



การศึกษารีแอกทีฟเบลนด์ของพอลิแลกติกแอซิด/พอลิবিวิธีสังเคราะห์โคอะดิเพท



โดย

นางสาวชนิกานต์ บุรีภักดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษารีแอกทีฟเบลนด์ของพอลิแลกติกแอซิด/พอลิবিวิธีสั้นซ์ซินเนตโคอะดิเพท



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY ON REACTIVE BLENDS OF POLY (LACTIC ACID)/ POLY (BUTYLENE
SUCCINATE CO ADIPATE)



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
Master of Engineering Program in Polymer Science and Engineering
Department of Materials Science and Engineering
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2015
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาริแอกทีฟเบลนด์ของ พอลิแลกติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท ” เสนอโดย นางสาวชนิกานต์ บุรีภักดี เป็นส่วน หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและ วิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์
2. รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อีรินทร์ คงพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน)

...../...../.....

56402201: สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : พอลิเมอร์เบลนด์/พอลิแลกติกแอซิด/พอลิবিวิลินซ์ซีซีเนตโคอะดิเพท/เปอร์ออกไซด์

ชื่อกิจกรรม : การศึกษารีแอกทีฟเบลนด์ของพอลิแลกติกแอซิด/พอลิবিวิลินซ์ซีซีเนตโคอะดิเพท.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผศ.ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และ รศ.ดร.มนัส แซ่ด่าน.
120หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของรีแอกทีฟเบลนด์ต่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ผ่านปฏิกิริยาฟรีแรดดิคัล (free radical) จากการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ ในตอนที่ 1 เป็นการศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรีแอกทีฟเอเจนท์ 2 ชนิด (Perkadox14s และ Luperox101) ต่อ PLA และ PBSA จากค่าทอร์กของการผสมในเครื่องผสมภายในแบบปิด พบว่า Perkadox มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า Luperox ดังนั้นในการศึกษารีแอกทีฟเบลนด์จึงเลือก Perkadox ปริมาณ 0.1 phr โดยนอร์แอกทีฟและรีแอกทีฟเบลนด์ทำในเครื่องผสมอัดรีดสกรูคู่ จากนั้นศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม Perkadox 0.1 phr ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นและเฟสกระจายมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่เติม Perkadox แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเติม Perkadox ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักพบว่าสัณฐานวิทยามีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่อง (Co-continuous phase) เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเติม Perkadox ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีค่า Impact strength และค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น กรณีของสมบัติทางความร้อนซึ่งทดสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่ากรณีไม่เติม Perkadox ความเป็นผลึกของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเบลนด์กับ PBSA และมีค่าความเป็นผลึกมากที่สุดที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติม Perkadox พบว่าความเป็นผลึกของ PLA และ PBSA มีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่สัดส่วนเดียวกัน เนื่องมาจากการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และการมีสารอนินทรีย์ใน Perkadox สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการตกผลึกของ PLA ที่ดีขึ้น ในตอนสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณของ Perkadox แตกต่างกัน จากสัณฐานวิทยาพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ Perkadox เพิ่มขึ้น กรณีสมบัติเชิงกลพบว่าค่า Impact strength และค่า Elongation at break มีค่ามากที่สุดเมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.1 phr เมื่อเติมมากขึ้นพบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าลดลง และพบว่าปริมาณผลึกของ PLA มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ Perkadox เพิ่มขึ้น

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

56402201: MAJOR: POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD : POLYLACTIC ACID/POLY (BUTYLENE SUCCINATE CO ADIPATE)/ REACTIVE
BLENDS/PEROXIDE

CHANIGARN BUREEPUKDEE: A STUDY ON REACTIVE BLENDS OF POLY (LACTIC ACID)/POLY (BUTYLENE
SUCCINATE CO ADIPATE). THESIS ADVISORS: ASST. PROF. SUPAKIJ SUTTIRUENGWONG, AND ASSOC.
PROF. MANUS SEADAN, Ph.D. 120pp.

This work aims to study the influence of reactive blends of Poly (lactic acid)/Poly (butylene succinate co adipate) via free radical reaction in twin screw extruder. In part 1, the reactivity of reactive agents (Perkadox14s and Luperox101) to polymers (PLA and PBSA) was studied by investigation of the torque of mixing. It was found that Perkadox was more active to PLA and PBSA than Luperox. The torque value of mixing was clearly increased at 1 phr. Thus 1 phr of Perkadox was used for further investigations to ensure the compatibilization between PLA and PBSA. Non-reactive and reactive blends were processed in twin-screw extruder by varying amount of PBSA from 0, 20, 40, 50, 60, 80, and 100%wt. corresponding to PLA. After adding 0.1 phr of Perkadox, the morphologies of two polymers exhibited better interfacial adhesion and the smaller size of dispersed phase. Most exceptionally, when the weight ratio of PBSA reached 40%wt., then co-continuous phase morphology could be observed. The impact strength and elongation at break were increased when adding 0.1 phr of Perkadox. Thermal analysis showed that the percent of crystallinity of PLA increased upon blending with PBSA without reactive agent. The highest percent of crystallinity was found for 20%wt. of PBSA. However, it was found that percent of crystallinity of PLA and PBSA slightly decreased after adding Perkadox. This could be due to cross-linking of polymer chains, which might hinder the crystallization process of two polymers. In final part, various amount of Perkadox were added. Increasing of Perkadox led to more compatible of morphologies but lower percent of crystallinity of PLA. For mechanical properties, the highest impact strength and elongation at break was found upon adding Perkadox 0.1phr in 40%wt. of PBSA.

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature.....

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature 1..... 2.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย ชี้แนะแนวทางในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตลอดจนการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อให้มีความถูกต้องอย่างละเอียด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ดร.ธีรินทร์ คงพันธุ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะและสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่คอยสั่งสอน ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า ทั้งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ทุนในการทำวิจัย สถานที่ในการดำเนินงาน รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และคุณเชาว์ ศรีเพชรดี ผู้ช่วยนักวิจัยพอลิเมอร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบการต้านทานต่อแรงกระแทก และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่

ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สำหรับการอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องปริญญาโท ที่คอยให้การช่วยเหลือและให้คำปรึกษาจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงกำลังใจที่มีให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมสั่งสอนและให้การเลี้ยงดู รวมถึงเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาทำให้สามารถแก้ปัญหาและผ่านอุปสรรคต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่ได้รับ	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
พอลิแลกติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA)	9
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (Poly (butylene succinate co adipate); PBSA).....	12
สารรีแอคทีฟ (Reactive agents).....	13
สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic peroxide)	13
เปอร์กาด็อกซ์ (Perkadox [®]).....	14
ลูเปอร์ล็อกซ์ (Luperox [®])	15
พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blends)	17
กลไกความเข้ากันได้ (Compatibility mechanism).....	17
วิธีการผสมเข้ากันได้ (Method of compatibilization).....	17
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

บทที่	หน้า
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย 28
	วัตถุุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 28
	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 30
	เครื่องมือวิเคราะห์..... 30
	วิธีดำเนินงานวิจัย..... 31
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 35
	การศึกษาผลของเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox) ต่อ PLA และ PBSA 35
	การศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงการไหลของ นอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA 46
	การศึกษาผลของปริมาณการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติของ พอลิเมอร์เบลนด์..... 68
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 82
	สรุปผลการทดลอง 82
	ข้อเสนอแนะ 84
	รายการอ้างอิง 85
	ภาคผนวก 88
	ภาคผนวก ก ข้อมูลและสมบัติของการทดสอบ..... 89
	ภาคผนวก ข การคำนวณ 96
	ภาคผนวก ค การเผยแพร่งานวิจัย 99
	ประวัติผู้วิจัย..... 109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติเชิงกลของพอลิแลกติกแอซิดเกรดต่างๆ (Nature Works)..... 11
2.2	เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่าง PBSA และ LLDPE 13
4.1	ปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์ใน Perkadox และ Luperox..... 36
4.2	ปริมาณเปอร์ออกไซด์ใน Perkadox และ Luperox ที่ความเข้มข้นต่างๆ 36
4.3	สมบัติการดึงยึดของ PLA เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox) 45
4.4	สมบัติการดึงยึดของ PBSA เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox) 45
4.5	ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance) ของนอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 55
4.6	ค่า Storage modulus (G') และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 59
4.7	สมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 65
4.8	สมบัติการดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ที่แตกต่างกัน..... 71
4.9	ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ในปริมาณที่แตกต่างกัน 73
4.10	สมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน 78
4.11	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน 80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	แผนภาพการแบ่งประเภทและตัวอย่างของพอลิเอสเทอร์[6]..... 8
2.2	โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด 9
2.3	วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด..... 10
2.4	โครงสร้างของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท 12
2.5	โครงสร้างทางเคมีของ Perkadox [®] 14s 14
2.6	โครงสร้างทางเคมีของ Luperox [®] 101..... 15
2.7	กราฟระหว่างครึ่งชีวิตการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์และอุณหภูมิ 16
2.8	พื้นผิวจากการแตกหักของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆจากเทคนิค SEM (กำลังขยาย1000เท่า)..... 20
2.9	กราฟ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน 21
2.10	ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงดัดยืดของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA 22
2.11	กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่อัตราส่วนแตกต่างกันและ ลักษณะ สัณฐานวิทยาและพื้นที่ผิวของ PBSA ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของพอลิเมอร์เบลนด์..... 23
2.12	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 24
2.13	กราฟแสดง impact strength ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์เบลนด์ 25
2.14	แบบจำลองการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์สองเฟส[4]..... 26
2.15	กราฟระหว่างค่า torque และเวลา ของ PLA และพอลิเมอร์เบลนด์PLA/PBS(80/20) ที่เติม DCPในปริมาณที่แตกต่างกัน 27
2.16	กลไกการเกิดปฏิกิริยาสำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS เมื่อเติม DCP 27
3.1	โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) 28
3.2	โครงสร้างของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (Poly(butylene succinate co adipate)29
3.3	โครงสร้างทางเคมีของ Perkadox14s 29
3.4	โครงสร้างทางเคมีของ Luperox101..... 29

ภาพที่	หน้า
4.1 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PLA กับ Perkadox ที่ปริมาณ 0.001,0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr	37
4.2 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PLA กับ Luperox ที่ปริมาณ0.001, 0.005, 0.01,0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr	38
4.3 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PBSA กับ Perkadox ที่ปริมาณ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr	38
4.4 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PBSA กับ Luperox ที่ปริมาณ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr	39
4.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาฟรีแรดดิคอลลสำหรับ PLA และ PBSA.....	40
4.6 ค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PLA กับ Perkadox (P) และ Luperox (L).....	41
4.7 ค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PBSA กับ Perkadox(P) และ Luperox (L).....	42
4.8 แผนภูมิค่าดัชนีการไหลระหว่าง (ก)PLA และ (ข)PBSA กับรีแอคทีฟเอเจนท์ (Perkadox และ Luperox).....	43
4.9 แผนภูมิแสดงปริมาณเจล (Gel contents) ของ PLA และ PBSA เมื่อผสมกับ เปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox).....	44
4.10 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอคทีฟ (Reactive) เปรียบเทียบกับระบบนอนรีแอคทีฟ (Non-reactive).....	47
4.11 แผนภูมิแสดงปริมาณเจล (Gel contents) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอคทีฟ (ปริมาณ Perkadox 0.1 phr).....	48
4.12 FT-IR spectra ของเจลที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Gel contents ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ซึ่งเติม Perkadox ปริมาณ 0.1 phr.....	49
4.13 Derivative thermograms ของการสลายตัวทางความร้อนของเจล PLA/PBSA สัดส่วน 60/40 เมื่อเติม Perkadox 0.1 phr	50
4.14 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA จาก fractured surface ของชิ้นงาน compression molding ของพอลิเมอร์เบลนด์.....	51
4.15 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA	53
4.16 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA.....	54

ภาพที่	หน้า
4.17	แผนภูมิแสดงค่า Elongation at break ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 54
4.18	Storage modulus (เส้นทึบ) และค่า tan delta (เส้นประ) ของนอนรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 57
4.19	Storage modulus และ ค่า tan delta ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox 0.08 phr 58
4.20	Storage modulus (เส้นทึบ) และค่า tan delta (เส้นประ) ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox 0.1 phr 58
4.21	Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของนอนรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 60
4.22	Complex viscosity (η^*) ของนอนรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 60
4.23	Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของนอนรีแอกทีฟและรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA..... 61
4.24	Complex viscosity (η^*) ของนอนรีแอกทีฟและรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA.. 61
4.25	DSC thermograms ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA 64
4.26	Derivative thermograms (DTG) ของนอนรีแอกทีฟและรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณเท่ากับ 0.08 phr และ 0.1 phr..... 66
4.27	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA 67
4.28	ดัชนีการไหลของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr ในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..... 68
4.29	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (กำลังขยาย 3000 เท่า) 69
4.30	กราฟ Stress-Strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA 71
4.31	พื้นผิวด้านข้างของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึดซึ่งถูกกัดด้วยกรดซัลฟิวริก เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า 72

ภาพที่	หน้า
4.32	แผนภาพแสดงค่า Storage modulus จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณแตกต่างกัน 74
4.33	แผนภาพแสดงค่า tan delta จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณแตกต่างกัน 75
4.34	แผนภาพแสดงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อ เติม Perkadox ปริมาณที่แตกต่างกัน 76
4.35	แผนภาพแสดงค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40)เมื่อ เติม Perkadox ปริมาณที่แตกต่างกัน 76
4.36	DSC thermograms จากการให้ความร้อนครั้งที่สอง ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน 78
4.37	TGA thermograms ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ปริมาณ แตกต่างกัน 79
4.38	Derivative thermograms ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน 80
4.39	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติมปริมาณ Perkadox แตกต่างกัน 81
ก.1	การทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของ Perkadox ด้วยเทคนิค TGA..... 94
ก.2	การทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของ Luperox ด้วยเทคนิค TGA 94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการใช้พลาสติกในชีวิตประจำวันกำลังมีบทบาทสำคัญ และการใช้พลาสติกเริ่มมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น และส่งผลไปถึงปัญหาขยะจากพลาสติกที่ไม่สามารถกำจัดได้ในสิ่งแวดล้อมตามมา การที่มีพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายและค้างอยู่ในธรรมชาตินั้นได้ส่งผลต่อระบบนิเวศน์ หรือแม้กระทั่งการกำจัดด้วยการเผาไหม้ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตเช่นกัน การเลือกใช้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่งที่จะช่วยในการลดปัญหาขยะพลาสติกที่มีมากเกินไป ดังนั้นในปัจจุบันพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางธรรมชาตินี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทโดยพิจารณาจากแหล่งที่มา คือ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติที่มาจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี (petroleum –based biodegradable plastics) และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบทางชีวภาพ (bio-based biodegradable plastics)

กลุ่มของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติที่กำลังได้รับความสนใจมากในขณะนี้คือ พอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid หรือ PLA) พอลิคาร์โปแลคโตน (polycaprolactone หรือ PCL) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate หรือ PBS) พอลิบิวทิลีน เทอเรพธาเลต (polybutylene terephthalate หรือ PBT) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพต (poly(butylene succinate co adipate) หรือ PBSA) เป็นต้น สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง คือ พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในธรรมชาติที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูง ซึ่งอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 160 ถึง 180 องศาเซลเซียส สมบัติที่ดีของพอลิแลคติกแอซิดคือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามพอลิแลคติกแอซิดนั้นยังคงมีข้อจำกัดในสำหรับการใช้งานในบางด้าน เช่น มีความยืดหยุ่นต่ำ และมีความแข็งเปราะ ดังนั้นจึงมีการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด การปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดนั้นสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การเติมสารเติมแต่ง การทำพอลิเมอร์เบลนด์

การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชัน ขึ้นกับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ จากวิธีการที่กล่าวมานั้น การเบลนด์พอลิแลกติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลายมากยิ่งขึ้นเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว แต่พบว่าพอลิเมอร์คู่เบลนด์ที่นำมาเบลนด์กันมีปัญหาความเข้ากันได้ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ ดังนั้นการปรับปรุงความเข้ากันได้สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการรีแอกทีฟเบลนด์ โดยการเลือกสารที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมที่ใช้ปริมาณน้อย ในการปรับปรุงความเปราะและความยืดหยุ่นของพอลิแลกติกแอซิดนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ทำพอลิเมอร์เบลนด์กับพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติเพื่อรักษาคุณสมบัตินี้ไว้ขณะที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าเดิม พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้สูง มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่าย และมีความต้านทานต่อความร้อนและสารเคมีที่ดี[1]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์กลุ่มเอสเทอร์ เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และมีสมบัติทางกายภาพหลากหลาย รวมถึงสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบควบแน่น ของ 1,4-บิวเทนไดออล กับกรดซัคซินิคและกรดอะดิพิค ซึ่งค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำและมีสมบัติเชิงกลที่น่าพอใจ โดยมีสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับสมบัติของพอลิโอเลฟิน เมื่อเปรียบเทียบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่ามีสมบัติการย่อยสลายได้ดีกว่า เนื่องจากมีความเป็นผลึกต่ำและสายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น นอกจากนี้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท ยังมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี[2]

จากงานวิจัยของ Sangmook Lee และ Jae Wook Lee [1]ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถเข้ากันได้ เมื่อมีปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทมากขึ้นจะทำให้เกิดการแยกเฟสเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทเพิ่มขึ้นค่า tensile strength และ tensile modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าเหมาะสมเมื่อมีปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจากการศึกษาสัญญาณวิทยาพบว่า พอลิเมอร์เบลนด์เกิดการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้มีความไม่เข้ากันและส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

N.Srisawat และคณะ[3]ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท โดยใช้พอลิแลกติกเป็นเฟสหลัก พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่อัตราส่วนระหว่าง PLA:PBSA ที่ 80:20 และพบว่าเมื่อมีการเติม

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ผิวการแตกหักของพอลิเมอร์เบลนด์มีความขรุขระมากขึ้น เนื่องมาจากการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และพบว่าความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์เบลนด์นี้ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์อีกด้วย จากงานวิจัยของ Vincent Ojijo และคณะ[4] ได้ทำการเติม TPP (Triphenyl phosphite) ลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็น compatibilizer โดยเติม TPP ที่ปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก พบว่าทำให้สมบัติเชิงกลได้รับการปรับปรุง โดยมีการเพิ่มขึ้นของค่า impact strength และไม่เพียงแต่ทำให้พอลิแลกติกแอซิดซึ่งมีการแตกหักแบบ brittle เปลี่ยนเป็นการเสียรูปแบบ ductile นอกจากนี้ยังช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์อีกด้วย

Deyun Ji และคณะ[5]ได้เติม DCP (Dicumyl peroxide) ในการผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด พบว่าการเติม DCP ปริมาณ 0.2 และ 0.3 phr ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจาก DCP ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาทำให้เกิดการเชื่อมขวาง หรือเกิดโคพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการหลอม และเป็นตัวเชื่อมทำให้พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเข้ากันได้มากขึ้น

จากการสืบค้นที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการศึกษาที่พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลกติกและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทในระบบรีแอกทีฟที่ใช้เปอร์ออกไซด์เป็นรีแอกทีฟเอเจนท์ และยังไม่มีการศึกษาการเบลนด์ในกรณีที่ใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทเป็นเฟสหลัก และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารเปอร์ออกไซด์ DCP สามารถใช้เป็นรีแอกทีฟเอเจนท์สำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต[5] ซึ่งมีหมู่ปลายสายโซ่ชนิดเดียวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพทและในการเติมนั้นสามารถเติมในปริมาณน้อยแต่ทำให้สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาระบบพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท โดยกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชันด้วยการเติมรีแอกทีฟเอเจนท์ ชนิดเปอร์ออกไซด์ คือ Perkadox[®] และ Luperox[®] ปริมาณไม่เกิน 1 phr โดยศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา ของพอลิเมอร์เบลนด์ ในกรณีที่ใช้ทั้งพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเฟสหลัก เพื่อทำให้เข้าใจเกี่ยวกับความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เบลนด์ และเข้าใจอิทธิพลของชนิดและปริมาณของรีแอกทีฟเอเจนท์ที่มีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ นำไปสู่การปรับสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเบลนด์ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะติเพท ทั้งแบบเติมและไม่เติมสารรีแอคทีฟในเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่
- 2) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล, สัณฐานวิทยา, สมบัติการไหล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ ในระบบนอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟเบลนด์
- 3) เพื่อศึกษาผลของปริมาณการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เพอร์ออกไซด์ที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ Perkadox14s และ Luperox101
- 2) ปริมาณเพอร์ออกไซด์ที่ใช้ไม่เกิน 1 phr

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ออกแบบวิธีและการวางแผนการวิจัย
- 3) ดำเนินการวิจัย

ตอนที่ 1 การศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรีแอคทีฟเอเจนท์ ต่อพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะติเพท โดยศึกษาจากค่าแรงบิดจากการผสมในเครื่อง internal mixer และใช้รีแอคทีฟเอเจนท์ (perkadox[®] 14s และ Luperox[®] 101) ปริมาณไม่เกิน 1 phr.

นำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะติเพทไปผสมกับรีแอคทีฟเอเจนท์ทั้งสองชนิด (Perkadox14s และ Luperox101 X45) โดยทำการผสมภายในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที โดยปริมาณรีแอคทีฟเอเจนท์ที่เติม ได้แก่ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr จากนั้นนำไปทำการทดสอบสมบัติทางการไหล ขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบหาปริมาณเจลที่เกิดขึ้น (Gel content) และนำเจลที่ได้ไปทดสอบด้วยเทคนิค FTIR

ตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะติเพทในระบบนอนรีแอคทีฟเบลนด์ โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อนเริ่มทำการผสม นำพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะติเพท (PBSA) ผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin screw extruder) โดยผสมอัตราส่วนระหว่าง PLA:PBSA เท่ากับ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 และ 0:100 เปอร์เซ็นต์โดย

น้ำหนัก จากนั้นขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (compression molding) และทำการศึกษา
 สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติทางความร้อน

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
 โคอะติเพท โดยกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชัน

นำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อน
 เริ่มทำการผสม จากนั้นนำ PLA และ PBSA ผสมด้วยอัตราส่วน 100:0, 80:20, 60:40,
 50:50, 40:60, 20:80 และ 0:100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่
 (Twin screw extruder) และเติมรีแอกทีฟเอเจนต์ชนิดที่เลือกจากการทดลองในตอน
 ที่ 1 โดยพิจารณาจากค่าทอร์กของการเกิดปฏิกิริยาของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดกับรีแอกทีฟเอเจนต์
 ทำการขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (compression molding) และทำการศึกษาสันฐานวิทยา
 สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน และปริมาณเจลที่เกิดขึ้น จากนั้น
 เปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ในระบบรีแอกทีฟเบลนด์กับสมบัติของพอลิเมอร์
 เบลนด์ในระบบนอนรีแอกทีฟ

ตอนที่ 4 ทำการศึกษาลักษณะของปริมาณการเติมรีแอกทีฟเอเจนต์ชนิดเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อ
 สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

เลือกสัดส่วนระหว่าง PLA และ PBSA เมื่อเติมรีแอกทีฟเอเจนต์จากการทดลอง
 ตอนที่ 3 โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ จากนั้นปรับเปลี่ยนปริมาณของ
 รีแอกทีฟเอเจนต์ที่ใช้ เพื่อศึกษาผลของปริมาณรีแอกทีฟเอเจนต์ที่มีผลต่อสมบัติของ
 พอลิเมอร์เบลนด์ จากนั้นขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (compression molding) แล้วทำการ
 ทดสอบสันฐานวิทยาสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน และปริมาณเจลที่
 เกิดขึ้น

- 4) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 5) จัดทำรายงานผลงานวิจัย
- 6) เสนอผลงานวิจัย
- 7) การสอบโครงการวิจัย
- 8) บทความวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ทราบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox) ต่อพอลิเมอร์ (PLA และ PBSA)
- 2) สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ด้วยกระบวนการรีแอคทีฟเอ็กซ์ทรูชั่น เพื่อให้พอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติที่ดีและสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น
- 3) ทราบถึงผลการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox) ต่อพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้เหมาะสม
- 4) สามารถเผยแพร่ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยสู่สาธารณะชน เพื่อให้เกิดแนวทางในการพัฒนางานวิจัยอื่นๆ และเกิดการพัฒนาระดับอุตสาหกรรมต่อไป



บทที่ 2

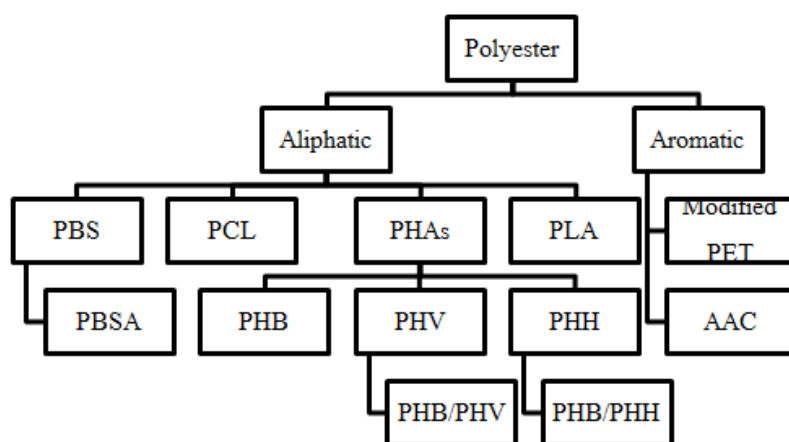
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[6]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช รวมถึงมันสำปะหลังและข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีรูปแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะ และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็จะเกิดการย่อยสลายได้ ซึ่งผู้บริโภครายหนึ่งที่กลัวว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้จะเกิดการย่อยสลายไปในขณะที่ใช้งาน โดยทำให้อายุการใช้งานสั้น และไม่คุ้มค่าในการใช้งานนั้นไม่ต้องกังวลในจุดนี้ต่อไป

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่รู้จักกันดี ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid หรือ PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate หรือ PHA) พอลิคาร์โปแลคโตน (polycaprolactone หรือ PCL) พอลิบิวทีลินซัคซิเนต (polybutylene succinate หรือ PBS) ฯลฯ โดยพอลิเมอร์ที่มีการศึกษาวิจัย และนำมาผลิตเพื่อใช้ประโยชน์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้ง (polysaccharide) และพอลิเอสเตอร์ (polyester)

พอลิเอสเตอร์ จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากประกอบด้วยพันธะเอสเตอร์อยู่ในสายโซ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งพันธะนี้มีความแข็งแรงน้อย สามารถแตกตัวได้ง่ายโดยทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrolysis) ดังนั้นจึงสามารถย่อยสลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้ นอกจากนี้พอลิเอสเตอร์ยังสามารถจำแนกตามส่วนประกอบของสายโซ่ได้เป็น 2 ประเภท คือ aliphatic และ aromatic polyester ในปัจจุบันมีการผลิตพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในกลุ่มนี้หลายชนิด ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นประเภท aliphatic polyester เพราะสายโซ่มีความเหมาะสมต่อการสลายพันธะดีกว่าในส่วน of aromatic polyester จะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมขึ้น โดยอาจต่อสายโซ่กับ aliphatic polyester ให้เป็นโคพอลิเมอร์ก่อนจึงจะสามารถย่อยสลายได้



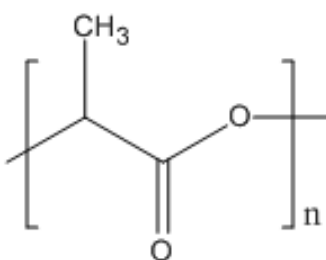
ภาพที่ 2.1 แผนภาพการแบ่งประเภทและตัวอย่างของพอลิเอสเทอร์[6]

หมายเหตุ	PHA- polyhydroxyalkanoates	PHB - polyhydroxybutyrate,
	PHH – polyhydroxyhexanoate	PHV- polyhydroxyvalerate
	PLA - polylactic acid	PCL - polycaprolactone
	PBS - polybutylene succinate	
	PBSA - polybutylene succinate co adipate	
	AAC - Aliphatic-Aromatic copolyesters	
	PET - polyethylene terephthalate	

Aliphatic polyester ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 4 ตระกูลใหญ่ๆ คือ polybutylene succinate (PBS), polycaprolactone (PCL), polyhydroxyalkanoates (PHA), polylactic acid (PLA) ซึ่งพอลิเมอร์ 2 ชนิดแรกต้องใช้มอนอเมอร์จากปิโตรเคมี ส่วน PLA สามารถใช้วัตถุดิบที่ทดแทนได้ แต่ยังคงอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์สายโซ่ของพอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย ขณะที่ PHA เป็นพอลิเมอร์ตระกูลเดียวที่กระบวนการสังเคราะห์ทั้งหมดเกิดขึ้นในจุลินทรีย์ โดยปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาใช้ทางการค้า และมีการผลิตผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดบ้างแล้วคือ PLA ที่สามารถนำไปทดแทนพลาสติกประเภทบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวด PET

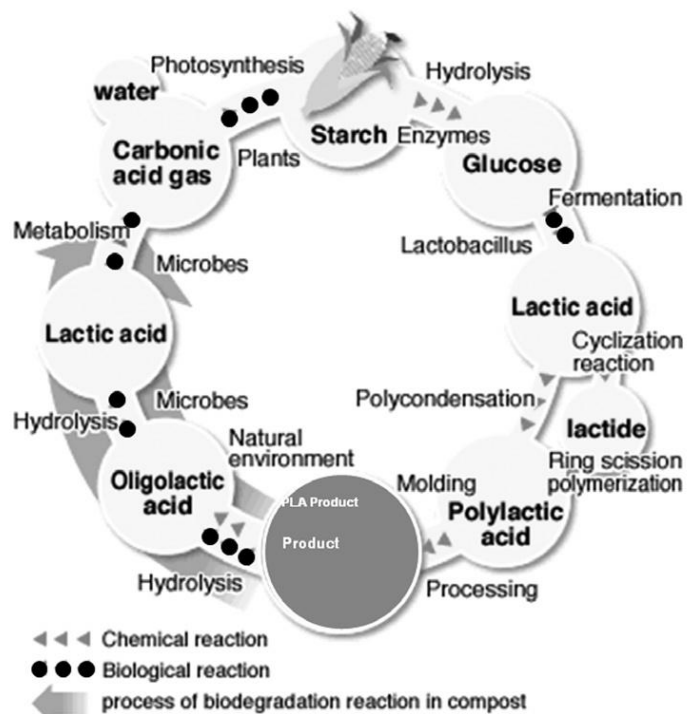
2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) ; PLA) [7]

พอลิแลคติกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายตรง (Aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนได้ใหม่อย่างต่อเนื่อง โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิดแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) การอัดรีด (Extrusion) และการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) เป็นต้น และภายหลังการใช้งาน ผลิตภัณฑ์จากพอลิแลคติกแอซิด สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เมื่อนำไปฝังกลบในดินโดยใช้ระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี



ภาพที่ 2.3 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด[7]

พอลิแลคติกแอซิด มีลักษณะใส และมีความแวววาวสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติทางกล และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก พอลิแลคติกแอซิดสามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทก (impact strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก มีความแข็งแรง ความคงทนต่อการกระแทก และความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดยังมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน และสามารถนำไปตัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอททิลีนหรือพอลิโพรพิลีน ดังนั้นพอลิแลคติกแอซิดจึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกโอเลฟินส์ที่ผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเคมี ซึ่งสมบัติของพอลิแลคติกที่ผลิตเพื่อการค้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิแลกติกแอซิดเกรดต่างๆ (NatureWorks)[8-11]

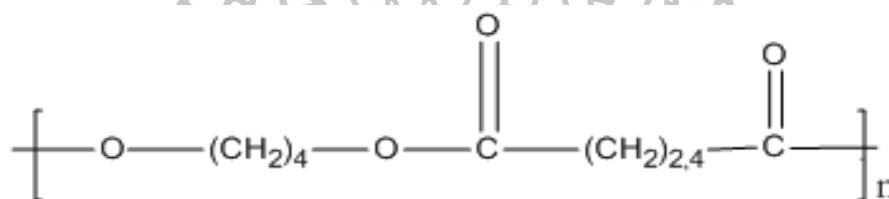
สมบัติของพอลิเมอร์	มาตรฐานการทดสอบ	Extrusion	Injection	Oriented film
		2003D	3051D	4042D
Tensile Strength at break	D882	53.1MPa (D638)	9000psi (D638)	-
Tensile yield Strength	D882	60MPa (D638)	48.3MPa (D638)	MD:16kpsi TD:21kpsi
Tensile Modulus	D882	3447.37M Pa (D638)	-	MD:480kpsi TD:560kpsi
Tensile Elongation	D882	6.00%	3.5% (D638)	MD:160% TD:100%
Notched Izod Impact	D256	0.0128 kJ/m	16.0J/m	Spencer Impact 2.5 joule
Heat Distortion Temperature	E2092	55	55	54

ผู้ผลิตและชื่อเกรดทางการค้า[11] ได้แก่

- บริษัท FKUR ชื่อเกรด Bio-flex® S9533
- บริษัท BIOTECH ชื่อเกรด Bioplast® 105 และ Bioplast® 2149
- บริษัท NatureWorks ชื่อเกรด Ingeo2003D, Ingeo3001D, Ingeo3051D, Ingeo3251D, Ingeo3801x, Ingeo4032D, Ingeo4042D, Ingeo4060, Ingeo5051x, Ingeo6060D, Ingeo6201D, Ingeo6202D, Ingeo6204D, Ingeo6251D, Ingeo6302D, Ingeo6350D, Ingeo6400D, Ingeo6751D, Ingeo7000D, Ingeo7032D
- บริษัท Natureplast ชื่อทางการค้าและเกรดNPC102, NPC201, NPC202
- บริษัท Futerro ชื่อเกรด PLA extrusion grade, PLA fiber melt spinning grade, PLA injection grade
- บริษัท Minima ชื่อเกรด FT1, GP1003, GP1025, GP3002

2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (Poly (butylene succinate co adipate); PBSA)

PBSA เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม และมีคุณสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจรวมถึงสมบัติความสามารถในการย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของ PBSA สามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แบบควบแน่นของ 1,4-butanediol ที่มีกรดซัคซินิกและกรดอะดิพิค และมีสมบัติเชิงกลเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์กลุ่มพอลิโอเลฟิน [12] เมื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่าง PBSA กับ PBS พบว่า PBSA มีสมบัติในการย่อยสลายที่ดีกว่า เนื่องจากมีความเป็นผลึกที่ต่ำกว่า และมีความยืดหยุ่นของสายโซ่สูงกว่า PBS นอกจากนี้ PBSA ยังมีสมบัติในการขึ้นรูปที่ดี ดังนั้นจึงสามารถนำไปผลิตในรูปของเส้นใย การขึ้นรูปฟิล์ม รวมถึงกระบวนการฉีดได้อีกด้วย[2] โดย PBSA มีชื่อทางการค้าที่รู้จักโดยทั่วไป คือ Bionolle™ (Showa Highpolymer, Japan) ซึ่ง PBSA จะเป็น Bionolle™ ในกลุ่มที่เป็นเกรด 3000 ซึ่งมีค่า modulus ต่ำและสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว[13]



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท

สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท[13]

PBSA มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่พอลิเมอร์ชนิดนี้มีค่า modulus ต่ำ และสามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้รวดเร็ว ความหนาแน่นของ PBSA มีค่าเท่ากับ 1.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีอุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 94 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -45 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม PBSA มีความเป็นผลึกต่ำเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ประเภทพอลิโอเลฟิน เนื่องจาก PBSA มีค่า MFR ต่ำกว่า 3g/10min ทำให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป่าและการนำไปผลิตฟิล์มบาง ฟิล์มที่ผลิตจาก PBSA จะแสดงสมบัติเชิงกลที่คล้ายคลึงกับฟิล์มที่ผลิตจาก LLDPE

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่าง PBSA และ LLDPE (บริษัท SHOWA DENKO K.K.)[13]

การทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ	PBSA (Bionelle เกรด 3001MD)	LLDPE
Tensile stress at break (MPa)	ISO 527-3	40	43
Tensile stress at yield (MPa)	ISO 527-3	18	13
Tensile elongation at break (%)	ISO 527-3	780	370
Young's Modulus (MPa)	ISO 527-3	320	330
Tear Strength (N/m)	ISO 6383-2	4.4	10
Impact Strength (kJ/m)	ASTM D3420	29	22
Heat Seal Strength (N)	SDK method*	1.5	1.2
Haze (%)	ISO 13468-1	20	7

ผู้ผลิตและเกรดเชิงการค้า[11] ได้แก่ บริษัท Showa Denko ชื่อเกรด Bionolle3001D

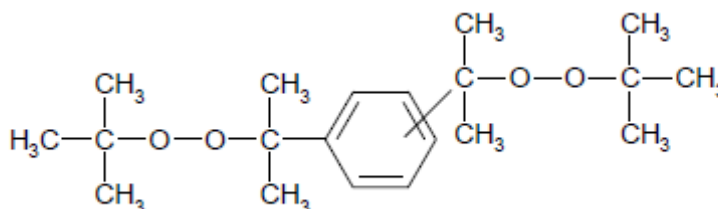
2.4 สารรีแอคทีฟ (Reactive agents)

2.4.1 สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic peroxide)[14]

สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนสองอะตอมติดกันหรือเรียกว่า หมู่เปอร์ออกซี (peroxy group) $-O-O-$ ในหมู่โครงสร้าง สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์มีหลายประเภท เช่น polyester, peroxydicarbonate, diakyl peroxides, diacyl peroxides, hydroperoxides, peroxyketals เป็นต้น สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์จะใช้ในทางการค้า ทางอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ พลาสติก ยาง ซึ่งอาจจะใช้ในรูปแบบของสารบริสุทธิ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือเป็นสารละลายเป็นเม็ด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้และความปลอดภัยในการใช้งาน

2.4.2 เปอร์กาด็อกซ์ (Perkadox[®]) [15]

เปอร์กาด็อกซ์(Perkadox[®])มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 5 มีชื่อทางเคมีคือ Di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Perkadox[®] 14s [15]

เปอร์กาด็อกซ์มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 338.5 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 1.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าประมาณ 44 ถึง 48 องศาเซลเซียส เปอร์กาด็อกซ์ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) สำหรับปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์ไรเซชันสามารถใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟได้ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ออกไซด์มักจะแสดงในรูปแบบของครึ่งชีวิต (half-life) ที่อุณหภูมิต่างๆ และความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของ Perkadox14S แสดงดังภาพที่ 7 เส้นกราฟ k_d สำหรับครึ่งชีวิตของเปอร์กาด็อกซ์ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 20 วินาที ทั้งนี้ครึ่งชีวิตของ Perkadox14S สามารถคำนวณได้จาก

$$k_d = A \cdot e^{-E_a / RT}$$

$$t_{1/2} = (\ln 2) / k_d$$

เมื่อ

$$E_a = 152.69 \text{ kJ / mole}$$

$$A = 7.65E + 15 \text{ s}^{-1}$$

$$R = 8.3142 \text{ J / mole} \cdot \text{K}$$

$$T = (273.15 + ^\circ\text{C}) \text{ K}$$

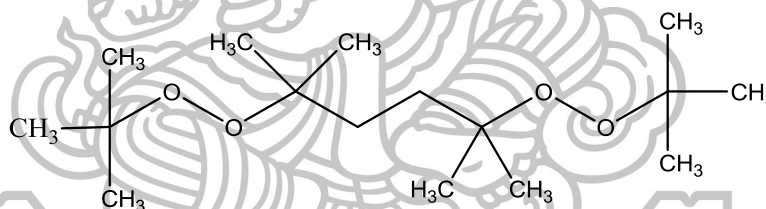
อันตรายของ Perkadox[®] [16]

Perkadox[®] เป็นสารชนิด organic peroxide ความร้อนหรือสิ่งเจือปนอาจเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายจากการสลายตัว อาจเป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบต่อดวงตาและผิวหนังได้ การสัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสกับดวงตา และการสูดดม เป็นเส้นทางหลักที่จะได้รับอันตรายจากสารชนิดนี้ ผู้ขนส่งจาก Perkadox[®] อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจ และอาจทำให้เกิดอาการของโรคหลอดลมอักเสบได้ เมื่อสัมผัสกับผิวหรือดวงตาอาจทำให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย หากกลืนสารชนิดนี้ลงไปอาจทำให้ปาก ลำคอ หลอดอาหารและกระเพาะอาหารเกิดการระคายเคืองได้

การจัดเก็บควรจัดเก็บในบริเวณที่ห่างไกลจากอาหาร เครื่องดื่ม และอาหารสัตว์ และควรจัดเก็บในพื้นที่ที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ห่างจากความร้อนและแสงแดด

2.4.3 ลูเปอร์ลอกซ์ (Luperox[®]) [17]

ลูเปอร์ลอกซ์ (Luperox[®]) มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 5 มีชื่อทางเคมีคือ 2,5-Bis(tert-butylperoxy)-2,5-Dimethylhexane

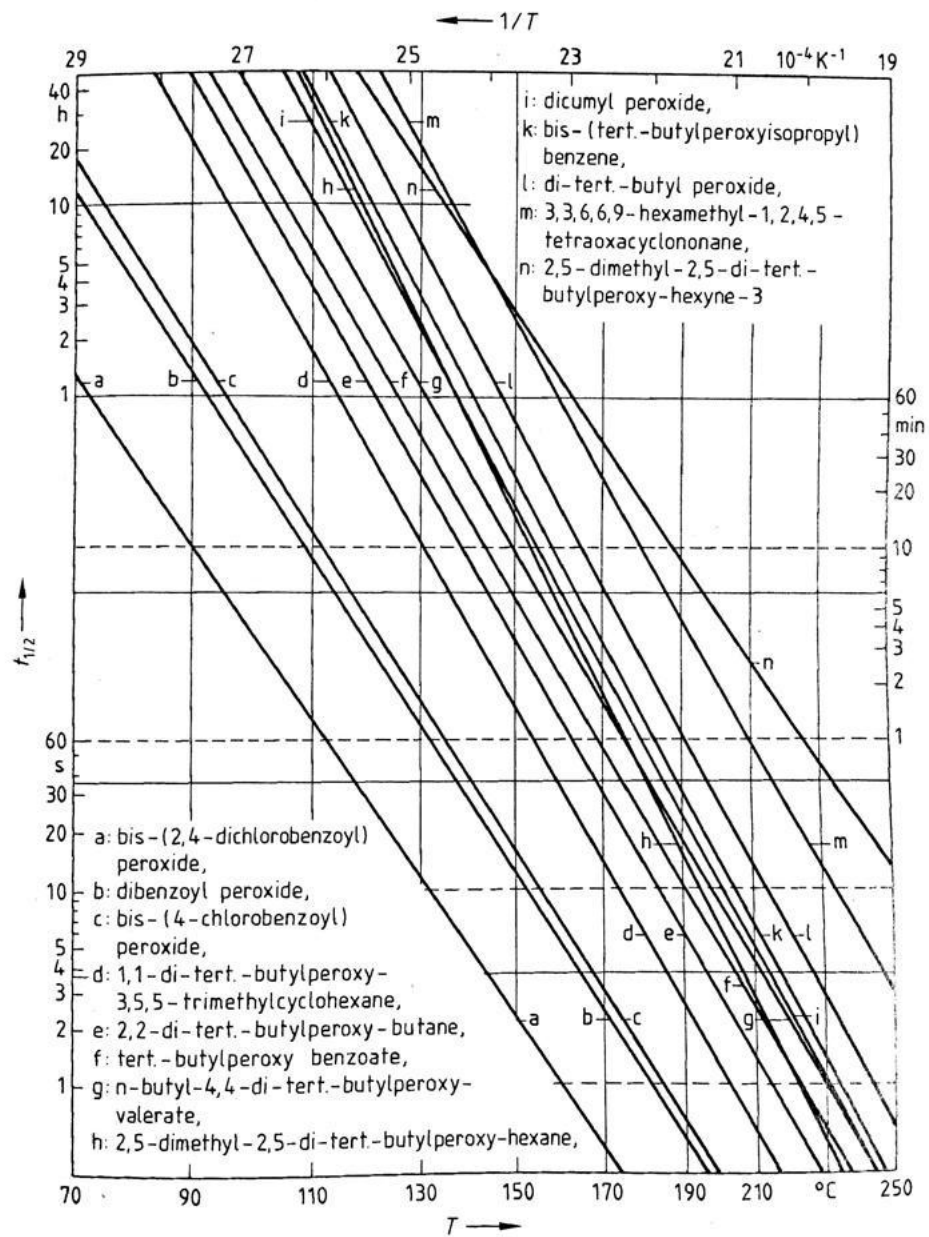


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ Luperox[®] 101[17]

ลูเปอร์ลอกซ์มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 246.35 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.877กรัมต่อมิลลิลิตร อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าประมาณ 55 ถึง 57 องศาเซลเซียส ลูเปอร์ลอกซ์เป็นรีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) สำหรับปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์ไรเซชัน ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ออกไซด์มักจะแสดงในรูปแบบของครึ่งชีวิต (half-life) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 30 วินาที (พิจารณาจากภาพที่ 2.7 เส้นกราฟ g)

อันตรายของ Luperox® [17]

Luperox® อาจก่อให้เกิดอันตรายได้หากมีกาศุดตม เนื่องจากวัสดุนี้เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อและระบบการหายใจส่วนบน หากถูกผิวหนังอาจทำให้ผิวหนังบริเวณนั้นเกิดการไหม้ได้ นอกจากนี้ยังเป็นอันตรายต่อระบบย่อยอาหารหากมีการกลืนกินสารชนิดนี้ลงไป



ภาพที่ 2.7 กราฟระหว่างครึ่งชีวิตการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์และอุณหภูมิ[18]

2.5 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blends) [19]

การทำพอลิเมอร์เบลนด์เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ สารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์เบลนด์ (polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางพลังงานที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือพลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

2.5.1 กลไกความเข้ากันได้ (Compatibility mechanism)

พอลิเมอร์เบลนด์ส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสมจากดิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์เบลนด์ เพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เหมาะสม

2.5.2 วิธีการผสมเข้ากันได้ (Method of compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้น การเลือกใช้ขึ้นกับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้ คือ

2.5.2.1 การพิจารณาสภาพการผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นกับสมดุลระหว่างเอนทาลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยที่ ΔG คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม

ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม

ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

T คือ อุณหภูมิ (K)

2.5.2.2 การเติมกราฟหรือบล็อกโคพอลิเมอร์ (Addition of block or graft copolymer)

การเติมบล็อกหรือกราฟโคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความนิยมในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟโคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟโคพอลิเมอร์
- ไตบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
- ไตบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าไตบล็อกโคพอลิเมอร์ที่มีความยาวเท่ากัน

2.5.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Addition of functional/reactive polymer)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน กับพอลิเมอร์ชนิดที่สอง กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอะเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมีนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโอะเลฟินส์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสม ที่ได้รับความนิยมทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

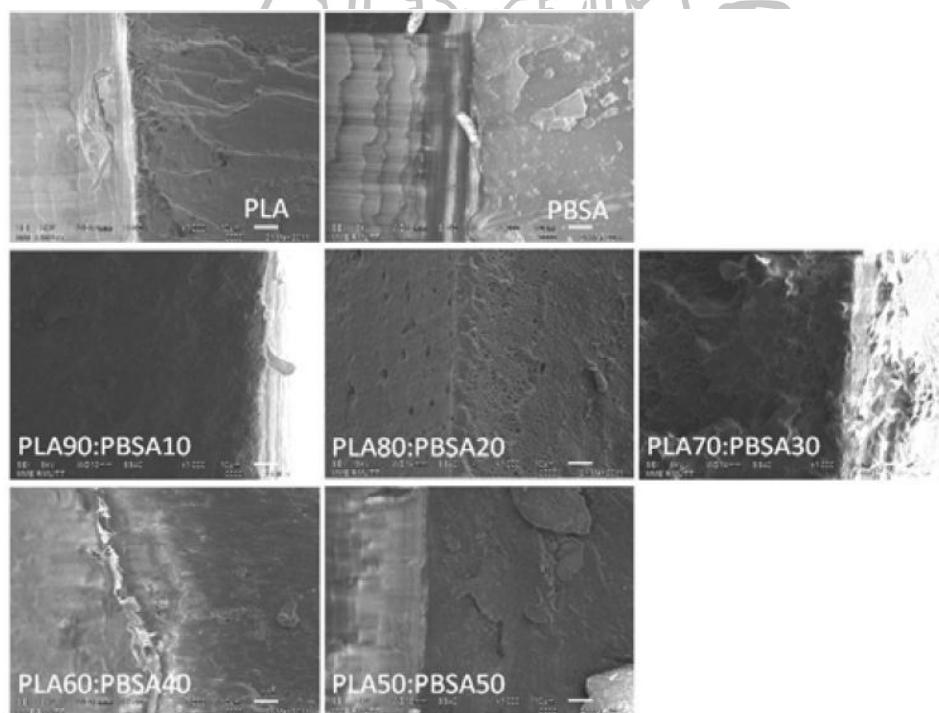
2.5.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากวาดโคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์โรเซชันในระหว่างการผสม (In-situ grafting polymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากวาดโคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์โรเซชันในระหว่างการผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

- เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ระหว่างการผสม
- เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
- เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้สภาวะที่แรงเฉือนสูง
- ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

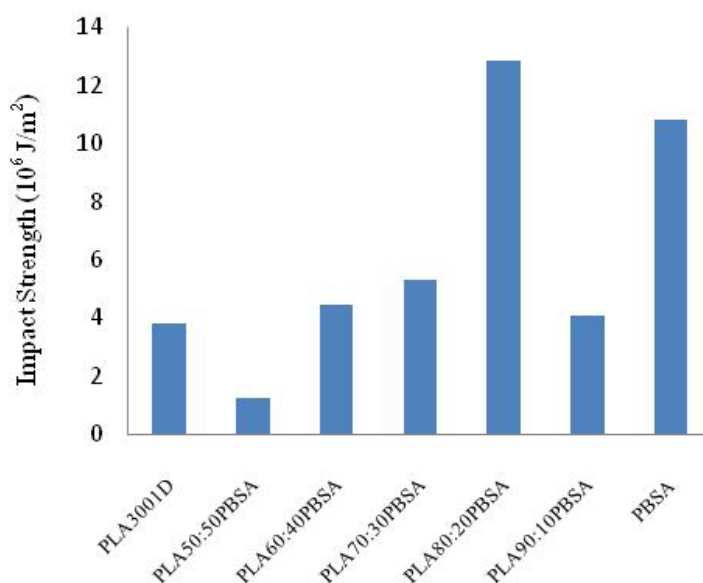
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ N.Srisawat และคณะ[3] ได้ทำการทดลองโดยนำพอลิแลกติกแลกติกแอซิด ผสมกับพอลิবিริลีนซัคซิเนตโคอะติเพท ด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ทำการผสมโดยใช้พอลิแลกติกแอซิดเป็นเมทริกซ์หลัก โดยทำการผสมที่อัตราส่วน PLA:PBSA เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, และ 0:100 แล้วศึกษาสมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา รวมถึงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ พบว่า เมื่อเติม PBSA ที่ปริมาณน้อยๆจะทำให้มีความเข้ากันได้มากกว่าการเติมในปริมาณที่มากขึ้น จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ที่อัตราส่วน 90:10 พีคของกราฟ DSC ไม่แสดงอุณหภูมิการหลอมเหลว และเมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM ในบริเวณที่เกิดการแตกหักพบว่า เมื่อเติม PBSA ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้พื้นผิวในส่วนที่มีการแตกหักมีความขรุขระมากขึ้น แต่การเติม PBSA ปริมาณต่ำๆจะทำให้พื้นผิวการแตกหักมีลักษณะคล้ายกับการแตกหักของ PLA



ภาพที่ 2.8 พื้นผิวจากการแตกหักของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆจากเทคนิค SEM (กำลังขยาย1000เท่า) [3]

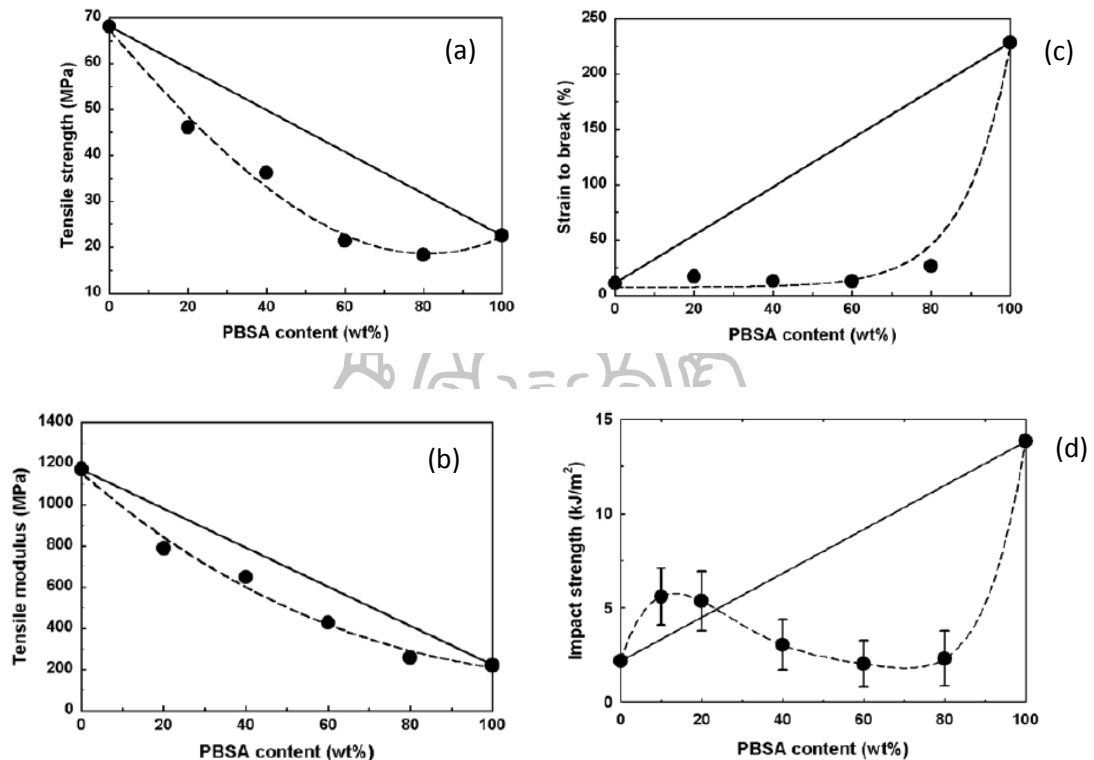
เมื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าค่า Young's modulus, tensile strength, และ stress at break มีค่าลดลงเมื่อเติม PBSA เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งเปราะส่วน PLBA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนนุ่ม แต่เมื่อทำการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่า การผสมที่อัตราส่วน 80:20 ให้ค่า Impact strength มีค่ามากที่สุด ซึ่งอาจเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผสม พอลิเมอร์ทั้งสองชนิด



ภาพที่ 2.9 กราฟ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนที่ต่างกัน[3]

งานวิจัยของ Sangmook Lee และคณะ[1]ได้ทำการศึกษาสมบัติของเบลนด์ระหว่าง PLA และ PBSA ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จากการทดสอบ DSC พบว่าสมบัติทางความร้อนของ PLA ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ PBSA แต่พบว่าการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าต่ำกว่า pure PLA และ pure PBSA นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้จากการทดสอบทางความร้อน พบว่า พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ โดยสังเกตจากค่าอุณหภูมิแข็งเปราะคล้ายแก้วแสดงพีคของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดแยกจากกัน เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดส่งผลต่อสมบัติเชิงกล แสดงดังภาพที่ 9 (a) แสดงค่า tensile strength พบว่ามีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ PBSA เพิ่มขึ้น ภาพ (b) ค่า tensile modulus มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ tensile strength คือ มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ PBSA นอกจากนี้พบว่าสมบัติทั้งสองของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าต่ำกว่าเส้น rule of mixing เมื่อพิจารณาค่า strain to break แสดงดังภาพที่ (c) มีค่าค่อนข้างคงที่และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเติม PBSA ปริมาณมากกว่า 60 wt% แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่า rule of mixing และเมื่อพิจารณาค่า impact

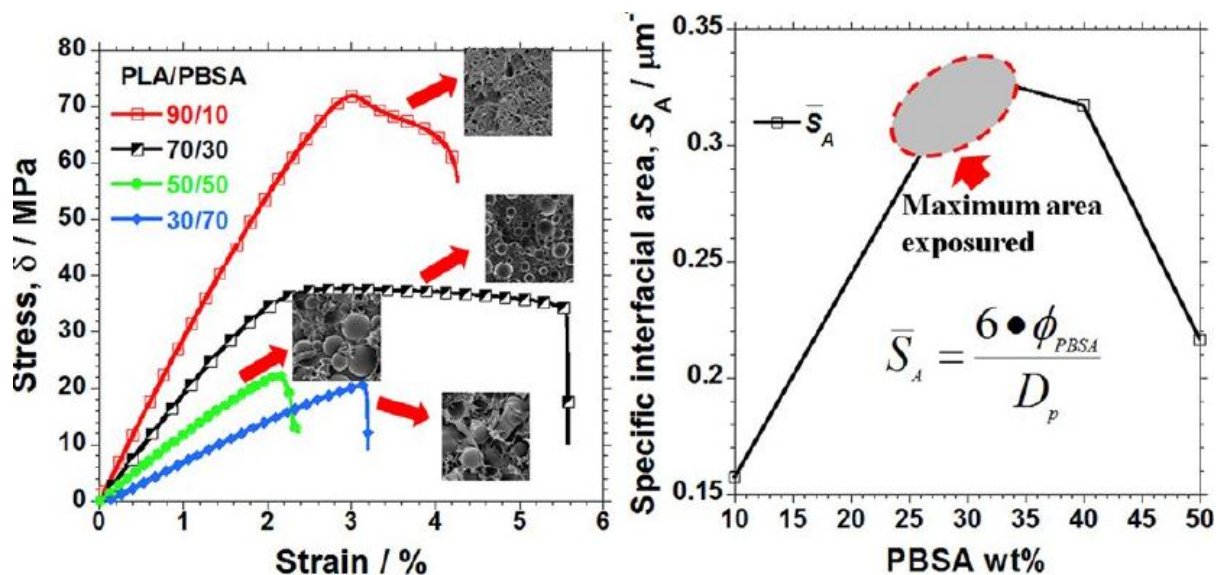
strength พบว่าค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีอัตราส่วนของ PBSA ต่ำกว่า 20 wt% จะมีค่าสูงกว่าค่า rule of mixing แต่เมื่อมีปริมาณ PBSA เพิ่มขึ้นพบว่ามีความต่ำกว่าค่า rule of mixing ซึ่งที่ 20wt% ของ PBSA เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดี



ภาพที่ 2.10 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (a) Tensile strength (b) Tensile modulus (c) Strain to break (d) impact strength[1]

งานวิจัยของ Vincent Ojijo และคณะ[20] ได้ทำการผสม PLA และ PBSA ในสภาวะหลอมเหลว โดยทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนของ PBSA ตั้งแต่ 0-100 wt% ซึ่งพบว่าในการผสมนั้นไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด จากผลการทดสอบ SEM พบว่า เมื่อใช้ PLA เป็นเฟสหลัก เฟสที่เกิดการแยกออกจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อใช้ PBSA เป็นเฟสหลัก และยังมีขนาดเล็กลงเมื่อมีปริมาณ PBSA ลดลง เมื่อทำการศึกษาความเสถียรทางความร้อนและสมบัติเชิงกลพบว่า ไม่เพียงแต่องค์ประกอบในพอลิเมอร์เบลนด์เท่านั้นที่ส่งผลถึงสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ แต่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดก็ส่งผลต่อสมบัติเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.11(a) จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติที่เหมาะสมคือที่อัตราส่วน

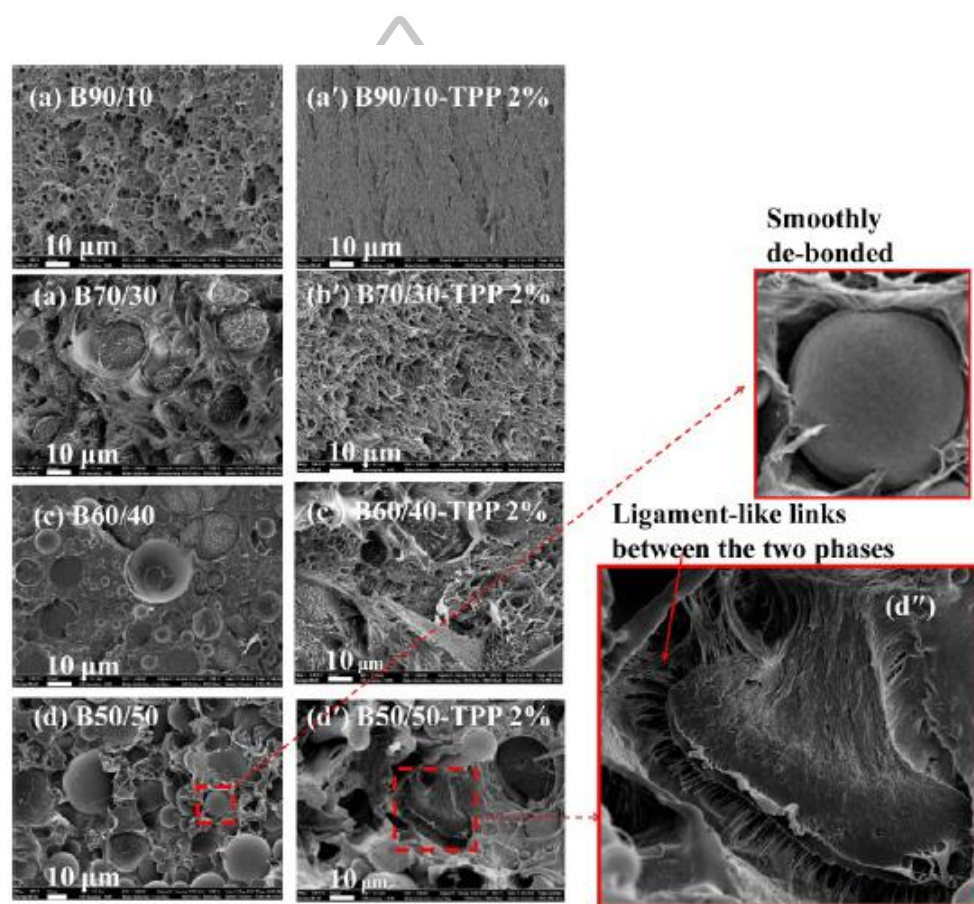
PLA:PBSA เท่ากับ 70:30wt% เนื่องจากมีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของเมทริกซ์หลัก กับเฟสกระจายตัวสูงที่สุด



ภาพที่ 2.11 (a) กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่อัตราส่วนแตกต่างกันและลักษณะสัณฐานวิทยา, (b) พื้นที่ผิวของ PBSA ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของพอลิเมอร์เบลนด์[20]

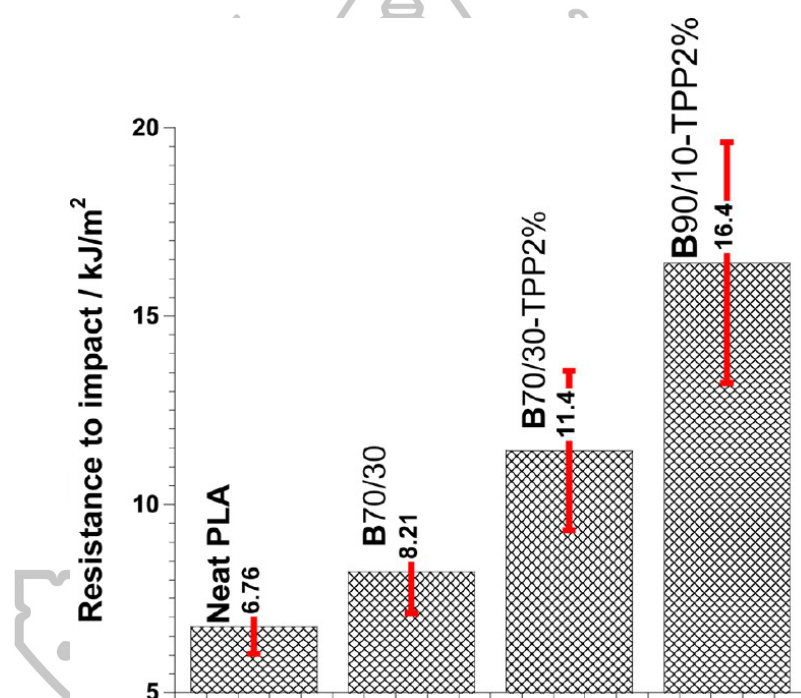
นอกจากนี้ยังมีอีกงานวิจัยของ Vincent Ojijo และคณะ[4]ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PBSA ในระบบการผสมแบบรีแอคทีฟเอ็กซ์ทรูชัน โดยใช้รีแอคทีฟเอเจนต์คือ Triphenyl Phosphite หรือ TPP ซึ่งทำหน้าที่เป็น compatibilizer พบว่าการเติม TPP มากขึ้นทำให้ขนาดของการแยกเฟสของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดลดลง นอกจากนี้ยังช่วยในการเชื่อมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาโดยพิจารณาภาพจากเทคนิค SEM พบว่า พอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์เบลนด์นั้นมีสัณฐานวิทยาแบบ island-sea-type แสดงให้เห็นว่ามี interfacial adhesion ระหว่างเฟสต่ำ และยังมีค่าแรงแ้งเมื่อมีปริมาณ PBSA เพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นการกระจายตัวของขนาดของการแยกเฟสยังเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมออีกด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติม 2 wt% ของ TPP ไม่เพียงแต่ช่วยลดขนาดของการแยกเฟสเท่านั้น ซึ่งทำให้การผสมมีสัณฐานวิทยาที่เป็นแบบเดียวกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเติม PBSA ในปริมาณน้อย แต่ยังทำให้เกิดกลไกในการแตกหักที่แตกต่างกันอีกด้วย ในกรณีของ neat PLA จะมีการแตกหักแบบเปราะ (brittle failure) ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม TPP จะมีการแตกหัก

แบบเหนียว(ductile failure) ซึ่งการปรับปรุงของสัณฐานวิทยานี้มีสาเหตุที่สำคัญจาก ความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBSA และการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่เกิดระหว่างกระบวนการ และเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นพบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วน 50wt% PBSA พบว่าพื้นที่ผิวที่เชื่อมต่อกันนั้นมีความเรียบแสดงให้เห็นถึงการแยกกันอย่างสมบูรณ์ของพอลิเมอร์ทั้งสองเฟส แต่เมื่อมีการเติม 2wt%TPP พบว่ามีลักษณะคล้ายเส้นใยเชื่อมต่อระหว่างสองเฟสซึ่งเป็นสาเหตุให้มีความเข้ากันได้มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.12

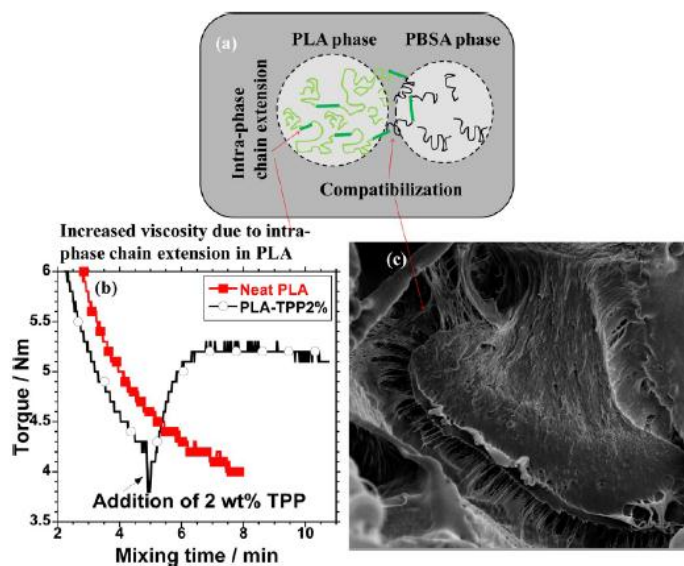


ภาพที่ 2.12 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (a)90/10, (b)70/30,(c)60/40,(d) 50/50 และ (a')90/10-TPP2%, (b')70/30-TPP2%, (c')60/40-TPP2%,(d')50/50-TPP2%[4]

จากภาพที่ 2.12 แสดงแบบจำลองระหว่างการผลิตในระบบรีแอกทีฟเบลนด์ด้วย TPP จะเกิดการเชื่อมระหว่างสองเฟสด้วยสายโซ่ซึ่งนำไปสู่การเกิดบล็อกโคพอลิเมอร์ในระหว่างการผสม (In-situ block copolymer) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัว compatibilizer ซึ่งโคพอลิเมอร์ช่วยให้ interfacial adhesion ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อเติม TPP ทำให้ค่า torque มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง จากความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์สองเฟส ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลทั้ง impact strength และ elongation at break แต่การเติม TPP ไม่ควรเติมเกิน 2wt% เพราะจะทำให้เกิดการรวมกลุ่มในระหว่างการผสมได้



ภาพที่ 2.13 กราฟแสดง impact strength ของพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์เบลนด์[4]

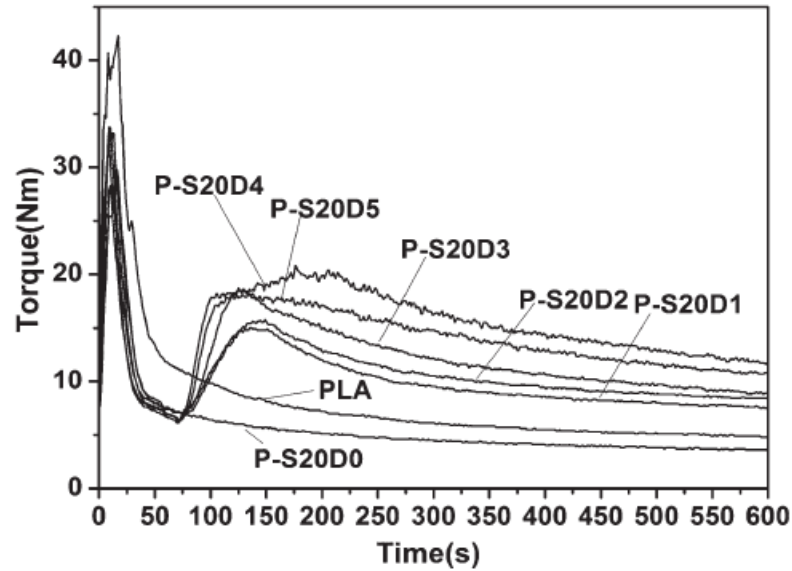


ภาพที่ 2.14 แบบจำลองการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์สองเฟส[4]

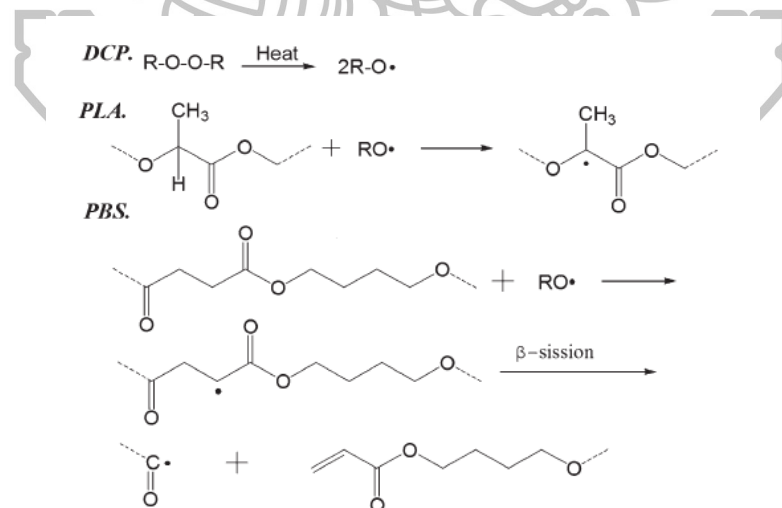
งานวิจัยของ Deyun Ji และคณะ[5] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โดยมีไดคิวมิล เพอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide : DCP) ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในสถานะหลอมเหลว และทำการศึกษาลักษณะวิทยา พฤติกรรมการเกิดผลึก สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของรีแอกทีฟเบลนด์ พบว่าเมื่อเติม DCP จะทำให้เกิดการเชื่อมขวาง โดยสังเกตได้จากผลของสมบัติการไหลและการเกิดเจล นอกจากนี้พบว่าเกิดการเชื่อมขวางยังทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกของพอลิเมอร์รีแอกทีฟเบลนด์อีกด้วย โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตในระบบรีแอกทีฟเบลนด์ยังทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต ดังนั้นการเติมเปอร์ออกไซด์จึงช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสององค์ประกอบ อย่างไรก็ตามพบว่าในระบบรีแอกทีฟเบลนด์นี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเติม DCP ปริมาณ 0.2 และ 0.3 phr

ภาพที่ 2.15 แสดงค่าแรงบิดของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ในกรณีที่เติมและไม่เติม DCP ในระหว่างการหลอมเหลวในระหว่างการผสม กรณีของ PLA และ PLA/PBS ที่ไม่มีการเติม DCP พบว่าค่าแรงบิดมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่ และพบว่าเมื่อมีการเติม DCP ทำให้ค่าแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBS อย่างที่เราทราบกันว่าค่า torque ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่าอาจเกิดการเชื่อมขวางในระหว่างการผสมเนื่องจากการเติม DCP และเมื่อพิจารณาปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาที่

น่าจะเกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.16 ชั้นแรกเริ่มจากเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็น free radical เมื่อได้รับความร้อน ชั้นที่สอง free radical เข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคาร์บอนของ PLA หรือ PBS [5]



ภาพที่ 2.15 กราฟระหว่างค่า torque และเวลา ของ PLA และพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS(80/20) ที่เติม DCP ในปริมาณที่ต่างกันไป [5]



ภาพที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาสำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS เมื่อเติม DCP [5]

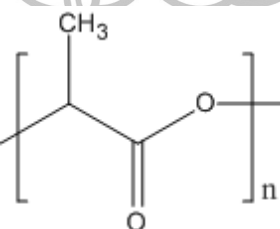
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสี่ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะติเพทต่อรีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์สองชนิด ได้แก่ Perkadox14s และ Luperox101 เพื่อเลือกชนิดและสัดส่วนของเปอร์ออกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้ดีมาทำหน้าที่เป็นรีแอคทีฟเอเจนท์สำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะติเพทในขั้นตอนต่อไป ตอนที่สองเป็นการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะติเพทกรณีที่ไม่มีการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ (Non-reactive PLA/PBSA blends) ตอนที่สามเป็นการศึกษาสมบัติของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะติเพท (Reactive PLA/PBSA blends) โดยรีแอคทีฟเอเจนท์ที่ใช้เลือกมาจากในส่วนที่หนึ่ง และในตอนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของปริมาณรีแอคทีฟเอเจนท์ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์

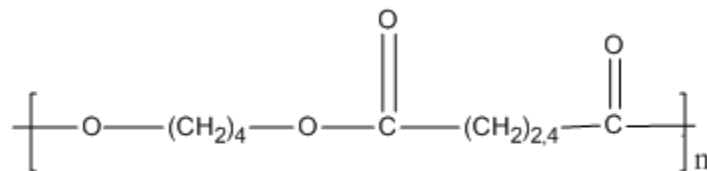
3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1) พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) เกรด Extrusion (2003D) จากบริษัท NatureWorks LLC จำกัด



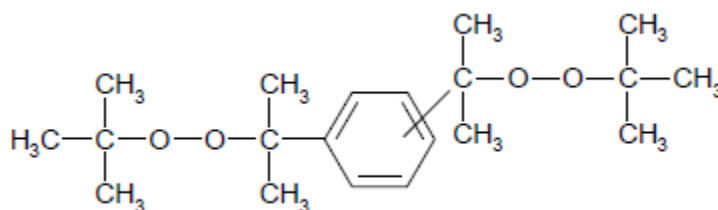
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid))

2) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (Poly (butylene succinate co adipate), PBSA) เกรด Bionolle 3001D จากบริษัท Showa Highpolymer ประเทศญี่ปุ่น



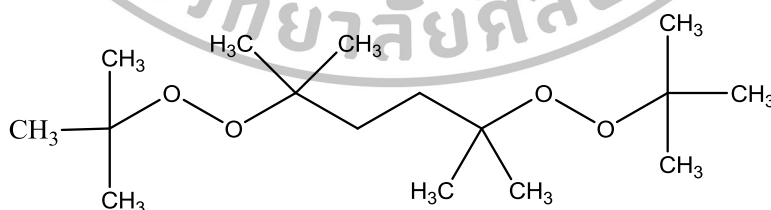
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (Poly(butylene succinate co adipate))

3) เปอร์กาท็อกซ์ (Perkadox 14s) ชื่อทางเคมี คือ (Di (tert-butylperoxyisopropyl) benzene) จากบริษัท Akzo Nobel มีความเข้มข้นของเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยส่วนที่เหลือประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา)[21]



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของ Perkadox14s

4) ลูเปอร์ลอกซ์ (Luperox 101) ชื่อทางเคมี คือ (2,5-Dimethyl-2,5-di(tert-butylperoxy)hexane) จากบริษัท Akzo Nobel มีความเข้มข้นของเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ (โดยส่วนที่เหลือประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา)[21]



ภาพที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของ Luperox101

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1) เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Co-rotating twin screw extruder) รุ่น SHJ-25 บริษัท Yngteng ประเทศจีน (L/D = 40) เพื่อใช้สำหรับการเบลนด์พอลิเมอร์ PLA/PBSA

2) เครื่องผสมภายในแบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX105-D40L50 ผลิตโดยบริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย ใช้สำหรับการผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคโอะติเพทกับ รีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ (Perkadox14s และ Luperox101) เพื่อศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และรีแอคทีฟเอเจนท์

3) เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) บริษัท Labtech engineering ประเทศไทย เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น CAMSCAN MX-2000 ประเทศอังกฤษ ใช้สำหรับศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

2) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact testing) รุ่น RESIL IMPACTOR, บริษัท PIANEZZA-TORINO ประเทศอิตาลี เพื่อทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์

3) เครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น 5969 บริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อทดสอบการดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์

4) เครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) รุ่น Modular compact rheometer MCR 302 บริษัท Anton Paar สำหรับการทดสอบสมบัติทางพลวัต

5) เครื่อง Melt flow indexer รุ่น 7053 บริษัท Kayeness สำหรับทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

6) เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น TGA/DSC1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์

7) เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์

8) เครื่อง Fourier transforms infrared spectrometer (FT-IR) รุ่น Vertex70 บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์

9) เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น XRD-6100 ผลิตโดยบริษัท SHIMADZU ใช้สำหรับทดสอบความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การผสมพอลิเมอร์และรีแอคทีฟเอเจนต์เพื่อศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา โดยเครื่องผสมภายในแบบปิด (Internal mixer)

1) ผสมพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (PBSA) กับรีแอคทีฟเอเจนต์สองชนิดเปอร์ออกไซด์ ได้แก่ Perkadox14s (เขียนแทนด้วย P) และ Luperox101 X45 (เขียนแทนด้วย L) โดยทำการทดสอบที่ปริมาณรีแอคทีฟเอเจนต์เท่ากับ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr (ตัวเลขหลัง P และ L แสดงถึงปริมาณรีแอคทีฟเอเจนต์ชนิดนั้นๆ ในหน่วย phr) เช่น PLA+P0.001 หมายถึง ผสม PLA และ Perkadox ปริมาณ 0.001phr

2) ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจากการเปลี่ยนแปลงค่าทอร์คในการผสม โดยเครื่องผสมภายในแบบปิด ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุน 60 rpm และใช้เวลาในการผสม 10 นาที

3) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) เพื่อนำไปทำการทดสอบ โดยใช้อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป 190 องศาเซลเซียส กดอัดเป็นเวลา 2 นาที

4) ทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เมื่อผสมกับรีแอคทีฟเอเจนต์ ด้วยเทคนิค ได้แก่

- ทดสอบสมบัติการดึงยึดด้วยเครื่อง Universal tensile testing ตามมาตรฐาน ASTM D638 น้ำหนักในการดึง 5 kN และความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อ นาที

- ทดสอบค่าดัชนีการไหล ด้วยเครื่อง Melt flow indexer ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 kN (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238)

- ทดสอบปริมาณเจล (Gel content) โดยแช่ในสารละลาย Dichloromethane ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- ทดสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR ที่เลขคลื่น 400 ถึง 4000 cm^{-1} โดยทำการผสมกับ KBr และขึ้นรูปเป็นแผ่นวงกลมเพื่อใช้ในการทดสอบ

3.4.2 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบนอนรีแอคทีฟเบลนด์ (Non-reactive blend)

1) ออบพอลิเมอร์ที่ใช้ ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (PBSA) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อนทำการผสม

2) ผสม PLA และ PBSA ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin screw extruder) โดยใช้ อุณหภูมิในการผสม ได้แก่ 130/140/150/160/170/190/190 องศาเซลเซียส

- สัดส่วนของการผสม PLA:PBSA ได้แก่ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80, และ 0:100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย เช่น PBSA20 หมายถึง มีสัดส่วนของ PBSA 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และส่วนที่เหลือคือสัดส่วนของ PLA

3) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ทำการอัดย้ำ 2 นาที และใช้ความดันเท่ากับ 500 psi

4) ทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

- ทดสอบดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt Flow Indexer ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 kN (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM1238)

- ทดสอบสมบัติการดึงยึดด้วยเครื่อง Universal tensile testing ตามมาตรฐาน ASTM D638 น้ำหนักในการดึง 5 kN และความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อ นาที

- ทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกด้วยเครื่อง Impact tester โดยมีค่าพลังงานสูงสุดในการกระแทกขึ้นงานเท่ากับ 2.4J (ทดสอบตามมาตรฐาน D256)

- ทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยชิ้นงานที่ศึกษามาจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป แล้วนำไปหักในไนโตรเจนเหลว และทำการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยทองคำ

- ทดสอบอุณหภูมิกการหลอมผลึก และอุณหภูมิกการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ต่อหนึ่งนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน และคำนวณปริมาณผลึกได้ดังสมการ[22]

$$\% X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^o} \times 100 \times \frac{1}{fraction} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

เมื่อ X_c คือปริมาณความเป็นผลึก, ΔH_m คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก ต่อหนึ่งหน่วย, ΔH_{cc} คือปริมาณความร้อนที่ทำให้เกิดการตกผลึก, และ ΔH_m^o คือปริมาณความร้อนซึ่งใช้ในการหลอมเหลวผลึกที่สมบูรณ์

- ทดสอบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อหนึ่งนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

- ทดสอบสมบัติทางพลวัตด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) โดยการทดสอบแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

- การทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature scan) ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยทดสอบในรูปแบบการให้แรงบิด (torsion) มีความถี่เชิงมุมในการหมุน 62.8 rad/s และค่าแอมพลิจูด 0.008 rad
- การทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency swift) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยทดสอบในรูปแบบการให้แรงเฉือน (shear) ความถี่เชิงมุมมีค่าเท่ากับ 0.1-100 rad/s

- ทดสอบปริมาณเจล (Gel content) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบใส่ในขวดตาข่ายสแตนเลส ความถี่ 120 mesh แล้วนำไปแช่ในไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และคำนวณ %Gel content จาก

$$\% \text{ Gel content} = (\text{น้ำหนักหลังการทดสอบ} / \text{น้ำหนักหลังการทดสอบ}) \times 100 \text{ (สมการที่ 2)}$$

- ทดสอบหมู่ฟังก์ชัน นำเจลที่เหลือจากการทดสอบการหาปริมาณเจลศึกษาหมู่ฟังก์ชัน โดยทำการบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide; KBr) ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Fourier transforms infrared spectrometer (FT-IR) ที่เลขคลื่น 400-4000 cm^{-1}

- ทดสอบผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปมาทดสอบ ใช้กระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมป์ และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 40 วัตต์ มุมในการส่องกราดเท่ากับ 4 ถึง 90 องศา (ณ อุณหภูมิห้อง)

3.4.3 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอกทีฟเบลนด์ โดยการเติมรีแอกทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์

1) ออบพอลิเมอร์ที่ใช้ ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะติเพท (PBSA) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อนทำการผสม

2) ผสม PLA และ PBSA ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin screw extruder) โดยใช้ อุณหภูมิในการผสม ได้แก่ 130/140/150/160/170/190 องศาเซลเซียส

- สัดส่วนของการผสม PLA:PBSA ได้แก่ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80, และ 0:100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย เช่น PBSA20 หมายถึง มีสัดส่วนของ PBSA 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และส่วนที่เหลือคือสัดส่วนของ PLA

- เติมรีแอกทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ ได้แก่ Perkadox14s ปริมาณ 0.1 phr (จากการทดลองใน 3.4.1) หรือเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ P0.1 หมายถึง ใช้ Perkadox14s ปริมาณ 0.1 phr

3) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ทำการอัดย៉า 2 นาที ด้วยความดันในการอัดย៉าเท่ากับ 500 psi

4) ทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่เติมรีแอกทีฟเอเจนท์เช่นเดียวกับการทดสอบในตอนต้นที่ 3.4.2

3.4.4 การศึกษาผลของปริมาณการเติมรีแอกทีฟเอเจนท์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

1) ออบพอลิเมอร์ที่ใช้ ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะติเพท (PBSA) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อนทำการผสม

2) ผสม PLA และ PBSA ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin screw extruder) โดยใช้ อุณหภูมิในการผสม ได้แก่ 130/140/150/160/170/190 องศาเซลเซียส

- สัดส่วนของการผสม PLA: PBSA ได้แก่ 60:40 (จากผลการทดสอบ ใน 3.4.3) นำมาปรับเปลี่ยนปริมาณ Perkadox14s โดยปริมาณที่ใช้ ได้แก่ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr

3) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ทำการกดอัด 2 นาที

4) ทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่เติมรีแอกทีฟเอเจนท์ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบในตอนต้นที่ 3.4.2

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเบลนดระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โคออะติเพท (PLA/PBSA) ในระบบนอร์แอคทีฟและรีแอคทีฟเบลนด์ โดยใช้รีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ ทำการเปรียบเทียบระหว่างรีแอคทีฟเอเจนท์ 2 ชนิด ได้แก่ Perkadox14s และ Luperox101 ปริมาณไม่เกิน 1 phr จากนั้นเลือกชนิดและปริมาณรีแอคทีฟเอเจนท์ที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBSA นำไปสู่การปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เบลนด์อีกด้วย เตรียมนอร์แอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์โดยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 0, 20, 40, 50, 60, 80, และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วศึกษาและเปรียบเทียบสัณฐานวิทยา สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล รวมถึงสมบัติทางความร้อนของนอร์แอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ และในตอนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของปริมาณรีแอคทีฟเอเจนท์ โดยทำการเปรียบเทียบที่สัดส่วนของพอลิเมอร์ที่เท่ากัน

4.1 การศึกษาผลของเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox) ต่อ PLA และ PBSA

4.1.1 ผลของเปอร์ออกไซด์ต่อค่าทอร์กของ PLA และ PBSA

เพื่อศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox) กับ PLA และ PBSA จึงทำการผสมเปอร์ออกไซด์กับพอลิเมอร์ในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิการผสม 190 องศาเซลเซียส จากการศึกษาปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์ใน Perkadox และ Luperox ที่มีอยู่จริง โดยใช้เทคนิค TGA พบว่ารีแอคทีฟเอเจนท์ทั้งของชนิดมีสัดส่วนปริมาณเปอร์ออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยส่วนที่เหลือประกอบไปด้วยซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต [21] และตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Perkadox และ Luperox ที่ใช้ในการผสม

ตารางที่ 4.1 ปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์ใน Perkadox และ Luperox

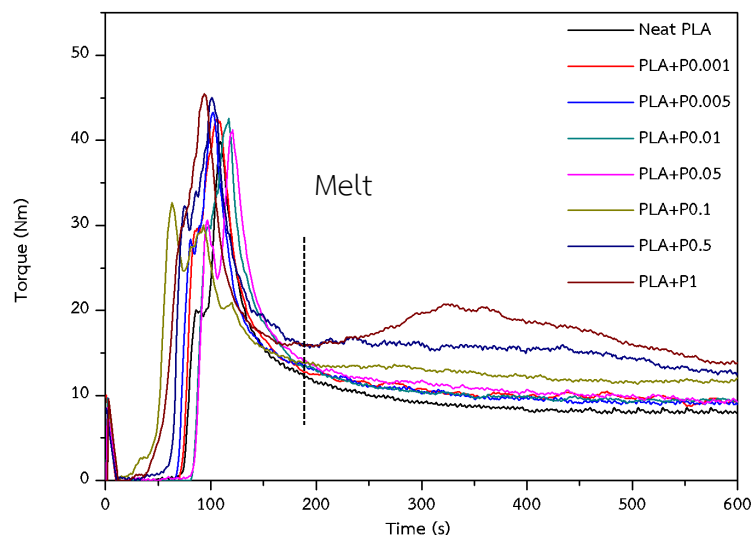
ชนิดของรีแอคทีฟเอเจนท์	ปริมาณเปอร์ออกไซด์ (%)
Perkadox	40%
Luperox	50%

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเปอร์ออกไซด์ใน Perkadox และ Luperox ที่ความเข้มข้นต่างๆ

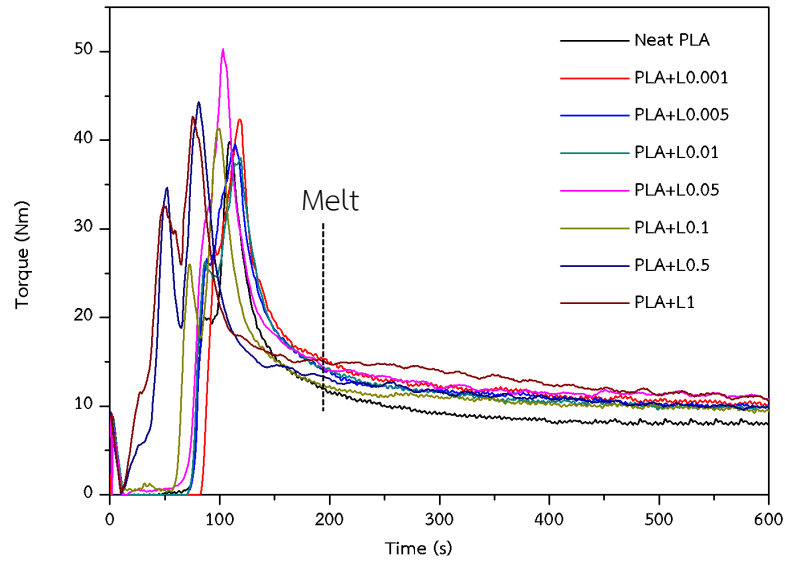
Perkadox		Luperox	
ความเข้มข้น(phr)	ปริมาณเปอร์ออกไซด์ (g)	ความเข้มข้น(phr)	ปริมาณเปอร์ออกไซด์ (g)
0.001	0.0004	0.001	0.0005
0.005	0.002	0.005	0.0025
0.01	0.004	0.01	0.005
0.05	0.02	0.05	0.025
0.1	0.04	0.1	0.05
0.5	0.2	0.5	0.25
1	0.4	1	0.5

ภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงค่าทอร์กการผสมระหว่าง PLA กับรีแอคทีฟเอเจนท์สองชนิด ได้แก่ Perkadox และ Luperox ที่ปริมาณ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr ตามลำดับ พบว่าค่าทอร์กของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณรีแอคทีฟเอเจนท์เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเท่ากับ 0.001, 0.005, 0.01, และ 0.05 phr ค่าทอร์กของ PLA ที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และค่าทอร์กสุดท้ายของการผสมมีค่าใกล้เคียงกับ Neat PLA ทั้งในกรณีที่เติม Perkadox และ Luperox แต่เมื่อปริมาณของรีแอคทีฟเอเจนท์มากกว่า 0.1 phr พบว่าสังเกตเห็นค่าทอร์กมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับ Neat PLA แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณที่มากกว่า 0.5 phr Perkadox และ Luperox สามารถเกิดปฏิกิริยากับ PLA ทำให้มีความหนืดสูงขึ้นมาก

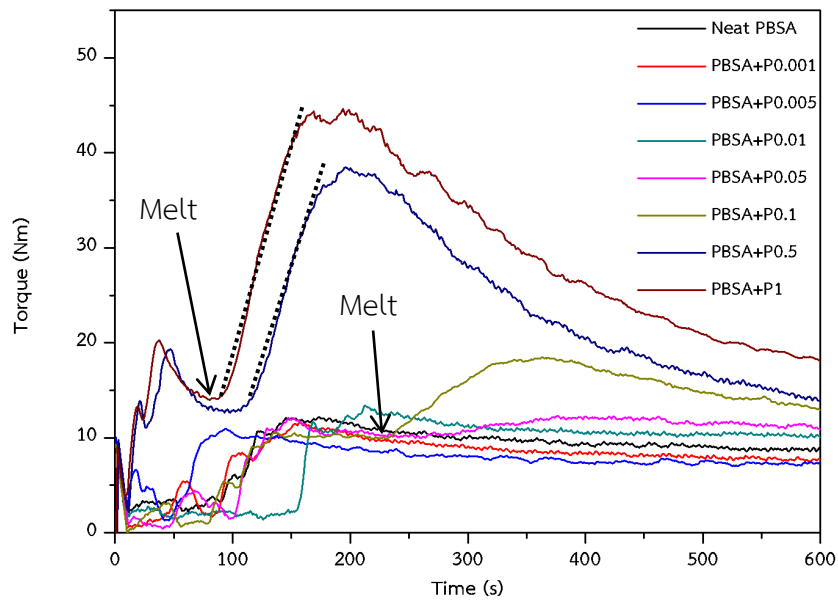
ค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PBSA กับรีแอคทีฟเอเจนต์ (Perkadox และ Luperox) แสดงดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ค่าทอร์กของ PBSA เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA แสดงให้เห็นว่า PBSA มีความ active กับรีแอคทีฟเอเจนต์ทั้งสองชนิดมากกว่า PLA โดยเฉพาะที่ปริมาณรีแอคทีฟเอเจนต์มากกว่า 0.1 phr จะเห็นความชันของค่าทอร์กที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และหลังจากการหลอมพบว่าทอร์กมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ลักษณะคล้ายกับการเกิดการ cure ของยาง เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเติมรีแอคทีฟเอเจนต์ โดยการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยาผ่านฟรีเรดิคัล (free radical) โดยเมื่อเปอร์ออกไซด์ได้รับความร้อนจะแตกตัวเป็นฟรีเรดิคัล จากนั้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสายโซ่ของ PLA และ PBSA ทำให้มีฟรีเรดิคัลเกิดขึ้นบนสายโซ่ ซึ่งแผนภาพการเกิดฟรีเรดิคัลของเปอร์ออกไซด์และพอลิเมอร์ที่อาจเกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.5 จากนั้น สายโซ่ของพอลิเมอร์ที่มีฟรีเรดิคัลอาจเกิดการ terminate ของสายโซ่ด้วยกระบวนการแบบ coupling (การเกิดการรวมกันของฟรีเรดิคัลระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์) จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ขึ้น และจากกราฟทอร์กพบว่า ค่าทอร์กของ PBSA มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า PLA เนื่องจากสายโซ่ของ PBSA มีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA จึงทำให้มีตำแหน่งที่สามารถเกิดฟรีเรดิคัลได้มากกว่าดังนั้นจึงสามารถเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ได้มากกว่านั่นเอง



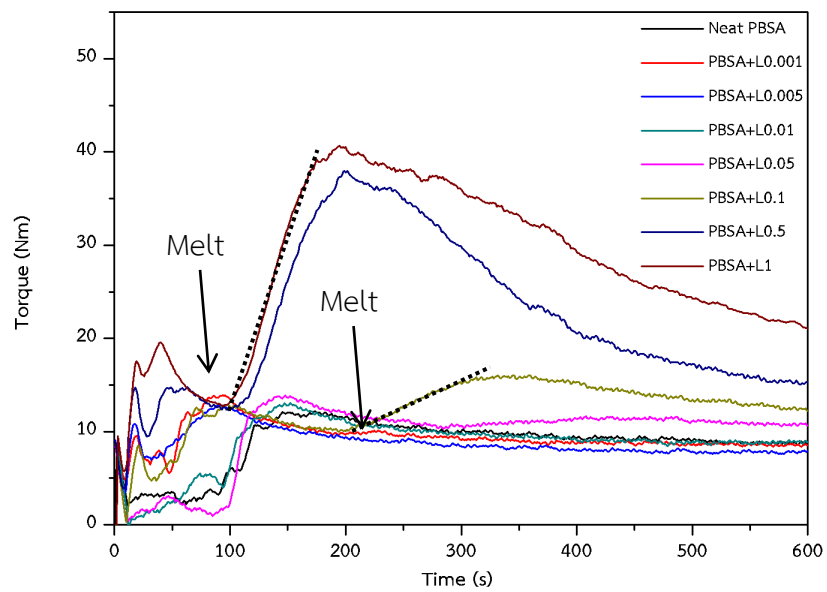
ภาพที่ 4.1 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PLA กับ Perkadox ที่ปริมาณ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr



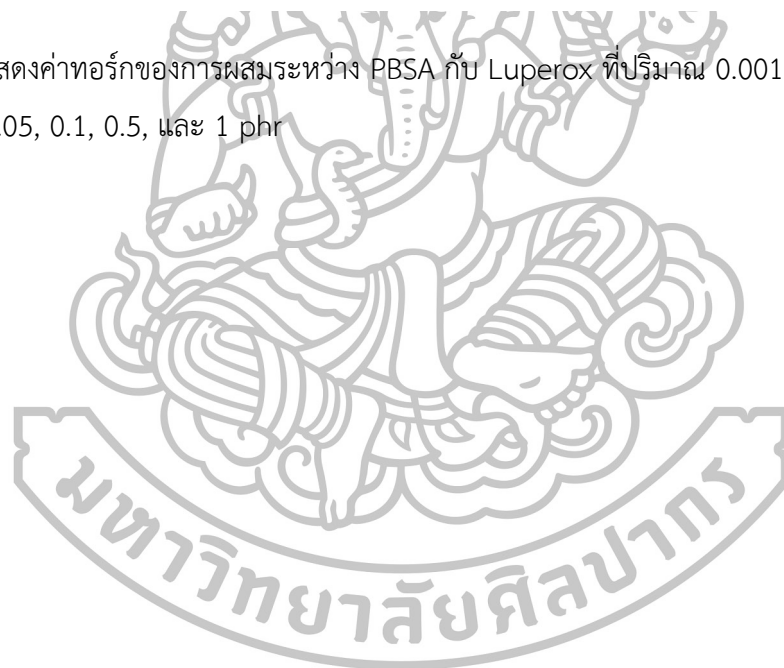
ภาพที่ 4.2 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PLA กับ Luperox ที่ปริมาณ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr



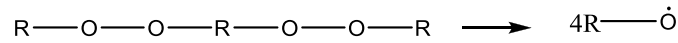
ภาพที่ 4.3 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PBSA กับ Perkadox ที่ปริมาณ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr



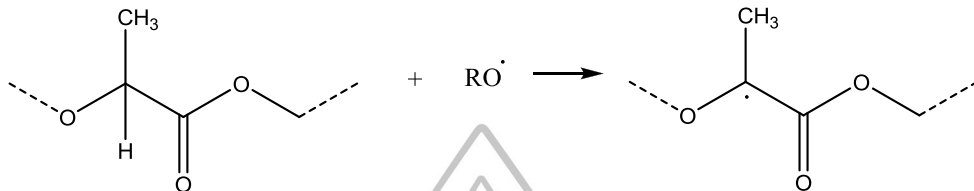
ภาพที่ 4.4 แสดงค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PBSA กับ Luperox ที่ปริมาณ 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, และ 1 phr



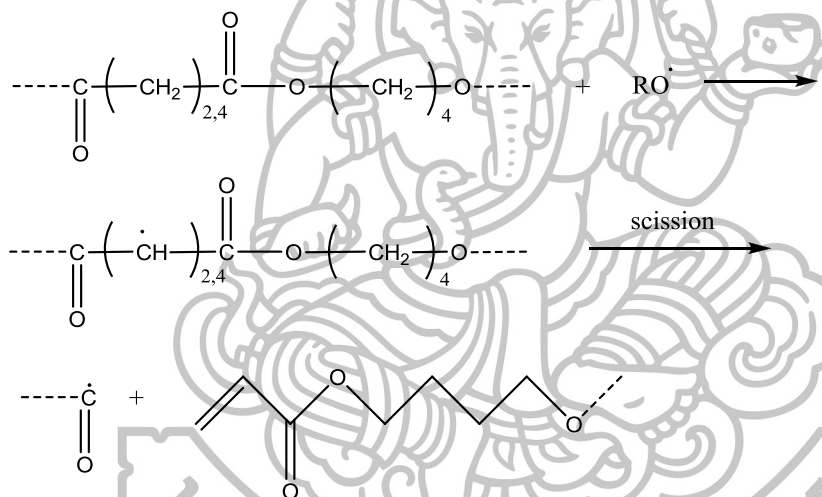
Perkadox or Luperox



PLA



PBSA

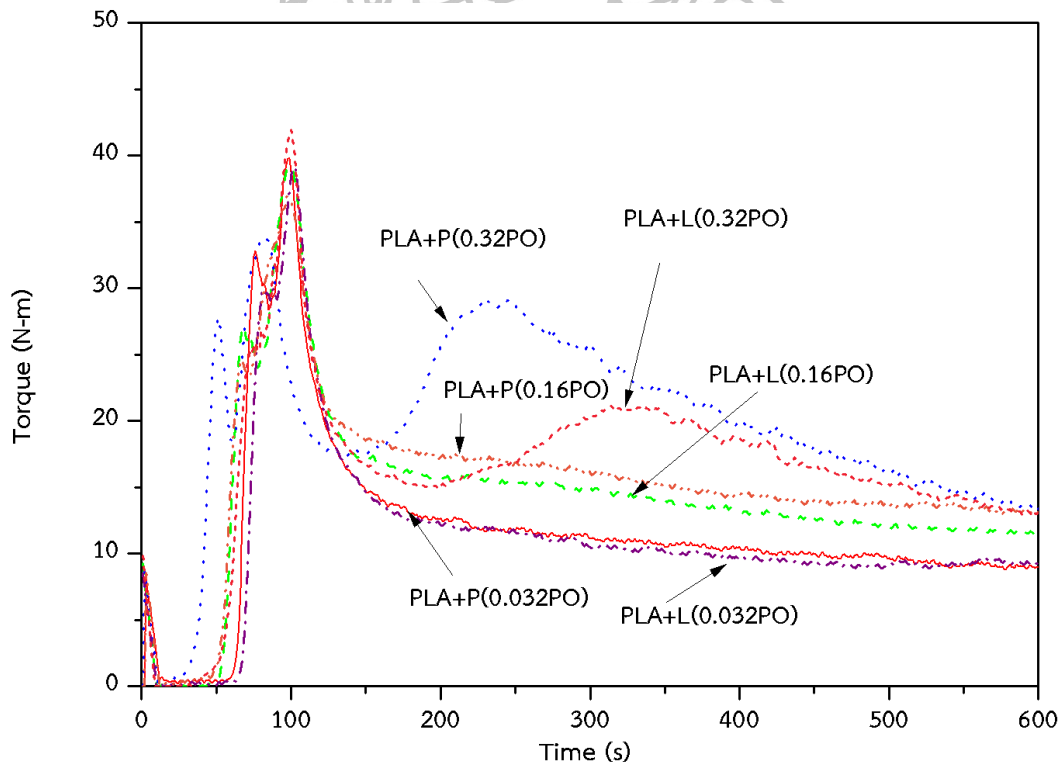


ภาพที่ 4.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาฟรีเรดดิคอลสำหรับ PLA และ PBSA

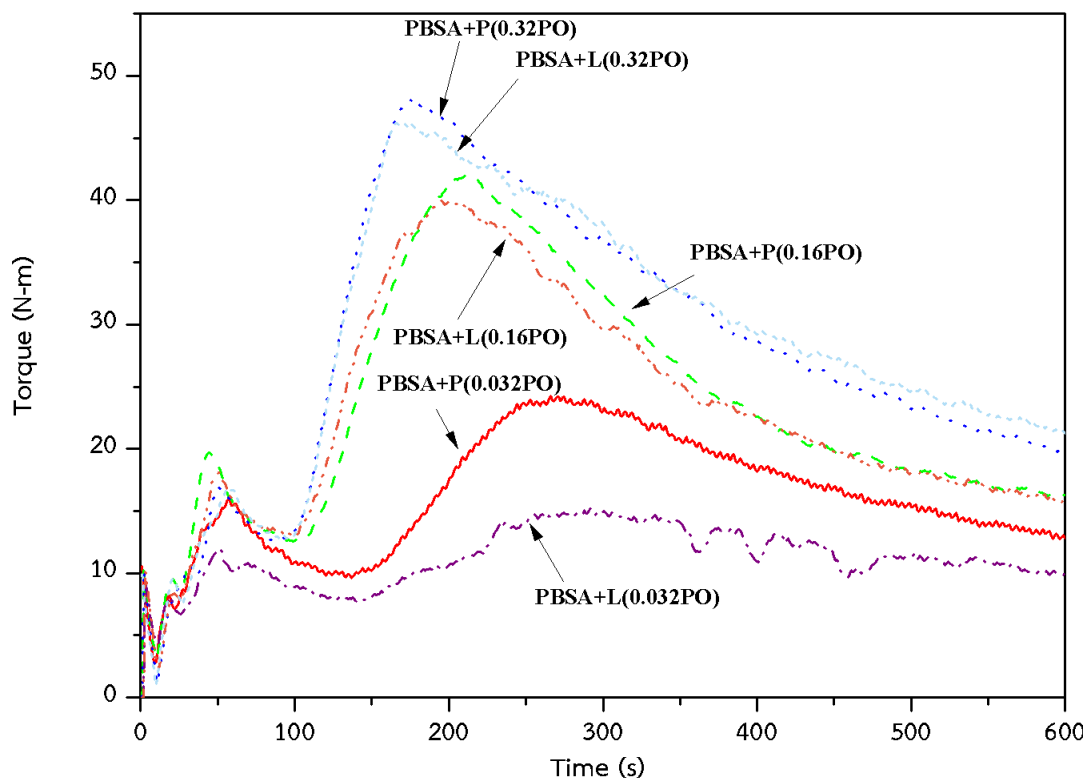
เพื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ออกไซด์ทั้งสองต่อ PLA และ PBSA จึงทำการผสมโดยคิดจากปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์ที่เท่ากัน โดยเปรียบเทียบใช้ที่ปริมาณของเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.032, 0.16, และ 0.32 กรัม (เปรียบเทียบในพอลิเมอร์ 80 กรัม) ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าทอร์ค ภาพที่ 4.6 และ 4.7 แสดงค่าทอร์คของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox และ Luperox ตามลำดับ พบว่าค่าทอร์คของ PLA ในกรณี Perkadox จะมีการเพิ่มขึ้นของค่าทอร์คมากกว่ากรณี Luperox ที่ปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์ที่เท่ากัน โดยจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อมีปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.32 กรัม จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าทอร์ค PBSA พบว่าในกรณีที่เติม Perkadox และ Luperox จะมีค่าทอร์คเพิ่มขึ้นมากและไม่มีความแตกต่างระหว่างการเติม Perkadox และ Luperox อย่างไรก็ตามที่ปริมาณ

เนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.032 กรัม พบว่า Perkadox ให้ค่าทอร์กสูงกว่า Luperox จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Perkadox มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับ PLA และ PBSA ที่ดีกว่า Luperox โดยเมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ทั้งสองชนิดพบว่ามีความใกล้เคียงกัน คือประมาณ 0.3 วินาที[21] ที่อุณหภูมิการผสม 190 องศาเซลเซียส[23] ดังนั้นผลของความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาน่าจะเป็นผลมาจากหมู่กลางของเปอร์ออกไซด์ โดยเมื่อแตกตัวแล้ว Perkadox จะให้ฟรีแรดดิคัลที่มีวงเบนซีน ซึ่งมีความเสถียรของฟรีแรดดิคัลมากกว่า Luperox ที่เป็น aliphatic[24] จึงมีเวลาในการทำงานของฟรีแรดดิคัลที่มากกว่าและทำให้สังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของค่าทอร์ก อย่างไรก็ตามพบว่าปฏิกิริยานั้นเกิดได้ค่อนข้างช้า โดยสังเกตจากค่าทอร์กที่เริ่มเกิดการเพิ่มขึ้นที่เวลาประมาณ 200 วินาที เมื่อเติม Perkadox ปริมาณน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเกาะของโครงสร้างจึงอาจทำให้เข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ได้ยากขึ้นนั่นเอง

จากการศึกษาค่าทอร์กของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox และ Luperox ที่ปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.032 กรัม หรือที่ความเข้มข้นของ Perkadox เท่ากับ 0.1 phr พบว่ามีความว่องไวเพียงพอ ดังนั้นจึงเลือกใช้เปอร์ออกไซด์ชนิด Perkadox ในปริมาณ 0.1 phr ในการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในขั้นตอนต่อไป



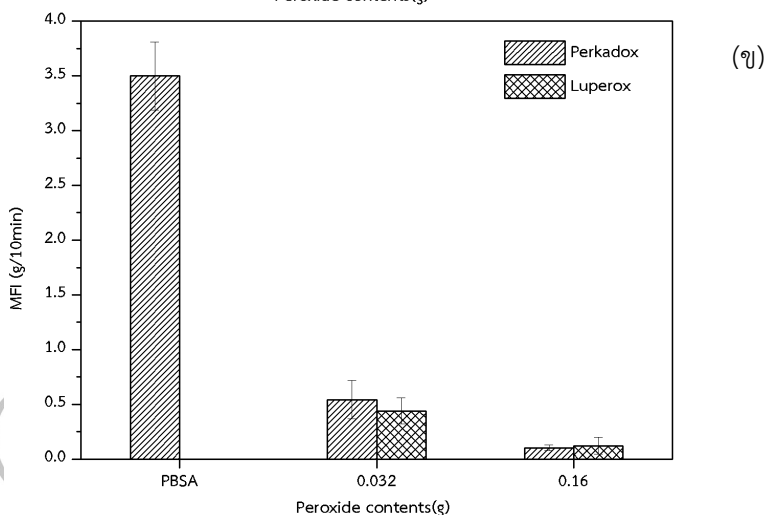
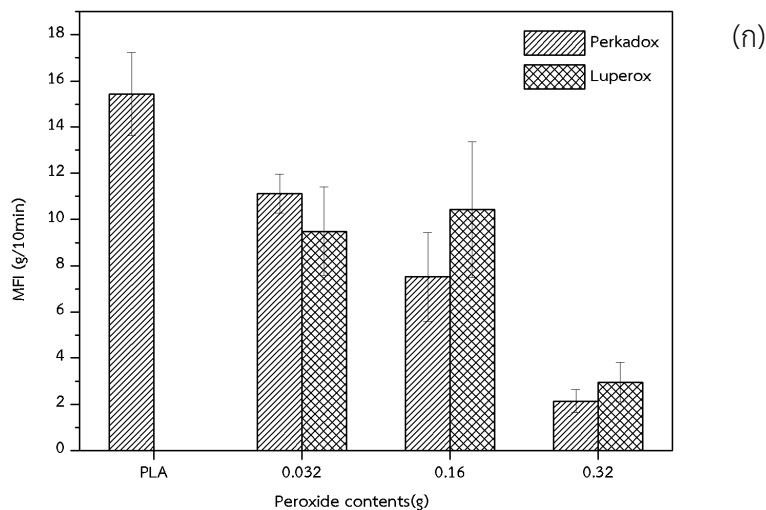
ภาพที่ 4.6 ค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PLA กับ Perkadox (P) และ Luperox (L)



ภาพที่ 4.7 ค่าทอร์กของการผสมระหว่าง PBSA กับ Perkadox(P) และ Luperox (L)

4.1.2 สมบัติการไหลของ PLA และ PBSA เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox)

การศึกษาค่าดัชนีการไหล ณ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส กัดด้วยน้ำหนักดเท่ากับ 2.16 kg ของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox และ Luperox ที่ปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากัน แสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่า ดัชนีการไหลมีค่าลดลง เมื่อมีปริมาณเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าทอร์กที่มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงอย่างมากในกรณีของ PBSA ส่วนในกรณีของ PLA ค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าทอร์กสุดท้ายของพอลิเมอร์ในตอนที่ 4.1.1

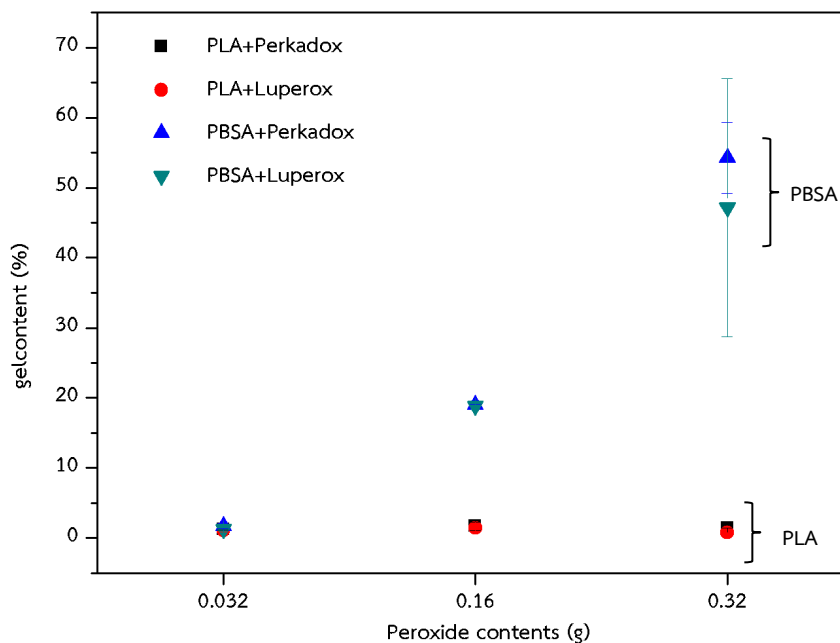


ภาพที่ 4.8 แผนภูมิค่าดัชนีการไหลระหว่าง (ก)PLA และ (ข)PBSA กับรีแอคทีฟเอเจนท์ (Perkadox และ Luperox)

4.1.3 การศึกษาปริมาณเจลของ PLA และ PBSA จากการเติม Perkadox และ Luperox

ศึกษาปริมาณเจลที่เกิดขึ้นของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox และ Luperox โดยละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดทั้งสำหรับ PLA และ PBSA ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาปริมาณเจลของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox และ Luperox ที่ปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.032, 0.16 และ 0.32 กรัม แสดงในภาพที่ 4.9 พบว่า กรณีของ PLA มีปริมาณเจลประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ทั้งกรณีที่เติม Perkadox และ Luperox สำหรับกรณีของ PBSA พบว่า ปริมาณเจลของ PBSA เพิ่มขึ้นมากเมื่อเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ปริมาณมากขึ้น โดยมีปริมาณเจลเท่ากับ 45-55

เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.32 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าทอร์กของ PBSA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่ (cross linking)



ภาพที่ 4.9 แผนภูมิแสดงปริมาณเจล (Gel contents) ของ PLA และ PBSA เมื่อผสมกับ เปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox)

4.1.4 สมบัติเชิงกลของพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคอะติเพทเมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox)

ศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการดึงยืด (Tensile testing) โดยพิจารณาจากค่าต่าง ๆ ได้แก่ Young's modulus, Tensile strength, และ Elongation at break ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า พบว่าการเติมรีแอคทีฟเอเจนต์ลงในพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อค่า Young's modulus, Tensile strength, และค่า Elongation at break แสดงให้เห็นว่ารีแอคทีฟเอเจนต์ส่งผลต่อความหนืดมากกว่าสมบัติเชิงกล โดยถือว่าการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ได้แก่ PLA-PLA และ PBSA-PBSA ซึ่งอาจจะทำให้มีปริมาณไม่มากพอจะส่งผลต่อสมบัติการดึงยืด

ตารางที่ 4.3 สมบัติการดึงยึดของ PLA เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox)

Properties	PLA mixed with Peroxides					
	0.032g (P)	0.032g (L)	0.16g (P)	0.16g (L)	0.32g (P)	0.32g (L)
Young's modulus	1391.1±38.9	1387.9±4.9	1419.0±16.9	1396.5±16.4	1512.8±7.2	1494.3±23.2
Tensile strength	75.2±3.6	80.9±5.3	72.1±4.4	75.1±2.6	81.7±6.0	72.5±8.1
Elongation at break	7.0±1.2	6.9±0.5	7.5±1.6	7.1±1.4	6.4±0.9	7.2±2.6

ตารางที่ 4.4 สมบัติการดึงยึดของ PBSA เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ (Perkadox และ Luperox)

Properties	PBSA mixed with Peroxides (Perkadox and Luperox)					
	0.032g (P)	0.032g (L)	0.16g (P)	0.16g (L)	0.32g (P)	0.32g (L)
Young's modulus	186.9±5.7	188.0±11.8	183.9±8.3	145.9±24.6	174.5±13.6	143.25±14.83
Tensile strength	34.87±0.86	33.40±1.15	35.69±1.51	34.18±2.47	34.58±2.01	28.75±2.69
Elongation at break	499.97±0.04	>500	498.06±4.61	483.96±35.82	480.42±33.91	497.5±5.05

จากการศึกษาค่าทอร์กของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox และ Luperox ที่ปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.032 กรัม หรือที่ความเข้มข้นของ Perkadox เท่ากับ 0.1 phr พบว่ามีความว่องไวเพียงพอ ที่ปริมาณนี้มีปริมาณเจลที่เกิดขึ้นใน PBSA และ PLA ในปริมาณที่น้อยมาก (ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นจึงเลือกใช้เปอร์ออกไซด์ชนิด Perkadox ในปริมาณ 0.1 phr ในการปรับปรุงความเข้ากันได้และศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในขั้นตอนต่อไป

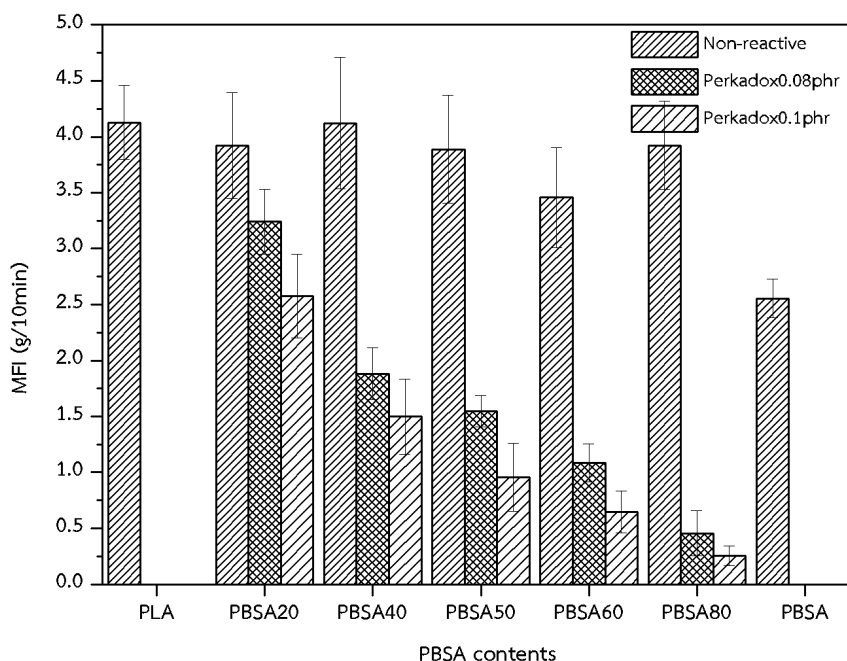
4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงการไหลของนอน

รีแอกทีฟและรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

จากการศึกษาในตอนต้นที่ 4.1 พบว่า PLA และ PBSA สามารถทำปฏิกิริยา free radical จากการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ และพบว่า Perkadox มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า Luperox ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 4.2 จึงเลือกใช้ Perkadox เป็นรีแอกทีฟเอเจนต์สำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA และจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าทอร์กพบว่าเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติม Perkadox ตั้งแต่ปริมาณ 0.1 phr ขึ้นไป และที่ปริมาณนี้มีเจลเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นของ Perkadox ที่ 0.1 phr มาเติมในรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20, 40, 50, 60, และ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยทำการเบลนด์ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วสกรูเท่ากับ 80 รอบต่อวินาที และทำการศึกษาสมบัติการไหล สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน

4.2.1 ค่าดัชนีการไหลของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

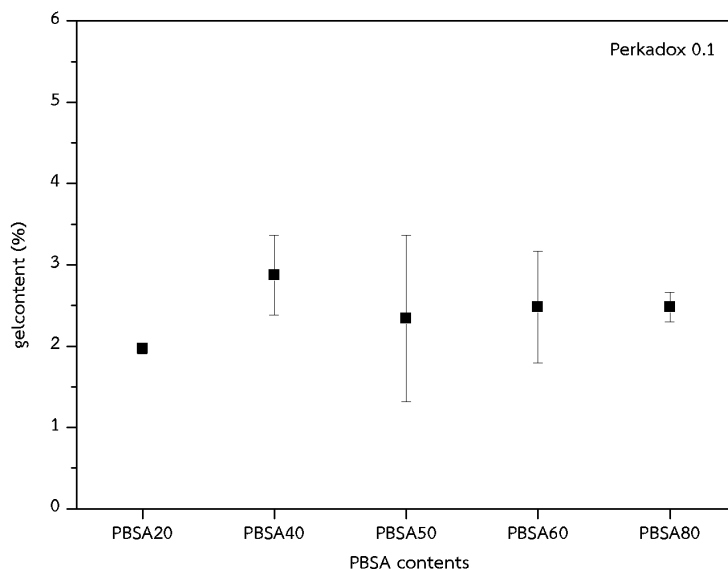
การศึกษาค่าดัชนีการไหล ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA แสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าที่ทุกสัดส่วนการเบลนด์ค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงเมื่อเติม Perkadox เพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณีไม่มีการเติมเปอร์ออกไซด์ ดัชนีการไหลมีค่าประมาณ 4 กรัม/10 นาที ในทุกสัดส่วนการเบลนด์ เมื่อสัดส่วน PBSA เพิ่มขึ้นพบว่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงอย่างมากตามสัดส่วนของ PBSA ที่เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 1.0 กรัม/10 นาทีและเท่ากับ 0.2 กรัม/10 นาที เมื่อมีสัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1 ที่ PBSA มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับ Perkadox มากกว่า PLA



ภาพที่ 4.10 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอคทีฟ (Reactive) เปรียบเทียบกับระบบนอนรีแอคทีฟ (Non-reactive)

4.2.2 การศึกษาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอคทีฟ

ภาพที่ 4.11 แสดงปริมาณเจลที่เหลือจากการทดสอบ Gel contents โดยใช้ตัวทำละลายคือ ไดคลอโรมีเทน ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ดีทั้งสำหรับ PLA และ PBSA ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเจลที่เหลือมีค่าประมาณ 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า ในระบบรีแอคทีฟของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่ใช้ Perkadox เป็นรีแอคทีฟเอเจนต์นั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับ PLA และ PBSA นำไปสู่การเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBSA มากขึ้น โดยการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดการเชื่อมขวางระหว่าง PLA-PLA, PBSA-PBSA, หรือ PLA-PBSA จึงทำให้ส่วนที่เหลือนี้ไม่ละลายในไดคลอโรมีเทน แต่การเกิดเจลนั้นยังมีปริมาณน้อย เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป

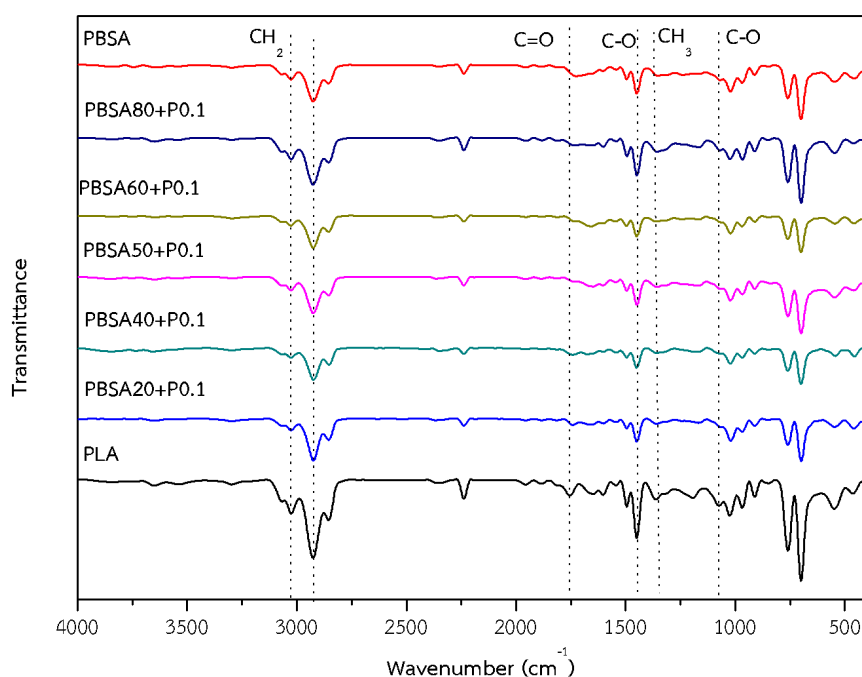


ภาพที่ 4.11 แผนภูมิแสดงปริมาณเจล (Gel contents) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอคทีฟ (ปริมาณ Perkadox 0.1 phr)

4.2.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอคทีฟ

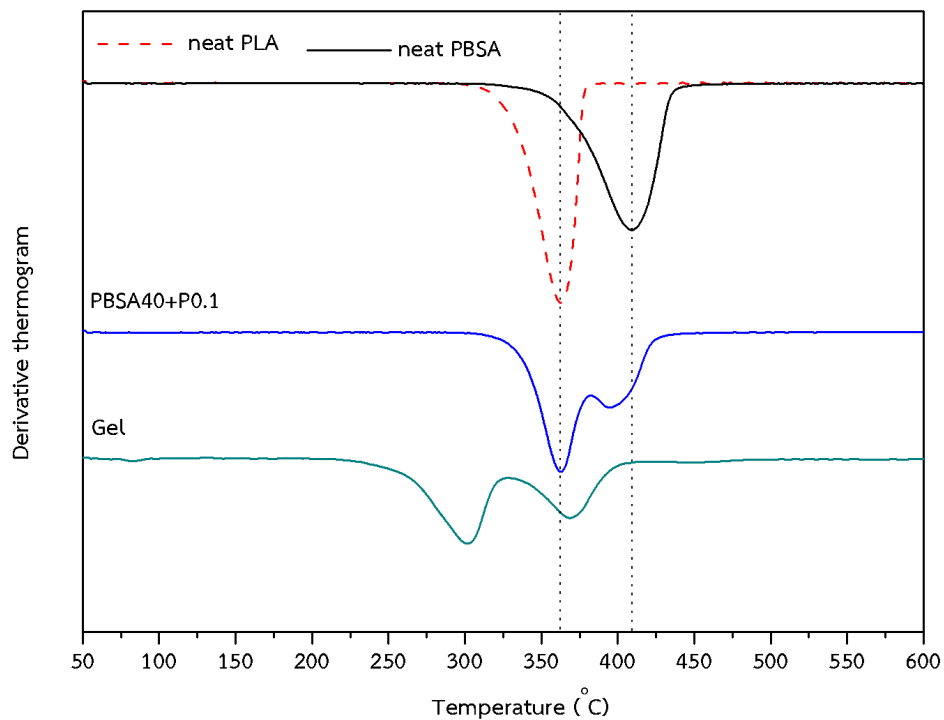
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเจลที่เหลือจากการทดสอบ Gel contents โดยนำส่วนที่เหลือจากการทดสอบปริมาณเจล ซึ่งไม่ละลายในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนที่เหลือนี้อาจเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดจากการเติม Perkadox ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.12 พบว่าพีค FTIR ของ PLA บริสุทธิ์ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง $3,029$ และ $2,926$ cm^{-1} คือการสั่นแบบยืดของหมู่เมทิล (CH_2) ตำแหน่ง $1,754$ cm^{-1} และตำแหน่ง $1,075$ cm^{-1} คือการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ และการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{O}$ ตามลำดับซึ่งแสดงถึงการมีหมู่เอสเทอร์ในโครงสร้าง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wei Kit Chee และคณะ [25] ที่พบพีคของ PLA บริสุทธิ์ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน สำหรับกรณีของ PBSA ปรากฏพีคแสดงตำแหน่งของการสั่นของ CH_2 ที่ตำแหน่ง $3,025$ และ $2,926$ cm^{-1} ส่วนการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}-\text{O}$ ปรากฏที่ตำแหน่ง $1,733$ cm^{-1} และตำแหน่ง 1068 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vincen Ojijo[20] และจากการพิจารณาพีคของเจลที่เหลือพบว่าแสดงพีคที่ตำแหน่งต่างๆใกล้เคียงกับ PLA และ PBSA บริสุทธิ์ ตำแหน่งที่มีความน่าสนใจคือ ตำแหน่งที่ $1,352$ cm^{-1} เป็นการสั่นของหมู่ CH_3 ซึ่งปรากฏใน PLA แต่ไม่ปรากฏใน PBSA และเมื่อพิจารณาจะสังเกตเห็นพีคนี้ปรากฏอยู่ในพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงให้เห็นว่าอาจเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ระหว่าง PLA-PBSA เจลที่เกิดขึ้นนี้น่าจะมี PBSA อยู่มาก เนื่องจาก PBSA มีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับ Perkadox มากกว่า PLA และจากพีค FTIR แสดงให้เห็นว่ามีพีคส่วนที่เป็นของ PLA ปรากฏอยู่ในเจลที่เหลืออยู่ด้วย ดังนั้นจึงอาจจะมีการเชื่อมขวางระหว่าง

PLA-PBSA เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงยากที่จะตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR เนื่องจากพิกที่ปรากฏของพอลิเมอร์เบลนด์นั้นอาจเกิดการซ้อนทับระหว่างพิกของพอลิเมอร์ทั้ง PLA และ PBSA



ภาพที่ 4.12 FT-IR spectra ของเจลที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Gel contents ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ซึ่งเติม Perkadox ปริมาณ 0.1 phr

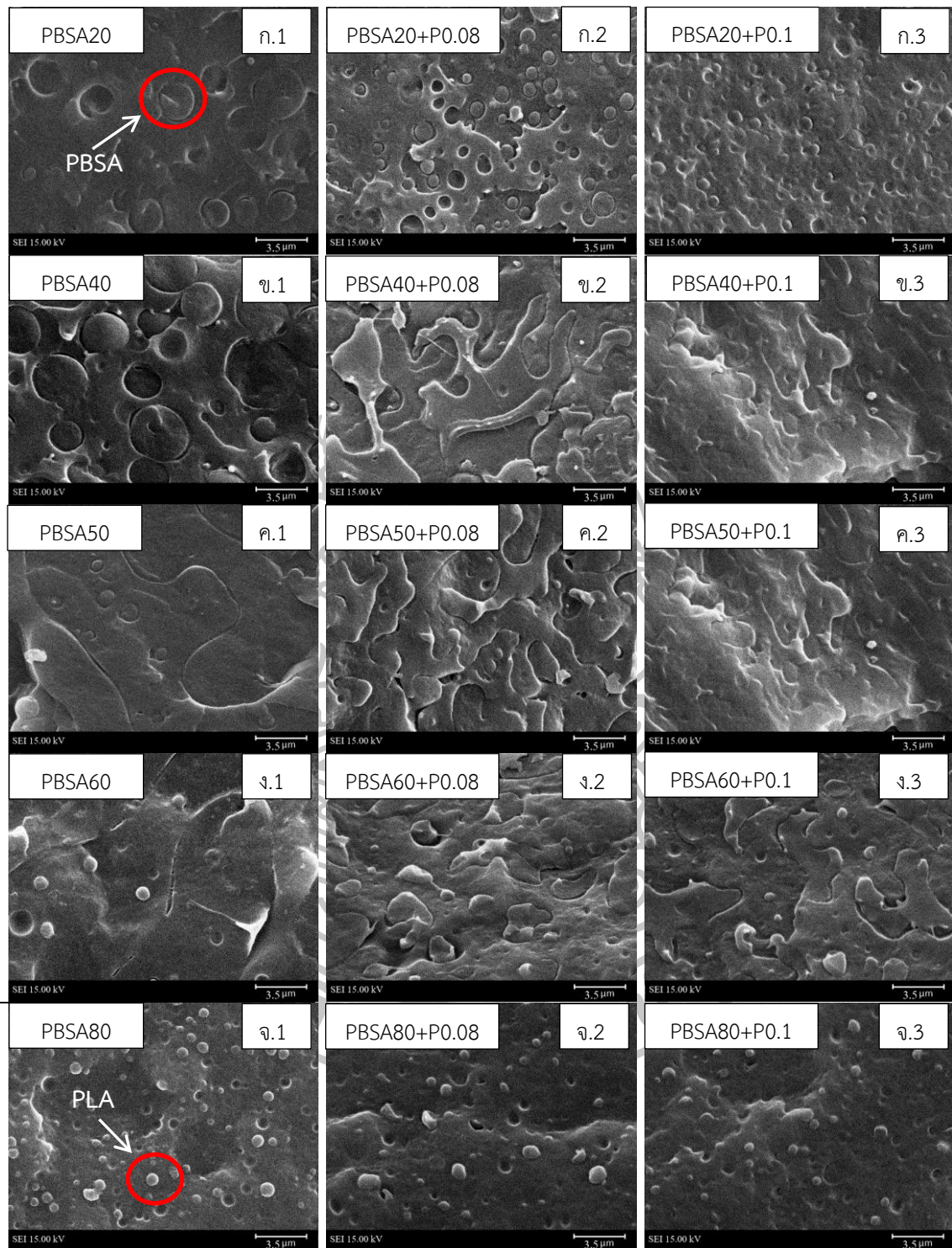
และเพื่อศึกษาว่าเจลที่เกิดขึ้นนั้นมีโมเลกุลใหม่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาฟรีแรดดิคอล จึงนำเจลที่เหลือมาทำการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยเลือกเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ซึ่งเติม Perkadox 0.1 phr ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.13 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเจลที่เหลือจะปรากฏพิก 2 พิก ที่อุณหภูมิเท่ากับ 301.6 องศาเซลเซียส และ 369.1 องศาเซลเซียส ซึ่งน่าจะเป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ในส่วนที่มีการเชื่อมขวางระหว่าง PLA และ PBSA โดยพิกที่อุณหภูมิต่ำแสดงการสลายตัวในส่วนของ PLA และที่อุณหภูมิสูงกว่าเป็นของ PBSA นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเจลที่เหลือมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับ neat PLA และ neat PBSA ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวเท่ากับ 360 และ 407 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 Derivative thermograms ของการสลายตัวทางความร้อนของเจล PLA/PBSA สัดส่วน 60/40 เมื่อเติม Perkadox 0.1 phr

4.2.4 สันฐานวิทยาของนอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

ภาพที่ 4.14 แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากพื้นผิวของการหักชิ้นงาน impact ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปในไนโตรเจนเหลว โดยแสดงภาพที่กำลังขยายเท่ากับ 3000 เท่า โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบนอนรีแอคทีฟ และรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ซึ่งเติม Perkadox ปริมาณเท่ากับ 0.08 และ 0.1 phr ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 20 และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสันฐานวิทยาแบบเฟสกระจายเป็นอนุภาคกลมกระจายอยู่ในเฟสหลัก พบว่าขนาดอนุภาคลดลงและมีการยึดเกาะระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นเมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr ในขณะที่ก่อนเติม Perkadox พบว่าเฟสกระจายมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และไม่มีการยึดเกาะระหว่างเฟส แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความไม่เข้ากัน เมื่อเติม Perkadox จะทำให้สามารถเบลนด์เข้ากันได้ดีขึ้น โดยสังเกตจากรอยต่อระหว่างสองเฟส เมื่อเติม Perkadox 0.08 และ 0.1 phr ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สันฐานวิทยาเริ่มมีความเป็นเฟสต่อเนื่อง คือ มีทั้งเฟสต่อเนื่องและเฟสกระจายอยู่ร่วมกัน โดยทั้งอนุภาคของเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่องมีขนาดใหญ่



ภาพที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA จาก fractured surface ของชิ้นงาน compression molding ของพอลิเมอร์เบลนด์ ที่อัตราส่วนของ PBSA เท่ากับ (ก) 20, (ข) 40, (ค) 50, (ง) 60, และ (จ) 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งเติม Perkadox 0.08 phr (ก.2-จ.2) และ 0.1 phr (ก.3-จ.3) (กำลังขยาย 3000เท่า)

เมื่อเติม Perkadox 0.08 phr และ 0.1 phr พื้นผิวมีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องเพิ่มขึ้น และอนุภาคเฟสกระจายมีขนาดเล็กลง และสังเกตเห็นการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเติม Perkadox ที่ 0.1 phr จะไม่สังเกตเห็นรอยต่อระหว่างเฟสของ PLA และ PBSA เนื่องจากเมื่อเติม Perkadox ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ทำให้เกิดความเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งน่าจะมาจากการเกิดโคพอลิเมอร์ของ PLA-PBSA จากการเกิดปฏิกิริยา free radical ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างเฟส PLA และ PBSA ในขณะเดียวกันทำให้ความหนืดของ PBSA เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของ PBSA จะมีความหนืดเข้าใกล้ PLA ที่อุณหภูมิเบลนด์และ shear rate ที่ใช้ในการเบลนด์ จึงทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้มากขึ้น ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 50 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะสังเกตเห็นสัญญาณวิทยาของการผสมที่ละเอียดขึ้นเมื่อเติม Perkadox และพบว่าสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์มีลักษณะเป็นเฟสเชื่อมโยงที่ดีขึ้น

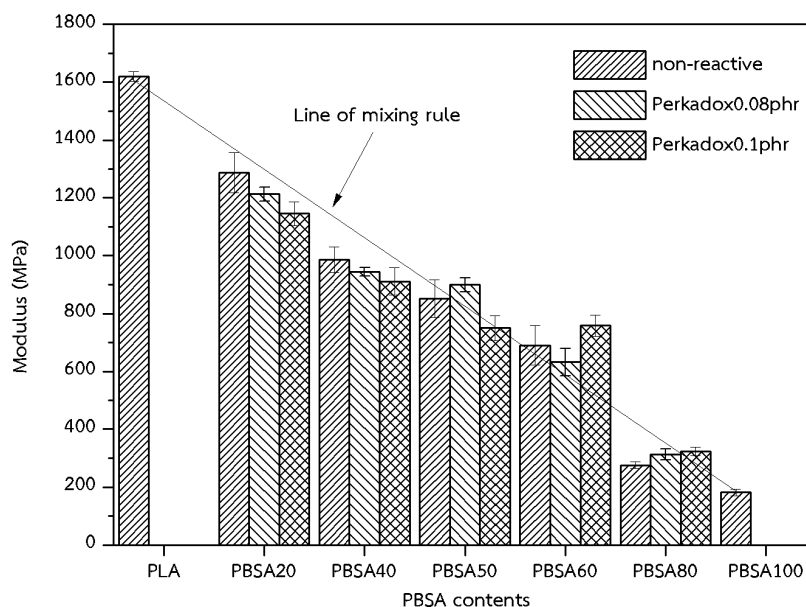
4.2.5 สมบัติเชิงกลของนอนรีแอกทีฟและรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของนอนรีแอกทีฟเปรียบเทียบกับรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ซึ่ง Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr ในพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20, 40, 50, 60, และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงทำการทดสอบสมบัติการดึงยึดและสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก

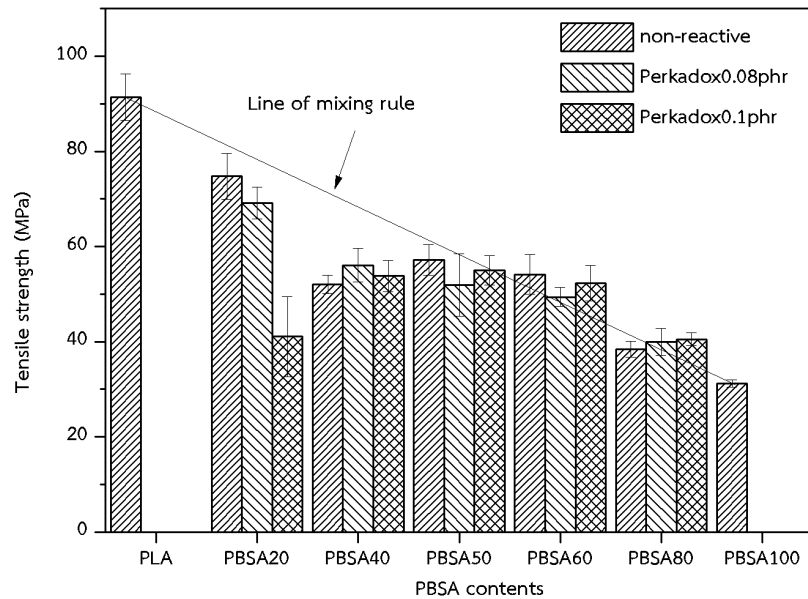
สมบัติการดึงยึดได้ทำการศึกษาค่า Young's modulus, Tensile strength, และค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงดังภาพที่ 4.15, 4.16, และ 4.17 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ PBSA เพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นและมีค่าต่ำกว่าเส้นกฎของการผสม (line of mixing rule) และเมื่อเติม Perkadox 0.08 และ 0.1 phr ที่สัดส่วนของ PBSA ตั้งแต่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป พบว่าค่า Young's modulus จะมีค่ามากกว่าเส้นกฎของการผสม แสดงให้เห็นว่าการเติม Perkadox ที่สัดส่วนของ PBSA มากๆจะส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดการเชื่อมขวางจะทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้นจากการเชื่อมขวางหรือการ cure ที่เกิดขึ้นนั่นเอง ในส่วนของค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าลดลงสอดคล้องกับเส้นกฎการผสม เนื่องจากที่สัดส่วนนี้มีสัญญาณวิทยาแบบเฟสกระจายขนาดเล็กอยู่ในเมทริกซ์ แต่เมื่อสัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40, 50, และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่า tensile strength มีค่าต่ำกว่าเส้นกฎการผสมอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสัญญาณวิทยาเป็นเฟสต่อเนื่องร่วม (co-continuous phase) และเมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.1 phr ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สัญญาณวิทยาเริ่มมีการกลับเฟส (แสดงดังภาพที่ 4.14 (ข3)) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติม Perkadox

0.1 phr ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า tensile strength มีค่าสูงกว่าเส้นกฏของการผสมเช่นเดียวกับค่า Young's modulus

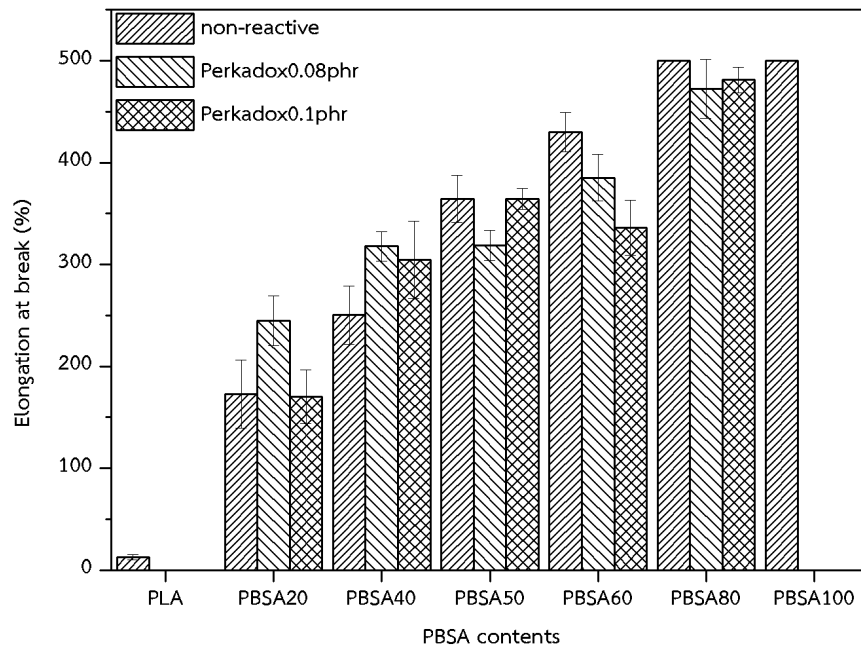
อย่างไรก็ตามพบว่าค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของ PBSA เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีที่ไม่เติมและเติม Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr เป็นที่น่าสังเกตว่า ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสัดส่วนวิชาที่อนุภาค PBSA กระจายอยู่ใน PBSA เฟสหลัก มีค่า Elongation at break เกือบ 200 เปอร์เซ็นต์ ทั้งกรณีที่ไม่เติมและไม่เติมเปอร์ออกไซด์ จากการสังเกตในขณะดึงพบว่ามีเกิดการเกิด necking ด้วย น่าจะเป็นเพราะ PBSA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความนิ่มหรือมี modulus ต่ำ และ PBSA น่าจะทำให้หน้าที่เป็นตัวก่อผลึกให้ PLA ทำให้ PLA เกิดผลึกเพิ่มขึ้นในชั้นการเตรียมชิ้นงาน และที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้มากขึ้น แต่เมื่อเติมในสัดส่วนของ PBSA ตั้งแต่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติม Perkadox ที่สัดส่วนเดียวกัน โดยที่สัดส่วนนี้ PBSA เป็นเฟสหลัก และมี PLA ซึ่งมีความแข็งเป็นเฟสกระจาย เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ สามารถทำให้ PBSA มีเจลเกิดขึ้นภายในเนื้อพอลิเมอร์เบลนด์ จึงทำให้ค่า Elongation at break ลดลง



ภาพที่ 4.15 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของรีเอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 0, 20, 40, 50, 60, 80, และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox 0.08 และ 0.1 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.16 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 0, 20, 40, 50, 60, 80, และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox 0.08 และ 0.1 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.17 แผนภูมิแสดงค่า Elongation at break ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 0, 20, 40, 50, 60, 80, และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox 0.08 และ 0.1 phr ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่า Impact strength ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก โดยใช้พลังงานในการตีสูงสุดของเครื่องเท่ากับ 2.4 J จากผลการทดสอบพบว่า กรณีไม่เติมรีแอคทีฟเอเจนท์พอลิเมอร์เบลนด์มีการแตกหักแบบเปราะ และมีค่า Impact strength ต่ำ โดยมีค่าประมาณ 5 kJ/m^2 ยกเว้นที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่า Impact strength มีค่าใกล้เคียงกับ Neat PBSA ซึ่งมากกว่า 38.6 kJ/m^2 และชิ้นงานไม่ขาดออกจากกัน ในกรณีที่เติม Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr พบว่าค่า Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกสัดส่วนของ PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.1 phr ในพอลิเมอร์ ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า Impact strength มีค่าต่ำ โดยมีค่าประมาณ 5 kJ/m^2 ซึ่งเท่ากับในกรณีที่เติม Perkadox แต่เมื่อพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วนของ PBSA มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr ทำให้ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้นมาก จากประมาณ 5 kJ/m^2 เป็นมากกว่า 34 kJ/m^2 สัดส่วนที่มีความน่าสนใจคือ การเติม Perkadox ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่สัดส่วนนี้พอลิเมอร์เบลนด์มีค่า Impact strength มากกว่า 34.8 kJ/m^2 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติม Perkadox ที่สัดส่วนของ PBSA ที่เท่ากัน เนื่องจากเมื่อเติม Perkadox ทำให้มีแรงยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีและมีลักษณะสันฐานวิทยาที่ละเอียด และมีพื้นที่ยึดเกาะระหว่างเฟสสูง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทพลังงานการกระแทกไปสู่เฟสของ PBSA ที่สามารถรับแรงกระแทกได้สูง เมื่อพิจารณาที่บริเวณรอยแตกหักพบว่าลักษณะพื้นผิวมีสีขาวขุ่นเกิดขึ้นและชิ้นงานไม่ขาดออกจากกัน แสดงถึงการแตกหักแบบเหนียว

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance) ของนอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

Formulas	Impact strength (kJ/m^2)		
	Non-reactive	Perkadox 0.08 phr	Perkadox 0.1 phr
Neat PLA	2.9 ± 0.2	-	-
Neat PBSA	$>38.6 \pm 2.9^*$	-	-
PBSA20	5.1 ± 0.9	4.8 ± 1.7	4.9 ± 1.1
PBSA40	5.6 ± 0.7	10.0 ± 1.6	$>34.9 \pm 3.4^*$
PBSA50	5.4 ± 0.5	11.8 ± 1.6	$>43.5 \pm 5.6^*$
PBSA60	10.1 ± 1.7	$>46.2 \pm 5.9^*$	$>61.7 \pm 2.6^*$
PBSA80	$>53.5 \pm 1.4^*$	$>56.7 \pm 3.9^*$	$>60.7 \pm 1.9^*$

*ชิ้นงานไม่ขาดออกจากกัน และบริเวณพื้นผิวการแตกหักมีรอยขาวขุ่น

4.2.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis) ของ นอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

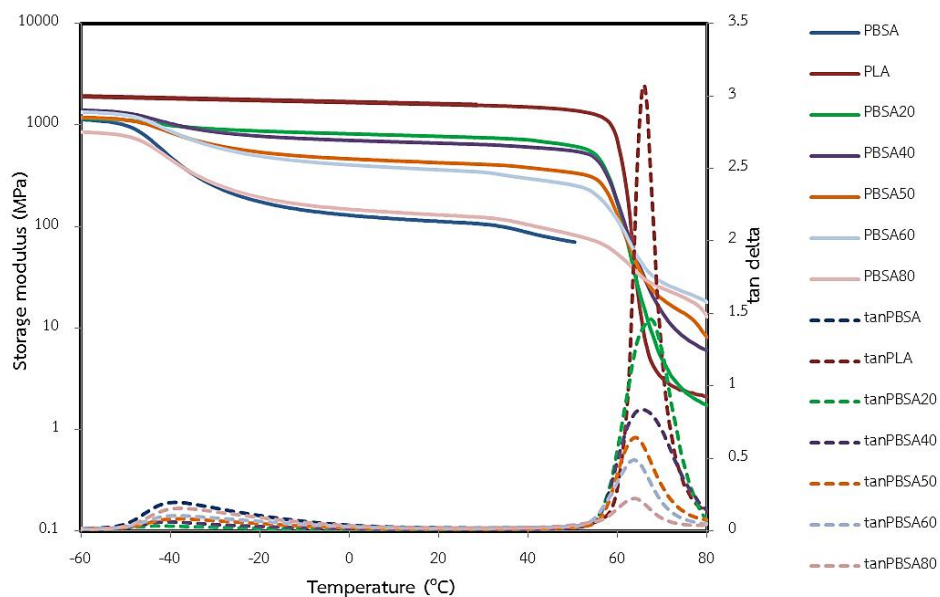
ภาพที่ 4.18 ถึง 4.20 แสดงผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ในโหมดการทดสอบแบบ Torsion เป็นการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ถึง 80 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 4 องศาเซลเซียสต่อหนึ่งนาที กรณีไม่เติม Perkadox แสดงดังภาพที่ 4.18 เมื่อพิจารณาค่า Storage modulus ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรงของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยส่วนที่ 1 จะพิจารณาค่า Storage modulus ของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ดังนั้น PLA และ PBSA จะอยู่ในสถานะที่เป็น glassy state จากผลการทดลองพบว่า PLA มีค่า Storage modulus ประมาณ 1579.6 MPa และ PBSA มีค่า Storage modulus ประมาณ 1160.0 MPa ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนี้ จะมีการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างจำกัด เนื่องจากมีพลังงานต่ำ ทำให้พอลิเมอร์ยังมีความแข็งแรงในส่วนในกรณีของพอลิเมอร์เบลนด์นั้นพบว่ามีค่า Storage modulus อยู่ระหว่างพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดโดยมีค่าไม่แตกต่างกันมากที่อัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกัน จากนั้นพิจารณาอุณหภูมิต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PBSA (ประมาณ -43 องศาเซลเซียส) ซึ่งทำให้สายโซ่ของ PBSA มีการเคลื่อนไหวได้มากขึ้น โดยจะสังเกตเห็นว่าค่า Storage modulus ของ PBSA บริสุทธิ์นั้นจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ PLA ยังมีค่า Storage modulus คงที่ ซึ่งยังคงอยู่ในสถานะที่เป็น glassy state นั้นเอง ในส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีการลดลงของค่า Storage modulus เพียงเล็กน้อย เนื่องจากมี PLA ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ยังคงมีความแข็งแรงจนเกือบจะคงที่ อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนของ PBSA เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นพบที่มีการลดลงของค่า Storage modulus ใกล้เคียงกับ PBSA

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิต้องพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีความแตกต่างของค่า Storage modulus มากขึ้น โดย Storage modulus จะมีค่าลดลงเมื่อมีสัดส่วนของ PBSA มากขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติม PBSA ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความแข็งแรงลดลง (สอดคล้องกับค่า Young's modulus ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.15) และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส พบว่าค่า Storage modulus ของพอลิเมอร์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่อุณหภูมินี้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระทำให้พอลิเมอร์เกิดการอ่อนตัว

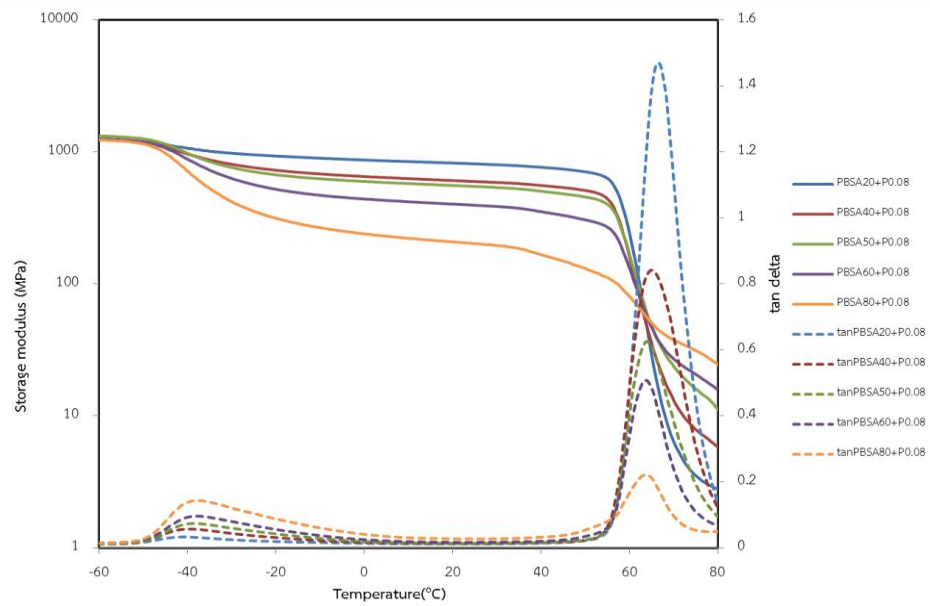
ในส่วน of ค่า $\tan \delta$ ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราส่วนของ Loss modulus ต่อ Storage modulus ที่จุดพิกของเส้น $\tan \delta$ สามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ได้ พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณ

PBSA เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณของ PBSA มาก สายโซ่ส่วนใหญ่จะสามารถเกิดการเคลื่อนไหวได้ จึงทำให้สายโซ่ของ PLA สามารถเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจึงมีค่าลดลง

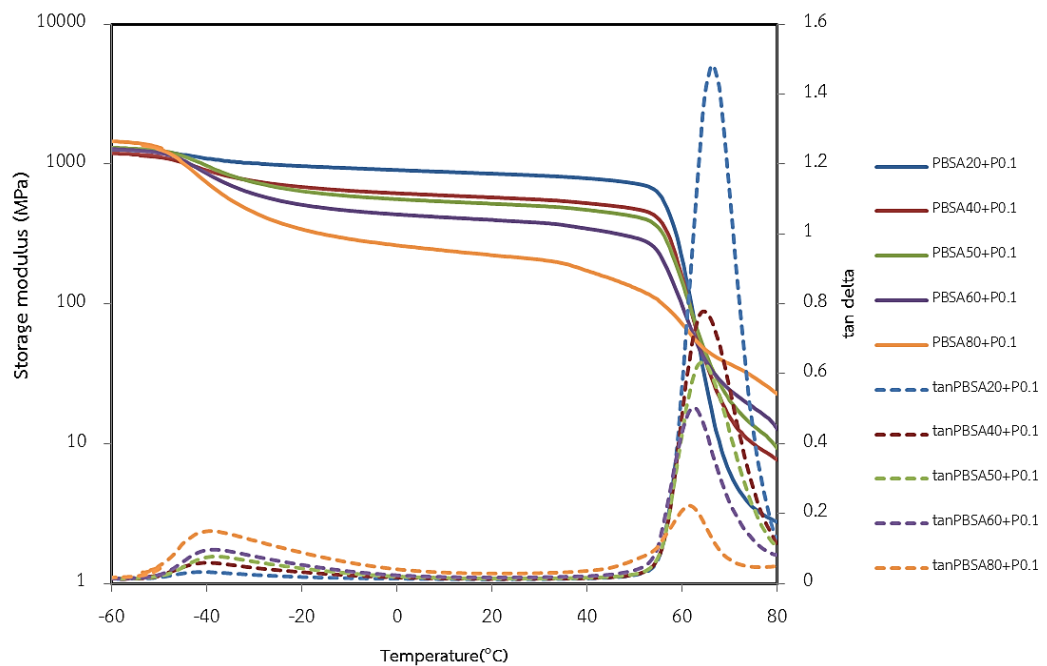
เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr ในโหมตการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงดังภาพที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาพิกของ tan delta ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์พบว่า ค่า T_g ของ PLA และ PBSA มีการเลื่อนตำแหน่งของพิกเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า T_g ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ดังนั้นพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดยังคงมีความไม่เข้ากัน (immiscible blend) และเมื่อพิจารณาค่า storage modulus พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม Perkadox นั้นแสดงพฤติกรรมเช่นเดียวกับกรณีไม่เติม นั่นคือเมื่อมีอัตราส่วนของ PBSA เพิ่มขึ้นจะทำให้ส่วนที่เป็นการเปลี่ยนแปลงในช่วง transition มีการลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนด์จะมีความแข็งแรงของโครงสร้างลดลงนั่นเอง เมื่อพิจารณาค่า storage modulus พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นค่า storage modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.18 Storage modulus (เส้นทึบ) และค่า tan delta (เส้นประ) ของนอร์แอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA



ภาพที่ 4.19 Storage modulus (เส้นทึบ) และค่า tan delta (เส้นประ) ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox 0.08 phr



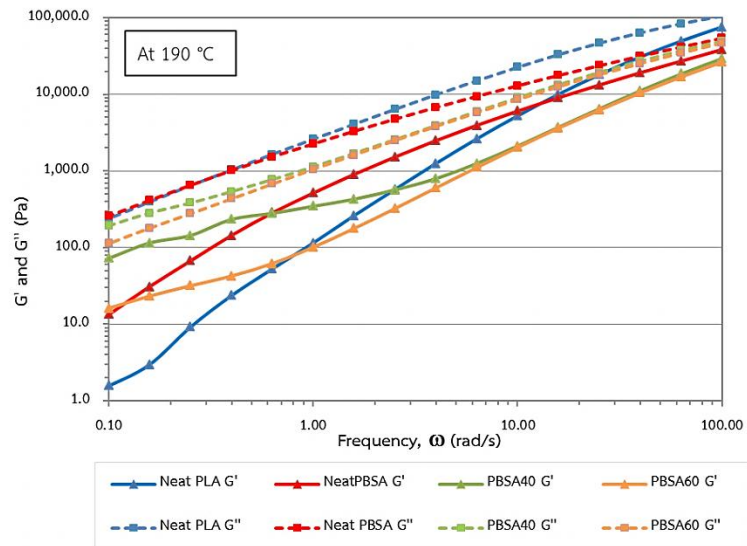
ภาพที่ 4.20 Storage modulus (เส้นทึบ) และค่า tan delta (เส้นประ) ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox 0.1 phr

ตารางที่ 4.6 ค่า Storage modulus (G') และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

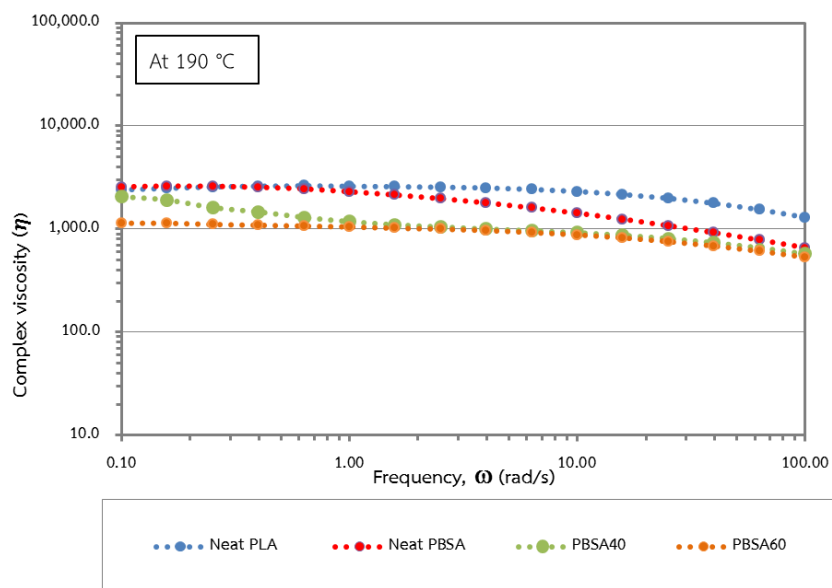
Formulas	Storage modulus (MPa)	T _g (°C)	
		PBSA	PLA
Neat PLA	1579.6	-	65.67
Neat PBSA	1130.0	-38.42	-
PBSA20	1170.0	-43.40	67.25
PBSA40	1400.0	-40.98	65.54
PBSA50	1190.0	-38.57	63.83
PBSA60	1350.0	-39.27	63.83
PBSA80	856.0	-37.87	63.83
PBSA20+P0.08	1240	-41.34	66.59
PBSA40+P0.08	1260	-40.28	64.84
PBSA50+P0.08	1330	-38.92	63.83
PBSA60+P0.08	1250	-38.57	63.83
PBSA80+P0.08	1240	-38.22	63.83
PBSA20+P0.1	1260	-41.65	66.59
PBSA40+P0.1	1190	-40.98	64.53
PBSA50+P0.1	1310	-39.27	64.53
PBSA60+P0.1	1280	-39.54	62.47
PBSA80+P0.1	1460	-39.72	61.76

เพื่อศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์หลอมเหลวเมื่อได้รับแรงเฉือนจึงทำการศึกษาด้วยเทคนิค DMA ในโหมดการทดสอบแบบเปลี่ยนแปลงความถี่เชิงมุมที่ใช้ในการให้แรงเฉือน ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ผลของค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') แสดงดังภาพที่ 4.21 เมื่อพิจารณาค่า G' พบว่าที่ความถี่สูง PLA จะมีค่า G' สูงกว่า PBSA แต่เมื่อความถี่มีค่าลดลงพบว่าค่า G' ของ PLA มีค่าลดลงมากกว่าค่า G' ของ PBSA จากนั้นเมื่อพิจารณา Complex viscosity (η^*)ของพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงดังภาพที่ 4.22 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่ระหว่างความหนืดของ PLA และ PBSA ซึ่งสอดคล้องกับความหนืดที่ได้จากการทดสอบการไหล (Melt flow index) เมื่อเติม Perkadox ในพอลิเมอร์เบลนด์พบว่าผลทำให้ค่า G' ของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นพิจารณาค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงดังภาพที่ 4.23

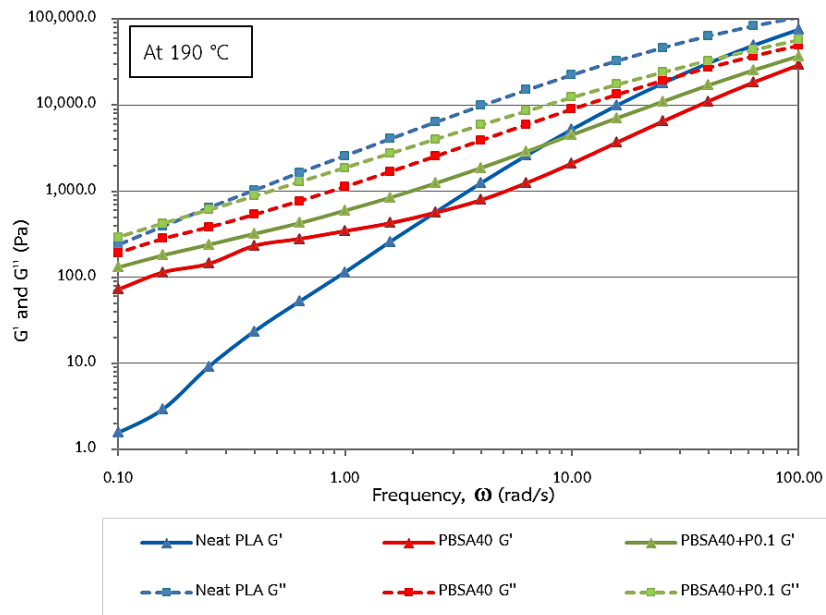
และ 4.24 ตามลำดับ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อมีการเติม Perkadox เนื่องจากการเติม Perkadox มีผลทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่ามากกว่า PLA และ PBSA



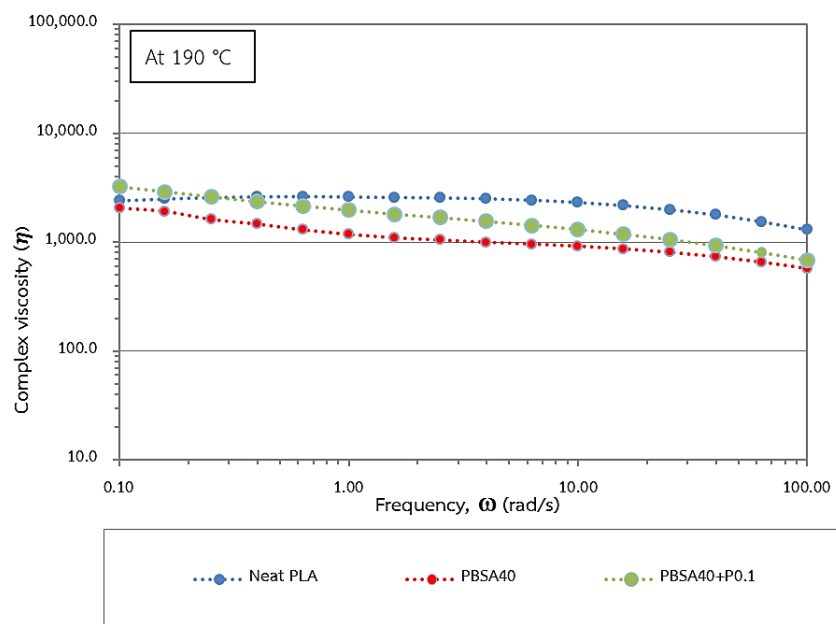
ภาพที่ 4.21 Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของนอร์แอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA



ภาพที่ 4.22 Complex viscosity (η^*) ของนอร์แอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA



ภาพที่ 4.23 Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของนอร์แอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA



ภาพที่ 4.24 Complex viscosity (η^*) ของนอร์แอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

4.2.7 สมบัติทางความร้อนของนอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์

PLA/PBSA

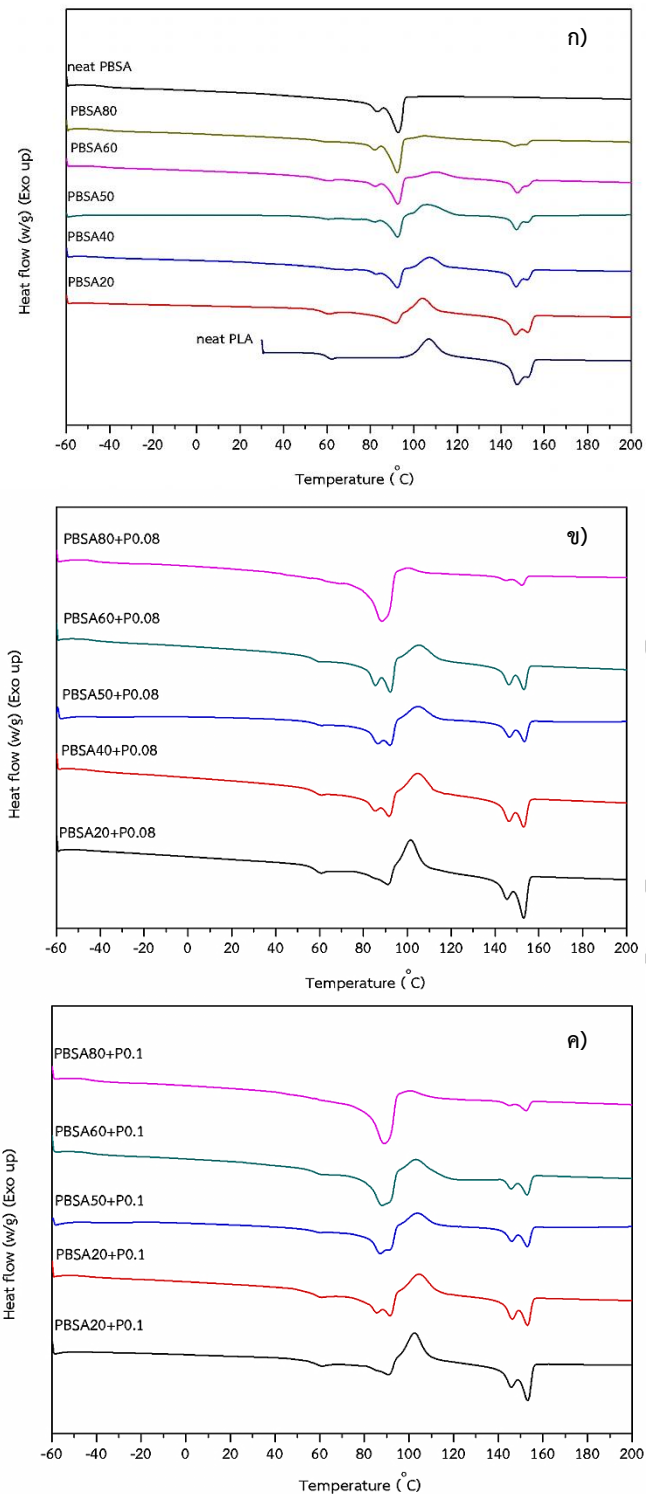
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเทคนิค DSC เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวและปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยพิจารณาจากกราฟการให้ความร้อนครั้งที่ 2 โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ -60 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) พบว่า ค่า T_g ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งกรณีไม่เติมและเติม Perkadox เมื่อเทียบกับ PLA และ PBSA บริสุทธิ์

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature; T_m) พบว่า PLA และ PBSA มีพีคการหลอมเหลวที่แยกออกจากกันอย่างชัดเจน โดย PBSA มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 2 อุณหภูมิคือที่อุณหภูมิประมาณ 82 และ 92 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดย T_{m1} เกิดจากการเกิดผลึกของ PBSA นั้นมีความไม่เสถียร จึงถูกหลอมเหลวอีกครั้ง (re-melting crystallization) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ T_{m2} [1] ในกรณีของ PLA แสดงอุณหภูมิการหลอมเหลว 2 อุณหภูมิ เช่นเดียวกัน โดยการหลอมเหลวของพีคแรกอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 147 องศาเซลเซียส และที่พีคที่สองอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 152 องศาเซลเซียส โดย T_{m1} และ T_{m2} ของ PLA นั้นเกิดจากมีรูปแบบผลึกของ PLA ที่แตกต่างกัน [23] เมื่อเติม Perkadox พบว่า PLA เกิดพีคการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำลง และเปลี่ยนเป็นพีคการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง แสดงให้เห็นว่าผลึกของ PLA มีความสมบูรณ์มากขึ้น เนื่องจากการเติม Perkadox ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้ PLA เกิดการตกผลึกได้ดีขึ้นนั่นเอง

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิการตกผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization; T_{cc}) ของ PLA กรณีไม่เติม Perkadox ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่า T_{cc} ของ PLA มีค่าลดลง จาก 106.9 องศาเซลเซียส (ใน PLA บริสุทธิ์) เป็น 103.8 องศาเซลเซียส และค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของ PBSA เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า PBSA ที่หลอมเหลวสามารถทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึก ทำให้ PLA สามารถเกิดการตกผลึกได้ดีในกรณีที่มี PLA เป็นเฟสหลัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vincen Ojijo [20] พบว่าพีค T_{cc} มีความกว้างมากขึ้นและมีค่าลดลงเมื่อเบลนด์กับ PBSA ในสัดส่วนเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PBSA สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการตกผลึกของ PLA ให้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติม Perkadox ทำให้ค่า T_{cc} ของ PLA มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ เนื่องจากเมื่อเติม Perkadox ลงในพอลิเมอร์เบลนด์อาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ โดยเฉพาะการเชื่อมขวางของ PBSA ซึ่งมีโอกาสในการเกิดได้สูงเนื่องจากมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับ Perkadox ได้ดีกว่า PLA (โดยพิจารณาจากกราฟเทอร์มกับเวลาในตอน 4.1) และการ

เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ในระดับที่ไม่มากนักอาจทำให้ PLA สามารถเกิดการตกผลึกได้ดีขึ้น ดังนั้นค่า T_{cc} จึงมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาปริมาณความเป็นผลึกของ PLA และ PBSA แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า PLA มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเท่ากับ 4.11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเบลนด์ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นในทุกสัดส่วนการเบลนด์เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ โดยมีค่ามากที่สุดเมื่อสัดส่วนของ PBSA มีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เท่ากับ 10.83 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นเมื่อมีสัดส่วนของ PBSA เพิ่มขึ้นพบว่าทำให้ปริมาณความเป็นผลึกของ PBSA ค่อยๆลดลง เนื่องจากที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20 นี้ PBSA จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสกับ PLA มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vincent Ojijo และคณะ[20] ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA จะมีพื้นที่ผิวระหว่างเฟสมากที่สุดเมื่อมีสัดส่วนของ PBSA ประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสนี้ส่งผลต่อการเกิดผลึก เนื่องจากการเกิดการก่อผลึกนี้เกิดขึ้นที่บริเวณระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเฟส ดังนั้นเมื่อมีพื้นที่ระหว่างผิวสัมผัสขนาดใหญ่จะส่งผลให้มีการก่อผลึก และสามารถเกิดผลึกได้ดีมากขึ้น จากนั้นเมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่เติม Perkadox พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของ PBSA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่เติมในทุกสัดส่วนการเบลนด์ เนื่องจากการเติม Perkadox ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ PLA และ PBSA ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความเข้ากันได้มากขึ้น เฟสกระจายมีขนาดเล็ก (แสดงดังสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.14) ทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเฟสของ PLA และ PBSA เพิ่มขึ้น ดังนั้น PLA จึงสามารถตกผลึกได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่เติม Perkadox ในส่วนของปริมาณความเป็นผลึกของ PBSA พบว่า PBSA เป็นพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกสูง โดย PBSA บริสุทธิ์มีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 36.51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเบลนด์กับ PLA พบว่าปริมาณความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ PLA เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า PLA สามารถขัดขวางการตกผลึกของ PBSA นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม Perkadox ไม่ส่งผลต่อการตกผลึกของ PBSA



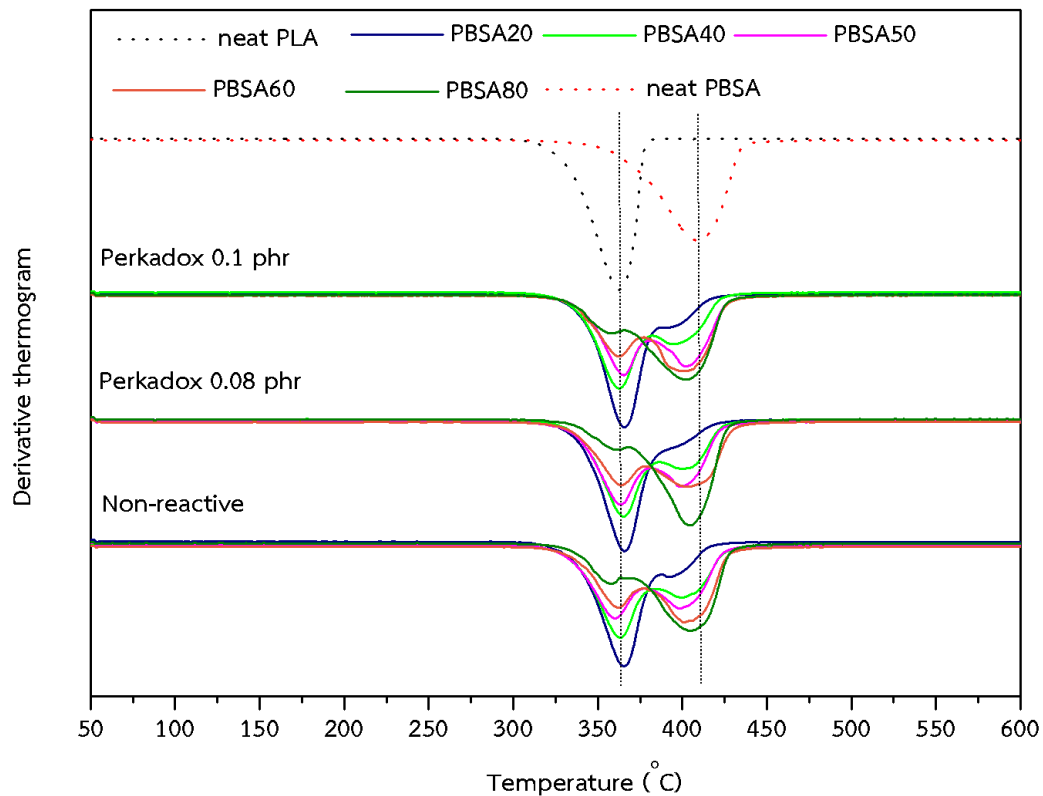
ภาพที่ 4.25 DSC thermograms จากการให้ความร้อนครั้งที่สอง ของพอลิเมอร์blend PLA/PBSA (ก) กรณีไม่เติม Perkadox (ข) เติม Perkadox 0.08 phr และ (ค) เติม Perkadox 0.1 phr

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2

formulas	T _g		T _{cc}	T _m				%X _c	
	PBSA	PLA	PLA	PBSA		PLA		PBSA	PLA
				T _{m1}	T _{m2}	T _{m1}	T _{m2}		
Neat PLA	-	61.91	106.9	-	-	147.4	153.1	-	4.11
Neat PBSA	-43.16	-	-	82.98	92.58	-	-	36.51	-
PBSA20	-50.69	60.60	103.8	-	91.57	146.6	152.6	24.23	10.83
PBSA40	-44.85	62.03	106.9	82.33	92.28	146.9	152.5	31.13	9.52
PBSA50	-44.30	60.37	105.7	82.06	92.52	147.3	152.7	31.68	5.76
PBSA60	-42.77	59.76	109.4	81.98	92.5	147.5	-	33.94	7.50
PBSA80	-43.16	56.89	105.7	81.84	92.27	146.4	151.6	29.16	6.13
PBSA20+P0.08	-	60.45	101.6	-	91.06	145.2	152.9	35.80	13.31
PBSA40+P0.08	-45.63	60.24	104.9	85.05	91.62	146.1	152.9	31.90	11.52
PBSA50+P0.08	-43.26	60.44	104.9	86.18	92.09	146.4	153.3	29.98	7.81
PBSA60+P0.08	-44.21	59.67	105.6	85.21	92.11	146.1	153.1	30.66	11.18
PBSA80+P0.08	-43.42	-	100.5	-	88.11	144.7	152.3	28.06	9.52
PBSA20+P0.1	-	60.42	102.5	-	91.04	145.7	153.1	29.23	11.68
PBSA40+P0.1	-45.33	60.33	104.6	85.23	91.48	146.0	152.9	34.48	7.26
PBSA50+P0.1	-43.86	60.01	103.9	87.18	-	145.9	153.0	31.36	6.47
PBSA60+P0.1	-43.68	60.16	103.5	-	87.95	145.7	152.9	29.39	8.16
PBSA80+P0.1	-43.16	-	100.5	-	88.95	144.8	152.3	28.32	9.14

*พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก 100% (Completed heat of fusion 100% crystallization) ของ PLA และ PBSA คือ 93 J/g[22] และ 113.4J/g [20]ตามลำดับ

สำหรับอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์เบลนด์ พบว่า PLA มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำที่สุด (เท่ากับ 360.8 องศาเซลเซียส) และ PBSA มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงที่สุด (เท่ากับ 407.4 องศาเซลเซียส) เมื่อผสมพอลิเมอร์ที่สัดส่วนต่างๆ อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์จะมีค่าอยู่ระหว่างการสลายตัวของ PLA และ PBSA และเกิดการสลายตัวสองขั้นที่แยกออกจากกัน โดยเห็นได้จากเส้น Derivative thermograms ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.26 โดยที่อุณหภูมิต่ำเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA ส่วนที่อุณหภูมิที่สูงกว่าเป็นการสลายตัวของ PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของ PBSA เท่ากันตามลำดับ

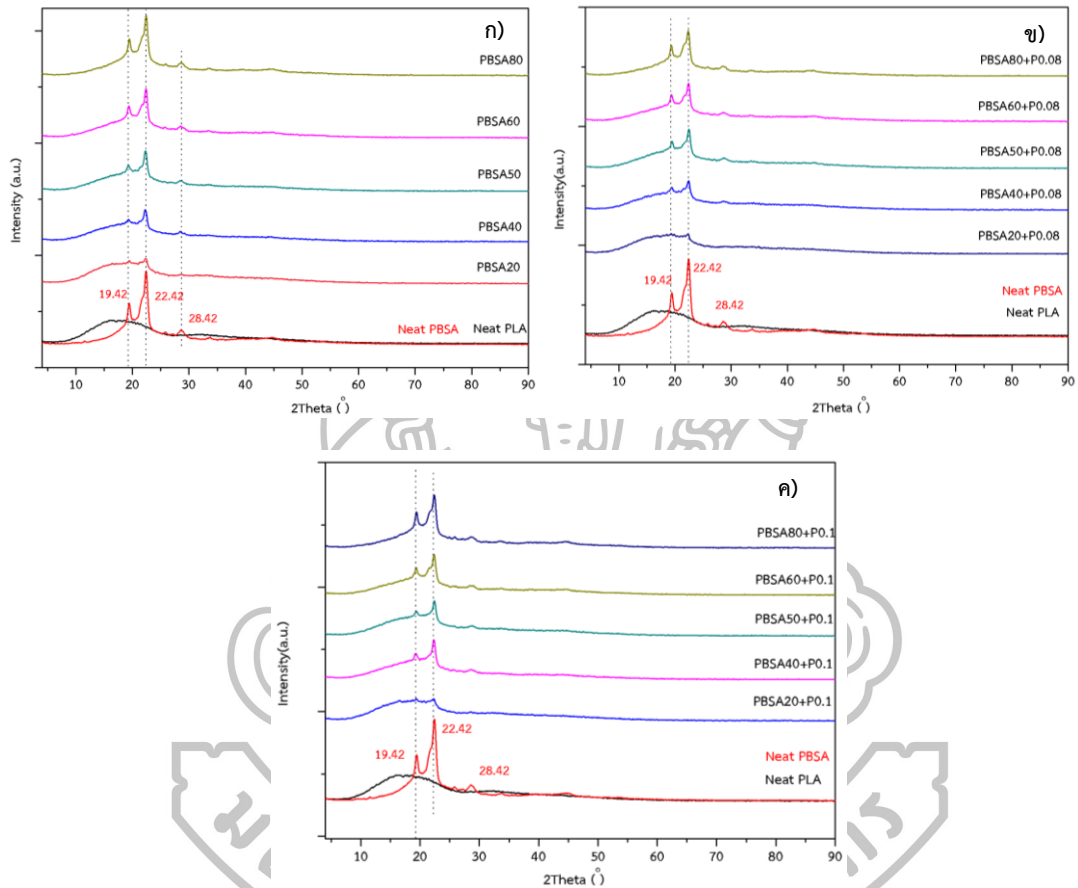


ภาพที่ 4.26 Derivative thermograms (DTG) ของนอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณเท่ากับ 0.08 phr และ 0.1 phr

4.2.8 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Analysis) ของนอนรีแอคทีฟและรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากชิ้นงาน impact ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 4.27 โดยภาพที่ 4.27(ก) กรณีไม่เติม Perkadox ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 20, 40, 50, 60, และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าลักษณะพีคของ PLA จะมีความกว้างมาก ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์ ในขณะที่ PBSA ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 19.42, 22.42, และ 28.42 องศา[26] และลักษณะของพีคแหลมซึ่งแสดงถึงโครงสร้างที่มีความเป็นผลึก เมื่อพิจารณาในส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA พบว่า ที่อัตราส่วนของ PBSA เท่ากับ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพีคจะมีลักษณะที่มีความกว้างมากและปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.42 และ 22.42 องศาซึ่งแสดงถึงโครงสร้างที่เป็นผลึกของ PBSA และเมื่อมีสัดส่วนของ PBSA มากขึ้นพบว่าความกว้างและส่วนโค้งของพีคหายไป และปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่งของ PBSA ชัดเจนมากขึ้น ในกรณีเติม Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr แสดงดังภาพที่ 4.27 (ข) และ 4.27 (ค) ตามลำดับ พบว่าพีคของ PBSA ยังคงปรากฏที่ตำแหน่งเดิมและไม่มีการเลื่อนตำแหน่งของพีคเกิดขึ้น

แสดงให้เห็นว่ารูปแบบผลึกของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงไม่ส่งผลต่อความสามารถในการผ่านของแสงในพอลิเมอร์เบลนด์ ทั้งในกรณีไม่เติมและเติม Perkadox ปริมาณ 0.08 และ 0.1 phr



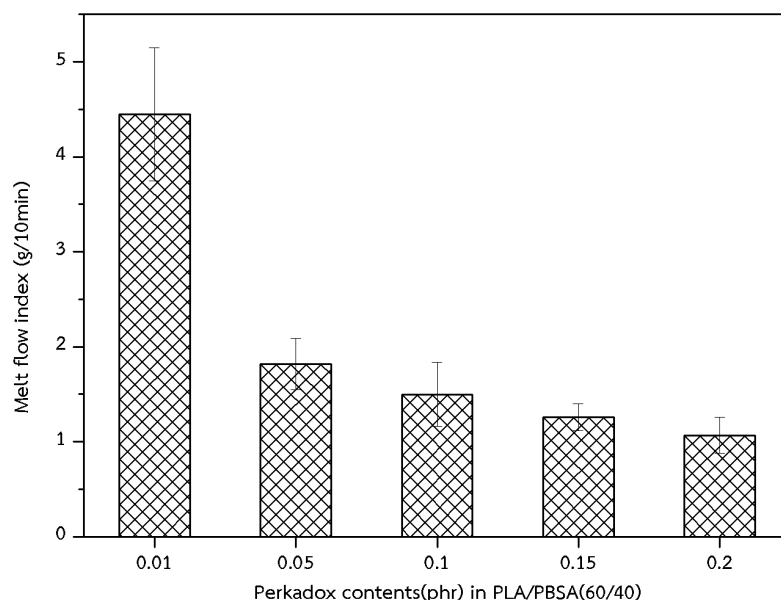
ภาพที่ 4.27 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (ก) ไม่เติม Perkadox (ข) เติม Perkadox 0.08 และ (ค) เติม Perkadox 0.1 phr

4.3 การศึกษาผลของปริมาณการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ชนิดเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์

เพื่อศึกษาผลของปริมาณรีแอคทีฟเอเจนท์ จึงทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของ Perkadox โดยใช้ปริมาณเท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์เมื่อมีปริมาณ Perkadox แตกต่างกัน

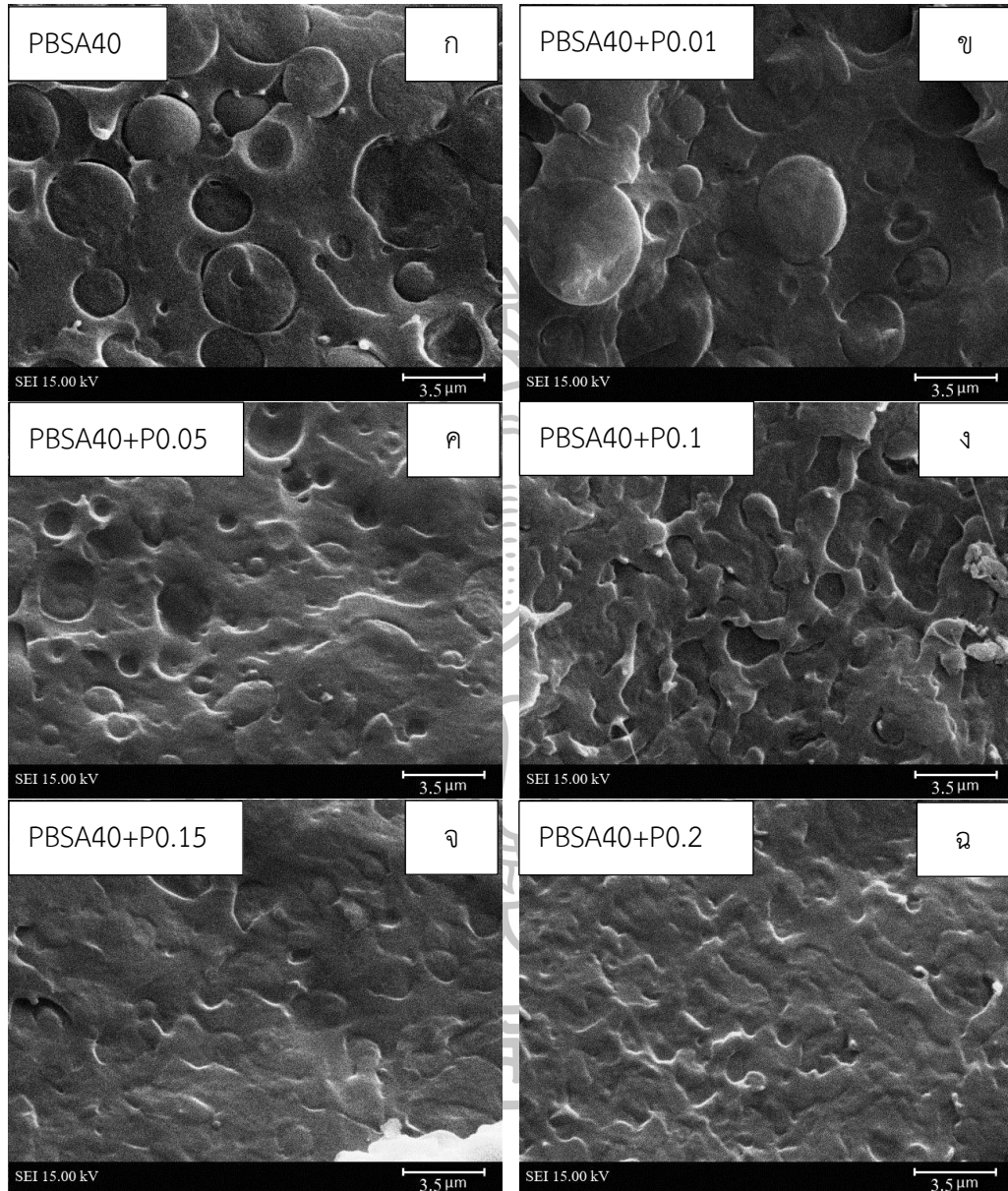
4.3.1 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณ แตกต่างกัน

ศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ปริมาณเท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr ทดสอบด้วยเครื่อง Melt flow indexer ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักกดเท่ากับ 2.18 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 4.28 พบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์จะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณของ Perkadox เพิ่มขึ้น หรือมีความหนืดมากขึ้นนั่นเอง เนื่องจากปริมาณ Perkadox ที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยเฉพาะ PBSA และทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเกิดการเชื่อมขวางได้มากขึ้น



ภาพที่ 4.28 ดัชนีการไหลของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อเติม Perkadox ปริมาณ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr ในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.29 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox (ก) 0.01 phr, (ข) 0.05 phr, (ค) 0.1 phr, (ง) 0.15 phr, และ (จ) 0.2 phr (กำลังขยาย 3000 เท่า)

ภาพที่ 4.29 แสดงสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กรณีไม่เติม Perkadox พบว่าเฟสกระจายมีขนาดใหญ่ (มากกว่า 3.5 ไมโครเมตร) และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสต่ำจึงสังเกตเห็นรอยต่อระหว่างเฟสได้ชัดเจน เมื่อเติม Perkadox ปริมาณเท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr พบว่าทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ดีขึ้น และการเติม Perkadox ปริมาณตั้งแต่ 0.1 phr เป็นต้นไป พบว่าสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่อง (Co-continuous phase) เนื่องจาก Perkadox สามารถเกิดการสลายตัวเป็นฟิรเรตติคอลลเมื่อได้รับความร้อน และสามารถเกิดปฏิกิริยากับ PLA และ PBSA อาจทำให้เกิดโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLA-PBSA ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเฟส ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีความเข้ากันได้มากขึ้นเมื่อเติม Perkadox

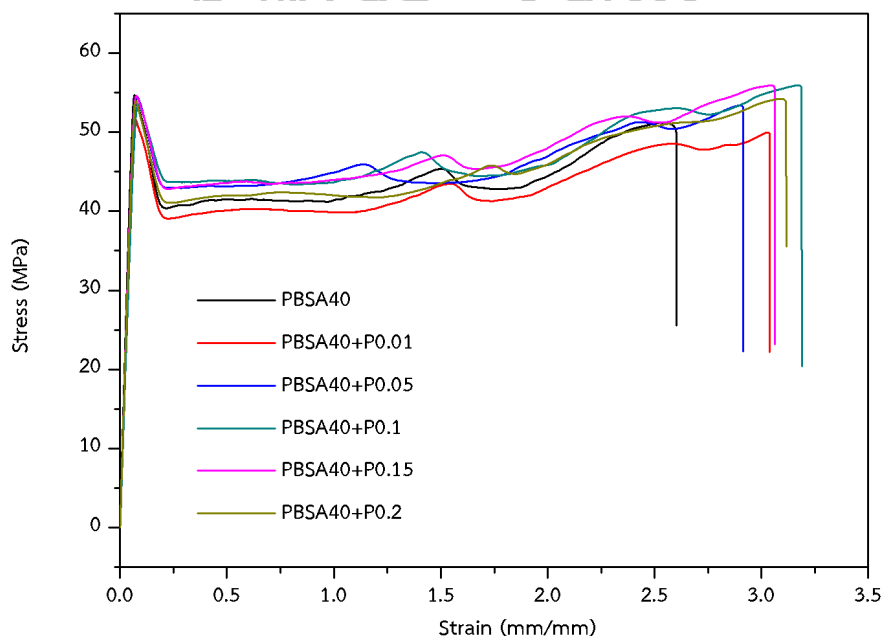
4.3.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติมปริมาณ Perkadox ที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาสมบัติการดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเติม Perkadox เท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr จากตารางที่ 4.8 ค่า Young's modulus ของ neat PLA และ neat PBSA มีค่าเท่ากับ 1,618 และ 182 MPa ตามลำดับ ในกรณีค่า tensile strength ของ neat PLA และ neat PBSA มีค่าเท่ากับ 91 และ 31 MPa ตามลำดับ เมื่อเบลนด์ PLA และ PBSA ที่สัดส่วน PLA:PBSA เท่ากับ 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่า Young's modulus และค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าอยู่ระหว่างพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิด และพบว่าทั้งค่า Young's modulus และ tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่ามากขึ้นเมื่อมีปริมาณ Perkadox เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมรีแอคทีฟเอเจนต์ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ PLA-PBSA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเฟสของ PLA และ PBSA จึงช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสทำให้พอลิเมอร์มีความเข้ากันได้มากขึ้นและทำให้มีความแข็งของพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์มีการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามพบว่าที่ปริมาณ Perkadox เท่ากับ 0.2 phr พบว่าค่า Elongation at break ลดลง อาจเนื่องมาจากเมื่อเติม Perkadox ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้มีการเกาะกลุ่มของสารอนินทรีย์ คือ silica ซึ่งเป็นส่วนประกอบใน Perkadox เกิดขึ้น และเป็นสาเหตุให้เกิดจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) ในชิ้นงาน จึงไปขัดขวางการดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์ และเมื่อพิจารณากราฟ Stress-Strain พบว่ามีพอลิเมอร์เบลนด์มีการแตกหักแบบเหนียว (ductile) และมีการเกิด double yielding ขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.30 โดยปรากฏการณ์ double yielding จะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดในพอลิเมอร์

กิ่งอสังฐาน และเนื่องจาก PBSA เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดการตกผลึกได้ง่ายจึงสามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้ง่ายอีกครั้งเมื่อได้รับแรงดึงยืด[27]

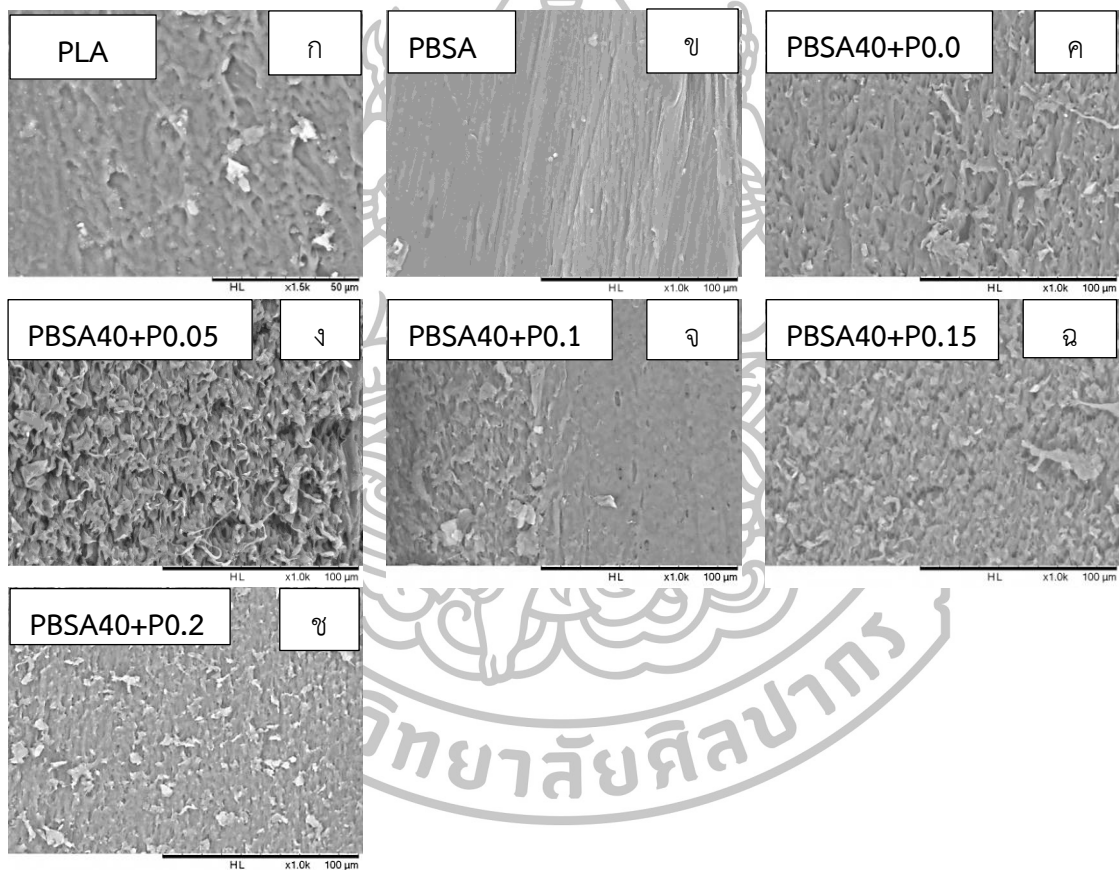
ตารางที่ 4.8 สมบัติการดึงยืดของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ที่แตกต่างกัน

Perkadox contents in PBSA40(phr)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)
0.01	891.7±28.8	300.1±39.6	46.4±3.9
0.05	913.4±30.9	305.9±23.9	54.6±3.1
0.10	911.2±46.9	304.7±38.0	53.8±3.3
0.15	915.7±17.6	328.7±15.7	53.3±4.1
0.20	931.6±32.8	307.8±12.8	53.6±2.1



ภาพที่ 4.30 กราฟ Stress-Strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr

และเมื่อทำการกัดผิวด้านข้างของพอลิเมอร์ซึ่งได้จากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดึงยึดด้วยกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์หลังจากการดึงยึด พบว่าเฟสของ PLA จะถูกกัดโดยกรดซัลฟิวริกได้มากกว่า PBSA (แสดงดังภาพที่ 4.31ก และ ข) และเมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่า เมื่อเติม Perkadox ปริมาณมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์มีช่องว่างระหว่างการดึงยึดที่ลดลง เนื่องจาก Perkadox อาจช่วยในการทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นเฟสต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการดึงยึดของพื้นผิวด้านข้างจึงมีความละเอียดเพิ่มขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 4.31 พื้นผิวด้านข้างของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึดซึ่งถูกกัดด้วยกรดซัลฟิวริก เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณเท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, และ 0.2 phr แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า ที่สัดส่วนเดียวกันพอลิเมอร์เบลนด์มีความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เมื่อเติม Perkadox ปริมาณมากขึ้น จากนั้นเมื่อพิจารณาที่พื้นผิวการแตกหักของพอลิเมอร์พบว่าการเติม Perkadox มากกว่า 0.1 phr ขึ้นไปจะมีรอยขาวขุ่นเกิดขึ้นที่รอยแตกหัก และชิ้นงานไม่ขาดออกจากกัน (แสดงการแตกหักแบบเหนียว) เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับแรงกระแทกจากค่า Impact strength พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม Perkadox เท่ากับ 0.1 phr จะมีค่า Impact strength สูงที่สุด คือมากกว่า 34.86 kJ/m^2 เนื่องจากพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองเฟส (แสดงดังสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.29 (ง)) ทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานที่ดี และสามารถรับพลังงานในการตีได้มาก เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณ 0.15 และ 0.2 phr พบว่าความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าต่ำลง เนื่องจากเมื่อเติมในปริมาณมากอาจทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดการกระจายตัวได้ลดลง ดังนั้นจึงมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ลดลง

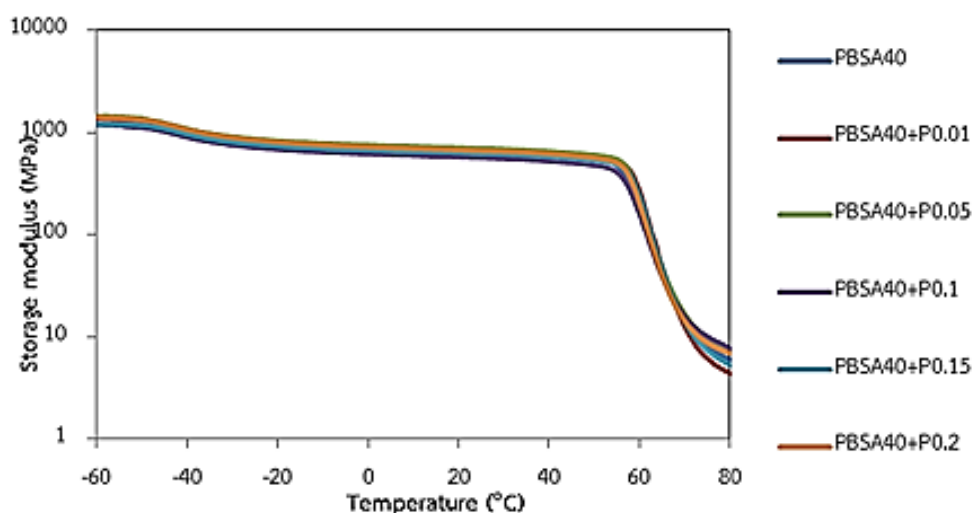
ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ในปริมาณที่แตกต่างกัน

Formulas	Impact strength(kJ/m^2)	S.D	ลักษณะพื้นผิวการแตกหัก
PBSA40+P0.01	5.77	0.53	ผิวเรียบ
PBSA40+P0.05	7.96	0.97	ผิวเรียบ
PBSA40+P0.1	>34.86*	3.38	รอยแตกมีสีขาวขุ่น
PBSA40+P0.15	>13.54*	1.43	รอยแตกมีสีขาวขุ่น
PBSA40+P0.2	>28.82*	2.78	รอยแตกมีสีขาวขุ่น

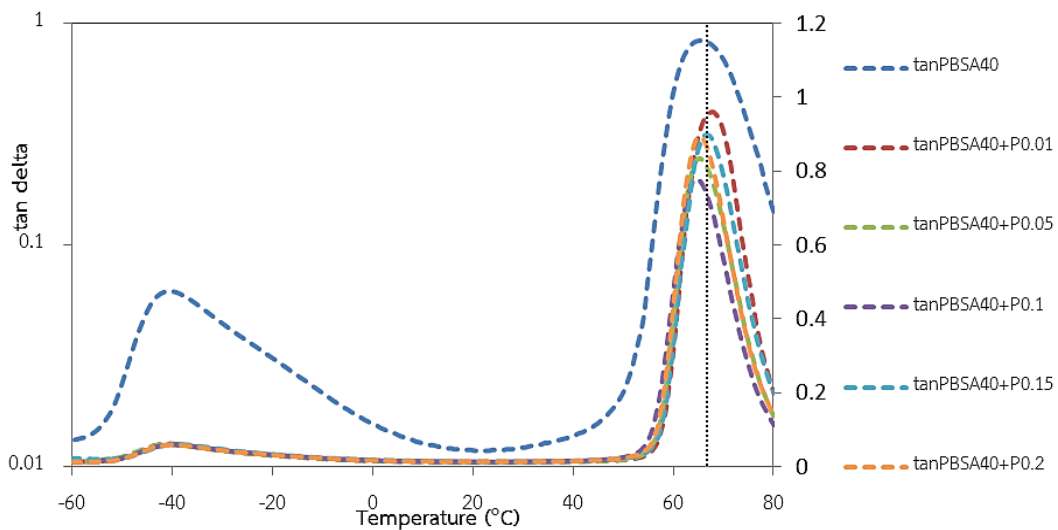
*ชิ้นงานไม่ขาดเป็นสองส่วน

4.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Mechanical Analysis) ของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติมปริมาณ Perkadox ที่แตกต่างกัน

การทดสอบสมบัติเชิงพลวัตในโหมดการทดสอบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาค่า Storage modulus (ภาพที่ 4.32) พบว่าเมื่อเติม Perkadox ที่สัดส่วนที่ต่างกันค่า storage modulus มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าการเติม Perkadox ปริมาณมากขึ้นนั้นไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์ และค่า storage modulus จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนในการผสม เมื่อพิจารณา $\tan \delta$ (แสดงดังภาพที่ 4.33) ซึ่งพิกของ $\tan \delta$ สามารถใช้ในการพิจารณาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์เบลนด์ (Glass transition temperature; T_g) พบว่าเมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณตั้งแต่ 0.1 phr ค่า T_g ของ PLA ในพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

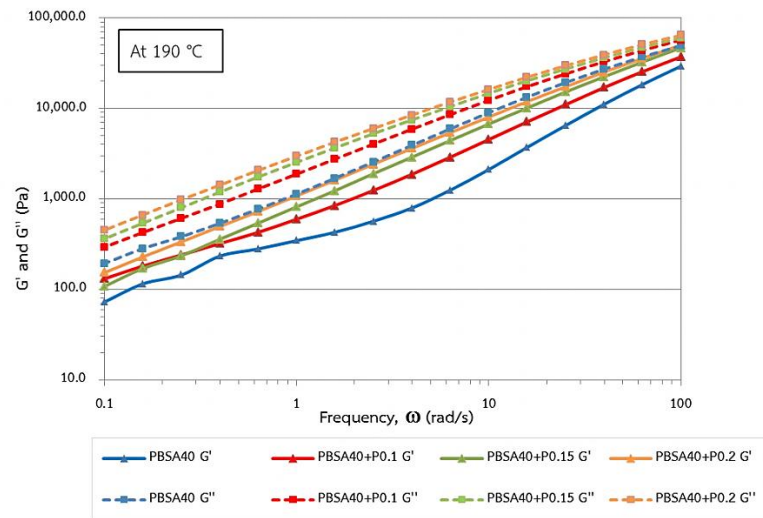


ภาพที่ 4.32 แผนภาพแสดงค่า Storage modulus จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณแตกต่างกัน

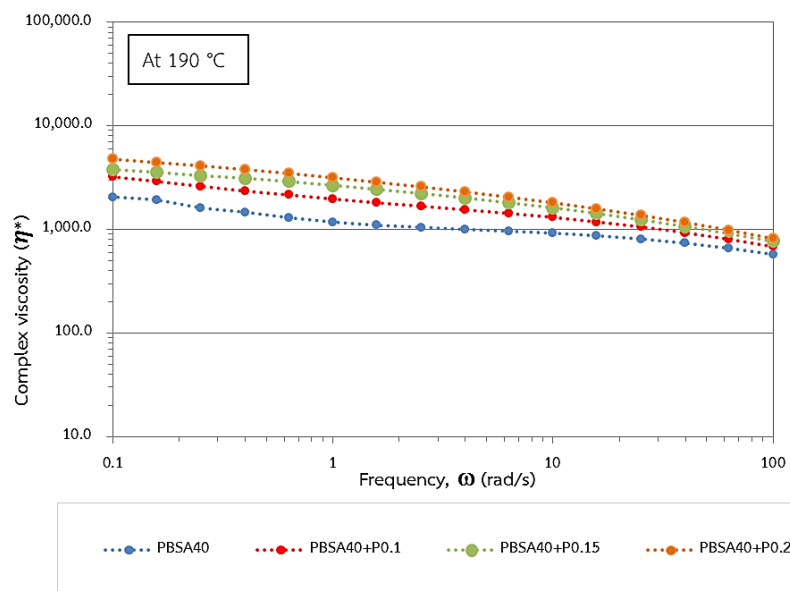


ภาพที่ 4.33 แผนภาพแสดงค่า tan delta จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณแตกต่างกัน

เมื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงพลวัตในรูปแบบการทดลองเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส พบว่าค่า G' ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (แสดงดังภาพที่ 4.34) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม Perkadox (เปรียบเทียบกับอัตราส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า Complex viscosity (η^*) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.35 พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ Perkadox เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อการเติม Perkadox ในพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวาง ดังนั้นจึงทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.34 แผนภาพแสดงค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ปริมาณที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.35 แผนภาพแสดงค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ปริมาณที่แตกต่างกัน

4.3.5 สมบัติทางความร้อนของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ที่ปริมาณแตกต่างกัน

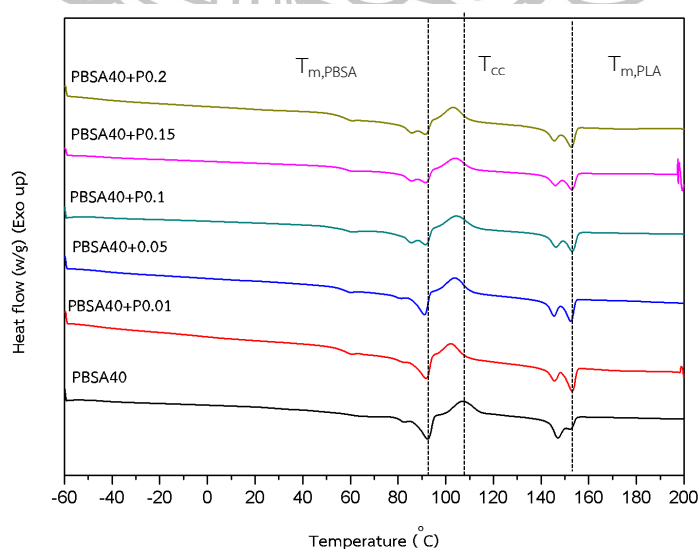
ศึกษาผลของปริมาณการเติม Perkadox ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยศึกษาจากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือ T_g ของพอลิเมอร์เบลนด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติม Perkadox ปริมาณมากขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการตกผลึกในขณะให้ความร้อน (Cold crystallization temperature; T_{cc}) ของ PLA พบว่า T_{cc} ของ PLA ในพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ Perkadox เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม Perkadox ไปทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึก จึงสามารถทำให้ PLA เกิดการตกผลึกได้เร็วขึ้น

กรณีของปริมาณความเป็นผลึกของ PLA เมื่อเติม Perkadox ในพอลิเมอร์เบลนด์ส่งผลให้มีความเป็นผลึกของ PLA มีค่าลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสมีความเข้ากันได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณความเป็นผลึกของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อมีปริมาณ Perkadox ตั้งแต่ 0.15 phr เนื่องจากการเติมรีแอกทีฟเอเจนต์เพิ่มขึ้นอาจมีผลทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกให้กับ PLA ได้อีกครั้ง นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม Perkadox ยังทำให้ผลึกของ PLA มีความสมบูรณ์มากขึ้น โดยสังเกตจากพีคการหลอมเหลวของ PLA ในภาพที่ 4.36 พบว่า PLA มีการหลอมเหลวของผลึกที่อุณหภูมิต่ำลงและมีการหลอมเหลวของผลึกที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้น สำหรับในกรณีของ PBSA พบว่า เมื่อเติม Perkadox จะยังคงปรากฏพีคของการหลอมเหลว 2 พีค แสดงถึงการมีผลึกที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น การเติม Perkadox ทำมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ PLA และ PBSA เพิ่มขึ้นทำให้ PLA สามารถขัดขวางการเกิดผลึกของ PBSA และสอดคล้องกับปริมาณความเป็นผลึกของ PBSA ซึ่งลดลงเมื่อมีปริมาณ Perkadox เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางความร้อนจากการทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน

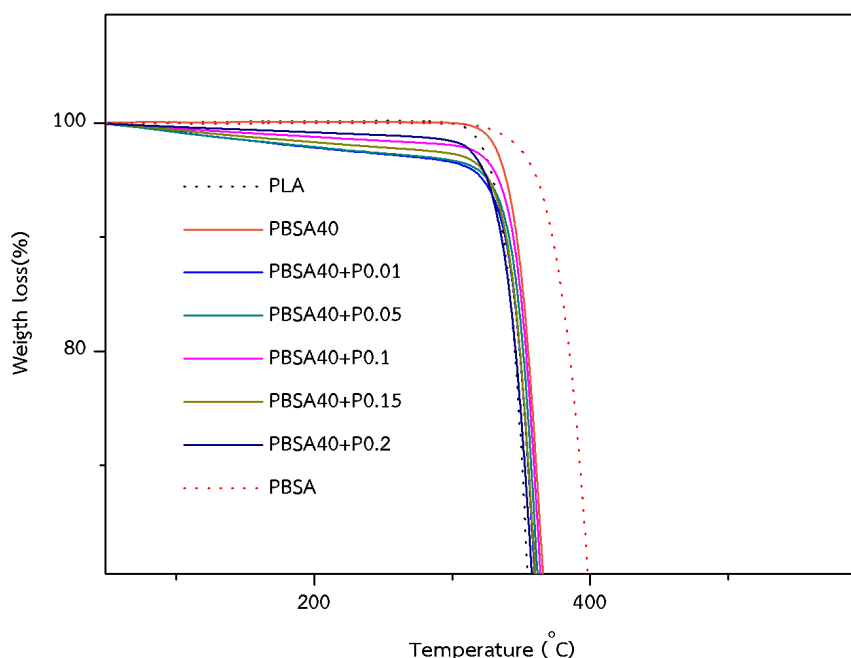
formula	T_g		T_{cc}		T_m				$\%X_c$	
	PBSA	PLA	PLA	PBSA	PLA		PBSA		PBSA	PLA
					T_{m1}	T_{m2}	T_{m1}	T_{m2}		
neat PLA	-	61.91	106.92	-	-	-	147.43	153.05	-	4.11
neat PBSA	-43.16	-	-	82.98	92.58	-	-	-	36.51	-
PBSA40	-44.85	62.03	106.22	82.33	92.28	146.92	152.54	31.13	9.52	
PBSA40+P0.01	-45.40	57.53	102.18	82.05	91.59	145.39	152.86	35.15	9.41	
PBSA40+P0.05	-44.25	56.11	103.88	80.67	90.97	145.2	152.35	24.51	6.34	
PBSA40+P0.1	-45.33	60.33	104.56	85.23	91.48	146.03	152.93	34.48	7.26	
PBSA40+P0.15	-44.07	60.39	103.98	85.27	91.6	145.83	152.82	26.23	9.82	
PBSA40+P0.2	-44.79	60.18	103.12	85.47	91.38	145.26	152.48	22.52	10.69	

*พลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก 100% (Completed heat of fusion 100% crystallization) ของ PLA และ PBSA คือ 93 J/g [22] และ 113.4J/g [20] ตามลำดับ



ภาพที่ 4.36 DSC thermograms จากการให้ความร้อนครั้งที่สอง ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน

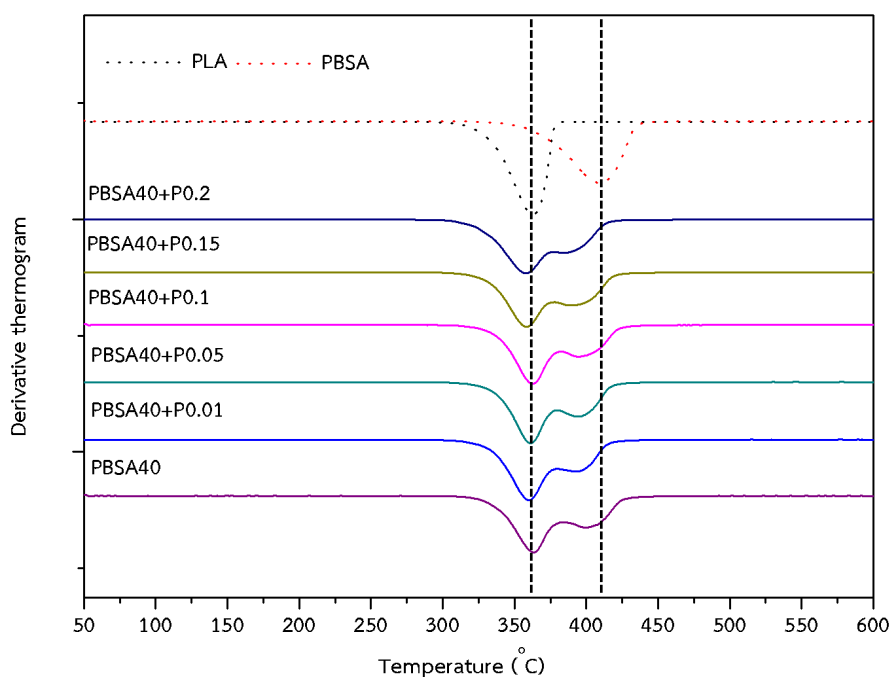
การทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่ สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 4.37 และตารางที่ 4.11 พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณมากขึ้นพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติม Perkadox เนื่องจากการเติมรีแอคทีฟเอเจนต์อาจทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สั้นลง การสลายตัวของ พอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองชนิดยังคงเกิดแยกกัน โดยเห็นได้จาก Derivative thermograms (ภาพที่ 4.37) ซึ่งปรากฏพีคของการสลายตัวสองชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม Perkadox สามารถทำให้พอลิเมอร์เบลนด์สามารถสลายตัวได้หมดโดยไม่เกิดเถ้าหลังการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า Perkadox สามารถทำให้พอลิเมอร์สามารถสลายตัวได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 4.37 TGA thermograms ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน

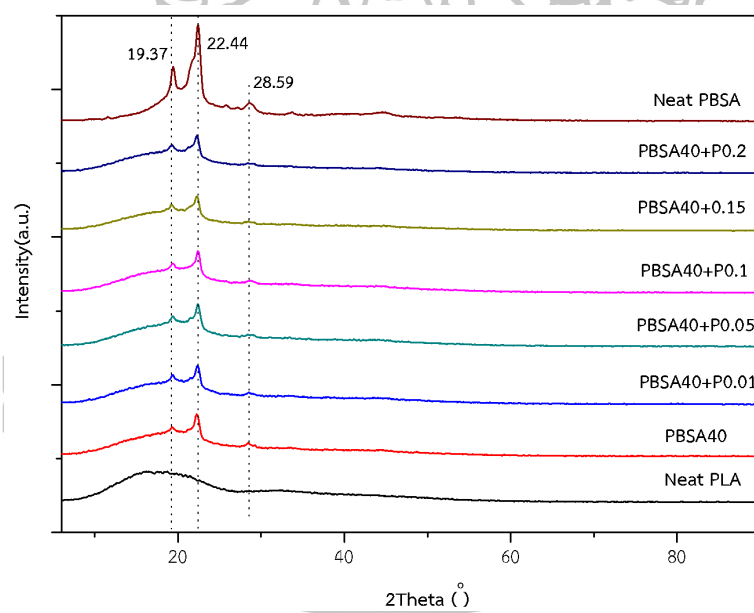
Formulas	Degradation temperature	
	T _{d5} (°C)	T _{d50} (°C)
PLA	330.8	359.2
PBSA	361.8	403.9
PBSA40	339.4	371.7
PBSA40+P0.01	322.1	364.3
PBSA40+P0.05	325.8	366.7
PBSA40+P0.1	335.7	369.2
PBSA40+P0.15	325.8	365.6
PBSA40+P0.2	325.8	363.0



ภาพที่ 4.38 Derivative thermograms ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน

4.3.6 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Analysis) ของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติมปริมาณ Perkadox ที่แตกต่างกัน

จากผลการศึกษสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังภาพที่ 4.28 พบว่าพีก XRD ของ PLA มีความกว้างมาก ซึ่งแสดงถึงความเป็นอสัณฐาน (amorphous) สำหรับกรณีของ PBSA จะปรากฏพีก XRD ที่ตำแหน่งของ 2θ เท่ากับ 19.37, 22.44, และ 28.59 [26] และพีกมีความแหลม แสดงถึงความเป็นผลึกสูง ในกรณีของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่าปรากฏลักษณะพีกของ PLA และ PBSA ที่ตำแหน่งเดียวกันและมีการซ้อนทับของพีก อย่างไรก็ตามพบว่าการเติม Perkadox ในปริมาณที่แตกต่างกันนั้นจะปรากฏพีกที่ลักษณะคล้ายกัน คือมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PLA และส่วนที่เป็นผลึกมากของ PBSA นอกจากนี้ยังพบว่า ไม่มีการเกิดการเลื่อนตำแหน่งของพีก PBSA ในพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์เมื่อมีปริมาณ Perkadox เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.39 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วนของ PBSA เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติมปริมาณ Perkadox ต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเบลนด์ของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2 ชนิด ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid); PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (Poly (butylene succinate co adipate); PBSA) ด้วยกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซูชัน (Reactive extrusion) โดยการเติมรีแอกทีฟเอเจนท์ที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น โดยความเข้ากันได้จะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์

งานวิจัยในตอนแรก เป็นการศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของรีแอกทีฟเอเจนท์ 2 ชนิด ได้แก่ Perkadox และ Luperox ต่อ PLA และ PBSA โดยทำการผสมในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส พบว่า Perkadox มีผลทำให้ค่าทอร์กของการผสมมีค่ามากกว่าการเติม Luperox โดยจะมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อผสมกับ PLA แสดงให้เห็นว่า Perkadox ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่ PLA และ PBSA ได้มากกว่า Luperox และปริมาณที่ค่าทอร์กของการผสมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง คือ 0.1 phr (หรือมีปริมาณเนื้อเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.032 กรัม) ดังนั้นจึงเลือก Perkadox ที่ปริมาณ 0.1 phr ทำหน้าที่เป็นรีแอกทีฟเอเจนท์ในรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมรีแอกทีฟเอเจนท์ลงในพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

งานวิจัยตอนที่สองเป็นการศึกษาสมบัติของนอนรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA พบว่าเมื่อทำการเบลนด์ PLA และ PBSA ที่สัดส่วนต่าง ๆ นั้น พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีความเข้ากันได้ โดยพิจารณาจากสัญญาณวิทยา ซึ่งจะเห็นการแยกระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสอย่างชัดเจน ซึ่งความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์นี้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA โดยพบว่า ค่า Young's modulus และค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลงเมื่อมีสัดส่วนของ PBSA เพิ่มมากขึ้น และค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม PBSA ซึ่ง

ค่าที่ได้จากทดสอบการดึงยึดนี้มีค่าต่ำกว่าเส้นกฎของการผสม (Line of mixing rule) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อแรงกระแทกพบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความไม่เข้ากันทำให้ความสามารถในการส่งผ่านแรงระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสต่ำ

งานวิจัยตอนที่ 3 เป็นการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ในระบบรีแอกทีฟเบลนด์ โดยใช้ Perkadox ปริมาณ 0.1 phr เป็นรีแอกทีฟเอเจนต์ ผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin screw extruder) พบว่าการเติม Perkadox ปริมาณ 0.1 phr สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA โดยจากหลักฐานวิทยาพบว่าเมื่อเติม Perkadox 0.1 phr ที่อัตราส่วนของ PBSA ในพอลิเมอร์เบลนด์ตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลักฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์เป็นเฟสต่อเนื่อง (Co-continuous phase) และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่าค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม Perkadox ในส่วนของความต้านทานต่อแรงกระแทก พบว่าเมื่อเติม Perkadox พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เนื่อง Perkadox ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้พอลิเมอร์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น และมีความเข้ากันได้มากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสได้ดีขึ้นเมื่อได้รับแรงกระแทก

สมบัติการให้ความร้อนของรีแอกทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA จากการทดสอบ DSC พบว่าการเติม PBSA ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PBSA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ง่าย จึงเหนี่ยวนำให้ PLA เกิดการตกผลึกได้ง่ายขึ้น นั่นคือ PBSA สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกของ PLA ได้นั่นเอง อย่างไรก็ตามพบว่าการเติม Perkadox ทำให้ PLA มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลง

อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA มีค่าอยู่ระหว่าง PLA และ PBSA บริสุทธิ์ ทั้งกรณีที่ไม่เติมและเติม Perkadox และพบว่าการเติม Perkadox ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่ถูกปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยการเติม Perkadox พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีความสามารถในการดึงยึดและความสามารถในการรับแรงกระแทกได้มากขึ้น จากสมบัติดังกล่าวจึงมีข้อเสนอแนะให้ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์เบลนด์ เช่น การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดฟิล์มและเส้นใย ซึ่งอาจสามารถนำไปใช้ผลิตได้ในเชิงอุตสาหกรรม



รายการอ้างอิง

- [1] Sangmook Lee and Jae Wook Lee. (2005). "Characterization and processing of Biodegradable polymer blends of poly(lactic acid) with poly(butylene succinate adipate)". **Korea-Aust. Rheol. J.** 17(2): 71-77
- [2] Suprakas Sinha Ray, Jayita Bandyopadhyay, and Mosto Bousmina. (2007). "Thermal and thermomechanical properties of poly[(butylene succinate)-co-adipate] nanocomposite". **Polymer Degradation and Stability.** 92: 802-812
- [3] N.Srisawat, S.Pivsa-Art, S.Pavasupree, et al.(2011)."*Polymer Blends from Poly(L-lactic acid) and Poly(butylene-succinate-co-adipate)*". 9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium :Chiang Rai, Thailand.
- [4] Vincent Ojijo, Suprakas Sinha Ray, and Rotimi Sadiku. (2013). "Toughening of Biodegradable Polylactide/Poly(butylene succinateco-adipate) Blends via in Situ Reactive Compatibilization". **APPLIED MATERIALS & INTERFACES.** 5: 4266-4276
- [5] Deyun Ji, Zhengying Liu, Xiaorong Lan, et al. (2013). "Morphology, Rheology, Crystallization Behavior, and Mechanical Properties of Poly(lactic acid)/Poly(butylene succinate)/Dicumyl Peroxide Reactive Blends". **Appl. Polm. Sci.:** 1-8
- [6] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ and กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2542). **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics):** 34.
- [7] อมรรัตน์ เลิศวารสิริกุล. (2545). **พอลิแลคติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์ จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้.** 7:12.
- [8] (2557). **NatureWorks. Inego Biopolymer2003D Technical Data Sheet.** เข้าถึงเมื่อ 15 กันยายน เข้าถึงได้จาก <http://www.natureworkslc.com/Product-and-Applications>.
- [9] (2557). **NatureWorks. Inego Biopolymer3052D Technical Data Sheet.** เข้าถึงเมื่อ 15 กันยายน เข้าถึงได้จาก <http://www.natureworkslc.com/Product-and-Applications>

- [10] (2557). NatureWorks, "Ingeo Biopolymer4043D Technical Data Sheet. เข้าถึงเมื่อ 15 กันยายน เข้าถึงได้จาก <http://www.natureworkslc.com/Product-and-Applications>
- [11] (2557). NatureWorksLLC. *Materials Data*. 2014. เข้าถึงเมื่อ 15 กันยายน เข้าถึงได้จาก <http://biopolymer.materialdatacenter.com/standard/main/ds/0>.
- [12] Suprakas Sinha Ray, Jayita Bandyopadhyay, and Mosto Bousmina. (2007). "Thermal and thermomechanical properties of poly[(butylene succinate)-co-(adipate)] nanocomposite". *Polymer degradation and Stability*. 92: 802-812
- [13] (2557). Showa Denko K.K. *Bionolle Biodegradable aliphatic polyester*. เข้าถึงเมื่อ 20 กันยายน เข้าถึงได้จาก www.showadenko.us/file/bionolle/Bionolle-Flyer.pdf.
- [14] (2557). กลุ่มพัฒนามาตรฐานความปลอดภัยแรงงาน. สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์อันตรายอย่างไร. เข้าถึงเมื่อ 20 กันยายน เข้าถึงได้จาก www.oshthai.org/phocadownload/organic_peroxide.pdf.
- [15] AkzoNobel. (2008). *Perkadox 14S*: 1-4
- [16] (2557). AkzoNobel. *Safety data sheet*. เข้าถึงเมื่อ 20 กันยายน เข้าถึงได้จาก <https://www.b2bcomposites.com/msds/akzo/82030.pdf>.
- [17] (2557). SIGMA-ALDRICH. *Material Safety Data Sheet*. เข้าถึงเมื่อ 20 กันยายน เข้าถึงได้จาก [https://www.lakeland.edu/PDFs/MSDS/1247/Luperox%20101%20\(Sigma\).pdf](https://www.lakeland.edu/PDFs/MSDS/1247/Luperox%20101%20(Sigma).pdf).
- [18] R. Gacher and H. Muller. *Plastic Additives*. 2nd ed. 1987: Hanser Publishers.: 753.
- [19] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา.(2548). *พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)*. :4.
- [20] Vincent Ojijo, Suprakas Sinha Ray, and Rotimi Sadiku. (2012). "Role of Specific Interfacial Area in Controlling Properties of Immiscible Blends of Biodegradable Polylactide and Poly[(butylene succinate)-co-adipate]". *APPLIED MATERIALS & INTERFACES*. 4: 6690-6701
- [21] G. Moad. (1999). "The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion". *Progress in polymer science*. 24: 81-142

- [22] H Rungsima and H Nattakarn. (2013). "Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBS Cocontinuous Blends Adding Nucleating Agent". **Energy procedia**. 34: 871-879
- [23] E. Fortunati, F. Luzi, D. Puglia, et al. (2014). "Investigation of thermo-mechanical, chemical and degradative properties of PLA-limonene films reinforced with cellulose nanocrystals extracted from Phormium tenax leaves". **European Polymer Journal**. 56: 77-91
- [24] กาญจนา โสโฑ. (2556). "สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเมตริกซ์หลักโดยกระบวนการรีแอกตีฟเอ็กซ์ทรูชัน." ปรินญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [25] Wei Kit Chee, Nor Azowa Ibrahim, Norhazlin Zainuddin, et al. (2013). "Impact Toughness and Ductility Enhancement of Biodegradable Poly(lactic acid)/Poly(caprolactone)". **Advances in Materials Science and Engineering: 1-8**
- [26] Hassan Eslami and Musa R. Kamal. (2011). "Elongational Rheology of Biodegradable Poly(lactic acid)/Poly[(butylene succinate)-co-adipate] Binary Blends and Poly(lactic acid)/Poly[(butylene succinate)-co-adipate]/Clay Ternary Nanocomposites". **Appl. Polm. Sci.127(3): 2290-2306**
- [27] Gui-Fang Shan, Wei Yang, Ming-bo Yang, et al., (2006) "Effect of crystallinity level on the double yielding behavior of polyamide 6". *Polymer testing*. 25: 452-459





ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์

ก-1 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์

ตารางผนวก ก. 1 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เมื่อเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส/2.16 กิโลกรัม) ผสมภายในเครื่องผสมแบบปิด

Peroxide contents (g)	PLA		PBSA	
	Perkadox	Luperox	Perkadox	Luperox
0	15.43±1.79	-	3.50±0.31	-
0.032	11.12±0.84	11.05±1.05	0.47±0.10	0.47±0.11
0.16	7.52±1.92	10.43±2.94	0.11±0.02	0.12±0.08
0.32	2.13±0.50	2.96±0.85	ND.	ND.

ตารางผนวก ก. 2 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติมและไม่เติมรีแอคทีฟเอเจนท์ (อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส/ 2.16 กิโลกรัม) ผสมภายในเครื่องอัดรีดสกรูคู่

Formulas	MFI(g/10min)		
	Perkadox 0phr	Perkadox 0.08phr	Perkadox 0.1phr
Neat PLA	4.128±0.332	-	-
PLA/PBSA(80/20)	3.920±0.472	3.240±0.288	2.577±0.374
PLA/PBSA(60/40)	4.122±0.588	1.883±0.229	1.499±0.338
PLA/PBSA(50/50)	3.888±0.483	1.549±0.141	0.955±0.305
PLA/PBSA(40/60)	3.456±0.446	1.085±0.171	0.646±0.188
PLA/PBSA(20/80)	3.922±0.394	0.456±0.202	0.2534±0.088
Neat PBSA	2.554±0.174	-	-

ตารางผนวก ก. 3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA เมื่อเติม Perkadox ปริมาณแตกต่างกัน (อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส/ 2.16 กิโลกรัม) ผสมภายในเครื่องอัดรีดสกรูคู่

Formulas	Melt flow index (g/10min)	S.D
PBSA40+P0.01	4.45	0.70
PBSA40+P0.05	1.82	0.27
PBSA40+P0.1	1.50	0.34
PBSA40+P0.15	1.26	0.14
PBSA40+P0.2	1.07	0.19

ก-2 การทดสอบ Gel content

ตารางผนวก ก. 4 ปริมาณเจลที่เหลือจากการทดสอบ Gel content ของ PLA และ PBSA เมื่อเติม Perkadox และ Luperox

Formulas	gel content (%)	S.D.	Formulas	gel content (%)	S.D.
PLA+P0.1	1.22	0.11	PBSA+P0.1	1.72	0.39
PLA+P0.5	1.67	0.63	PBSA+P0.5	18.97	0.17
PLA+P1	1.39	0.01	PBSA+P1	54.28	5.07
PLA+L0.1	1.11	0.24	PBSA+L0.1	1.24	0.22
PLA+L0.5	1.45	0.07	PBSA+L0.5	18.79	0.03
PLA+L1	0.78	0.01	PBSA+L1	47.17	18.3

ตารางผนวก ก. 5 ปริมาณเจลที่เหลือจากการทดสอบ Gel content ของรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA

Formulas	Gel content (%)	S.D.
PBSA20+P0.1	1.968	0.065
PBSA40+P0.1	2.875	0.491
PBSA50+P0.1	2.339	1.025
PBSA60+P0.1	2.481	0.686
PBSA80+P0.1	2.481	0.184

ตารางผนวก ก. 6 ปริมาณเจลที่เหลือจากการทดสอบ Gel content ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA (60/40) เมื่อเติมปริมาณ Perkadox แตกต่างกัน

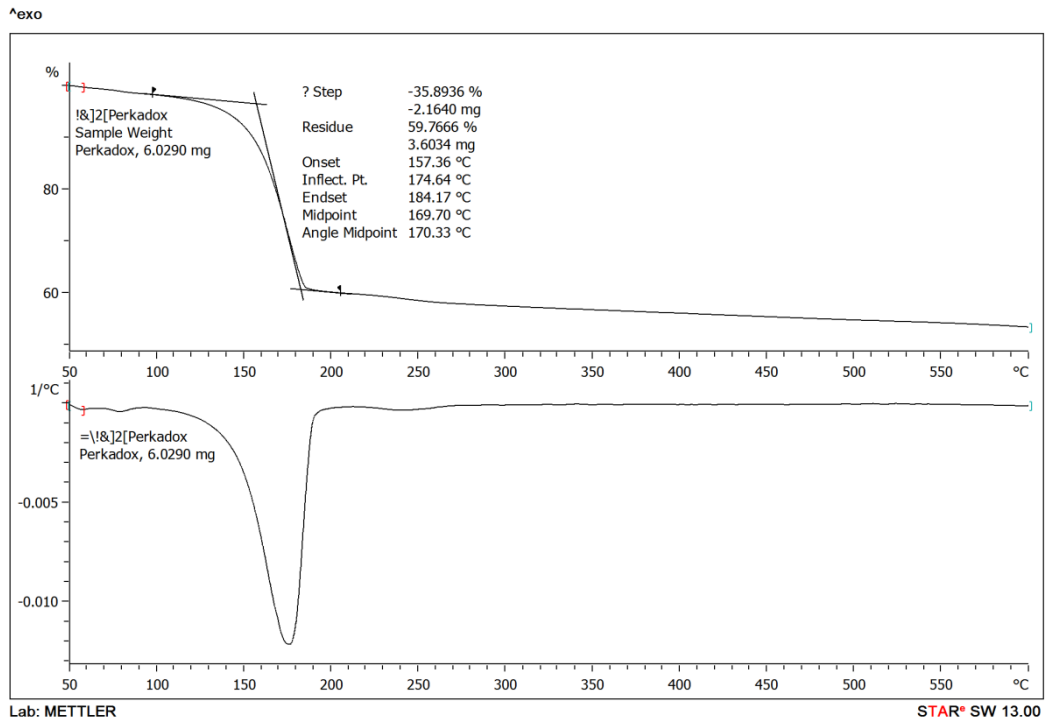
Formulas	Gel content (%)	S.D.
0.01	0.65	0.23
0.05	0.35	0.17
0.1	2.88	0.02
0.15	1.03	0.05
0.2	1.20	0.34

ก-3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

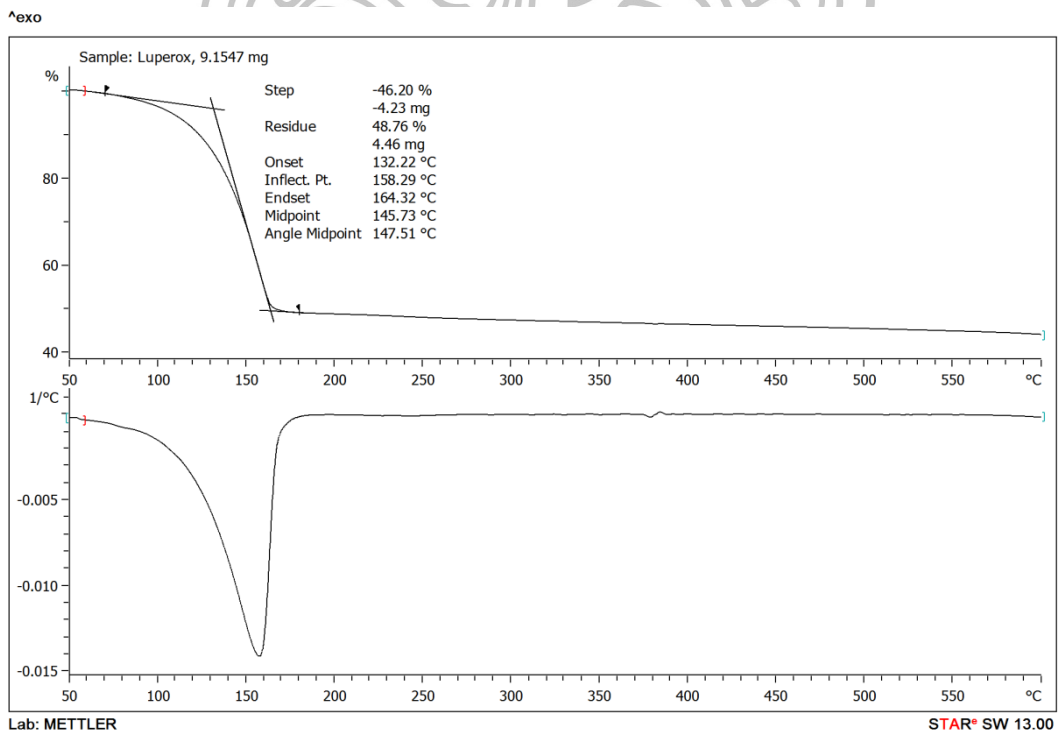
ตารางผนวก ก. 7 ผลการทดสอบสมบัติการดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์PLA/PBSA

Formulas	Modulus(MPa)	Elongation (%)	Tensile strength(MPa)
Neat PLA	1618.8±16.7	12.5±2.5	91.4±4.8
Neat PBSA	181.6±10.9	499.9±0.1	31.2±0.7
PBSA20	1288.2±69.5	173.0±33.4	74.8±4.8
PBSA40	985.5±44.4	250.4±28.7	52.0±1.9
PBSA50	851.5±64.2	364.5±22.9	57.2±3.2
PBSA60	690.7±68.8	429.9±4	54.2±4.1
PBSA80	275.9±12.3	499.9±0.1	38.4±1.6
PBSA20+P0.08	1212.6±66.3	244.7±24.1	69.2±3.3
PBSA40+P0.08	943.0±45.6	317.7±14.7	56.0±3.5
PBSA50+P0.08	899.7±24.1	318.9±14.9	51.9±6.6
PBSA60+P0.08	632.1±47.0	385.3±22.9	49.4±1.9
PBSA80+P0.08	312.5±19.9	472.4±28.7	39.9±2.8
PBSA20+P0.1	1145.2±40.9	170.1±26.4	41.1±8.5
PBSA40+P0.1	911.2±46.9	304.7±38.0	53.8±3.3
PBSA50+P0.1	749.8±42.4	364.2±10.2	55.0±3.1
PBSA60+P0.1	758.5±36.4	335.9±26.9	52.3±3.7
PBSA80+P0.1	323.6±14.2	481.2±12.4	40.5±1.6

ก-3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน



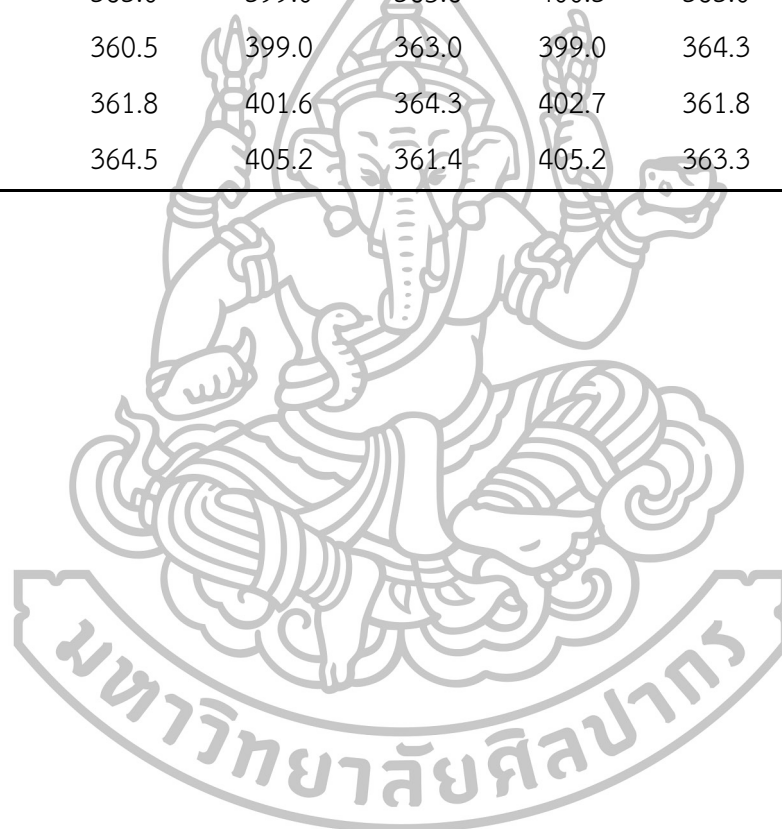
ภาพผนวก ก. 1 การทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของ Perkadox ด้วยเทคนิค TGA



ภาพผนวก ก. 2 การทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของ Luperox ด้วยเทคนิค TGA

ตารางผนวก ก. 8 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของนอนรีแอคทีฟเมื่อเปรียบเทียบกับรีแอคทีฟพอลิเมอร์เบสเนต PLA/PBSA

Formulas	Non-reactive		Perkadox0.08phr		Perkadox0.1phr	
	T _{max,(PLA)}	T _{max,(PBSA)}	T _{max,(PLA)}	T _{max,(PBSA)}	T _{max,(PLA)}	T _{max,(PBSA)}
Neat PLA	360.8	-	-	-	-	-
Neat PBSA	-	407.4	-	-	-	-
PBSA20	364.5	392.8	366.8	-	365.5	-
PBSA40	363.0	399.0	365.6	400.3	363.0	394.1
PBSA50	360.5	399.0	363.0	399.0	364.3	402.7
PBSA60	361.8	401.6	364.3	402.7	361.8	401.6
PBSA80	364.5	405.2	361.4	405.2	363.3	401.6





ข-1 การคำนวณหาปริมาณเจลหลังการทดสอบ Gel content

$$\text{ปริมาณเจลที่เหลือ (\%)} = (\text{น้ำหนักหลังการทดสอบ/น้ำหนักเริ่มต้น}) \times 100 \quad (1)$$

น้ำหนักหลังจากการทดสอบ ได้จากการทดสอบปริมาณเจล โดยใช้ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืน

ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาณเจลที่เหลือของชิ้นงาน PBSA ซึ่งเติม Perkadox 1 phr

น้ำหนักเริ่มต้น = 0.30, น้ำหนักเจลหลังอบ = 0.11g

$$\text{ปริมาณเจลที่เหลือ (\%)} = \frac{0.11}{0.30} \times 100 = 36.7\%$$

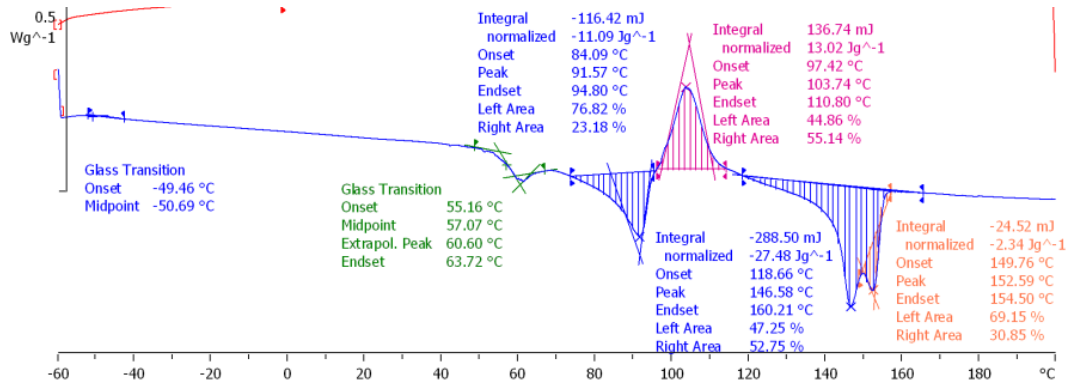
ข-2 การคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกจากเทคนิค DSC

$$\% X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0} \times 100 \times \frac{1}{\text{fraction}}$$

เมื่อ X_c คือปริมาณความเป็นผลึก, ΔH_m คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g), ΔH_{cc} คือปริมาณความร้อนที่ทำให้เกิดการตกผลึก (J/g), และ ΔH_m^0 คือปริมาณความร้อนซึ่งใช้ในการหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์ที่มีผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (J/g) ซึ่ง PLA และ PBSA มีค่าเท่ากับ 93 J/g และ 113.4 J/g ตามลำดับ และค่า fraction คือสัดส่วนของพอลิเมอร์ที่สนใจในพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่างการคำนวณ

หาปริมาณผลึกของ PLA และ PBSA ในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBSA ที่สัดส่วน 80/20 จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง

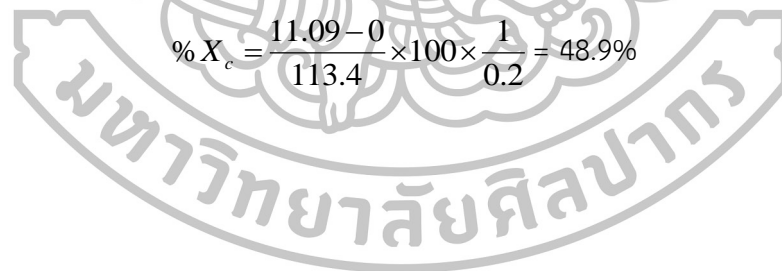


- ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA ($\Delta H_m = 27.48 \text{ J/g}$, $\Delta H_c = 13.02 \text{ J/g}$, $\Delta H_m^\circ = 93 \text{ J/g}$)

$$\% X_c = \frac{27.48 - 13.02}{93} \times 100 \times \frac{1}{0.8} = 19.43\%$$

- ปริมาณความเป็นผลึกของ PBSA ($\Delta H_m = 11.09 \text{ J/g}$, $\Delta H_m^\circ = 113.4 \text{ J/g}$)

$$\% X_c = \frac{11.09 - 0}{113.4} \times 100 \times \frac{1}{0.2} = 48.9\%$$





A study on reactive blending of (poly lactic acid) and poly (butylene succinate co adipate)

This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text.

View [the table of contents for this issue](#), or go to the [journal homepage](#) for more

Download details:

IP Address: 182.52.174.252

This content was downloaded on 19/08/2015 at 14:22

Please note that [terms and conditions apply](#).

A study on reactive blending of (poly lactic acid) and poly (butylene succinate co adipate)

C Bureepukdee¹, S Suttireungwong^{1,3} and M Seadan²

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrials Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Silpakom University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand

E-mail: suttireungwong_s@su.ac.th

Abstract. This research aims to study the blending of Poly(lactic acid) (PLA) and Poly(butylene succinate co adipate) (PBSA) in order to understand the role of peroxide in free radical reaction on the compatibilization between these two biodegradable polyesters. Various ratios of PLA/PBSA blends with and without reactive agents were prepared in the twin screw extruder. Two types of peroxides, Di (tert-butylperoxyisopropyl) benzene (DTBP) and 2, 5-Dimethyl-2, 5-(t-butylperoxy) hexane (DTBH), were used with various concentrations to compare. From the torques measurement, DTBP was more reactive with PLA and PBSA than DTBH. PLA and PBSA 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, and 20:80% by weight were melt-blended in a twin screw extruder. The reactive polymer blends were also prepared for the same ratios of the blends with addition of 0.08 and 0.1 phr of DTBP. The mechanical, thermal, rheological, and morphological properties were investigated. The impact strengths of the non-reactive blend increased with the increasing in PBSA content. The optimal impact strength was obtained at 40%wt of PBSA with 0.1 phr of DTBP. Adding 0.08 and 0.1 phr of DTBP led to the co-continuous phase morphology of PLA/PBSA blends. The per cent crystallinity of PLA increased when blended with PBSA. PBSA might induce the crystallization of PLA.

1. Introduction

In the last two decades, biodegradable plastics based on renewable and non-renewable resources have been recognized as a solution to address the environmental pollution caused by the increase of non-degradable plastic wastes and the threat of oil depletion. Poly (lactic acid) (PLA) is one of the most popular biodegradable plastics being utilized in various applications due to its high tensile strength, good heat stability during processing, an excellent gloss and clarity. However, there are some drawbacks, including its brittleness and poor heat resistance when applied to the temperature above its glass transition temperature.

The simple approach to overcome the brittleness of PLA is the blending with others ductile biodegradable polymers, such as Poly (butylene succinate) (PBS), Poly (butylene succinate co adipate) (PBSA), Poly (caprolactone) (PCL), Poly (butylene adipate co butylene terephthalate) (PBAT). These choices of polymers have been readily studied. An important factor in polymer blends is the compatibility. Unfortunately, the above mentioned polymers and PLA are incompatible. PBSA is a promising biodegradable polymer because of its lower crystallinity and more polymer chain flexible so it is appropriate for various applications [1]. PBSA is commercially available aliphatic polyester

³Address for correspondence: S Suttireungwong, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrials Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand. E-mail: suttireungwong_s@su.ac.th.

with high flexibility, excellent impact strength, melt processibility, thermal, chemical resistance. Besides, PBSA has a low melting point of 90°C, which is more readily bio-degradable than others [2]. However, blending PLA with PBSA is not compatible so it is necessary to improve the compatibility between two phases. Sangmook Lee and Jae Wook Lee [2] investigated thermal properties and mechanical properties of binary blend of PLA and PBSA. They found that polymer blends had lower thermal stability than pure polymers. The modulus and tensile strength of polymer blends decreased when the content of PBSA increased. On the other hand, the impact strength of polymer blends was seriously increased higher than the rule of mixing.

Compatibilization through the in situ formation of compatibilizer in polymer blends has become increasingly important alternative to replace the method of adding block or graft copolymers [3]. Vincent Ojijo et al. [4] blended PLA/PBSA in a presence of triphenyl phosphide (TPP); they found that the torque values were increased after adding the TPP. When increased the TPP content, the dispersed phase size was reduced and PLA and PBSA were linked so they were improved the compatibility. Deyun Ji et al. [5] prepared the polymer blends of PLA/PBS in a reactive blending by using dicumyl peroxide (DCP) as a reactive agent. Some cross linked/blanch structures were formed according to the rheological measurement and gel fraction results. PLA-PBS copolymers of the reactive acted as a compatibilizer for PLA and PBS phase so the compatibility between PLA and PBS phase were improved [5].

The blend between PLA and PBSA is incompatible so the properties of PLA/PBSA blends could be deteriorated [4]. From the previous research, adding additives (e.g. triphenyl phosphide, dicumyl peroxide) could improve the compatibility and dispersity of polymer blends [4, 5]. Moreover there is no research that used the peroxides as the reactive agent for PLA/PBSA blends and it was found that PBS which had the same functional groups as PBSA could react with peroxide so it might indicate that PBSA can also reacts with peroxides. Thus the properties of PLA/PBSA might improve with a presence of Peroxides. The effect of Di (tert-butylperoxyisopropyl) benzene (DTBP) to PLA/PBSA blends has not been reported. Therefore, in this study, it aimed to study the properties of polymer blends (PLA/PBSA) in non-reactive and reactive blends. Peroxide (DTBP) was used as a reactive agent for PLA/PBSA blends. The mechanical, rheological, thermal, and morphological of non-reactive and reactive polymer blends were investigated.

2. Experimental

2.1. Materials

Poly (lactic acid) (PLA) was purchased from Nature Works, LLC, USA and Poly (butylene succinate co adipate) (PBSA grade; Bionolle® 3001D) was purchased from Showa High Polymer Co., Ltd., Japan. Both of polymers were in the form of pellet dried at 60°C for 5 hours before processing. Di (tert-butylperoxyisopropyl) benzene (DTBP) (Perkadox14s) having 40% of peroxide and 2, 5-Dimethyl-2, 5-(t-butylperoxy) hexane (DTBH) (Luperox 101 XL45) having 50% of peroxide were purchased from Akzo Nobel and Arkema Inc., respectively.

2.2. Melt-blend of PLA or PBSA with reactive agents

To investigate the reactivity between polymers and two types of peroxides (DTBP and DTBH), PLA and PBSA were melt-blended with each peroxide at 190° in an internal mixer with screw speed 60 rpm. The torque values were detected in 10 minutes. The concentrations of peroxide varied from 0.1 to 1 phr.

2.3. Preparation of polymer blends

The ratios of PLA: PBSA 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, and 20:80 were weighted and melt-blended in a twin screw extruder. The temperature profile from feeding zone to die were 130/140/150/160/170/180/190°C and the screw speed was set at 80 rpm. The reactive blends were prepared by blending both of polymers with peroxide selected from 2.2, in this case 0.08 and 0.1 phr of DTBP were used in the twin screw extruder with the same temperature profile as non-reactive PLA/PBSA blends. The symbol PBSA20 referred to 20%wt PBSA in the blend. The concentrations of Di (tert-butylperoxyisopropyl) benzene (DTBP) and 2, 5-Dimethyl-2, 5-(t-butylperoxy) hexane (DTBH) were written as Pxx and Lxx respectively (where xx is the concentration).

2.4. Melt flow index

Melt Flow Index (MFI) of polymer blends and neat polymers were investigated according to ASTM D1238. PLA/PBSA blends were characterized at 190°C, using 2.8 kN of load.

2.5. Fourier Transform Infrared Spectroscopy(FT-IR)

Fourier transformed infrared spectra of samples were detected over the range 400-4000 cm⁻¹, using Vertex70, Bruker, Germany. The samples were mixed with KBr and laminated.

2.6. Morphology

The morphology of non-reactive and reactive polymer blends was studied by Scanning Electron Microscope (SEM, made by Hitachi). The specimens were prepared from fractured surface of the impact testing specimens.

2.7. Mechanical properties

The modulus, elongation at break, and tensile strength of polymer blends were determined using Instron Crop, model 5969 with a load cell of 5 kN, according to ASTM D638-typeIV with rate at 10 mm/min at room temperature. For Impact testing, the specimens were tested according to ASTM D256 and using RESIL IMPACTOR, PIANEZZA-TORINO, Italy with a load 2.75 Jules.

2.8. Thermal Properties

Differential Scanning Calorimeter (DSC) was used to investigate the glass transition temperature and melting temperature of polymer blends. The samples were tested in the heat-cool-heat mode under the nitrogen atmosphere, with the heating and cooling rate at 5°C/min. The temperature was scanned from -60° to 200°C. The crystallinity of polymer blends were calculated from followed equation [6].

$$\%X_c = \frac{(\Delta H_m - \Delta H_{cc})}{\Delta H_f^0} \times \frac{100}{\text{fraction}} \quad (1)$$

Where ΔH_m is the enthalpy of fusion and ΔH_{cc} is the enthalpy of crystallization which obtained from the second heating of DSC. ΔH_f^0 is the enthalpy of completed crystallization and the fraction means PLA or PBSA weight ratios of the polymer blend.

3. Results and Discussions

3.1. Effect of peroxide types on torque values of neat PLA and PBSA

PLA and PBSA were dried-mixed with DTBP (P) and DTBH (L) and transferred to an internal mixer at the same mixing temperature and rotor speed to investigate the reactivity of each polymer and reactive agent. Figure 1 showed the torque values of PLA after adding DTBP and DTBH. The torque values of PLA increased when the concentration of DTBP and DTBH reached 1 phr. For the same amount of peroxides, DTBP was more reactive with PLA than DTBH in agreement with final torques. Torques of PBSA mixed with peroxides was shown in figure 2, the torque values of PBSA increased with increased amount of peroxide. At 0.1 phr of peroxides, the torque value was lowest and it was highest when added 1 phr of peroxides for both DTBP and DTBH. The increase in torque values indicated an increase in melt viscosity. It could be speculated that there were possible crosslinking reactions during the melt-blending [5]. When compared DTBP and DTBH, DTBP was more reactive with PBSA than DTBH due to the higher final torque value as seen in figure 2. Thus, 0.1 phr of DTBP was selected as a reactive agent of PLA/PBSA blends.

3.2. PLA/PBSA blends

3.2.1. *Melt Flow Index (MFI)*. Table 1 showed Melt Flow Index (MFI) of polymer blends in non-reactive and reactive blends. The MFI of the blends lied between neat PLA and PBSA as shown in table 1. After adding DTBP at 0.08 and 0.1 phr, MFI of reactive polymer blends decreased, implying the increase in viscosity of polymer blends. Peroxides could act as the crosslink promoter as observed in the increase in torque values.

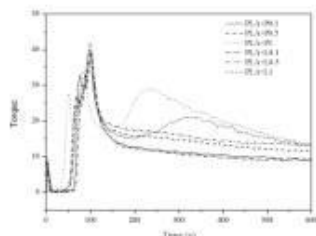


Figure 1. Torque-time of PLA mixed with peroxides (DTBP (P), DTBH (L)) with various contents.

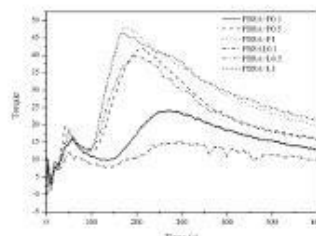


Figure 2. Torque-time of PBSA mixed with peroxides (DTBP (P), DTBH (L)) various contents.

Table 1. Melt flow index of polymer blends.

Formulation	MFI(g/10min)		
	non-reactive	DTBP 0.08phr	DTBP 0.1phr
Neat PLA	4.13±0.33	-	-
PBSA20	3.92±0.47	3.24±0.29	2.58±0.37
PBSA40	4.12±0.59	1.88±0.23	1.50±0.33
PBSA50	3.89±0.48	1.55±0.14	0.96±0.31
PBSA60	3.46±0.45	1.09±0.17	0.65±0.19
PBSA80	3.92±0.39	0.46±0.20	0.25±0.09
Neat PBSA	2.55±0.18	-	-

3.2.2. *Fourier Transformation Infrared Spectroscopy (FT-IR).* As seen in the figure 3, FT-IR spectra of PLA showed peaks at 2997.29 and 2945.91 cm^{-1} which corresponded to $-\text{CH}_2$ stretching vibration and peaks at 1752.92 cm^{-1} and 1183.08 cm^{-1} were assigned to $-\text{C}=\text{O}$ and $\text{C}-\text{O}$ stretching vibration respectively. FTIR spectra of PBSA located at 1744.42 and 1181.73 cm^{-1} were assigned to $\text{C}=\text{O}$ and $\text{C}-\text{O}$ respectively. For the blends, the characteristic peaks of PLA and PBSA were appeared about 2900, 2800, and 1700 cm^{-1} respectively. Besides, it was found that the peaks of $-\text{CH}_2$, $\text{C}=\text{O}$, and $\text{C}-\text{O}$ of blends in a presence of DTBP shifted towards lower wavenumber. It might suggest that the interaction between PLA and PBSA existed upon blending. However, very low degree of possible crosslinking reaction was difficult to be detected by FTIR due to peaks overlapping.

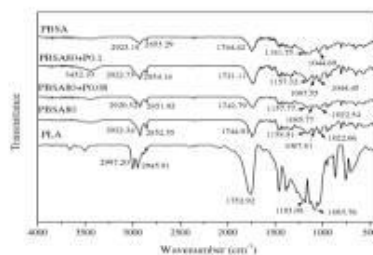


Figure 3. FT-IR spectra of neat PLA, neat PBSA and non-reactive and reactive PLA/PBSA blends.

3.2.3. *Morphology.* Figure 4 showed SEM micrographs of non-reactive and reactive polymer blends from the fractured surface of impact specimens. Without adding DTBP, as shown in figures 4(a-e), the dispersed phase particles were larger in sizes (the particle size was 30 microns) and the particle sizes of dispersed phase increased with PBSA contents. It indicated that PLA and PBSA in non-reactive blends were not compatible. However, at 80%wt of PBSA, the separation between two phases was not clearly observed. When adding 0.08 and 0.1 phr of DTBP, the morphology of the blends changed as seen in figures 4 (a'-e') and figures 4 (a''-e''). It was found that co-continuous

phase occurred upon adding the DTBP in 40%wt of PBSA. In this case, PBSA became the matrix because the addition of peroxides resulted in higher viscosity of PBSA as compared to PLA so PLA was sheared easily and became the small dispersed phase. The increase of peroxides caused the better compatibility between PLA and PBSA.

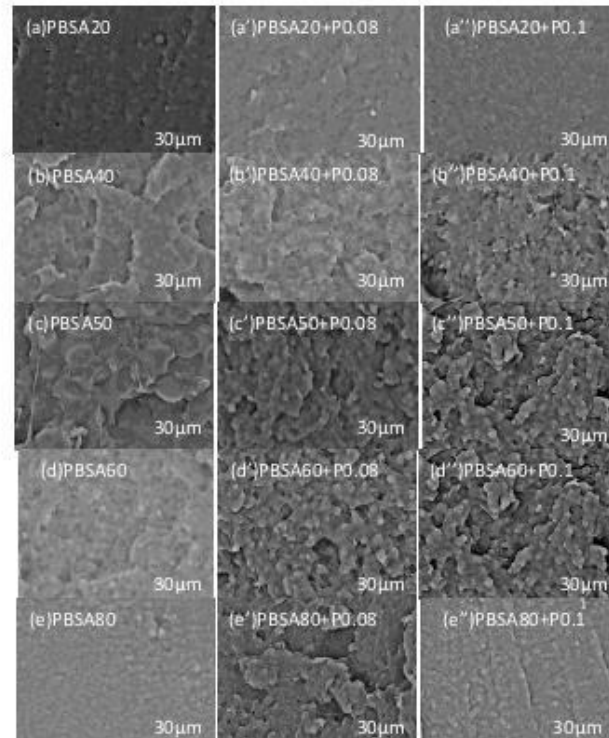


Figure 4. SEM micrographs of fractured surface from impact testing (a-e) non-reactive PLA/PBSA blends, (a'-e') adding 0.08 phr of DTBP, and (a''-e'') PLA/PBSA with adding 0.1 phr of DTBP. (Under 2000x magnification).

3.2.4. Mechanical properties: As seen in figure 5, the impact strengths of non-reactive polymer blends remained almost unchanged. When PBSA content was 80%wt, the impact strength increased dramatically and was even higher than the line of mixing rule. It indicated that there were better compatibility and dispersity in PLA/PBSA blends as seen in SEM micrographs (discussed in 3.2.3). The improvement of impact strength of polymer blends could be more pronounced when adding 0.08 and 0.1 phr of DTBP. Especially, when adding 0.1 phr of DTBP for 40%wt. of PBSA, it was found that the impact strength reached 35 kJ/m^2 (7 times higher than that of non-reactive blends at the same ratio). DTBP acted as an initiator for the possible partial crosslink reaction between PLA and PBSA, hence improving interfacial adhesion between the polymers. The impact strength increased with PBSA contents. At 40%wt. of PBSA with 0.1 phr of DTBP, the inversion phase might occur as the PBSA had higher viscosity than PLA and could become the matrix. Thus, PBSA40 with a presence of 0.1 phr of DTBP had the similar impact strength as neat PBSA and its impact strength was higher than line of mixing rule.

The modulus of polymer blends decreased when PBSA contents increased as seen in figure 6 and the tensile strength showed the similar trends (figure 7) because PBSA is tougher than PLA. In

addition, it was found that adding 0.08 and 0.1 phr of DTBP caused the modulus and tensile strength of polymer blends to drop. The elongation at break of polymer blends increased when PBSA contents increased as shown in figure 8. For both non-reactive and reactive blends, the elongations at break were higher than the line of mixing rule. This implied that PBSA could improve the brittleness of PLA because of the elastic characteristic in PBSA. However, it was found that the elongation at break of polymer blends slightly decreased when adding 0.1 phr of DTBP.

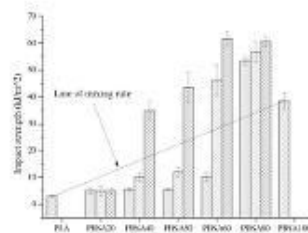


Figure 5. Impact strength of polymer blends.

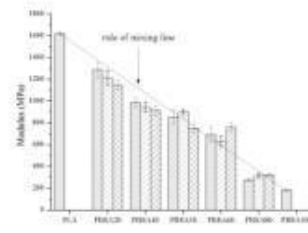


Figure 6. Modulus of polymer blends.

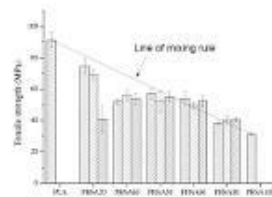


Figure 7. Tensile strength of polymer blends.

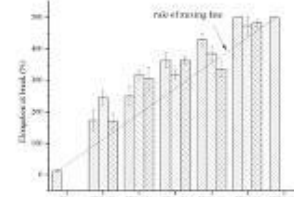


Figure 8. Elongation at break of polymer blends.

//// Non-reactive, \\\\ 0.08 phr, and ◇◇◇ 0.1phr of DTBP

Table 2. Thermal properties of polymer blends obtained from 2nd heating of DSC thermograms.

Formulation	T _g (°C)		T _c (°C)		T _m (°C)				H _m (J/g)		%X _c	
	PBSA	PLA	PBSA	PLA	PBSA		PLA		PBSA	PLA	PBSA	PLA
					T _{m1}	T _{m2}	T _{m1}	T _{m2}				
neat PLA	-	61.91	-	-	-	-	147.4	153.1	-	28.26	-	4.108
PBSA20	-50.69	60.6	-	-	-	91.57	146.6	152.6	11.09	27.48	39.05	19.44
PBSA40	-44.85	62.03	59.45	-	82.33	92.28	146.9	152.5	16.39	17.6	28.86	12.22
PBSA50	-44.3	60.37	59.09	-	82.06	92.52	147.3	152.7	17.96	12.18	25.3	5.763
PBSA60	-42.77	59.76	59.26	-	81.98	92.5	147.5	-	23.09	10.98	27.1	7.5
PBSA80	-43.16	56.89	59.42	-	81.84	92.27	146.4	151.6	26.45	5.71	23.28	6.129
PBSA20+P0.08	-	60.45	65.49	-	-	91.06	145.2	152.9	10.29	26.53	36.23	18.8
PBSA40+P0.08	-45.63	60.24	64.73	-	85.05	91.62	146.1	152.9	14.47	17.94	25.48	11.52
PBSA50+P0.08	-43.26	60.44	65.73	-	86.18	92.09	146.4	153.3	17	11.93	23.94	7.806
PBSA60+P0.08	-44.21	59.67	65.67	-	85.21	92.11	146.1	153.1	20.86	14.02	24.48	11.18
PBSA80+P0.08	-43.42	-	68.43	-	-	88.11	144.7	152.3	46.47	4.66	40.91	8.118
PBSA20+P0.1	-	60.42	65.79	-	-	91.04	145.7	153.1	6.63	21.84	23.35	11.68
PBSA40+P0.1	-45.33	60.33	65.38	-	85.23	91.48	146	152.9	15.64	15.63	27.54	7.258
PBSA50+P0.1	-43.86	60.01	67.04	-	87.18	-	145.9	153	17.78	9.95	25.04	6.473
PBSA60+P0.1	-43.68	60.16	67.25	-	87.95	-	145.7	152.9	19.83	7.59	23.27	8.161
PBSA80+P0.1	-43.16	-	68.57	-	88.95	-	144.8	152.3	25.69	4.04	22.61	9.14
neat PBSA	-43.16	-	60.04	-	82.98	92.58	-	-	51.8	-	36.48	-

^aHeat of fusion of PLA and PBSA are 93 J/g [6] and 142 J/g [7], respectively.

3.2.5. Thermal properties. Table 2 showed the results of DSC from second heating scans. It was found that the glass transition temperature of PBSA and PLA were about -43°C and 61°C respectively and there were no differences of the results after blending them together. It suggested that PLA/PBSA blends were immiscible. When considering the cool crystallization temperatures (T_c), T_c of all blends with 0.08 and 0.1 phr increased, especially when PBSA contents increased. However, PLA did not show the cool crystallization temperature because of its slow crystallization rate. The melting temperature (T_m) of PBSA was 92°C . After PBSA was blended with PLA, there were no differences of T_m between pure polymer and polymer blends. Moreover, PBSA showed two peaks of melting temperature corresponding to re-melting of newly formed crystalline [2]. PLA showed T_m which remained constant for both non-reactive and reactive blends. The addition of DTBP did not affect the melting temperature of polymer blends. The percent crystallinity ($\%X_c$) of PLA in non-reactive blends was found to be increased. It might be due to the fact that PBSA was able to crystallize easily so it might induce the crystallization of PLA. Adding 0.08 and 0.1 phr of DTBP caused the decrease of the percent crystallinity of PLA in PLA/PBSA blends because possible crosslink might hinder the crystallization of PLA. The percent crystallinity of PBSA could not be accurately measured because the heat of fusion of PBSA overlapped with the heat of cold crystallization of PLA.

4. Conclusion

In this research, it aimed to study the properties of polymer blends in non-reactive and reactive blending. The effect of two types of peroxides and amount of peroxides on torque values was analyzed and it was found that DTBP was more reactive with PLA and PBSA than DTBH under specified blending condition as DTBP revealed higher torque value. For the impact testing, adding 0.1 phr of DTBP into PBSA40 could increase the impact strength dramatically. The interfacial adhesion and viscosity of PLA/PBSA blends could be improved. SEM micrographs showed the morphology close to co-continuous phase with a presence of DTBP. Furthermore, the elongation at break of polymer blends was improved when PBSA contents increased for both non-reactive and reactive blends. For thermal properties, blending the PLA with PBSA could increase the percent crystallinity of PLA. The percent crystallinity of PLA in reactive blends decreased when compared with non-reactive blends for all ratios.

Acknowledgments

Authors would like to thanks the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of engineering and industrial, Silpakorn University for financial support and Nation Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand for impact test measurement.

References

- [1] Eslami H and Kamal M 2011 *App. Polym. Sci.* **127** 2290-306
- [2] Lee S and Lee W 2005 *Korea-Aust. Rheol. J.* **17** 71-7
- [3] Mani R, Bhattachara M and Tang J 1998 *J Polymer Sci Polymer Chem* **37** 1693-720
- [4] Ojijo V, Ray S and Sadiku R 2013 *App. Mat. Interf.* **5** 11-7
- [5] Ji D 2013 *App. Polym. Sci* **10** 1-8
- [6] Rungsima H and Nattakarn H 2013 *Energy Procedia* **34** 871-9
- [7] Available from: www.showadenko.us/file/bionolle/Bionelle-Flyer.pdf



ภาคผนวก ง

การพัฒนาตนเอง

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำปีการศึกษา ๒๕๕๖ ปีการศึกษา ๒๕๕๖

ชื่อ-นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว) โห้กล้าหทัย บุรีรัมย์ รหัสประจำตัวนักศึกษา 56402201
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่ 1 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมทอเลเมอร์

รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ	
การประชุมวิชาการ. มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ 2556 (Thailand Research Expo 2013)	
ระดับ <input checked="" type="checkbox"/> ชาติ <input type="checkbox"/> นานาชาติ	สถานที่ (โรงแรม/ศูนย์การประชุม/สถานที่และหน่วยงานออกคอนเสิร์ต/พิพิธภัณฑ์/ศูนย์วิจัย)
วันที่ 25 สิงหาคม 2556	
หัวข้อการบรรยาย การส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์ต่ออาชีวระดับของภาคอุตสาหกรรม	
โดย นายเชษฐพงษ์ เก่งอำพล, นายอุดม วงศ์วิวัฒน์ไชย, ศาสตราจารย์นายแพทย์สุภวัณห์ จิตต์มิตรเกษม	
ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้) จากภาพฟังบรรยายทำให้ทราบดีถึง	
ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัยในหลากหลายด้าน ทั้ง การนำเงินทุนมาลงทุน ประเมิน	
ด้านโรงงานวิจัย และเทคโนโลยีจากงานวิจัยไปใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม	
วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก	
นายอุดม วงศ์วิวัฒน์ไชย	
หน่วยงาน สถาบันการศึกษาระดับมหาวิทยาลัยส่งเสริมการลงทุน	
ติดต่อ udom@boi.go.th	
ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก	
1) นายอาทิตย์ กอฉนวน	
หน่วยงาน สาขาวิชา Biotechnology มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	
ติดต่อ artit_kk@hotmail.com	
2) นายเกียรติศักดิ์ คุ้มมาตย์	
หน่วยงาน สาขาวิชาเคี้องภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	
ติดต่อ ton_3555@hotmail.com	

3) <u>นางสาวบุษิณี อุพวง</u> หน่วยงาน <u>สาขาวิชาปิโตรเคมี The Petroleum and Petrochemical College</u> ติดต่อ <u>kluang_ubu@hotmail.com</u>	
งานวิจัยที่สนใจ <u>กรณีตั้งแบบแข็งเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก (โดยผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทวี)</u> <u>เป็นงานวิจัยที่นำเอาวัสดุดินทางปิโตรเคมีมาผลิต รากนั้นนำไปกลั่นลำดับส่วนเพื่อไปไดเอทานอล</u> <u>ออกมา และนำไปแยกน้ำออกในกระบวนการสุดท้ายด้วยเทคนิคการแยกน้ำด้วยเยื่อเลือกผ่านที่</u> <u>นำมาจากเซรามิกส์</u> แนวคิดในการพัฒนาต่อของงานวิจัย <u>งานวิจัยข้างต้น มีความน่าสนใจเพราะเป็นการนำวัสดุจากธรรมชาติมาสร้างเป็นพลังงาน</u> <u>ทดแทน ที่ให้ผลผลิตทางปิโตรเคมีที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้เป็นการทำให้สเกลขนาดเล็ก</u> <u>มีการพัฒนาต่อยอดโดยทำให้มีสเกลขนาดใหญ่ขึ้น และมีกัมมันตภาพเคมีมาพัฒนาเป็นเชื้อ</u> <u>เพลิงทดแทนแทนการใช้เซรามิกส์ ซึ่งจะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้แต่ยังคงประสิทธิภาพ</u> <u>เท่าเดิม</u>	
ลงชื่อ <u>ธนิกานต์ บุรีศักดิ์</u> (<u>น.ส. ธนิกานต์ บุรีศักดิ์</u>) วันที่ <u>27</u> เดือน <u>สิงหาคม</u> พ.ศ. <u>2556</u>	
<u>บอปรศาน น. ใต้ปทุมประเสริฐ</u> ลงชื่อ <u>Ann S.</u> (<u>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมา พัฒนาการ</u>) อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ วันที่ <u>11</u> เดือน <u>พ.ย.</u> พ.ศ. <u>56</u>	<u>ท.ว.</u> ลงชื่อ <u>อ.ดร. นงศรีพันธ์</u> (<u>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ นงศรีพันธ์</u>) หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ วันที่ <u>12</u> เดือน <u>พ.ย.</u> พ.ศ. <u>2556</u>

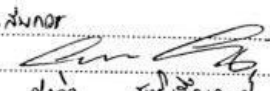
หมายเหตุ

1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดย นักศึกษาต้องทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาควิชา) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้ง กับนักวิชาการและนักศึกษาที่มีการศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ตามเกณฑ์การสำเร็จ การศึกษาคามหลักสูตร
2. นักศึกษานับรูปถ่ายแสดงการทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแบบเอกสาร ลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำปีการศึกษา 2558 ปีการศึกษา 2554

ชื่อ-นามสกุล (นาย/หญิง/นางสาว) ชัยภักดิ์ บุญเกิด รหัสประจำตัวนักศึกษา 56402201
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่ 2 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

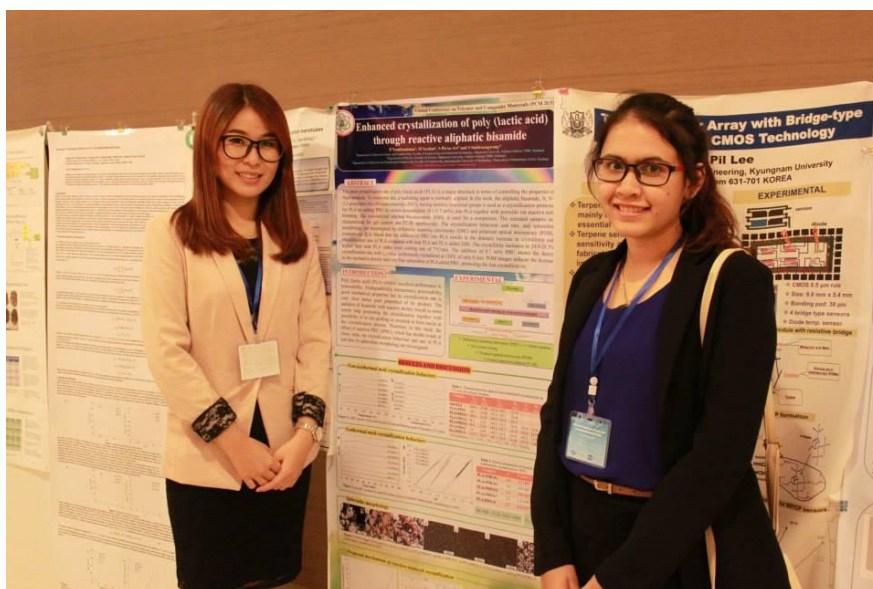
<p>รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ</p> <p>การประชุมวิชาการ 2015 Global Conference On Polymer and Composite Materials</p> <p>ระดับ <input type="checkbox"/> ชาติ <input checked="" type="checkbox"/> นานาชาติ สถานที่ ปังเจ้าเก๋จีน</p> <p>วันที่ 16 - 19 พฤษภาคม 2558</p> <p>หัวข้อการบรรยาย Basic Guidelines for Structuring a Scientific Paper</p> <p>โดย Prof. Esteban Broitman</p> <p>ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้)</p> <p>ได้ความรู้เกี่ยวกับหลักการในการเขียนเปเปอร์ โดยทบทวนว่าในแต่ละส่วน ควรมีเนื้อหาของไหนทบทวนเขียนอย่างไร นอกจากนี้ยังได้ทบทวนว่าในมุมมองของ reviewer ให้ความสำคัญ อย่างไรเพื่อให้งานผ่าน เป็นสิ่งที่ควรจำไว้ ทำให้เราสามารถนำความรู้ที่นำมาปรับใช้ในงานวิจัย งานต่อไปได้</p>	
<p>วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก</p> <p>Prof. N.M. Ravindra</p> <p>หน่วยงาน New Jersey Institute of Technology, USA</p> <p>ติดต่อ</p>	
<p>ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก</p> <p>1) Rungsiri Suriyatem</p> <p>หน่วยงาน Division of Food Science and Technology, Chiang Mai University, Thailand</p> <p>ติดต่อ Mariusz Siciński</p>	
<p>หน่วยงาน Institute of Polymers and Dyes Technology, Faculty of Chemistry, Technical University of</p> <p>ติดต่อ mariusz.sicinski@p.lodz.pl</p>	Lodz' Poland

3) <u>Jian Jun Jiang</u> หน่วยงาน <u>Northwestern Polytechnical University, China</u> ติดต่อ <u>jianjun@nwpu.edu.cn</u>	
งานวิจัยที่สนใจ <u>Influence of deposited CNTs on the surface of carbon fiber by ultrasonically assisted electrophoretic</u>	
แนวคิดในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย <u>ในกรณี carbon nanotube เราใช้มันจะต้องสังเคราะห์ปรับปรุงสมบัติเพื่อให้สามารถนำม</u> <u>ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นไปที่การปรับปรุงที่หน้าผิว และเทคนิคที่นำมาใช้ เช่น</u> <u>การใช้ electrophoretic deposition ซึ่งถือเป็นวิธีอันยอดเยี่ยม ที่อาจสามารถนำวัสดุจาก</u> <u>ในกรณีวิจัยนี้ไปปรับใช้กับกรณี treat ทั่วสัปดาห์แล้วได้</u>	
ลงชื่อ <u>ชัชวาลย์ บุรีศักดิ์</u> (น.ส. ชัชวาลย์ บุรีศักดิ์) วันที่ <u>25</u> เดือน <u>พฤษภาคม</u> พ.ศ. <u>2558</u>	
เห็นสมควร ลงชื่อ  (<u>ศ.ดร. สุทธิ เวียงวงศ์</u>) อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ วันที่ <u>25</u> เดือน <u>พฤษภาคม</u> พ.ศ. <u>2558</u>	ทนาย <u>ปิรชกร เขมรัมย์</u> ลงชื่อ <u>ปิรชกร เขมรัมย์</u> (<u>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกัญญา นงส์ศรีพันธ์</u>) หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ วันที่ <u>26</u> เดือน <u>พฤษภาคม</u> พ.ศ. <u>2558</u>

หมายเหตุ

1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดยนักศึกษาคงทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาควิชา) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้งกับนักวิชาการและนักศึกษามัธยมศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ตามเกณฑ์การสำเร็จการศึกษาตามหลักสูตร
2. นักศึกษาแบบรูปถ่ายแสดงการทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแนบเอกสารลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย

2nd Global Conference on Polymer and Composite Materials
(PCM2015), Beijing, China, May 16-19, 2015



แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำภาคการศึกษา ที่.....ปีการศึกษา 2558.....

ชื่อ-นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว) โพธิ์กาหนัถ์ บุรีภักดิ์ รหัสประจำตัวนักศึกษา 56402201
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการ <u>Eco Innovation and Solution 2015</u> ระดับ <input checked="" type="checkbox"/> ชาติ <input type="checkbox"/> นานาชาติ สถานที่ <u>ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา</u> วันที่ <u>2 ตุลาคม 2558</u> หัวข้อการบรรยาย <u>Green Energy : ธุรกิจหมุนเวียนสีเขียวเพื่อพลังงาน</u> โดย <u>นายรัชพล ประสพโชค</u> ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถนับเป็นเอกสารประกอบได้) <u>หมุนเวียนสีเขียวเป็นสิ่งที่กำลังมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาให้เป็นเชื้อเพลิง โดยแหล่งพลังงานที่สะอาดและได้ความมั่นใจ ผลลัพธ์เป็นรูปแบบไร้อากาศ จะได้ก๊าซชีวภาพ (Bio-Methane Gas) ให้ปริมาณสูง ซึ่งก๊าซชีวภาพนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้ผลิตไฟฟ้า หรือ การทำให้เป็นพลังงานสะอาดเพื่อสามารถนำไปใช้กับเครื่องจักร หรือ จากนี้หมุนเวียนสีเขียวยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โทเทียล จึงจะสามารถลดปัญหาการเกิดแก๊สเรือนกระจกได้อย่างดีเยี่ยม</u>	
วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก <u>นายรัชพล ประสพโชค</u> หน่วยงาน <u>UAC GLOBAL PLC.</u> ติดต่อ <u>chatchaphol@uac.co.th</u>	
ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก 1) <u>คุณฐิติพร วัฒนสุภา พนมสุโข</u> หน่วยงาน <u>บริษัท แมกซ์ กาเบจ รีไซเคิล เซ็นเตอร์ จำกัด</u> ติดต่อ <u>wexga@hotmail.com</u> 2) <u>คุณกัญญาพัชร ศรีสัมพันธ์</u> หน่วยงาน <u>บริษัท อีส์เทิร์นไทยคอนกรีตตั้ง 1992 จำกัด</u> ติดต่อ <u>kittipol@etc1992.com</u>	

3) คุณพิชญ์พงษ์ อพรศรีรุ่งโรจน์

หน่วยงาน บริษัท Creatus corporation Limited group
 อีเมล patpong@creatuscorp.com

งานวิจัยที่สนใจ
การออกแบบเครื่องห่อพลาสติกใสของก้อนยางพารา โดยงานวิจัยนี้ใช้พลาสติก PVC
มาห่อหุ้มก้อนยาง เพื่อป้องกันแรงกดทับ โดยยากับวัสดุกรรมกรหดตัวของฟิล์มพลาสติก
เมื่อได้รับความร้อน ทำให้สีของสารตกผลึกเร็วไม่เกาะกาว

แนวคิดในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย
เนื่องจากพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Polyvinyl chloride (PVC) ที่ไม่สามารถผลิต
การย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงคิดว่าน่าจะ สกัดหรือทำจากวัสดุทางชีวภาพที่มาจากพืชที่มี
พลาสติกที่ก็สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ทำให้ช่วยลดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

ลงชื่อ ชัชฎาภรณ์ บุรีรัตน์
 (น.ส. ชัชฎาภรณ์ บุรีรัตน์)
 วันที่ 8 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2558

<p><u>เด่น สุภกร</u> ลงชื่อ <u>[ลายเซ็น]</u> (น.ส. ชัชฎาภรณ์ บุรีรัตน์) อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ วันที่ <u>12</u> เดือน <u>ธันวาคม</u> พ.ศ. <u>58</u></p>	<p><u>เนติธอม ธีระเกษมทรัพย์</u> ลงชื่อ <u>[ลายเซ็น]</u> (น.ส. ศาสตราภรณ์ คร.ณิศาณูญ นงศิริพันธ์) หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ วันที่ <u>14</u> เดือน <u>ตุลาคม</u> พ.ศ. <u>2558</u></p>
---	--

หมายเหตุ

1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดย นักศึกษาต้องทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาควิชา) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้ง กับนักวิชาการและนักศึกษามีการศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ตามเกณฑ์การสำเร็จ การศึกษาตามหลักสูตร
2. นักศึกษาแบบรูปถ่ายแสดงการทำทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแนบเอกสาร ลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล นางสาวชนิกานต์ บุรีภักดิ์
ที่อยู่ 46/592 ม.พฤษภา3 ต.บางคูรัด อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดอมรินทราราม จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสตรีวัดระฆัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีวัดระฆัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและ วัสดุพอลิเมอร์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
- พ.ศ. 2556 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชา วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

ประวัติการทำงาน

- พ.ศ. 2554 บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน ฝ่ายการผลิต ABS

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

- พ.ศ. 2556-2558 ทุนผู้ช่วยสอน ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

การนำเสนอผลงานวิจัย

1. C Bureepukdee, S Suttiruengwong, and M Seadan.
“A study on reactive blending of (poly lactic acid) and poly (butylene succinate co adipate)” 2nd Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM2015), Beijing, China, May 16-19, 2015

การตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

1. C Bureepukdee, S Suttiruengwong, and M Seadan.
“A study on reactive blending of (poly lactic acid) and poly (butylene succinate co adipate)” 2nd Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM2015), Beijing, China, May 16-19, 2015

