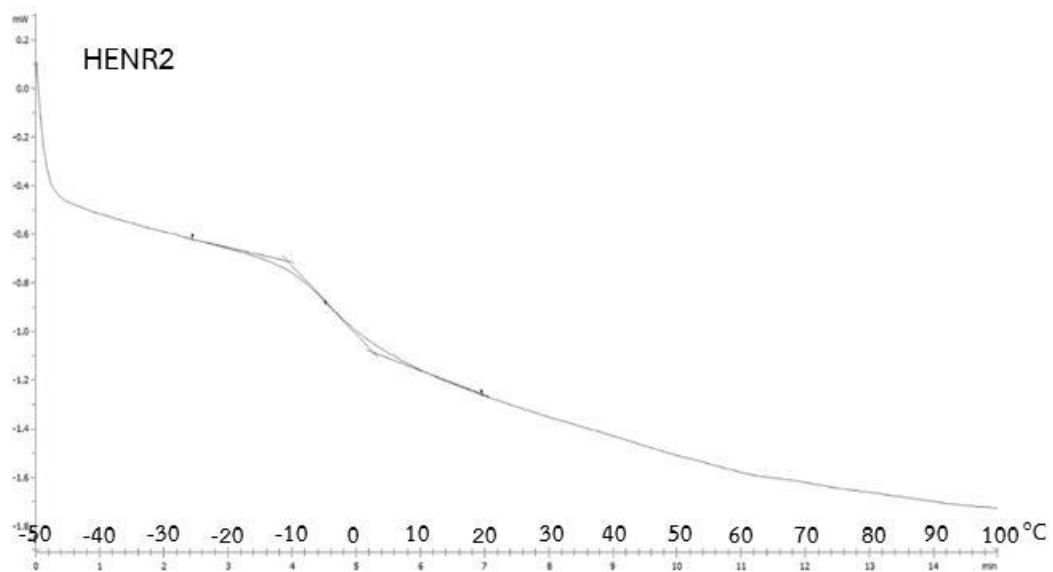
ภาพผนวก ข
DSC โครมาโตแกรม

ภาพผนวก ข

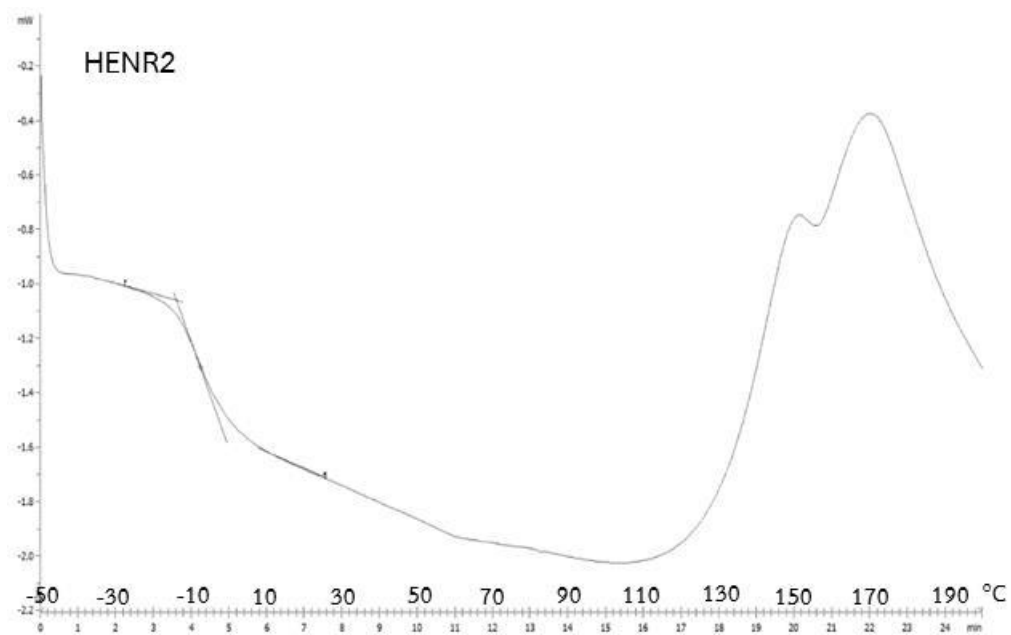
DSC โครมาโตแกรม



รูป ผ-2.1 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ -50 – 200°C ของ ENR



รูป ผ-2.2 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ -50 – 100°C ของ HENR2



รูป ผ-2.3 DSC เทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ -50 – 200°C ของ HENR2

The effect of novel modified rubber on morphology, physical and mechanical properties of blown PLA/HENR film

Chor Wayakron Phetphaisit^{1*,2}, Wittawat Wapanyakul^{1,2}, Pranee Phinyocheep³

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

²Center of Excellence in Biomaterials, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand

³Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University, 10400, Thailand

*Corresponding author. Tel.: +66-55-3445 ; Fax: +66-55-96-3401

e-mail: chorwayakronp@nu.ac.th

Abstract

In this work, modified natural rubber powder was prepared and used to increase the elongation of poly(lactic acid) (PLA) film. PLA and hydroxyl epoxidized natural rubber (HENR) was blended via a melt mixing process using twin screw extruder and a blowing machine. The influence of HENR content in the blend films on the microstructure, thermal, tensile, and optical properties has been investigated. The morphology of the blend showed coarse surface and elongated fibrils of HENR in the PLA matrix. After blowing, the dispersion of small particles of HENR in the substrate was seen. The size of the remaining HENR particles was smaller than that of the starting powder. The compatibility of HENR and the remaining rubber particles may synergistically contribute to the improvement of the elongation at break and UV-vis transition protection of PLA films. The elongation at break was drastically increased from 3% to 228% after blending with 20 wt% HENR. On the other hand, all blends exhibited 2 glass transition temperatures with lower values than that of pure PLA films. It can be concluded that the blend is partially compatible and may help the flexibility of PLA films.

Keywords: Poly (lactic acid); Hydroxyl epoxidized natural rubber; Rubber powder; Blown film

1. Introduction

Flexible film packaging such as bags and envelopes needs to be considered not only in terms of its utility but also in terms of its environmental impact. Packaging products made of conventional plastic resin have been a cause of environmental problems because of their inherent non-biodegradability. The substitution of plastic resins from petroleum resources with bio-plastics has been investigated. Poly(lactic acid) (PLA) is one of these biodegradable polymers that have been investigated for development into flexible films such as film packaging for meat because it has been recognized as safe for food, especially packaging that will be in contact with the product, which might be acidic or contain fats [1, 2]. It is also of potential use in agriculture for the use as planting/mulching films because it can be decomposed after use and thus reduce the plastic waste on cultivated land [3, 4]. However, due to the relatively high glass transition temperature of PLA, PLA exhibits glassy state in usage. As a result, PLA shows great tensile strength, but with little elongation resulting in limitations for its use in food or agriculture applications. In order to address this toughness problem, many approaches have been used such as copolymerization of lactides with other monomers [5, 6], grafting with other polymers [7], adding of plasticizers [8, 9] and blending

with toughening polymers [10-18]. Among these approaches for addressing the problems, blending with other polymers is of big interest.

Elastomers are one of the materials recognized for their efficiency in increasing the toughness of plastics by increasing the energy absorption of brittle polymers. Various elastomers have been used in blends with PLA such as polyurethane elastomer [13], thermoplastic polyurethane [14], synthetic and natural rubber [15-18]. Among these, natural rubber and modified natural rubber have been of interest, because of their degradability and environmental friendliness. However, the problem of natural elastomers such as NR or ENR is their high tacking property, which limits their use in continuous mixing with PLA by using extruder. Moreover, they also provide a relatively low elongation value compared to synthetic elastomers.

Furthermore, another disadvantage of PLA is its high UV-visible light radiation transmittance due to its colorless and transparent properties, which presents a weakness in terms of preserving food materials [2, 19-20]. In addition in the field of agricultural and food items, UV-visible light radiation may accelerate the laceration of planting/mulching films prior to use [21-22]. Therefore, not only does the flexibility of PLA packaging need to be increased, but also the UV protection properties need to be considered for food and agricultural applications.

This work focused on the use of new modified natural rubbers containing both epoxide and hydroxyl groups (Hydroxyl epoxidized NR, HENR) as the agents which increase the flexibility and UV-visible light protecting properties of PLA films. It has been reported that the epoxide and hydroxyl groups, which would be able to interact with polylactic acid, show a significant effect in enhancing the compatibility and physical properties between rubbers and PLA, therefore, giving rise to the adsorption energy of the PLA matrix [16, 18, 23]. In addition, the obtained HENR is available as fine solid powder, which can be easily combined with PLA by mixing in solid state via twin screw extruder and shaped by film blowing, respectively. The effects of HENR content on the morphological, thermal, and mechanical properties of the blend compound and blend films are presented in detail. Furthermore, the UV-vis transmission behavior is also investigated because it plays an important role in food and agriculture applications.

2. Experimental

2.1. Materials

PLA (4043 D grade) was purchased from Nature works Co. Ltd., (USA). High ammonia natural rubber (HANR) latex (dry rubber content, DRC = 60%) was supplied from TTN Rubber, Thailand. Hydroxyl epoxidized natural rubber (HENR) was synthesized in our laboratory following the procedure presented in the patent no. 12147 (Thailand) [24]. Briefly, the HENR was prepared via two reaction steps: epoxidation of natural rubber (ENR) and oxidation of epoxidized natural rubber (HENR). Fine particles of the product were obtained after finishing the oxidative reaction. The powder was dried by using a microwave operating at 510 watt for 10 minutes and then in oven at 50°C for 24 hours.

2.2 Compounding and blown film preparation

PLA was dried at 80°C for 8 hours, in the hot air oven before being used. The PLA and HENR powders were blended with twin screw extruder (Lab Tech type LTE 16-40) with the screw speed of 100 rpm. The co-rotating screw diameter was 16 mm and an L/D ratio of 40 with five control temperature zones, which were set in the range from 160°C to 175°C (die zone). The weight ratios of PLA/HENR used in this work were as follows: 100/0, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 % by weight. The blend filaments were collected for surface compatible analysis. After that, blend films were prepared by blown film machine connected with a

single screw extruder with the screw diameter of 20 mm and an L/D ratio of 30. The five control temperature zones were set to a range from 180°C to 200°C (annular zone) and the screw speed was maintained at 80 rpm (Lab Tech type LF-250). The width and thickness of the sac were about 10 inches and 50 microns, respectively.

2.3 Characterization methods

Chemical structure of HENR was characterized by an ATR-IR instrument using diamond press on a Perkin-Elmer Spectrum GX Series spectrometer in the wavenumber range from 600 to 4000 cm^{-1} .

The morphology of the filaments and film surfaces of neat PLA and PLA/HENR blends were studied by Scanning Electron Microscopy (SEM) on a LEO 1455 VP instrument. The filament blends were cryogenically fractured in liquid nitrogen before crack formation. The crack surfaces and the films were sputtered with gold before the analysis.

The tensile properties of the blend films were measured using an Instron Universal Tester (Model 5965 series) with a load cell of 1 kN. The crosshead speed was 50 mm/min and the procedure was performed according to the ASTM D882 standard. The rectangle film had the following dimensions 10x90x0.5 mm^3 . The average of data for 10 specimens of each condition is reported.

The thermal properties of the blend films were analyzed using a Differential Scanning Calorimeter (DSC) (Mettler Toledo model TGA/DSC1 STAR^e system). All film samples were scanned from -50°C to 200°C with a heating rate of 10°C/min under nitrogen flow rate of 20 mLmin^{-1} . The degree of crystallinity (X_c) of the PLA and PLA blend films was calculated using the following equation:

$$X_c (\%) = \left(\frac{(\Delta H_m - \Delta H_{cc})}{w_{\text{PLA}} \Delta H_m^0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Where ΔH_m and ΔH_{cc} are the enthalpies of melting and cold crystallization during the heating; ΔH_m^0 is the melting enthalpy of pure PLA (93.7 J/g) [15, 25], and w_{PLA} is the weight fraction of PLA component in the blend.

The light transition behaviors of the pure PLA and PLA/HENR blend films were studied by using UV-vis absorption spectrophotometer (Jasco V-650). The UV-vis transmittance of the films was detected in the wavelength range of 200-900 nm with the resolution of 0.5 nm. The film color properties were measured by using color reader (CR-20 Konika minolta). The film color values (L^* (lightness), a^* (+60 (red) to -60 (green)) and b^* (+60 (yellow) to -60 (blue)) were recorded. Average values of ten measurements for each five random locations of the film were calculated and recorded. Total color difference parameter (ΔE^*) was calculated in order to quantify the variation in the color of the control pure PLA films and PLA/HENR blend films as follows:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

3. Results and discussion

3.1 Hydroxyl epoxidized NR

The HENR powder was obtained after a two steps, epoxidation and oxidation, modification of natural rubber. The appearance of HENR as a final product is a fine powder. Images of the resulting rubber materials can be seen in the Figure 1. The particle size of the powder, measured by optical microscope, is approximately between 200-900 microns.

The comparison of infrared spectra of NR and HENR is shown in Figure 2. The infrared spectrum of the hydroxyl epoxidized rubber (Figure 2 (b)) exhibits decreased intensities of the bands corresponding to C=C stretching and C=C-H out of plane bending of cis-1,4-polyisoprene at 1664 cm^{-1} and 836 cm^{-1} in comparison to the signal of CH_3 bending of the isoprene units at 1376 cm^{-1} . This confirms the loss of the double bonds of natural rubber. Furthermore, HENR exhibits new characteristic signals at 1250 cm^{-1} and 875 cm^{-1} , assigned to epoxide symmetric and asymmetric stretching and signals at 3436 cm^{-1} and 1064 cm^{-1} , assigned to $-\text{OH}$ stretching and C-O(H) stretching, respectively. These signals represent the presence of the epoxide and hydroxyl functional groups on the isoprene units of natural rubber [26-28].

The ratio of hydroxyl content and epoxide content was determined using the ATR-IR technique. The OH ratio (A_{1064}/A_{1376}) and epoxide ratio (A_{875}/A_{1376}) of HENR on the rubber chain relative to the isoprene unit are 5.86 and 0.85, respectively. The glass transition temperature was analyzed ($T_{g,\text{midpoint}}$) using DSC and was determined to be -4.80°C (Figure 5).

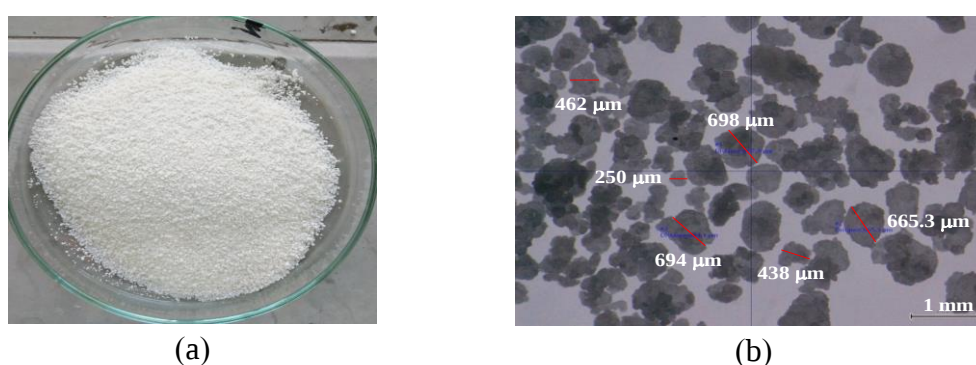


Figure 1 HENR (a) photograph and (b) optical microscope image (2x).

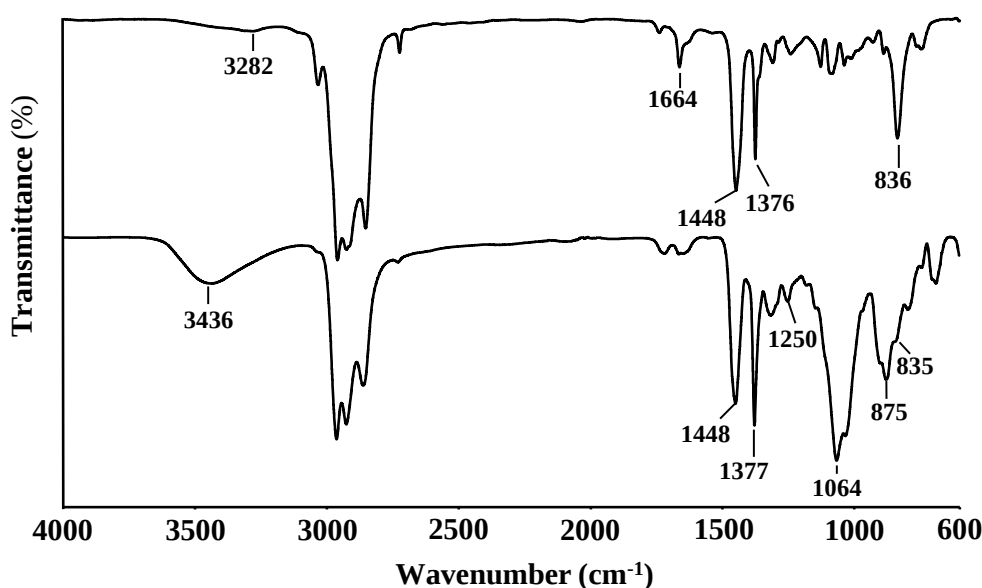


Figure 2 ATR-IR spectra of (a) NR and (b) HENR.

3.2 PLA/HENR compound

PLA/HENRs were blended by a twin screw extruder. The appearance of the blend pellets is light brown, opaque, and softer than that of the starting PLA.

Figure 3 shows the SEM micrographs of fracture surfaces of PLA and PLA/HENR blends. It is usually the case that the mechanical properties of polymer blends depended upon

the phase morphology. The fractured surface of neat PLA was very smooth, which corresponded to a brittle fracture surface. The addition of HENR, in all studied ratios, resulted in the observation of coarse surface without obvious particles of HENR dispersed in the blends, except for the case of 25 wt% where obscure rubber droplet was observed. This morphology is similar to the morphologies of PLA/ENR blends reported by several papers [17-18]. Thus, it can be postulated that HENR is compatible with PLA [16, 23, 29]. Moreover it was observed that elongated fibrils remained in the fracture surface and that their content increased with increasing HENR content. These morphology features and elongated fibrils might have an effect on the toughening properties and increase the elongation of the blend films [26, 29-30].

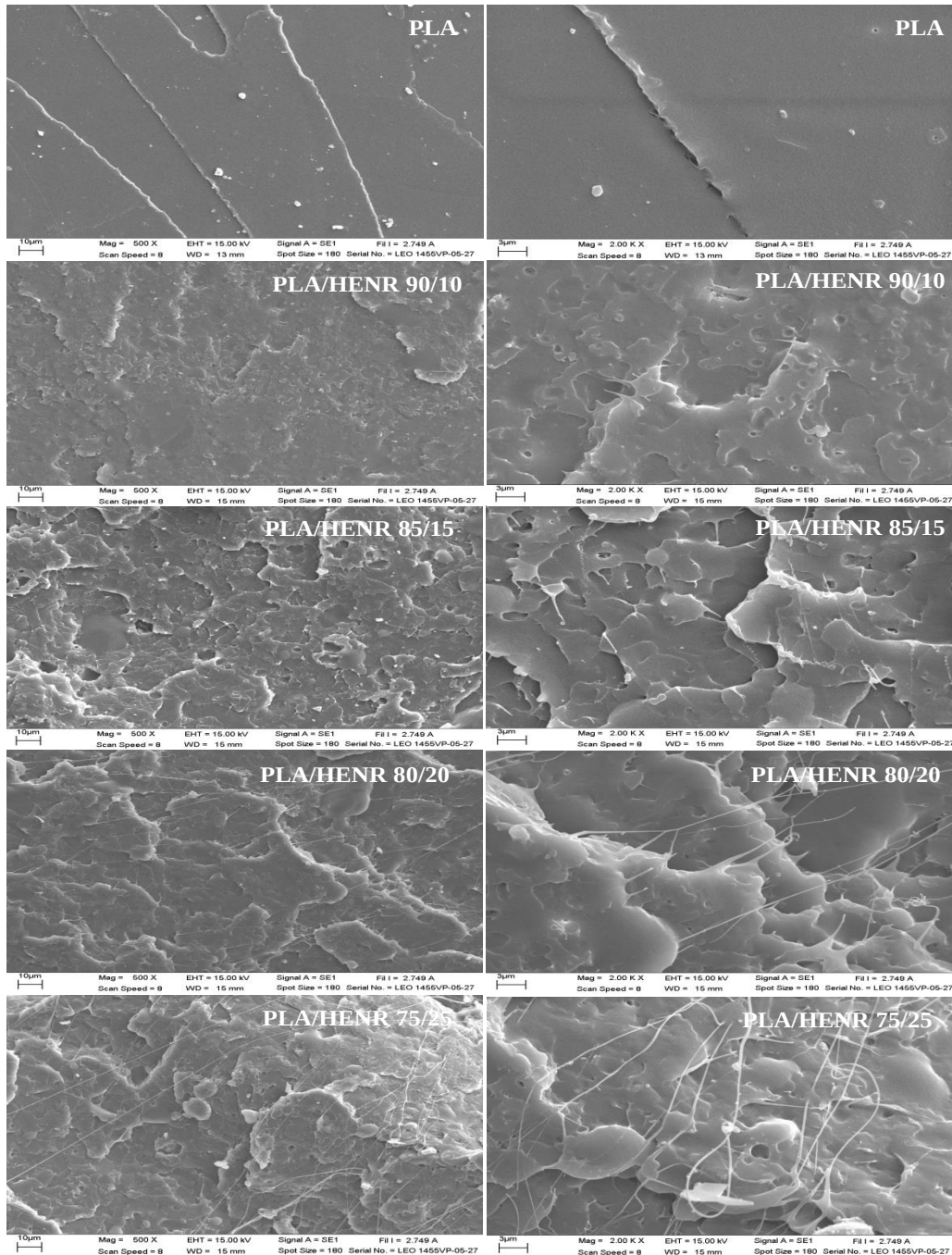


Figure 3 SEM micrographs (500x and 2kx) of PLA and PLA/HENR blends with various rubber contents.

3.2 PLA/HENR films

3.2.1 Morphology of blend films

The SEM micrographs of film surfaces of PLA and PLA/HENR blends are shown in Figure 4. It can be seen that all the blend films exhibit phase separation of small rubber particles in the PLA matrix of the thin film. The amount and the size of the dispersed phase increased with increasing amount of the rubber in the blend. The particle size of remaining rubber was approximately between 5-30 microns, which was smaller than that of the starting HENR particles. Thus, it can be concluded that HENR can partially dissolve and form a compatible blend with PLA. The presence of the remaining rubber is probably due to the high intra-action of HENR and short time of mixing between PLA and HENR due to the small size of the twin screw extruder. Therefore, small rubber particles dispersed in the PLA matrix are present in the prepared materials.

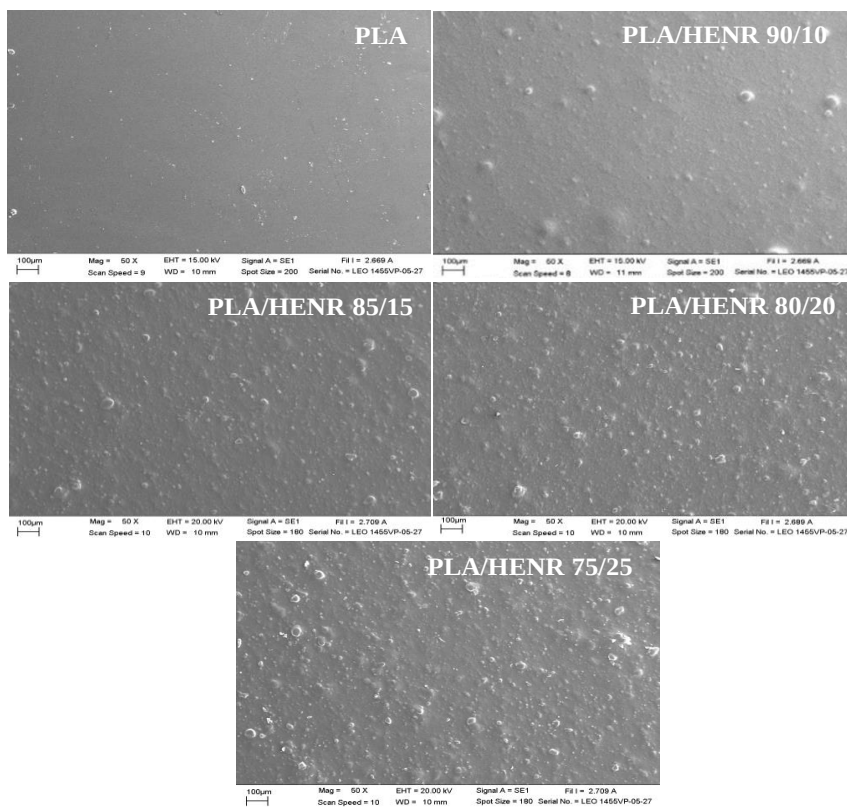


Figure 4 SEM micrographs (50x) of PLA film and PLA/HENR blended films with various HENR contents.

3.2.2 Thermal analysis of blend films

The DSC thermograms of PLA film and PLA/HENR blend films are shown in Figure 5 and the transition temperatures are summarized in Table 1. Blends containing more than 15 wt% of HENR actually exhibit two T_g values, the first occurring in the 45-47°C range and the others in the 57-59°C range. The first T_g lies between the values for HENR and PLA, indicating that some molecular interaction between PLA and HENR is present and inhibits chain mobility of the rubber component [16]. This trend suggests that some parts of HENR which are solubilized in the PLA matrix are thermodynamically compatible, especially with higher HENR content.

The cold crystallization temperature (T_{cc}), a value that signifies the reorganization of amorphous domains into crystalline ones, of PLA film and the PLA/HENR blend films has been determined during heating analysis. The T_{cc} s of blend films resulted in weaker crystallization peak (about 110°C). This is probably due to the remaining HENR particles, which can act as nuclei and induce crystallization process of PLA. This phenomenon was also observed in PLA/NR blends, where NR showed small phase separation in the PLA matrix. On the other hand, it was not observed in compatible PLA/ENR blends [17]. The lower cold crystallization temperature represents higher crystallization kinetics of the blends, thus indicating the involvement of more flexible macromolecules characteristic for HENR [31]. Furthermore, the reduction in crystallization temperature (ΔH_m) with increasing HENR contents is attributed to the rate of reduction of molecular relaxation rate exhibited in the abnormal formation of PLA crystals [32].

Another observation was the splitting of the melting peaks (T_m) with increasing HENR contents. This phenomenon can take place due to several factors such as type of solvent used for the preparation of PLA cast film [33] or heating rate of temperature change for DSC analysis [32]. All of them lead to the change of the perfect PLA α crystal into a mixture of α and β crystal forms. Thus, it can be concluded that the presence of two overlapping endothermic peaks is probably a result of the formation of different crystalline structures of PLA as a result of the presence of HENR nuclei during the cold crystallization step and the reduction of macromolecular interaction of PLA [17, 34]. Moreover, the appearance of the double peak may indicate a possible effect due to the reaction between PLA and HENR. This possibility is evidenced by the formation of a broader and delayed T_{cc} during the analysis process, accompanied with a reduction in the melting enthalpy (ΔH_m) [32].

In addition, %crystallinity of blend film shows the slight increase containing 10 wt% HENR and followed by low content of %crystallinity (0.5-0.7%) in samples with other PLA/HENR ratios. This data was calculated from the cold crystallization enthalpy values [35] and showed the same results as those that were observed for pure PLA (4043 D grade) in another paper [10]. Thus, it can be concluded that the HENR can slightly induce crystallization of PLA during our film blowing process.

Table 1 DSC analysis of PLA film, PLA/HENR blend films and starting HENR.

Samples	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
PLA	60.47	117.32	149.49	24.16	25.92	1.88
HENR	-4.80	-	-	-	-	-
PLA/HENR 90/10	58.26	112.83	149.09	21.83	23.76	2.29
PLA/HENR 85/15	47.33, 58.57	110.49	146.56, 151.56	18.75	19.08	0.41
PLA/HENR 80/20	45.54, 57.96	111.99	144.38, 150.04	21.21	21.77	0.75
PLA/HENR 75/25	46.63, 58.41	111.48	144.40, 149.07	16.35	16.67	0.46

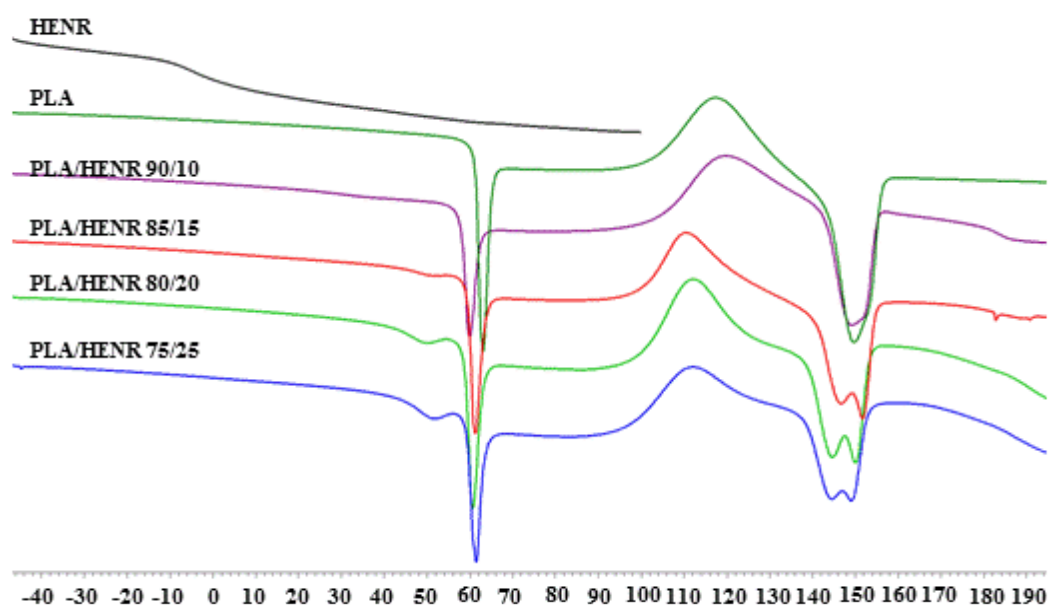


Figure 5 DSC thermograms of starting HENR, PLA films and PLA/HENR blend films.

3.2.3 Mechanical properties of the blend films

The tensile properties of PLA and PLA/HENR blend films are shown in Figure 6. It was observed that tensile strength and elongation at break of PLA film measured in transverse direction (TD) and machine direction (MD) were 57-58 MPa and 2.8-2.9%, respectively. Incorporation of low content of HENR (10 wt%) resulted in tensile modulus and elongation at break being slightly higher than that of the starting PLA film. The increase of stress at low extension is probably because of the increased degree of crystallinity of PLA in the blend and the interaction between the carbonyl and acid groups of PLA with hydroxyl and epoxide groups of HENR [36].

The elongation at break increased with increasing HENR content in the blend film in comparison with pure PLA, which indicates the decrease of intra-molecular interactions of PLA and increase of inter-molecular interaction between PLA and HENR. After adding 15-25 wt% of HENR, elongation of the blend increased remarkably in both directions to 100-230% with the tensile strength of 30-40 MPa. These results indicate that the elastic properties of modified rubber play an important role in the tensile deformation of PLA film from brittle to ductile deformation. It should be noted that the maximum elongation occurred with 20 wt% HENR in PLA, which gave the most appropriate amount of solubilized HENR phase and the amount of dispersed rubber in the PLA matrix. In the case of the sample with 10 wt% HENR, the solubilized rubber phase might be too small for acting as a good toughening agent. On the other hand, the material containing 25 wt% of HENR, might have too many HENR particles, which may favor the possibility of acceleration of phase separation and phase failure of the blends.

Figure 7 shows the stress-strain curves of PLA and PLA/HENR blend films with different HENR content. It was observed that PLA film shows the obvious break point before yielding. On the contrary, all the blend films show yielding and necking which was observed and continued until failure. Furthermore, strain hardening occurred after the yield point and continued until failure (except 10 wt%). Notably, when 20 wt% HENR was blended, the elongation of the blend film is tremendously increased by 228-229 in both direction.

The occurring of HENR presented an increase in elongation at break seen during plastic deformation, which is the characteristic of ductile formation of the PLA blends that

was reported by other papers [16, 37]. It can be concluded that the presence of high number of functional groups of HENR, such as hydroxyl group and epoxide group, in PLA matrix played effective role in enhancing the elongation at break properties of the blend and changes the failure behavior of the film in the tensile test from brittle failure of pure PLA film to ductile failure of the blends.

From above of all analysis, a possible mechanism for interaction between the HENR and PLA is proposed in Scheme 1.

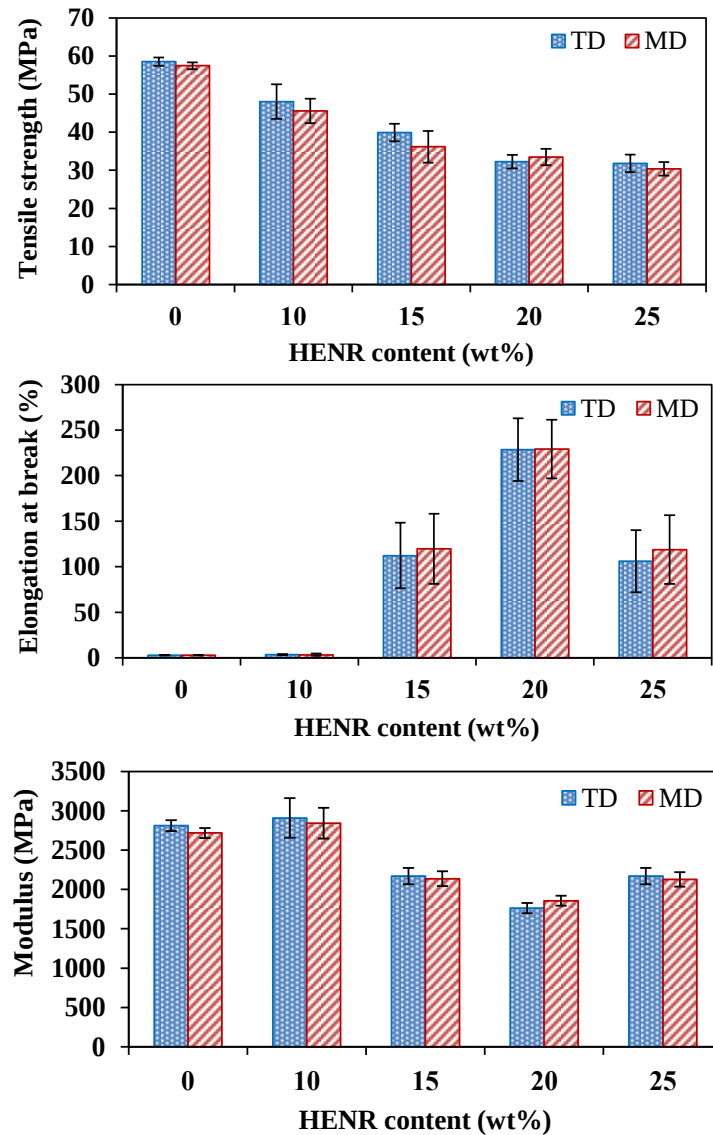


Figure 6 Tensile properties of PLA and PLA/HENR blend films in transverse direction (TD) and machine direction (MD): (a) Tensile strength, (b) Elongation at break and (c) Young's modulus.

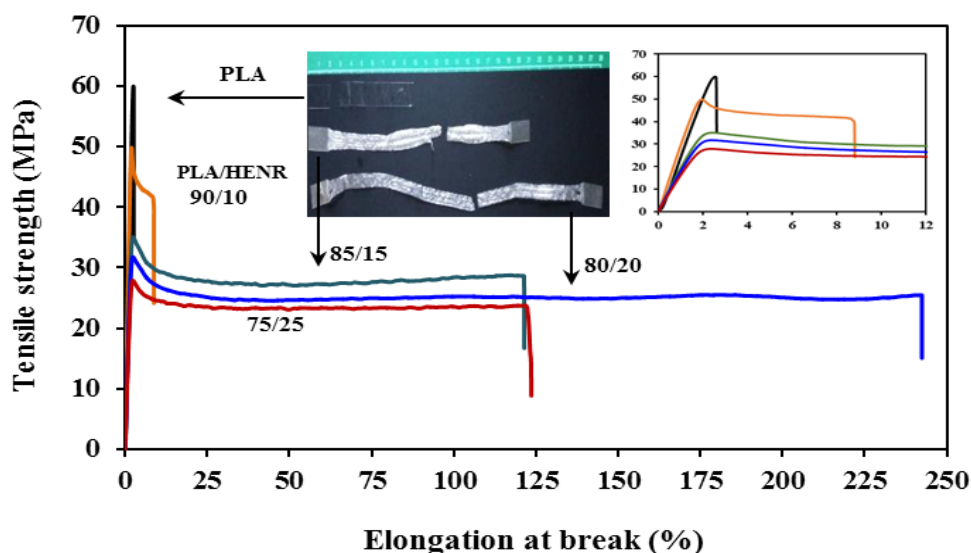
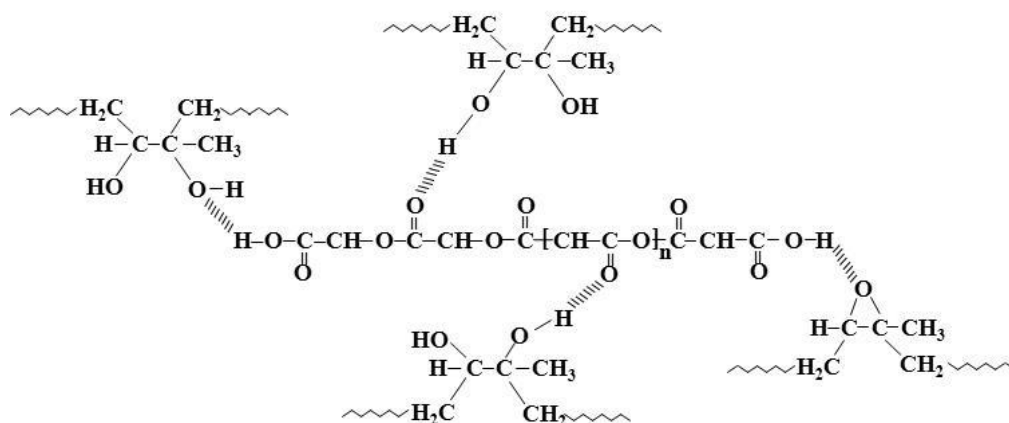


Figure 7 Average stress-strain curves of PLA and PLA/HENR blend films.



Scheme 1 Possible bonding between PLA and HENR.

3.2.4 Appearance and Optical properties

Polymer blends prepared in this research are intended for the formation of films, which can be used in many applications such as food packaging and in agriculture for planting/mulching films. Thus, the visual appearance and the transmission of radiation, especially ultraviolet radiation, need to be considered. For example, ultraviolet radiation (190-350 nm) and visible light radiation (400-700 nm) can accelerate lipid oxidation in food systems [2, 19-20] and hinder plant growth [38].

In order to evaluate the effect of HENR on light transmission, the UV-vis transmittance spectrum of PLA/HENR blend film (80/20) was recorded. This spectrum was compared with that of neat PLA film. The addition of HENR resulted in a dramatically decreased light transmittance in all light regions (ultraviolet and visible) (Figure 8 (a)). The transmittance of UV-B, which has an especially detrimental effect in terms of lipid oxidation, at 280 nm decreases from 80.2% for the pure PLA film to 6.8% in the case of PLA/HENR 80/20 blend film. Moreover, the decrease of visible light (400 – 700 nm) transmittance from 91% to 24% for the film made with addition of HENR can also help to prevent the spoilage of the sensitive food materials especially vitamins and lipids [20].

The absorption of light is probably because of the presence of brownish color of the chromophore isoprene in PLA/HENR blend films [39]. In addition, light blocking properties

might originate from scattering by the distributed rubber particles in the PLA matrix and lead to reduction of light transmission [40-41]. The decrease of transparency percentage (%) value for the film containing HENR in comparison to pure PLA film indicates that HENR can act as a light absorbing agent (homogeneous blend) and light scattering agent (heterogeneous blend) and prevents the transmission of light through the blend film. Visually, the films containing HENR had a limited transparency and light brown color, while the pure PLA presented more transparency and were colorless (Figure 8 (b)).

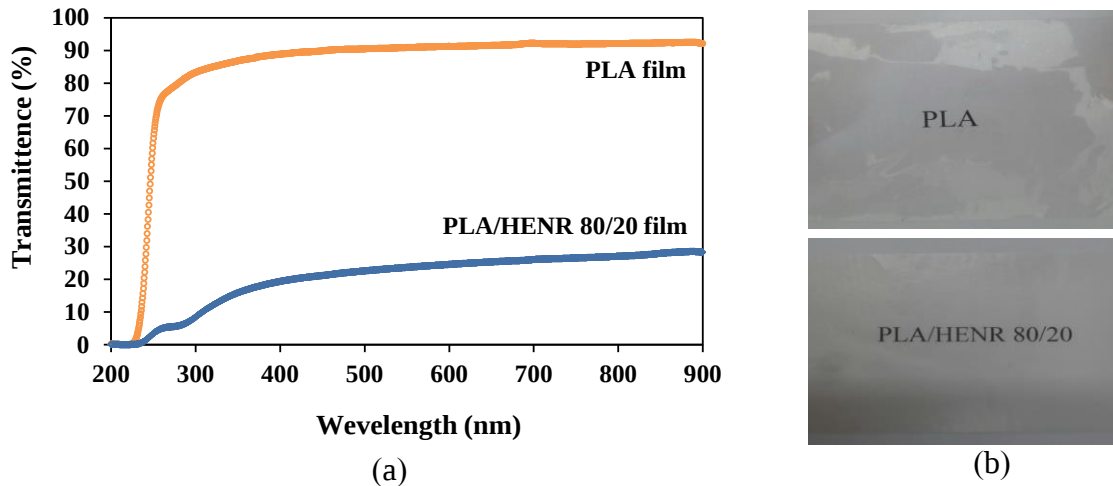


Figure 8 (a) Light transmission of PLA film and PLA/HENR 80/20 blend films and (b) Visual aspect of films.

The values from the color measurement of the polymer films are shown in Table 2. The CIELAB parameters (L^* , a^* and b^*) and the total color difference parameter, ΔE^* of polymer blend films were evaluated in comparison with the pure PLA film. It was found that both samples, pure PLA and PLE/HENR blend, showed insignificant differences in their negative values of coordinated a^* and b^* parameters indicating a tendency towards green-blue tonality. On the other hand, the L^* value of the PLA/HENR blend showed significant increase with respect to the pure PLA, resulting in a higher whiteness of the film. Given the ΔE^* value, it can be concluded that the addition of HENR resulted in a large color difference when compared to the control PLA film.

Table 2 The CIELAB color parameters of the blown films

Film sample	L^* value	a^* value	b^* value	ΔE^*
PLA	23.62 ± 1.83	-0.28 ± 0.04	-1.70 ± 0.07	-
PLA/HENR 80/20	31.93 ± 0.78	-0.43 ± 0.06	-0.83 ± 0.06	8.36

4. Conclusion

In this paper, modified NR powder was synthesized and blended with PLA for the preparation of blown film. Partially miscible blend was achieved via the melt blending process and its analysis revealed fine dispersion of rubber in the PLA film. Furthermore, DSC thermograms the of PLA/HENR blend films showed 2 glass transition temperature points, which are lower that of pure PLA film. Increasing rubber content produced an improved elongation at break of the film. This was attributed to the increase in active function of hydroxyl and epoxide groups on the isoprene unit and elastic segment of natural rubber in the system. PLA/HENR blend film with a compositon of 80/20 wt% showed

superior elongation at break, with a value 80 times that of the starting PLA film. The blend film (80/20) showed significantly reduced transmission of UV-B, UV-A, and visible light with transmission values of 6.8% 11%, and 24%, respectively. This was due to the UV absorption and UV blocking behavior of the homogeneous and heterogeneous HENR components in the blend.

Acknowledgments

The authors would like to thank The Thailand Research Fund (TRF) for financial support (RDG5920044). The authors also thank the Science Lab Center of Faculty of Science, Naresuan University for providing analytical instruments used in this study. Authors gratefully acknowledge Dr. Filip Kielar and Dr. Polphat Ruamcharoen for their assistance with editing the manuscript.

References

- [1] Conn, R. E., Kolstad, J. J., Borzelleca, J. F., Dixler, D. S., Filer Jr, L. J., Ladu Jr, B. N., Pariza, M. W. *Food and Chemical Toxicology*. **1995**, 33, 273-283.
- [2] Bonillaa, J., Fortunatib, E., Vargasa, M., Chiralta, A., Kennyb, J. M. *J. Food Eng.* **2013**, 119, 236-243.
- [3] Touchaleaume, F., Martin-Closas, L., Angellier-Coussy, H., Chevillard, A., Cesar, G., Gontard, N., Gastaldi, E. *Chemosphere*. **2016**, 144, 433-439.
- [4] Lomthong, T., Hanphakphoom, S., Yoksan, R., Kitpreechavanich, V. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **2015**, 104, 401-410.
- [5] Petchsuk, A., Nakayama, A., Aiba, S. *Polym. Degrad. Stab.* **2009**, 94, 1700-1706.
- [6] Pappuru, S., Chakraborty, D., Sundar, J. V., Roymuhury, S. K., Ramkumar, V., Subramanian, V., Chand, D. K. *Polym.* **2016**, 102, 231-247.
- [7] Maharana, T., Pattanaik, S., Routatay, A., Nath, N., Sutar, A. K. *Polym.* **2015**, 93, 47-67.
- [8] Ozdemir, E., Hacaloglu, J. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. **2017**, 127, 343-349.
- [9] Herrera, N., Roch, H., Salaberria, A. M., Pino-Orellana, M.A., Labidi, J., Fernandes, S. C. M., Radic, D., Leiva, A., Oksman, K. *Mater. Des.* **2016**, 92, 846-852.
- [10] Ploypetchara, N., Suppakul, P., Atong, D., Pechyen, C. *Energy Procedis.* **2014**, 56, 201-210.
- [11] Nagarajan, V., Mohanty, A. K., Misra, M. *Mater. Des.* **2016**, 110, 581-591.
- [12] Ostafinska, A., Fortelný, I., Hodan, J., Krejčíková, S., Nevoralová, M., Kredatusová, J., Kruliš, Z., Kotek, J., Šlouf, M. *J. Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. **2017**, 69, 229-241.
- [13] Imre, B., Bedő, D., Domján, A., SchÖn, P., Vancso, G. J., Pukánszky, B. *Eur. Polym. J.* **2013**, 49, 3104-3113.
- [14] Yu, F., Huang, H., *Polym. Test.* **2015**, 45, 107-113.
- [15] Maroufkhani, M., Katbab, A., Liu, W., Zhang, J. *Polym. J.* **2017**, 115, 37-44.
- [16] Wang, Y., Wei, Z., Li, Y. *Eur. Polym. J.* **2016**, 85, 92-104.
- [17] Pongtanayut, K., Thongpin, C., Santawitee, O. *Energy Procedis.* **2013**, 34, 888-897.
- [18] Zhang, C., Wang, W., Huang, Y., Pan, Y., Jiang, L., Dan, Y., Luo, Y., Z. Peng, Z. *Mater. Des.* **2013**, 45, 198-205.
- [19] Kanatt, S. R., Rao, M. S., Chawla, S. P., Sharma, A. *Food Hydrocolloids*. **2012**, 29, 290-297.
- [20] Narayanan, M., Loganathan, S., Valapa, R. B., S. Thomas, S. *Int. J. Biol. Macromol.* **2017**, 99, 37-45.
- [21] Picuna, P., Sica, C., Laviano, R., Dimitrijevic, A., Scarascia-Mugnazza, G. *Polym. Degrad. Stab.* **2012**, 97, 1654-1661.
- [22] Briassoulis, D. *Polym. Degrad. Stab.* **2007**, 92, 1115-1132.

- [23] Shi, X., Li, Q., Fu, G., Jia, L. *Polym. Test.* **2014**, 33, 1-6.
- [24] Phetphaisit, C. W., Phinyocheep, P. Thailand patent 12147, November 22, 2016.
- [25] Yuan, D., Chan, K., Xu, C., Chen, Z., Chen, Y. *Carbohydr. Polym.* **2014**, 113, 438-445.
- [26] Bac, N. V., Terlemezyan, L., Mihailov, M. *J. Appl. Polym. Sci.* **1991b**, 42, 2965-2973.
- [27] Phetphaisit, C. W., Bumeer, R., Namahoot, I., Ruamcharoen, J., Ruamcharoen, P. *Int. J. Adhes. Adhes.* **2013**, 41, 127-131.
- [28] Dahham, O. S., Hamzah, R., Bakar, M. A., Zulkepli, N. N. Dahham, S. S., Ting, S. S. *Polym. Test.* **2017**, 59, 55-66.
- [29] Yew, G. H., Mohd Yusof, A. M., Mohd Ishak, Z. A., Ishiaku, U. S. *Polym. Degrad. Stab.* **2005**, 90, 488-500.
- [30] Xu, C., Yuan, D., Fu, L., Chen, Y. *Polym. Test.* **2014**, 37, 94-101.
- [31] Signori, F., Coltelli, M. B., Bronco, S. *Polym. Degrad. Stab.* **2009**, 94, 74-82.
- [32] Mascia, L., Haworth, B., Vignali, A., Megna, R., Acierno, D., Russo, P. *Thermochim Acta.* **2016**, 633, 82-90.
- [33] Byun, Y., Whiteside, S., Thomas, R., Dharman, M., Hughes, J., Kim, Y. T. *J. Appl. Polym. Sci.* **2012**, 124, 3577-3582.
- [34] Gao, H., Fang, X., Chen, H., Qin, Y., Xu, F., Jin, T. Z. *Food Control.* **2017**, 73, 1522-1531.
- [35] Yuan, D., Xu, C., Chen, Z., Chen, Y. *Polym. Test.* **2014**, 38, 73-80.
- [36] Mina, M. F., Beg, M. D. H., Islam M. R., Nizam, A., Alam, A. K. M. M., Yunus, R. M. *Polym. Eng. Sci.* **2014**, 54(2), 317-326.
- [37] Bitinis, N., Verdejo, R., Cassagnau, P., Lopez-Manchado, M. A. *Chem. Phys.* **2011**, 129, 823-831.
- [38] Roro, A. G., Terfa, M. T., Solhaug, K. A., Tsegaye, A., Olsen, J. E., Torre, S. *South African Journal of Botany.* **2016**, 106, 119-128.
- [39] Armentano, I., Bitinis, N., Fortunati, E., Mattioli, S., Rescignano, N., Verdejo, R., Lopez-Manchado, M. A., Kenny, J. M. *Prog. Polym. Sci.* **2013**, 38, 1720-1747.
- [40] Răpă, M., Mitelut, A. C., Tănase, E. E., Grosu, E., Popescu, P., Popa, M. E., Rosnes, J. T., Sivertsvik, M., Darie-Niță, R. N., Vasile, C. *Composite Part B.* **2016**, 102, 112-121.
- [41] Yang, H., Zhu, S., Pan, N. *J. Appl. Polym. Sci.* **2004**, 92, 3201-3210.

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์หลัก เพื่อให้ได้ถุงปลูกที่เตรียมจาก PLA ที่คงสภาพอยู่ได้ไม่น้อยกว่า 5 เดือน* และสามารถย่อยสลายได้หลังการใช้งาน โดยมียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ

วัตถุประสงค์รอง	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. ศึกษาผลของยางธรรมชาติดัดแปรต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของสารตั้งต้น พอลิเมอร์คอมพาวนด์ และพอลิเมอร์ผสม 2. ศึกษาการใช้งานเป็นถุงปลูกเบื้องต้น 3. ศึกษาการใช้งานเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ 4. ศึกษาการย่อยสลาย	1. เตรียมยางธรรมชาติดัดแปร - ในข้อเสนอโครงการ ได้เสนอการเตรียมยางธรรมชาติดัดแปร (HENR) ที่มีหมู่ฟังก์ชันปริมาณต่างกัน 2 ตัว 2. เตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ - ในข้อเสนอโครงการ ได้เสนอการเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ระหว่าง PLA:HNR ใน 2 อัตราส่วน คือ 90:10 และ 85:15 3. เป่าถุง - ในข้อเสนอโครงการ ได้เสนอการเตรียมถุงจำนวน 6 สูตร (PLA 1 สูตร พอลิเมอร์ผสม 4 สูตร PE 1 สูตร)	1. เตรียม HENR ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อีพอกไซด์ที่แตกต่างกัน 3 ตัว 2. เตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์ระหว่าง PLA:HNR ใน 4 อัตราส่วน คือ 90:10, 85:15, 80:20 และ 75:25 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของเทคนิคที่ใช้ในการลดขนาดของยางผง ต่อสมบัติของฟิล์มที่ได้รับ 3. เป่าถุงจำนวน 20 สูตร (PLA 1 สูตร พอลิเมอร์ผสม 18 สูตร PE 1 สูตร)	1. ได้สูตรถุงปลูกที่สามารถใช้งานได้นาน 3-5 เดือน ทั้งแบบที่เกิดการปริแตกเล็กน้อย และสูตรที่ไม่เกิดการปริแตกเลย ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าถุงที่เกิดการปริแตกเล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต คุณภาพ และปริมาณผลผลิตของมะเขือเทศ 2. ถุงที่เตรียมได้สามารถย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะเงื่อนไข และเวลาที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์รอง	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
	4. ศึกษาการใช้งานเป็นถุงปลูกเบื้องต้น เปรียบเทียบกับถุงที่เตรียมจาก PLA บริสุทธิ์และ PE เป็นเวลา 4 เดือน 5. ศึกษาการใช้งานเป็นถุงปลูกมะเขือเทศ เปรียบเทียบกับถุงที่เตรียมจาก PE 6. ศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ ผสมเทียบกับฟิล์ม PLA - ในข้อเสนอโครงการได้ตั้งงบประมาณ สำหรับทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 1-2 สูตร และ ฟิล์ม PLA 1 สูตร	4. ศึกษาการใช้งานเป็นถุงปลูกเบื้องต้น ที่ม.นเรศวร โดยการเติมวัสดุปลูก และทำการรดน้ำปุ๋ยทุกวัน เป็นเวลา 4 เดือน เก็บข้อมูล 15 วัน 1 เดือน 2 เดือน 3 เดือน และ 4 เดือน จำนวน 12 สูตร 5. ศึกษาการใช้งานเป็นถุงปลูกมะเขือเทศที่โครงการ หลวง โดยศึกษาถุงสูตรพอลิเมอร์ผสมจำนวน 6 สูตร เทียบกับถุง PE เป็นเวลา 5 เดือน (ตามระยะเวลา กำหนดของโครงการหลวง) ทั้งนี้ทั้ง 6 สูตร มีการ เก็บข้อมูลการใช้งานเบื้องต้นที่ ม.นเรศวร ควบคู่ไป ด้วย 6. ศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 3 สูตร (สูตรที่ใช้ปลูกมะเขือเทศ) ทั้งนี้ไม่ได้ศึกษาฟิล์ม PLA เพราะจากการ ทดสอบการใช้งานฟิล์มที่เตรียมจาก PLA ไม่สามารถ คงสภาพถุงได้หลังผ่านการใช้งาน 1 เดือน	