



อิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์
เบลนด์ระหว่างพอลิไวนิลิลีนซัคซิเนตและพอลิแลคติกแอซิด



โดย
นางสาววรลักษณ์ ฉวยขุนทด

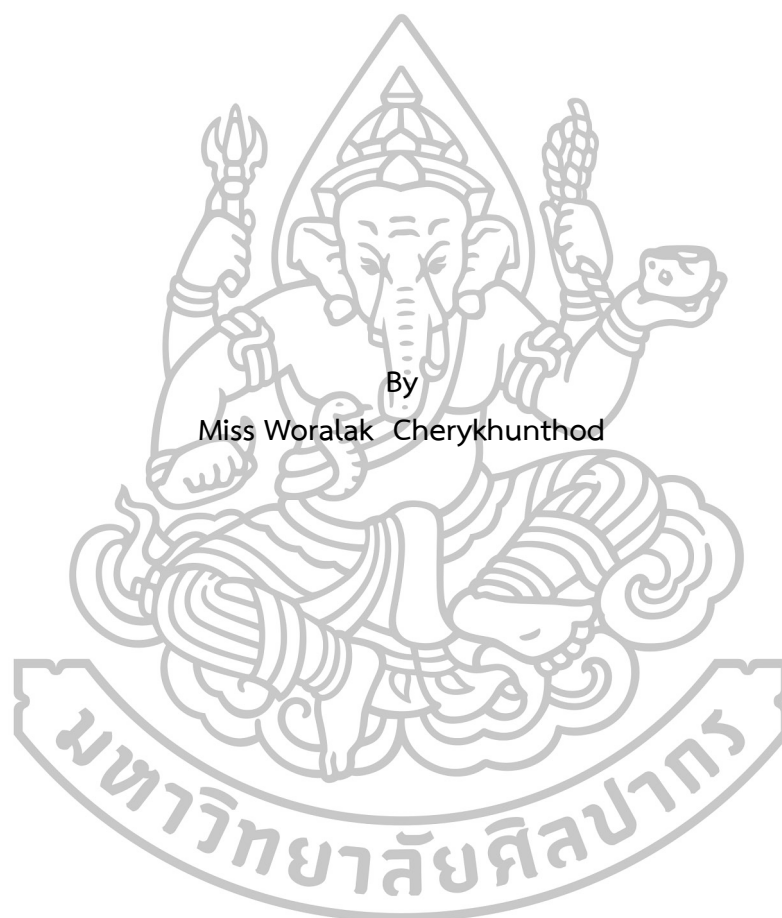
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์
เบสลดระหว่างพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิแลคติกแอซิด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF REACTIVE COMPOUNDS ON COMPATIBILIZATION AND PROPERTIES OF
POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/POLY(LACTIC ACID) BLENDS



By
Miss Woralak Cherykhunthod

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 “ อิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิแลคติกแอซิด ” เสนอโดย นางสาวรลักษณ์ ฉวยขุนทด เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

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

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

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

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธีรินทร์ คงพันธ์)

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

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)

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

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่दान)

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

56402203: สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ: พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, พอลิแลคติกแอซิด, สารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

วลักษณ์ เฉยขุนทด: อิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่อความเข้ากันได้ และสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิแลคติกแอซิด. อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และ รศ. ดร.มนัส แซ่ด่าน. 162 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบการทำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA) โดยมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเมทริกซ์หลัก ผ่านกระบวนการผสม ด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิด หรือเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ แล้วศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของ สารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่อลักษณะสัมพันธ์วิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงรีโอโลยี และปริมาณเจลที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์เบลนด์ ซึ่งสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox 14-40B-PD), Joncryl[®] ADR-4368 และ Titanium (IV) butoxide (TBT) จากลักษณะสัมพันธ์วิทยาพบว่า การเติม Perkadox หรือ Joncryl ช่วยทำให้อนุภาคของ PLA มีขนาดเล็กลง มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ในเมทริกซ์ของ PBS และมีการยึดเกาะที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟสที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์แบบ ไม่มีปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด และความต้านทานต่อการกระแทกที่ดีขึ้น มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณ เจลที่เกิดขึ้นเท่ากันที่ 8% พบว่าจะต้องใช้ Perkadox ปริมาณ 0.0075 phr ซึ่งน้อยกว่า Joncryl ที่ใช้ ปริมาณ 1.0 phr แสดงให้เห็นว่า Perkadox มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก มากกว่า Joncryl และเมื่อนำเจลที่ได้มาทำการทดสอบ FTIR และ ¹H-NMR พบว่ามี graft-copolymer ระหว่าง PBS และ PLA เกิดขึ้นจริง เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเติม Perkadox หรือ Joncryl ในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PBS เป็นเฟสหลักกับ PLA เป็นเฟสหลัก พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ที่มี PLA เป็นเฟสหลัก จะมีการยึดเกาะที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟสที่ดีกว่า ในขณะที่ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT พบว่าไม่ส่งผลให้ลักษณะสัมพันธ์วิทยา และสมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์เบลนด์เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี และรีแอกทีฟเบลนด์ของ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก ด้วยเทคนิค DSC พบว่า อุณหภูมิ T_g และ T_m ของ PLA และ PBS ในพอลิเมอร์เบลนด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จากการทดสอบ การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าการเติม Perkadox หรือ Joncryl ส่งผลให้ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวสูงขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อทดสอบ สมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง DMA พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีค่า G', G'' และ η* สูงกว่า Neat PBS และ Neat PLA เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีความยืดหยุ่นมากขึ้น และเมื่อเติม Perkadox หรือ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA พบว่าความหนืดเชิงซ้อนมีค่าสูงขึ้นมาก อาจเนื่องมาจากพอลิเมอร์เบลนด์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1..... 2.....

56402203: MAJOR: POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD: POLYBUTYLENE SUCCINATE, POLYLACTIC ACID, REACTIVE COMPOUNDS

WORALAK CHERYKHUNTHOD: EFFECT OF REACTIVE COMPOUNDS ON COMPATIBILIZATION AND PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/POLY(LACTIC ACID) BLENDS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SUPAKIJ SUTTIRUENGWONG, AND ASSOC. PROF. MANUS SEADAN, Ph.D. 162 pp.

The objective of this work was to study the blends of poly(butylene succinate)/poly(lactic acid) (PBS/PLA) systems, using poly(butylene succinate) as a matrix by one-step blend process in an internal mixer or a twin screw extruder. The effects of types and contents of reactive compounds in PBS/PLA blends were also investigated. The morphology, mechanical, thermal and rheological properties of the blends were studied. Reactive compounds, Di(tert-butylperoxy isopropyl) benzene (Perkadox 14-40B-PD), Joncryl® ADR-4368 and Titanium(IV) butoxide (TBT) were selected for comparison. By observing morphology of the blends, it was found that using the Perkadox or Joncryl resulted in fine and more uniform PLA particles dispersed in PBS matrix and showed a better interfacial adhesion than the non-reactive blends. The better morphology of the reactive blends provided the higher tensile and impact properties and thermal degradation temperature than the non-reactive blends. For the constant gel content of 8%, Perkadox of 0.0075 phr was required, where the amount of Joncryl was 1.0 phr, it could be postulated that Perkadox was more reactive with PBS/PLA than Joncryl. The gel fractions were characterized by FTIR and ¹H-NMR and it revealed the formation of graft-copolymer of PBS and PLA. When compared the systems consisting of Perkadox with Joncryl, the blends using PLA as a matrix showed a better interfacial adhesion than the blends using PBS as a matrix. In the case of TBT system, the morphology and mechanical properties were unaffected. Thermal properties of blends were characterized by DSC, it was found that the T_g and T_m of PLA and PBS remained almost unchanged. The addition of Perkadox or Joncryl to PBS/PLA blends is likely to improve the thermal degradation temperature compared with non-reactive blends. Rheological properties were studied by DMA, it was found that the non-reactive blends showed higher G', G'' and η* than neat PBS and neat PLA. This could be due to the blends provided the higher elasticity. The addition of Perkadox or Joncryl, showed higher complex viscosity. This may be cause the increased molecular weight of blends.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University
Student's signature..... Academic Year 2015
Thesis Advisor's signature 1..... 2.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และรองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมผู้ให้คำปรึกษา และชี้แนะวิธีวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทำวิจัย มาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบความเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียด

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอนข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ สถานที่ และทุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช นายช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สำหรับการอำนวยความสะดวกเรื่องอุปกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องจักรที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่สำนักงานภาควิชาที่อำนวยความสะดวกทางด้านเอกสารต่าง ๆ และการเงิน

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอก และเพื่อน ๆ ปริญญาโท รวมถึงรุ่นน้องปริญญาตรี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา รวมถึงกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุก ๆ คนในครอบครัวที่สูญเสียเลี้ยงดู สั่งสอน และให้กำลังใจ ผู้ทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมาทำให้การศึกษา และการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่ได้รับ	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	5
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS).....	6
พอลิแลคติกแอซิด Poly(lactic acid), PLA.....	8
พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend).....	10
สารช่วยประสาน (compatibilizer).....	13
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	25
วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
เครื่องผสมและขึ้นรูป.....	26
เครื่องมือวิเคราะห์.....	26
ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	27
ศึกษาระบบการเบลนด์.....	30
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี	32
ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม Perkadox	40
ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม Joncryl	53

บทที่	หน้า
ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม TBT	67
ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม PEG และ TBT	81
ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA/PBS blends) โดยมีพอลิแลคติกแอซิดเป็นเมทริกซ์หลัก	87
ศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเทคนิค Dynamic Mechanical Analysis ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) และ PLA:PBS(80:20)	92
การประเมินราคาคอมพาวด์ที่ได้	101
5 สรุปลผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
สรุปลผลการวิจัย	102
ข้อเสนอแนะ	103
รายการอ้างอิง	104
ภาคผนวก	108
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์	109
ภาคผนวก ข การคำนวณ	139
ภาคผนวก ค การเผยแพร่งานวิจัย	142
ภาคผนวก ง การพัฒนาตนเอง	151
ประวัติผู้วิจัย	161



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (GS Pla, Mitsubishi Co., Ltd.) เกรดต่างๆ.....8
2.2	สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (NatureWorks, Ingeo) เกรดต่างๆ.....9
2.3	สมบัติเชิงกล (tensile modulus, stress at break และ elongation at break) ของ PLA,PLA/PBAT ที่มีการเติมและไม่เติม Joncryl..... 24
3.1	สภาวะที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ด้วยเทคนิค DSC..... 29
3.2	องค์ประกอบของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาผลของปริมาณสารประกอบที่วงเวต่อการเกิด ปฏิกิริยาเคมี ใน PBS:PLA(80:20) และ PBS:PLA(75:25)..... 30
3.3	องค์ประกอบของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาผลของปริมาณสารประกอบที่วงเวต่อการเกิด ปฏิกิริยาเคมี ใน PBS:PLA(80:20) และ PBS:PLA(75:25)..... 31
4.1	การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ..... 37
4.2	ตำแหน่งพิกที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค ¹ H-NMR ของ PBS และ PLA ใน รีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Perkadox 48
4.3	สัดส่วนความเข้มข้นพิกที่เกิดจากไฮโรเจนตำแหน่งต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยเทคนิค ¹ H-NMR ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Perkadox 48
4.4	การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox 0.0025-0.0100 phr 49
4.5	ตำแหน่งพิกที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค ¹ H-NMR ของ PBS และ PLA ใน รีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Joncryl..... 61
4.6	สัดส่วนความเข้มข้นพิกที่เกิดจากไฮโรเจนตำแหน่งต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยเทคนิค ¹ H-NMR ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Joncryl..... 62
4.7	การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl 0.5- 2.0 phr 62
4.8	ตำแหน่งพิกที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค ¹ H-NMR ของ PBS และ PLA ใน รีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม TBT 75
4.9	สัดส่วนความเข้มข้นพิกที่เกิดจากไฮโรเจนตำแหน่งต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยเทคนิค ¹ H-NMR ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม TBT 76
4.10	การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และ การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT 0.025-0.100 phr..... 77

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงราคาประเมินของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (คิดเฉพาะราคาวัตถุดิบ ไม่รวมค่าแรง)	101

ตารางผนวก	หน้า
ก.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่เตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่	110
ก.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ที่เตรียม ในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่.....	110
ก.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl ที่เตรียมใน เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่.....	110
ก.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ที่เตรียมใน เครื่องผสมภายในแบบปิด.....	111
ก.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT และ PEG ที่เตรียมใน เครื่องผสมภายในแบบปิด.....	111
ก.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มีการเติม Perkadox หรือ Joncryl ที่เตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่.....	111
ก.7 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (190°C/2.16 kg).....	112
ก.8 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox (190°C/2.16 kg)	112
ก.9 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl (190°C/2.16 kg)	112
ก.10 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT (190°C/2.16 kg)	112
ก.11 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT และ PEG (190°C/2.16 kg)	113
ก.12 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มีการเติม Perkadox หรือ Joncryl (190°C/2.16 kg)	113
ก.13 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox.....	114
ก.14 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl	114
ก.15 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT	114
ก.16 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA	115
ก.17 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox.....	115

ตารางผนวก	หน้า
ก.18 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบสชนิด PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl	115
ก.19 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบสชนิด PBS/PLA ที่มีการเติม TBT	115



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ประเภทของพลาสติกจำแนกตามวัตถุดิบ และความสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ PBS.....6
2.3	แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต Bionolle®7
2.4	โครงสร้างทางเคมีของ PLA.....8
2.5	แสดงการใช้บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นสารช่วยประสาน (compatibilizer)..... 14
2.6	แสดงการใช้พอลิเมอร์ที่มีขั้วอยู่บนสายโซ่โมเลกุลเป็นสารช่วยประสาน (compatibilizer). 15
2.7	แสดงการใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือมีส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็น สารช่วยประสาน (compatibilizer)..... 15
2.8	ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่สัดส่วนต่าง..... 17
2.9	ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงดัดยัดของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS..... 17
2.10	ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่สัดส่วนต่าง ๆ..... 18
2.11	ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLLA/PBS/DCP ที่สัดส่วนต่าง ๆ..... 18
2.12	ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT(75/25) โดยมีการเติม perox 19
2.13	แผนภาพแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ที่มีการเติม เปอร์ออกไซด์ ROOR..... 20
2.14	ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PHBV/PBS(80/20) ที่มีการเติม DCP..... 20
2.15	ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PHB/PBS(80/20) ที่มีการเติม DCP..... 21
2.16	กราฟ TGA ของ PLA ที่มีการเติม TAIC และ DCP..... 21
2.17	โครงสร้างทางเคมีของ (a) Luperox และ (b) Perkadox..... 22
2.18	โครงสร้างทางเคมีของ TBT..... 22
2.19	ผลของปริมาณ TBT ต่อค่า tensile strength และ elongation at break ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT..... 23
2.20	ผลของปริมาณ TBT ต่อค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT เทียบกับ Pure PLA..... 23
2.21	ค่า %Elongation at break และ Young Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA..... 24
2.22	โครงสร้างทางเคมีของ Joncryl ADR®-4368..... 24
3.1	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS)..... 25
3.2	โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) 25
3.3	โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene 25
3.4	โครงสร้างทางเคมีของ Joncryl® ADR-4368..... 26
3.5	โครงสร้างทางเคมีของ Titanium(IV) butoxide..... 26
4.1	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (ก) 85:15, (ข) 80:20 และ (ค) 75:25 ตามลำดับ..... 33

ภาพที่	หน้า
4.2	ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25..... 33
4.3	ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ..... 34
4.4	ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ 35
4.5	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ขาดจากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึดของ (ก) Neat PBS, (ข) Neat PLA, (ค) PBS/PLA(85:15), (ง) PBS/PLA(80:20) และ (จ) PBS/PLA(75:25) ตามลำดับ 35
4.6	ค่าความต้านทานต่อการกระแทก (Impact strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ 36
4.7	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (ก) 85:15, (ข) 80:20 และ (ค) 75:25 ตามลำดับ..... 36
4.8	อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ 37
4.9	TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25ตามลำดับ..... 38
4.10	Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ..... 38
4.11	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ..... 39
4.12	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ 40
4.13	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ 41
4.14	ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ 41
4.15	ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ 42

ภาพที่	หน้า
4.16 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ.....	43
4.17 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	43
4.18 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ	44
4.19 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ	44
4.20 ปริมาณเจล (Gel Content) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	45
4.21 FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	46
4.22 FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	46
4.23 อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA (80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	49
4.24 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	50
4.25 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	50
4.26 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	51
4.27 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ	51

ภาพที่	หน้า
4.28	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ 52
4.29	กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox. 53
4.30	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ..... 54
4.31	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ 54
4.32	ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ 55
4.33	ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ 55
4.34	ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ 56
4.35	ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ..... 57
4.36	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ 57
4.37	สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ 58
4.38	ปริมาณเจล (Gel Content) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ ... 59
4.39	FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ ... 59
4.40	FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ ... 60
4.41	อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ 63

ภาพที่	หน้า
4.42 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ	63
4.43 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ	64
4.44 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ.....	64
4.45 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ.....	65
4.46 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ	66
4.47 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl ..	66
4.48 ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม TBT จากเครื่องผสมภายในแบบปิด	67
4.49 ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT จากเครื่องผสมภายในแบบปิด	68
4.50 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่ไม่มีการเติม TBT (ก) และมีการเติม TBT (ข) T0.025, (ค) T0.050, (ง) T0.075 และ (จ) T0.100 phr ตามลำดับ.....	69
4.51 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่ไม่มีการเติม TBT (ก) และมีการเติม TBT (ข) T0.025, (ค) T0.050, (ง) T0.075 และ (จ) T0.100 phr ตามลำดับ.....	69
4.52 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ	70
4.53 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ.....	70
4.54 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ	71
4.55 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ	71
4.56 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ พอลิเมอร์เบลนด์PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม TBT (ก) และมีการเติม TBT (ข) T0.025, (ค) T0.050, (ง) T0.075 และ(จ) T0.100 phr ตามลำดับ.....	72

ภาพที่	หน้า
4.57	72
4.58	73
4.59	74
4.60	74
4.61	77
4.62	78
4.63	78
4.64	79
4.65	79
4.66	80
4.67	81
4.68	82
4.69	83
4.70	84
4.71	84

ภาพที่	หน้า
4.72 ค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT	85
4.73 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT.....	85
4.74 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT.....	86
4.75 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT	87
4.76 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่ไม่มีการเติมสารประกอบที่วงไวต่อปฏิกิริยาเคมี (ก) และมีการเติม (ข) P0.01 phr, (ค) J1.0 phr และพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่ไม่มีการเติมสารประกอบที่วงไวต่อปฏิกิริยาเคมี (ง) และมีการเติม (จ) P0.01 phr และ (ฉ) J1.0 phr ตามลำดับ.....	88
4.77 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ตามลำดับ.....	89
4.78 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ตามลำดับ.....	90
4.79 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ตามลำดับ.....	90
4.80 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr ตามลำดับ.....	91
4.81 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ พอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr ตามลำดับ	91
4.82 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr ตามลำดับ	92
4.83 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20).....	93
4.84 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20).....	94
4.85 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA (80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr.....	94
4.86 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr.....	95
4.87 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS (80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr.....	95

ภาพที่	หน้า
4.88 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr.....	96
4.89 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA (80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr.....	96
4.90 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr.....	97
4.91 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr.....	97
4.92 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr.....	98
4. 93 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA (80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr.....	98
4.94 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr.....	99
4.95 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr.....	99
4.96 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr.....	100
ภาพผนวก	หน้า
ก.1 DSC thermogram ของ Neat PBS.....	116
ก.2 DSC thermogram ของ Neat PLA.....	116
ก.3 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25).....	117
ก.4 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20).....	117
ก.5 DSC thermogram ของ PBS:PLA(85:15).....	118
ก.6 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0025.....	118
ก.7 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0050.....	119
ก.8 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0075.....	119
ก.9 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0100.....	120
ก.10 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0025.....	120
ก.11 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0050.....	121
ก.12 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0075.....	121
ก.13 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0100.....	122
ก.14 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J0.5.....	122
ก.15 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J1.0.....	123

ภาพผนวก	หน้า
ก.16 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J1.5	123
ก.17 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J2.0	124
ก.18 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J0.5	124
ก.19 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J1.0	125
ก.20 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J1.5	125
ก.21 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J2.0	126
ก.22 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.025	126
ก.23 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.050	127
ก.24 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.075	127
ก.25 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.100	128
ก.26 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.025	128
ก.27 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.050	129
ก.28 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.075	129
ก.29 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.100	130
ก.30 DMA thermogram ของ Neat PBS.....	131
ก.31 DMA thermogram ของ Neat PLA.....	131
ก.32 DMA thermogram ของ PBS:PLA(85:15).....	132
ก.33 DMA thermogram ของ PBS:PLA(80:20).....	132
ก.34 DMA thermogram ของ PBS:PLA(75:25).....	133
ก.35 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS	134
ก.36 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PLA	134
ก.37 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20)	135
ก.38 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) P0.01	135
ก.39 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) J2.0	136
ก.40 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) T0.1	136
ก.41 ผลการวิเคราะห์ $^{13}\text{C-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20)	137
ก.42 ผลการวิเคราะห์ $^{13}\text{C-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) P0.01	137
ก.43 ผลการวิเคราะห์ $^{13}\text{C-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) J2.0	138
ก.44 ผลการวิเคราะห์ $^{13}\text{C-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) T0.1	138

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ปัจจุบันมีปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกขณะ โดยเฉพาะปัญหาที่มาจากขยะพลาสติกมีปริมาณการใช้งานสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของประชากร ซึ่งผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยส่วนใหญ่มีสารตั้งต้นมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นจึงทำให้เกิดขยะที่มาจากพลาสติกมากขึ้น ซึ่งแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การใช้วัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ ซึ่งได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS), พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลต (PBAT), พอลิคาร์โพรแลคโตน (PCL) [1, 2] โดยในบรรดาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง เตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล โดยมอนอเมอร์ทั้งสองสามารถเตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี และวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ (renewable materials) ซึ่งในปัจจุบันเรียกว่า Bio-PBS นอกจากนี้แล้ว PBS ยังสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ จึงนับเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี อย่างไรก็ตามพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตนั้นยังมีความแข็งแรงขณะหลอมค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับพลาสติกที่ใช้งานในปัจจุบัน มีอายุการเก็บสั้น และขึ้นรูปโดยวิธีการเป่าฟิล์มได้ยาก [3] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงความแข็งแรงขณะหลอม โดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความแข็งแรงขณะหลอมสูงกว่า และมีราคาถูกลงกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นั่นคือพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย และยังมีจำหน่ายทั่วไปอยู่หลายเกรด [4, 5] โดยการทำให้พอลิเมอร์เบลนด์นั้นเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากทำได้ง่าย และได้สมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเสริมกัน แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีความเข้ากันได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ T. Yokohara และ คณะ [6] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS พบว่า PLA และ PBS ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ในสภาวะการหลอมเหลวจึงทำให้เกิดการแยกเฟสกัน และส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี และจากงานวิจัยของ A. Bhatia และ คณะ [4] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของ PLA และ PBS พบว่าจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และสัญญาณวิทยาแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ของ PLA และ PBS ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ในทุกสัดส่วนการผสม ส่งผลให้เกิดการแยกเฟสกัน และมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี โดยจะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม PLA ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่า tensile strength และ modulus เป็นไปตามกฎการผสม ซึ่งอาจเป็นผลจากการผสมเข้ากันได้บางส่วน โดยในงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS กับ PLA ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึงแม้ PBS และ PLA จะเป็นพอลิเมอร์จำพวกเอสเทอร์เหมือนกัน แต่พอลิเมอร์ทั้งสองสามารถผสมเข้ากันได้แค่ในบางสัดส่วนเท่านั้น ที่จะส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี

โดยความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งการเติมสารช่วยประสาน (compatibilizer) ลงไป จะช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเฟสได้ โดยสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี (reactive compounds) คือสารช่วยประสานที่มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ ดังนั้นการใช้สารเหล่านี้จึงช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเฟสได้ โดยใช้ในปริมาณที่น้อยเพื่อเป็นการลดต้นทุน และลดความเป็นพิษจากสารเคมีด้วย

สารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีการนำมาใช้ในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอสเทอร์ คือ Glycidyl methacrylate (PLA/PBAT [7]), สารจำพวก Isocyanate (PLA/PCL [8] และ PLA/PBS [9]), สารจำพวก Peroxide (PLA/PBAT [10], PLLA/PBS [11], และ PHBV/PBS [12]), สารจำพวก chain extender (PLA/PA6 [13] และ PLA/PBAT [14]) และ Transesterification catalyst (PBS/PTES [15] และ PLA/PBAT [16])

การเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี สามารถทำได้โดยการผสมกับพอลิเมอร์ตัวใดตัวหนึ่งก่อน แล้วจึงนำมาผสมกับพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่ง (หลายขั้นตอน) หรือผสมกับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในขณะทำการผสม (ขั้นตอนเดียว) สำหรับวิธีการแรกนั้นมีข้อดี คือ สารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้เฉพาะเจาะจง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง หรือมีความหนืดใกล้เคียงกับพอลิเมอร์อีกชนิดที่จะนำไปผสม โดยหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกตัวช่วยให้มีแรงยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดี แต่วิธีนี้มีหลายขั้นตอน ซึ่งมีความยุ่งยากในกระบวนการการผลิต จึงนำมาสู่การผสมแบบขั้นตอนเดียว หรือการผสมแบบรีแอคทีฟ โดยวิธีการนี้จะเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีลงในพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในขณะทำการผสม ซึ่งเป็นการลดขั้นตอน และทำให้มีความสะดวกในการทำงาน

งานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมร่วมกับพอลิแลคติกแอซิด มีระบบการผสมเป็นแบบรีแอคทีฟ โดยมีการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีในปริมาณไม่เกิน 2 phr และศึกษาอิทธิพลของการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงรีโอโลยี เพื่อให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติตามต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1. ศึกษากระบวนการทำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการรีแอคทีฟเอกซ์ทรูชัน โดยใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเมตริกซ์หลัก

1.2.2. ศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงรีโอโลยี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการทำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS และ PLA แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี (non-reactive) ที่สัดส่วนการผสม PBS:PLA เป็น 85:15, 80:20 และ 75:25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณของสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี 3 ชนิด คือ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox 14-40B-PD), Joncryl® ADR-4368 และ Titanium(IV) butoxide (TBT)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบวิธีการและวางแผนการวิจัย

1.4.3 ดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมร่วมกับพอลิแลคติกแอซิด ในระบบการผสมแบบรีแอกทีฟ เพื่อศึกษาผลของการใช้สารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ ทั้งสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการไหล สมบัติเชิงรีโอโลยี และโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้ โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนการผสมของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิแลคติกแอซิด แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

ทำการเบลนด์ PBS และ PLA ที่อัตราส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder)

ศึกษาสมบัติในด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี (non-reactive blends) ได้แก่ สัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการไหล และสมบัติเชิงรีโอโลยี

ส่วนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของชนิด และปริมาณการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

1) พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox หรือ Joncryl

ทำการเบลนด์ PBS, PLA และ Perkadox หรือ Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder)

ศึกษาสมบัติในด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ได้แก่ สัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการไหล และสมบัติเชิงรีโอโลยี

2) พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Titanium (IV) butoxide (TBT)

ทำการเบลนด์ PBS, PLA และ TBT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิด (Internal mixer)

ศึกษาสมบัติในด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ได้แก่ สัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการไหล และสมบัติเชิงรีโอโลยี

1.4.4 วิเคราะห์ผลการวิจัย

1.4.5 สรุปผลการวิจัย

1.4.6 รายงานผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่ดี สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดเข้าเป้า อัดขึ้นรูป และเป่าฟิล์มได้ มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานนำไปเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่มีราคาถูกลง ซึ่งผลการวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดความรู้เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาวัสดุที่มีสมบัติหลากหลายนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

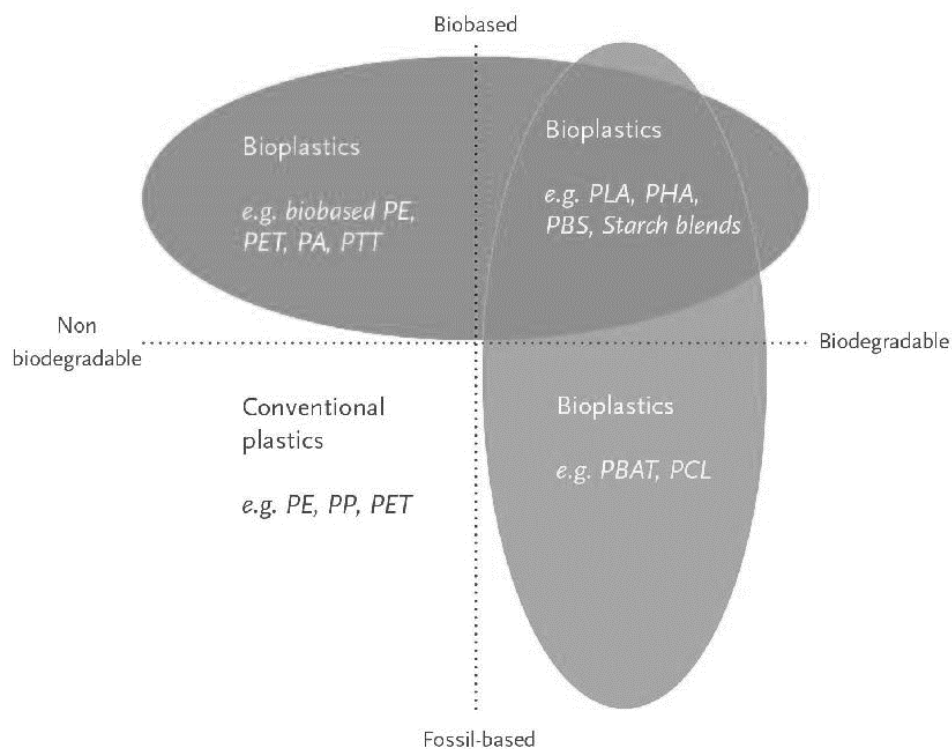
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากวัสดุนั้นเปลี่ยนสภาพกลายเป็นปุ๋ยหมักได้เมื่อถูกนำไปหมักในสภาวะที่เหมาะสม และกลับสู่ธรรมชาติได้โดยกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งวัสดิบผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นได้มาจากทั้งมวลชีวภาพ (biomass) หรือจากปิโตรเคมี ซึ่งการจำแนกประเภทของพลาสติกชีวภาพนั้นมีหลายลักษณะแตกต่างกันออกไป ดังภาพที่ 2.1

2.1.1 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ [17] แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1.1 พลาสติกที่ผลิตจากวัสดิบธรรมชาติ (Bio-based plastics): เป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากผลิตจากพืช หรือวัสดิบที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ โดยอาศัยกระบวนการหมัก (fermentation) เช่น bio-based PE, PP, PET, PA และ PTT

2.1.1.2 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics): เป็นพลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี ซึ่งย่อยสลายได้ทางธรรมชาติเมื่อถูกฝังกลบ เช่น PBAT และ PCL

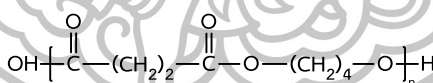
2.1.1.3 พลาสติกที่ผลิตจากวัสดิบธรรมชาติ และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น PLA, PHA และ PBS



ภาพที่ 2.1 ประเภทของพลาสติกจำแนกตามวัตถุดิบ และความสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [17]

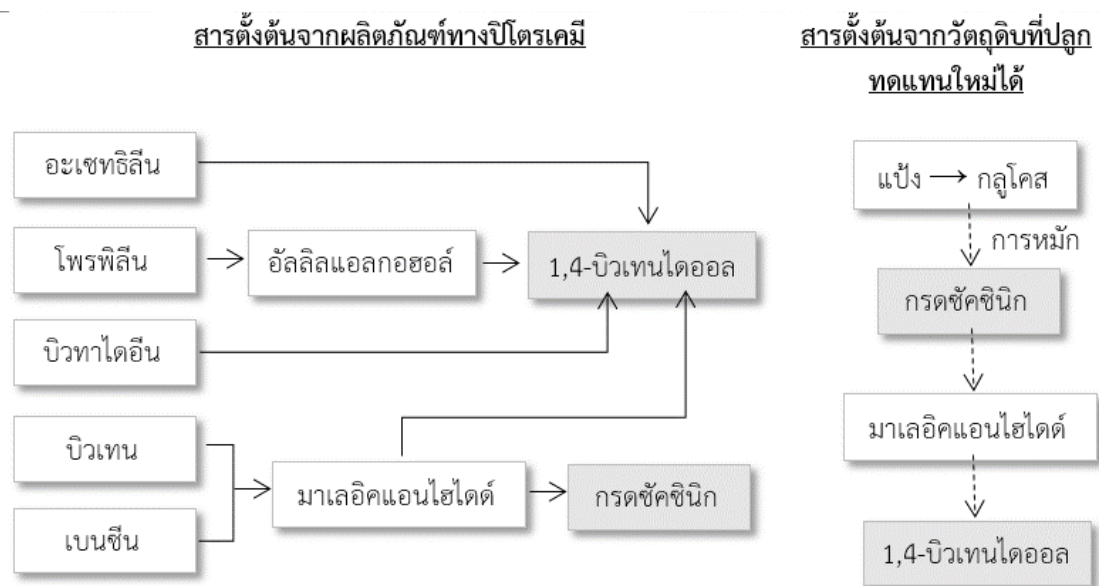
2.2 พอลิบิวทีเร็นซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS [18]

PBS เป็นพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PBS

กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออลเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต PBS โดยในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามกรดซัคซินิกยังสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้จากกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก และยังสามารถเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4-บิวเทนไดออล



ภาพที่ 2.3 แหล่งสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิต Bionolle® [18]

2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

ผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี: เริ่มจากเปลี่ยนก๊าซบิวเทน ไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเปลี่ยนไปเป็นกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล

วัตถุดิบที่ปลุกใหม่ทดแทนได้: กรดซัคซินิกที่ได้จากการหมักวัตถุดิบที่ปลุกทดแทนใหม่ได้ ถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล

2.2.2 สมบัติของ PBS

PBS เป็นเทอร์โมพลาสติก สีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 1.26 g/cm^3 ซึ่งใกล้เคียงกับ PLA โดย PBS มี T_g ประมาณ -40°C มีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 115°C โดยตารางที่ 2.1 แสดงค่า flexural modulus, yield stress, strain at break, impact strength และ deflection temperature ของ PBS พบว่ามีสมบัติเชิงกลที่ดี และทนความร้อนสูง นอกจากนี้ยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วย

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนต (GS Pla, Mitsubishi Co., Ltd.) เกรดต่างๆ [19]

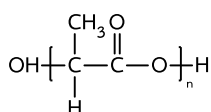
สมบัติ	วิธีการทดสอบ	AZ series standard			FZ series food contact		
		Extrusion film	Film Injection	injection	Extrusion film	Film Injection	injection
		AZ91TN	AZ71TN	AZ61TN	FZ91PD	FZ71PD	FZ61PD
MFR(190°C/21.18N) (g/10 min)	ISO1133	4	22	40	6	22	40
Specific gravity (g/cm ³)	ISO1183	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
Flexural modulus (MPa)	ISO 178	530	540	550	650	630	610
Yield stress (MPa)	ISO 527	37	34	34	39	39	39
Strain at break (%)	ISO 527	300	290	140	160	120	20
Izod impact strength (23°C), (kJ/m ²)	ISO180	8.2	6.9	6.2	7.3	7.0	5.9
Deflection temperature under load (0.45MPa), (°C)	ISO 75	84	84	83	91	90	88

2.2.3 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

PBS สามารถย่อยสลายได้โดยผ่านเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะเอสเทอร์ จนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง จากนั้นจะเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต่อไป ซึ่งมีงานวิจัยระบุว่าแผ่นฟิล์ม PBS หนา 40 ไมครอน สามารถย่อยสลายถึงร้อยละ 50 ภายในเวลา 1 เดือนในดินที่ใช้เพาะปลูกทั่วไป

2.3 พอลิแลคติกแอซิด Poly(lactic acid), PLA [18]

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid) หรือพอลิแลคไทด์ (Polylactide) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในประเภทพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพกลุ่มพอลิเอสเทอร์ สำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าอย่างแพร่หลายในขณะนี้ โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PLA

2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

กรดแลคติกจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ จะถูกนำมาให้ความร้อนภายใต้สุญญากาศ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการควบแน่นกันแล้วเชื่อมต่อเป็นพอลิแลคติกแอซิดสายโซ่ยาว

กรดแลคติก 2 โมเลกุลจะเกิดการรวมตัวเป็นวงแหวนแลคไทด์มอนอเมอร์ จากนั้นจะเกิดการเปิดวงแล้วเชื่อมต่อเป็นสายโซ่ยาวพอลิแลคไทด์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบดีบุก เช่น ทินออกโทเอต (tin(II) octoate)

2.3.2 สมบัติของ PLA

PLA มีความแวววาวสูง และใส โดย PLA สามารถเก็บกักกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง แต่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี ซึ่งจากตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของ PLA เกรด extrusion (2003D) และ oriented film (4043D) พบว่า PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็ง และเปราะ จึงมีข้อจำกัดในด้านการขึ้นรูปเพื่อใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (NatureWorks, Ingeo) เกรดต่างๆ [20, 21]

สมบัติ	วิธีการทดสอบ	Extrusion	Oriented film
		2003D	4043D
MFR (210°C/2.16kg) (g/10 min)	D1238	5-7	-
Specific gravity (g/cm ³)	D792	1.24	1.24
Tensile Strength @ Break, (MPa)	D882	53	-
Tensile Yield Strength, (MPa)	D882	60	MD : 16 (110.1) TD : 21 (144.5)
Tensile Modulus, (GPa)	D882	3.5	MD : 480(3302) TD : 560(3852)
Tensile Elongation (%)	D882	6.0	MD : 160% TD : 100%
Notched Izod Impact, (J/m ²)	D256	12.81	2.5

2.3.4 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

PLA สามารถย่อยสลายได้โดยการหมักที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยขั้นตอนแรก PLA จะเกิดไฮโดรไลซิส และถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ และกรดแลคติก ภายใน 2 สัปดาห์ จากนั้นจะถูกย่อยต่อไปอย่างรวดเร็วโดยจุลินทรีย์ จนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ

2.4 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend)

การทำพอลิเมอร์เบลนด์เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยการนำพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิด ในสถานะของไหล ได้แก่ สารละลาย หรือสารหลอมเหลว มาผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous blending) ได้เป็นพอลิเมอร์เบลนด์ การทำพอลิเมอร์เบลนด์เป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ และใช้เวลาน้อย เมื่อเทียบกับการหลอมพอลิเมอร์ชนิดใหม่ หรือหาวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบใหม่ นอกจากนี้ยังได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลาย เพียงแค่ปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสม แต่การเบลนด์พอลิเมอร์ต่างชนิดกันให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัมนั้นเป็นไปได้ยาก และพบว่าในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยจะต้องมีการกระจายตัวขนาดเล็ก มีความสม่ำเสมอ และมีแรงยึดติดที่พื้นผิวดี (Interfacial adhesion) มิฉะนั้นจะทำให้เกิดจุดบกพร่อง (Defects) ภายในพอลิเมอร์เบลนด์ที่รอยต่อระหว่างเฟส ทำให้มีการส่งผ่านแรงจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งได้ไม่ดี และเป็นจุดเริ่มต้นในการแตกหัก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ที่นำมาผสม ดังนั้นในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ จึงต้องพิจารณาความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์เบลนด์

2.4.1 ความสามารถในการผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวทางเทอร์โมไดนามิกส์ของพอลิเมอร์ (Miscibility of polymers)

การพิจารณาการเข้ากันได้ของการผสมนั้นจะพิจารณาจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) พอลิเมอร์ที่สามารถผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันจะต้องมีค่า Gibbs free energy ของการผสม (ΔG_{mix}) เป็นลบ ซึ่งค่า ΔG_{mix} สามารถหาได้จากสมการ 2.1

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \quad (2.1)$$

ในกรณีของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เอนโทรปี (Entropy, ΔS_{mix}) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นถ้าค่า ΔG_{mix} อาจมีค่าเป็นลบได้ เมื่อเอนทัลปี (enthalpy, ΔH_{mix}) ของการผสมเป็นลบ แสดงว่ากระบวนการผสมเป็นระบบที่มีการคายความร้อน (Exothermic) โดยเกิดจากการทำอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพอลิเมอร์กับองค์ประกอบที่นำมาผสมกัน โดย Interaction นั้นอาจจะเป็นได้ทั้ง Ionic interaction และ Nonbonding interaction เช่น Hydrogen bonding, Ion-dipole, Dipole-dipole และ Donor-acceptor interaction ยกเว้น Van der Waals interaction นอกจากนี้ความสามารถในการเข้ากันได้อาจขึ้นกับอุณหภูมิเป็นอย่างมากด้วย

2.4.2 ชนิดของพอลิเมอร์เบลนด์ (Types of polymer blends)

การจำแนกพอลิเมอร์เบลนด์จากความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible) ในระดับโมเลกุล (Molecular level) แบ่งได้ 3 แบบดังนี้

1) ผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ (Completely miscible blend) พอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันได้ อย่างสมบูรณ์จะมีค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs Free energy) เป็นลบ ($\Delta G_{\text{mix}} \approx \Delta H_{\text{mix}} \leq 0$) และมีค่า Second derivative เป็นบวกหรือ Chemical potential เพิ่มขึ้น ($\partial^2 \Delta G_{\text{mix}} / \partial \phi^2 > 0$, ϕ คือ volume fraction ของ Dispersed phase) เนื่องจากเกิด Interaction ที่จำเพาะขึ้น และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะมีความเป็นเนื้อเดียวกันในระดับนาโนเมตร โดย Dispersed phase จะมีขนาด 2-4 nm หรือในช่วงของ Sub-micron ซึ่งเล็กกว่า Radius of gyration ของพอลิเมอร์ (5-30 nm) แต่ไม่ถึงในระดับโมเลกุล ตัวอย่างของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสมกันได้ดีสมบูรณ์ในช่วง อุณหภูมิที่กว้าง และทุกสัดส่วนการผสม ได้แก่ Polystyrene กับ Poly(dimethylphenylene oxide) (PS/PPO) ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้นั้นจะมีสมบัติของ PPO ที่มีความต้านทานต่อ ความร้อน ไม่เกิดการลुकติดไฟ และมีความยืดหยุ่น กับสมบัติของ PS ที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก พอลิเมอร์ที่ผสมกันได้อย่างสมบูรณ์นั้นจะมี Glass transition temperature (T_g) เพียงค่าเดียว ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่าง T_g ของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ผสมแต่ละตัว

2) ผสมเข้ากันได้บางส่วน (Partially miscible blends) พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน จะสามารถละลายกับพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งได้ในบางส่วน ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มี สัณฐานวิทยาที่มีความละเอียด และมีสมบัติที่ยอมรับได้ มักเรียกพอลิเมอร์เบลนด์ชนิดนี้ว่า “Compatible polymer blend” ซึ่งพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้ จะมีค่า T_g ของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่เกิด การเบนเข้ามาหากัน โดยตัวอย่างของพอลิเมอร์เบลนด์แบบนี้ได้แก่ Polycarbonate และ Acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer (PC/ABS) ซึ่งมีพื้นผิวระหว่างเฟส (Interphase) มาก และมีแรงยึดติดที่พื้นผิวระหว่างเฟสที่ดี (Interfacial adhesion)

3) ผสมเข้ากันไม่ได้ (Fully immiscible) จะมีค่าพลังงานอิสระ (Free energy) เป็นบวก ($\Delta G_{\text{mix}} \approx \Delta H_{\text{mix}} > 0$) พอลิเมอร์เบลนด์ชนิดนี้จะมีสัณฐานวิทยาที่หยาบ มีพื้นผิวระหว่างเฟสน้อย และมีแรงยึดติดระหว่างเฟสที่ไม่ดี ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้นั้นแย่ โดยจะแสดง T_g ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดแยกกันอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเราสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatible) ของพอลิเมอร์เบลนด์ชนิดนี้โดยการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ [22]

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของส่วนประกอบที่นำมาผสมกัน และเทคนิคที่ใช้ในการผสม

$$\text{Viscosity ratio} = \frac{\text{Viscosity of Dispersed phase}}{\text{Viscosity of Matrix phase}} \quad (2.2)$$

2.4.1.1 ปัจจัยทางธรรมชาติของส่วนประกอบ [22]

อัตราส่วนความหนืด (Viscosity ratio) คือ อัตราส่วนของความหนืดของ เฟสกระจาย (dispersed phase) ต่อความหนืดของเฟสหลัก (matrix phase) ของพอลิเมอร์เบลนด์ ดังสมการที่ 2.2 โดยพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความหนืดของ dispersed phase ต่ำกว่า matrix phase (Viscosity ratio < 1) จะมีลักษณะทางกายภาพของ dispersed phase ที่ละเอียด และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (uniform) ในทางตรงกันข้าม ถ้า dispersed phase มีความหนืดสูงกว่า matrix phase (Viscosity ratio > 1) จะมีลักษณะทางกายภาพของ dispersed phase จะค่อนข้างหยาบ [23]

องค์ประกอบ (Composition) การเพิ่มสัดส่วนของ dispersed phase จะทำให้ขนาดอนุภาค (particle) ของมันใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของ dispersed phase แต่อย่างไรก็ตาม ความตึงผิว (interfacial tension) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน จะมีผลต่อการรวมตัวกันของเฟสดังกล่าวด้วย โดยถ้ามีความตึงผิวน้อยจะสามารถลดการรวมตัวกันของ dispersed phase ได้

ความยืดหยุ่น (Elasticity) เนื่องจากความเป็น viscoelastic ของส่วนประกอบในพอลิเมอร์เบลนด์ จะส่งผลต่อลักษณะการไหลของพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการผสมได้ โดยพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงจะคืนกลับสู่รูปเดิมได้ง่าย จึงส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของ dispersed phase ได้

2.4.1.2 ปัจจัยจากเทคนิคที่ใช้ในการผสม [22]

การผสมภายใต้แรงเชิงกล (Mechanical blending) เป็นวิธีการผสมพอลิเมอร์ผ่านเครื่องมือ เช่น เครื่องรีดสองลูกกลิ้ง (two-roll-mill), เครื่องผสมภายใน (internal mixer) และเครื่องอัดรีด (extruder) ทำให้เกิดการแตกตัวของ dispersed phase โดยสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็ว และเวลาที่ใช้ในการผสม

การผสมในสภาวะสารละลาย (Solution mixing) เป็นการผสมที่ต้องอาศัยการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย ซึ่งมี 2 วิธี คือ Casting โดยการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย

(solvent) แล้วนำสารละลายของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาผสมกัน จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายออกไป และ Freeze drying ซึ่งมีวิธีการคล้ายกับ Casting แต่จะเอาตัวทำละลายออกด้วยการระเหิด ซึ่งความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ และการแยกตัวทำละลายออกจากพอลิเมอร์เบลนด์

การผสมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) พอลิเมอร์จะถูกผสมภายใต้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion) ในระบบที่มีองค์ประกอบของมอนอเมอร์ (monomer), อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) และตัวเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่ละลายได้ในตัวกลาง โดยวิธีการนี้ dispersed phase จะมีการแตกตัว และกระจายตัวค่อนข้างดี

การผสมผ่านปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลต่างชนิดในสภาวะหลอม (Reactive blending) เป็นการผสมที่มีการเติมโคพอลิเมอร์ (copolymer) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาแลกเปลี่ยน (trans-reactive catalyst) ลงไปเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยสารดังกล่าวจะลดแรงตึงผิวของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน หรือทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ ในระหว่างการผสมแบบหลอม (melt blending) พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง (homogeneous)

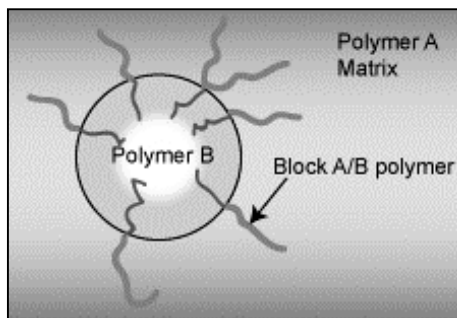
อย่างไรก็ตาม แต่ละเทคนิคที่ใช้ขึ้น ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์จะขึ้นอยู่กับ การได้รับแรงเค้นเฉือน (shear stress) ในระหว่างการผสมด้วย โดยเมื่อพอลิเมอร์ที่ได้รับแรงเค้นเฉือนในระหว่างการผสมสูง จะมีขนาดอนุภาคของ dispersed phase ที่เล็กลง

2.5 สารช่วยประสาน (compatibilizer) [24]

สารช่วยประสาน (compatibilizer) คือพอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของเฟสกระจาย โดยสารช่วยประสานที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.5.1 บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Block or Graft copolymer)

บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์จะเข้าไปแทรกบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์เพื่อลดแรงตึงผิว ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าโคพอลิเมอร์ด้านหนึ่งจะเป็นส่วนที่เข้ากับพอลิเมอร์ A (เฟสต่อเนื่อง) ส่วนโคพอลิเมอร์อีกด้านหนึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ B (เฟสที่กระจายตัว) ส่งผลให้แรงตึงผิวของ พอลิเมอร์ลดลง ทำให้เกิดการยึดติดที่พื้นผิว และเกิดการกระจายตัวของพอลิเมอร์ B ที่ดีขึ้น



ภาพที่ 2.5 แสดงการใช้บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นสารช่วยประสาน (compatibilizer) [24]

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ ซึ่งนิยมใช้บล็อกโคพอลิเมอร์มากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปแทรกอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยประสาน จากการทดสอบประสิทธิภาพของสารช่วยประสาน โดยการทดสอบความทนแรงดึง พบว่า

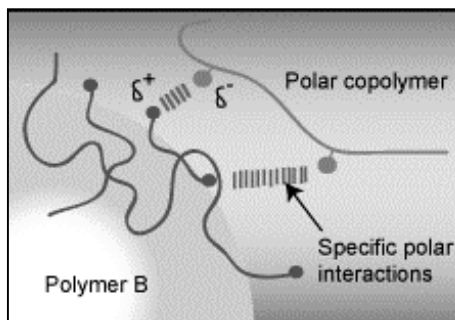
บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์

ไคบล็อกโคพอลิเมอร์ประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์

ไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

2.5.2 พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วแต่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Non-reactive polymer containing polar groups)

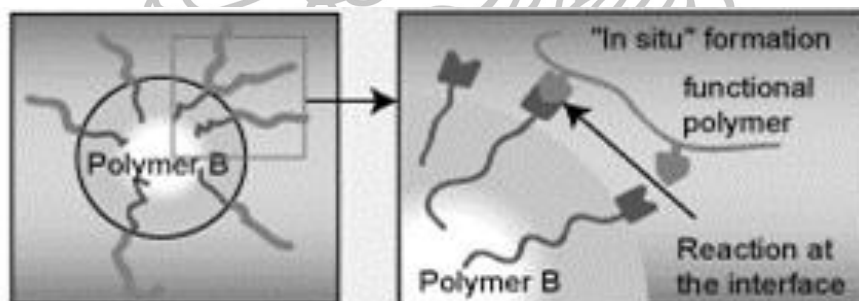
พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วแต่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา คือโคพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วอยู่บนโมเลกุลสามารถเกิดอันตรกิริยา (พันธะไฮโดรเจน) กับพอลิเมอร์ได้ โดยถ้าเกิดอันตรกิริยานี้มาก จะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับโคพอลิเมอร์นี้มีความแข็งแรงมาก ส่งผลทำให้เกิดความเข้ากันได้ดี โดยสารช่วยประสาน (compatibilizer) นั้นจะต้องเข้ากันได้กับเฟสใดเฟสหนึ่ง (มักเป็นเฟสที่ไม่มีขั้ว) และจะต้องทำให้เกิดอันตรกิริยากับเฟสอื่นที่อยู่ในระบบ



ภาพที่ 2.6 แสดงการใช้พอลิเมอร์ที่มีขั้วอยู่บนสายโซ่โมเลกุลเป็นสารช่วยประสาน (compatibilizer)[24]

2.5.3 พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือมีส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Functional/ Reactive polymer)

พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือมีส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน โดยสารในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยส่วนของโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วแต่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และหมู่ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ Maleic anhydride (MA) และ glycidyl methacrylate (GMA) เป็นต้น



ภาพที่ 2.7 แสดงการใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน หรือมีส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารช่วยประสาน (compatibilizer) [24]

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสาน มักนำเอาพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือมีส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์ หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด

2.5.4 การทำให้เกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม (In-situ grafting polymerization)

การทำให้เกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม (reactive blending) เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากัน โดยต่างจากวิธีอื่น ๆ คือ พอลิเมอร์ที่นำมาผสมจะถูกตัดแปรให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ซึ่งการผสมแบบ reactive blending สามารถนำมาใช้ได้กับ ทั้งการผสมแบบต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการผสม มีดังนี้

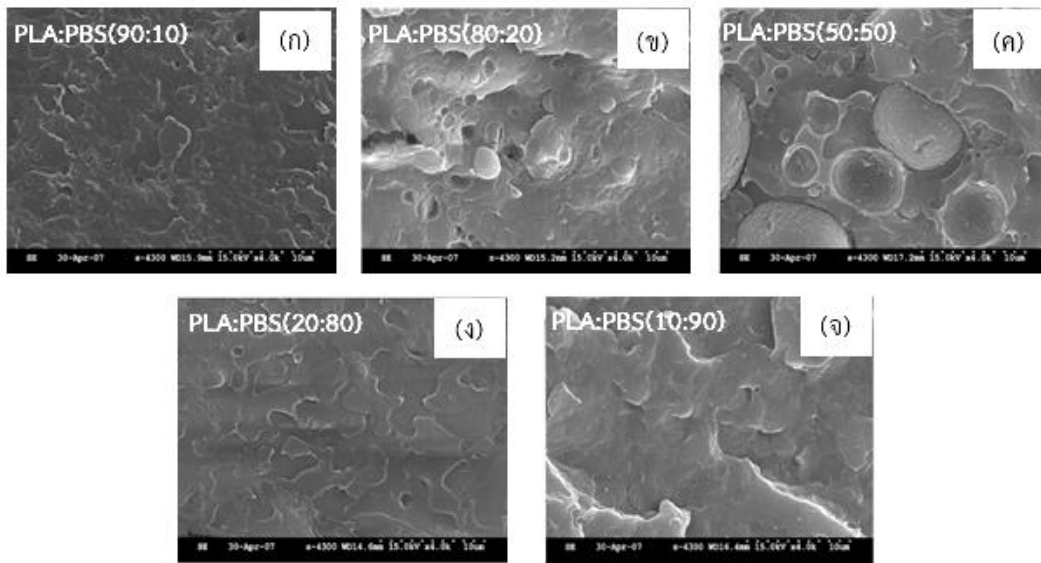
เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (initiator) ในระหว่างการผสม

เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่มักเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น

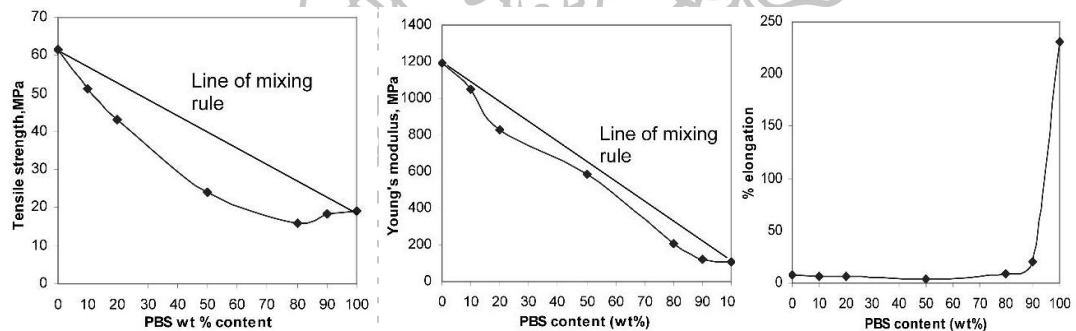
เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อก หรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่มีแรงเฉือนสูง และมีการเติมตัวเร่ง (catalyst)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ A. Bhatia และคณะ [4] ที่ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของ PLA และ PBS ในด้านสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่สัดส่วน PLA/PBS เป็น 100/0, 90/10, 80/20, 50/50, 20/80, 10/90 และ 0/100 โดยน้ำหนัก ที่มีการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin screw extruder) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติในด้านต่าง ๆ พบว่าจากการทดสอบสัณฐานวิทยาด้วย SEM แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองเกิดการแยกเฟสกันในบางสัดส่วนการผสม จากการทดสอบ DSC แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วนการผสมของ PLA ตั้งแต่ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไปนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ glass transition temperature (T_g) ของ PLA ในพอลิเมอร์เบลนด์ อาจเนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองไม่มีความเข้ากัน จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า tensile strength, modulus และ elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลงตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น และพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วนของ PLA ตั้งแต่ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป มีค่า tensile strength และ modulus เป็นไปตามกฎการผสม



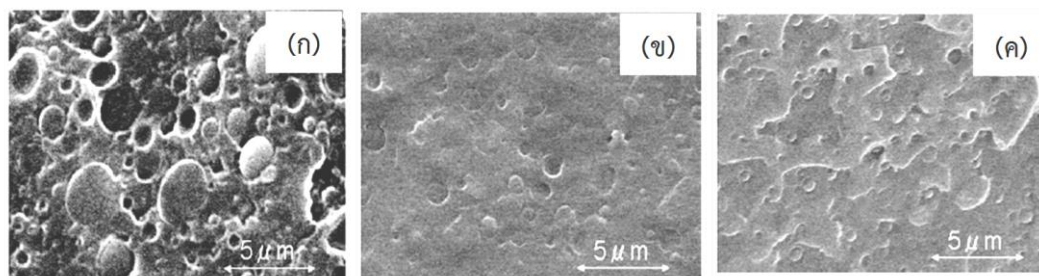
ภาพที่ 2.8 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่สัดส่วนต่าง [4]



(ก) Tensile strength (ข) Modulus (ค) % Elongation at break

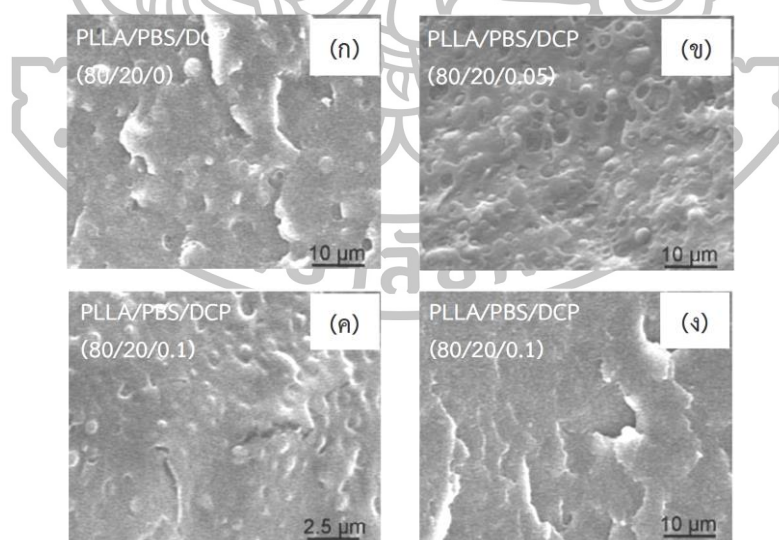
ภาพที่ 2.9 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงยืดของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS [4]

จากงานวิจัยของ T. Yokohara และคณะ [6] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติในด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS โดยทำการผสม PLA และ PBS ที่สัดส่วน PLA/PBS เป็น 100/0, 90/10 และ 80/20 ด้วยเครื่อง internal mixer จากนั้นนำมาศึกษาโครงสร้าง และสมบัติในด้านต่าง ๆ ด้วยเทคนิค SEM, DSC, DMA และ optical polarized microscope จากผลการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ และเกิดการแยกเฟสกัน นอกจากนี้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC และ DMA พบว่า การมีเฟสของ PBS ทำให้ PLA สามารถเกิดการตกผลึกได้เพิ่มขึ้น (cold crystallization) ซึ่งเมื่อมีปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น อุณหภูมิการตกผลึกของ PLA จะต่ำลง แสดงให้เห็นว่า PBS ที่เติมลงไปนั้น ทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มการเกิดผลึก (nucleating agent) ให้กับ PLA



ภาพที่ 2.10 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่สัดส่วนต่าง ๆ [6]

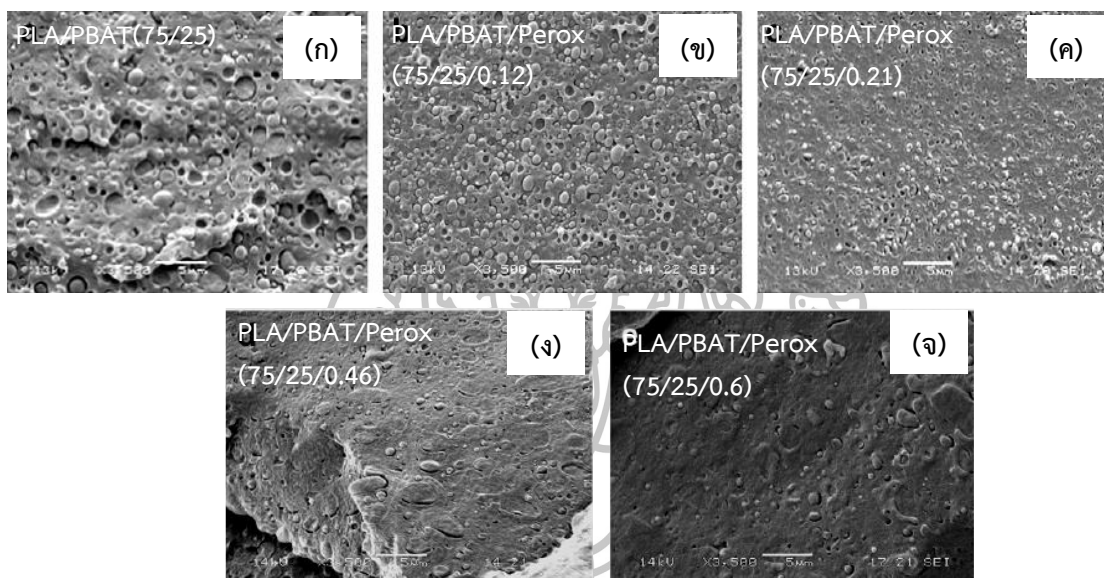
R. Wang และคณะ [11] ได้ศึกษาการปรับปรุงความเหนียวของ PLLA โดยการทำให้เป็นพอลิเมอร์เบลนด์ร่วมกับ PBS ที่สัดส่วน PLLA/PBS เป็น 80/20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติมไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ในปริมาณ 0.05-0.2 phr พบว่าการเติม PBS ทำให้ PLLA สามารถยึดได้มากขึ้น และเมื่อเติม DCP 0.05-0.2 phr พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีค่า impact strength สูงขึ้น แต่ tensile strength และ modulus มีค่าลดลงเมื่อมีการเติม DCP ในปริมาณมากขึ้น จากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยกล้อง POM พบว่า PBS ทำให้หน้าที่เป็นสารริเริ่มการเกิดผลึกให้แก่ PLLA แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติม PBS ลงไปนั้น ไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณผลึกของ PLLA มากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการเติม DCP ในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการเกิด cold crystallization ของ PLLA มีค่าลดลง ความเหนียวของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการที่ PBS สามารถกระจายตัวได้ดี และมีแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของ PLLA และ PBS ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้บางส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์



ภาพที่ 2.11 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLLA/PBS/DCP ที่สัดส่วนต่าง ๆ [11]

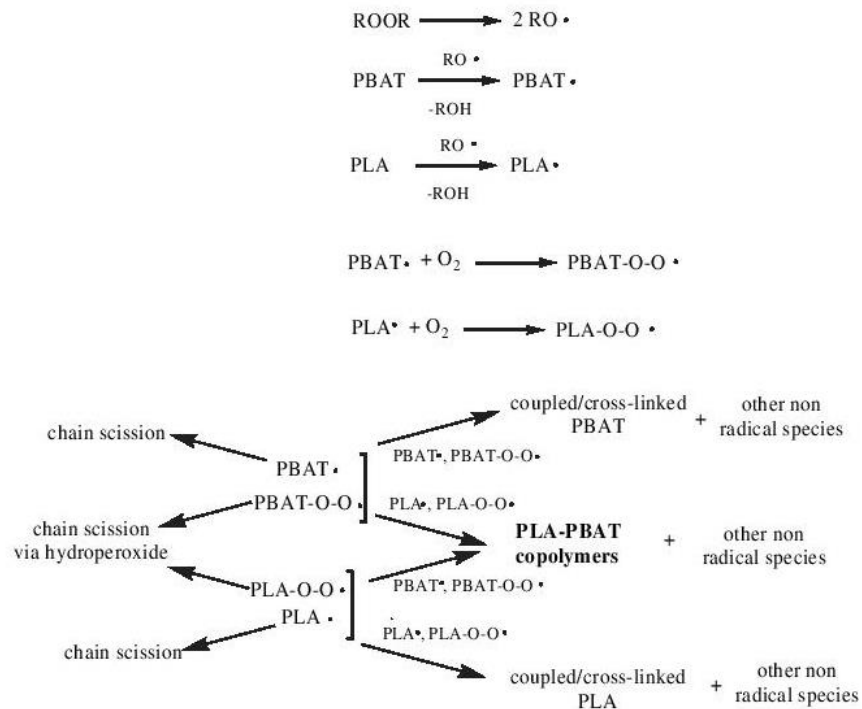
M.-B. Coltelli และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาผลของรีแอกทีฟเอเจนต์ต่อโครงสร้าง และสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT โดยมีการเติมรีแอกทีฟเอเจนต์คือ 2,5-dimethyl-

2,5-di(tert-butylperoxy) hexane หรือ perox ในปริมาณไม่เกิน 0.6 phr จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ที่มีการเติม perox จะมีการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของ PLA และ PBAT ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้บางส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ เนื่องมาจาก PLA และ PBAT สามารถเกิดปฏิกิริยาผ่าน free radical ได้ นำไปสู่การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ให้ดีขึ้น



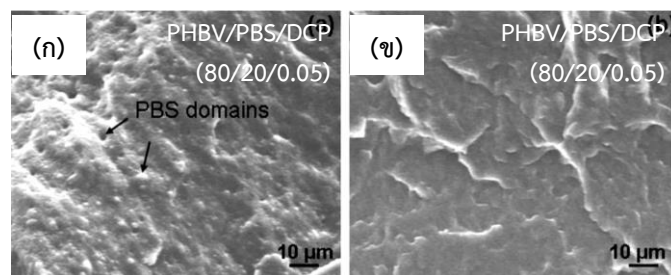
ภาพที่ 2.12 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT(75/25) โดยมีการเติม perox [10]



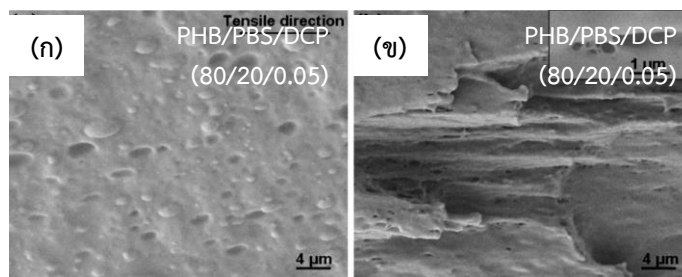


ภาพที่ 2.13 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ที่มีการเติมเปอร์ออกไซด์ ROOR [10]

P. Ma และคณะ [12] ได้ศึกษาผลของรีแอคทีฟเอเจนต์ต่อโครงสร้างและสมบัติด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PHBV/PBS และ PHB/PBS โดยมีการเติมรีแอคทีฟเอเจนต์คือ Dicumyl peroxide (DCP) ในปริมาณไม่เกิน 1.0 phr จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PHBV/PBS และ PHB/PBS ที่มีการเติม DCP จะมีการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวของ PHBV/PBS และ PHB/PBS ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้บางส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ เนื่องจาก PHBV/PBS และ PHB/PBS สามารถเกิด free radical ทำให้เกิดเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งช่วยพอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

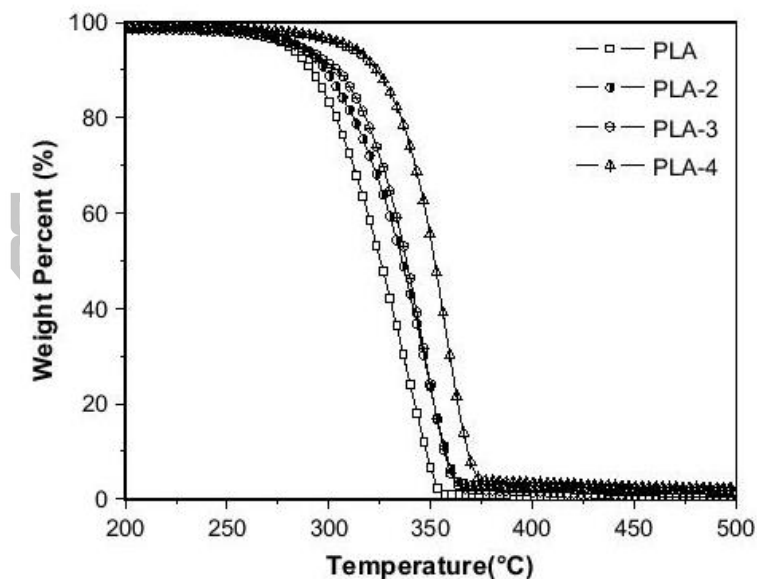


ภาพที่ 2.14 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PHBV/PBS(80/20) ที่มีการเติม DCP [12]



ภาพที่ 2.15 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ PHB/PBS(80/20) ที่มีการเติม DCP [12]

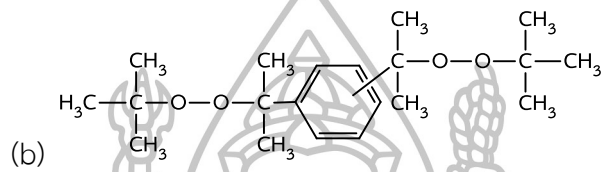
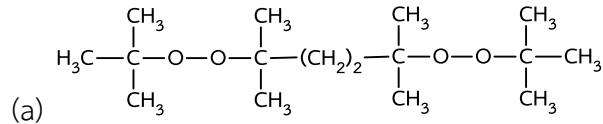
M. Harada และคณะ [8] ได้ศึกษาผลของสารช่วยประสานต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PCL ที่มีการเติม LTI ในปริมาณไม่เกิน 0.5 phr พบว่า impact strength, ultimate strain และ tensile stress มีค่าสูงขึ้น และในงานวิจัยของ S. Yang และคณะ [25] ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของ PLA ที่มีการเติม triallyl isocyanurate (TAIC) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวาง และ dicumyl peroxide (DCP) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา จากผลการทดสอบ TGA พบว่าอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เริ่มเกิดการสลายตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติม TAIC และ DCP ลงในปริมาณมากขึ้น



ภาพที่ 2.16 กราฟ TGA ของ PLA ที่มีการเติม TAIC และ DCP [25]

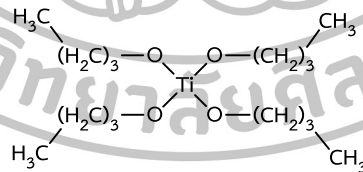
K. Sotho [26] ได้ศึกษาผลของรีแอคทีฟเอเจนต์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติมเปอร์ออกไซด์ 2 ชนิด คือ Perkadox และ Luperox ในปริมาณไม่เกิน 1 phr จากการทดสอบ SEM พบว่าขนาดอนุภาคของ PLA ที่กระจายตัวอยู่ใน PBS มีขนาดเล็กลง เมื่อมีการเติมเปอร์ออกไซด์ ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ และจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์

PBS/PLA ที่มีการเติมเปอร์ออกไซด์มีค่า impact strength และ tensile strength สูงขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่ปริมาณเปอร์ออกไซด์เท่ากัน พบว่า Perkadox ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และ สันฐานวิทยาดีกว่า Luperox และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดคือ พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox 0.005 phr

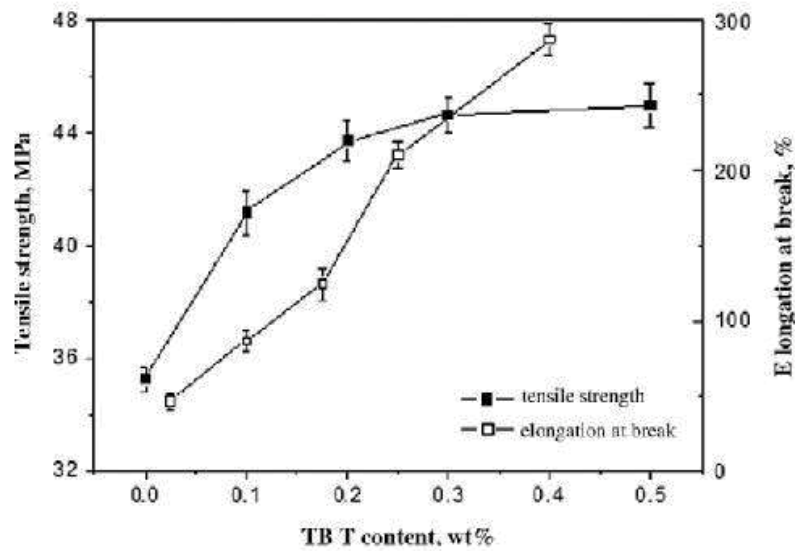


ภาพที่ 2.17 โครงสร้างทางเคมีของ (a) Luperox และ (b) Perkadox

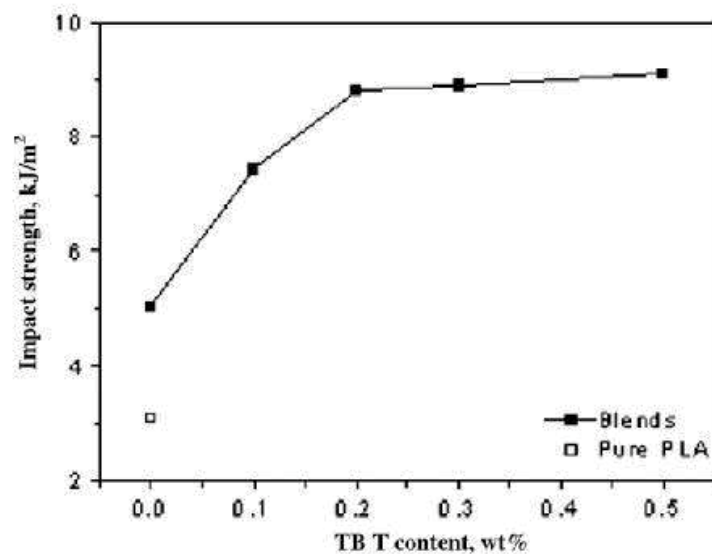
จากงานวิจัยของ S. Lin และคณะ [27] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ที่สัดส่วน 70/30 ที่เกิดผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) โดยมีการเติม $\text{Ti}(\text{OBU})_4$ หรือ TBT ในปริมาณไม่เกิน 0.5 phr จากการทดสอบ SEM พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ที่มีการเติม $\text{Ti}(\text{OBU})_4$ จะมือนุภาคของ PBAT ที่กระจายตัวอยู่ใน PLA มีขนาดเล็กลง มีการยึดเกาะกันระหว่างพื้นผิวของ PLA และ PBAT มากขึ้น และจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ที่มีการเติม $\text{Ti}(\text{OBU})_4$ จะมีค่า impact strength และ tensile strength สูงขึ้น



ภาพที่ 2.18 โครงสร้างทางเคมีของ TBT



ภาพที่ 2.19 ผลของปริมาณ TBT ต่อค่า tensile strength และ elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT [27]



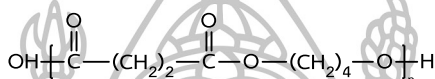
ภาพที่ 2.20 ผลของปริมาณ TBT ต่อค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT เทียบกับ Pure PLA [27]

จากงานวิจัยของ I. Moura และคณะ [28] ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) ของ PLA และ EVA โดยมีการเติม $Ti(OiPr)_4$ และ $Ti(OPh)_4$ ในปริมาณไม่เกิน 2.0 wt% จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA ที่มีการเติม $Ti(OiPr)_4$ และ $Ti(OPh)_4$ จะมีค่า %Elongation at break และ Young Modulus สูงขึ้น

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

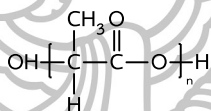
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ GS Pla[®] เกรด FZ91PD มีลักษณะเป็นเม็ด สีขาวขุ่น ผลิตโดยบริษัท Mitsubishi Chemicals ประเทศญี่ปุ่น มีดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D-1238 เท่ากับ 11 g/10 min (ที่สภาวะ 190 °C/2.16 kg)



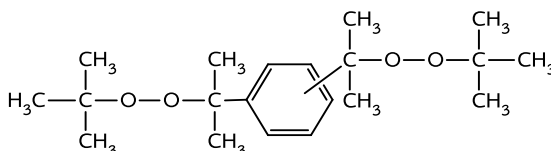
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS)

3.1.2 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือเกรด 4043D มีลักษณะเป็นเม็ด สีเหลืองใส ผลิตโดยบริษัท NatureWorks LLC ประเทศสหรัฐอเมริกา มีดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D-1238 เท่ากับ 2 g/10 min (ที่สภาวะ 190 °C/2.16 kg)



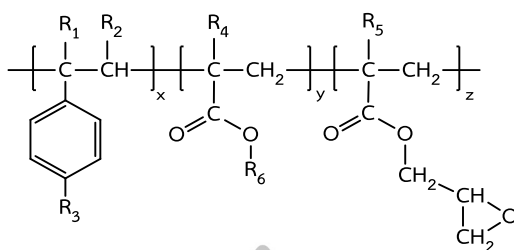
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

3.1.3 Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox 14-40B-PD) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ผลิตโดยบริษัท Akzo Nobel มีความเข้มข้นของเปอร์ออกไซด์ 40% (ส่วนที่เหลือคือ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา) เปอร์ออกไซด์จะแตกตัวให้ฟรีแรดิคอล ใช้เป็นรีแอคทีฟเอเจนท์ มีครึ่งชีวิต 2.5 นาที ที่ 180 °C



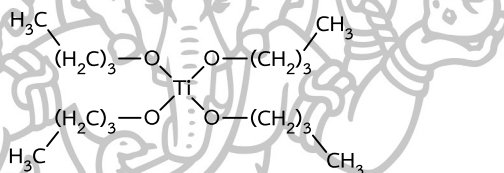
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene

3.1.4 Joncryl[®] ADR-4368 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็ก สีขาว ผลิตโดยบริษัท BASF Chemical Co. ใช้เป็นสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล (Chain extender) ที่ประกอบไปด้วยหมู่อีพอกไซด์จำนวนมาก



ภาพที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของ Joncryl[®] ADR-4368

3.1.5 Titanium (IV) butoxide (TBT) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใส มีความบริสุทธิ์ 97% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC. ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา transesterification



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของ Titanium(IV) butoxide

3.2 เครื่องผสมและขึ้นรูป

3.2.1 เครื่องผสมภายในแบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX 105-D40L50 บริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย

3.2.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder) L/D = 40 รุ่น HRJ-25 บริษัท Enmach Co.,Ltd. ประเทศจีน

3.2.3 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น PR10-W300L350 บริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย

3.2.4 เครื่องฉีดเข้าเส้น (Injection molding) รุ่น HYF-350 บริษัท Ningbo Jiangdong Xiazhou Plastic Industry Co., Ltd. ประเทศจีน

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Canscan MX-2000 ประเทศอังกฤษ ใช้วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

3.3.2 เครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น 5969 Load cell สูงสุด 50 kN ระยะยืดสูงสุด 1212 mm บริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ทดสอบสมบัติการดึงยึดของชิ้นงาน (Tensile test)

3.3.3 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact tester) รุ่น Zwick Pendulum impact tester B5102.202 พลังงานสูงสุดในการกระแทก 4 จูล

3.3.4 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) รุ่น Vertex 70 บริษัท Bruker Optic ประเทศเยอรมนี ใช้สำหรับวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยรังสีอินฟราเรด

3.3.5 เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ใช้สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ และพลังงานในการหลอมผลึก/ การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทดสอบได้ -85°C ถึง 700°C

3.3.6 เครื่องทดสอบ Heat distortion temperature (HDT) ประเทศไทย

3.3.7 เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น TGA/DSC1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ใช้สำหรับวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทดสอบได้ 25°C ถึง 1100°C

3.3.8 เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow indexer) รุ่น Plastometer: MFR1 บริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย

3.3.9 เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) รุ่น MCR 302 บริษัท Anton Paar GmbH ใช้สำหรับวิเคราะห์หาความหนืดเชิงซ้อน ช่วงความถี่ที่สามารถทดสอบได้ 10^{-7} ถึง 628 rad/s

3.3.10 เครื่อง Proton Nuclear Magnetic Resonance spectrometer (^1H NMR) รุ่น 300 Ultrashield บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี ใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสาร

3.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 กระบวนการในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

3.4.1.1 ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ทั้งที่เติม และไม่เติม Perkadox หรือ Joncryl ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่

เตรียมพอลิเมอร์ และสารประกอบที่ວ່งไวต่อปฏิกิริยาเคมีสำหรับการเบลนด์ โดยอบ PBS และ PLA ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ทำการผสม PBS และ PLA ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ (และ Perkadox หรือ Joncryl) และเขย่าให้กระจายทั่วถึงกันอย่างสม่ำเสมอ ก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ โดยตั้งอุณหภูมิในโซนต่างๆ เป็น $100/130/140/150/160/170/180/195^{\circ}\text{C}$, 100 rpm จากนั้นอัดรีดสารผสมผ่านหัวตายให้เป็นเส้น หล่อเย็นด้วยน้ำ แล้วตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องตัดเม็ด

ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงยืด (Tensile) ด้วยการฉีดเข้าเป้า (Injection molding) เป็นรูปทรง dumbbell ที่อุณหภูมิ $190-200^{\circ}\text{C}$ ด้วยความดัน 40 บาร์

ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact) และชิ้นงานสำหรับศึกษาอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อนของพลาสติก (HDT) ด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 180°C โดย Pre-heat 4 นาที, Full pressing 1 นาที และ Cooling 5 นาที

3.4.1.2 ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่เติม TBT ด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิด

เตรียมพอลิเมอร์ และสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสำหรับการเบลนด์ โดยการอบ PBS และ PLA ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ทำการผสม PBS, PLA และ TBT ที่อัตราส่วนการผสมต่าง ๆ เข้าให้กระจายทั่วถึงกันอย่างสม่ำเสมอ ก่อนเติมพอลิเมอร์เข้าไปในเครื่อง ที่อุณหภูมิ 185°C, 60 rpm เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ

ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงยืด (Tensile), ชิ้นงานสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact) และชิ้นงานสำหรับศึกษาอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อนของพลาสติก (HDT) โดยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 180°C โดย Pre-heat 4 นาที, Full pressing 1 นาที และ Cooling 5 นาที

3.4.2 กระบวนการในการทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ

ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ ด้วยเทคนิค SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากชิ้นงานที่หักในไนโตรเจนเหลว, ชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบการต้านทานต่อแรงกระแทก และชิ้นงานที่ขาดจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืด โดยทำการทดสอบภายใต้โหมด back scattering ที่ความต่างศักย์ 15.00 kV ที่กำลังขยาย 1000 และ 3000 เท่า

นำชิ้นงานรูปทรง dumbbell ที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงยืด (Tensile) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D-638 Type I โดยใช้ Load cell 5 kN และอัตราเร็วในการดึง 50 mm/min สำหรับชิ้นงาน Type I ของ PBS/PLA ที่ไม่ได้เติมสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี และเติม Perkadox หรือ Joncryl และ 10 mm/min สำหรับชิ้นงาน Type V ของ PBS/PLA ที่เติม TBT

นำชิ้นงานสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact) ไปทดสอบโดยใช้เครื่อง Impact tester ตามมาตรฐาน ASTM D-256 โดยทดสอบแบบ Notched-Izod impact testing

การทดสอบ Gel content test โดยนำชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีน้ำหนัก 0.3 กรัม มาใส่ตะแกรงขนาด 120 mesh (125 μm) จากนั้นนำมาแช่ใน Dichloromethane (ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับทั้ง PBS และ PLA) ที่อุณหภูมิ 50°C เพื่อให้ Dichloromethane เตือดตลอดเวลา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตะแกรงที่มีตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่ 50°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักหาปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ ดังสมการที่ 3.1 จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR

$$\% \text{ Gel content} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.1)$$

- เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ (กรัม)
 W_2 คือ น้ำหนักของตะแกรง (กรัม)
 W_3 คือ น้ำหนักของชิ้นงานและตะแกรงหลังทดสอบ (กรัม)

ศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ด้วยเทคนิค DSC โดยนำชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีน้ำหนัก 3-10 มิลลิกรัม มาอัดใส่ pan จากนั้นทำการทดสอบที่สภาวะดังตารางที่ 3.1 โดยใช้อัตราการให้ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ด้วยเทคนิค DSC

ขั้นที่	สภาวะ
1	คงอุณหภูมิที่ -40°C เป็นเวลา 1 นาที
2	ให้ความร้อนจาก -40°C ไปจนถึง 200°C
3	คงอุณหภูมิที่ 200°C เป็นเวลา 1 นาที
4	ลดอุณหภูมิลงมาจาก 200°C ไปจนถึง -40°C
5	คงอุณหภูมิที่ -40°C เป็นเวลา 1 นาที
6	ให้ความร้อนจาก -40°C ไปจนถึง 200°C
7	คงอุณหภูมิที่ 200°C เป็นเวลา 1 นาที

ศึกษาอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ ตามมาตรฐาน ASTM D-648 โดยทำการทดสอบแบบ 3 point blending ซึ่งมีการให้ความร้อน $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และบันทึกค่า HDT ของชิ้นงานที่มีการโค้งงอ (Deflect) เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร โดยใช้น้ำหนักกด 0.455 MPa

ศึกษาการสลายตัวทางความร้อน ด้วยเทคนิค TGA โดยนำชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีน้ำหนัก 3-10 มิลลิกรัม มาใส่ลงใน pan จากนั้นทำการทดสอบโดยให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 50°C ถึง 500°C และใช้อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ศึกษาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ ด้วยเครื่อง Melt flow indexer ตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยใช้น้ำหนักกด 2.16 kg ที่อุณหภูมิ 190°C

ศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยี ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) โดยนำชิ้นงานที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร มาทำการทดสอบแบบ Plate-Plate ในช่วงความถี่ $0.1 < \omega < 100 \text{ rad/s}$ ที่อุณหภูมิ 190°C และให้ shear strain เท่ากับ 0.1%

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสาร ด้วย Proton Nuclear Magnetic Resonance spectro-meter (^1H NMR) โดยใช้ deuterium chloroform (CDCl_3) เป็นตัวทำละลาย และใช้เตตระเมทิลไซเลน (tetramethylsilane, TMS) เป็นตัวกำหนดตำแหน่งอ้างอิง

3.5 ศึกษากระบวนการเบลนด์

การเบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends)

3.5.1 ศึกษาอัตราส่วนการผสม PBS กับ PLA

ผสม PBS และ PLA ที่สัดส่วนต่าง ๆ คือ PBS:PLA (85:15), PBS:PLA (80:20) และ PBS:PLA(75:25)

3.5.2 ศึกษาอิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในการผสม PBS และ PLA

สารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ Perkadox (P), Joncryl (J) และ TBT (T) แทนการเติม Perkadox, Joncryl และ TBT ในพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยสัญลักษณ์ P, J และ T แล้วตามด้วยปริมาณที่เติมหน่วยเป็น phr เช่น PBS:PLA(80:20) P0.01 หมายถึงเติม Perkadox ปริมาณ 0.01 phr ใน PBS/PLA blend ที่อัตราส่วน 80:20

เปรียบเทียบอิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยการผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยผสม PBS:PLA(80:20) และ PBS:PLA(75:25) พร้อมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังตารางที่ 3.2

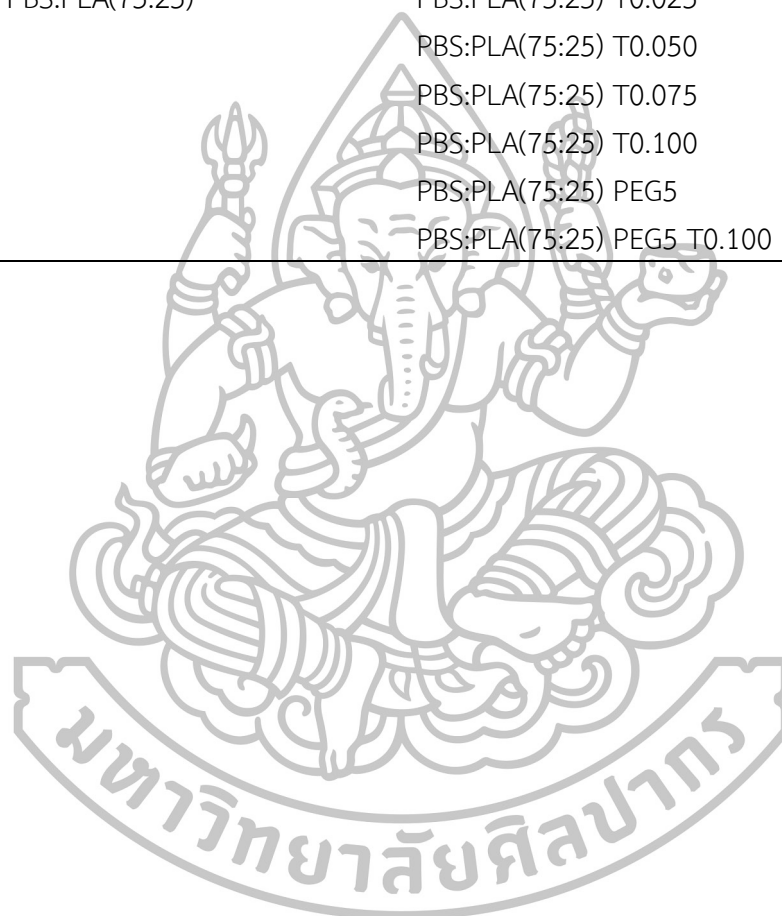
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาผลของปริมาณสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ใน PBS:PLA(80:20) และ PBS:PLA(75:25)

Non-reactive	Perkadox (phr)	Joncryl (phr)
PBS:PLA(80:20)	PBS:PLA(80:20) P0.0025	PBS:PLA(80:20) J0.5
	PBS:PLA(80:20) P0.0050	PBS:PLA(80:20) J1.0
	PBS:PLA(80:20) P0.0075	PBS:PLA(80:20) J1.5
	PBS:PLA(80:20) P0.0100	PBS:PLA(80:20) J2.0
PBS:PLA(75:25)	PBS:PLA(75:25) P0.0025	PBS:PLA(75:25) J0.5
	PBS:PLA(75:25) P0.0050	PBS:PLA(75:25) J1.0
	PBS:PLA(75:25) P0.0075	PBS:PLA(75:25) J1.5
	PBS:PLA(75:25) P0.0100	PBS:PLA(75:25) J2.0
PLA:PBS(80:20)	PLA:PBS(80:20) P0.0100	PLA:PBS(80:20) J1.0

เปรียบเทียบอิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยการผสมในเครื่องผสมภายในแบบปิด โดยผสม PBS:PLA(80:20) หรือ PBS:PLA(75:25) พร้อมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาผลของปริมาณสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ใน PBS:PLA(80:20) และ PBS:PLA(75:25)

Non-reactive	TBT (phr)
PBS:PLA(80:20)	PBS:PLA(80:20) T0.025
	PBS:PLA(80:20) T0.050
	PBS:PLA(80:20) T0.075
	PBS:PLA(80:20) T0.100
PBS:PLA(75:25)	PBS:PLA(75:25) T0.025
	PBS:PLA(75:25) T0.050
	PBS:PLA(75:25) T0.075
	PBS:PLA(75:25) T0.100
	PBS:PLA(75:25) PEG5
	PBS:PLA(75:25) PEG5 T0.100



บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

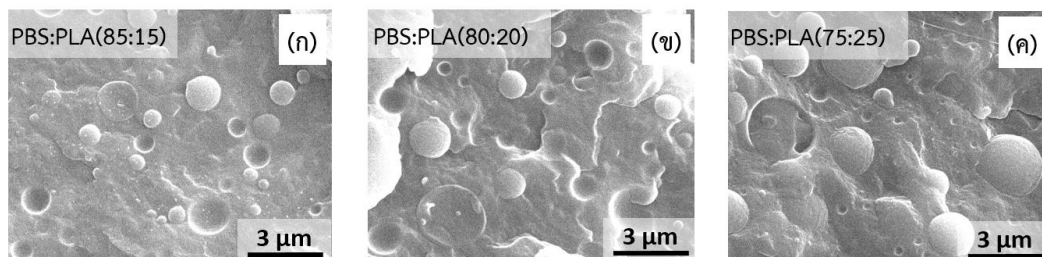
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการทำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเมทริกซ์หลัก โดยผ่านกระบวนการรีแอกทีฟเอ็กซ์ทรูชันที่มีการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ Perkadox, Joncryl และ TBT ในปริมาณไม่เกิน 2 phr เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของ PBS กับ PLA โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล ปริมาณเจลที่เกิดขึ้น การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเจลด้วยเทคนิค FTIR และ $^1\text{H-NMR}$ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่เตรียมได้

4.1 ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

ในส่วนแรกของงานวิจัย จะทำการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต กับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA) ซึ่งมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเมทริกซ์หลัก ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 โดยน้ำหนัก การผสมทำในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีดเข้าเบ้า หรือกระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อนำไปศึกษาสมบัติในด้านต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

เมื่อนำพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 จากกระบวนการอัดขึ้นรูป มาทำการหักในไนโตรเจนเหลว เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่บริเวณรอยแตกที่กำลังขยาย 3000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่า PLA มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ขนาดเล็กประมาณ 1-2 μm กระจายตัวในเฟสของ PBS ถึงแม้ว่า PLA จะมีขนาดเล็ก แต่ก็พบว่า PBS และ PLA มีการยึดเกาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสไม่ดี สังเกตได้จากร่องรอยที่เกิดจากการหลุดออกของ PLA ซึ่งเป็นเฟสกระจาย และลักษณะกลมเกลี้ยงของอนุภาค PLA ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับในงานวิจัยของ D. Wu และคณะ [29]

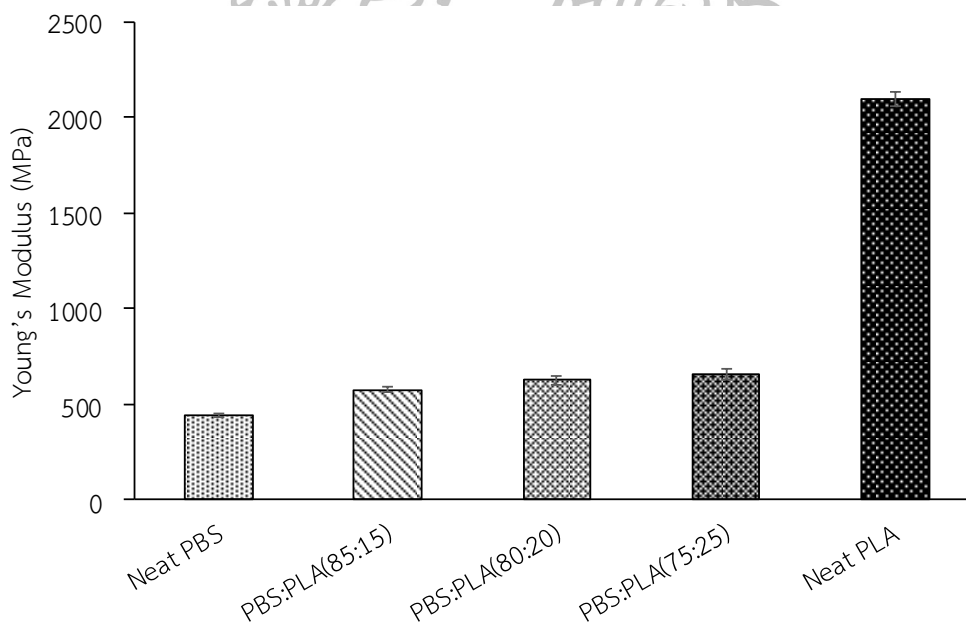


ภาพที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (ก) 85:15, (ข) 80:20 และ (ค) 75:25 ตามลำดับ

4.1.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

การทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบไปด้วยการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) และการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) ซึ่งสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่อัตราส่วนการผสมต่าง ๆ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ Neat PBS และ Neat PLA

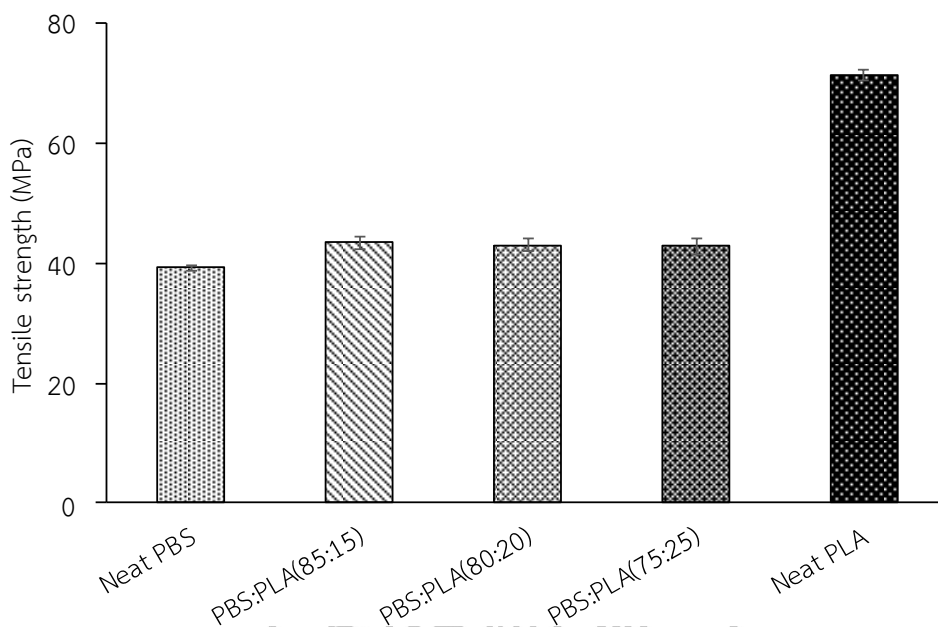
สมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) ของพอลิเมอร์เบลนด์จะพิจารณาจากค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus), ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของชิ้นงาน



ภาพที่ 4.2 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25

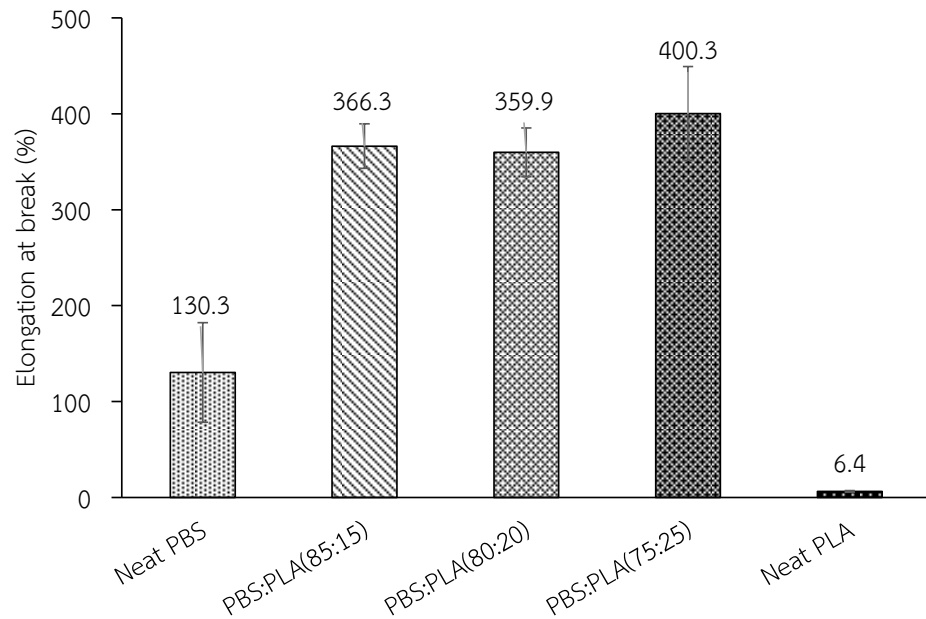
เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus ดังภาพที่ 4.2 พบว่า Neat PBS มีค่า Young's modulus ประมาณ 440 MPa ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีค่า

Young's modulus สูงกว่า Neat PBS เล็กน้อย และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของ PLA เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับงานวิจัยของ A. Bhatia และคณะ [4]



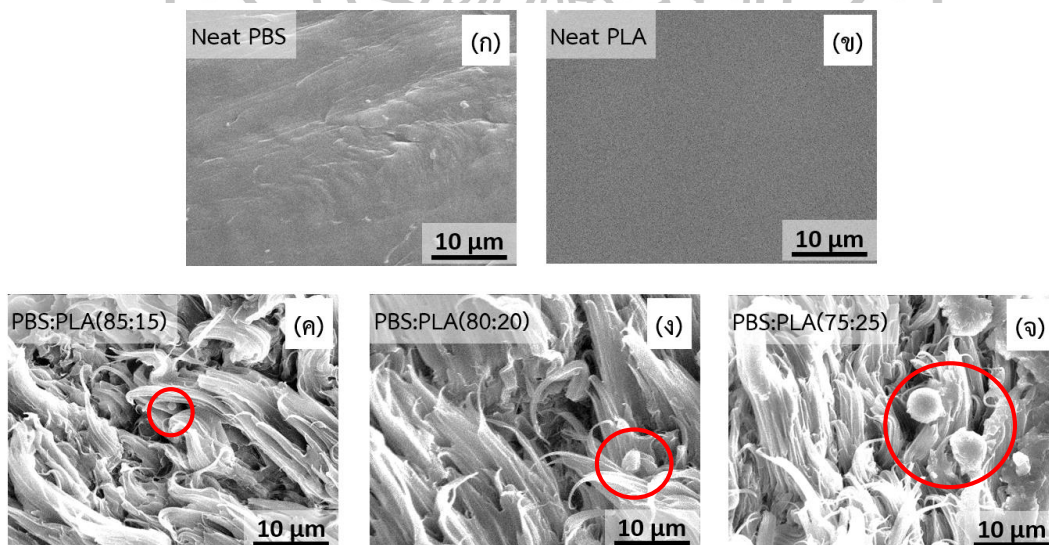
ภาพที่ 4.3 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ดังภาพที่ 4.3 พบว่า Neat PBS มีค่า Tensile strength ประมาณ 40 MPa และ Neat PLA มีค่า Tensile strength ประมาณ 70 MPa ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA จะมีค่า Tensile strength สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติม PLA ลงไป อาจเนื่องมาจากการมีอนุภาค PLA ที่มีความแข็งแรงกระจายตัวอยู่ภายในเมทริกซ์ของ PBS[4]



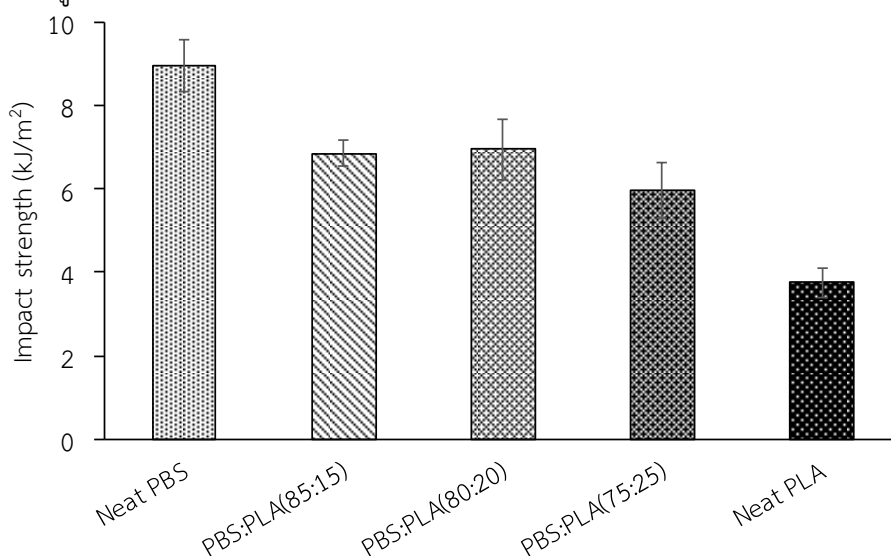
ภาพที่ 4.4 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่ สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ดังภาพที่ 4.4 พบว่า Neat PLA มีค่า Elongation at break ประมาณ 6% ในขณะที่ Neat PBS มีค่า Elongation at break ประมาณ 130% แต่พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก มีค่า Elongation at break สูงกว่า Neat PBS และ Neat PLA โดยพอลิเมอร์เบลนด์มีค่า Elongation at break มากกว่า 300 % และในขณะที่ดึงยืด มีการเกิด cold drawing แสดงให้เห็นว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว



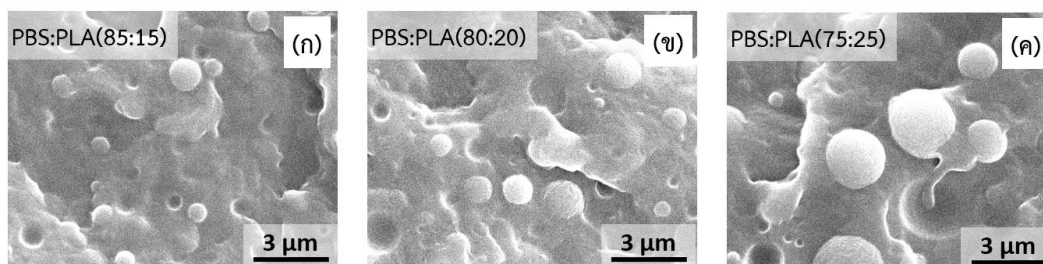
ภาพที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ขาดจากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืดของ (ก) Neat PBS, (ข) Neat PLA, (ค) PBS/PLA(85:15), (ง) PBS/PLA(80:20) และ (จ) PBS/PLA(75:25) ตามลำดับ

จากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มี Elongation at break มากกว่า 300% และเกิด cold drawing สอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่ขาดจากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด ดังในภาพที่ 4.5(ค)-(จ) จะเห็นว่าในกรณีพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีการยืดออกเป็นเส้น ๆ ของ PBS และเห็นอนุภาคของ PLA ที่มีลักษณะกลมกระจายอยู่



ภาพที่ 4.6 ค่าความต้านทานต่อการกระแทก (Impact strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

จากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ค่า Impact strength แสดงในภาพที่ 4.6 พบว่า Neat PBS มีค่า impact strength ประมาณ 9 kJ/m² และ Neat PLA มีค่า impact strength ประมาณ 4 kJ/m² แสดงให้เห็นว่า PBS มีความต้านทานต่อการกระแทกมากกว่า PLA ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA จะมีค่า impact strength อยู่ระหว่าง PBS และ PLA โดยพอลิเมอร์ทั้งหมดมีค่า Impact strength ค่อนข้างต่ำแสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสัณฐานวิทยาที่แสดงในภาพที่ 4.7 ที่มีพื้นผิวการแตกหักของ PBS ซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่องที่มีลักษณะค่อนข้างเรียบ



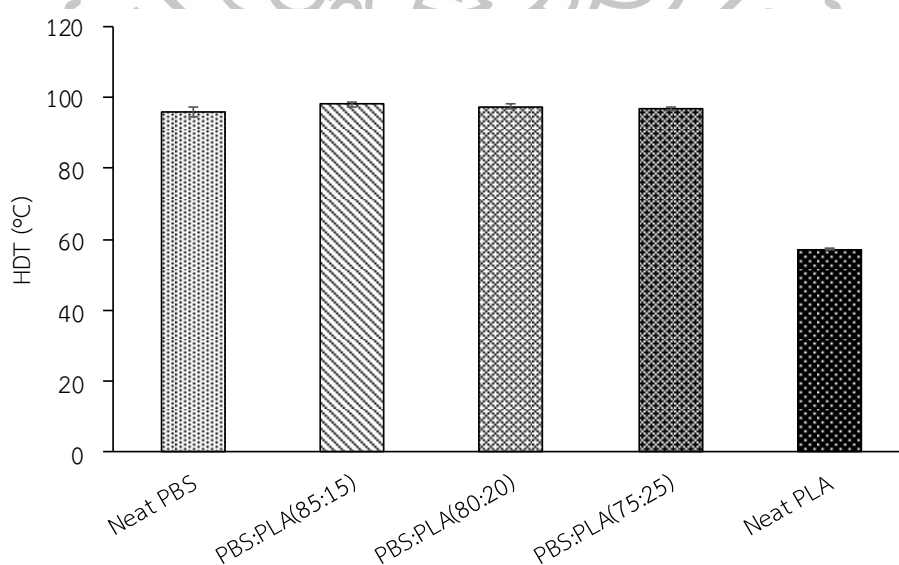
ภาพที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (ก) 85:15, (ข) 80:20 และ (ค) 75:25 ตามลำดับ

4.1.3 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า Neat PBS มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) คือ -39°C และ Neat PLA มี T_g คือ 51°C ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ปรากฏ T_g ของ PBS และ PLA ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งบ่งบอกถึงการเบลนด์ไม่เข้ากัน และเมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์ พบว่าปริมาณผลึกของ PBS มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (62-65%) ในขณะที่ปริมาณผลึกของ PLA มีค่าลดลงเล็กน้อย (21-34%) และไม่สามารถสังเกตเห็น T_{cc} ในพอลิเมอร์เบลนด์ ในขณะที่ T_{cc} ของ Neat PLA สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน โดยมีค่าอยู่ที่ 104°C

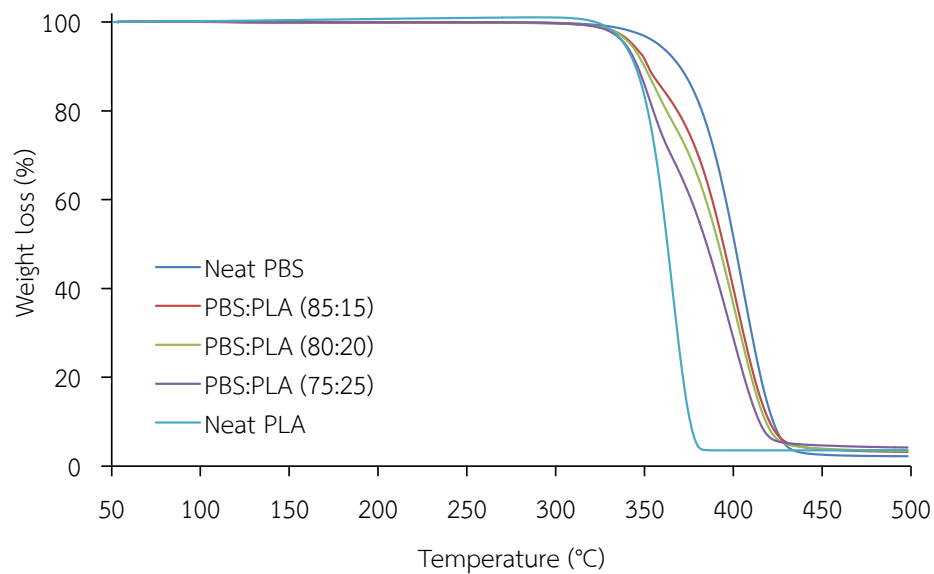
ตารางที่ 4.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

	PBS					PLA				
	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	T_{cc} ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	X_c (%)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	T_{cc} ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	X_c (%)
Neat PBS	-39.4	73.0	-	114.5	56.4	-	-	-	-	-
PBS/PLA(85:15)	-39.4	81.2	-	112.9	64.6	51.4	-	-	152.9	33.9
PBS/PLA(80:20)	-39.5	75.9	-	112.7	63.0	51.3	-	-	153.3	26.3
PBS/PLA(75:25)	-39.4	78.0	-	112.8	62.1	51.3	-	-	153.5	21.2
Neat PLA	-	-	-	-	-	51.4	-	104.3	152.4	34.2

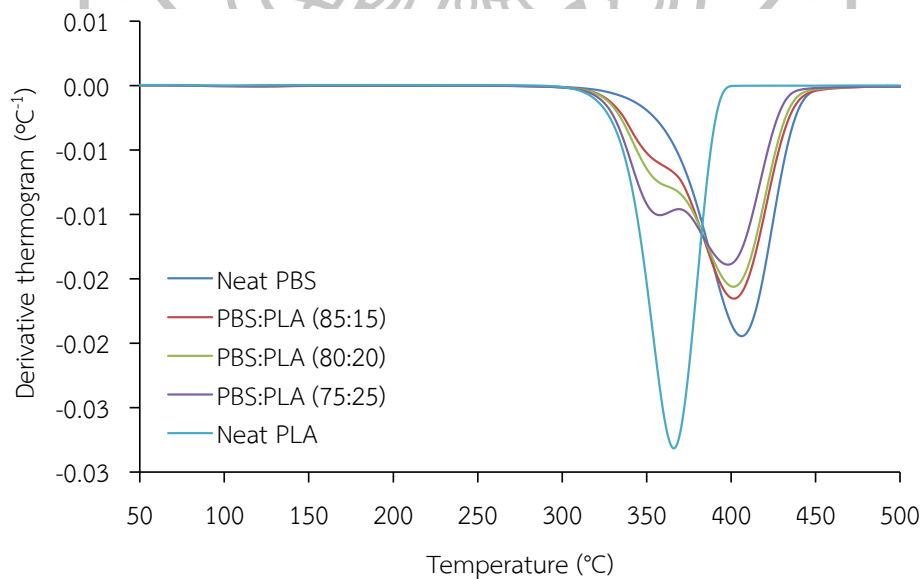


ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

จากการทดสอบหาค่าอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ดังแสดงในภาพที่ 4.8 พบว่า Neat PBS มีค่า HDT 96°C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมของ PBS เล็กน้อย ส่วน Neat PLA มีค่า HDT 57°C ซึ่งสูงกว่าค่า T_g ของ PLA เล็กน้อย ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีค่า HDT ใกล้เคียงกับ Neat PBS ถึงแม้ว่าจะมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสม เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนด์มี PBS เป็นเฟสหลัก จึงส่งผลให้ชิ้นงานสามารถคงรูปทางความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกับ Neat PBS ก่อนที่จะเกิดการอ่อนตัว



ภาพที่ 4.9 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

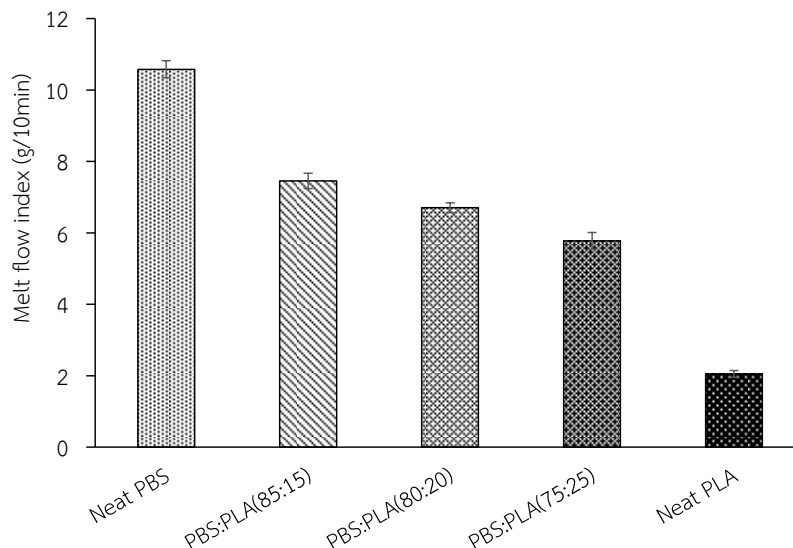


ภาพที่ 4.10 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ซึ่งแสดง TGA thermogram ดังในภาพที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า Neat PBS มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature, T_d) ที่ประมาณ 400°C และ Neat PLA มี T_d ที่ประมาณ 360°C ในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีการสลายตัว 2 ชั้น โดย PLA สลายตัวก่อนที่ T_d ประมาณ 360°C และ PBS สลายตัวต่อมาที่ T_d ประมาณ 400°C

4.1.4 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

ดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS และ PLA แสดงในภาพที่ 4.11 พบว่า Neat PBS มีค่าดัชนีการไหลประมาณ $11 \text{ g}/10 \text{ min}$ ในขณะที่ Neat PLA มีค่าดัชนีการไหลประมาณ $2 \text{ g}/10 \text{ min}$ ในขณะที่ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีค่าลดลงตามปริมาณ PLA ที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.11 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 85:15, 80:20 และ 75:25 ตามลำดับ

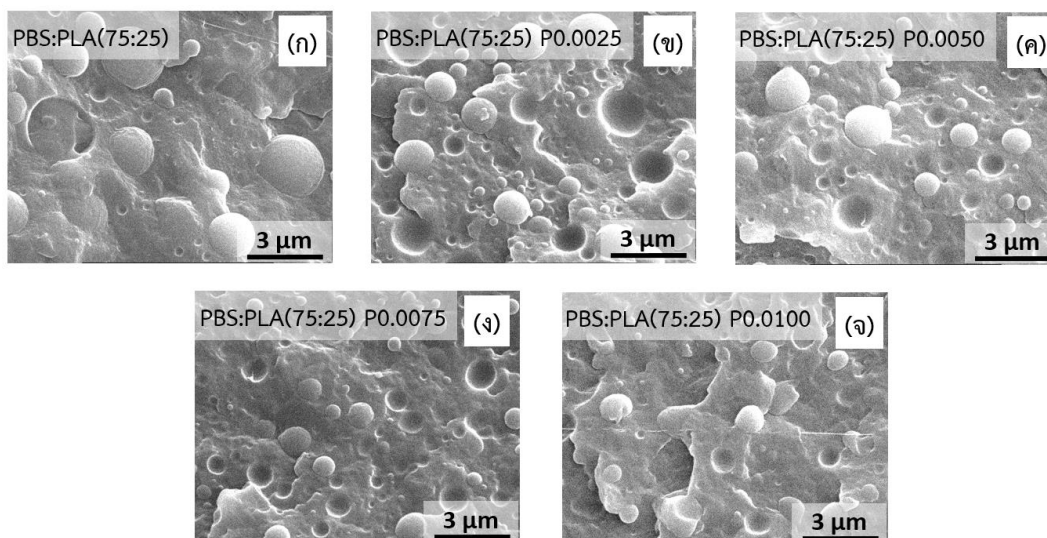
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา, สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเมทริกซ์หลัก พบว่ามีสมบัติในด้านต่าง ๆ ที่ใกล้เคียงกัน จึงนำพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ไปทำการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ Perkadox, Joncryl และ TBT ในปริมาณไม่เกิน 2 phr เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อความเข้ากันได้ของ PBS และ PLA ในหัวข้อถัดไป

4.2 ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม Perkadox

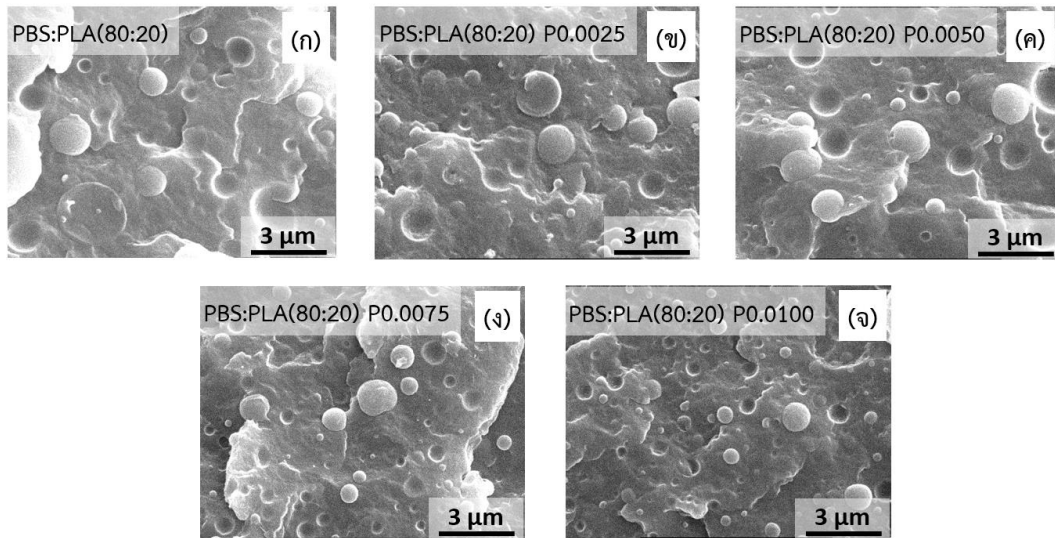
การศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox ในปริมาณ 0.0025-0.0100 phr โดยทำการผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือนที่อุณหภูมิ 100-195°C ส่งผลให้ Perkadox ที่เติมลงไป ซึ่งประกอบไปด้วยเปอร์ออกไซด์ สามารถแตกตัวให้ฟรีแรดิคัลที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์

4.2.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox

เมื่อนำชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(75:25) และ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox จากกระบวนการอัดขึ้นรูป มาทำการหักในไนโตรเจนเหลว เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่บริเวณรอยแตก ที่กำลังขยาย 3000 เท่า พื้นผิวรอยแตกแสดงในภาพที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าการเติม Perkadox ที่ปริมาณ 0.0025-0.0100 phr ส่งผลให้อนุภาค PLA ที่กระจายตัวเป็นเม็ดกลมอยู่ในเฟสของ PBS มีขนาดเล็กลง โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.5-2.0 μm ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัยของ K. Sotho [26]



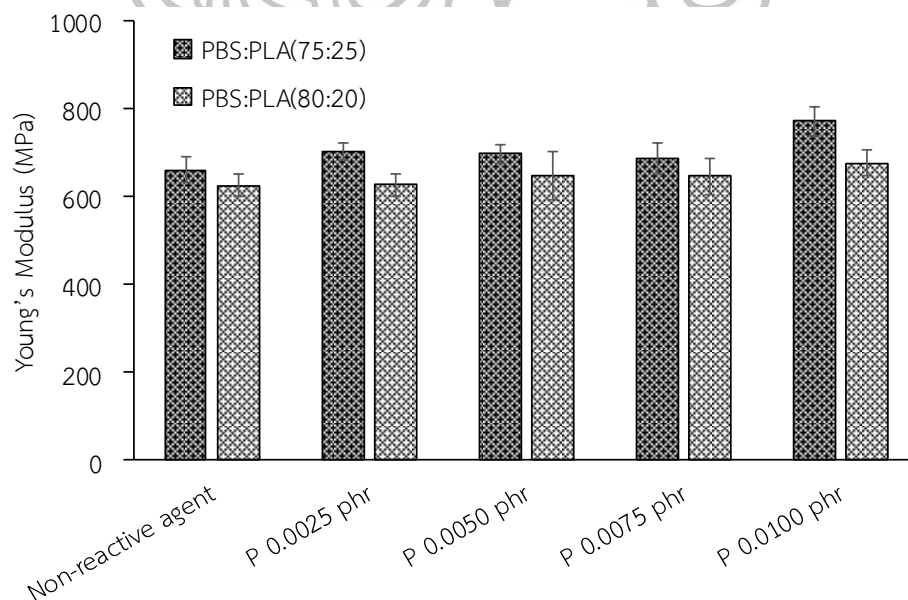
ภาพที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ

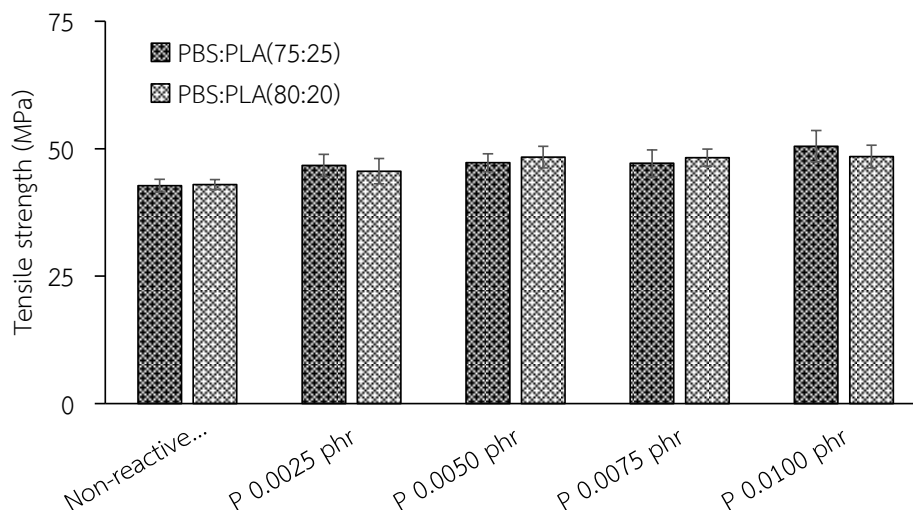
4.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ PBS/PLA ที่ไม่มีการเติม Perkadox โดยค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus), ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงในภาพที่ 4.14-4.16



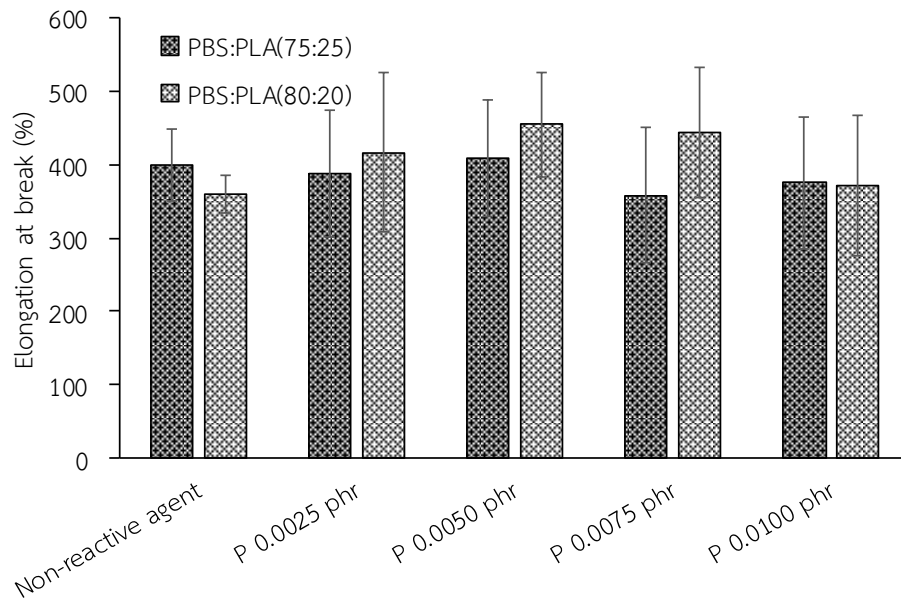
ภาพที่ 4.14 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.14 จะเห็นว่า PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีค่า Young's modulus ประมาณ 660 MPa และ 630 MPa ตามลำดับ และพบว่าเมื่อเติม Perkadox ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ไม่ทำให้ค่า Young's modulus เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะ



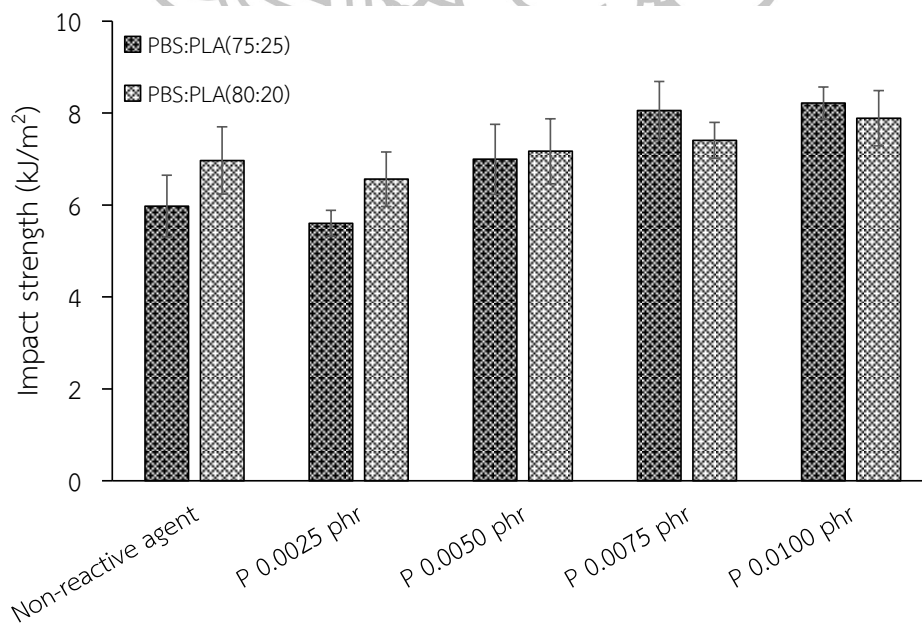
ภาพที่ 4.15 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength ดังภาพที่ 4.15 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีค่า Tensile strength ประมาณ 43 MPa ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox มีค่า Tensile strength เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าสูงสุด 50 MPa เมื่อเติม Perkadox 0.01 phr



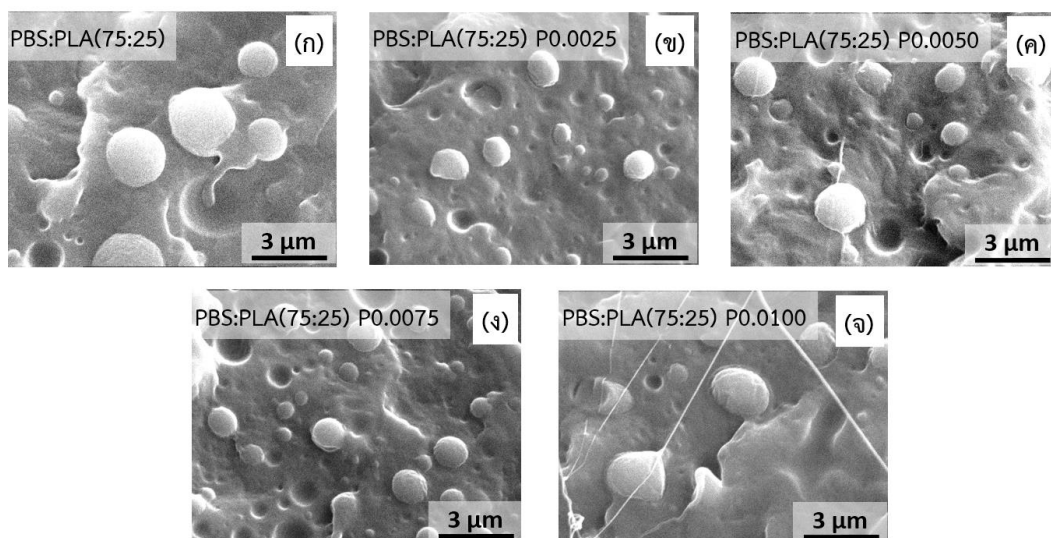
ภาพที่ 4.16 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox ดังภาพที่ 4.16 จะเห็นว่าชิ้นงานทุกสัดส่วนสามารถยืดออกได้มากกว่า 300%

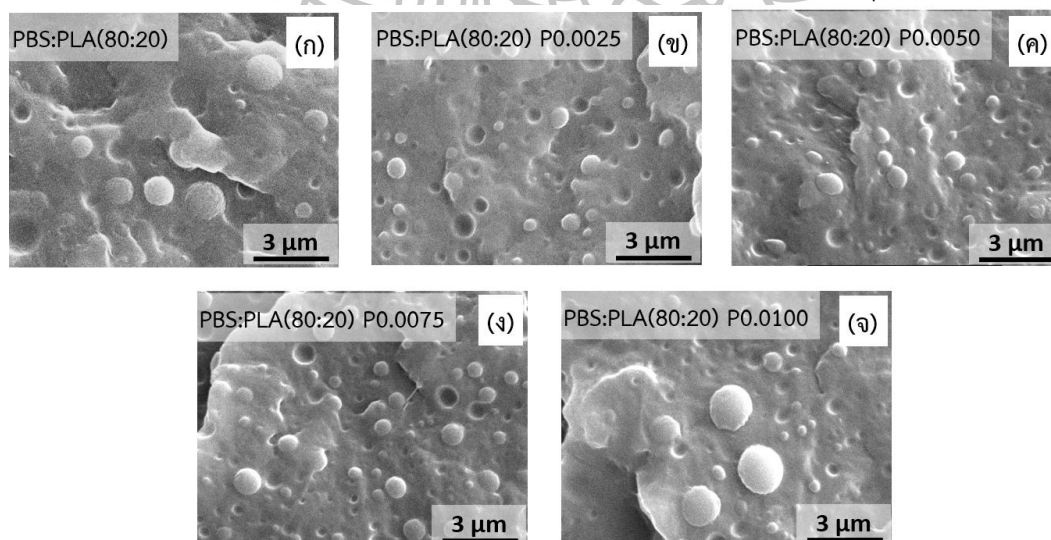


ภาพที่ 4.17 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

จากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox ดังภาพที่ 4.17 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบสมบูรณทั้งหมด โดยพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่า impact strength ประมาณ 6 kJ/m^2 และ 7 kJ/m^2 ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ลงไป มีค่า impact strength ที่สูงขึ้น เนื่องการเติม Perkadox ส่งผลให้ PLA มีขนาดเล็กลง และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้นภายในเฟสของ PBS ดังภาพที่ 4.18-4.19 จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น [26]



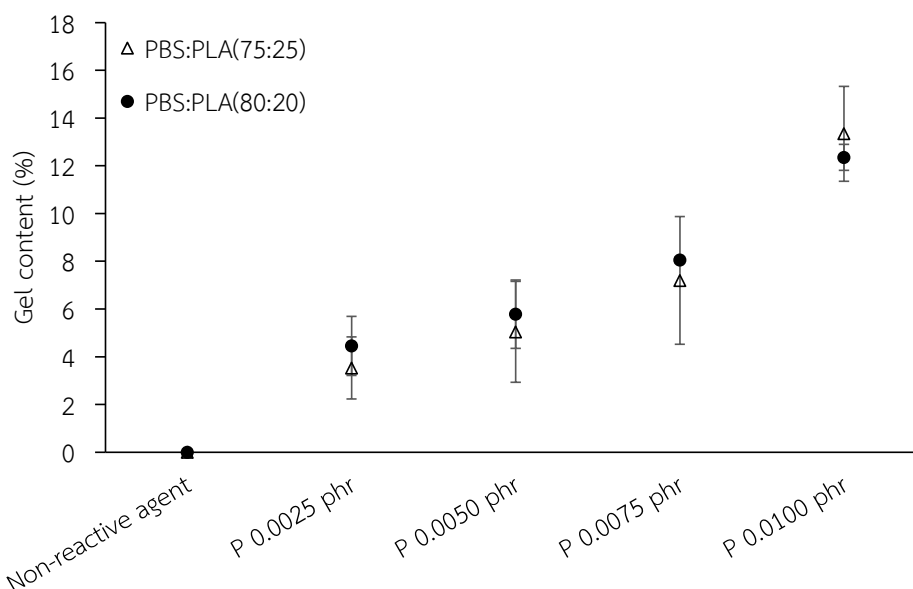
ภาพที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20) ที่ไม่มีการเติม Perkadox (ก) และมีการเติม Perkadox (ข) 0.0025, (ค) 0.0050, (ง) 0.0075 และ (จ) 0.0100 phr ตามลำดับ

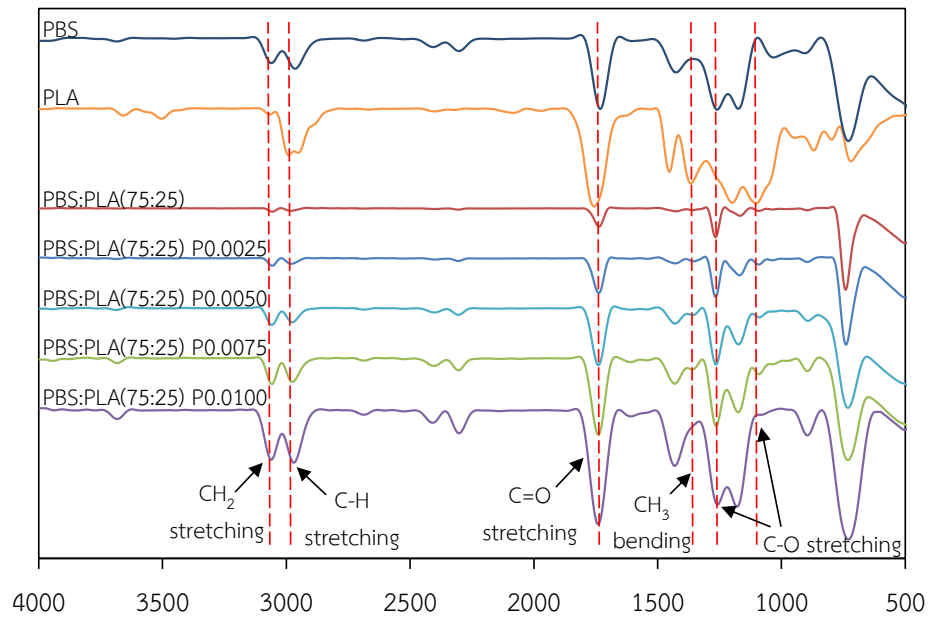
4.2.3 การทดสอบหาปริมาณเจล (Gel Content) และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox มีลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกที่ดีขึ้น อาจเนื่องมาจากการมีโครงสร้างของ graft-copolymer ซึ่งสามารถยับยั้งการเกิด graft-copolymer ได้โดยอาศัยหลักการละลาย โดยการนำพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มาละลายในไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) (ตัวทำละลายที่ดีที่สุดสำหรับ PBS และ PLA) ซึ่งการเติม Perkadox ลงไป อาจทำให้เกิด graft-copolymer ของ PBS และ PLA ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมี ส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง จึงเหลือเป็นเจลที่ไม่ละลาย ซึ่งเจลที่ได้จะถูกนำไปอบเพื่อกำจัดสารละลายที่หลงเหลืออยู่ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาปริมาณเจลที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.20

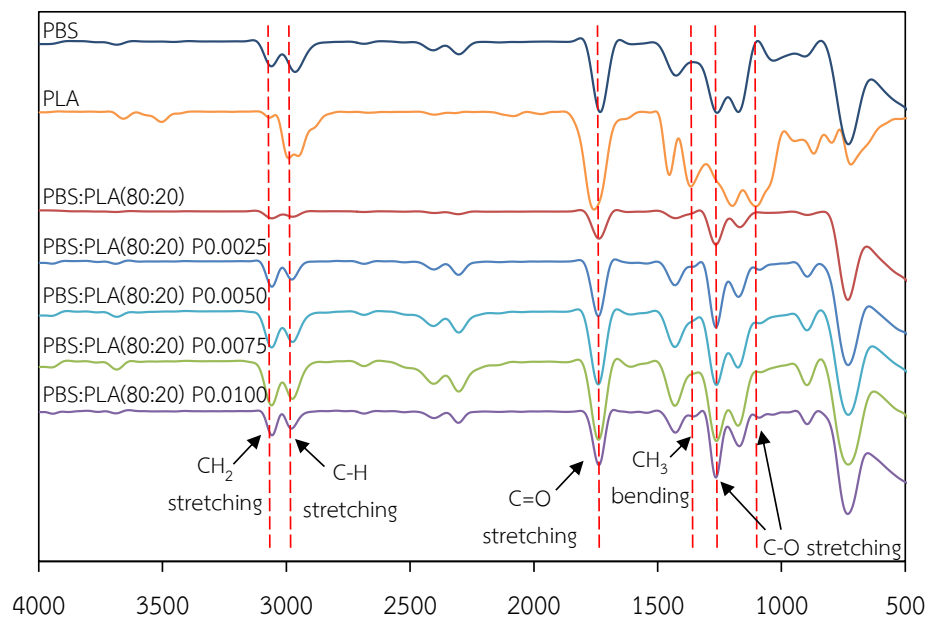


ภาพที่ 4.20 ปริมาณเจล (Gel Content) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

จากการศึกษาปริมาณเจล (Gel Content) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox แสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่าเจลที่เกิดขึ้น มีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณ Perkadox ที่เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเจลที่ได้จะถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ดังในภาพที่ 4.21 และ 4.22



ภาพที่ 4.21 FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.22 FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

จาก FTIR spectra ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ดังภาพที่ 4.21 และ 4.22 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่ไม่มีการเติม Perkadox มีพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของ

PBS คือที่ 3060, 1732 และ 1259 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นแบบยืดของพันธะ CH_2 , $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}-\text{O}$ ในพอลิเอสเทอร์ ตามลำดับ สำหรับพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของ PLA คือที่ 2990, 1760, 1103 และ 1366 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}-\text{H}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$ และการสั่นแบบงอของ CH_3 ตามลำดับ ซึ่ง FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox แสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของทั้ง PBS และ PLA เป็นการยืนยันว่าภายในเจลที่เหลือมี PBS-g-PLA (graft copolymer) อยู่ด้วย ซึ่ง graft copolymer หรือ crosslink ที่เกิดขึ้น อาจอยู่ที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ซึ่งช่วยให้เกิดการยึดเกาะระหว่างทั้งสองเฟสที่ดีขึ้น [26]

4.2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ จะพิจารณาได้จากตำแหน่งของพีค (peak position) และความเข้มของพีค (peak area or peak intensity) ในการบ่งบอกจำนวนโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนตัวที่สนใจ และคาร์บอนที่อยู่ติดกันได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ deuterium chloroform (CDCl_3) เป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะพบพีคที่ตำแหน่ง chemical shift (δ) เท่ากับ 7.2 ppm และใช้เตตระเมทิลไซเลน (tetramethylsilane, TMS) ซึ่งเป็นสารเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา เป็นตัวกำหนดให้เป็นตำแหน่งสำหรับอ้างอิง โดยถือว่าตำแหน่งดังกล่าวมีค่า chemical shift เท่ากับศูนย์ ($\delta = 0$)

จากสมมติฐานของงานวิจัยที่ว่า Perkadox ที่เติมลงไป ซึ่งประกอบไปด้วยเปอร์ออกไซด์ จะสามารถแตกตัวให้ฟรีแรดิคัลที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา จึงเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ทำให้เกิด crosslink หรือ graft-copolymer ของ PBS-g-PLA ได้ จึงนำเจลที่ได้จากการทดสอบหาปริมาณเจล (Gel content) มาทำการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ โดยเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงค่า chemical shift (δ) ของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ PBS และ PLA ในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า PBS แสดงพีคที่สำคัญ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ พีคที่เกิดจากไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_2-$ ในหมู่ butylene (ตำแหน่งที่ 1 และ 2) และพีคที่เกิดจากไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_2-$ ใน succinate (ตำแหน่งที่ 3) ที่ตำแหน่ง $\delta = 4.120, 1.710$ และ 2.627 ppm ตามลำดับ ในขณะที่ PLA แสดงพีคที่สำคัญ 2 ตำแหน่ง ได้แก่ พีคที่เกิดจากไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_3$ ในหมู่ methyl (ตำแหน่งที่ 1) ซึ่งปรากฏเป็นสองพีคย่อย คือที่ตำแหน่ง $\delta = 1.571$ และ 1.595 ppm และพีคที่เกิดจากไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}-$ ในสายโซ่หลัก (ตำแหน่งที่ 2) ซึ่งปรากฏเป็นสี่พีคย่อยในช่วง $\delta = 5.131-5.236$ ppm [30]

สำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี พบว่าค่า chemical shift ของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ PBS และ PLA ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่าง PBS และ PLA ในขณะที่รีแอคทีฟเบลนด์ PBS:PLA(80:20) P0.01 ที่มีการเติม Perkadox พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคที่เกิดจากไฮโดรเจนตำแหน่งที่ 1 และ 2 ใน PBS คือจาก 4.119 เป็น 4.361 และจาก 1.709 เป็น 1.701 และไฮโดรเจนตำแหน่งที่ 2 ใน PLA คือจาก 5.127-5.198 เป็น 5.128-5.199 แสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนระหว่าง PBS และ PLA

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งพีคที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Perkadox

H position	^1H chemical shift (ppm)					
	PBS	PLA	PBS:PLA(80:20)		PBS:PLA(80:20) P0.01	
			PBS	PLA	PBS	PLA
1	4.120	1.571, 1595 (doublet)	4.119	1.577	4.361	1.571, 1.594 (doublet)
2	1.710	5.131-5.236 (quartet)	1.709	5.127-5.198 (quartet)	1.701	5.128-5.199 (quartet)
3	2.627	-	2.626	-	2.627	-

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนความเข้มพีคที่เกิดจากไฮโดรเจนตำแหน่งต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Perkadox

H position	^1H intensity					
	PBS	PLA	PBS:PLA(80:20)		PBS:PLA(80:20) P0.01	
			PBS	PLA	PBS	PLA
1	1.88	2.99	1.00	4.32	1.00	1.28
2	1.89	1.00	1.13	1.00	1.21	0.06
3	2.00	-	1.00	-	1.00	-

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนความเข้มพีคของ PBS และ PLA ดังตารางที่ 4.3 พบว่าที่ตำแหน่ง PBS1 : PBS2 : PBS3 : PLA1 : PLA2 ในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) มีสัดส่วนความเข้มพีคเป็น 1.00 : 1.13 : 1.00 : 4.32 : 1.00 และมีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนเป็น 1.00 : 1.21 : 1.00 : 1.28 : 0.06 สำหรับรีแอคทีฟเบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ซึ่งแสดงถึงจำนวนโปรตอนที่ลดลงที่ $-\text{CH}_2-$ ในหมู่ butylene ของ PBS และ $-\text{CH}-$ ในสายโซ่หลักของ PLA ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่ารีแอคทีฟเบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox อาจเกิด PBS-g-PLA (graft copolymer) ผ่านปฏิกิริยาฟรีแรดิคัล

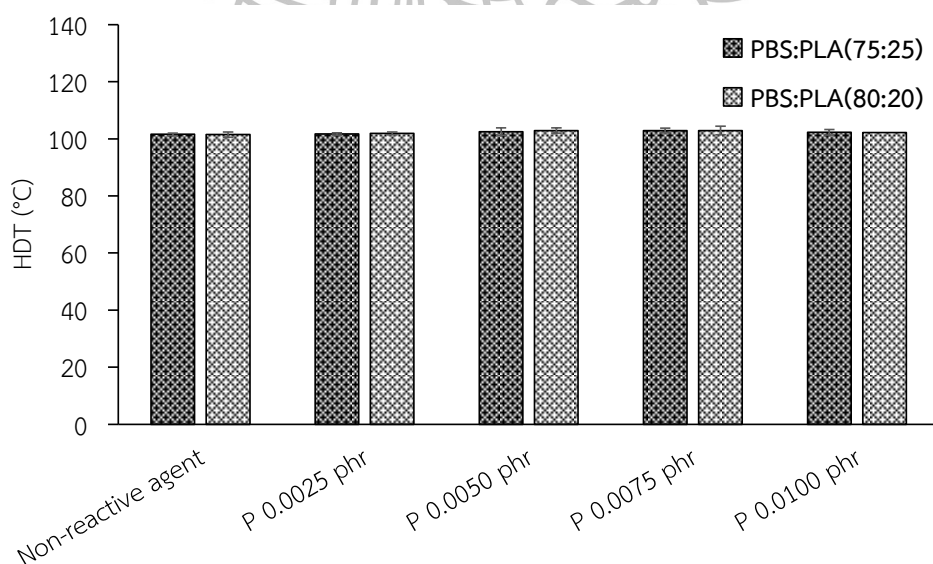
4.2.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox โดยพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PBS ปรากฏที่ -39°C และ PLA ปรากฏที่ 51°C ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox มี T_g ของ PBS และ PLA เกิดขึ้นที่บริเวณเดียวกับพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่ไม่มีการเติม Perkadox และเมื่อพิจารณาปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นพบว่า

การเติม Perkadox ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ทำให้ปริมาณผลึกของ PBS มีค่าลดลงเล็กน้อย (51-57%) แต่ปริมาณผลึกของ PLA ไม่เปลี่ยนแปลง

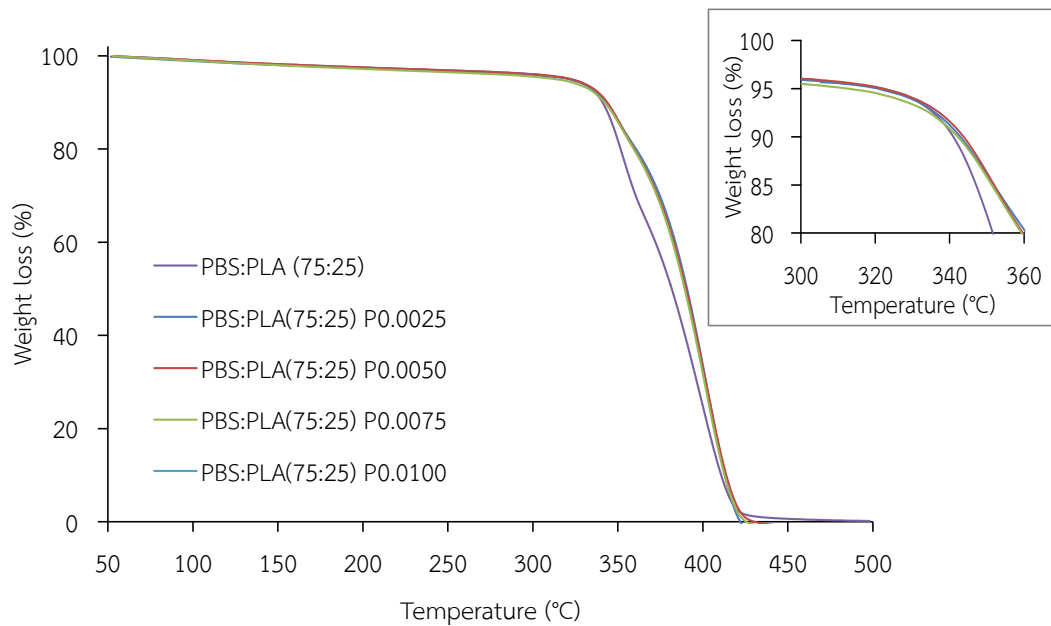
ตารางที่ 4.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox 0.0025-0.0100 phr

	PBS					PLA				
	T _g (°C)	T _c (°C)	T _{cc} (°C)	T _m (°C)	X _c (%)	T _g (°C)	T _c (°C)	T _{cc} (°C)	T _m (°C)	X _c (%)
PBS/PLA(75:25)	-39.4	78.0	-	112.8	62.1	51.3	-	-	153.5	21.2
PBS/PLA(75:25) P0.0025	-39.2	78.5	-	113.3	52.3	51.4	-	-	153.7	21.6
PBS/PLA(75:25) P0.0050	-39.2	87.8	-	112.9	52.1	51.4	-	-	153.6	21.6
PBS/PLA(75:25) P0.0075	-38.1	89.1	-	112.7	52.0	51.3	-	-	153.5	21.7
PBS/PLA(75:25) P0.0100	-38.3	90.9	-	112.6	52.0	51.1	-	-	153.2	21.3
PBS/PLA(80:20)	-39.5	75.9	-	112.7	63.0	51.3	-	-	153.3	26.3
PBS/PLA(80:20) P0.0025	-39.4	87.6	-	113.6	56.2	51.1	-	-	153.0	26.5
PBS/PLA(80:20) P0.0050	-38.2	87.8	-	113.1	56.3	51.2	-	-	153.6	26.6
PBS/PLA(80:20) P0.0075	-38.4	88.6	-	113.0	56.8	51.3	-	-	153.2	26.6
PBS/PLA(80:20) P0.0100	-38.1	89.2	-	113.0	57.4	50.8	-	-	153.0	26.6

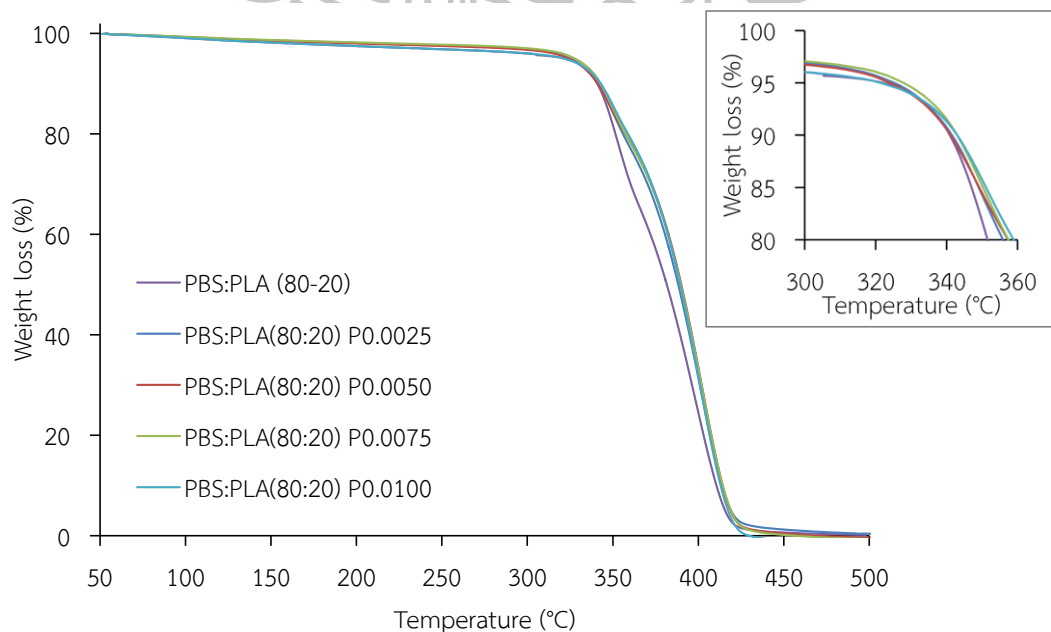


ภาพที่ 4.23 อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA (80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

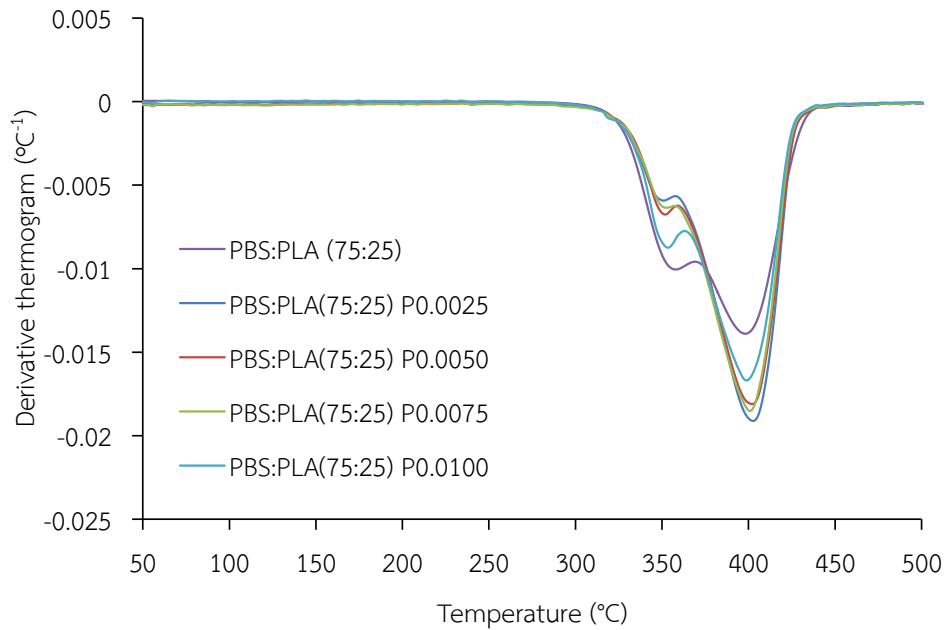
จากการศึกษาอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ดังแสดงในภาพที่ 4.23 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีค่า HDT 101°C ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ลงไป พบว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า HDT อย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากปริมาณผลึกโดยรวมของทั้ง PBS และ PLA มีค่าเท่าเดิม ดังตารางที่ 4.4



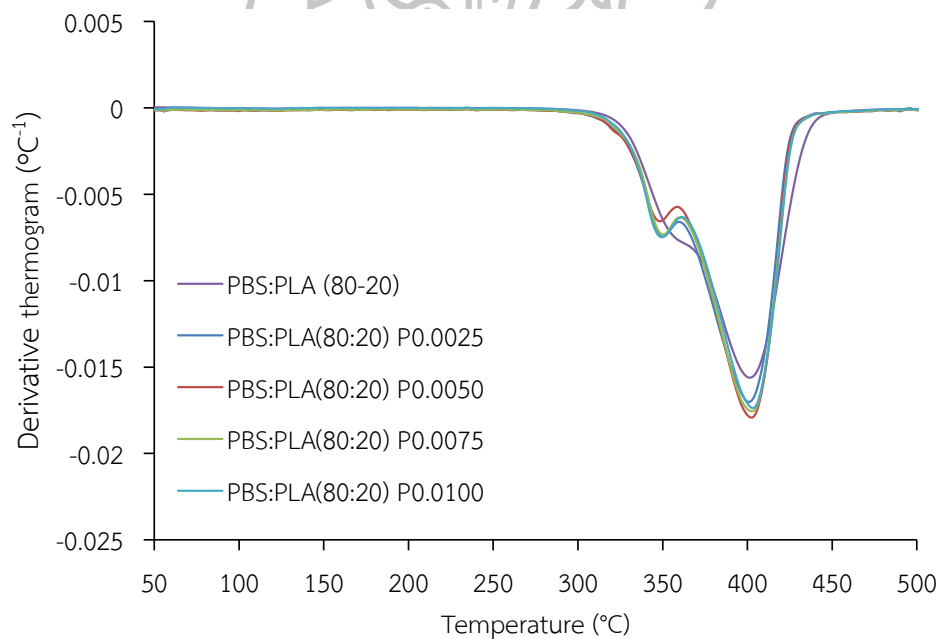
ภาพที่ 4.24 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.25 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.26 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ



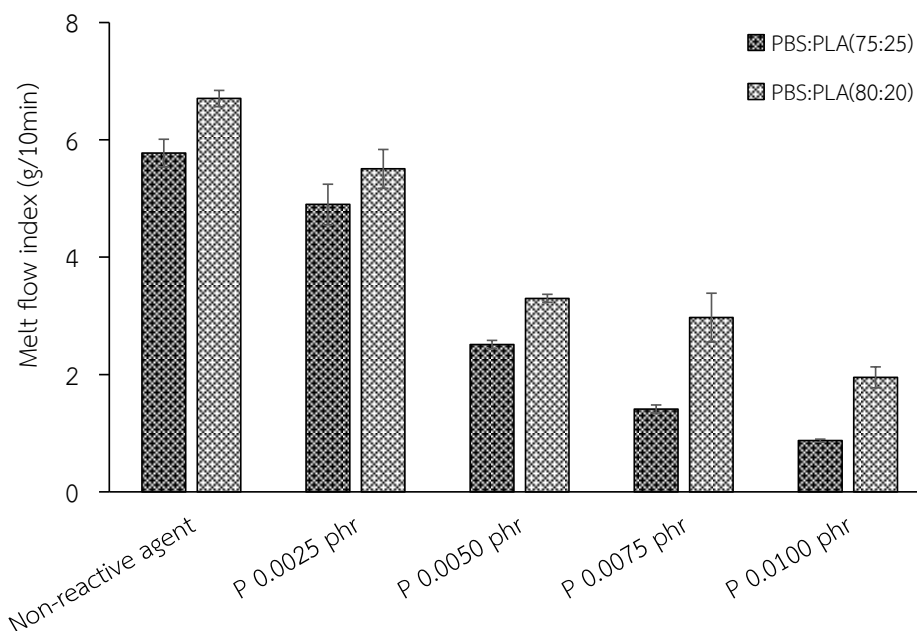
ภาพที่ 4.27 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox แสดงดังในภาพที่ 4.24-4.27 โดยพบว่าการสลายตัว 2 ชั้น โดย PLA เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 350°C และ PBS เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 400°C โดยพอลิเมอร์เบลนด์

PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox พบว่ามีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติม Perkadox ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้น [26]

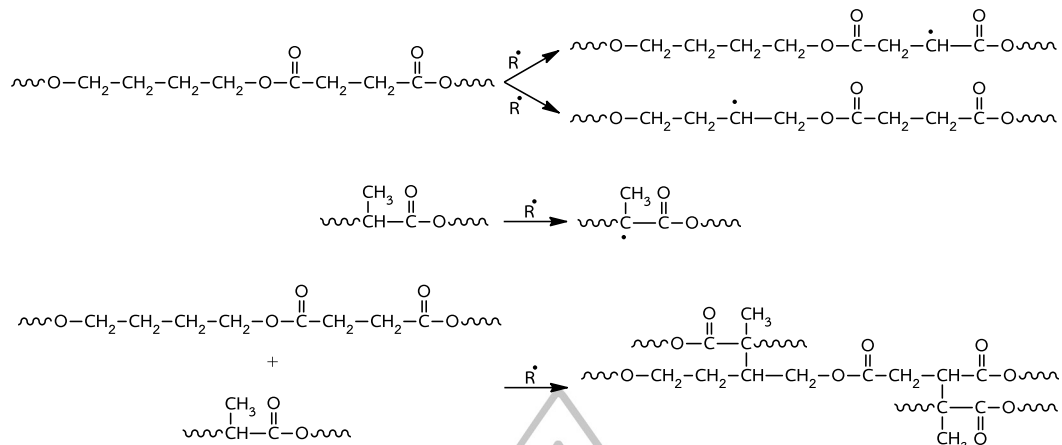
4.2.6 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox

การทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ดังแสดงภาพที่ 4.28 พบว่า PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่าดัชนีการไหลประมาณ 6 g/10 min และ 7 g/10 min ซึ่งค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox มีค่าลดลงตามปริมาณ Perkadox ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเติมเปอร์ออกไซด์ลงไป จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PBS เกิดการเชื่อมขวางจำนวนมาก จึงทำให้ความหนืดสูงขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์



ภาพที่ 4.28 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม Perkadox 0.0025, 0.0050, 0.0075 และ 0.0100 phr ตามลำดับ

จากการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox พบว่ามีความหนืดเพิ่มขึ้น และมีเจลเกิดขึ้น ซึ่งจากการทดสอบ FTIR จะเห็นว่าเจลที่ได้ประกอบไปด้วย PBS และ PLA ซึ่งเป็นการเกิดการเชื่อมขวางระหว่าง PBS และ PLA กลไกการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ว่า Perkadox ที่เติมลงไปนั้น ประกอบไปด้วยเปอร์ออกไซด์ซึ่งสามารถแตกตัวให้ฟรีแรดิคอลที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา จึงเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ทำให้เกิด crosslink หรือ graft-copolymer ดังภาพที่ 4.29



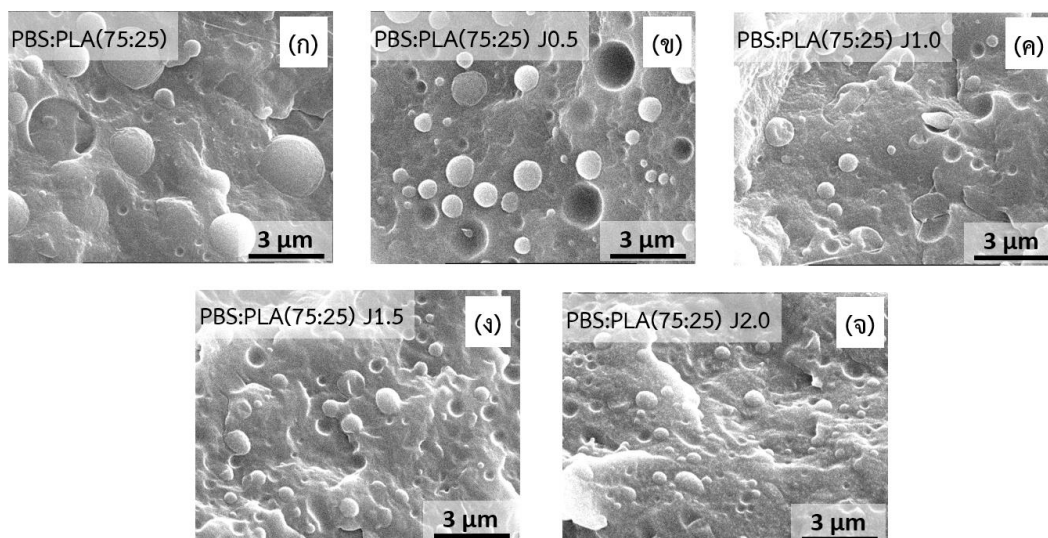
ภาพที่ 4.29 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox [26]

4.3 ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม Joncryl

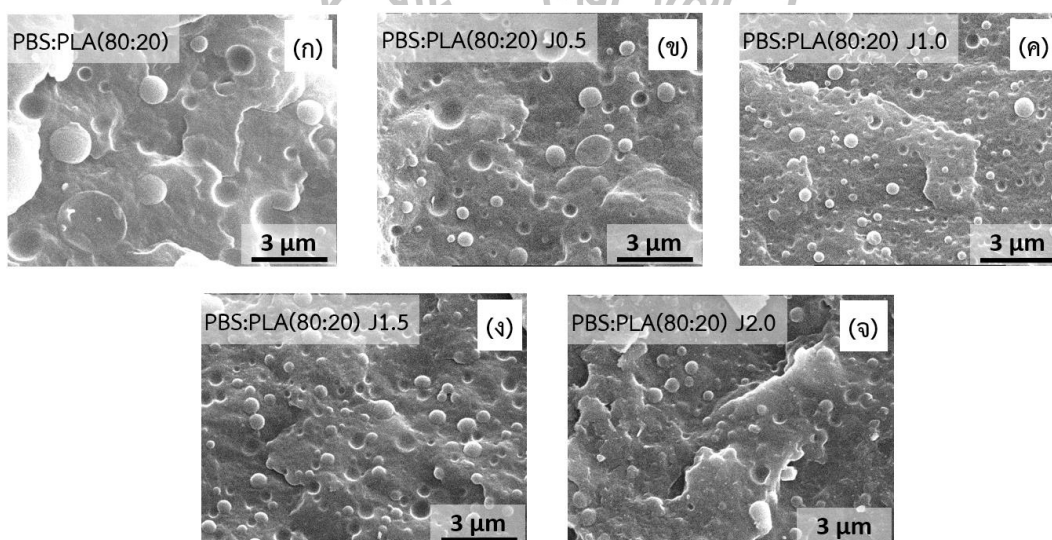
การศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl ที่ปริมาณ 0.5-2.0 phr ด้วยการผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือน ที่อุณหภูมิ 100-195°C ส่งผลให้ Joncryl ที่เติมลงไป ซึ่งเป็นสารยืดต่อสายโซ่ (chain extender) ที่มีหมู่ฟอกไซด์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้ [13]

4.3.1 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl

จากการศึกษาลักษณะสันฐานวิทยาที่บริเวณรอยแตกของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วนการผสม 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม Joncryl จากกระบวนการอัดขึ้นรูป และหักในไนโตรเจนเหลว ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.30 และ 4.31 พบว่าการเติม Joncryl ที่ปริมาณ 0.5-2.0 phr ส่งผลให้ PLA ที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของ PBS มีขนาดเล็กลง โดยมีขนาดประมาณ 0.5-1.5 μm และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น



ภาพที่ 4.30 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ

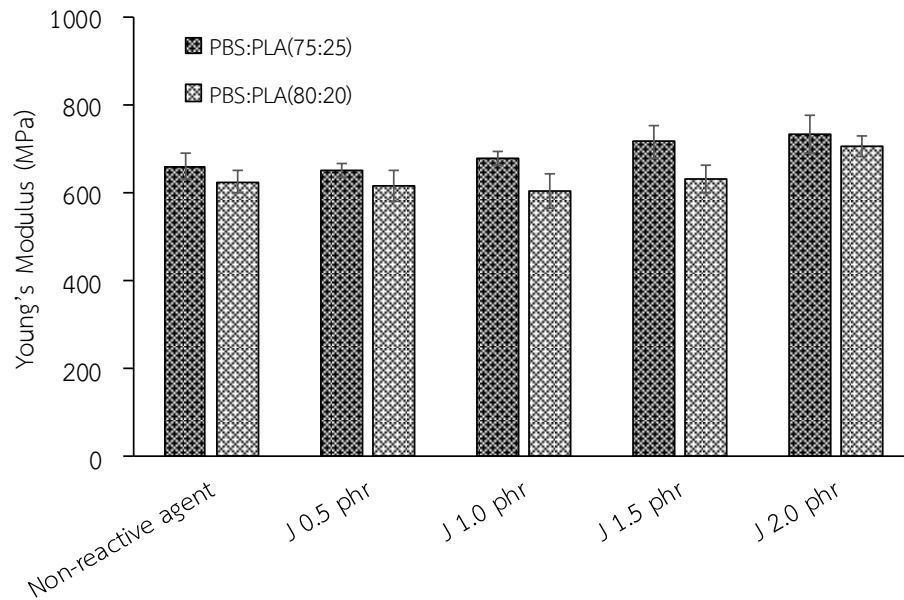


ภาพที่ 4.31 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ

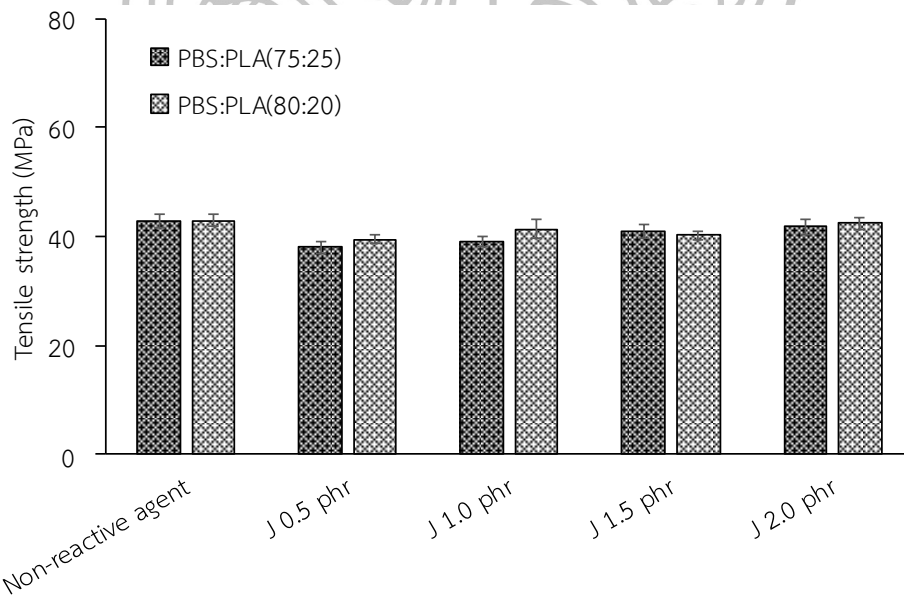
4.3.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl

การทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) จะพิจารณาค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus), ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Young's modulus ดังภาพที่ 4.32 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วนการผสม 75:25 และ 80:20 มีค่า Young's modulus ประมาณ

660 MPa และ 630 MPa ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl มีค่า Young's modulus ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะ

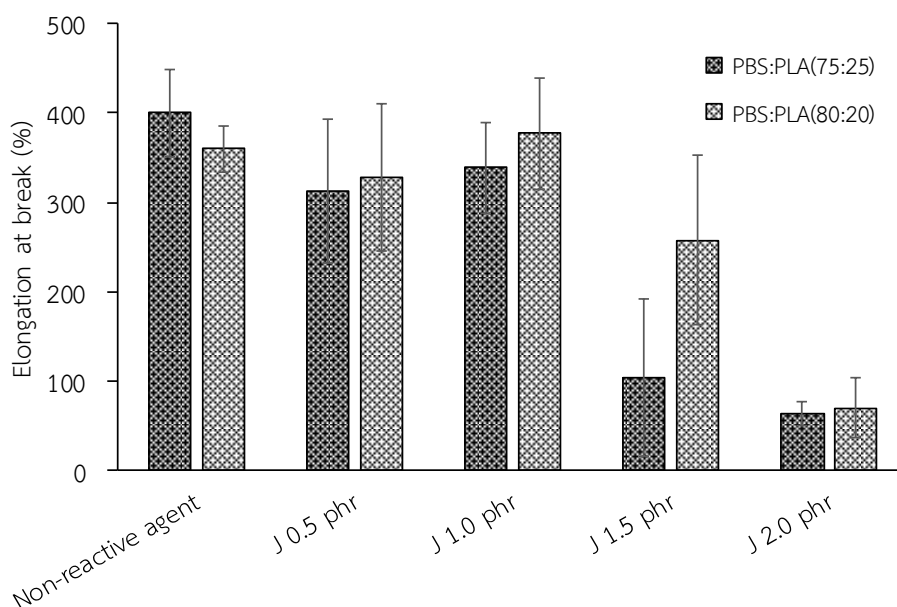


ภาพที่ 4.32 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ



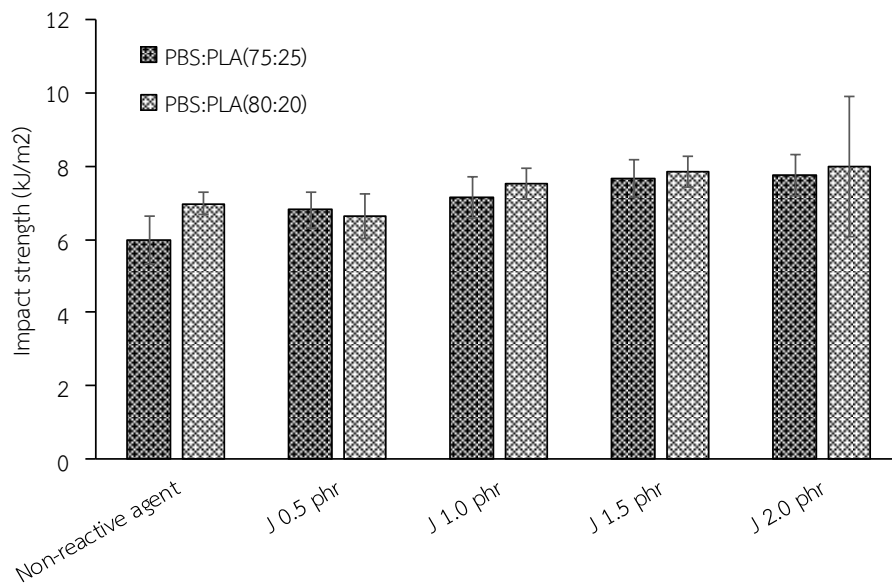
ภาพที่ 4.33 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength ดังภาพที่ 4.33 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่ สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่า Tensile strength ประมาณ 43 MPa ซึ่งเมื่อมีการเติม Joncryl พบว่าไม่ทำให้ค่า Tensile strength เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน



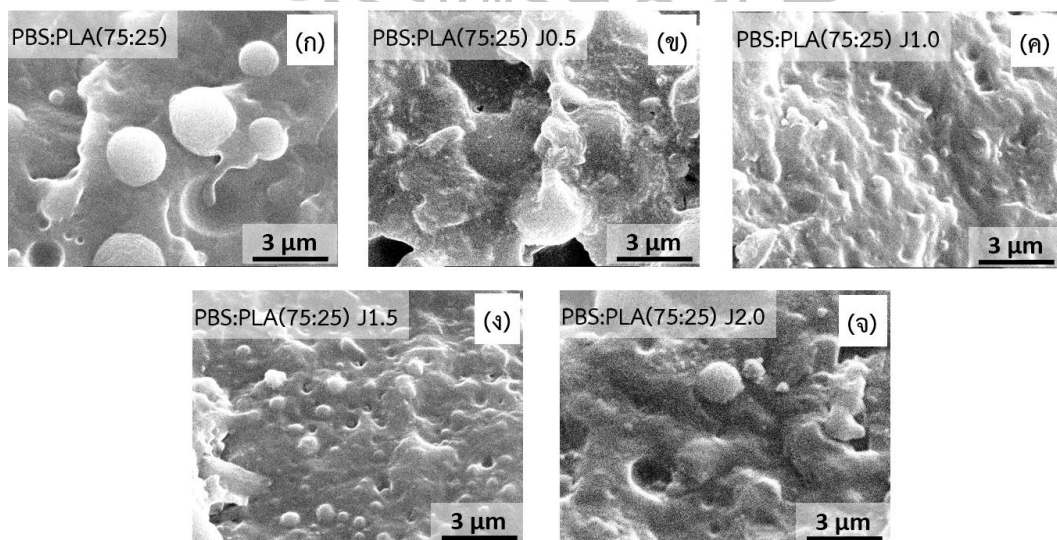
ภาพที่ 4.34 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม Joncryl ดังภาพที่ 4.34 จะเห็นว่าชิ้นงานสามารถยืดออกได้มากกว่า 300% ที่ปริมาณการเติม Joncryl 0.5-1.0 phr แสดงถึงการมีแรงยึดติดที่ดีระหว่าง PBS กับ PLA อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเติม Joncryl มากกว่า 1.0 phr ขึ้นไป ค่า Elongation at break จะลดน้อยลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางของ PBS และ PLA ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction) ซึ่งจะอธิบายต่อไปในผลการทดสอบหาปริมาณเจล (Gel Content)

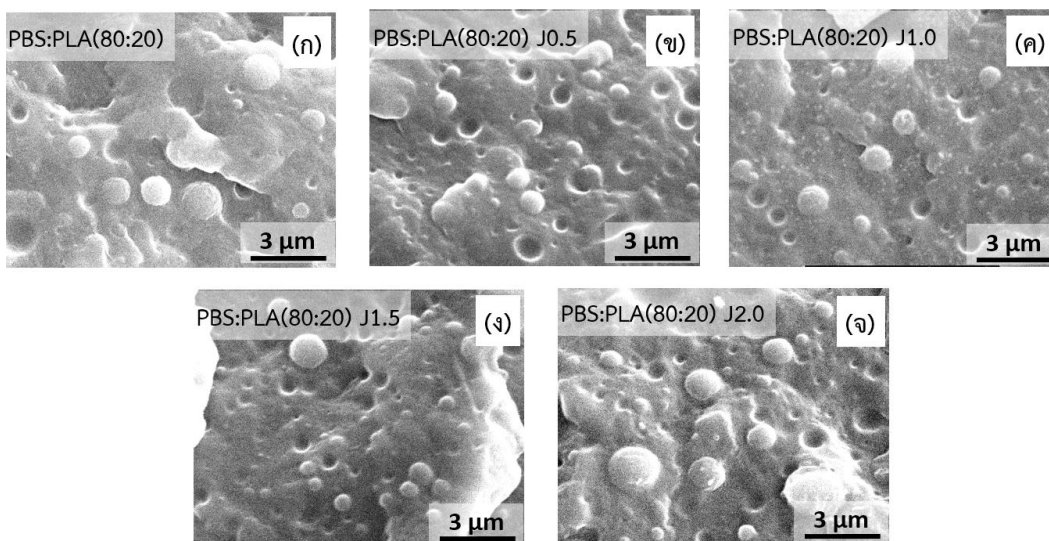


ภาพที่ 4.35 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.35 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบสมบูรณ์ทั้งหมด โดยพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่า impact strength ประมาณ 6 kJ/m² และ 7 kJ/m² ตามลำดับ ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl ลงไป มีค่า impact strength ที่สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเติม Joncryl ส่งผลให้ PLA มีขนาดเล็กลง และมีการกระจายตัวภายในเฟสของ PBS ที่สม่ำเสมอมากขึ้น ดังภาพที่ 4.36-4.37 จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้นเล็กน้อย



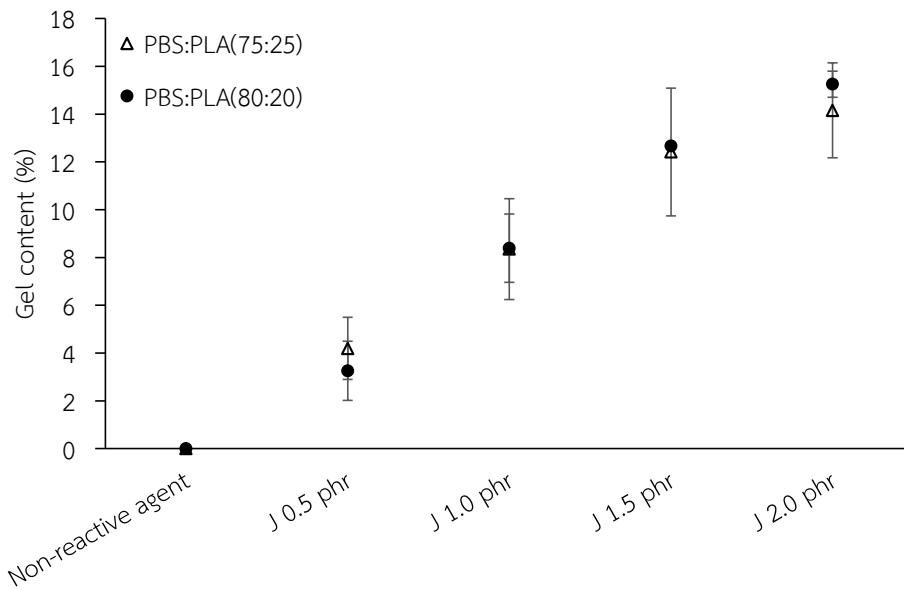
ภาพที่ 4.36 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ



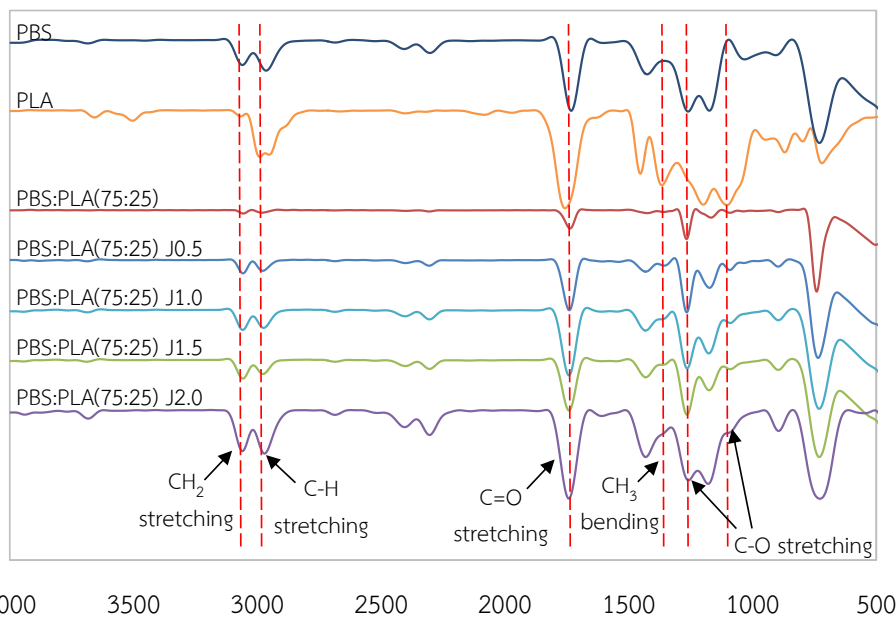
ภาพที่ 4.37 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20) ที่ไม่มีการเติม Joncryl (ก) และมีการเติม Joncryl (ข) 0.5, (ค) 1.0, (ง) 1.5 และ (จ) 2.0 phr ตามลำดับ

4.3.3 การทดสอบหาปริมาณเจล (Gel Content) และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl

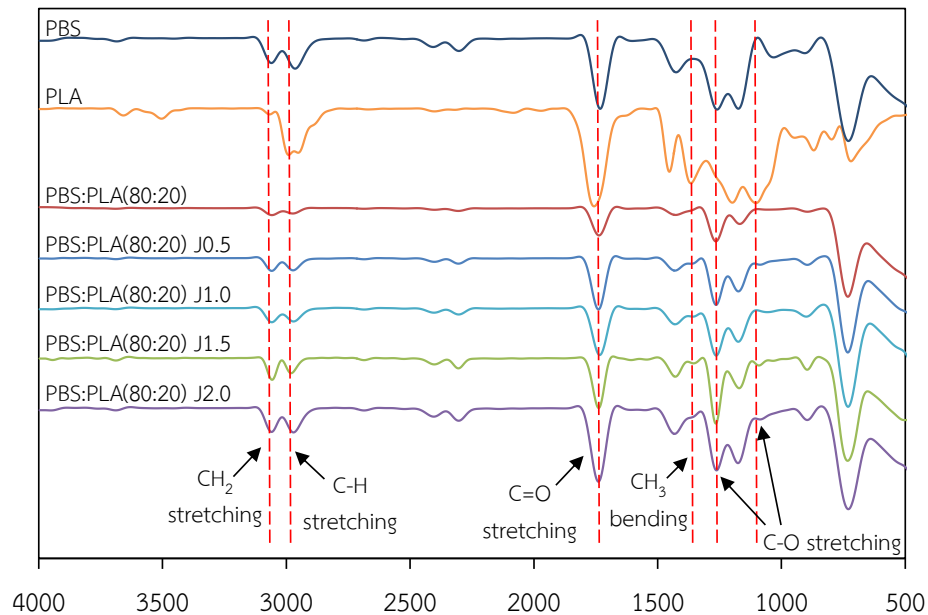
จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl มีลักษณะสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น อาจเนื่องมาจากการมีโครงสร้างของ graft-copolymer ซึ่งสามารถยับยั้งการเกิด graft-copolymer ได้โดยการทดสอบหาปริมาณเจล ดังแสดงในภาพที่ 4.38 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl มีเจลเกิดขึ้น และปริมาณเจลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Joncryl ที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.38 ปริมาณเจล (Gel Content) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.39 FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.40 FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

จาก FTIR spectra ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl ดังภาพที่ 4.39 และ 4.40 จะเห็นว่า PBS/PLA ที่ไม่มีการเติม Joncryl มีพีคเอกลักษณ์ของ PBS ปรากฏที่ 3060, 1732 และ 1259 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดของพันธะ CH_2 , $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}-\text{O}$ ในพอลิเอสเตอร์ ตามลำดับ สำหรับพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของ PLA ปรากฏที่ 2990, 1760, 1103 และ 1366 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}-\text{H}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$ และการสั่นแบบงอของ CH_3 ตามลำดับ โดยพบว่าเจลที่เหลือของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl มีพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของทั้ง PBS และ PLA เป็นการยืนยันว่าภายในเจลที่เหลือมี PBS-g-PLA (graft copolymer) อยู่ด้วย ซึ่ง graft copolymer หรือ long-branch polymer ที่เกิดขึ้น อาจอยู่ที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ตีระหว่งทั้งสองเฟส

4.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

จากสมมติฐานของงานวิจัยที่ว่า การเติม Joncryl ซึ่งเป็นสารยืดต่อสายโซ่ (chain extender) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ทำให้เกิด crosslink หรือ branching ของ PBS และ PLA ได้ จึงนำเจลที่ได้จากการทดสอบหาปริมาณเจล (Gel content) มาทำการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า chemical shift (δ) ของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ PBS และ PLA ในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ดังตารางที่ 4.5 พบว่ามีพีคที่สำคัญของ PBS ปรากฏอยู่ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่ตำแหน่ง $\delta=4.120$, 1.710 และ 2.627 ppm ซึ่งสอดคล้องกับพีคของไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_2-$ ในหมู่ butylene (ตำแหน่งที่ 1

และ 2) และไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-CH_2-$ ใน succinate (ตำแหน่งที่ 3) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีพีคที่สำคัญของ PLA ปรากฏอยู่ 2 ตำแหน่ง ได้แก่ พีคที่เกิดจากไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-CH_3$ ในหมู่ methyl (ตำแหน่งที่ 1) โดยปรากฏเป็นสองพีคย่อย คือที่ $\delta = 1.571$ และ 1.595 ppm และพีคของไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-CH-$ ในสายโซ่หลัก (ตำแหน่งที่ 2) ซึ่งปรากฏเป็นสี่พีคย่อย ในช่วง $\delta = 5.131-5.236$ ppm [30]

สำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี พบว่าค่า chemical shift ของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ PBS และ PLA ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่พบว่ารีแอกทีฟเบลนด์ PBS:PLA(80:20) J1.0 ที่มีการเติม Joncryl มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคที่เกิดจากไฮโดรเจนตำแหน่งที่ 1 และ 2 ใน PBS คือจาก 4.119 เป็น 4.360 และจาก 1.709 เป็น 1.700 และไฮโดรเจนตำแหน่งที่ 2 ใน PLA คือจาก 5.127-5.198 เป็น 5.128-5.199 แสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนระหว่าง PBS และ PLA

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งพีคที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^1H-NMR ของ PBS และ PLA ในรีแอกทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Joncryl

H position	1H chemical shift (ppm)					
	PBS	PLA	PBS:PLA(80:20)		PBS:PLA(80:20) J1.0	
			PBS	PLA	PBS	PLA
1	4.120	1.571, 1.595 (doublet)	4.119	1.577	4.360	1.579, 1.664 (doublet)
2	1.710	5.131-5.236 (quartet)	1.709	5.127-5.198 (quartet)	1.700	5.128-5.199 (quartet)
3	2.627	-	2.626	-	2.626	-

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนความเข้มพีคของ PBS และ PLA ดังตารางที่ 4.6 พบว่าที่ตำแหน่ง PBS1 : PBS2 : PBS3 : PLA1 : PLA2 ในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) มีสัดส่วนความเข้มพีคเป็น 1.00 : 1.1 : 1.00 : 4.32 : 1.00 และมีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนเป็น 1.00 : 1.12 : 1.00 : 2.16 : 0.04 สำหรับรีแอกทีฟเบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl ซึ่งแสดงถึงจำนวนโปรตอนที่ลดลงที่ $-CH_2-$ ในหมู่ butylene ของ PBS และ $-CH-$ ในสายโซ่หลักของ PLA ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่ารีแอกทีฟเบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl อาจเกิด PBS-g-PLA (graft copolymer) ได้

ตารางที่ 4.6 สัดส่วนความเข้มพีคที่เกิดจากไฮโรเจนตำแหน่งต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม Joncryl

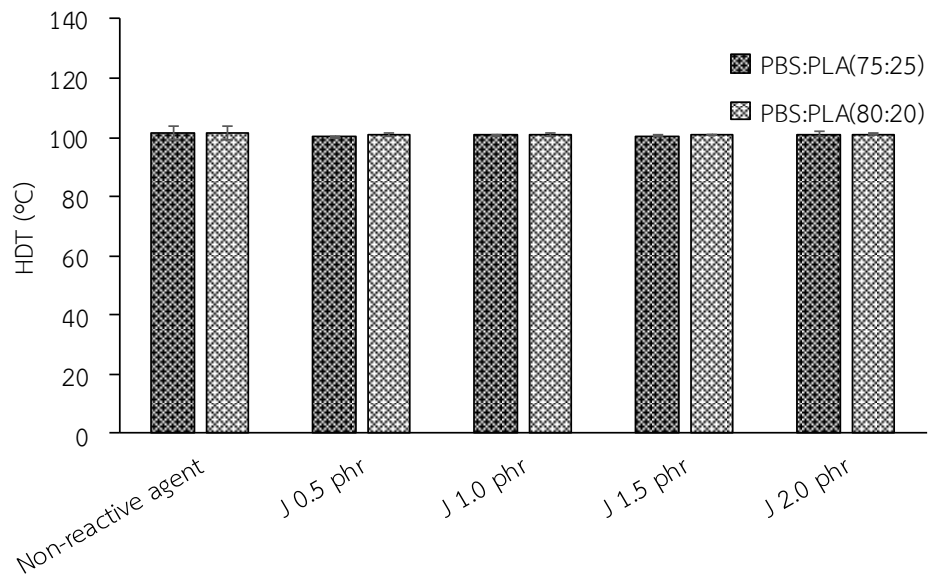
H position	^1H intensity					
	PBS	PLA	PBS:PLA(80:20)		PBS:PLA(80:20) J1.0	
			PBS	PLA	PBS	PLA
1	1.88	2.99	1.00	4.32	1.00	2.16
2	1.89	1.00	1.13	1.00	1.12	0.04
3	2.00	-	1.00	-	1.00	-

4.3.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl ด้วยเทคนิค DSC ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PBS ปรากฏที่ -39°C และ PLA ปรากฏที่ -51°C ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl มี T_g ของ PBS และ PLA ที่ตำแหน่งเดียวกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม Joncryl เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl พบว่าผลึกของ PBS มีค่าลดลง (30-45%) ส่วนปริมาณผลึกของ PLA ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะ

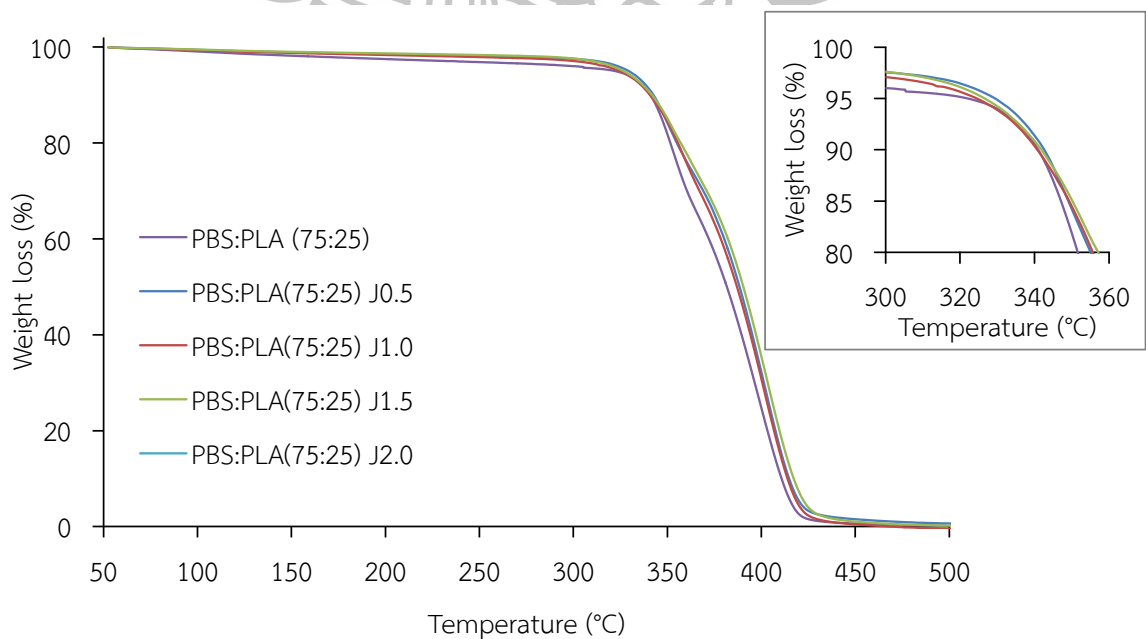
ตารางที่ 4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl 0.5- 2.0 phr

	PBS					PLA				
	T_g ($^\circ\text{C}$)	T_c ($^\circ\text{C}$)	T_{cc} ($^\circ\text{C}$)	T_m ($^\circ\text{C}$)	X_c (%)	T_g ($^\circ\text{C}$)	T_c ($^\circ\text{C}$)	T_{cc} ($^\circ\text{C}$)	T_m ($^\circ\text{C}$)	X_c (%)
PBS/PLA(75:25)	-39.4	78.0	-	112.8	62.1	51.3	-	-	153.5	21.2
PBS/PLA(75:25) J0.5	-39.2	83.5	-	112.7	39.8	51.5	-	-	152.4	20.9
PBS/PLA(75:25) J1.0	-39.1	79.9	-	112.6	39.1	51.3	-	-	150.8	20.9
PBS/PLA(75:25) J1.5	-39.2	86.3	-	112.4	39.8	51.2	-	-	151.0	21.0
PBS/PLA(75:25) J2.0	-39.2	87.3	-	112.4	39.7	51.2	-	-	150.6	21.2
PBS/PLA(80:20)	-39.5	75.9	-	112.7	63.0	51.3	-	-	153.3	26.3
PBS/PLA(80:20) J0.5	-39.2	86.4	-	112.6	41.5	51.2	-	-	152.0	25.7
PBS/PLA(80:20) J1.0	-38.2	86.6	-	112.7	41.4	51.1	-	-	151.4	26.0
PBS/PLA(80:20) J1.5	-39.2	86.2	-	112.2	41.2	51.1	-	-	145.0	26.1
PBS/PLA(80:20) J2.0	-39.1	86.8	-	112.3	44.5	51.2	-	-	144.9	26.5

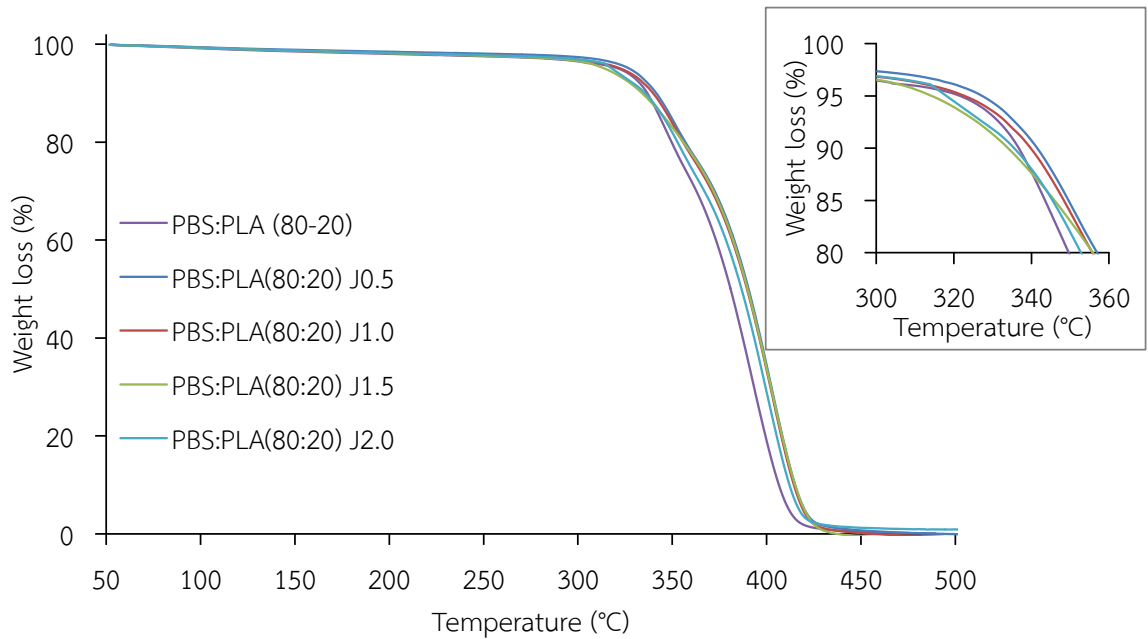


ภาพที่ 4.41 อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

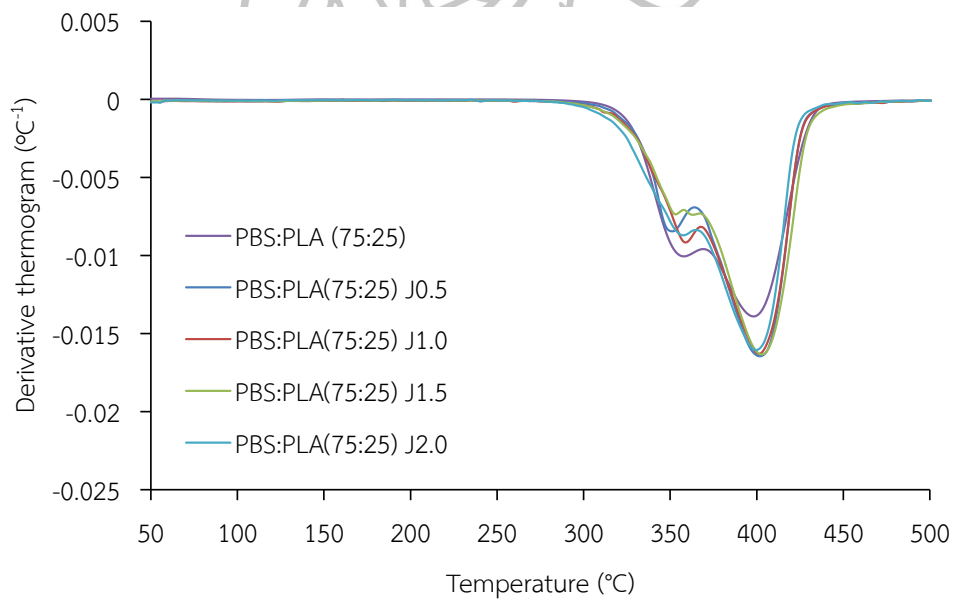
จากภาพที่ 4.41 แสดงอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่า HDT 101°C และเมื่อมีการเติม Joncryl ลงไป พบว่าค่า HDT ไม่เปลี่ยนแปลงอย่าง อาจเนื่องมาจาก ปริมาณผลึกกรรมของ PBS และ PLA มีค่าเท่าเดิม ดังตารางที่ 4.7



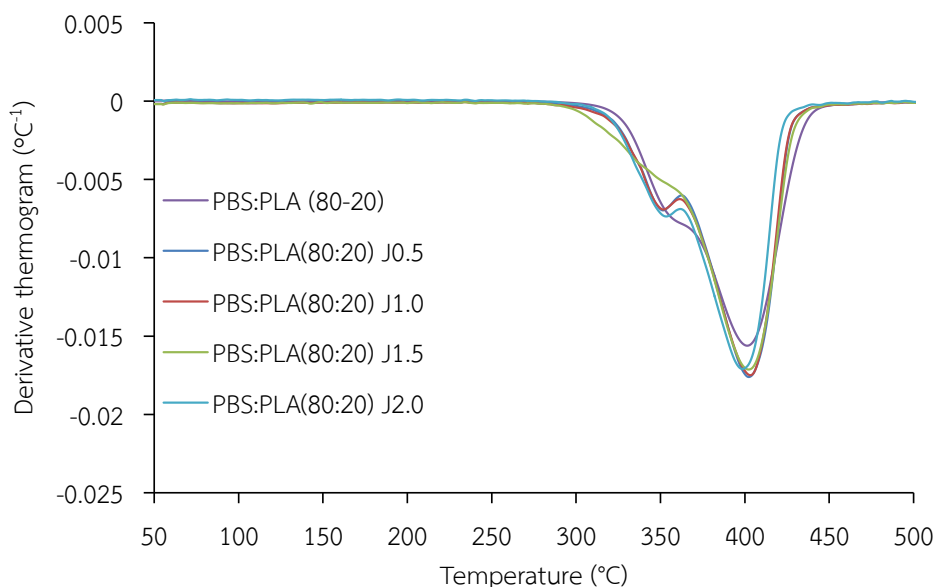
ภาพที่ 4.42 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.43 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบสblend PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.44 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบสblend PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

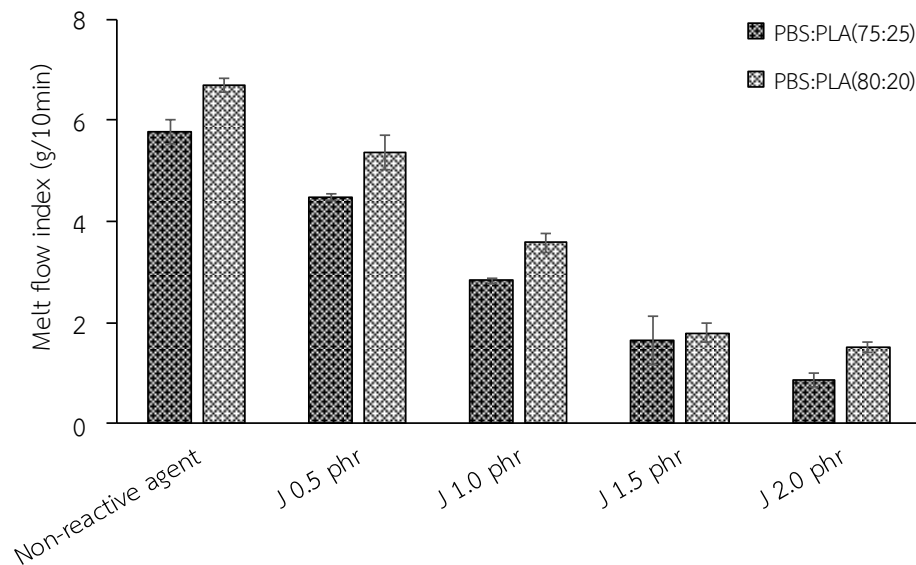


ภาพที่ 4.45 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.42-4.45 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม Joncryl พบว่ามีการสลายตัว 2 ชั้น โดยการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 350°C เป็นของ PLA และการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 400°C เป็นของ PBS ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl มีค่า T_d ที่อุณหภูมิสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติม Joncryl มีส่วนช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

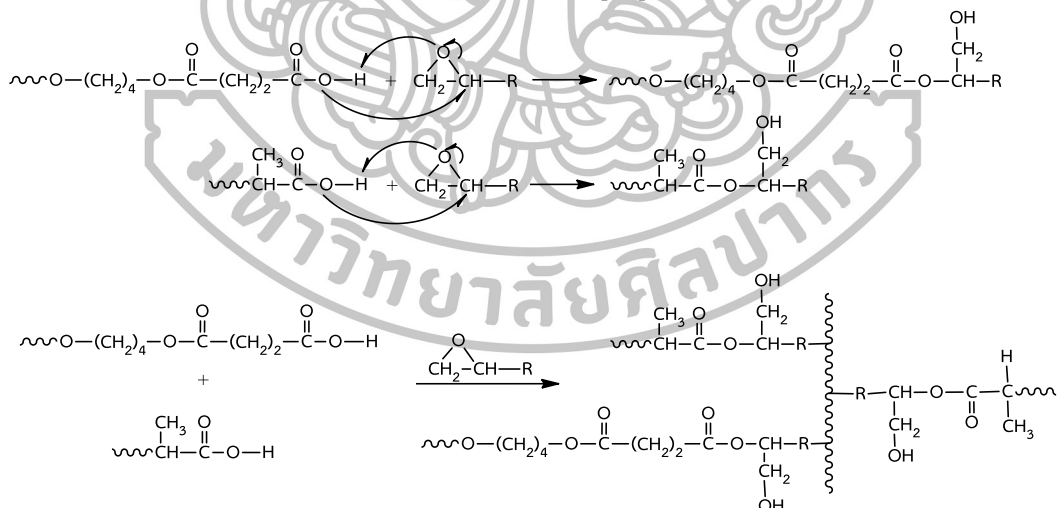
4.3.6 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl

จากภาพที่ 4.46 แสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PLA โดยพบว่าที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่าดัชนีการไหลประมาณ 6 g/10 min และ 7 g/10 min ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl มีค่าดัชนีการไหลลดลงเมื่อเติม Joncryl ในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากการเติม Joncryl ซึ่งเป็นสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล (chain extender) ลงไป จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่ PBS กับ PLA จนมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อค่าความหนืด ทำให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์มีค่าต่ำลง



ภาพที่ 4.46 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม Joncryl 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 phr ตามลำดับ

จากการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl พบว่ามีลักษณะสัณฐานวิทยา, สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น โดย Joncryl ที่เติมลงไปนั้น เป็นสารยืดต่อสายโซ่ (chain extender) ที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ซึ่งความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่ ซึ่งอาจเกิดการเชื่อมต่อทั้งในสายโซ่หลัก การเชื่อมต่อที่ทำให้เกิดกิ่งก้าน และการเชื่อมต่อแบบโครงร่างตาข่าย [31] ดังภาพที่ 4.47



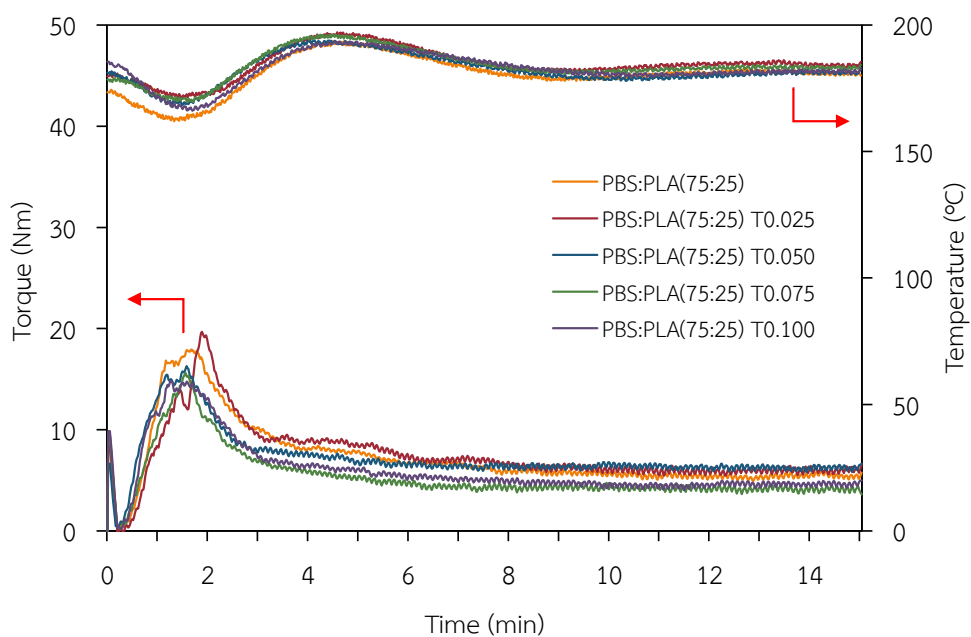
ภาพที่ 4.47 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl [13, 32]

4.4 ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิবিທີลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม TBT

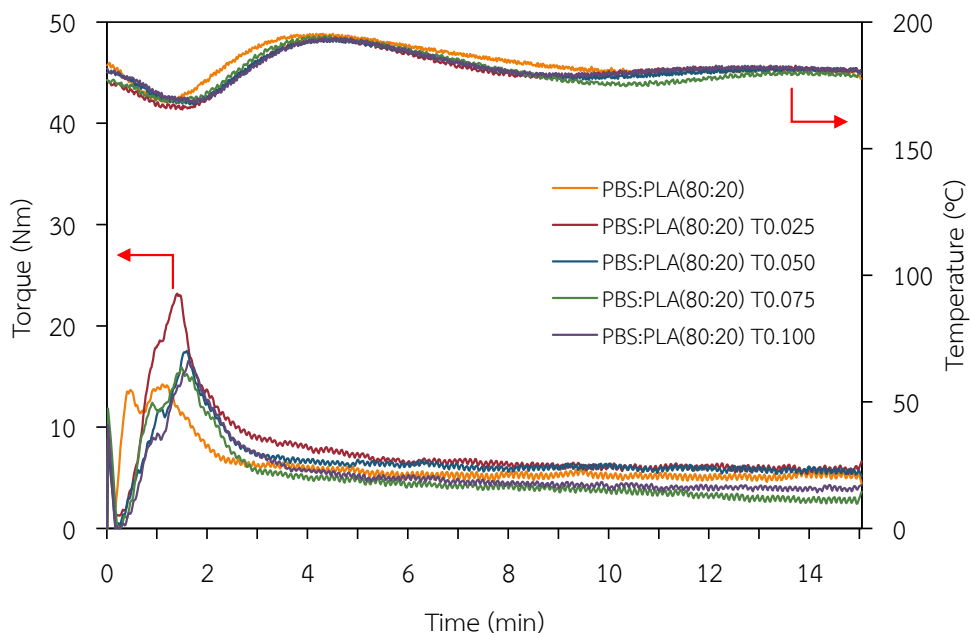
การศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT ที่ปริมาณ 0.025-0.100 phr โดยทำการผสมในเครื่องผสมภายในแบบปิด ภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือน ที่อุณหภูมิ 185°C ส่งผลให้ TBT ที่เติมลงไป ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของพอลิเมอร์ได้ [33, 34]

4.4.1 ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT จากเครื่องผสมภายในแบบปิด

ในการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) มีอิทธิพลทั้งการทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่และการทำให้สายโซ่เกิดการขาดออกจากกัน จึงทำการศึกษาอิทธิพลของ TBT ต่อ PBS และ PLA โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดและอุณหภูมิของเครื่องผสมภายในแบบปิด ที่อุณหภูมิ 185°C ความเร็วรอบในการผสม 60 rpm เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.48 และ 4.49 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม TBT ปริมาณ 0.025-0.100 phr ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ไม่ทำให้ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ซึ่งค่าแรงบิดค่อย ๆ ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น และพบว่าค่าแรงบิดสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า TBT ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) ไม่ทำให้ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA เกิดการเปลี่ยนแปลง



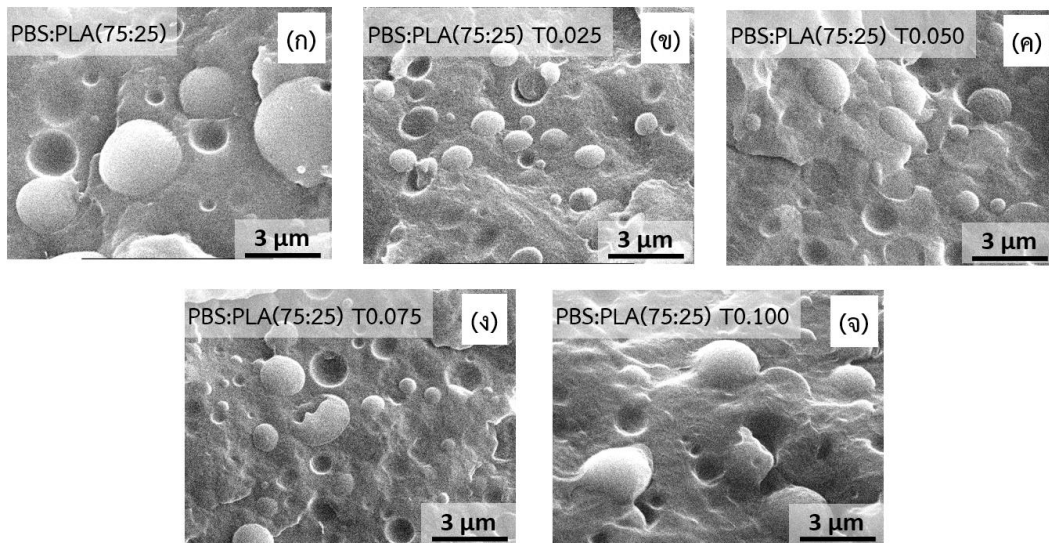
ภาพที่ 4.48 ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม TBT จากเครื่องผสมภายในแบบปิด



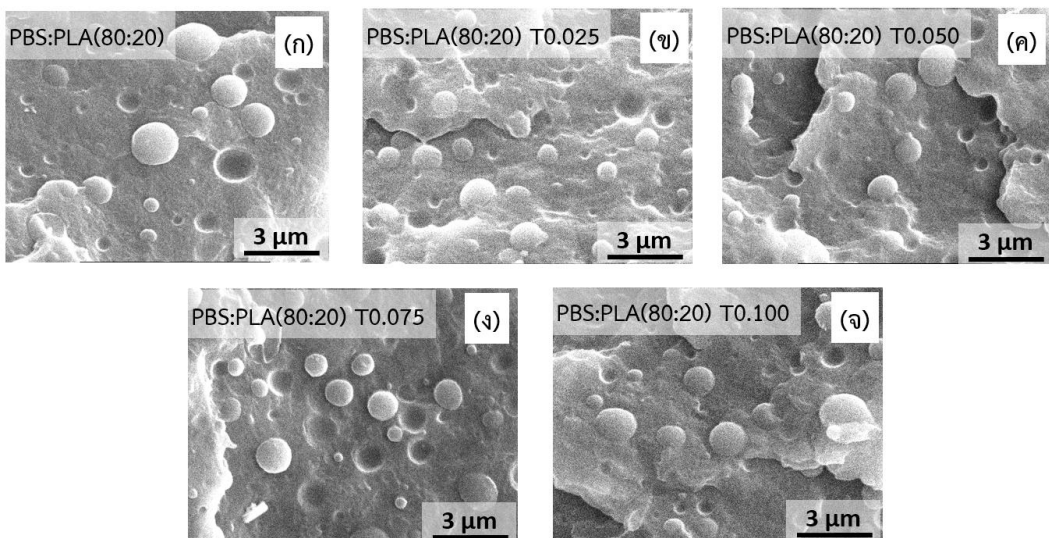
ภาพที่ 4.49 ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT จากเครื่องผสมภายในแบบปิด

4.4.2 สัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT

จากสัมฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานที่หักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT ดังแสดงในภาพที่ 4.50-4.51 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่ไม่มีการเติม TBT มีอนุภาค PLA ที่กระจายตัวเป็นเม็ดกลมขนาดใหญ่ประมาณ 3-5 μm และเมื่อเติม TBT ที่ปริมาณ 0.025-0.100 phr ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA พบว่าอนุภาค PLA มีขนาดเล็กลง โดยมีขนาดประมาณ 0.5-3.0 μm และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น



ภาพที่ 4.50 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม TBT (ก) และมีการเติม TBT (ข) T0.025, (ค) T0.050, (ง) T0.075 และ (จ) T0.100 phr ตามลำดับ

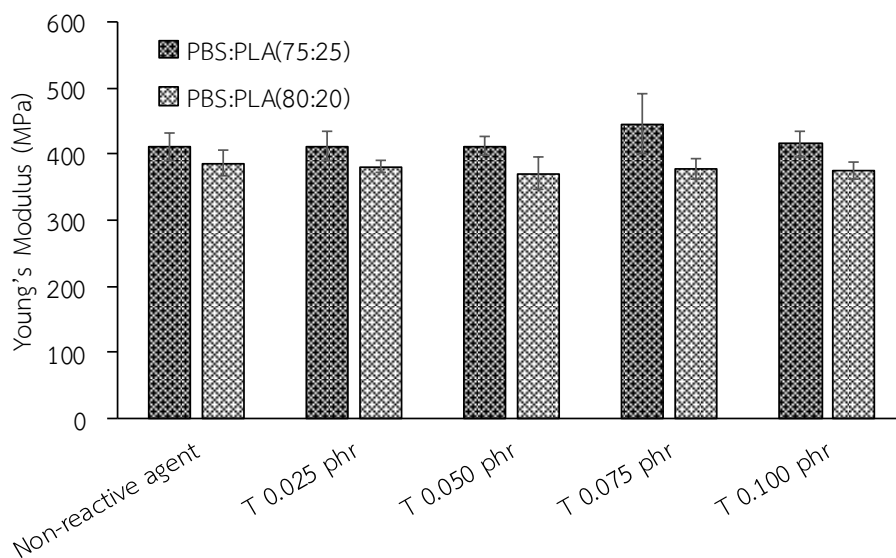


ภาพที่ 4.51 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20) ที่ไม่มีการเติม TBT (ก) และมีการเติม TBT (ข) T0.025, (ค) T0.050, (ง) T0.075 และ (จ) T0.100 phr ตามลำดับ

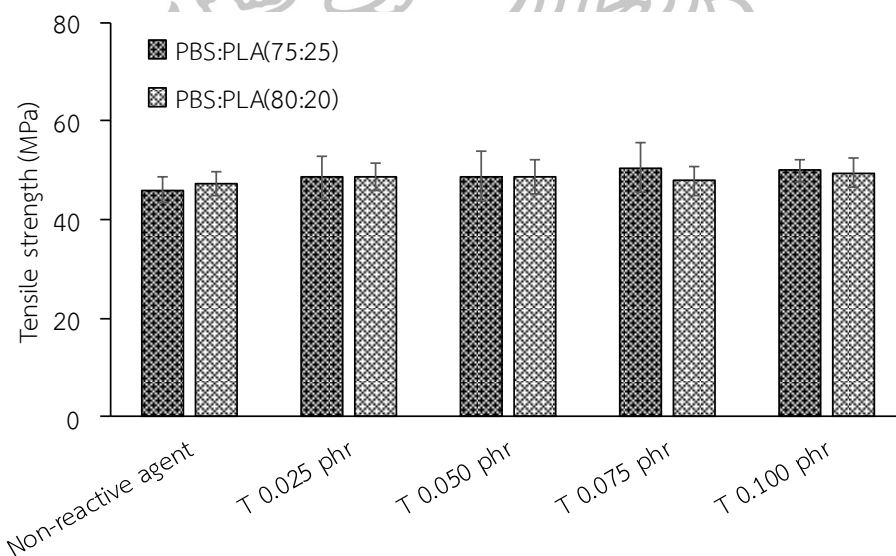
4.4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT

การทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA จะพิจารณาจากค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus), ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Young's modulus ดังภาพที่ 4.52 พบว่า PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีค่า Young's modulus ประมาณ 410 MPa

และ 390 MPa ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT พบว่าค่า Young's modulus ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะ

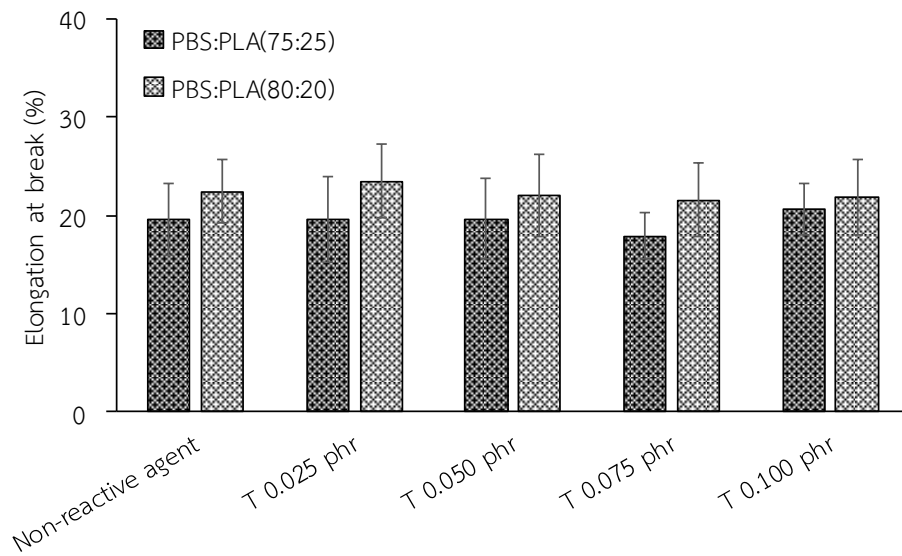


ภาพที่ 4.52 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ



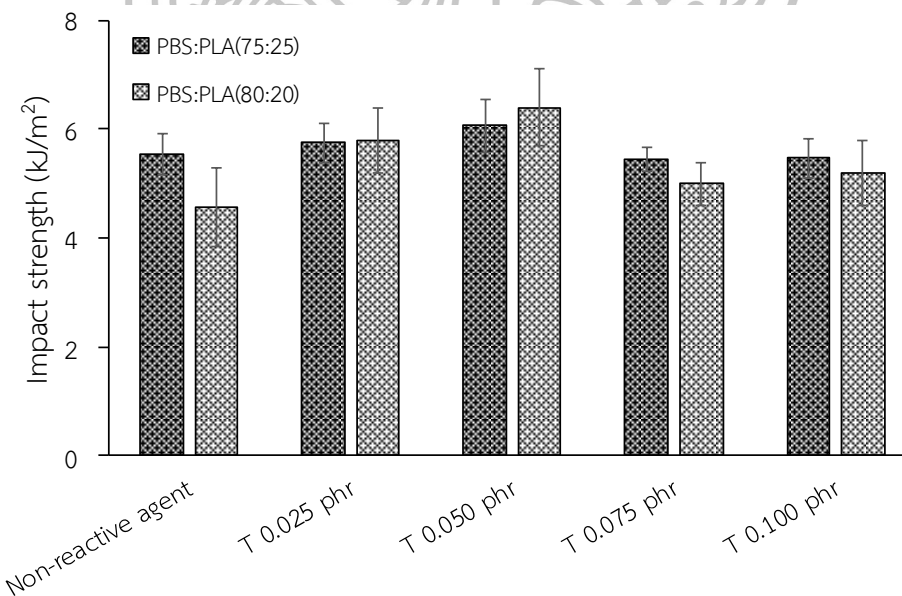
ภาพที่ 4.53 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.53 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่า Tensile strength ประมาณ 50 MPa ซึ่งเมื่อมีการเติม TBT พบว่าค่า Tensile strength ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะ



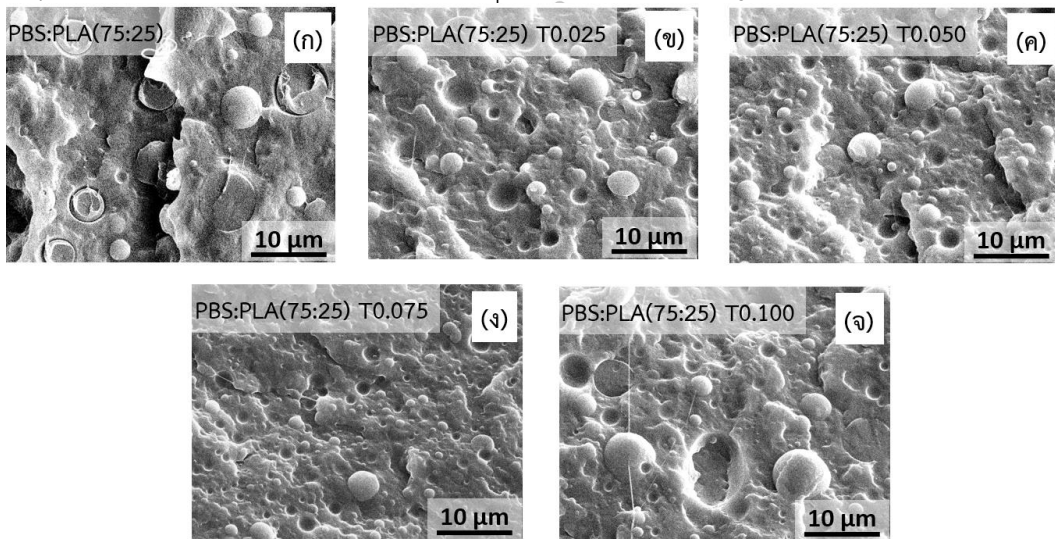
ภาพที่ 4.54 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ดังภาพที่ 4.54 จะเห็นว่า การเติม TBT ลงไปไม่ส่งผลให้ Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA เกิดการเปลี่ยนแปลง

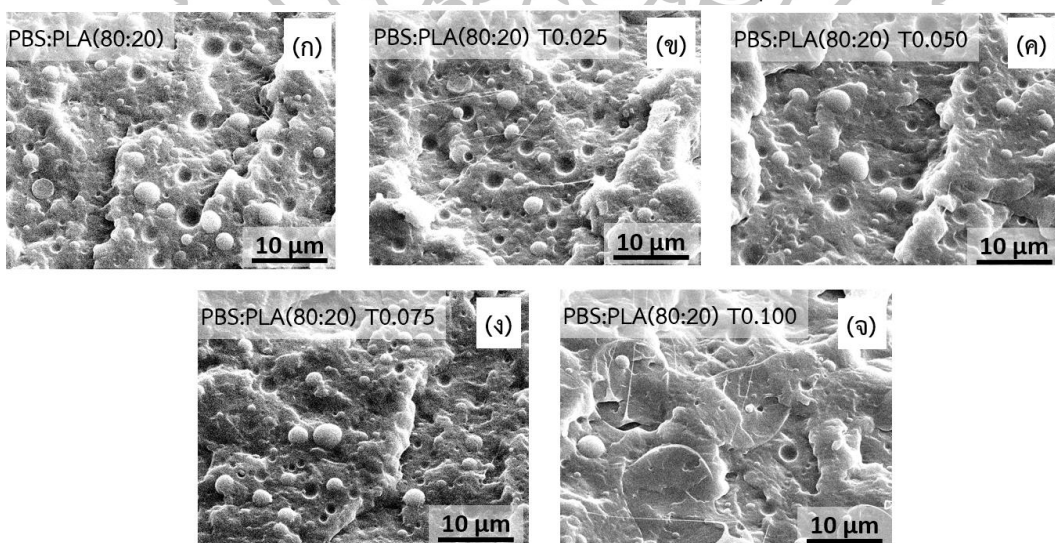


ภาพที่ 4.55 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

การทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ดังภาพที่ 4.55 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบสมบูรณ์ทั้งหมด โดยพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีค่า impact strength ประมาณ 6 kJ/m^2 และ 5 kJ/m^2 ตามลำดับ ซึ่งพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ปริมาณ 0.025-0.075 phr ลงไป มีค่า impact strength ที่สูงขึ้น เนื่องจากการเติม TBT ส่งผลให้ PLA มีขนาดเล็กลง จากประมาณ 3-5 μm เหลือ 1-3 μm และมีการกระจายตัวภายในเฟสของ PBS ที่สม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4.56-4.57 จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่เมื่อเติม TBT ปริมาณมากกว่า 0.075 phr พบว่าค่า impact strength จะมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาค PLA มีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 4.56 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่ไม่มีการเติม TBT (ก) และมีการเติม TBT (ข) T0.025, (ค) T0.050, (ง) T0.075 และ (จ) T0.100 phr ตามลำดับ

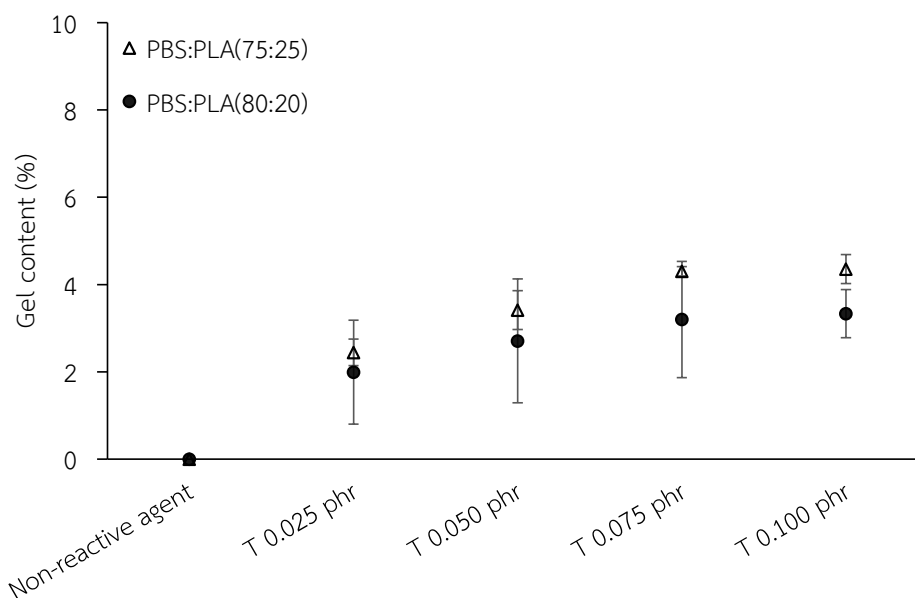


ภาพที่ 4.57 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20) ที่ไม่มีการเติม TBT (ก) และมีการเติม TBT (ข) T0.025, (ค) T0.050, (ง) T0.075 และ (จ) T0.100 phr ตามลำดับ

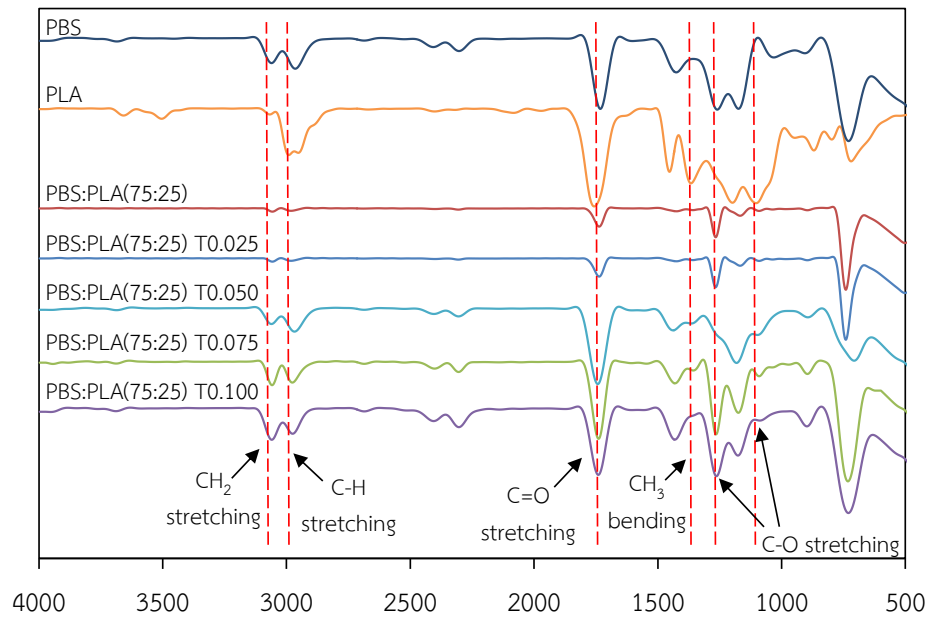
4.4.4 การทดสอบหาปริมาณเจล (Gel Content) และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ลงไปเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน มีลักษณะสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน จึงยืนยันการเกิดปรากฏการณ์ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้ด้วยหลักการละลาย โดยการนำพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มาละลายในไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) (ตัวทำละลายที่ดีสำหรับ PBS และ PLA) ซึ่งการเติม TBT ลงไป อาจทำให้เกิด transesterification ระหว่าง PBS และ PLA โดยโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง จึงเหลือเป็นเจลที่ไม่ละลาย

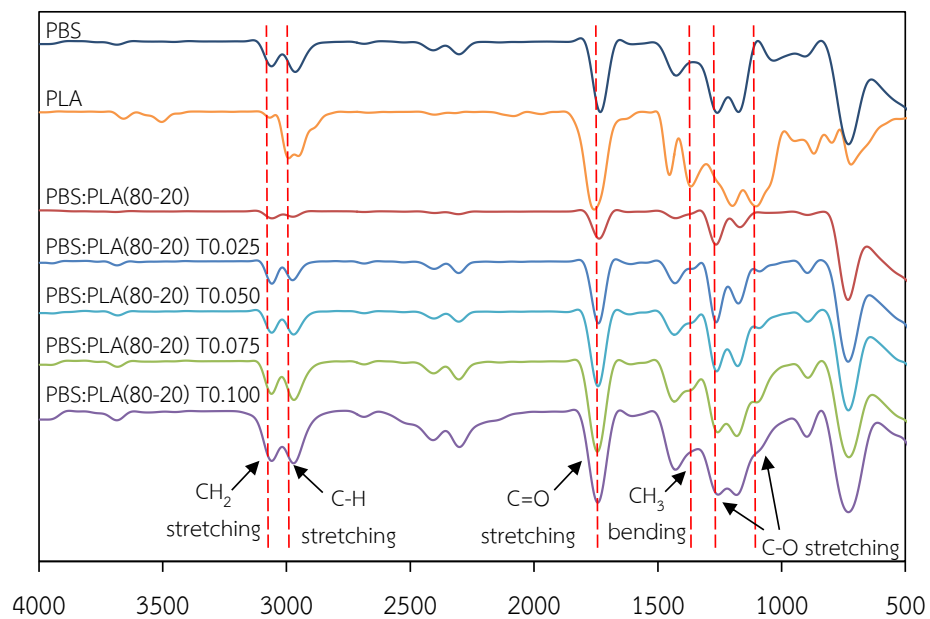
จากการทดสอบหาปริมาณเจลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PLA ที่มีการเติม TBT แสดงดังภาพที่ 4.58 พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT มีเจลเกิดขึ้น และปริมาณเจลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TBT ที่เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเจลที่ได้จะถูกนำไปทดสอบ FTIR



ภาพที่ 4.58 ปริมาณเจล (Gel Content) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.59 FTIR spectra ของตะกอนที่เหลือจากการทดสอบ Gel content พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.60 FTIR spectra ของตะกอนที่เหลือจากการทดสอบ Gel content พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

จาก FTIR spectra ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ดังภาพที่ 4.59-4.60 จะเห็นว่า PBS/PLA ที่ไม่มีการเติม TBT มีพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของ PBS คือที่ 3060, 1732 และ 1259 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นแบบยืดของพันธะ CH_2 , $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}-\text{O}$ ในพอลิเอสเทอร์ ตามลำดับ

สำหรับพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของ PLA คือที่ 2990, 1760, 1103 และ 1366 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H, C=O, C-O และการสั่นแบบงอของ CH_3 ตามลำดับ ซึ่ง FTIR spectra ของเจลที่เหลือจากการทดสอบ Gel content แสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของทั้ง PBS และ PLA เป็นการยืนยันว่าภายในเจลที่เหลือมี PBS-g-PLA (graft copolymer) อยู่ด้วย ซึ่ง transesterification ระหว่าง PBS และ PLA ที่เกิดขึ้น อาจอยู่ที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ซึ่งช่วยให้เกิดการยึดเกาะระหว่างทั้งสองเฟสที่ดีมากขึ้น

4.4.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

จากสมมติฐานของงานวิจัยที่ว่า การเติม TBT ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของพอลิเมอร์ และทำให้เกิด graft-copolymer ระหว่าง PBS และ PLA ได้ จึงนำเจลที่ได้จากการทดสอบหาปริมาณเจล (Gel content) มาทำการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟ $^1\text{H-NMR}$ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT ดังตารางที่ 4.8 พบว่า PBS มีพีคที่สำคัญ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ พีคของไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_2-$ ในหมู่ butylene (ตำแหน่งที่ 1 และ 2) และไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_2-$ ใน succinate (ตำแหน่งที่ 3) โดยปรากฏที่ $\delta=4.120, 1.710$ และ 2.627 ppm ตามลำดับ และพบว่า PLA ปรากฏพีคที่สำคัญอยู่ 2 ตำแหน่ง ได้แก่ พีคที่ปรากฏเป็นสองพีคย่อยที่ $\delta= 1.571$ และ 1.595 ppm ซึ่งสอดคล้องกับไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_3$ ในหมู่ methyl (ตำแหน่งที่ 1) และพีคที่ปรากฏเป็นสี่พีคย่อยในช่วง $\delta= 5.131-5.236$ ppm ซึ่งสอดคล้องกับไฮโดรเจนในโมเลกุลของ $-\text{CH}-$ ในสายโซ่หลัก (ตำแหน่งที่ 2) [30]

สำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี พบว่าไฮโดรเจนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ PBS และ PLA มีค่า chemical shift ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ในขณะที่รีแอคทีฟเบลนด์ PBS:PLA(80:20) T0.1 ที่มีการเติม TBT มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคที่เกิดจากไฮโดรเจนตำแหน่งที่ 1 ใน PBS คือจาก 4.119 เป็น 4.359 และไฮโดรเจนตำแหน่งที่ 2 ใน PLA คือจาก 5.127-5.198 เป็น 5.128-5.198 แสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนระหว่าง PBS และ PLA

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งพีคที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม TBT

H position	^1H chemical shift (ppm)					
	PBS	PLA	PBS:PLA(80:20)		PBS:PLA(80:20) T0.1	
			PBS	PLA	PBS	PLA
1	4.120	1.571, 1.595 (doublet)	4.119	1.577	4.359	1.571, 1.593 (doublet)
2	1.710	5.131-5.236 (quartet)	1.709	5.127-5.198 (quartet)	1.709	5.128-5.198 (quartet)
3	2.627	-	2.626	-	2.626	-

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนความเข้มข้นของ PBS และ PLA ดังตารางที่ 4.9 พบว่าที่ตำแหน่ง PBS1 : PBS2 : PBS3 : PLA1 : PLA2 ในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) มีสัดส่วนความเข้มข้นเป็น 1.00 : 1.1 : 1.00 : 4.32 : 1.00 และมีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนเป็น 1.00 : 1.08 : 1.01 : 1.37 : 0.07 สำหรับรีแอคทีฟเบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ซึ่งแสดงถึงจำนวนโปรตอนที่ลดลงที่ $-CH_2-$ ในหมู่ butylene ของ PBS และ $-CH-$ ในสายโซ่หลักของ PLA ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่ารีแอคทีฟเบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT อาจเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งทำให้เกิด graft-copolymer ระหว่าง PBS และ PLA ได้

ตารางที่ 4.9 สัดส่วนความเข้มข้นที่เกิดจากไฮโดรเจนตำแหน่งต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยเทคนิค ^1H-NMR ของ PBS และ PLA ในรีแอคทีฟเบลนด์ที่มีการเติม TBT

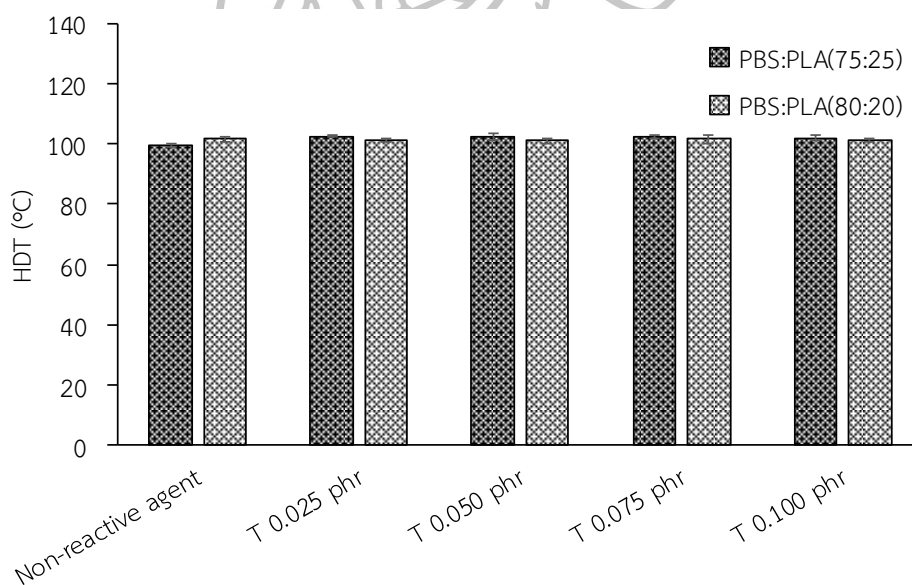
H position	1H intensity					
	PBS	PLA	PBS:PLA(80:20)		PBS:PLA(80:20) T0.1	
			PBS	PLA	PBS	PLA
1	1.88	2.99	1.00	4.32	1.00	1.37
2	1.89	1.00	1.13	1.00	1.08	0.07
3	2.00	-	1.00	-	1.01	-

4.4.6 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT

จากการทดสอบ DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PBS ปรากฏที่ $-39^{\circ}C$ และ PLA ปรากฏที่ $51^{\circ}C$ ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ปรากฏ T_g ของ PBS และ PLA ที่บริเวณเดียวกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม TBT และเมื่อพิจารณาปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นพบว่าการเติม TBT ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ทำให้ปริมาณผลึกของ PBS มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.10 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT 0.025-0.100 phr

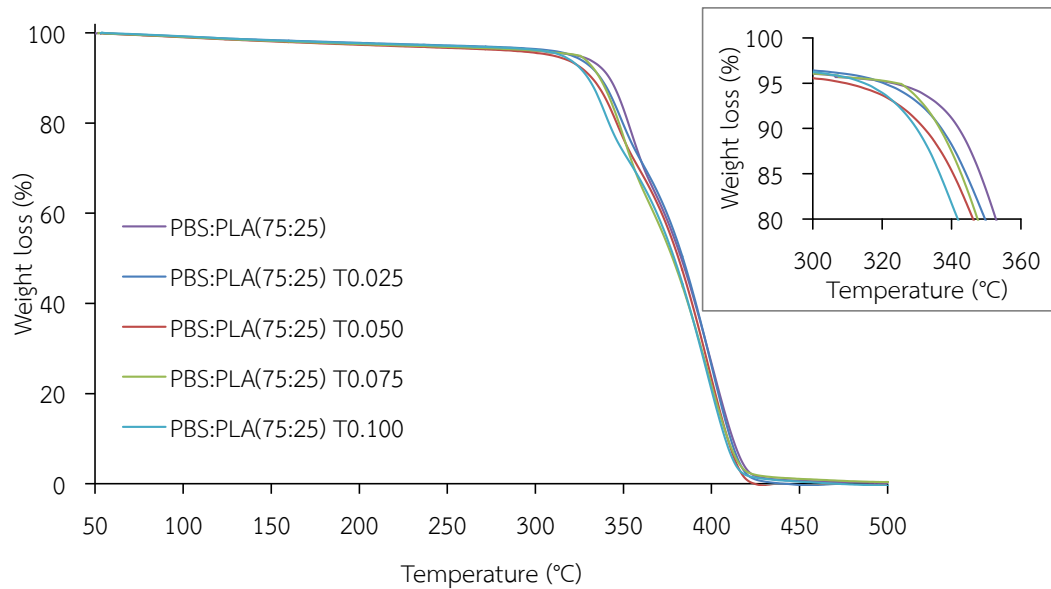
	PBS					PLA				
	T _g (°C)	T _c (°C)	T _{cc} (°C)	T _m (°C)	X _c (%)	T _g (°C)	T _c (°C)	T _{cc} (°C)	T _m (°C)	X _c (%)
PBS/PLA(75:25)	-39.4	78.0	-	112.8	62.1	51.3	-	-	153.5	21.2
PBS/PLA(75:25) T0.025	-39.2	87.1	-	113.0	51.7	50.9	-	-	153.5	20.0
PBS/PLA(75:25) T0.050	-39.3	90.9	-	112.6	52.0	50.6	-	-	153.2	20.8
PBS/PLA(75:25) T0.075	-39.3	83.6	-	112.2	57.0	51.1	-	-	153.0	21.2
PBS/PLA(75:25) T0.100	-39.1	86.9	-	112.5	56.9	51.2	-	-	152.9	21.7
PBS/PLA(80:20)	-39.5	75.9	-	112.7	63.0	51.3	-	-	153.3	26.3
PBS/PLA(80:20) T0.025	-39.3	86.9	-	112.2	49.8	50.0	-	-	152.7	24.9
PBS/PLA(80:20) T0.050	-39.3	88.2	-	112.6	50.1	50.5	-	-	152.7	25.1
PBS/PLA(80:20) T0.075	-39.2	85.1	-	112.9	50.5	51.0	-	-	153.1	25.8
PBS/PLA(80:20) T0.100	-39.3	87.5	-	112.4	50.8	51.1	-	-	152.9	26.0



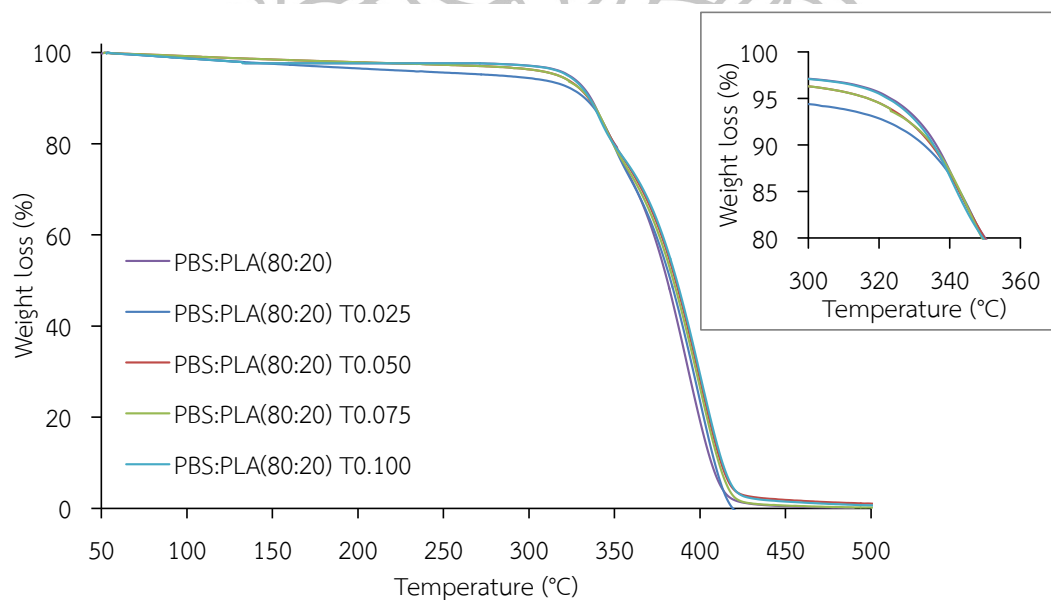
ภาพที่ 4.61 อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA (80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

จากการทดสอบหาค่าอุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ดังแสดงในภาพที่ 4.61 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(80:20) มีค่า HDT 101°C ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มี

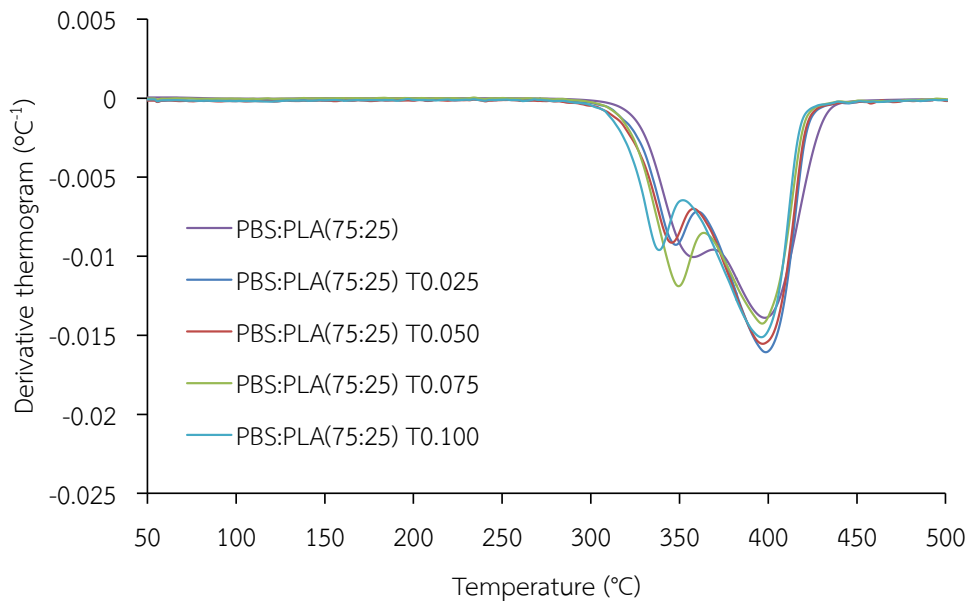
การเติม TBT ลงไป พบว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า HDT อย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจาก ปริมาณผลึกโดยรวมของทั้ง PBS และ PLA มีค่าเท่าเดิม ดังตารางที่ 4.10



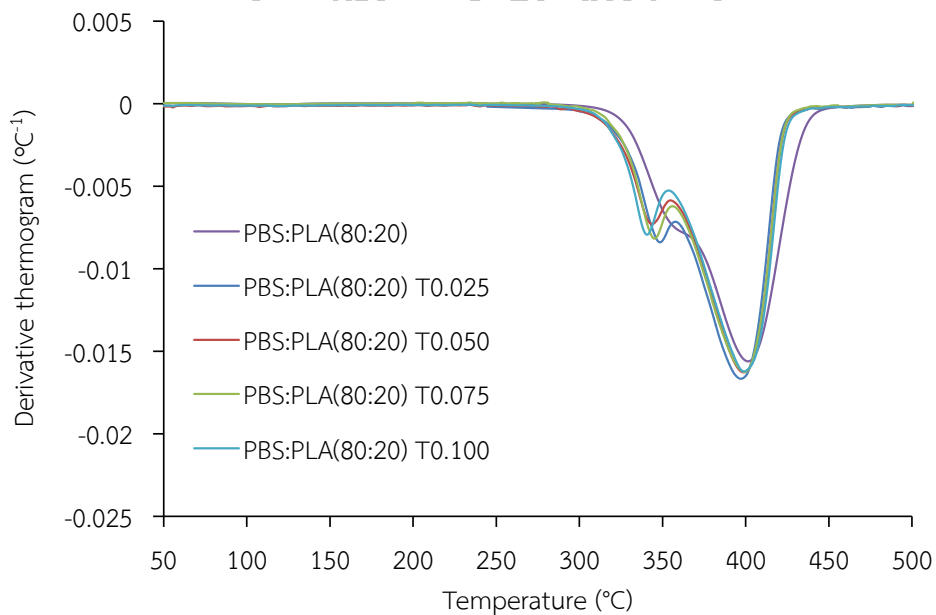
ภาพที่ 4.62 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบสblend PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.63 TGA thermogram ของพอลิเมอร์เบสblend PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.64 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

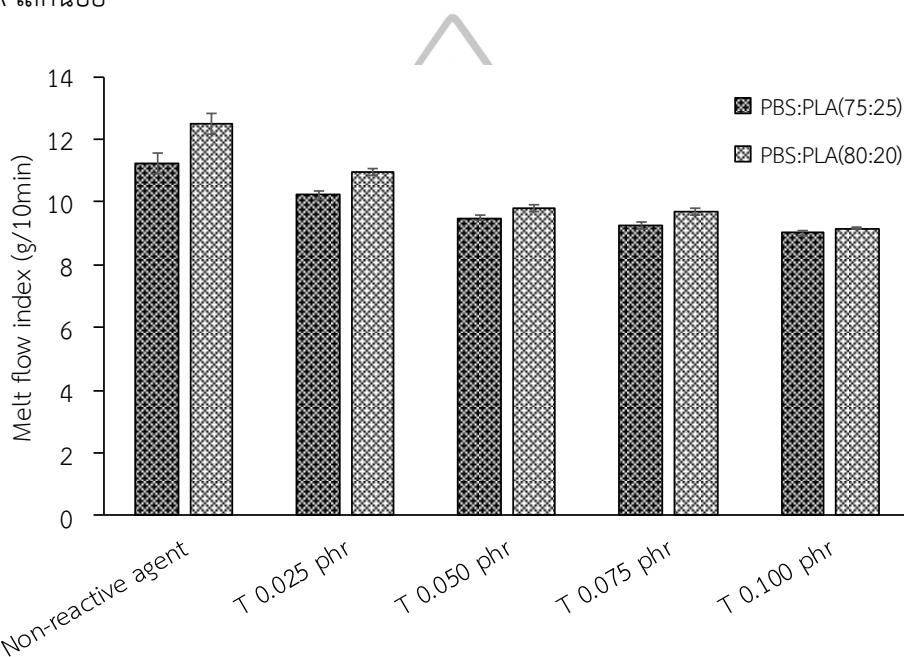


ภาพที่ 4.65 Derivative thermogram ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

จากการทดสอบ TGA ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ดังแสดงในภาพที่ 4.62-4.65 พบว่ามีการสลายตัว 2 ชั้น โดย PLA สลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 352°C และ PBS สลายตัวที่อุณหภูมิ 394°C ตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าการเติม TBT ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

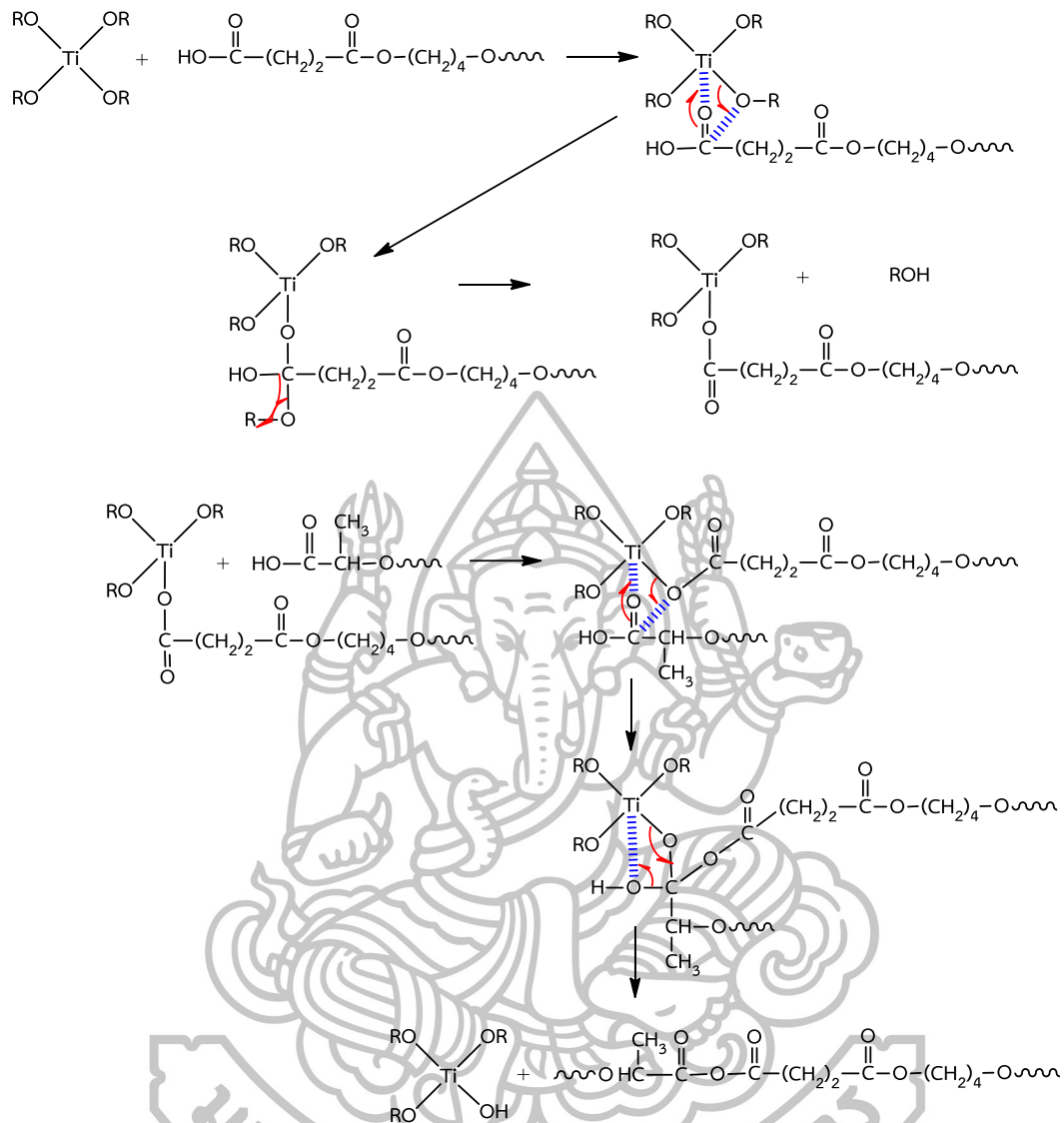
4.4.7 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT

การทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PLA ที่มีการเติม TBT แสดงดังภาพที่ 4.66 โดย PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 มีค่าดัชนีการไหล 11.24 g/10 min และ 12.50 g/10 min ซึ่งค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT มีค่าลดลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการเติม TBT ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) มีอิทธิพลทั้งการทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่ และการทำให้สายโซ่เกิดการขาดออกจากกัน จึงส่งผลต่อค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA เล็กน้อย



ภาพที่ 4.66 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่สัดส่วน 75:25 และ 80:20 ที่มีการเติม TBT 0.025, 0.050, 0.075 และ 0.100 phr ตามลำดับ

จากการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT พบว่ามีลักษณะสัณฐานวิทยา, สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น โดย TBT ที่เติมลงไปนั้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของพอลิเมอร์ อาจทำให้เกิด graft-copolymer ดังภาพที่ 4.67



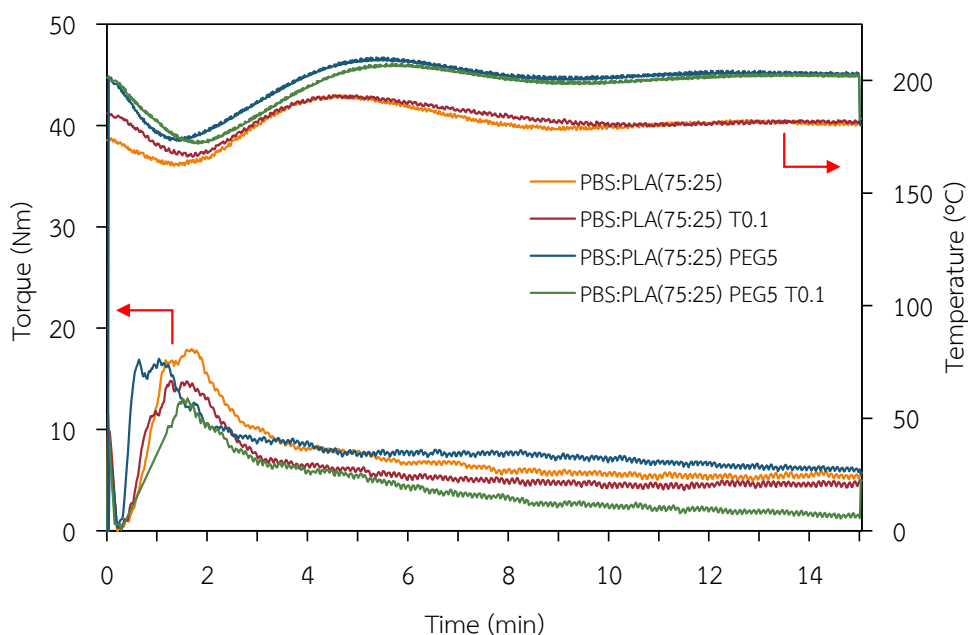
ภาพที่ 4.67 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLAที่มีการเติม TBT [4, 35]

4.5 ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซีคซีเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีการเติม PEG และ TBT

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG 5 phr และ และ TBT 0.1 phr ตามลำดับ ด้วยการผสมในเครื่องผสมภายในแบบปิด ภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือน ที่อุณหภูมิ 185°C ซึ่ง PEG ที่เติมลงไป เป็นโมกุลเล็ก ๆ มีน้ำหนักโมเลกุล 190-210 สามารถเป็นพลาสติกไซเซออร์ให้กับพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ได้ โดยทั้ง PEG และ TBT จะไปแทรกอยู่ที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเฟส PBS และ PLA ซึ่ง TBT ที่เติมลงไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่าง PBS กับ PLA ที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเฟสได้

4.5.1 ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม PEG และ TBT จากเครื่องผสมภายในแบบปิด

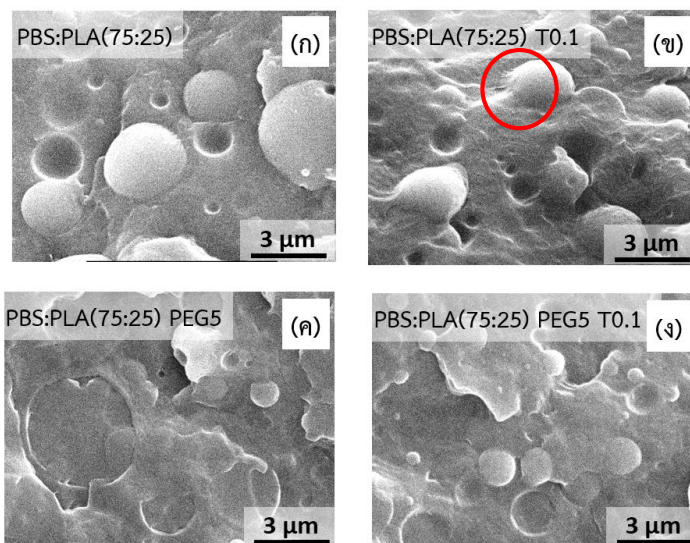
ในการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG เป็นพลาสติกไซเซอริให้กับพอลิเมอร์เบลนด์ และ TBT ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกัน และการขาดออกจากกันของสายโซ่ จึงทำการศึกษาอิทธิพลของ TBT ต่อ PBS, PLA และ PEG โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดและอุณหภูมิของเครื่องผสมภายในแบบปิด ที่อุณหภูมิ 185°C ความเร็วรอบในการผสม 60 rpm เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.68 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม TBT ปริมาณ 0.1 phr ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ไม่ทำให้ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมเปลี่ยนแปลง แต่พบว่า PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติมทั้ง PEG และ TBT ลงไป แรงบิดมีค่าต่ำลง และอุณหภูมิในการหลอมมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 4.68 ค่าแรงบิดและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

4.5.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

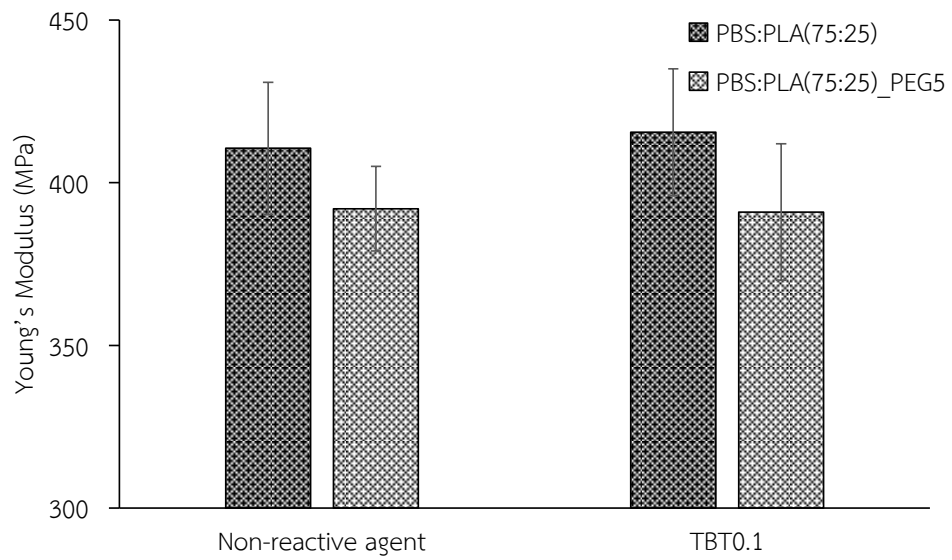
ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่ไม่มีการเติม TBT ดังแสดงในภาพที่ 4.69(ก) พบว่า PLA ซึ่งเป็นเฟสกระจาย ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ขนาดประมาณ 1-4 μm กระจายตัวในเฟสของ PBS และมีการยึดเกาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสที่ไม่ดี และเมื่อมีการเติม TBT ลงไปใน PBS/PLA พบว่ามีการยึดเกาะที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ที่ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.69(ข) นอกจากนี้ เมื่อมีการเติมทั้ง PEG และ TBT ลงไปใน PBS/PLA ดังแสดงในภาพที่ 4.69(ง) พบว่าอนุภาคของ PLA มีขนาดเล็กลง และมีการยึดเกาะที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ที่ดีขึ้นด้วย



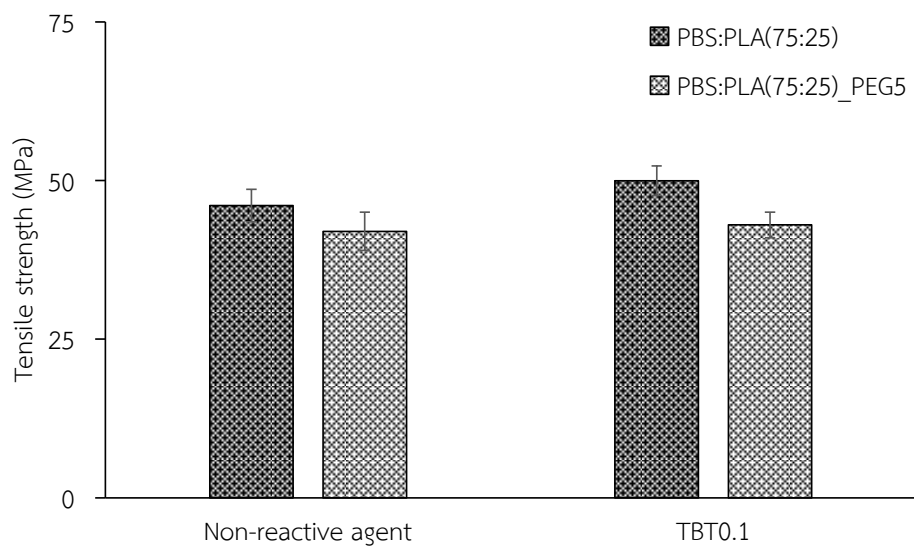
ภาพที่ 4.69 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

4.5.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

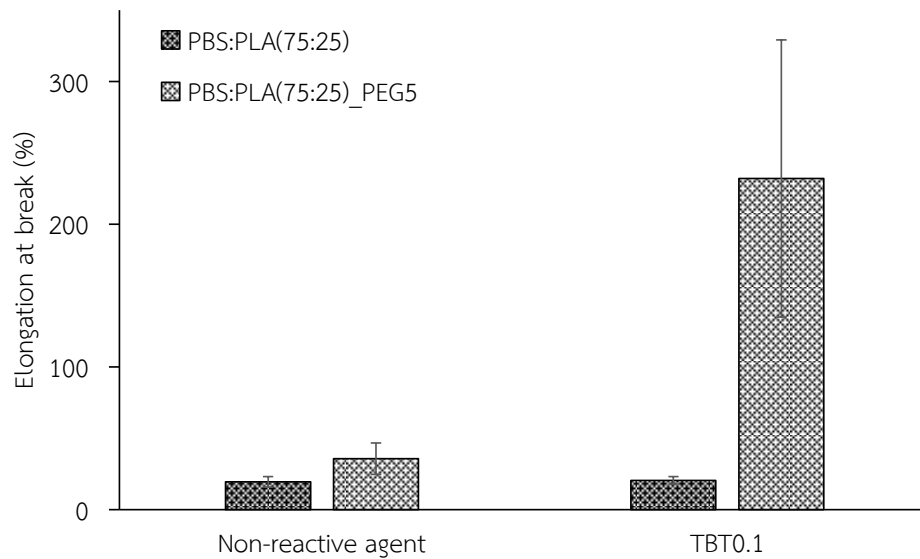
จากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (tensile test) พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) มีค่า Young's modulus (ดังภาพที่ 4.70) ประมาณ 400 MPa และ Tensile strength (ดังภาพที่ 4.71) 50 MPa ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG พบว่าค่า Young's modulus และ Tensile strength ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อมีการเติม TBT ลงไปใน PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(75:25) PEG พบว่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าลดลง



ภาพที่ 4.70 ค่า Young's Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

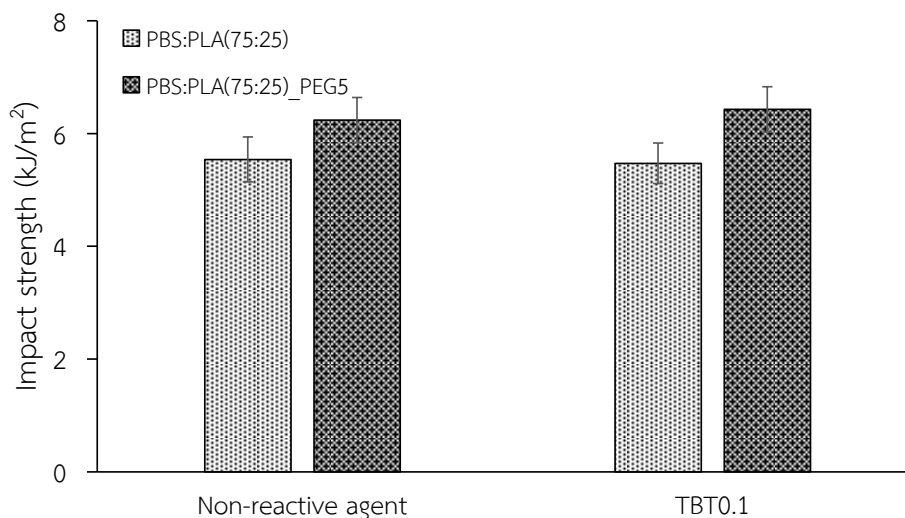


ภาพที่ 4.71 ค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT



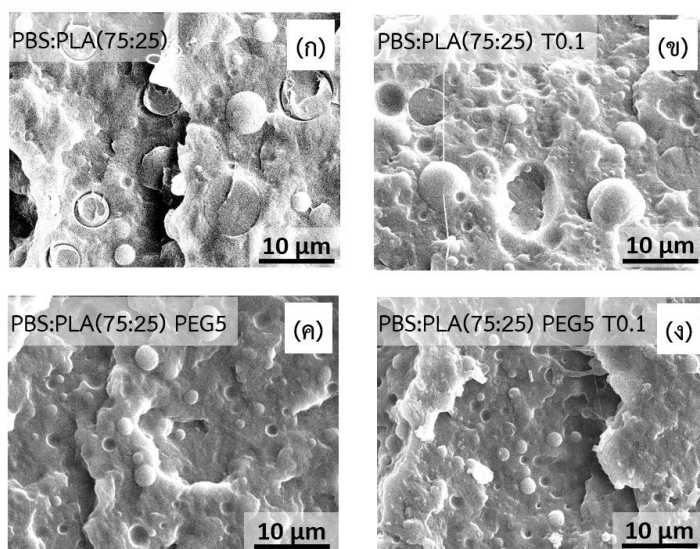
ภาพที่ 4.72 ค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม PEG และ TBT ดังภาพที่ 4.72 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติมทั้ง PEG และ TBT ลงไปสามารถยืดออกได้มากขึ้น อาจเนื่องมาจากการยึดเกาะกันที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ที่ดีขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับงานวิจัยของ F. Hassouna และคณะ [36]



ภาพที่ 4.73 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

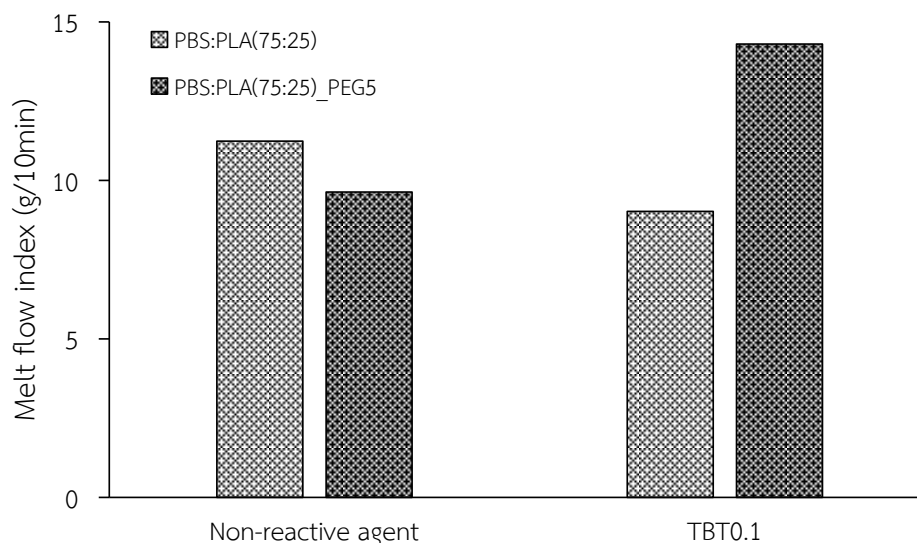
การทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) ดังภาพที่ 4.73 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบสมบูรณ์ทั้งหมด โดยพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) มีค่า impact strength ประมาณ 6 kJ/m^2 ซึ่งพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) และ PBS/PLA(75:25) PEG ที่มีการเติม TBT ปริมาณ 0.1 phr ลงไป มีค่า impact strength ที่สูงขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 4.74 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

4.5.4 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

การทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT แสดงดังภาพที่ 4.75 โดย PBS/PLA(75:25) มีค่าดัชนีการไหล $11.24 \text{ g}/10 \text{ min}$ ในขณะที่ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(75:25) ที่มีการเติมทั้ง PEG และ TBT มีค่าสูงขึ้น อาจเนื่องมาจาก PEG ซึ่งเป็นโมเลกุลเล็กไปเกาะที่ผิวระหว่างเฟส PBS และ PLA จึงทำให้ PEG มีลักษณะคล้ายพลาสติกไซเซอร์ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA จึงส่งผลให้ดัชนีการไหลมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 4.75 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (75:25) ที่มีการเติม PEG และ TBT

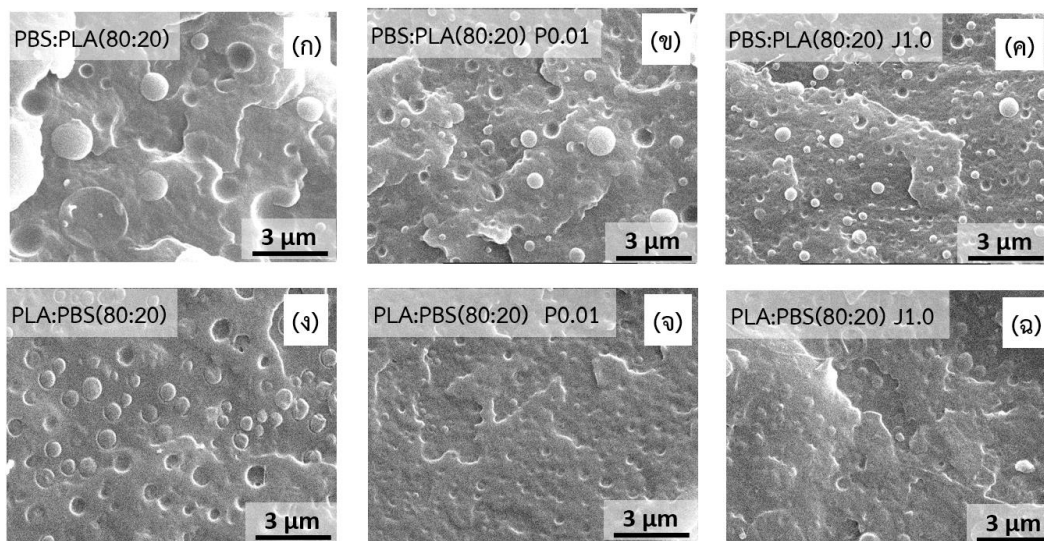
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา, สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเมทริกซ์หลัก ที่มีการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ Perkadox, Joncryl และ TBT พบว่าการเติม TBT ส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl โดยเมื่อพิจารณาปริมาณเจลที่เกิดขึ้นเท่ากัน คือ 8% พบว่าจะต้องใช้ Perkadox ในปริมาณ 0.0075 phr ซึ่งน้อยกว่า Joncryl ที่ใช้ปริมาณ 1.0 phr แสดงให้เห็นว่า Perkadox มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเมทริกซ์หลัก มากกว่า Joncryl และเพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง PBS และ PLA มีการเติม Perkadox และ Joncryl จึงทำการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PLA เป็นเมทริกซ์หลัก โดยการเติม Perkadox และ Joncryl ในหัวข้อถัดไป

4.6 ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA/PBS blends) โดยมีพอลิแลคติกแอซิดเป็นเมทริกซ์หลัก

การศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS โดยมี PLA เป็นเมทริกซ์หลัก ที่สัดส่วน PLA:PBS(80:20) และมีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ตามลำดับ ด้วยการผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ภายใต้สภาวะที่มีแรงเฉือน ที่อุณหภูมิ 100-195°C

4.6.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PLA เป็นเมทริกซ์หลัก

เปรียบเทียบอิทธิพลของการเติม Perkadox และ Joncryl ในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PBS เป็นเฟสหลักกับ PLA เป็นเฟสหลัก แสดงสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.76 โดยภาพที่ 4.76(ก)-(ค) มี PBS เป็นเฟสหลัก ภาพที่ 4.79(ง)-(ฉ) มี PLA เป็นเฟสหลัก ทั้งสองกรณีมีสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ในเฟสหลัก



ภาพที่ 4.76 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) ที่ไม่มีการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (ก) และมีการเติม (ข) 0.01 phr, (ค) 1.0 phr และพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่ไม่มีการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (ง) และมีการเติม (จ) 0.01 phr และ (ฉ) 1.0 phr ตามลำดับ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักในไนโตรเจนเหลวของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ดังแสดงในภาพที่ 4.76(ก) พบว่า PLA มีลักษณะเป็นเม็ดกลม ขนาดเล็กประมาณ 0.5-2.0 μm กระจายตัวในเฟสของ PBS จากนั้นเมื่อทำการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ดังแสดงในภาพที่ 4.76(ข)-(ค) พบว่า PLA ที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของ PBS มีขนาดเล็กลง ประมาณ 0.25-1.0 μm และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น แต่ยังคงมีการยึดเกาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสไม่ดีขึ้น สังเกตได้จากร่องรอยที่เกิดจากการหลุดออกของ PLA ซึ่งเป็นเฟสกระจาย

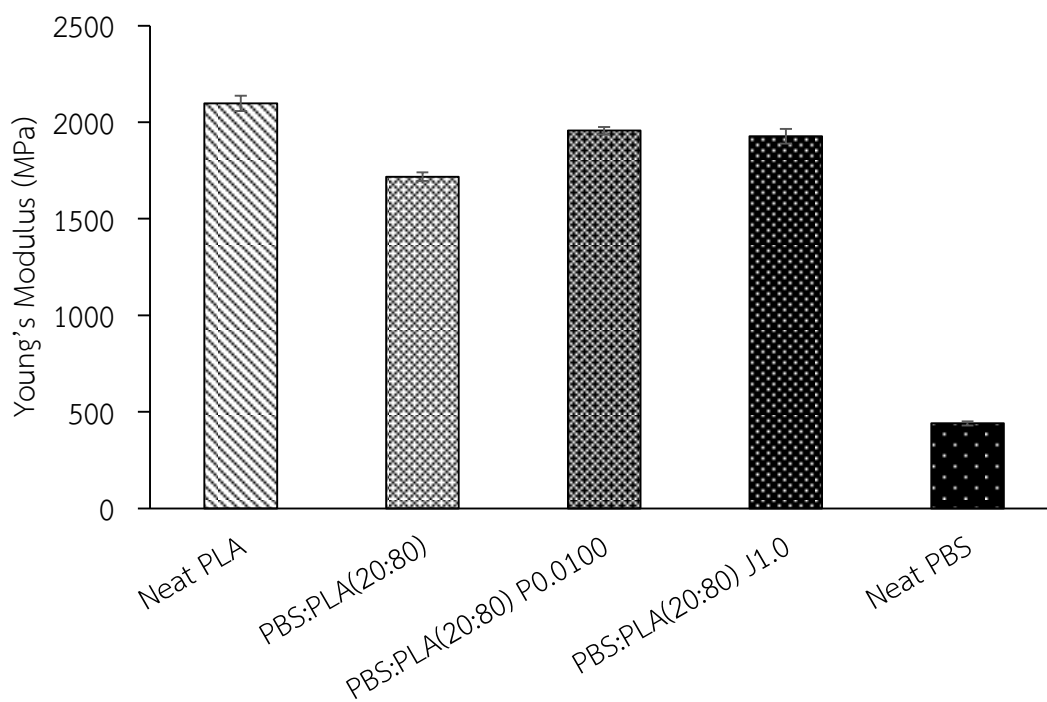
เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ดังแสดงในภาพที่ 4.76(ง) พบว่า PBS มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็กประมาณ 1 μm กระจายตัวในเฟสของ PLA จากนั้นเมื่อทำการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ดังแสดงในภาพที่ 4.76(จ)-(ฉ) พบว่า PBS ที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของ PLA มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น และมีขนาดเล็กลง ประมาณ 0.25-0.5 μm ซึ่งจะเห็นว่าการเติม Perkadox และ Joncryl ใน PLA:PBS(80:20) มีการยึดเกาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสที่ดีกว่า PBS/PLA(80:20) เนื่องจาก PBS มีความหนืดต่ำกว่า PLA และมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่า PLA

4.6.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PLA เป็นเมทริกซ์หลัก

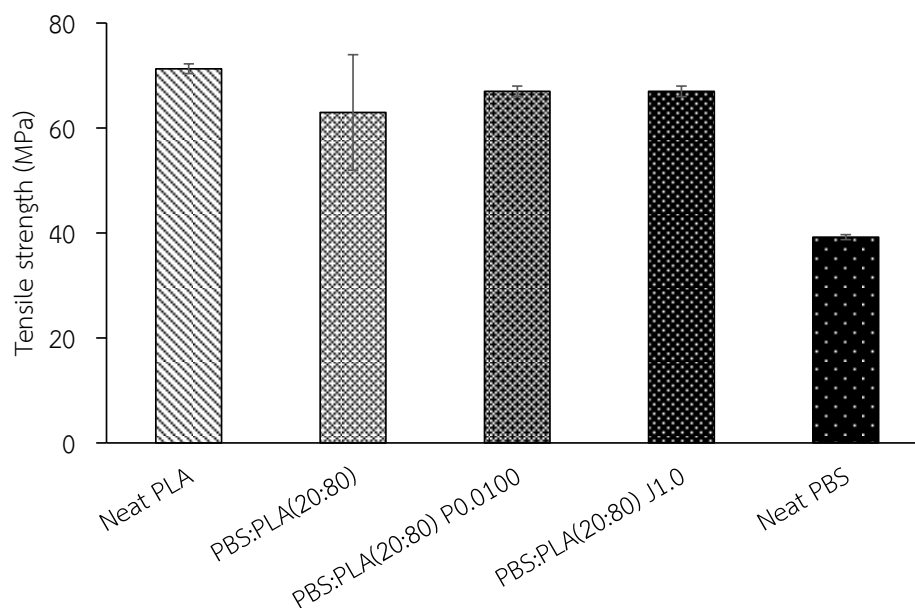
การทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบไปด้วยการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile test) และการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) ซึ่งสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

พอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ PLA:PBS(80:20)

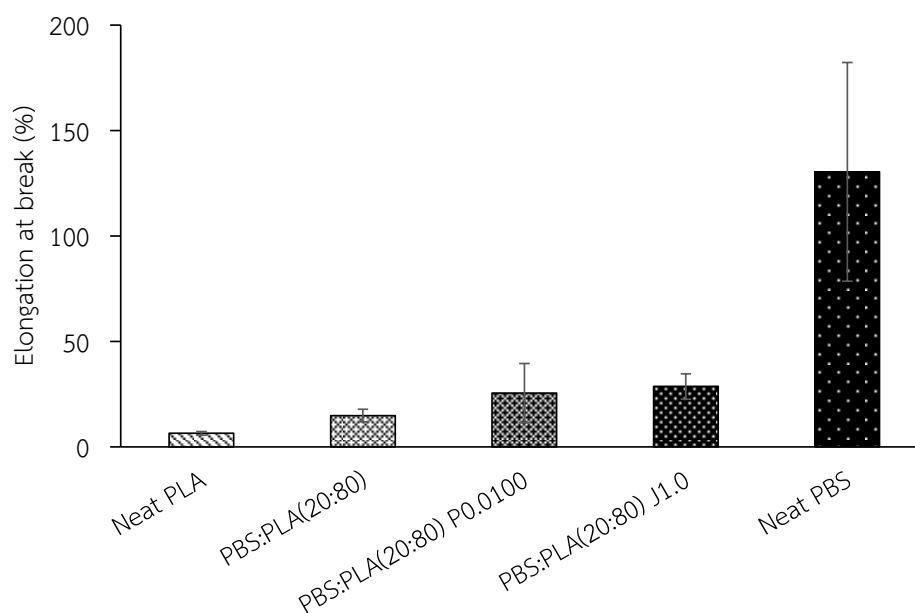
จากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (tensile test) พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20)มีค่า Young's modulus ประมาณ 1700 MPa (ดังภาพที่ 4.77) และ Tensile strength ประมาณ 60 MPa (ดังภาพที่ 4.78) ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr พบว่าค่า Young's modulus และ Tensile strength สูงขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 4.77 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ตามลำดับ



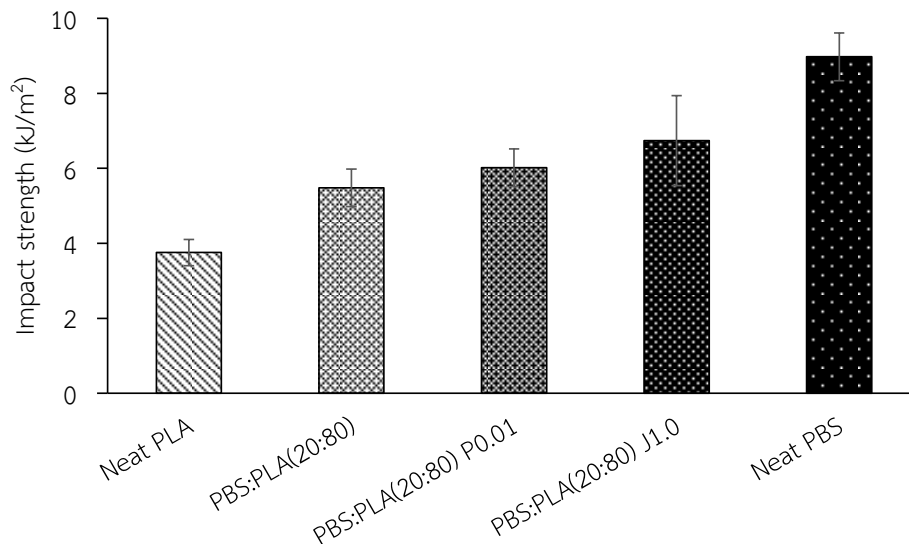
ภาพที่ 4.78 ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.79 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ตามลำดับ

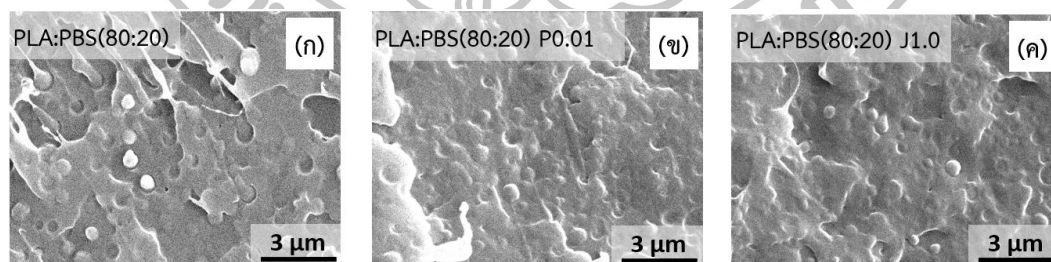
เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ดังภาพที่ 4.79 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) มีค่า Elongation at break ประมาณ 15% ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS

ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr สามารถยึดออกได้มากขึ้นเล็กน้อย (26-29%)



ภาพที่ 4.80 ค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr ตามลำดับ

จากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) ดังภาพที่ 4.80 พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบสมบูรณ์ทั้งหมด โดยพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) มีค่า impact strength ประมาณ 5 kJ/m² ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มีการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr ลงไป มีค่า impact strength ที่สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเติม Perkadox และ Joncryl ส่งผลให้ PBS มีขนาดเล็กลง และมีการยึดเกาะที่ผิวระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ดังในภาพที่ 4.81 จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น

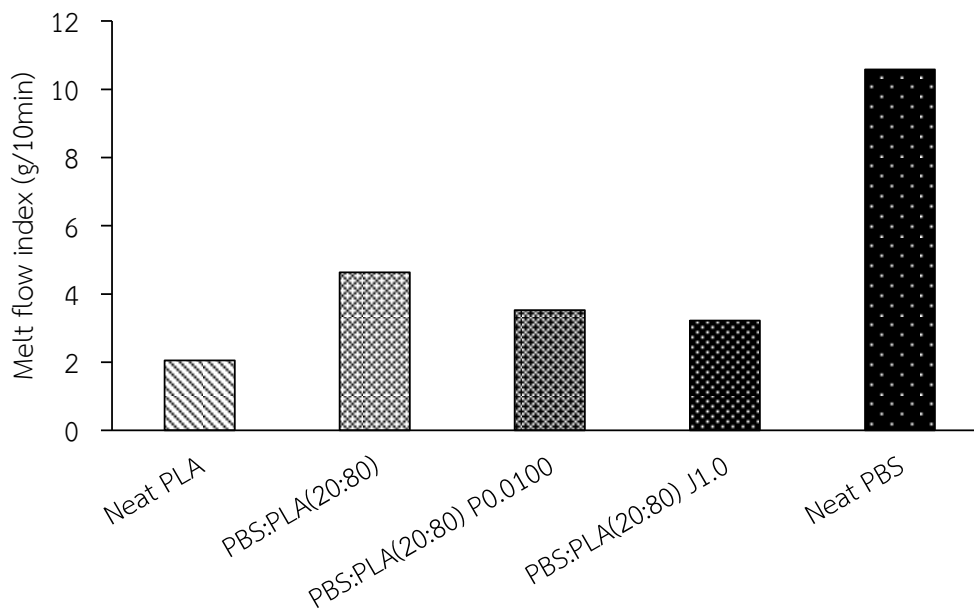


ภาพที่ 4.81 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr ตามลำดับ

4.6.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PLA เป็นเมทริกซ์หลัก

การทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PBS ที่มีการเติม Perkadox แสดงดังภาพที่ 4.82 โดย Neat PBS มีค่าดัชนีการไหล 10.58 g/10 min ในขณะที่ Neat PLA มีค่าดัชนีการไหล 2.05 g/10 min ซึ่งค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์

PLA:PBS(80:20) มีค่า 4.63 g/10 min จากนั้นเมื่อทำการเติม Perkadox และ Joncryl ที่ปริมาณ 0.01 และ 1.0 phr พบว่าดัชนีการไหลมีค่าลดลง เนื่องจากการเติม Perkadox และ Joncryl ลงไป จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่ PBS และ PLA จนมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS



ภาพที่ 4.82 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr ตามลำดับ

4.7 ศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเทคนิค Dynamic Mechanical Analysis ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) และ PLA:PBS(80:20)

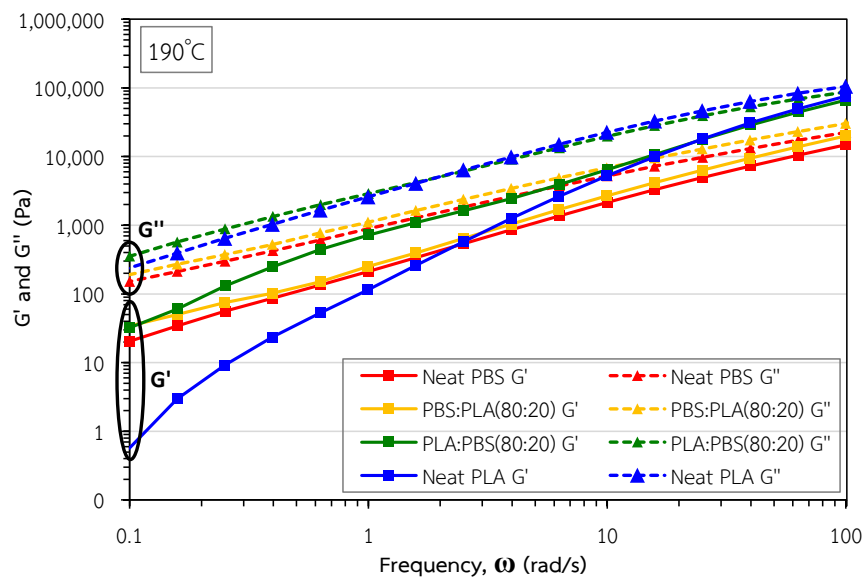
สมบัติเชิงรีโอโลยี (rheological properties) หรือพฤติกรรมการไหลของวัสดุพอลิเมอร์นั้น มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหล ได้แก่ อุณหภูมิ, น้ำหนักโมเลกุล และอัตราการเฉือน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) โดยการนำชิ้นงานที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร มาทำการทดสอบแบบ Plate-Plate ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกับที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้ความถี่ในช่วง $0.1 < \omega < 100$ rad/s และให้ shear strain เท่ากับ 0.1% [4]

4.7.1 สมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) และ PLA:PBS(80:20)

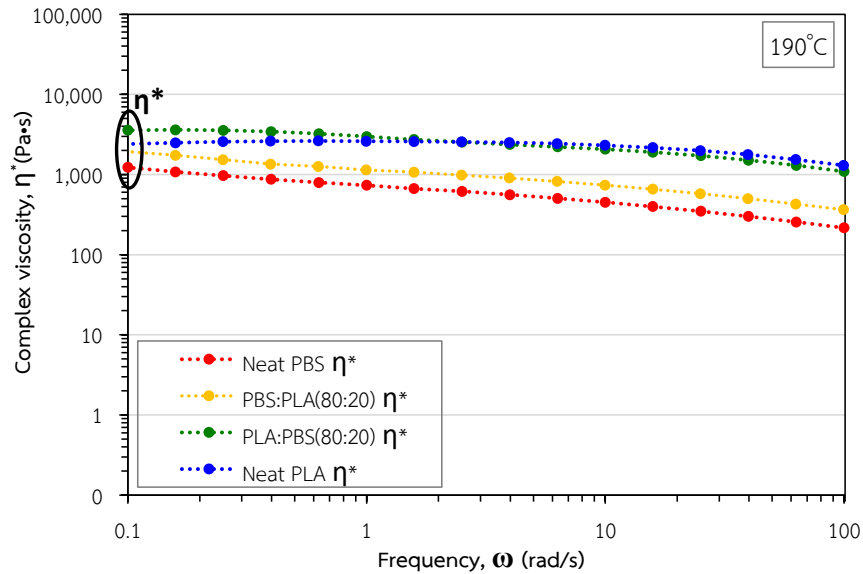
เมื่อพิจารณาค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของ PBS, PLA และพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ดังแสดงในภาพที่ 4.83 จะพบว่าจุดตัดของ Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของแต่ละตัว มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจุดตัดนี้เป็นตัวบ่งบอกถึง

long relaxation time ของพอลิเมอร์ และเมื่อพิจารณาค่า complex viscosity (η^*) ดังแสดงในภาพที่ 4.84 จะเห็นว่ากราฟความหนืดเชิงซ้อนของ PLA และ PBS มีลักษณะค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงถึงช่วงของ Newtonian zone โดยเมื่อความถี่มากขึ้น ความหนืดเชิงซ้อนจะมีค่าลดลง ซึ่งในช่วงความถี่ 0.1-100 rad/s ที่อุณหภูมิห้องนั้น PLA จะมีความหนืดเชิงซ้อนมากกว่า PBS ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) จะมี PBS เป็นอนุภาคของเหลวกระจายตัวอยู่ใน PLA หลอม ซึ่งเป็นเฟสหลัก ดังในภาพที่ 4.76(ง) ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก จะมีอนุภาคของ PLA ซึ่งเป็นเฟสกระจายที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมที่มีขนาดใหญ่ ดังในภาพที่ 4.76(ก)

เมื่อพิจารณาค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') จะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำ Neat PBS มีค่า G' และ G'' สูงกว่า Neat PLA ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีค่า G' , G'' และ η^* สูงกว่า Neat PBS และ Neat PLA เนื่องมาจากการมีอนุภาคที่มีความยืดหยุ่นของ PBS กระจายตัวอยู่ภายในเฟสของ PLA จึงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงส่งผลให้ G' และ G'' มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับงานวิจัยของ E. Hassan และคณะ [5]



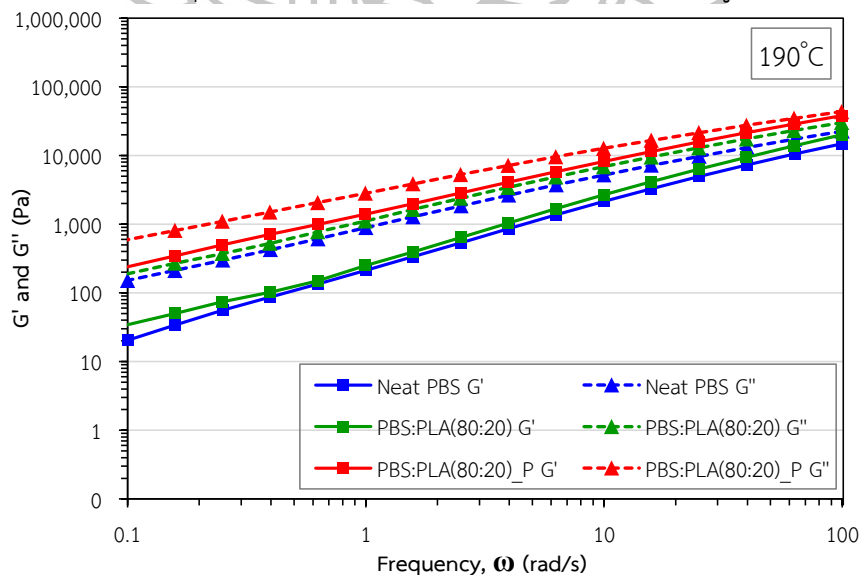
ภาพที่ 4.83 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (80:20)



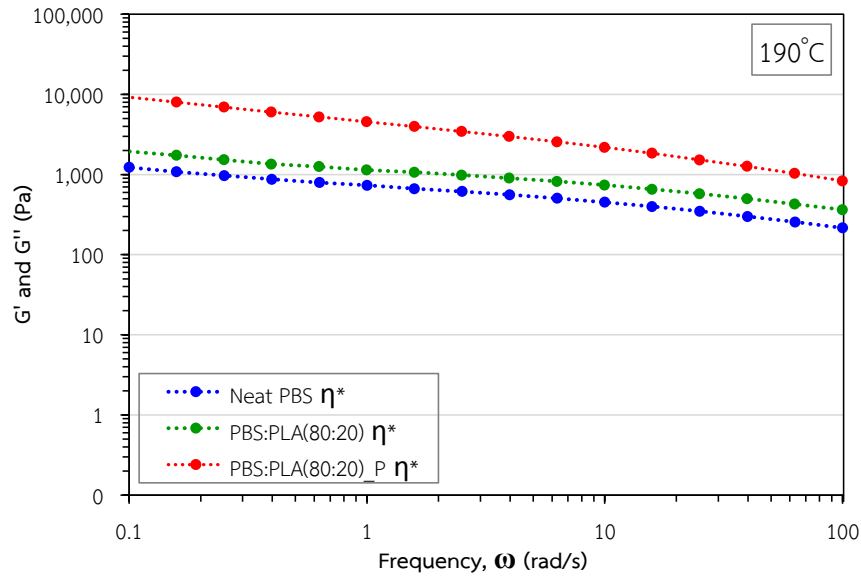
ภาพที่ 4.84 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20)

4.7.2 สมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr

จากภาพที่ 4.85 และ 4.86 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr จะมีค่า G' , G'' และ η^* สูงขึ้น เนื่องจากการเติม Perkadox ลงไป ทำให้เกิด graft-copolymer ของ PBS และ PLA ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้น มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงส่งผลให้ G' , G'' และ η^* มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

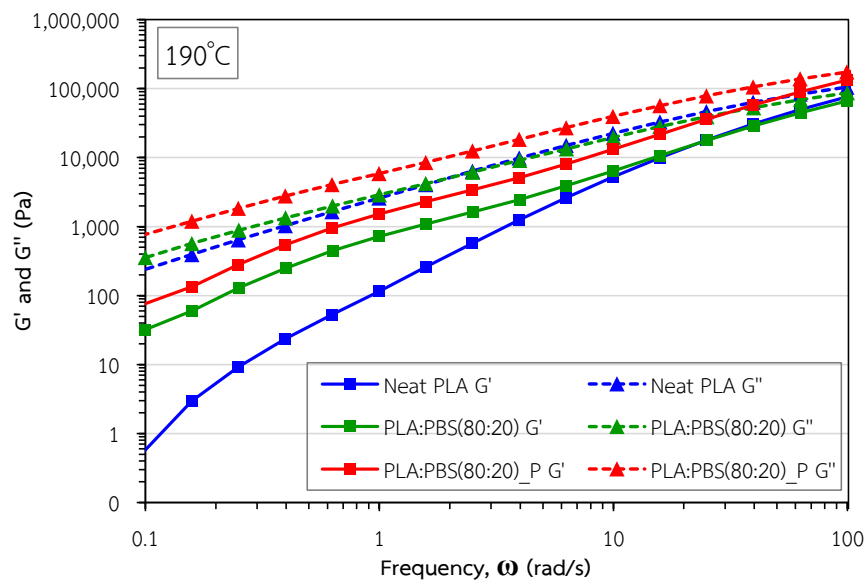


ภาพที่ 4.85 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA (80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr

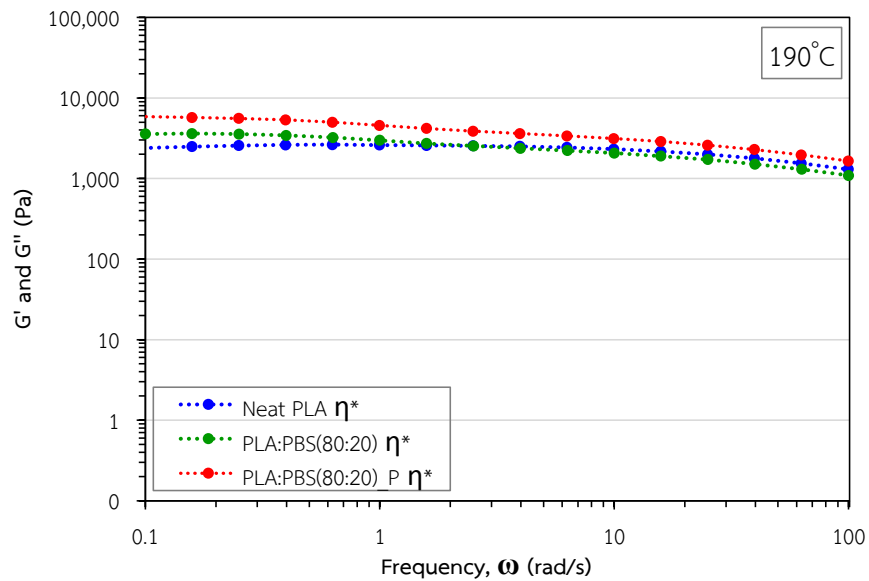


ภาพที่ 4.86 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr ดังแสดงในภาพที่ 4.87 และ 4.88 จะเห็นว่าค่า G' , G'' และ η^* เพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเติม Perkadox ลงไป เช่นเดียวกัน แต่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก จะมีการเปลี่ยนแปลงของ G' , G'' และ η^* ที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่า Perkadox มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับ PBS มากกว่า PLA



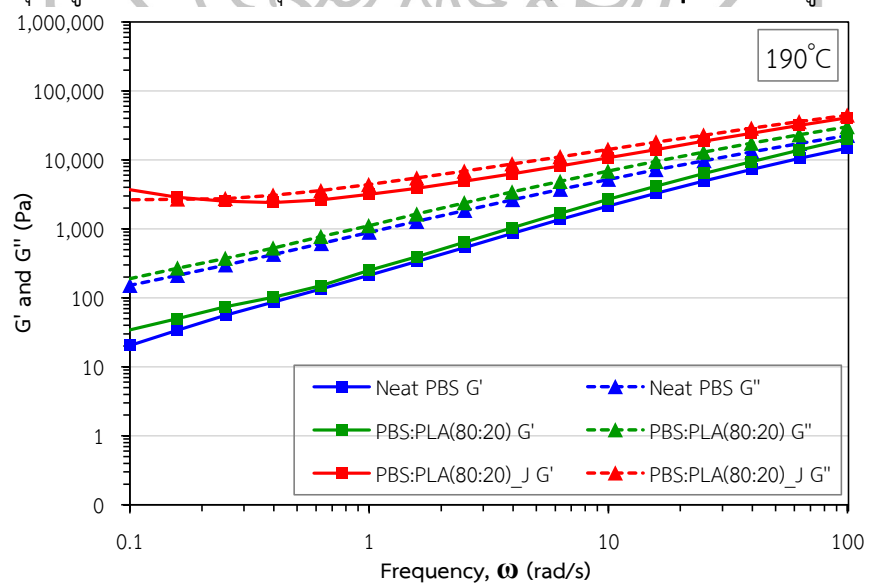
ภาพที่ 4.87 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr



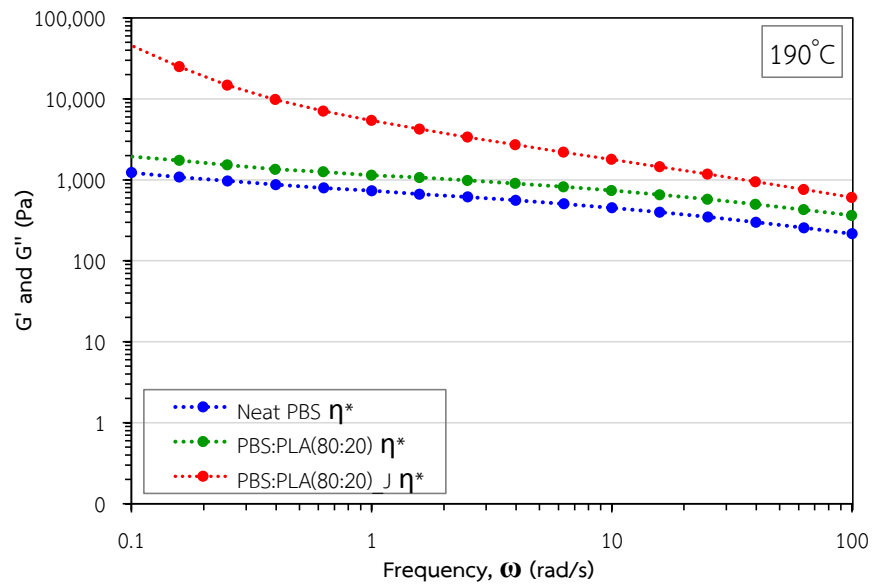
ภาพที่ 4.88 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Perkadox 0.01 phr

4.7.3 สมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr

จากภาพที่ 4.89 และ 4.90 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr จะมีค่า G' , G'' และ η^* สูงขึ้น เนื่องจากการเติม Joncryl ลงไป อาจทำให้เกิด branch-chain ของ PBS และ PLA จำนวนมาก ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้น มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงส่งผลให้ G' , G'' และ η^* มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

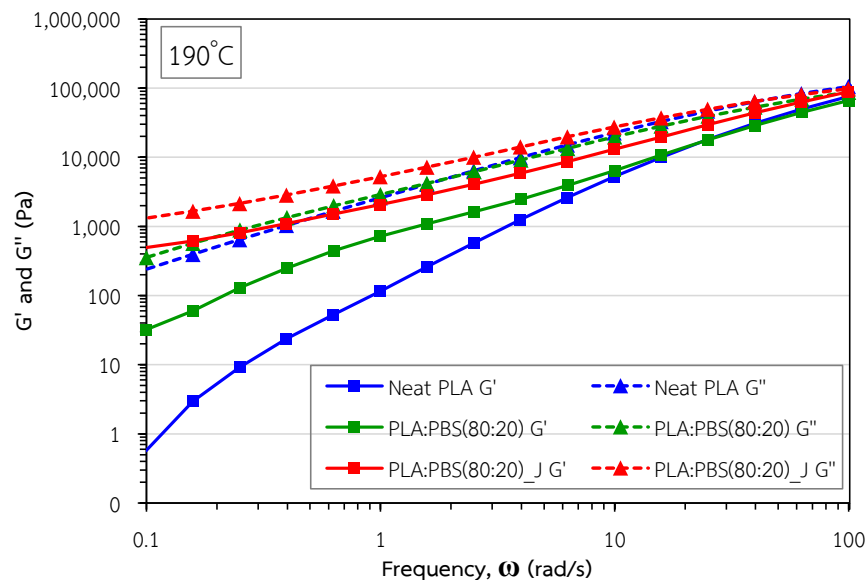


ภาพที่ 4.89 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA (80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr

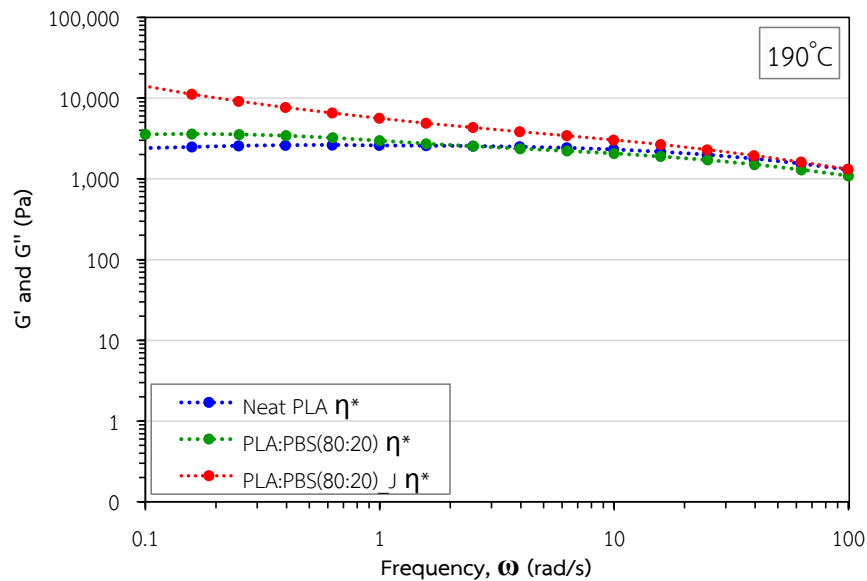


ภาพที่ 4.90 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr ดังแสดงในภาพที่ 4.91 และ 4.92 จะเห็นว่าค่า G' , G'' และ η^* เพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเติม Joncryl ลงไปเช่นเดียวกัน แต่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก จะมีการเปลี่ยนแปลงของ G' , G'' และ η^* ที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่า Joncryl น่าจะมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับ PBS มากกว่า PLA



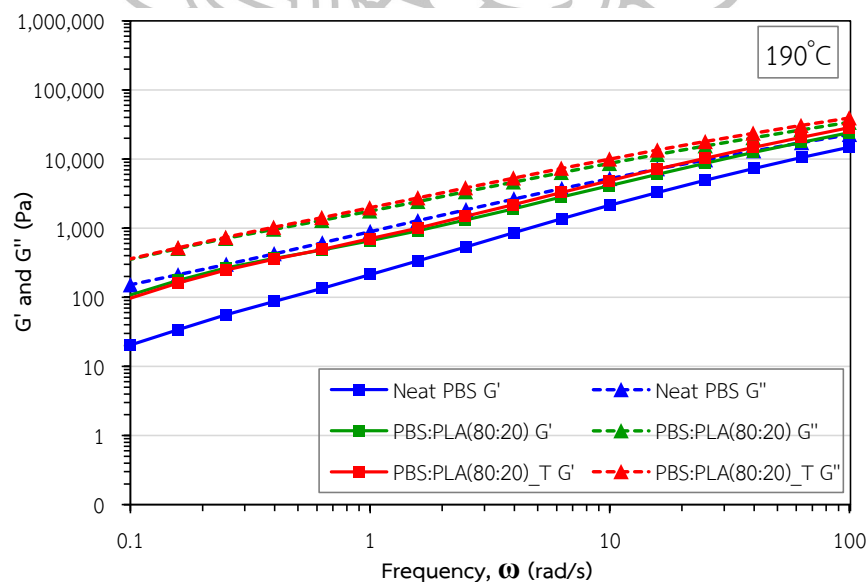
ภาพที่ 4.91 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr



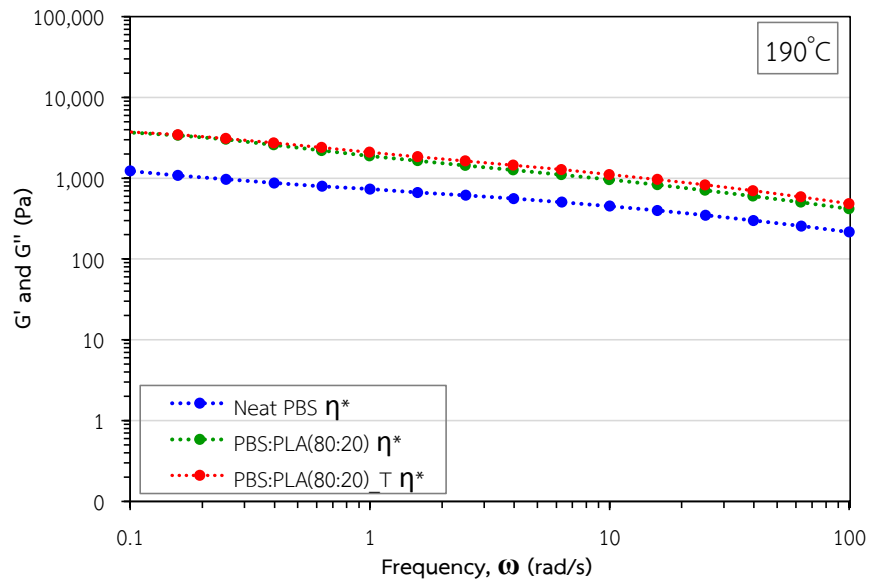
ภาพที่ 4.92 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม Joncryl 1.0 phr

4.7.4 สมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT 0.1 phr

จากภาพที่ 4.93 และ 4.94 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr จะมีค่า G' , G'' และ η^* ที่ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการเติม TBT ลงไป อาจทำให้เกิดการเชื่อมต่อกัน หรือเกิดการขาดออกของสายโซ่ PBS และ PLA จึงส่งผลให้ G' , G'' และ η^* ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

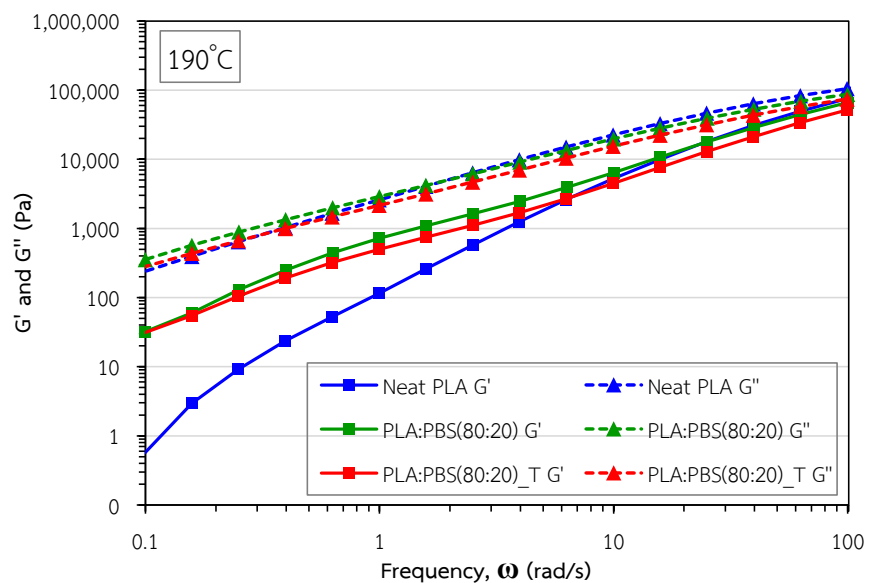


ภาพที่ 4.93 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA (80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr

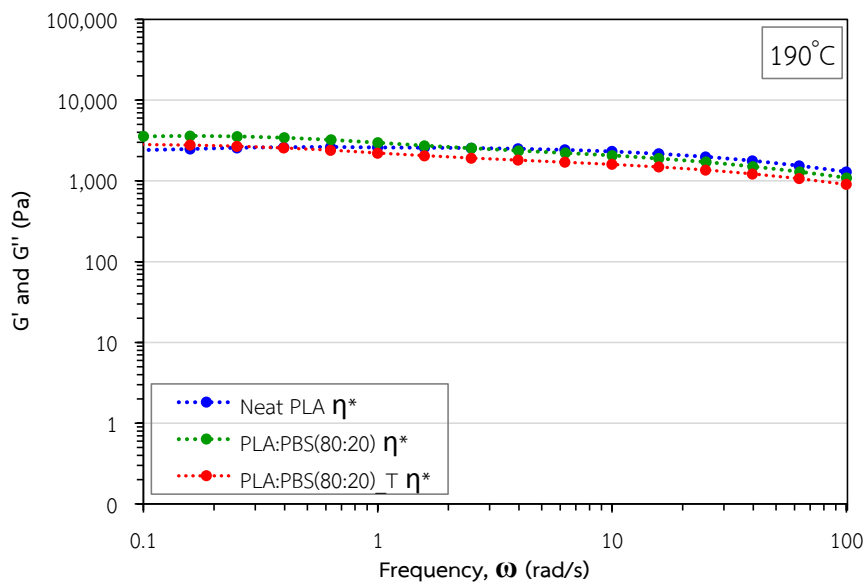


ภาพที่ 4.94 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS:PLA(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr ดังแสดงในภาพที่ 4.95 และ 4.96 จะเห็นว่าค่า G' , G'' และ η^* ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเช่นเดียว อาจเนื่องมาจากการเติม TBT มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยากับ PBS และ PLA ได้น้อยมาก เนื่องจากทั้ง PBS และ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาว จึงเข้าทำปฏิกิริยาได้ยาก



ภาพที่ 4.95 ค่า Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr



ภาพที่ 4.96 ค่า Complex viscosity (η^*) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA:PBS(80:20) ที่มีการเติม TBT 0.1 phr



4.8 การประเมินราคาคอมพาวด์ที่ได้

จากตารางที่ 4.11 แสดงราคาประเมินของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (คิดเฉพาะราคาวัตถุดิบ ไม่รวมค่าแรง) พบว่า PBS มีราคาประมาณ 260 บาท/กก. เมื่อนำเบลนด์กับ PLA ที่สัดส่วน PBS:PLA(80:20) จะมีราคาลดลงถึง 30 บาท/กก. เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี พบว่าจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เมื่อมีการเติม Perkadox 0.01 phr และ Joncryl 1.0 phr โดยจะเห็นว่าการเติม Joncryl ส่งผลให้ราคาโดยรวมสูงขึ้นถึง 12 บาท/กก. ในขณะที่การเติม Perkadox ไม่ทำให้ราคาโดยรวมเปลี่ยนแปลง และยังใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า Joncryl ถึง 100 เท่าอีกด้วย

ตารางที่ 4.11 แสดงราคาประเมินของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (คิดเฉพาะราคาวัตถุดิบ ไม่รวมค่าแรง)

	ราคาต่อหน่วย (บาท/ กก.)	องค์ประกอบ (%)	ราคารวม (บาท/ กก.)
PBS:PLA(80:20)			
PBS	256.80	80.00	205.44
PLA	117.70	20.00	23.54
Total		100.00	228.98
PBS:PLA(80:20) P0.01			
PBS	256.80	80.00	205.44
PLA	117.70	20.00	23.54
Perkadox	1070.00	0.01	0.11
Total		100.01	229.09
PBS:PLA(80:20) J1.0			
PBS	256.80	80.00	205.44
PLA	117.70	20.00	23.54
Joncryl	1357.83	1.00	13.58
Total		101.00	242.56
PBS:PLA(80:20) T0.1			
PBS	256.80	80.00	205.44
PLA	117.70	20.00	23.54
TBT	6687.50	0.10	6.69
Total		100.10	235.67

* หมายเหตุ : ราคาต่อหน่วยรวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% แล้ว

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการทำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิแลคติกแอซิด (PBS/PLA blends) ที่มีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเมทริกซ์หลัก โดยผ่านกระบวนการรีแอกทีฟทรูชันที่มีการเติมสารประกอบที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน เพื่อให้เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยี และปริมาณเจลที่เกิดขึ้น เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาในการนำพอลิเมอร์เบลนด์ไปใช้งาน ในส่วนแรกของงานวิจัย เป็นการศึกษาการระบบการทำพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS กับ PLA จากภาพ SEM พบว่าขนาดอนุภาค PLA ที่เป็นเฟสกระจายตัวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามสัดส่วนของ PLA ที่เพิ่มมากขึ้น โดยอนุภาคของ PLA มีลักษณะกลมเกลี้ยง และไม่มีการยึดเกาะระหว่างเฟสของ PBS กับ PLA จากการทดสอบค่าดัชนีการไหล พบว่า PLA มีความหนืดสูงกว่า neat PBS โดย neat PBS มีค่า MFI 11 g/10min และ neat PLA มีค่า MFI 2 g/10min (190°C/2.16kg) จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี (non-reactive blends) ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก ในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่าค่า Young's modulus, Tensile strength, Elongation at break และ Impact strength มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเติม PLA 15-25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเฉพาะ Elongation at break ที่มีค่ามากกว่า 300% แม้ว่า PBS กับ PLA เบลนด์ไม่เข้ากัน

สำหรับระบบรีแอกทีฟเบลนด์ ที่มีการเติม Perkadox, และ Joncryl ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA พบว่าการเติม Perkadox และ Joncryl ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีสมบัติความต้านทานต่อการดึงยึด ความต้านทานต่อการกระแทก และลักษณะสัณฐานวิทยาที่ดีขึ้น มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้น เนื่องจาก Perkadox และ Joncryl มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับ PBS และ PLA ทำให้เกิด graft copolymer และ PBS เมทริกซ์เกิดการ crosslink ทำให้ความหนืดของ PBS เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความหนืดของ PLA ส่งผลให้อนุภาค PLA มีขนาดเล็กถึง 0.25 μm มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นภายในเฟส PBS และมีการยึดเกาะกันระหว่างผิว PBS กับ PLA ดีขึ้น พบว่ามีเจลเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเจลเท่ากับ 8% พบว่าต้องใช้ Perkadox ในปริมาณ 0.0075 phr ซึ่งน้อยกว่า Joncryl ที่ใช้ปริมาณ 1.0 phr แสดงให้เห็นว่า Perkadox มีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเฟสหลักมากกว่า Joncryl เมื่อนำเจลที่ได้มาทำการทดสอบ FTIR และ $^1\text{H-NMR}$ พบว่ามี graft copolymer ระหว่าง PBS และ PLA เกิดขึ้นจริง เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเติม Perkadox และ Joncryl ในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PBS เป็นเฟสหลักกับ PLA เป็นเฟสหลัก พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี PLA เป็นเฟสหลัก จะมีการยึดเกาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสที่ดีกว่า

ในกรณีรีแอกทีฟเบลนด์โดยการเติม TBT ไม่ส่งผลให้ลักษณะสัญญาณวิทยาเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงว่า TBT ไม่ช่วยให้ PBS กับ PLA เบลนด์เข้ากัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่เมื่อมีการเติม PEG ร่วมกับ TBT พบว่าอนุภาคของ PLA มีขนาดเล็กลง และมีการยึดเกาะที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟสของ PBS และ PLA ที่ดีขึ้น จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าชิ้นงานสามารถยืดออกได้มากขึ้น แสดงว่า PEG ที่เติมลงไปช่วยให้ TBT มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกัน PEG ก็ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของ PBS และ PLA ด้วย

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์แบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี และรีแอกทีฟเบลนด์ PBS/PLA ที่มี PBS เป็นเฟสหลัก ด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่าอุณหภูมิ T_g และ T_m ของ PLA และ PBS ในพอลิเมอร์เบลนด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จากการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าการเติม Perkadox และ Joncryl ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวสูงขึ้นเล็กน้อย

การทดสอบสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง DMA พบว่าความหนืดเชิงซ้อนของ Neat PBS และ Neat PLA มีลักษณะค่อนข้างคงที่ ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA(80:20) และ PLA/PBS(80:20) มีค่า G' , G'' และ η^* สูงกว่า Neat PBS และ Neat PLA เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA และ PLA/PBS มีความยืดหยุ่นมากขึ้น และเมื่อเติม Perkadox และ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA และ PLA/PBS พบว่าความหนืดเชิงซ้อนมีค่าสูงขึ้นมาก เนื่องจากการเกิด graft-copolymer ของ PBS และ PLA ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA และ PLA/PBS มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้น และในสภาวะหลอมมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์นี้มี melt strength ที่สูง ทำให้สามารถขึ้นรูปในกระบวนการเป่าฟิล์มได้ง่ายขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มี PLA เป็นเฟสหลัก และมีการเติม Perkadox หรือ Joncryl มีความหนืด และ melt strength ที่สูงขึ้น ซึ่งน่าสนใจในการนำไปศึกษาต่อในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยอาจมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ PLA/PBS และปริมาณ Perkadox หรือ Joncryl และการเบลนด์อย่างต่อเนื่องเพื่อเข้าสู่อุตสาหกรรม นอกจากนี้ควรนำไปศึกษาต่อในด้านสมบัติการย่อยสลายด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] Tokiwa, Yutaka and Buenaventurada P. Calabia. (2007). "Biodegradability and Biodegradation of Polyesters." **Polymers and the Environment** 15: 259-267.
- [2] Tokiwa, Yutaka, et al. (2009). "Biodegradability of Plastics." **International Journal of Molecular Sciences** 10: 3722-3742.
- [3] Limited, Ptt Mcc Biochem Company (2557). **Product Information FZ91PD for Paper Lamination**. เข้าถึงได้จาก www.pttmcc.com/new/download/FZ91PD.pdf.
- [4] Bhatia, Amita, et al. (2007). "Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application." **Korea-Australia Rheology** 19 (3): 125-131.
- [5] Hassan, Elwathig, et al. (2013). "Dynamic Mechanical Properties and Thermal Stability of Poly(lactic acid) and Poly(butylene succinate) Blends Composites." **Journal of Fiber Bioengineering and Informatics** 6 (1): 85-94.
- [6] Yokohara, Tadashi and Masayuki Yamaguchi. (2008). "Structure and properties for biomass-based polyester blends of PLA and PBS." **European Polymer Journal** 44: 677-685.
- [7] Kumar, Mukesh, et al. (2010). "Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites." **Bioresource Technology** 101: 8406-8415.
- [8] Harada, Masaki, et al. (2008). "Reactive Compatibilization of Biodegradable Poly(lactic acid)/Poly(ϵ -caprolactone) Blends with Reactive Processing Agents." **Polymer Engineering and Science**: 1359-1368.
- [9] Harada, Masaki, et al. (2007). "Increased Impact Strength of Biodegradable Poly(lactic acid)/Poly(butylene succinate) Blend Composites by Using Isocyanate as a Reactive Processing Agent." **Applied Polymer Science** 106: 1813-1820.
- [10] Coltelli, Maria-Beatrice, Simona Bronco, and Carlos China. (2010). "The effect of free radical reactions on structure and properties of poly(lactic acid) (PLA) based blends." **Polymer Degradation and Stability** 95: 332-334.
- [11] Wang, Ruyin, et al. (2009). "Toughening Modification of PLLA/PBS Blends via In Situ Compatibilization." **Polymer engineering and science** 26-33.

- [12] Ma, Piming, et al. (2012). "Toughening of PHBV/PBS and PHB/PBS Blends via In situ Compatibilization Using Dicumyl Peroxide as a Free-Radical Grafting Initiator." **Macromolecular Materials and Engineering** 297: 402–410.
- [13] Khankrua, Rattikarn, et al. (2014). "Effect of chain extenders on thermal and mechanical properties of poly(lactic acid) at high processing temperatures:
Potential application in PLA/Polyamide 6 blend." **Polymer Degradation and Stability** 108: 232-240.
- [14] Al-Itry, Racha, K.L., and Abderrahim Maazouz. (2012). "Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA,PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy." **Polymer Degradation and Stability** 97: 1898-1914.
- [15] Soccio, Michelina, et al. (2012). "Reactive blending of poly(butylene succinate) and poly(triethylene succinate): characterization of the copolymers obtained." **Polymer International** 61: 163–1169.
- [16] Coltelli, Maria-Beatrice, et al. (2011). "Compatible blends of biorelated polyesters through catalytic transesterification in the melt." **Polymer Degradation and Stability** 96: 982-990.
- [17] Bioplastics, European (2558). **What are bioplastics?** เข้าถึงเมื่อ มกราคม 2558. เข้าถึงได้จาก http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Bioplastics_eng.pdf.
- [18] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (2551). เทคโนโลยีของประเทศผู้นำด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. เข้าถึงได้จาก <http://www.nia.or.th/download/document/chapter 3.pdf>.
- [19] Corporation, Mitsubishi Chemical **GS Pla properties sheet**. เข้าถึงได้จาก <https://www.pttpm-techinfo.com/download.ashx?lang=en&file=20138279335297560926208.pdf&field=1>.
- [20] Llc, Natureworks (2553). **Ingeo™ Biopolymer 2003D Technical Data Sheet**. เข้าถึงได้จาก http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_2_0_0_3_D_FFP-FSW.pdf.
- [21] Llc, Natureworks (2553). **Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet**. เข้าถึงได้จาก http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4_0_4_3_D_films.pdf.

- [22] Paul, Donald R. and C. B. Bucknall, **Polymer Blends: Formulation**. Vol. 1. 2000, New York: John Wiley & Sons.
- [23] Everaerta, V., L. Aertsb, and G. Groeninckxa. (1999). "Phase morphology development in immiscible PP/(PS/PPE) blends influence of the melt-viscosity ratio and blend composition." **Polymer** 40: 6627–6644.
- [24] Bicerano, Jozef (2553). **A Practical Guide to Polymeric Compatibilizers for Polymer blends**. เข้าถึงได้จาก <http://www.plas2006.com/UploadFile/TopicFile/20063112235119.doc>.
- [25] Yang, Sen-Lin, et al. (2008). "Thermal and mechanical properties of chemical crosslinked polylactide (PLA)." **Polymer Testing** 27: 957–963.
- [26] กาญจนา โสโฑ. (2556). "Properties of Poly(butylene succinate) base blends via reactive extrusion." **ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร**
- [27] Lin, Shan, et al. (2012). "Mechanical properties and morphology of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends compatibilized by transesterification." **Materials and Design** 36: 604–608.
- [28] Moura, I., et al. (2012). "Synthesis of EVA-g-PLA copolymers using transesterification reactions." **Materials Chemistry and Physics** 134: 103–110.
- [29] Wu, Defeng, et al. (2012). "Interfacial Properties, Viscoelasticity, and Thermal Behaviors of Poly(butylene succinate)/Polylactide Blend." **Industrial & Engineering Chemistry Research** 51: 2290–2298.
- [30] ชลธชา จินดา. (2556). "การเตรียมฟิล์ม PBS/PLA ที่ขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มสำหรับใช้เป็นรีแอกทีฟฟิล์ม." **ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร**
- [31] Villalobos, M., et al. (2006). "Oligomeric chain extenders for economic reprocessing and recycling of condensation plastics." **Energy** 31: 3227–3234.
- [32] Corre, Yves-Marie, et al. (2011). "Melt strengthening of poly (lactic acid) through reactive extrusion with epoxy-functionalized chains." **Rheologica Acta** 50: 613–629.
- [33] Nawaratna, Gayan, Ronald Lacey, and Sandun D. Fernando. (2012). "Effect of hydrocarbon tail-groups of transition metal alkoxide based amphiphilic catalysts on transesterification." **Catalysis Science & Technology** 2: 364-372.

- [34] Khrouf, Amel, et al. (1999). "Polyesters bearing furan moieties. Part 3. A kinetic study of the transesterification of 2-furoates as a model reaction for the corresponding polycondensations." **Polymer International** 649 ± 659: 649-659.
- [35] Dubois, Ph., et al. (1991). "Macromolecular Engineering of Polylactones and Polylactides. 4. Mechanism and Kinetics of Lactide Homopolymerization by Aluminum Isopropoxide." **Macromolecules** 24: 2266-2270.
- [36] Hassouna, Fatima, et al. (2011). "New approach on the development of plasticized polylactide (PLA): Grafting of poly(ethylene glycol) (PEG) via reactive extrusion." **European Polymer Journal** 47: 2134-2144.







ก-1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

ตารางผนวก ก.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่เตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่

ตัวอย่าง	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PBS	8.98 ± 0.6	39.2 ± 1.1	440.8 ± 11	130.3 ± 52
Neat PLA	3.75 ± 0.4	71.3 ± 0.9	2097.3 ± 39	6.4 ± 0.8
PBS:PLA(85:15)	6.87 ± 0.3	43.4 ± 1.1	575.8 ± 13	366.3 ± 23
PBS:PLA(80:20)	6.97 ± 0.7	43.0 ± 1.0	626.9 ± 26	359.9 ± 25
PBS:PLA(75:25)	5.98 ± 0.7	42.8 ± 0.9	660.6 ± 29	400.3 ± 49

ตารางผนวก ก.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox ที่เตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่

ตัวอย่าง	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBS:PLA(75:25) P0.0025	5.60 ± 0.3	46.7 ± 2.2	702.7 ± 19	388.4 ± 87
PBS:PLA(75:25) P0.0050	7.00 ± 0.8	47.3 ± 1.8	697.9 ± 23	408.6 ± 79
PBS:PLA(75:25) P0.0075	8.05 ± 0.6	47.1 ± 2.7	688.0 ± 35	358.4 ± 92
PBS:PLA(75:25) P0.0100	8.22 ± 0.3	50.5 ± 3.1	772.3 ± 34	375.3 ± 90
PBS:PLA(80:20) P0.0025	6.56 ± 0.6	45.6 ± 2.5	627.6 ± 25	417.0 ± 108
PBS:PLA(80:20) P0.0050	7.17 ± 0.7	48.4 ± 2.1	648.9 ± 55	455.1 ± 71
PBS:PLA(80:20) P0.0075	7.41 ± 0.4	48.2 ± 1.7	647.2 ± 40	444.5 ± 89
PBS:PLA(80:20) P0.0100	7.89 ± 0.6	48.5 ± 2.2	677.9 ± 29	371.2 ± 95

ตารางผนวก ก.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl ที่เตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่

ตัวอย่าง	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBS:PLA(75:25) J0.5	6.81 ± 0.5	38.0 ± 1.0	653.6 ± 15	312.5 ± 81
PBS:PLA(75:25) J1.0	7.14 ± 0.5	39.2 ± 0.9	680.7 ± 15	339.3 ± 51
PBS:PLA(75:25) J1.5	7.66 ± 0.5	41.0 ± 1.2	717.5 ± 38	103.9 ± 83
PBS:PLA(75:25) J2.0	7.75 ± 0.5	41.9 ± 1.4	734.2 ± 43	62.5 ± 14
PBS:PLA(80:20) J0.5	6.63 ± 0.8	39.4 ± 0.8	615.6 ± 36	327.8 ± 82
PBS:PLA(80:20) J1.0	7.52 ± 0.3	41.4 ± 1.7	605.8 ± 40	377.5 ± 62
PBS:PLA(80:20) J1.5	7.84 ± 0.3	40.2 ± 0.8	632.3 ± 32	257.4 ± 96
PBS:PLA(80:20) J2.0	7.97 ± 0.4	42.5 ± 1.1	708.7 ± 23	69.1 ± 34

ตารางผนวก ก.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT ที่เตรียมในเครื่องผสมภายในแบบปิด

ตัวอย่าง	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBS:PLA(75:25)	5.54 ± 0.4	464 ± 2.5	410.6 ± 20	19.6 ± 3.6
PBS:PLA(75:25) T0.025	5.76 ± 0.4	48.5 ± 4.4	412.3 ± 21	19.6 ± 4.4
PBS:PLA(75:25) T0.050	6.06 ± 0.5	48.8 ± 5.0	411.6 ± 15	19.6 ± 4.1
PBS:PLA(75:25) T0.075	5.46 ± 0.2	50.5 ± 5.1	445.7 ± 46	17.9 ± 2.4
PBS:PLA(75:25) T0.100	5.47 ± 0.4	50.0 ± 2.3	415.5 ± 20	20.6 ± 2.6
PBS:PLA(80:20)	4.56 ± 0.3	47.3 ± 2.5	386.3 ± 19	22.6 ± 3.3
PBS:PLA(80:20) T0.025	5.79 ± 0.6	49.0 ± 2.6	380.5 ± 9	23.5 ± 3.8
PBS:PLA(80:20) T0.050	6.40 ± 0.4	48.7 ± 3.5	370.3 ± 25	22.0 ± 4.1
PBS:PLA(80:20) T0.075	5.00 ± 0.4	47.9 ± 3.0	377.3 ± 16	21.5 ± 3.8
PBS:PLA(80:20) T0.100	5.19 ± 1.9	49.5 ± 3.0	374.9 ± 12	21.9 ± 3.8

ตารางผนวก ก.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT และ PEG ที่เตรียมในเครื่องผสมภายในแบบปิด

ตัวอย่าง	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBS:PLA(75:25)	5.54 ± 0.4	464 ± 2.5	410.6 ± 20	19.6 ± 3.6
PBS:PLA(75:25) T0.1	5.47 ± 0.4	50.0 ± 2.3	415.5 ± 20	20.6 ± 2.6
PBS:PLA(75:25) PEG5	6.24 ± 0.4	42.0 ± 3.0	392.0 ± 13	35.8 ± 11.0
PBS:PLA(75:25) PEG5 T0.1	6.43 ± 0.4	43.0 ± 2.0	391.0 ± 21	232.0 ± 97.0

ตารางผนวก ก.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มีการเติม Perkadox หรือ Joncryl ที่เตรียมในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่

ตัวอย่าง	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PLA:PBS(80:20)	5.48 ± 0.5	63.0 ± 11.0	1718.0 ± 23.0	14.8 ± 3.0
PLA:PBS(80:20) P0.01	6.02 ± 0.5	67.0 ± 1.0	1957.0 ± 19.0	25.5 ± 14.0
PLA:PBS(80:20) J1.0	6.74 ± 1.2	67.0 ± 1.0	1928.0 ± 38.0	28.6 ± 6.0

ก-2 ผลการทดสอบการหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์

ตารางผนวก ก.7 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA (190°C/2.16 kg)

ตัวอย่าง	MFI (g/10min)	ตัวอย่าง	MFI (g/10min)
PBS resin	8.44 ± 0.8	PBS:PLA(85:15)	7.46 ± 0.2
PLA resin	1.16 ± 0.1	PBS:PLA(80:20)	6.70 ± 0.1
Neat PBS	10.58 ± 0.2	PBS:PLA(75:25)	5.77 ± 0.2
Neat PLA	2.05 ± 0.1		

ตารางผนวก ก.8 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox (190°C/2.16 kg)

ตัวอย่าง	MFI (g/10min)	ตัวอย่าง	MFI (g/10min)
PBS:PLA(75:25) P0.0025	4.90 ± 0.4	PBS:PLA(80:20) P0.0025	5.51 ± 0.3
PBS:PLA(75:25) P0.0050	2.51 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) P0.0050	3.30 ± 0.1
PBS:PLA(75:25) P0.0075	1.41 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) P0.0075	2.97 ± 0.4
PBS:PLA(75:25) P0.0100	0.87 ± 0.0	PBS:PLA(80:20) P0.0100	1.95 ± 0.2

ตารางผนวก ก.9 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl (190°C/2.16 kg)

ตัวอย่าง	MFI (g/10min)	ตัวอย่าง	MFI (g/10min)
PBS:PLA(75:25) J0.5	4.48 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) J0.5	5.36 ± 0.3
PBS:PLA(75:25) J1.0	2.83 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) J1.0	3.58 ± 0.2
PBS:PLA(75:25) J1.5	1.65 ± 0.5	PBS:PLA(80:20) J1.5	1.80 ± 0.2
PBS:PLA(75:25) J2.0	0.86 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) J2.0	1.52 ± 0.1

ตารางผนวก ก.10 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT (190°C/2.16 kg)

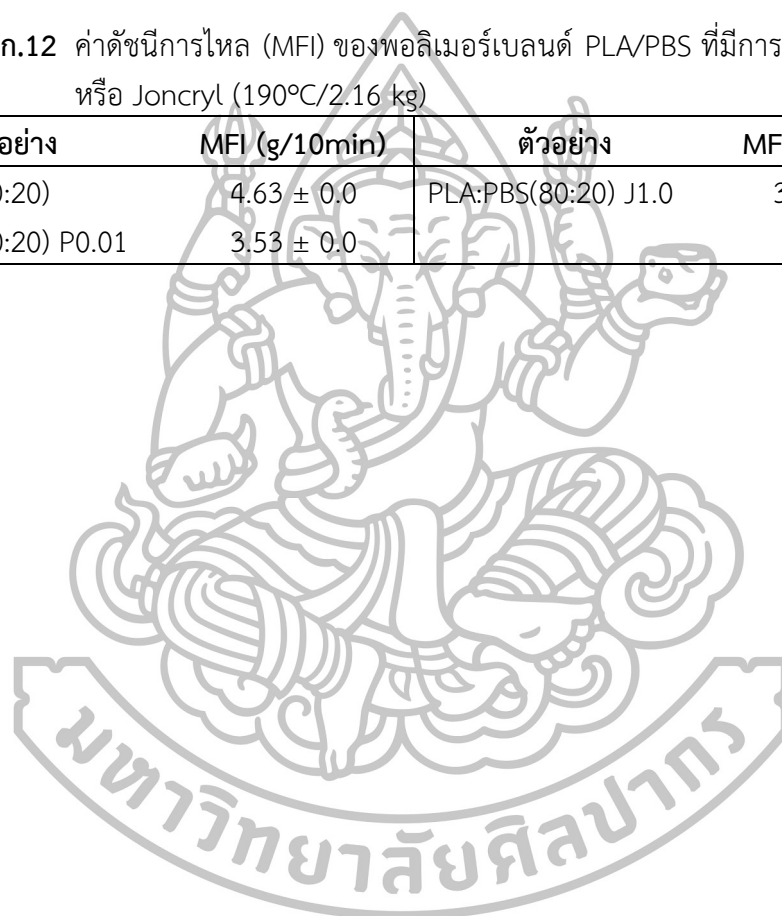
ตัวอย่าง	MFI (g/10min)	ตัวอย่าง	MFI (g/10min)
PBS:PLA(75:25)	11.24 ± 0.3	PBS:PLA(80:20)	12.50 ± 0.3
PBS:PLA(75:25) T0.025	10.23 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) T0.025	10.95 ± 0.1
PBS:PLA(75:25) T0.050	9.50 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) T0.050	9.81 ± 0.1
PBS:PLA(75:25) T0.075	9.27 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) T0.075	9.68 ± 0.1
PBS:PLA(75:25) T0.100	9.02 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) T0.100	9.17 ± 0.0

ตารางผนวก ก.11 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT และ PEG (190°C/2.16 kg)

ตัวอย่าง	MFI (g/10min)	ตัวอย่าง	MFI (g/10min)
PBS:PLA(75:25)	11.24 ± 0.3	PBS:PLA(75:25) PEG5	9.64 ± 0.0
PBS:PLA(75:25) T0.100	9.02 ± 0.1	PBS:PLA(75:25) PEG5 T0.100	14.30 ± 0.0

ตารางผนวก ก.12 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBS ที่มีการเติม Perkadox หรือ Joncryl (190°C/2.16 kg)

ตัวอย่าง	MFI (g/10min)	ตัวอย่าง	MFI (g/10min)
PLA:PBS(80:20)	4.63 ± 0.0	PLA:PBS(80:20) J1.0	3.22 ± 0.0
PLA:PBS(80:20) P0.01	3.53 ± 0.0		



ก-3 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

ตารางผนวก ก.13 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox

ตัวอย่าง	ปริมาณเจล (%)	ตัวอย่าง	ปริมาณเจล (%)
PBS:PLA(75:25) P0.0025	3.53 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) P0.0025	4.46 ± 0.1
PBS:PLA(75:25) P0.0050	5.04 ± 0.3	PBS:PLA(80:20) P0.0050	5.78 ± 0.2
PBS:PLA(75:25) P0.0075	7.20 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) P0.0075	8.05 ± 0.2
PBS:PLA(75:25) P0.0100	13.34 ± 0.4	PBS:PLA(80:20) P0.0100	12.35 ± 0.1

ตารางผนวก ก.14 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl

ตัวอย่าง	ปริมาณเจล (%)	ตัวอย่าง	ปริมาณเจล (%)
PBS:PLA(75:25) J0.5	4.20 ± 1.3	PBS:PLA(80:20) J0.5	3.26 ± 1.2
PBS:PLA(75:25) J1.0	8.35 ± 2.1	PBS:PLA(80:20) J1.0	8.39 ± 1.4
PBS:PLA(75:25) J1.5	12.42 ± 2.7	PBS:PLA(80:20) J1.5	12.67 ± 0.1
PBS:PLA(75:25) J2.0	14.16 ± 2.0	PBS:PLA(80:20) J2.0	15.25 ± 0.6

ตารางผนวก ก.15 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT

ตัวอย่าง	ปริมาณเจล (%)	ตัวอย่าง	ปริมาณเจล (%)
PBS:PLA(75:25) T0.025	2.45 ± 0.3	PBS:PLA(80:20) T0.025	1.99 ± 1.2
PBS:PLA(75:25) T0.050	3.41 ± 0.5	PBS:PLA(80:20) T0.050	2.71 ± 1.4
PBS:PLA(75:25) T0.075	4.31 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) T0.075	3.20 ± 1.3
PBS:PLA(75:25) T0.100	4.35 ± 0.3	PBS:PLA(80:20) T0.100	3.33 ± 0.6

ก-4 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัวของพลาสติก (Heat distortion temperature: HDT)

ตารางผนวก ก.16 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA

ตัวอย่าง	HDT (°C)	ตัวอย่าง	HDT (°C)
PBS resin	103.2 ± 0.6	PBS:PLA(85:15)	98.0 ± 0.8
PLA resin	57.8 ± 0.2	PBS:PLA(80:20)	97.5 ± 0.7
Neat PBS	96.0 ± 1.3	PBS:PLA(75:25)	96.9 ± 0.5
Neat PLA	57.3 ± 0.2		

ตารางผนวก ก.17 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (HDT) ของพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Perkadox

ตัวอย่าง	HDT (°C)	ตัวอย่าง	HDT (°C)
PBS:PLA(75:25) P0.0025	101.7 ± 0.4	PBS:PLA(80:20) P0.0025	101.9 ± 0.4
PBS:PLA(75:25) P0.0050	102.5 ± 0.4	PBS:PLA(80:20) P0.0050	102.9 ± 0.4
PBS:PLA(75:25) P0.0075	102.9 ± 0.5	PBS:PLA(80:20) P0.0075	102.9 ± 1.1
PBS:PLA(75:25) P0.0100	102.3 ± 0.7	PBS:PLA(80:20) P0.0100	102.2 ± 0.2

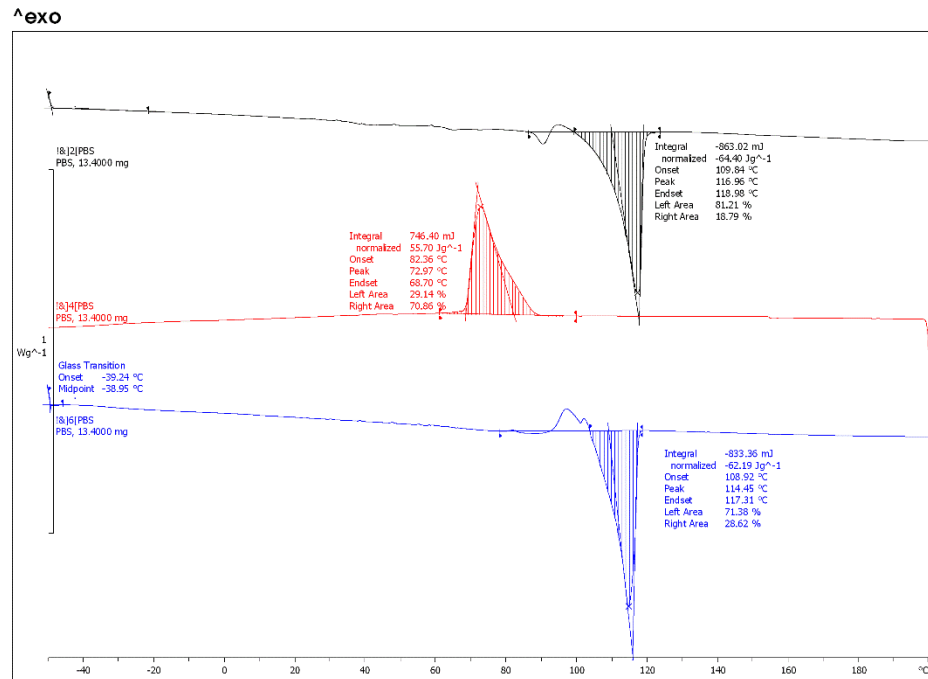
ตารางผนวก ก.18 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม Joncryl

ตัวอย่าง	HDT (°C)	ตัวอย่าง	HDT (°C)
PBS:PLA(75:25) J0.5	100.2 ± 0.2	PBS:PLA(80:20) J0.5	101.0 ± 0.6
PBS:PLA(75:25) J1.0	100.7 ± 0.1	PBS:PLA(80:20) J1.0	101.0 ± 0.4
PBS:PLA(75:25) J1.5	100.6 ± 0.3	PBS:PLA(80:20) J1.5	101.1 ± 0.1
PBS:PLA(75:25) J2.0	101.2 ± 0.9	PBS:PLA(80:20) J2.0	101.0 ± 0.3

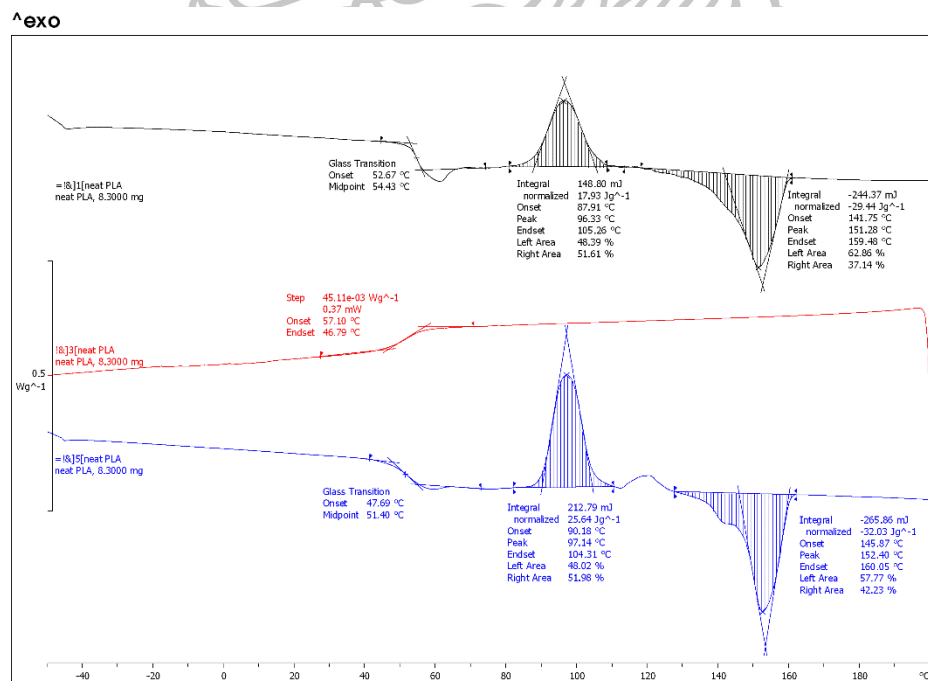
ตารางผนวก ก.19 ปริมาณเจลหลังจากสกัด PBS และ PLA ออกจากพอลิเมอร์เบลนด์ PBS/PLA ที่มีการเติม TBT

ตัวอย่าง	HDT (°C)	ตัวอย่าง	HDT (°C)
PBS:PLA(75:25)	99.7 ± 0.4	PBS:PLA(80:20)	101.8 ± 0.9
PBS:PLA(75:25) T0.025	102.6 ± 0.4	PBS:PLA(80:20) T0.025	101.4 ± 0.5
PBS:PLA(75:25) T0.050	102.4 ± 1.3	PBS:PLA(80:20) T0.050	101.1 ± 0.9
PBS:PLA(75:25) T0.075	102.5 ± 0.8	PBS:PLA(80:20) T0.075	101.8 ± 1.5
PBS:PLA(75:25) T0.100	102.1 ± 1.0	PBS:PLA(80:20) T0.100	101.2 ± 0.5

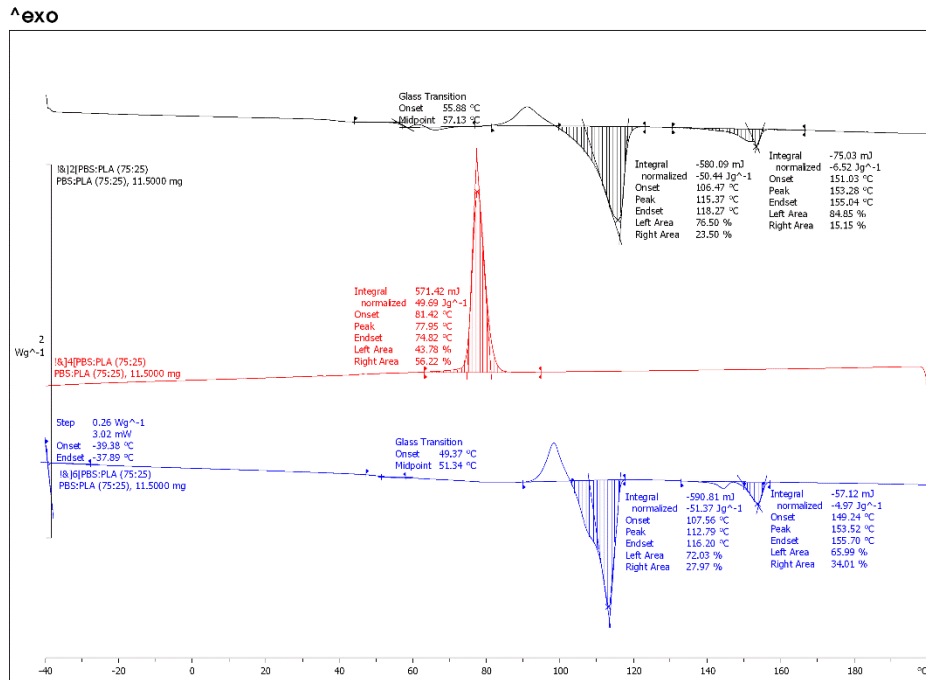
ก-5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค DSC



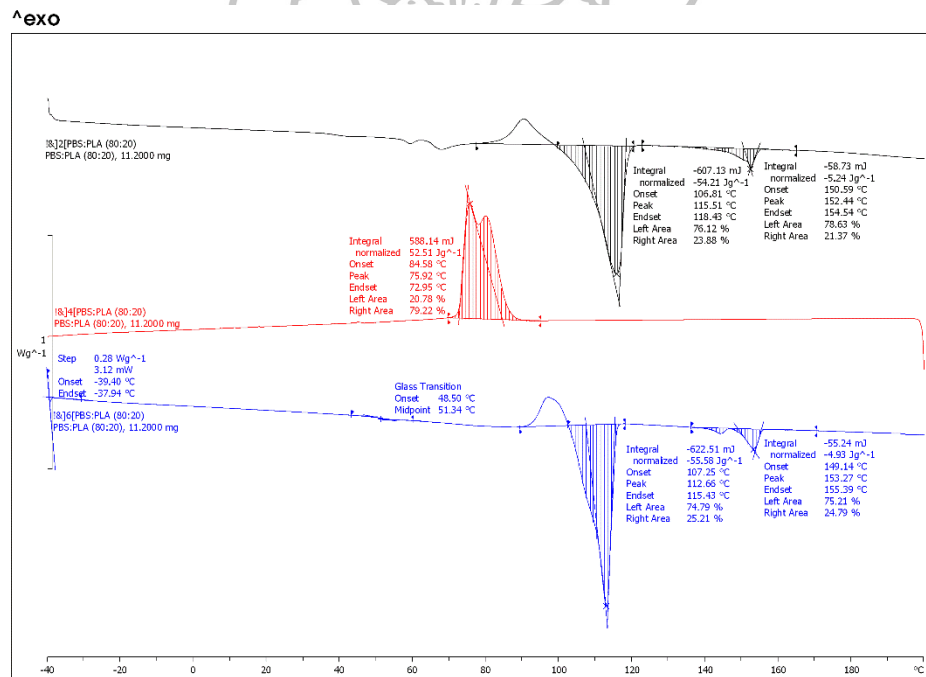
ภาพผนวก ก.1 DSC thermogram ของ Neat PBS



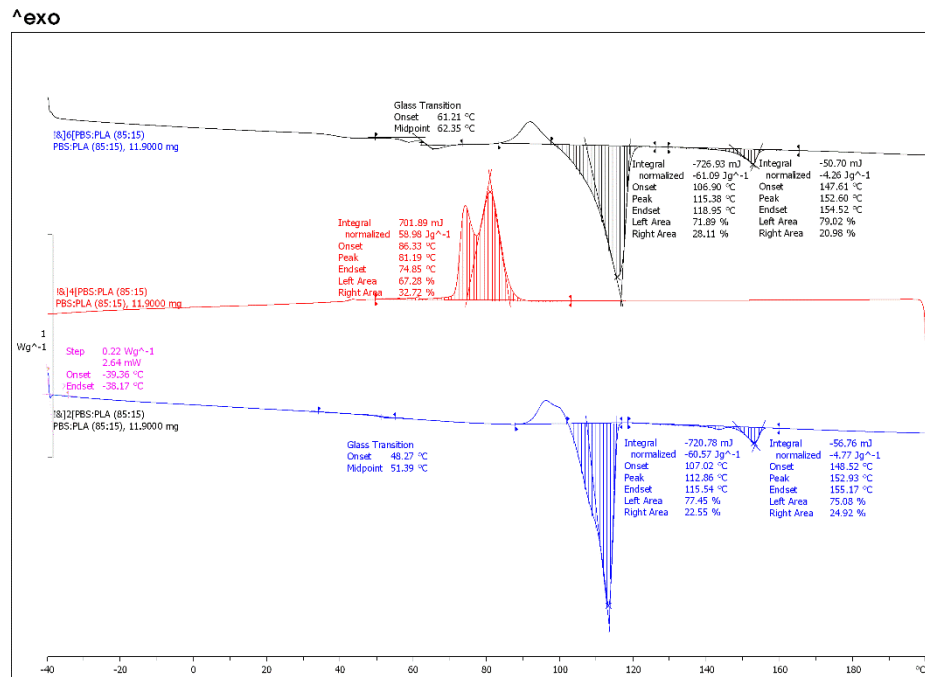
ภาพผนวก ก.2 DSC thermogram ของ Neat PLA



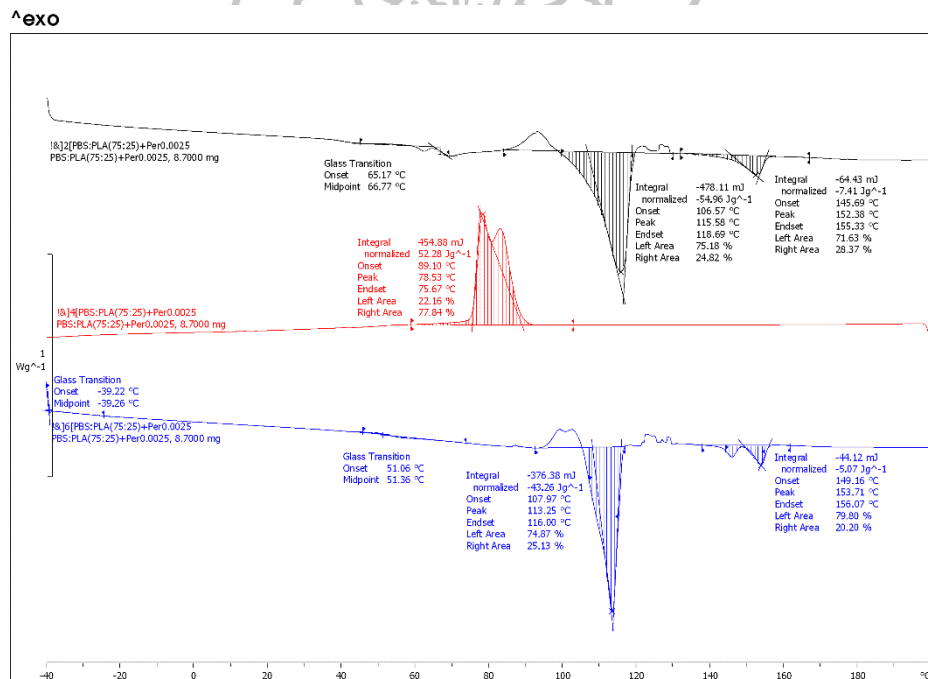
ภาพผนวก ก.3 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25)



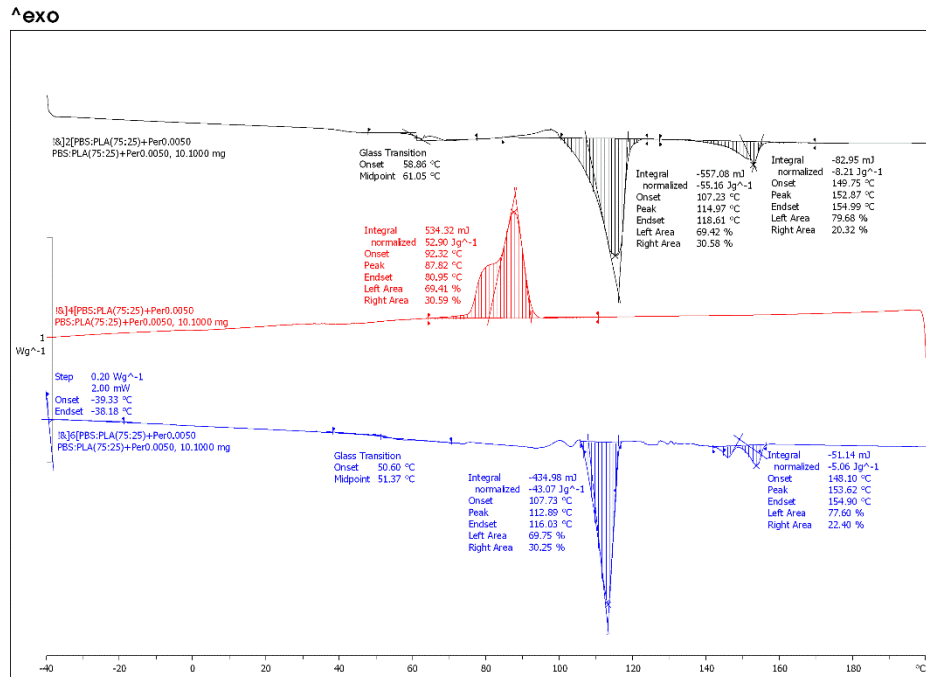
ภาพผนวก ก.4 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20)



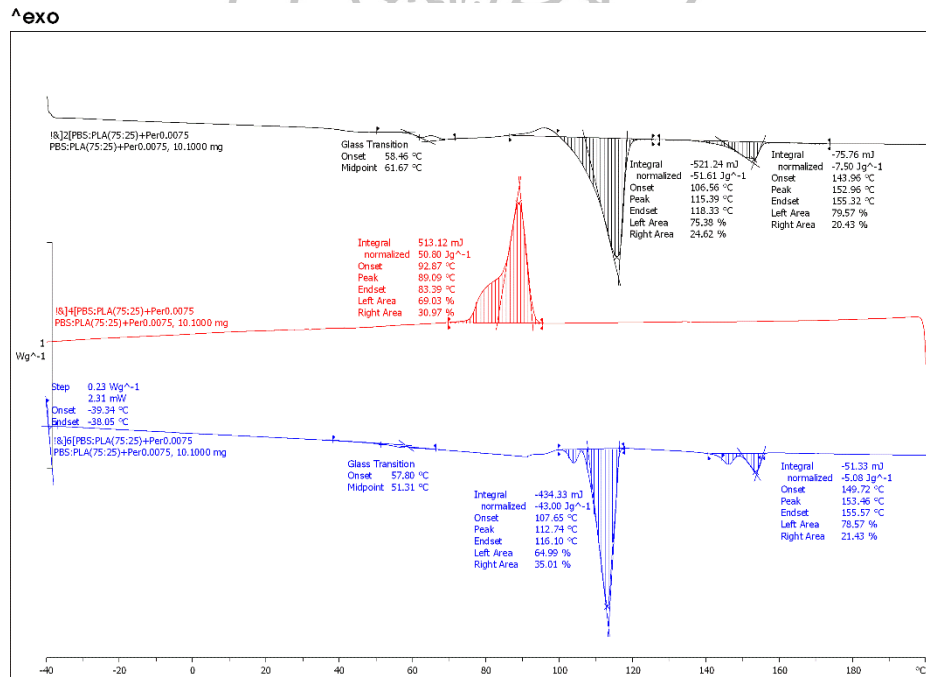
ภาพผนวก ก.5 DSC thermogram ของ PBS:PLA(85:15)



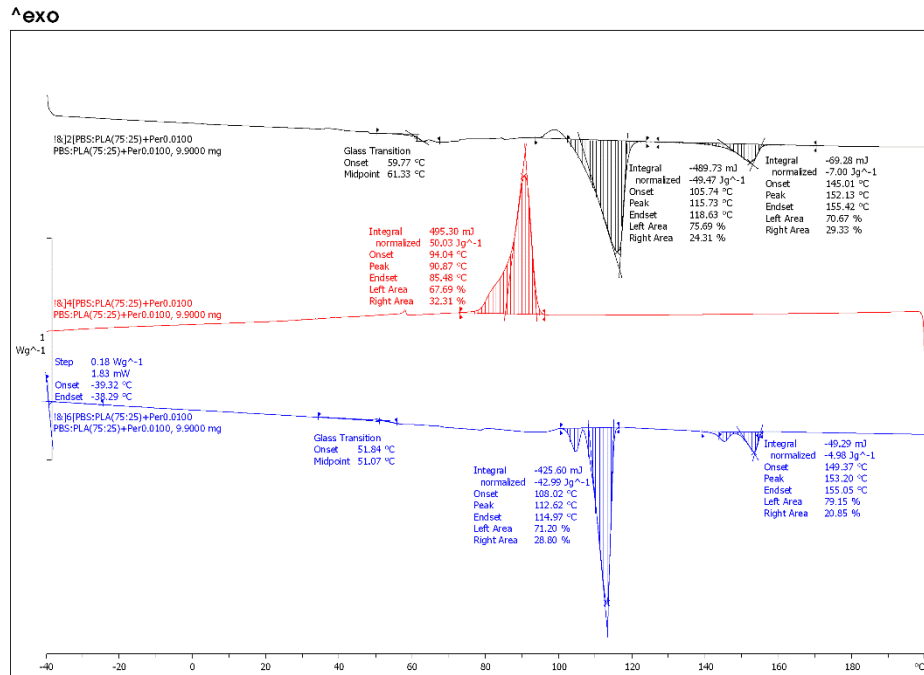
ภาพผนวก ก.6 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0025



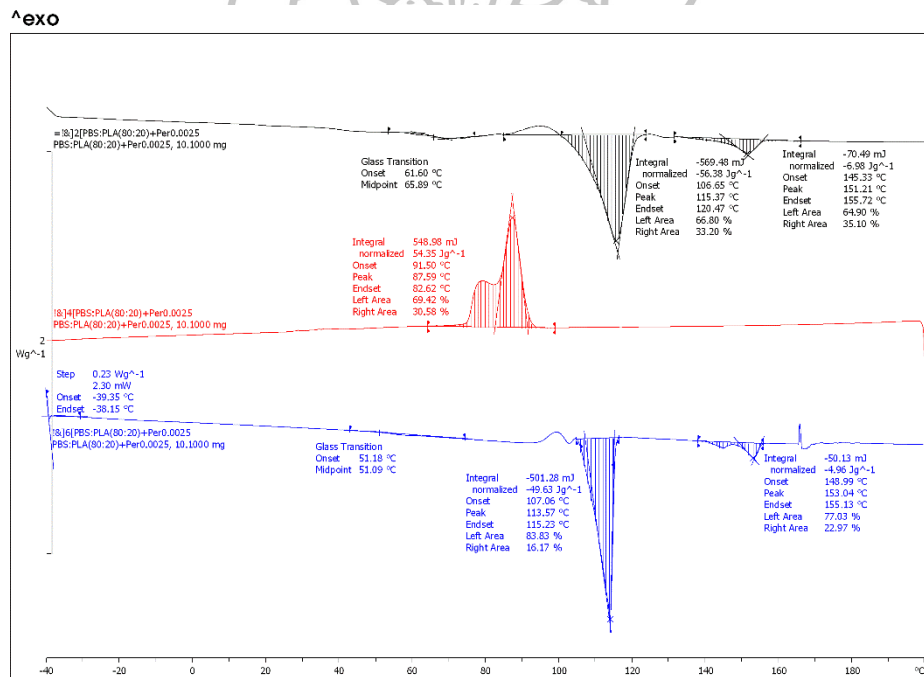
ภาพผนวก ก.7 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0050



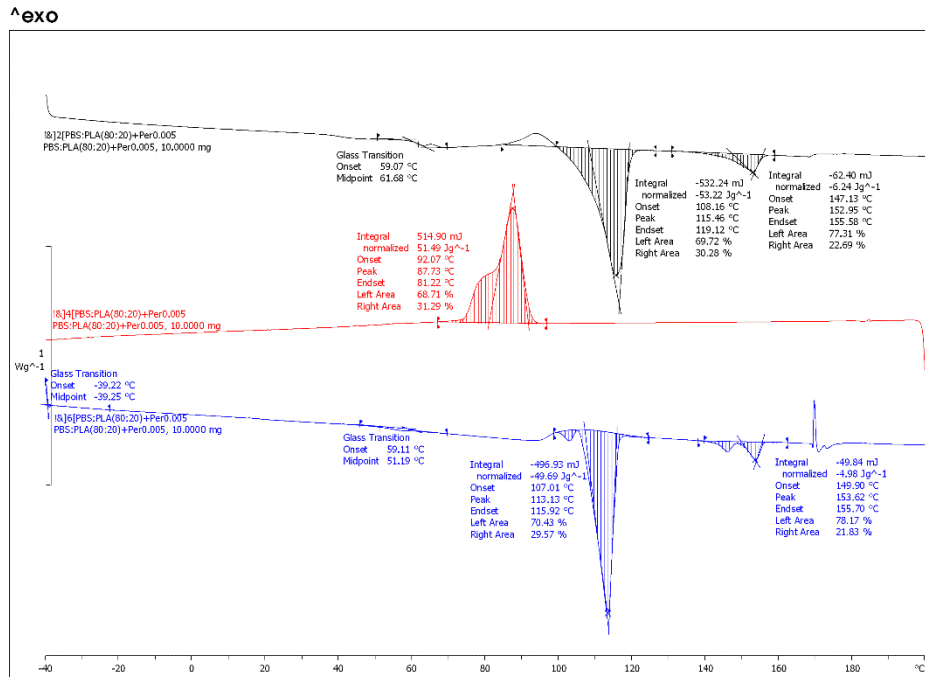
ภาพผนวก ก.8 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0075



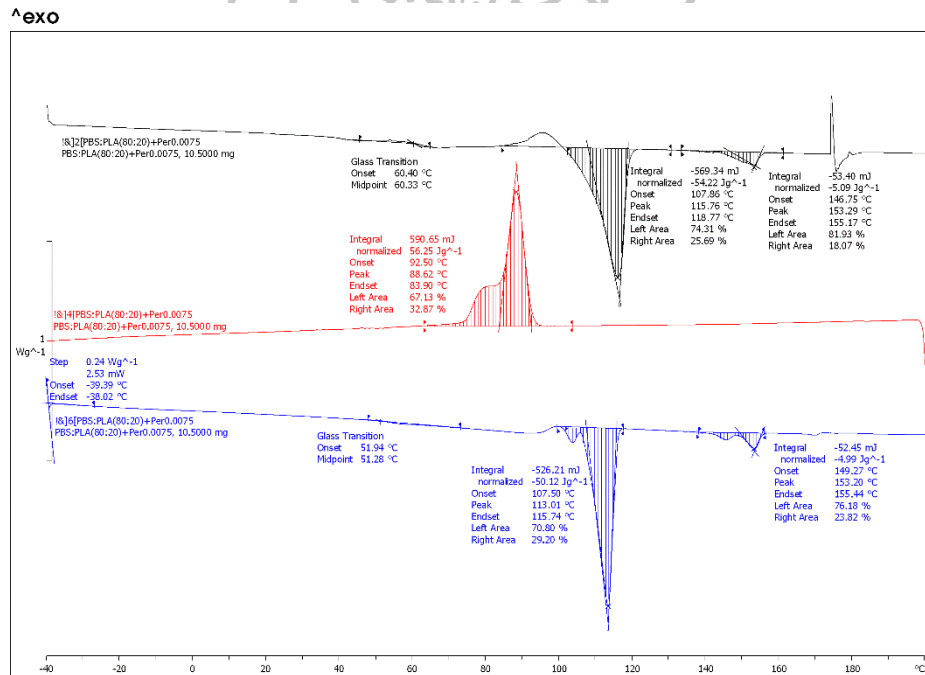
ภาพผนวก ก.9 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) P0.0100



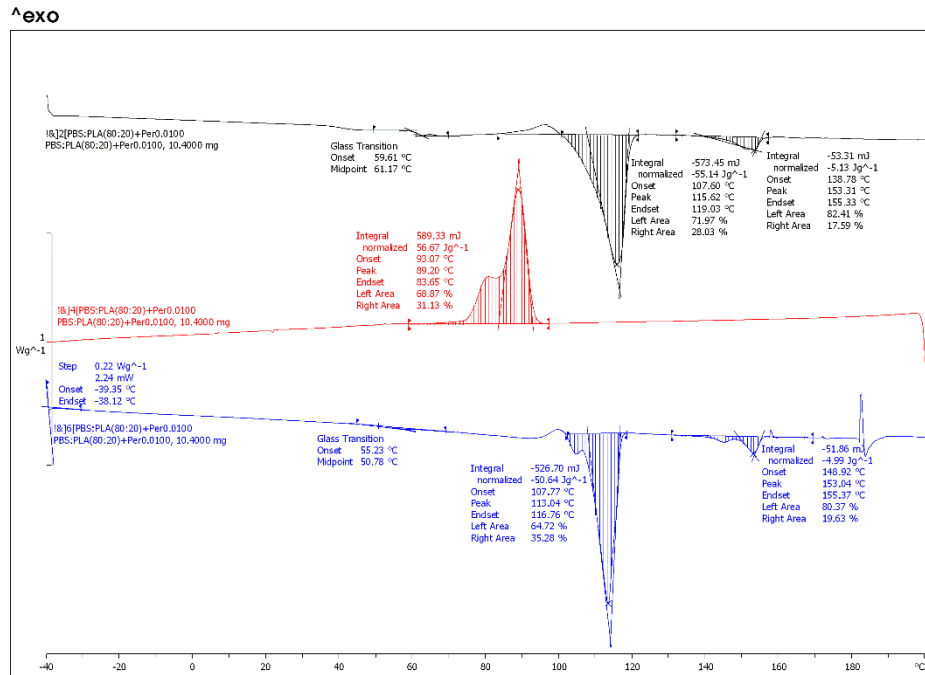
ภาพผนวก ก.10 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0025



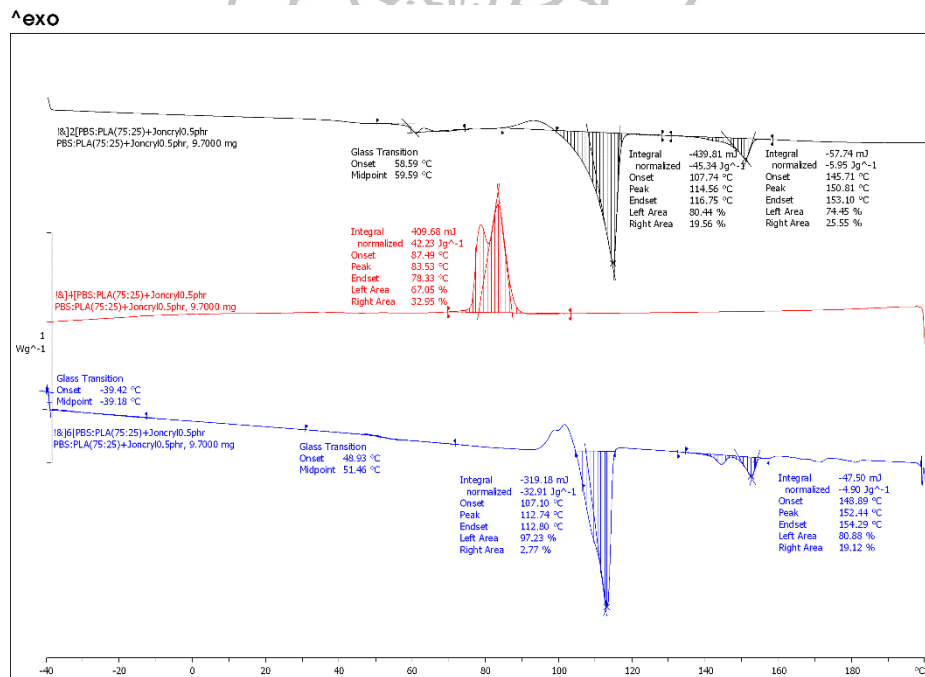
ภาพผนวก ก.11 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0050



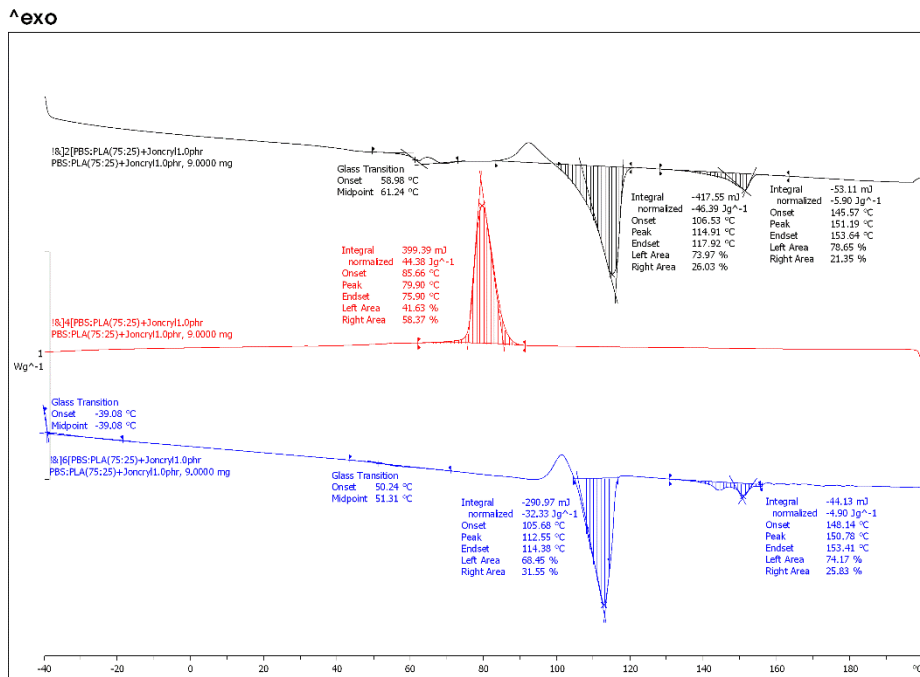
ภาพผนวก ก.12 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0075



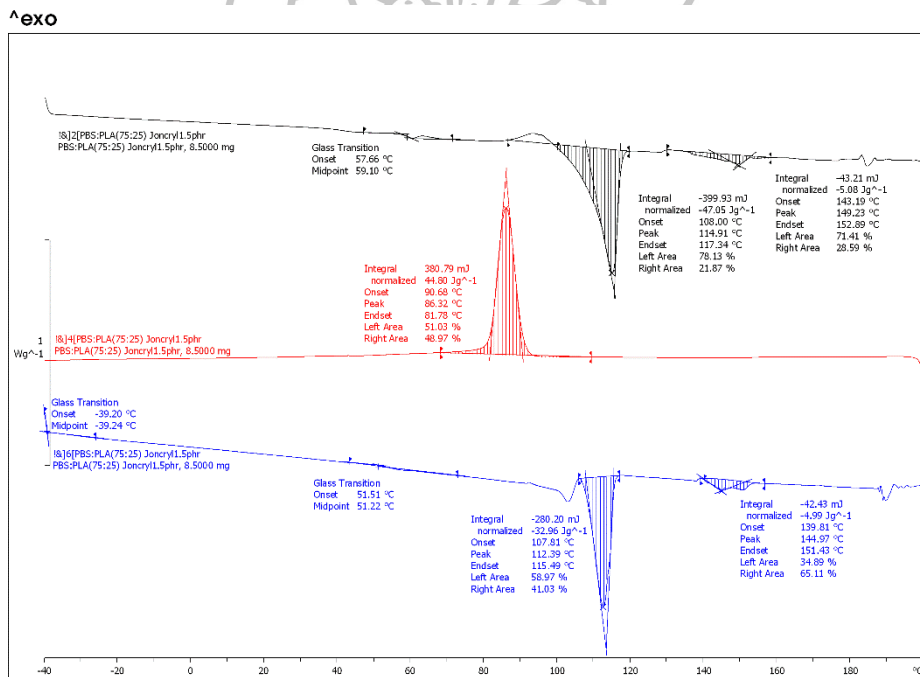
ภาพผนวก ก.13 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) P0.0100



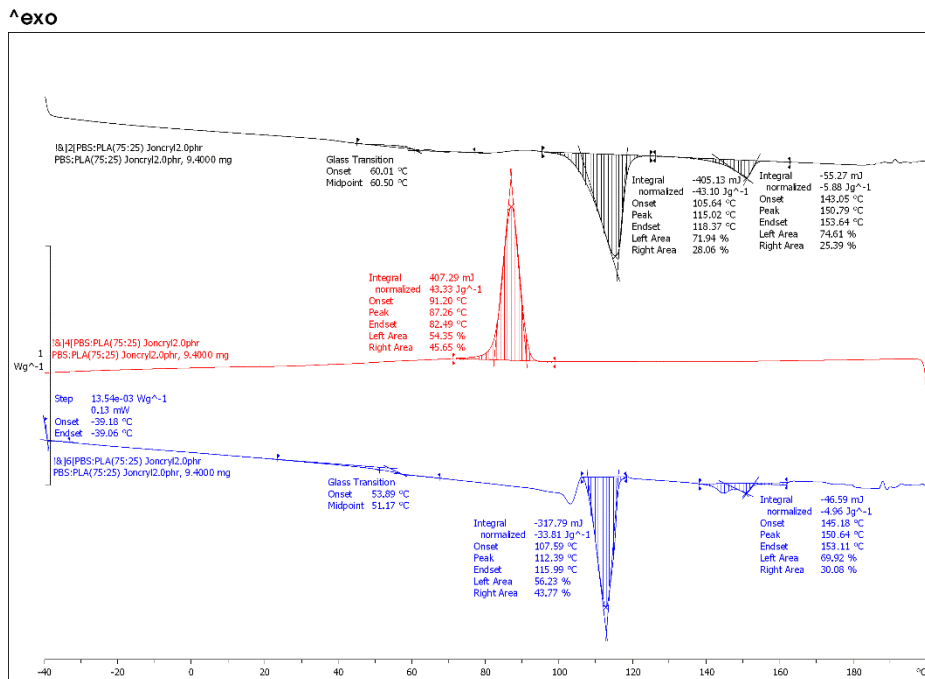
ภาพผนวก ก.14 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J0.5



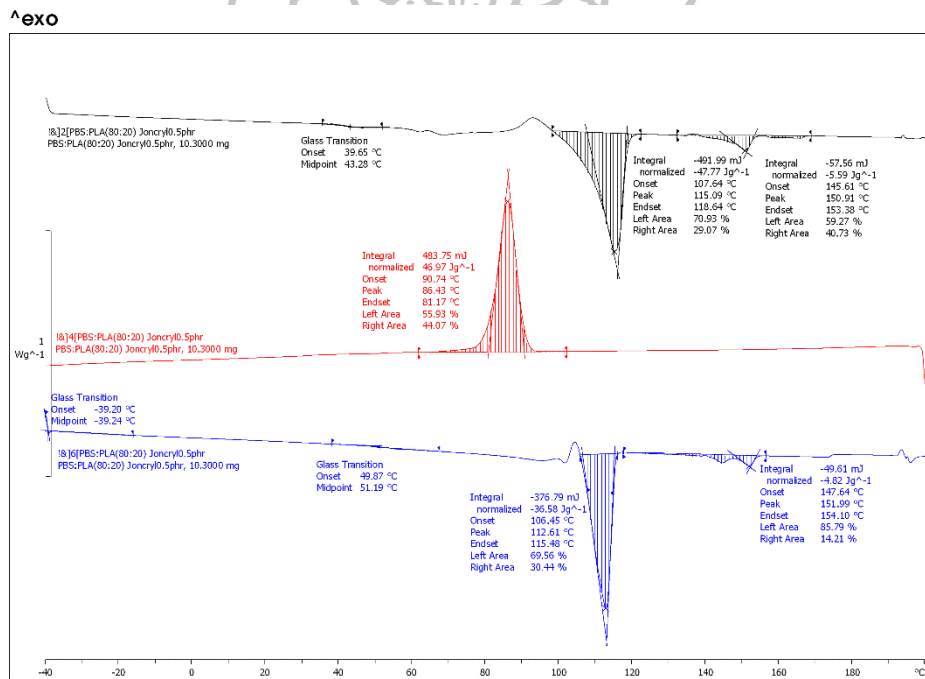
ภาพผนวก ก.15 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J1.0



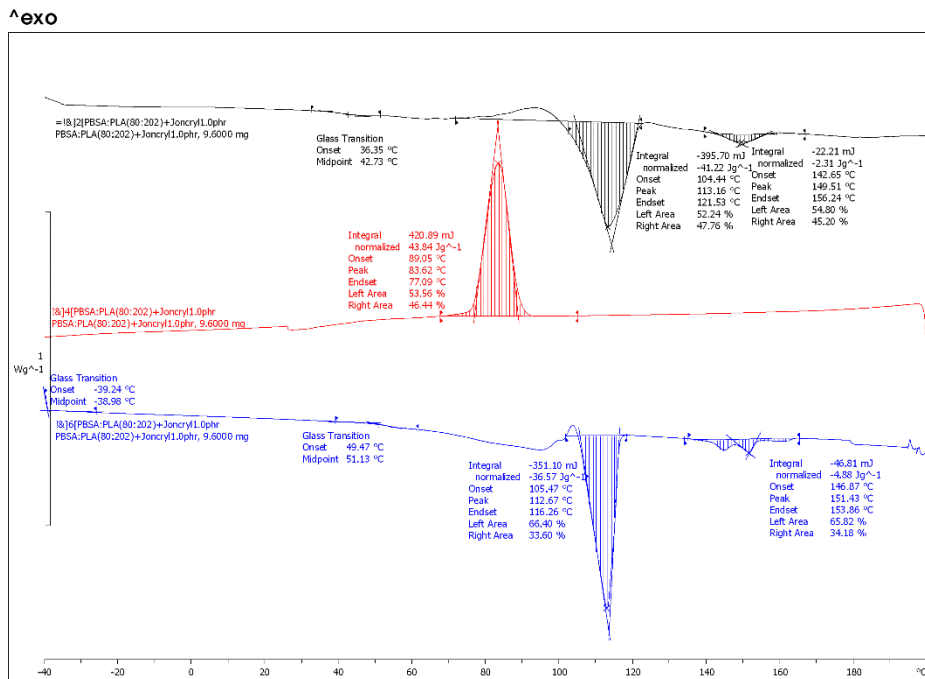
ภาพผนวก ก.16 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J1.5



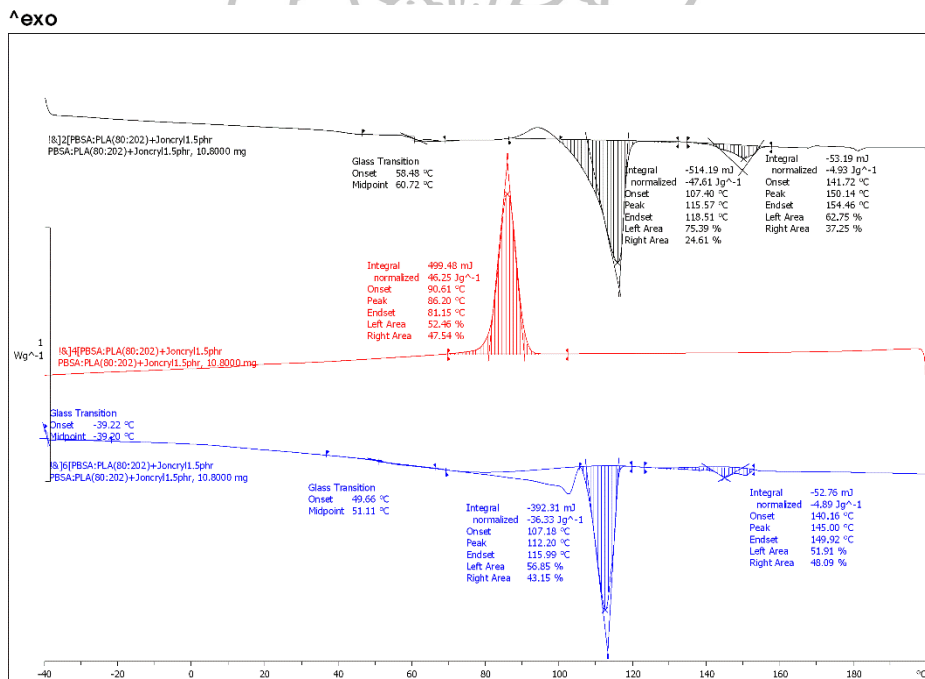
ภาพผนวก ก.17 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) J2.0



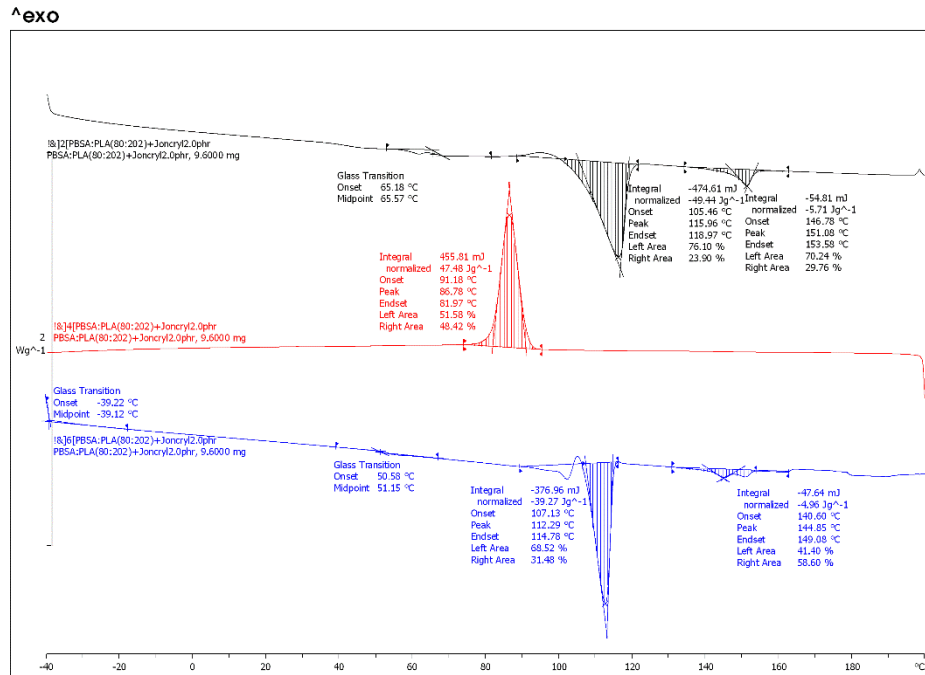
ภาพผนวก ก.18 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J0.5



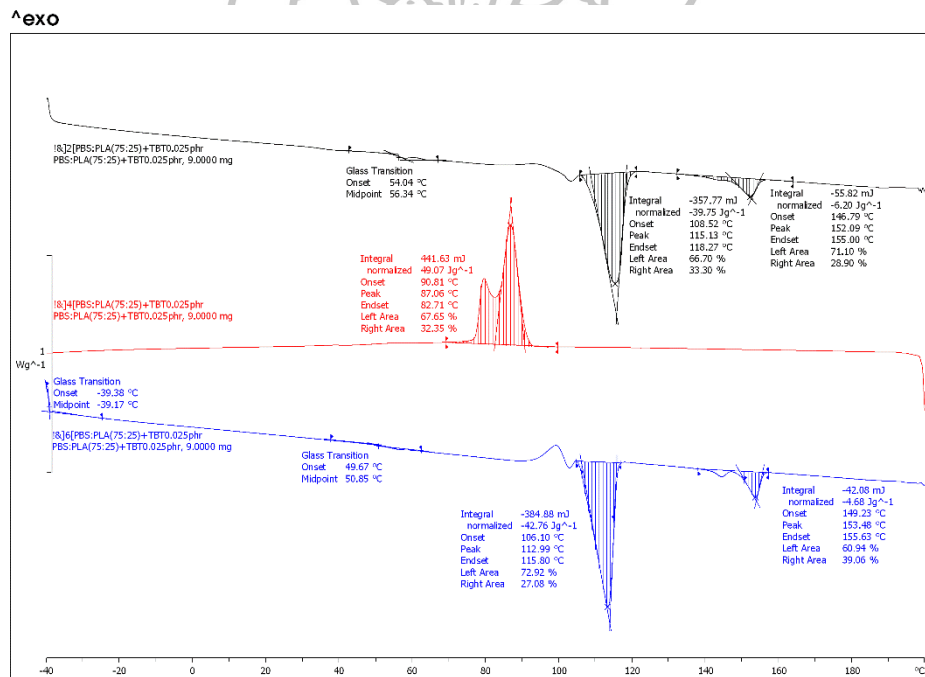
ภาพผนวก ก.19 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J1.0



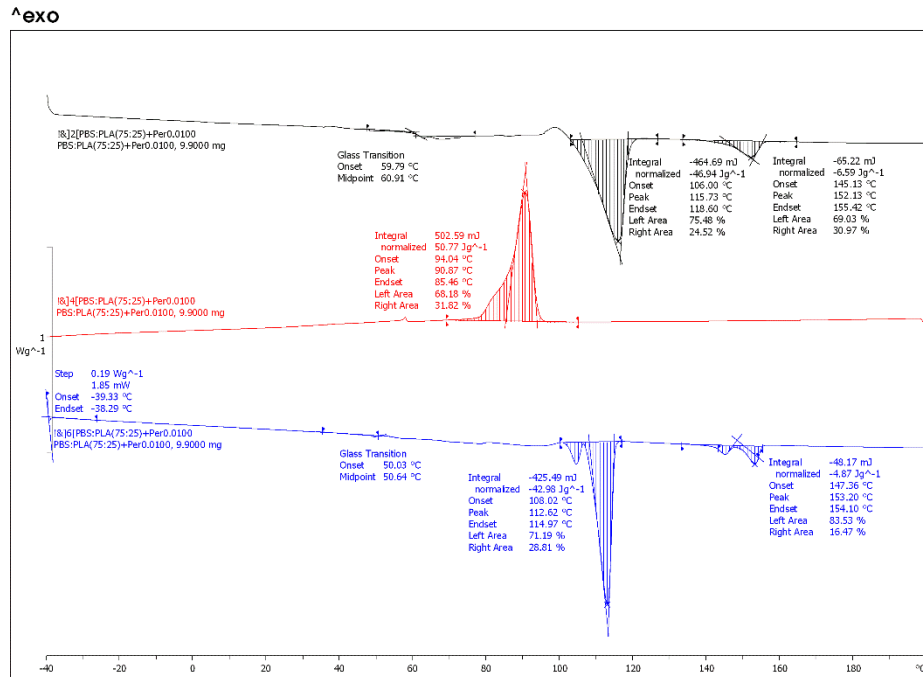
ภาพผนวก ก.20 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J1.5



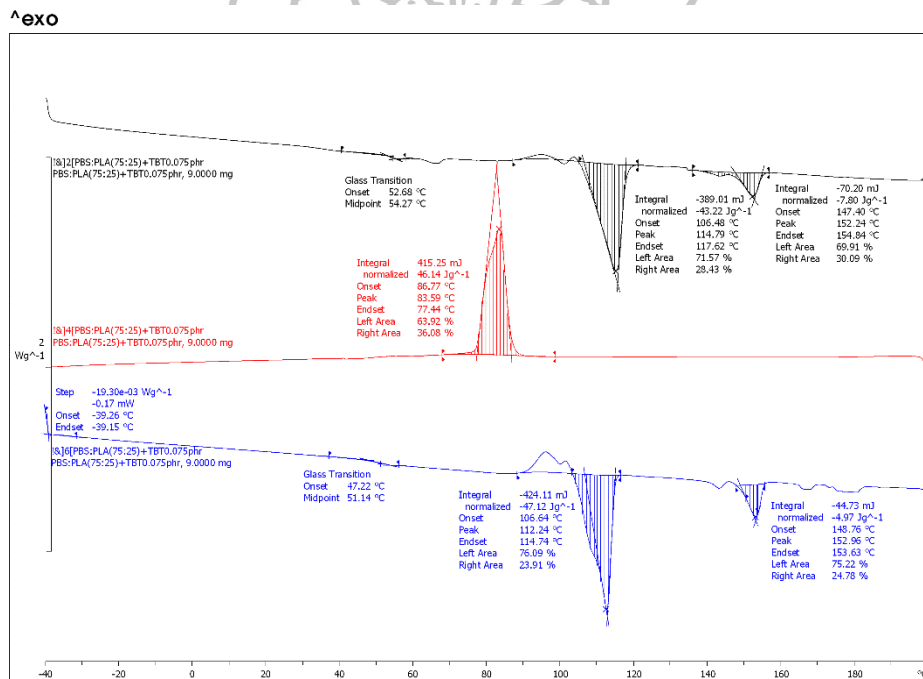
ภาพผนวก ก.21 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) J2.0



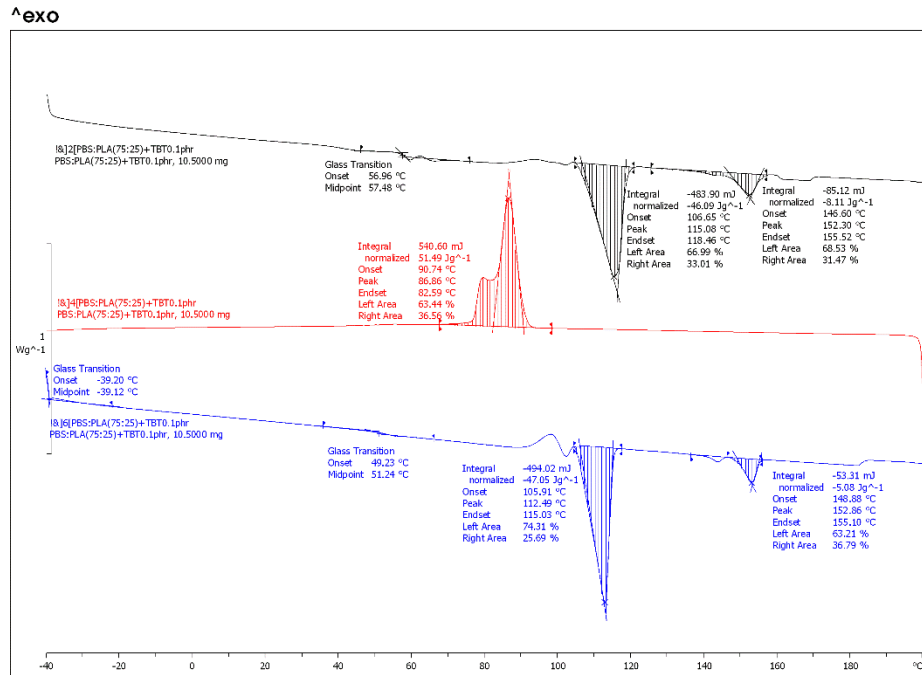
ภาพผนวก ก.22 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.025



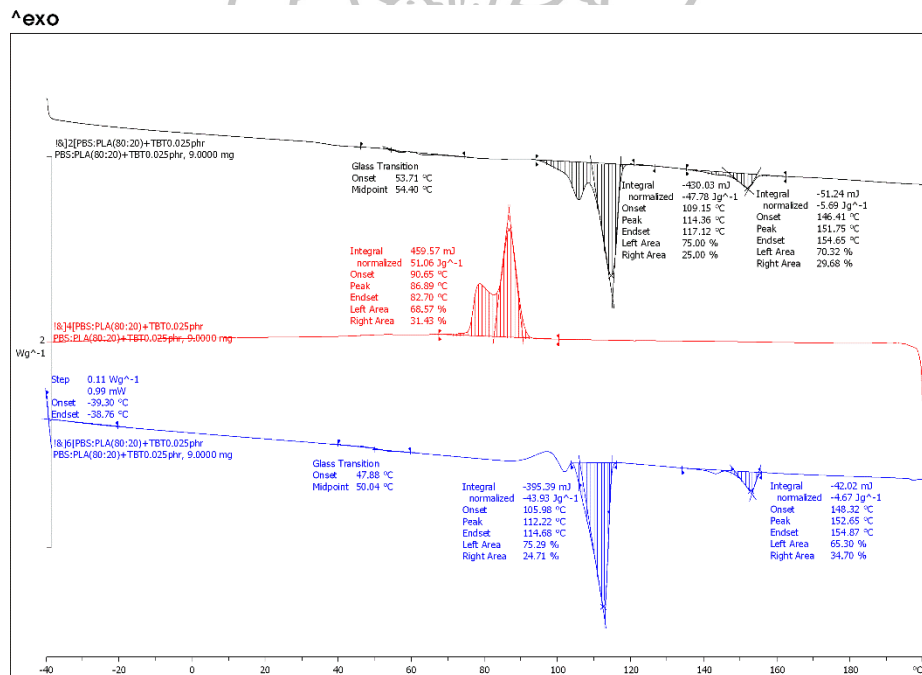
ภาพผนวก ก.23 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.050



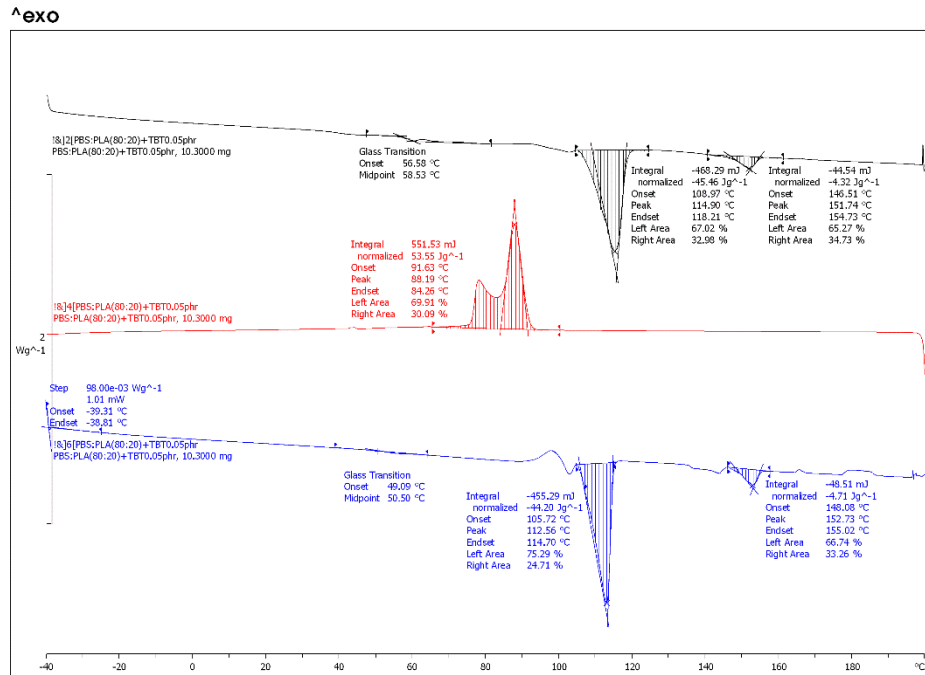
ภาพผนวก ก.24 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.075



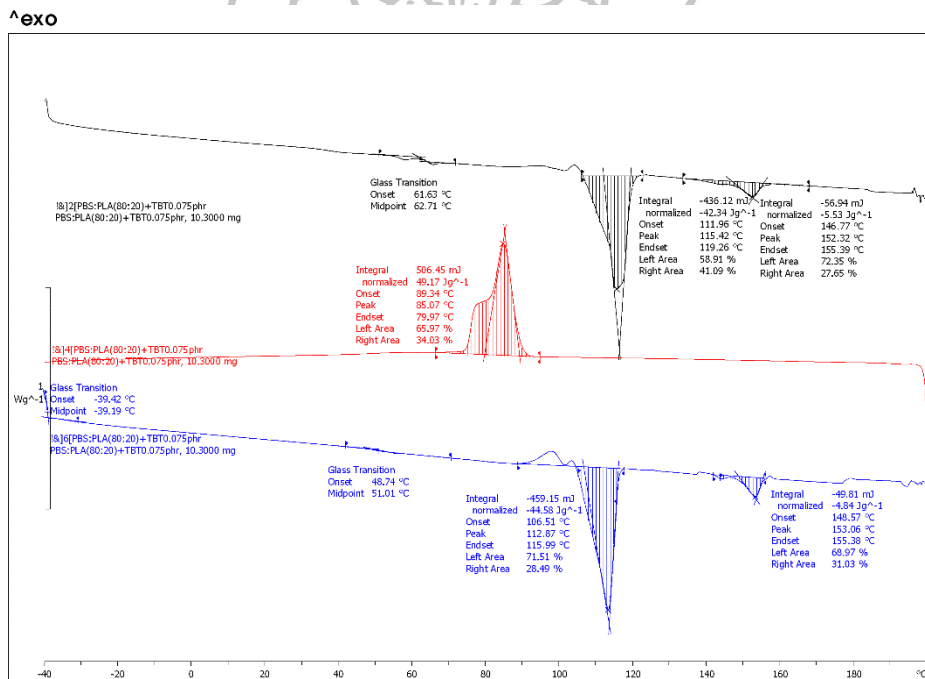
ภาพผนวก ก.25 DSC thermogram ของ PBS:PLA(75:25) T0.100



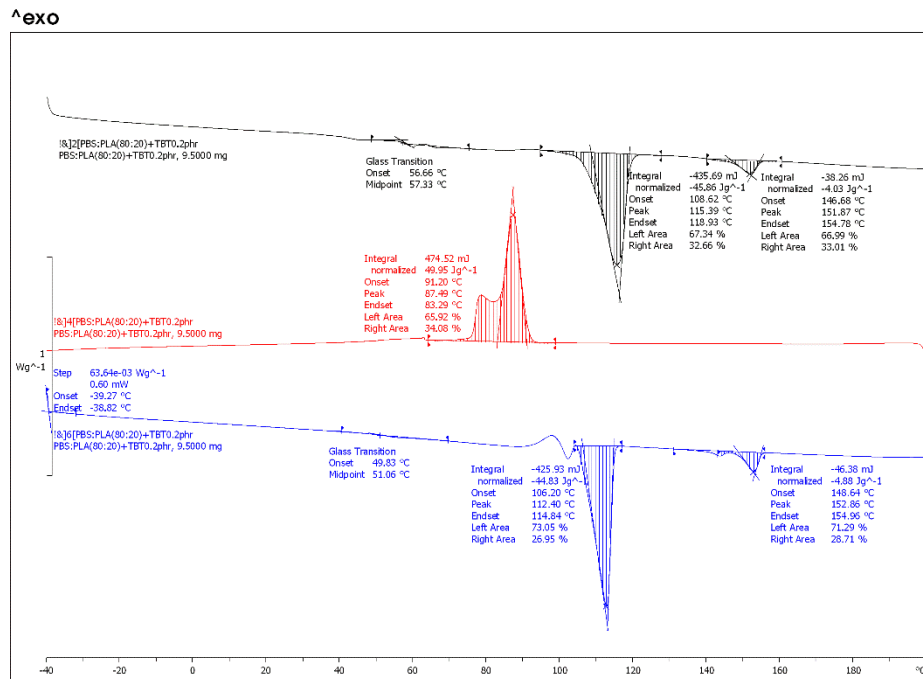
ภาพผนวก ก.26 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.025



ภาพผนวก ก.27 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.050



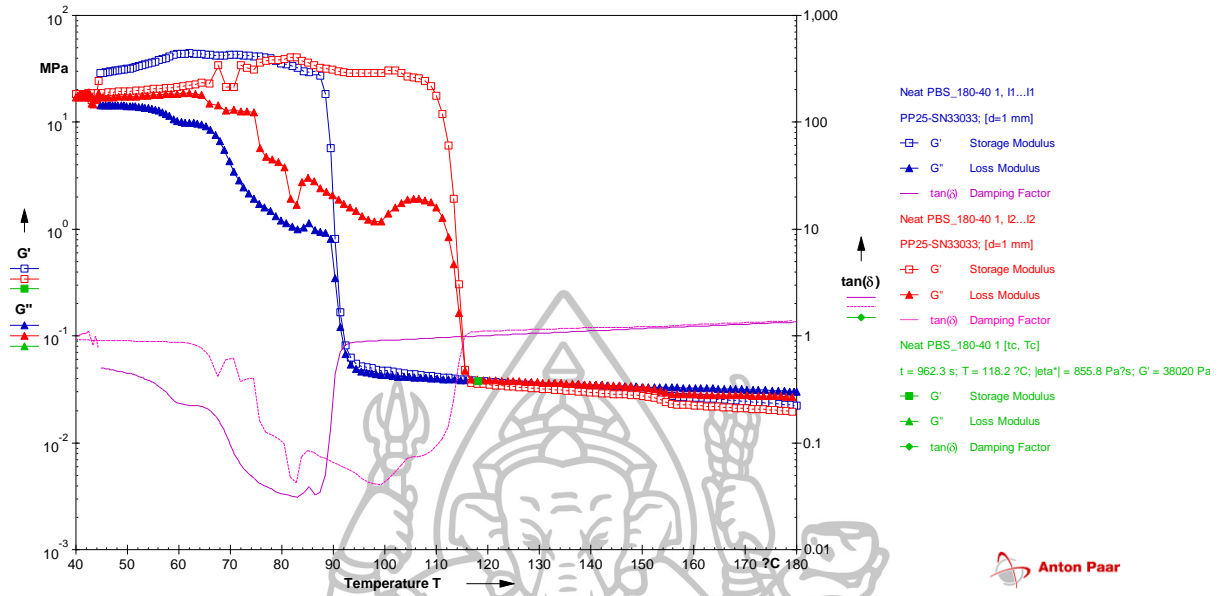
ภาพผนวก ก.28 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.075



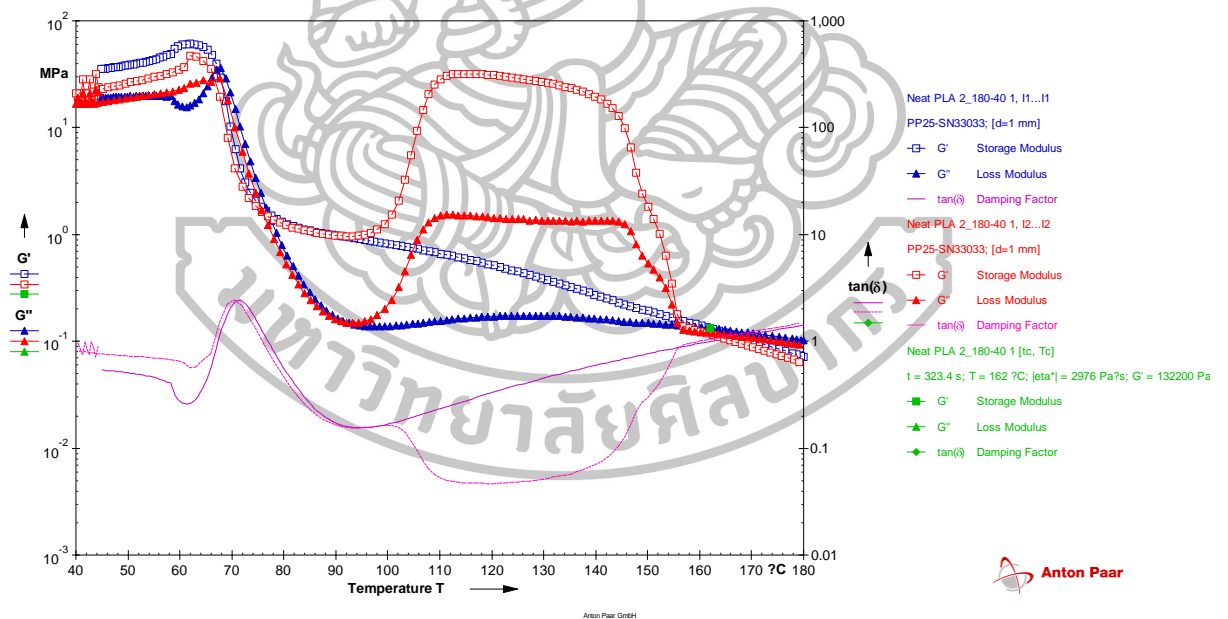
ภาพผนวก ก.29 DSC thermogram ของ PBS:PLA(80:20) T0.100



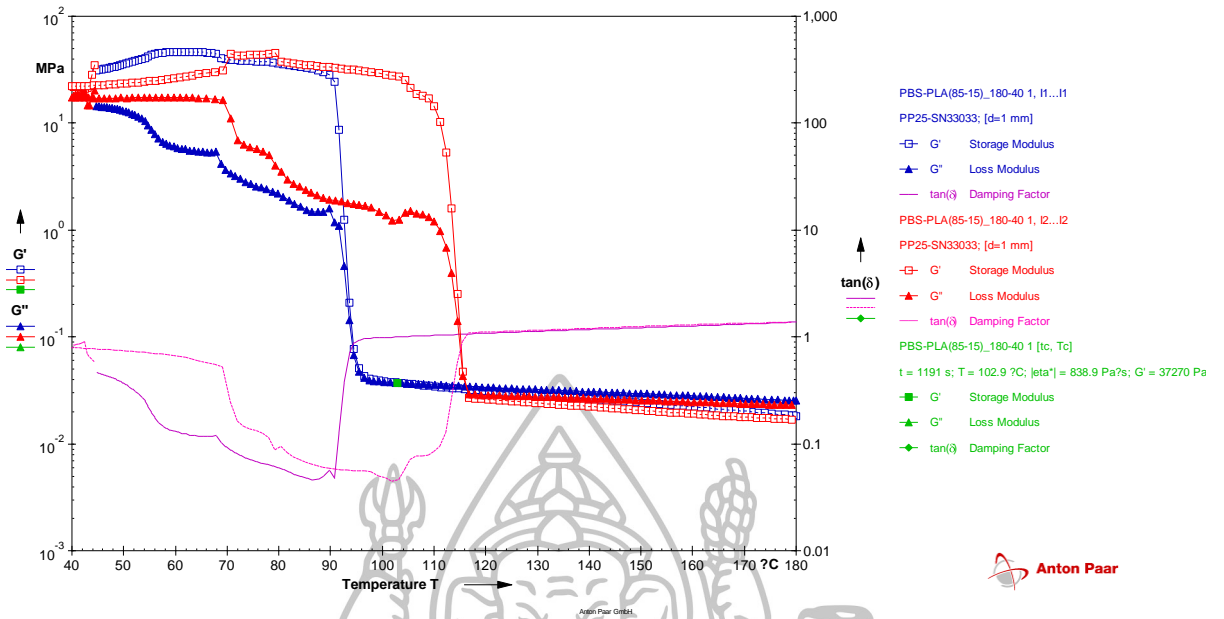
ก-6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค DMA



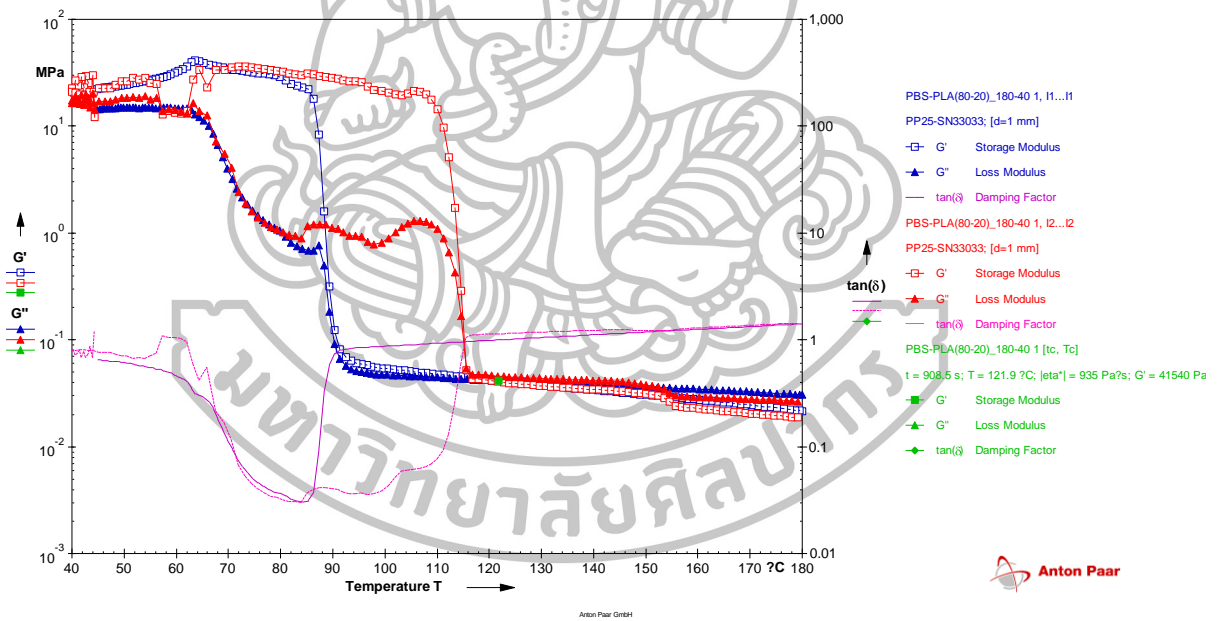
ภาพผนวก ก.30 DMA thermogram ของ Neat PBS



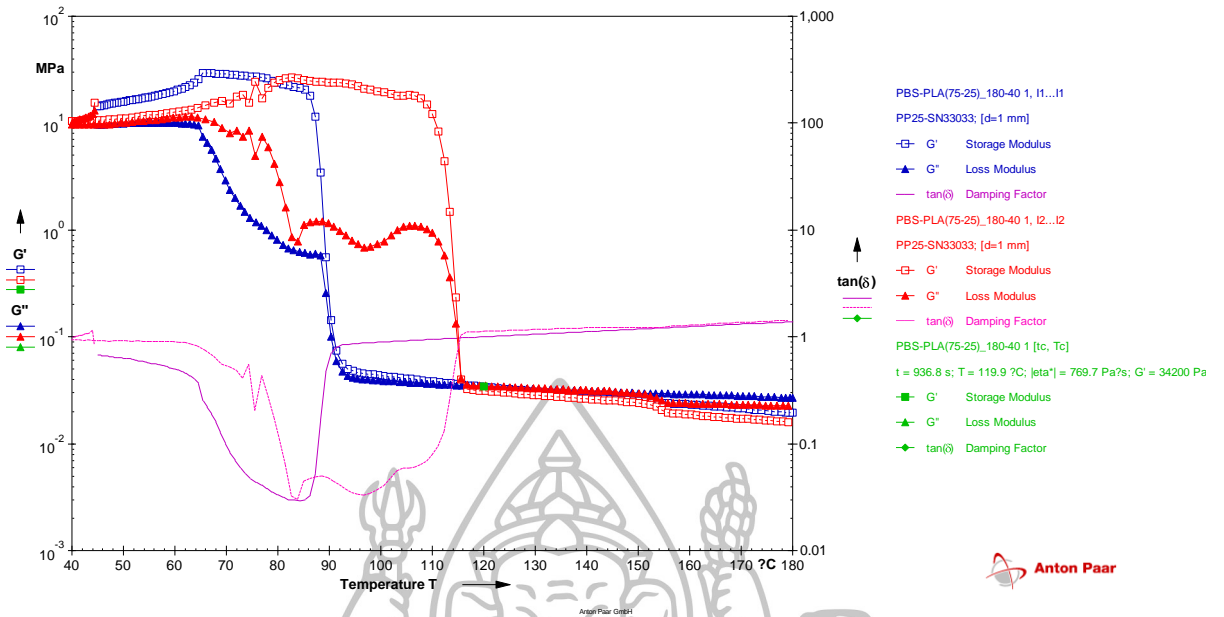
ภาพผนวก ก.31 DMA thermogram ของ Neat PLA



ภาพผนวก ก.32 DMA thermogram ของ PBS:PLA(85:15)



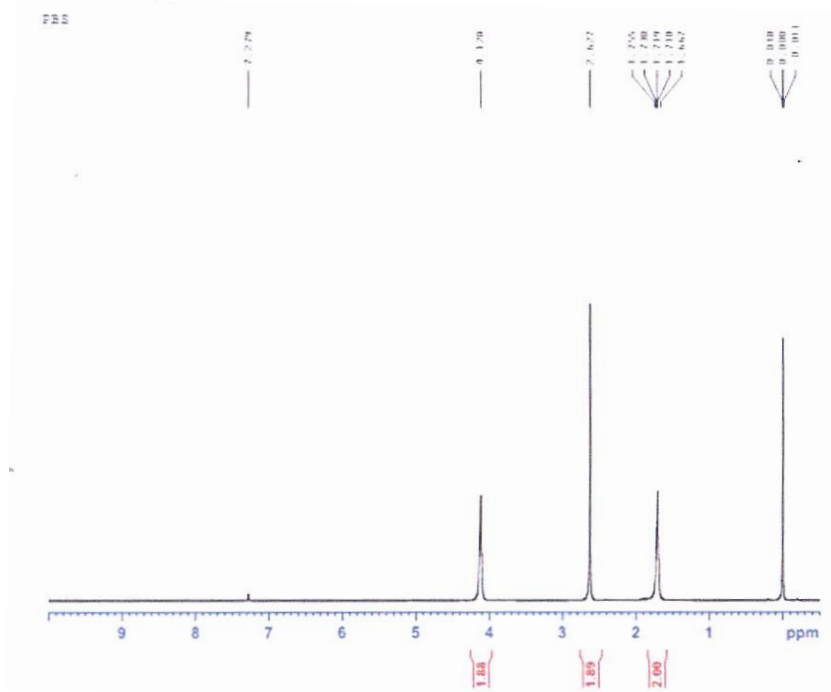
ภาพผนวก ก.33 DMA thermogram ของ PBS:PLA(80:20)



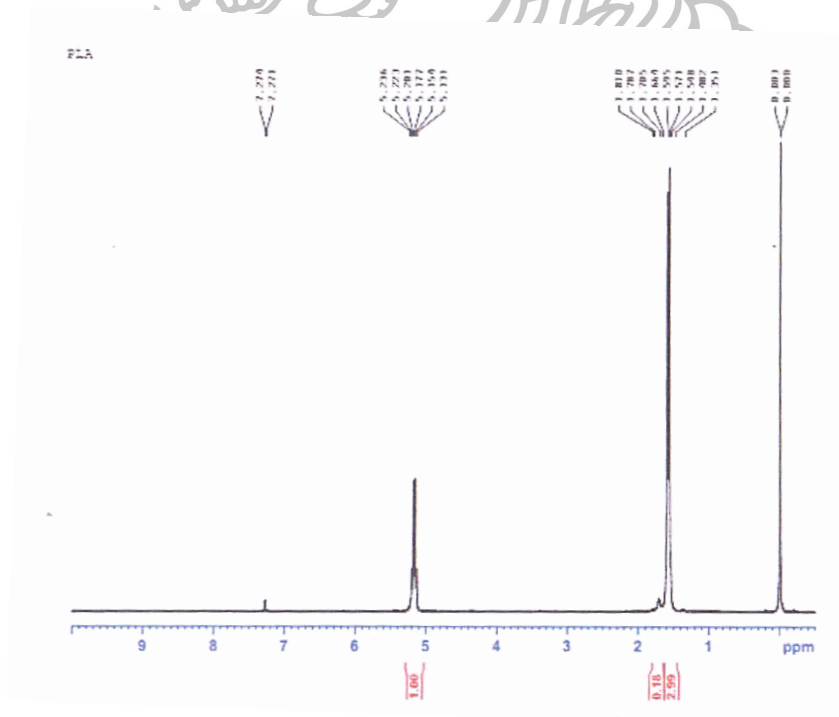
ภาพผนวก ก.34 DMA thermogram ของ PBS:PLA(75:25)



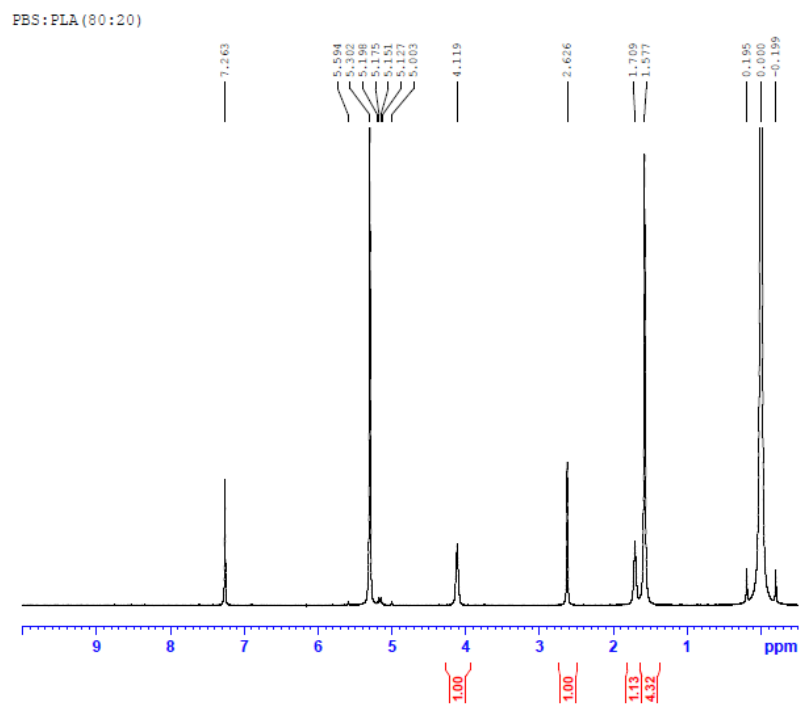
ก-7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค NMR



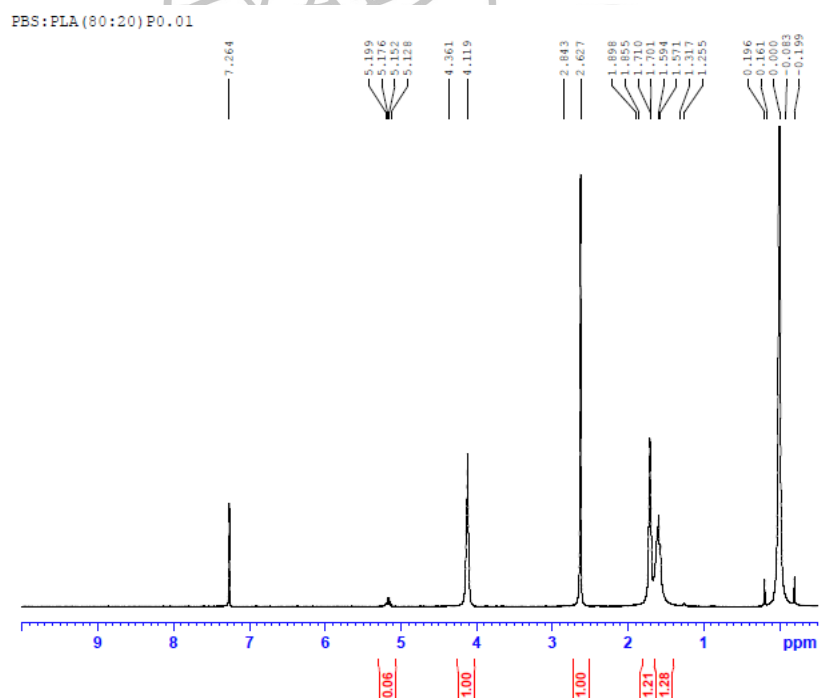
ภาพผนวก ก.35 ผลการวิเคราะห์ ¹H-NMR ของ PBS [30]



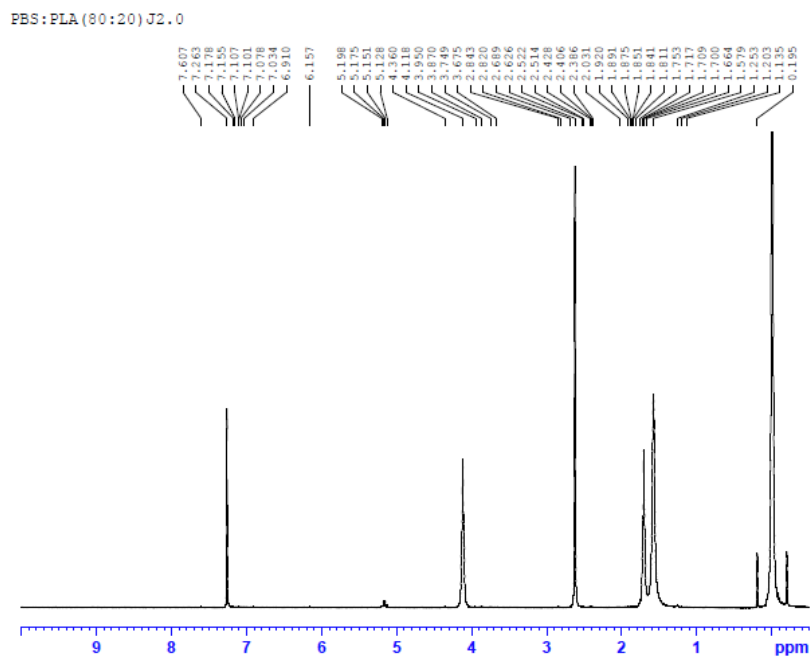
ภาพผนวก ก.36 ผลการวิเคราะห์ ¹H-NMR ของ PLA [30]



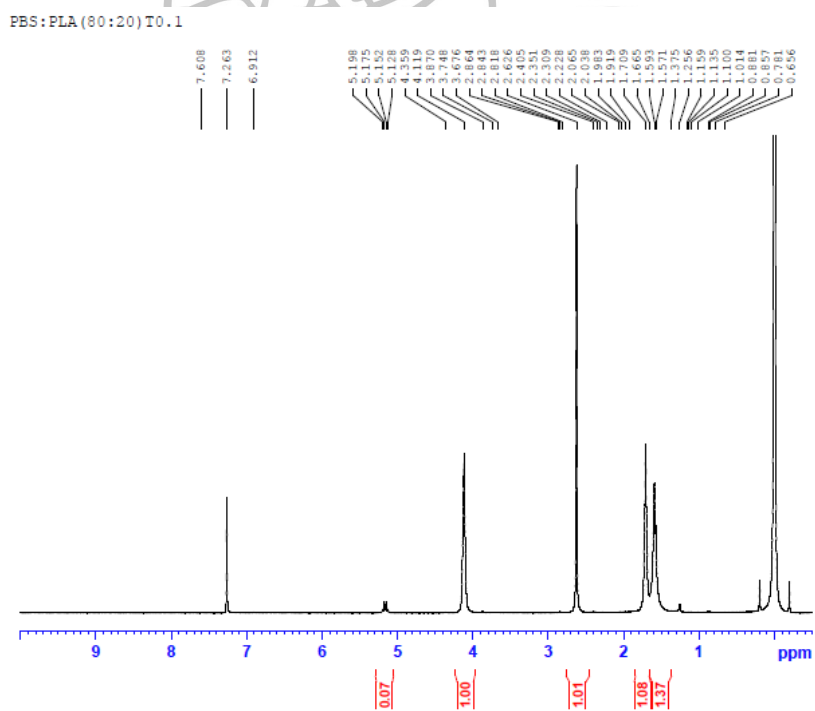
ภาพผนวก ก.37 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20)



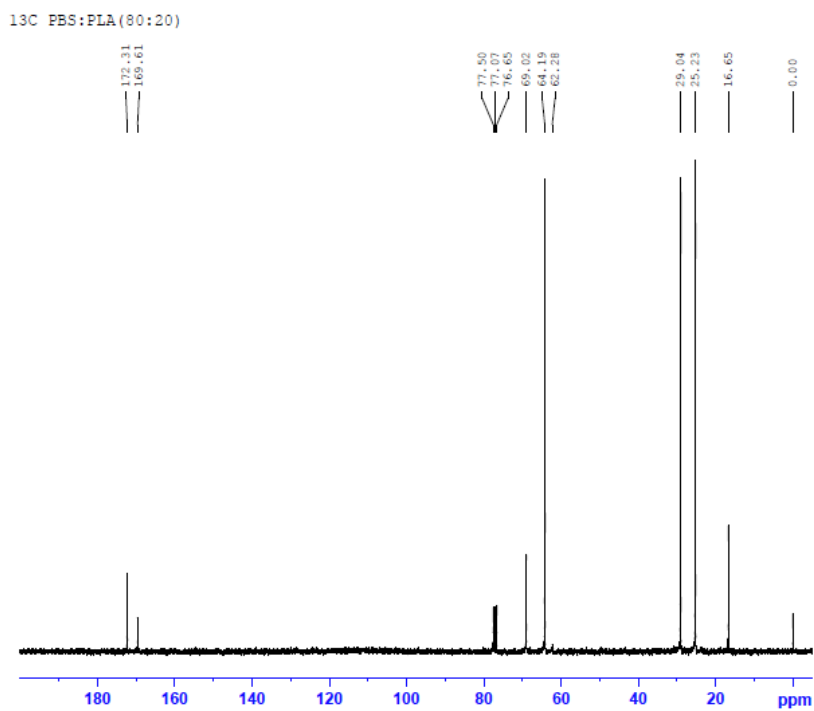
ภาพผนวก ก.38 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) P0.01



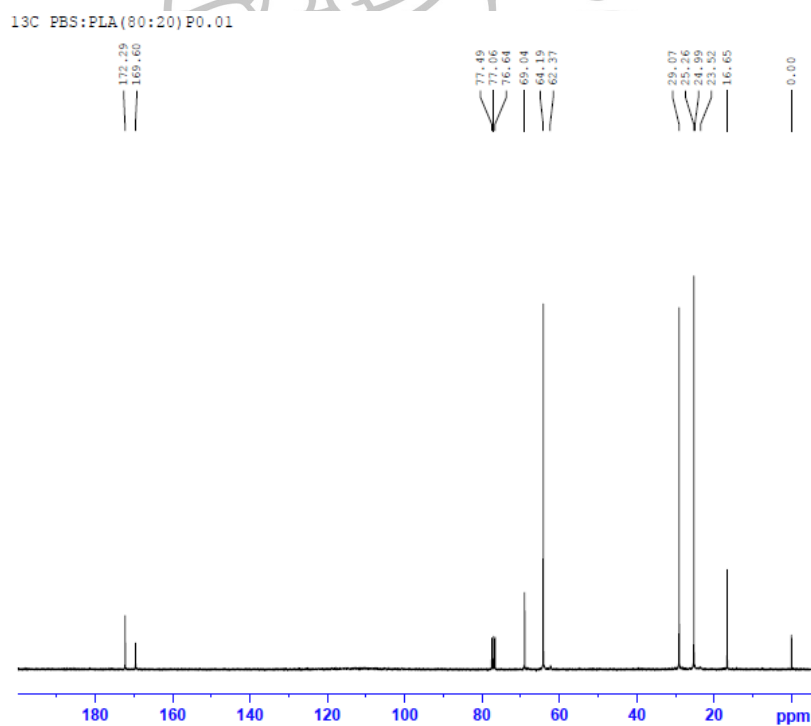
ภาพผนวก ก.39 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) J2.0



ภาพผนวก ก.40 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ ของ PBS:PLA(80:20) T0.1

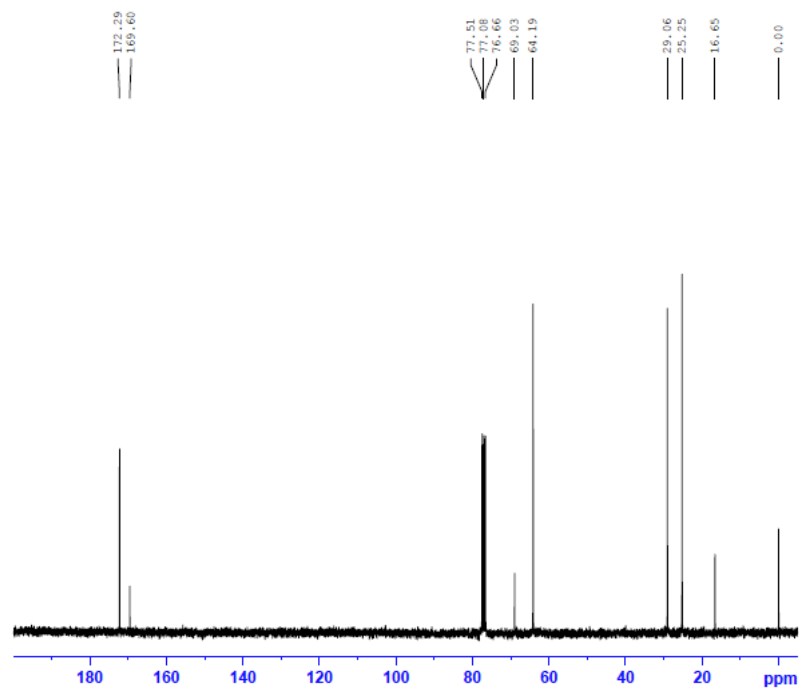


ภาพผนวก ก.41 ผลการวิเคราะห์ ¹³C-NMR ของ PBS:PLA(80:20)



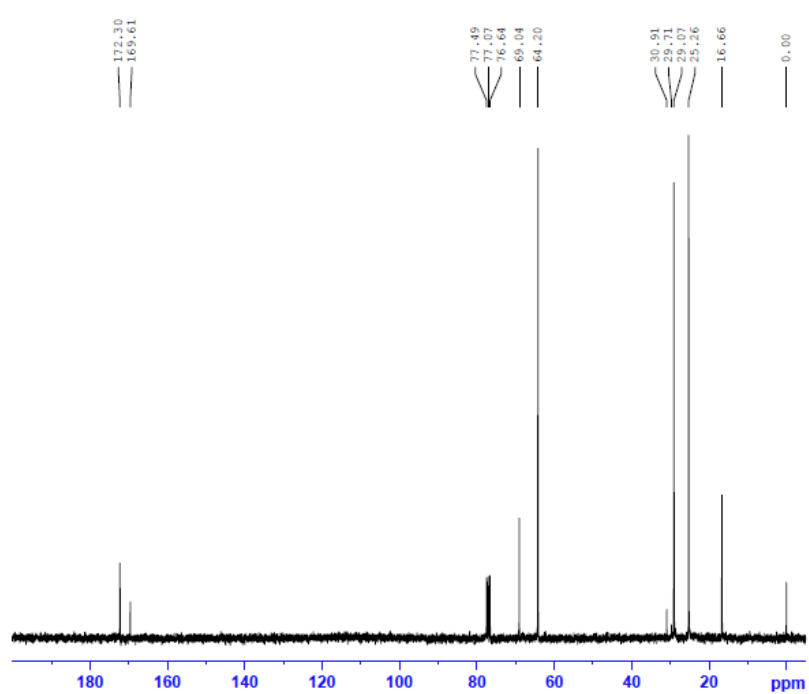
ภาพผนวก ก.42 ผลการวิเคราะห์ ¹³C-NMR ของ PBS:PLA(80:20) P0.01

¹³C PBS:PLA(80:20)J2.0



ภาพผนวก ก.43 ผลการวิเคราะห์ ¹³C-NMR ของ PBS:PLA(80:20) J2.0

¹³C PBS:PLA(80:20)T0.1



ภาพผนวก ก.44 ผลการวิเคราะห์ ¹³C-NMR ของ PBS:PLA(80:20) T0.1



ข-1 การคำนวณหาปริมาณผลึก

$$\% X_c = \frac{(\Delta H_m - \Delta H_c)}{\Delta H_f} \times \frac{100}{w}$$

เมื่อ ΔH_m คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก (J/g) หาได้จากพื้นที่ใต้พีคที่แสดงการดูดพลังงาน

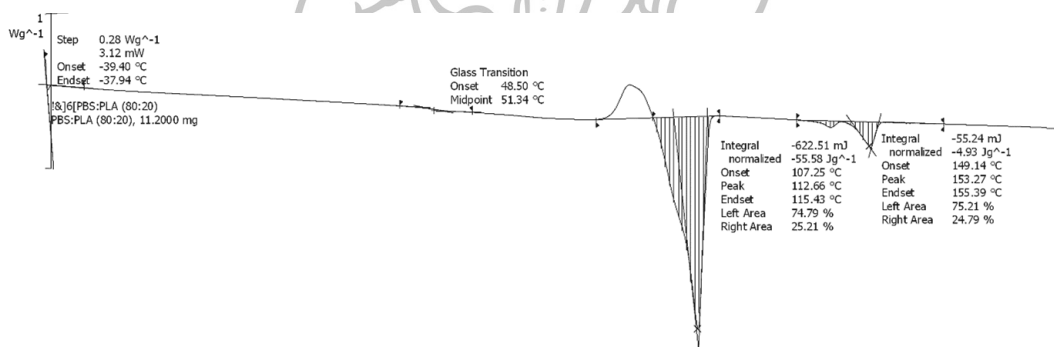
ΔH_c คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการตกผลึก (J/g) หาได้จากพื้นที่ใต้พีคที่แสดงการคายพลังงาน

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก (J/g) ของพอลิเมอร์ที่มีผลึก 100% ($\Delta H_f, \text{PBS} = 110.3 \text{ J/g}$, $\Delta H_f, \text{PLA} = 93.7 \text{ J/g}$)

w คือ สัดส่วนของพอลิเมอร์องค์ประกอบที่สนใจในพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่างการคำนวณ

คำนวณหาปริมาณผลึกของ PBS และ PLA ใน PBS/PLA(80:20) ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2



ภาพผนวก ข.1 DSC thermogram ของ PBS/PLA(80:20) ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

- ปริมาณผลึกของ PBS ($\Delta H_m = 55.58 \text{ J/g}$, $\Delta H_f, \text{PBS} = 110.3 \text{ J/g}$, $w = 0.8$)

$$\% X_c = \frac{(55.58 - 0)}{110.3} \times \frac{100}{0.8} = 63.0\%$$

- ปริมาณผลึกของ PLA ($\Delta H_m = 4.93 \text{ J/g}$, $\Delta H_f, \text{PLA} = 93.7 \text{ J/g}$, $w = 0.2$)

$$\% X_c = \frac{(4.93 - 0)}{93.7} \times \frac{100}{0.2} = 26.3\%$$

ข-2 การคำนวณหาปริมาณเจลที่เหลือจากการสกัดพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสออก

$$\% \text{ Gel content} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของตะแกรง (กรัม)

W_3 คือ น้ำหนักของชิ้นงานและตะแกรงหลังทดสอบ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

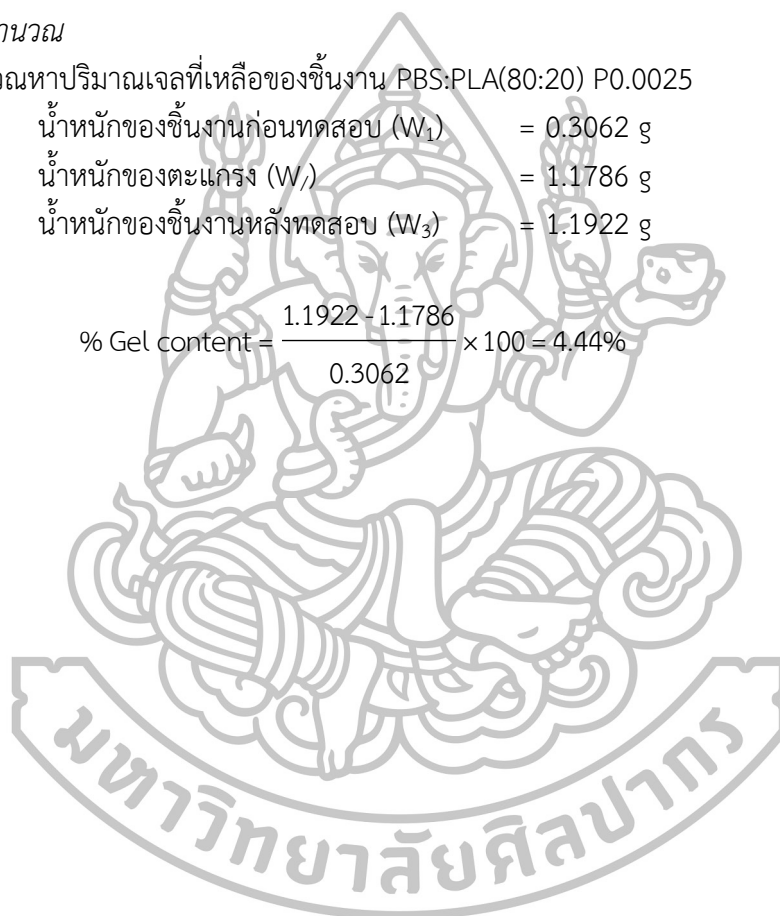
คำนวณหาปริมาณเจลที่เหลือของชิ้นงาน PBS:PLA(80:20) P0.0025

น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ (W_1) = 0.3062 g

น้ำหนักของตะแกรง (W_2) = 1.1786 g

น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ (W_3) = 1.1922 g

$$\% \text{ Gel content} = \frac{1.1922 - 1.1786}{0.3062} \times 100 = 4.44\%$$





ภาคผนวก ค
การเผยแพร่งานวิจัย

Effect of peroxide and chain extender on mechanical properties and morphology of poly (butylene succinate)/poly (lactic acid) blends

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: 101.108.166.186

This content was downloaded on 23/07/2015 at 08:14

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

Effect of peroxide and chain extender on mechanical properties and morphology of poly (butylene succinate)/poly (lactic acid) blends

W Cherykhunthod¹, M Seadan² and S Suttiruengwong^{1,3}

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, NakhonPathom, 73000, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

E-mail: suttiruengwong_s@su.ac.th

Abstract. Poly (butylene succinate) (PBS) and poly (lactic acid) (PLA) are biodegradable polymers with high potential to replace commodity fossil-based polymers in a wide range of applications. However, these two polymers are immiscible in most ratios, but partially miscible when one of the two is a major phase. In this study, a one-step process in a twin-screw extruder was used to prepare the blends between poly (butylene succinate) (PBS) as a matrix and poly (lactic acid) (PLA) as a dispersed phase. To improve mechanical properties and morphology of blends, two reactive agents, peroxide (Perkadox) and multifunctional epoxide chain extender (Joncryl) were selected and compared. All samples were characterized for melt flow index (MFI), morphology, tensile, and impact properties. The results showed that the mechanical properties and morphology of PBS/PLA blends were improved when using both reactive agents. It was demonstrated that the increased mechanical properties resulted from good interfacial adhesion between PBS and finely dispersed PLA particles. The addition of 0.075 phr Perkadox to PBS/PLA (75:25 and 80:20) blends increased elongation at break by 7.2% and 38.4%, respectively compared with the blends without reactive agents. The results from gel content also revealed the graft copolymer existed at the interface when reactive agents were added. In the case of using multifunctional epoxide chain extender, the impact strength of the blends increased.

1. Introduction

In recent years, environmental pollution and the great depletion of non-renewable fossil resource have been increasingly concerned. The accumulation of non-biodegradable plastic wastes disposed daily leads to land and air pollution. One possible solution to this problem is to replace the commodity non-biodegradable fossil-based polymers with the renewable polymers or biodegradable polymers, which are readily susceptible to microbial action. Such biodegradable polymers are produced and processed to a wide spectrum of products, offering an alternative to fossil-based plastics [1-3]. Among biodegradable polymers, poly (butylene succinate) (PBS) is a popular choice due to its good

³ Address for correspondence: S Suttiruengwong, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, NakhonPathom, 73000, Thailand. E-mail: suttiruengwong_s@su.ac.th.



mechanical strength and wide availability in an industrial scale. It is a renewable and fully-degradable plastic. It has high flexibility, impact strength, and thermal and chemical resistance but has low melt strength and is still expensive. Blending PBS with other biodegradable polyester can allow the fine-tuning of process ability of raw materials and properties of products. For most of the commercially biodegradable polymers, PLA is an interesting blend pair for PBS. PLA possesses high mechanical properties and is inexpensive. Moreover, PLA has recently been applied in various end-use applications [4-7].

A blend between PBS and PLA is partially miscible with the blend ratio of PBS/PLA up to 80/20 wt% [1]. PLA can offer strength and stability of PBS. However, the elongation at break of the blends decreases with the increasing PLA content [1, 6]. Mechanical properties of PBS/PLA blends strongly rely on the interfacial adhesion. Therefore, effective compatibilizers must be located at the interface for giving a low interfacial tension and a fine morphology of dispersed phase in the blend.

In order to achieve good compatibility of aliphatic polyesters, many methods such as non-reactive and reactive blending, copolymer synthesis and the addition of additives [8] were proposed. The superior compatibility of biodegradable polymer could be produced by adding reactive agents or grafting chemicals onto polymer backbone [9]. Many authors have reported the use of reactive agents in PBS/PLA blends such as dicumyl peroxide(DCP)[2],2,5-dimethyl-2,5-din (tertbutylperoxy) hexane [10], isocyanate [11], Ti(OiPr)₄ [12], Ti(OBu)₄ [12], and multifunctional epoxide [13]. The main advantages of reactive blending process include one-step process, cost-effectiveness and easy-to-handle features. The reactive can be selected relevant to polymers and processing parameters. Therefore, the aim of this work was to study the effect of two reactive agents on the mechanical properties and morphology of PBS/PLA (75:25 and 80:20). Two types of reactive agents, namely, peroxide (Perkadox 14-40B-PD) and multifunctional epoxide chain extender (Joncryl™ ADR-4368) with varying contents, were selected for comparison. Mechanical properties and morphology of PBS/PLA (75:25 and 80:20) were investigated and discussed. Gel content was determined to confirm the possible reactions.

2. Experimental

2.1. Materials

PBS (GS Pla FZ91PD) with MFI of 11 g/10 min (190°C, 2.16 kg) was purchased from the Mitsubishi Chemical Corporation (Japan). PLA (4043D) with a MFI of 2 g/10 min (190°C, 2.16 kg) was purchased from Nature Works LLC (USA). Di (tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox 14-40B-PD), was purchased from Akzo Nobel (Netherlands).The peroxide initiator was absorbed on silica and calcium carbonate powder having reactive content of about 40%. The chain extender (Joncryl™ ADR-4368) was purchased from BASF The Chemical Co. (Thailand).The chain extender in solid flake had high epoxy functionality.

2.2. Preparation of PBS/PLA blends

PBS and PLA pellets were first dried at 60°C for 5 hours before further use. The ratios of PBS and PLA were 75:25 and 80:20 by weight. PBS, PLA and reactive agents were weighted and premixed prior to transferring to a twin-screw extruder (SHJ-25, China). The extrusion temperature was controlled with temperature profile being 100/130/140/150/160/170/180/195°C from feed zone to die exit. The screw speed was set at 100 rpm. The extruder was cooled in the water bath, then granulated and dried at 60°C for 12 hours. Two reactive agents systems, free radical reaction (Perkadox) and condensation reaction (Joncryl), were used for comparison. Reactive agents at various loading per 100 g of PBS/PLA blends were 0.0025, 0.0050, and 0.0075 phr for Perkadox system and 0.5, 1.0, and 1.5 phr for Joncryl system, respectively. PBS/PLA blend with Perkadox was referred to as Px and Joncryl as Jx, where x was the amount of reactive agents per 100g of blends. For instance, P0.0025 refers to a blend with 0.0025 phr of perkadox. A non-reactive PBS/PLA blend was prepared by using the identical procedure for comparison and denoted as PBS/PLA.

2.3. Characterization

2.2.1. Melt flow index. Melt flow index (MFI) of all samples was performed on a melt flow indexer (Intro D7053, KAYENESS) operating at 190°C with 2.16 kg load according to ASTM D1238.

2.2.2. Morphology. Scanning electron microscope (SEM) (Camscan MX-2000) was used to characterize the phase morphology and compatibility of PBS/PLA blends. The fracture surface was coated with spluttered gold and an accelerating voltage of 15 kV was used to produce the SEM photographs.

2.2.3. Mechanical properties. Notched Izod impact strength was tested according to ASTM D256 (ZwickB5102.202, Izod type). Tensile properties were measured using Universal Testing Machine (Instron 5969, Instron) according to ASTM D638, specimen type I. The specimens were tested at a cross-head speed of 50 mm/min.

2.2.4. Gel content analysis. To investigate the change in physical properties due to possible reactions, gel content test was measured using 1 g of PBS/PLA blends (with various reactive agents), which was thoroughly shaken with 20 ml dichloromethane and then left to rest at room temperature for 18 hours. PBS and PLA were removed from extraction residues. The residues were filtered through a 120-mesh sieve. Finally, the obtained residues were dried in an oven before calculating gel contents in each sample and performing FTIR analysis. The gel content (%) was calculated via equation (1).

$$\% \text{gel content} = \frac{W_1 - W_2}{W_3} \times 100 \quad (1)$$

Where W_1 denoted the weight of the sample and the cage after extraction and drying, W_2 was the weight of cage, and W_3 : referred to weight of original sample.

3. Results and discussion

3.1. Melt flow index

From figure 1, MFI value of PBS/PLA (80:20) blend was similar to that of PBS/PLA (75:25) blend. MFI value of PBS/PLA (75:25) blends was 6.92 g/10min whereas PBS/PLA blends with reactive agents (P0.0025, P0.0050, P0.0075, J0.5, J1.0, and J1.5) expressed lower MFI values. Interestingly, MFI value was significantly decreased in the case of the blend with Perkadox (P) 0.0075 phr consisting of higher PLA content (grey bar, PBS/PLA(75:25)) (from 6.92 to 1.42 g/10 min), while the addition of Joncryl (J) 1.5 phr in the same composition of PBS/PLA(75:25) decreased the MFI value to 1.65 g/10 min. This indicated that some reactions in the blend with Perkadox and Joncryl were likely to occur.

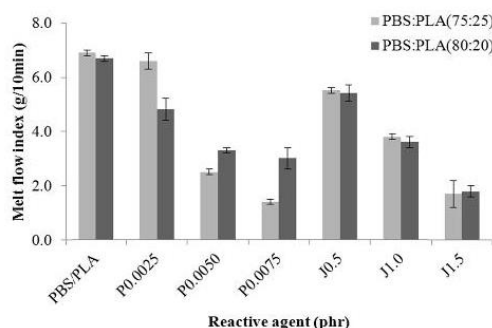


Figure 1. MFI of PBS/PLA blends at various contents of reactive agents.

3.2. Morphology

SEM micrographs of PBS/PLA (75:25) blend were shown in figure 2. The dispersion of PLA particles within the PBS matrix was less than 1 μm . The voids between PBS matrix and dispersed PLA particles could be observed in figure 2(a), indicating the poor interface between two polymers. In the case of PBS/PLA (75:25) blend at low contents of Perkadox between 0.0025-0.0075 phr (figures 2(b), 2(c) and 2(d), respectively), PLA particles were finely and uniformly dispersed in PBS matrix and showed a better interfacial adhesion than the blend without Perkadox. Considering the addition of Joncryl between 0.5-1.5 phr (figures 2(e)-2(g) for PBS/PLA (75:25) blend, PLA particles were dispersed in PBS matrix with fine particle sizes. Compared with the systems consisting of Perkadox with Joncryl, Perkadox system demonstrated a better interfacial adhesion, whereas Joncryl system only provided a fine dispersion phase. Similar results were also observed for SEM micrographs of PBS/PLA (80:20) blend at various contents of reactive agents in figure 3. Therefore, the addition of two reactive agents, namely, Perkadox and Joncryl, to PBS/PLA blends is likely to improve the morphology compared with non-reactive PBS/PLA blend.

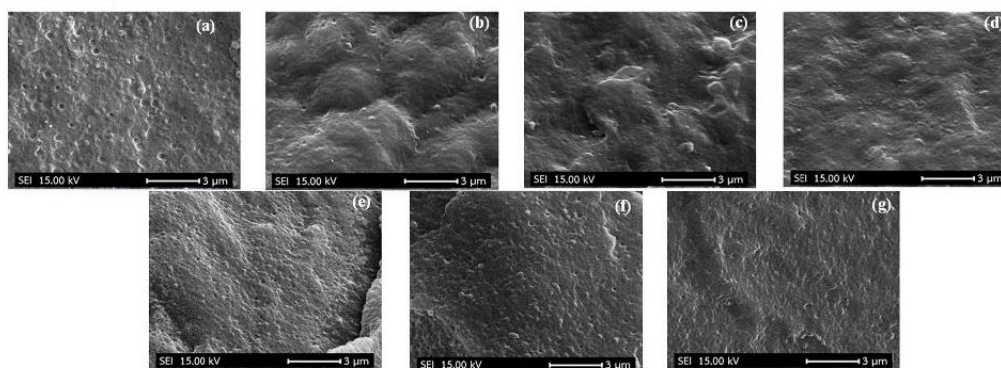


Figure 2. SEM micrographs of the fracture surface of PBS/PLA(75:25) blends at various contents of reactive agents(a) non-reactive agent, (b) Perkadox 0.0025 phr, (c) Perkadox 0.0075 phr, (d) Perkadox 0.0100 phr, (e) Joncryl 0.5 phr, (f) Joncryl 1.0 phr, and (g) Joncryl 1.5 phr.

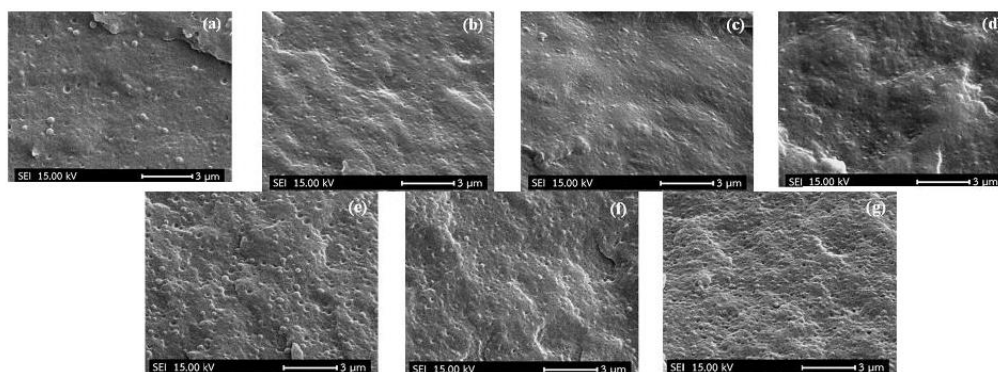


Figure 3. SEM micrographs of the fracture surface of PBS/PLA(80:20) blends at various contents of reactive agents(a) non-reactive agent, (b) Perkadox 0.0025 phr, (c) Perkadox 0.0075 phr, (d) Perkadox 0.0100 phr, (e) Joncryl 0.5 phr, (f) Joncryl 1.0 phr, and (g) Joncryl 1.5 phr.

3.3. Mechanical properties

According to two selected reactive systems, the effect of reactive agents on the mechanical properties of PBS/PLA blends was investigated. The impact strength was shown in figure 4. From figure 4, the

impact strengths of PBS/PLA 75:25 and 80:20 blends were 5.98 and 6.97 kJ/m² respectively. The impact strength increased with the increasing Perkadox and Joncryl contents. The reactive agents systems, having Perkadox content between 0.0025 and 0.0075 phr, and having Joncryl content between 0.5 and 1.5 phr, clearly improved the impact strengths of PBS/PLA blends. This could be due to the free radical reaction of peroxide (Perkadox) with PBS/PLA to form the long branched structures or lightly crosslinked structures, whereas multifunctional epoxides of Joncryl could react with PBS/PLA providing the long linear of reconnected PBS/PLA chain. Therefore, they exhibited the difference in the improvement of impact strength compared with non-reactive agents.

The modulus, tensile strength, and elongation at break were characterized as shown in figures 5-7. Modulus, tensile strength, and elongation at break increased with the increasing Perkadox contents. From figure 5, modulus of PBS/PLA 75:25 and 80:20 blends were 653 and 636 MPa, respectively. A Perkadox system improved the modulus, tensile strength, and elongation at break of PBS/PLA blends, whereas for the Joncryl system, modulus remained almost unchanged with the increasing Joncryl contents while tensile strength and elongation at break decreased. In the case of the addition of Joncryl, the modulus, tensile strength, and elongation at break of PBS/PLA blends were unaffected.

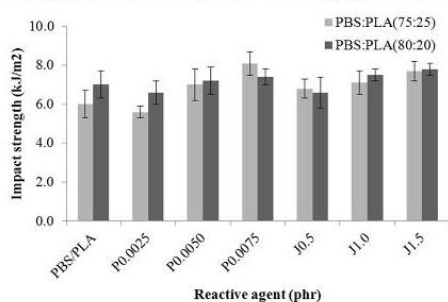


Figure 4. Impact strengths of PBS/PLA blends at various contents of reactive agents.

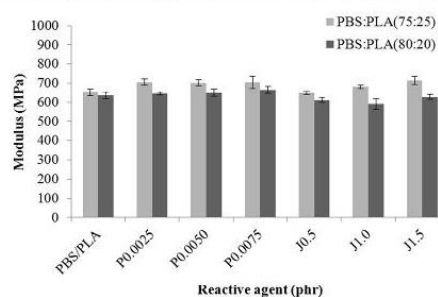


Figure 5. Modulus of PBS/PLA blends at various contents of reactive agents.

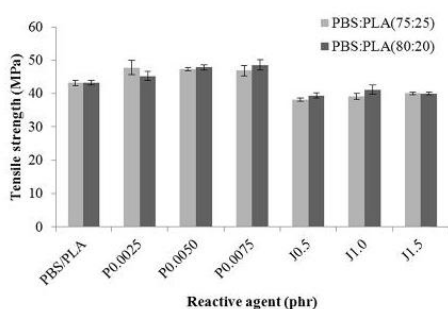


Figure 6. Tensile strength of PBS/PLA blends at various contents of reactive agents.

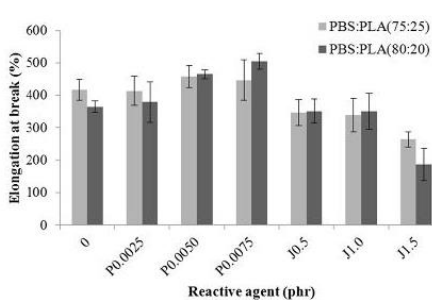


Figure 7. Elongation at break of PBS/PLA blends at various contents of reactive agents.

3.4. Gel content tests

It was evident that with the addition of Perkadox or Joncryl, the melt viscosity changed significantly. This implied possible reactions such as crosslink or branching. Gel content analysis was then performed to prove the physical changes of PBS/PLA blends with reactive agents. Any changes in chemical structures can result in the poor dissolution in the good solvent. Figure 8 represented the gel contents of PBS/PLA blends at various contents of reactive agents. Crosslinked polymers would give more gel contents in polymer blends, which were obtained after removing PBS and PLA by dichloromethane. The gel was not dissolved in dichloromethane. All of the blends showed low gel content (less than 10%), but it increased with the added amount of reactive agents. A small gel fraction

could arise from possible crosslinked phase, branching structures and some graft copolymers in the blends.

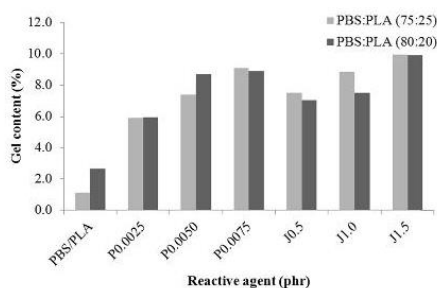


Figure 8. Gel contents of PBS/PLA blends at various contents of reactive agents.

The gel fractions of PBS/PLA blend from the extraction method were characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and compared with the PBS and PLA as shown in figures 9 and 10. The FTIR spectrum of PBS showed the characteristic at peak 1739cm^{-1} and 1170cm^{-1} corresponding to carbonyl (C=O) groups and C-O stretching, respectively. The FTIR characteristic peaks of PLA were about 3157cm^{-1} and 1406cm^{-1} assigning to -OH stretch, and C-O, respectively. The FTIR spectra of the gel fractions from the reactive blends showed both characteristics of PBS and PLA. It indicated that the gel fraction contained a small portion of possible PBS-g-PLA (graft copolymer). This graft copolymer might be located at the interface of PBS and PLA, which led to the better interfacial adhesion between two polymers when reactive agents were added. Consequently, mechanical properties were improved.

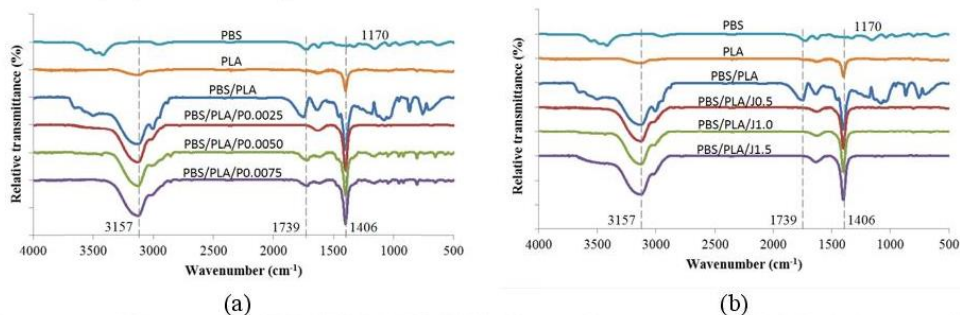


Figure 9. FTIR spectra of PBS/PLA (75/25) blend at various contents of (a) Perkadox and (b) Joncryl.

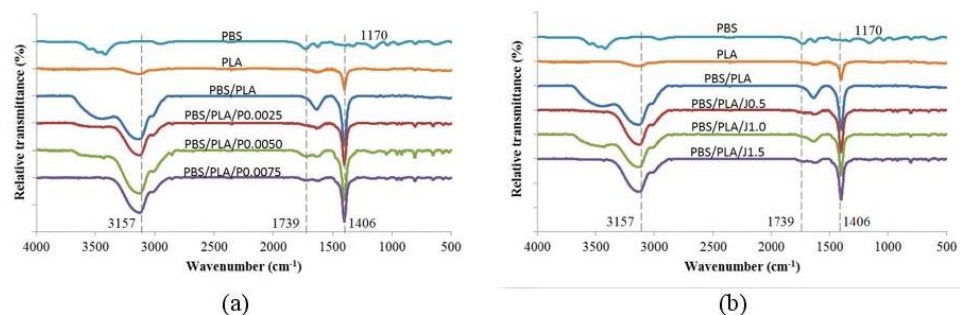


Figure 10. FTIR spectra of PBS/PLA (80/20) blend at various contents of (a) Perkadox and (b) Joncryl.

4. Conclusion

The addition of two reactive agents, Perkadox and Joncryl, into PBS/PLA blends improves the mechanical properties and morphology. The peroxide is likely to react with PBS/PLA via free radical reaction to form the long branched structures or lightly crosslinked structures whereas multifunctional epoxides (Joncryl) is prone to react with PBS/PLA to form the long linear of reconnected PBS/PLA chain. Therefore, they exhibit the differences in the improvement of impact strength and morphology compared with non-reactive agents. The results from gel content test and FTIR spectra reveal the formation of graft-copolymer at the interface of PBS and PLA when reactive agents are added. The slightly crosslinked polymers could be formed as suggested by low gel content. In addition, the addition of both reactive agents in PBS/PLA blends also improves the impact strength and morphology. Therefore, the reactive agents have the great potential to be used in PBS/PLA blends.

Acknowledgments

The authors would like to gratefully thank National Research Council Thailand (NRCT) and Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, and Silpakom University, Thailand for financial supports.

References

- [1] Bhatia A, Gupta R K, Bhattacharya S N and Choi H J 2007 *Korea-Aust. Rheol. J* **19** 125-31
- [2] Wang R, Wang S, Zhang Y, Wan C and Ma P 2009 *Polym. Eng. Sci.* 26-33
- [3] Sotho K 2013 *Properties of Poly (Butylene Succinate) Base Blends via Reactive Extrusion* (Silpakom University: Faculty of Engineering and Industrial Technology)
- [4] Corporation M C GS Pla properties sheet. Available at: <https://www.pttpm-techinfo.com/DownloadProduct.aspx>, 2013
- [5] LLC N 2010 Material Safety Data Sheet: 4043D. Available at: www.natureworkslc.com/media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4032D_films_pdf, 2015
- [6] Yokohara T and Yamaguchi M 2008 *Eur. Polym. J.* **44** 677-85
- [7] Wilcox-Barsalou M 2010 Two concepts of Bioplastics–Degradability and Renewability. Available at: plasticsandtheplanet.com/archives/343, October 18, 2010
- [8] Bicerano J 2010 A Practical Guide to Polymeric Compatibilizers for Polymer blends. Available at: www.plas2006.com/uploadfile/20063112235119.doc, 2010
- [9] Ma P, Hristova-Bogaerds G D, Lemstra P J, Zhang Y and Wang S 2012 *Macromol. Mater. Eng.* **297** 402-10
- [10] Coltelli M-B, Bronco S and Chinea C 2010 *Polym. Degrad. Stabil.* **95** 332-4
- [11] Yang S-L, Wu Z-H, Yang W and Yang M-B 2008 *Polym. Test.* **27** 957-63
- [12] Moura I, Nogueira R, Boumor-Legare V and Machado A V 2012 *Mater. Chem. Phys.* **134** 103-10
- [13] Al-Ittry R, Lammawar K and Maazouz A 2002 *Polym. Degrad. Stabil.* **97** 1898-914



ภาคผนวก ง
การพัฒนาตนเอง

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำภาคการศึกษา.....ต้น.....ปีการศึกษา.....๒๕๖๕.....

ชื่อ นามสกุล (นาย/นร/นางสาว) น.ส.กษัตริย์ นพรัตน์ รหัสประจำตัวนักศึกษา 54402203
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโท/ปริญญาเอก ชั้นปีที่..... 1 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการ มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ ๒๕๖๕ (Thailand Research Expo 2013)	
ระดับ <input checked="" type="checkbox"/> ชาติ <input type="checkbox"/> นานาชาติ	สถานที่ โรงแรมรัตนโกสินทร์ เขต: บางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร
วันที่ 25 สิงหาคม 255๕	หัวข้อการบรรยาย การส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์ของภาคอุตสาหกรรม
โดย นายเชษฐา เต็มเดช , นายอุดม วรศิริวัฒน์ไชย, ศ.นพ. สุทธิพร วิเศษมิตรภน ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้) ได้ทำกิจกรรมระดับต้นสุดที่นครฯ ในรูปแบบ ต่างๆ ทั้งในด้านภาวะการตัดสินใจที่ปรึกษา การวางแผนการผลิต การที่ไม่สามารถผลิตสินค้าที่ใหม่ รวมทั้งการตั้งโรงงาน ในพื้นที่ซึ่งภาคนี้ช่วยการวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์ของภาคอุตสาหกรรม	
วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก นายอุดม วรศิริวัฒน์ไชย หน่วยงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ส่งเสริมการลงทุน ติดต่อ udom@bca.go.th	
ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก 1) ผศ. ดร. สุวิวัฒน์ สินศิริ หน่วยงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ติดต่อ sirsiri@q.sut.ac.th 2) ผ.ดร. วี ธีรวิเศษ หน่วยงาน มหาวิทยาลัยสุโขทัยนครสวรรค์ ติดต่อ wamee.t@psu.ac.th	



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) Office of the National Research Council of Thailand (NRCT)

เครือข่ายในระบบวิจัย และ วช. ร่วมเสนอ “วิจัยเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิต เศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน” ในงาน
“มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ 2556” (Thailand Research Expo 2013)
 วันศุกร์ที่ 23 - อังคารที่ 27 สิงหาคม 2556 ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์

คุณ วรลักษณ์ เฉยขุนทด

โปรแกรมการประชุมที่ท่านลงทะเบียนไว้ มีดังนี้ ↓

วันที่	รอบเช้า (9.00 - 12.00 น.)	รอบบ่าย (13.30 - 16.30 น.)	Twilight Program (18.00 - 20.00 น.)
23 สิงหาคม 2556			
24 สิงหาคม 2556			
25 สิงหาคม 2556	(34) การส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาระบบวิจัยของภาคอุตสาหกรรม		
26 สิงหาคม 2556			
27 สิงหาคม 2556			

ภาคเช้า
ลงทะเบียน / รับเอกสาร 7.30-9.00 น.
ภาคบ่าย
ลงทะเบียน / รับเอกสาร 12.30-13.30 น.
Twilight Program
ลงทะเบียน / รับเอกสาร 17.00-18.00 น.

- การเข้าร่วมประชุม - มาเข้าร่วมงานวันแรก แสดงบัตรเข้าร่วมประชุมที่จุดรับเอกสารส่วนกลาง ชั้น 22 เพื่อรับเอกสารส่วนกลาง
แสดงบัตรฯ ณ ห้องประชุมที่ลงทะเบียนไว้
 - มาเข้าร่วมงานวันถัดไป แสดงบัตรเข้าร่วมประชุม ณ ห้องประชุมที่ลงทะเบียนไว้ทุกครั้งที่เข้าร่วมการประชุม
- ดูห้องประชุมของแต่ละเรื่องได้ที่ **Seminar Board** บริเวณคานางาน หรือที่ www.researchexpo.nrct.go.th ก่อนเดินทางมาเข้าร่วมประชุม
- การเข้าร่วมประชุมและนิทรรศการ **ไม่เสียค่าลงทะเบียนใดๆทั้งสิ้น** โดยท่านจะได้รับเอกสารประกอบการประชุมและอื่นๆ (ถ้ามี) หรืออาหารว่าง ณ จุดลงทะเบียนหน้าห้องประชุม
- ท่านที่นำรถส่วนตัวมา โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ มีบริการจอดรถฟรี จำนวน 3 ชั่วโมง ภายหลังจากที่ส่งตัวมีค่าใช้จ่ายตามเงื่อนไขของโรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์

การได้สิทธิ์และรอสิทธิ์การประชุม

- ท่านที่ได้สิทธิ์ในการเข้าร่วมประชุมในหัวข้อลงทะเบียนไว้ก่อนลงทะเบียน/รับเอกสาร ในเวลาที่กำหนดและช่วงเวลา หากห้องประชุมใดว่างมีผู้สนใจเป็นจำนวนมากแล้วท่านลงทะเบียนล่าช้า (หลังเวลา 9.00 น./13.30 น./18.00 น.) วช. จะใช้สิทธิ์การเข้าร่วมประชุมแก่ ผู้รอสิทธิ์ โดยท่านอาจมีสิทธิ์การเข้าร่วมประชุมเรื่องดังกล่าว
- ท่านที่ลงทะเบียนในหัวข้อเรื่องที่มีผู้สนใจจำนวนมากและรอสิทธิ์ สามารถตรวจเช็คสิทธิ์ในการเข้าร่วมประชุมได้ที่จุดประชาสัมพันธ์ บริเวณจุดลงทะเบียนส่วนกลาง (ในกรณีผู้รอสิทธิ์)

เงื่อนไขการใช้บัตร

- กรุณานำบัตรเข้าร่วมการประชุมที่สำคัญคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ส่งได้แก่ท่านนี้ แสดงที่สำนักงานบุคคลที่เข้าร่วมการประชุม และนิทรรศการ
- การลงทะเบียนเข้าร่วมงานใช้ระบบคอมพิวเตอร์ กรุณาแสดงบัตรที่ได้ลงทะเบียนด้านหน้าห้องประชุม เพื่อสะดวกการได้คนบัตร ระบบคอมพิวเตอร์จะบันทึกข้อมูลการเข้าร่วมประชุมของท่านโดยอัตโนมัติ
- บัตรที่ส่งมาบ้างมีการแสดงสิทธิ์ในการเข้าร่วมการประชุม แต่ระบบคอมพิวเตอร์ยังไม่ได้เวลาประชุมแล้ว
- บัตรนี้เป็นทรัพย์สินของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ขอสงวนสิทธิ์ในการยกเลิก หรือเปลี่ยนแปลง โดยมีข้อแจ้งใช้ทราบล่วงหน้า
- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) จะไม่ออกบัตรให้โดยไม่ทราบโดยผู้ส่ง

บัตรเข้าร่วมงาน



Thailand Research Expo 2013
มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ 2556

คุณ วรลักษณ์ เฉยขุนทด



1199900258654

เครือข่ายในระบบวิจัย และ วช. ร่วมเสนอ “วิจัยเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิต เศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน”

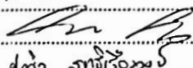
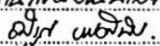
บัตรสำหรับเข้าร่วมการประชุมและเข้าเยี่ยมชมนิทรรศการ

บัตรนี้เป็นทรัพย์สินของ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
 การให้บัตรจะถือผู้ถูกใช้บัตรกำหนดและเงื่อนไขของ วช.

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
 ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
 ประจำปีการศึกษา.....๕.....ปีการศึกษา.....๒๕๕๖.....

ชื่อ-นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว)..... พลิกหนี่ เดยขุนทด..... รหัสประจำตัวนักศึกษา..... 5๖๔๐๒๒๐๓
 กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่.....๕..... สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

<p>รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการ 2๐15 Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2๐15) ระดับ <input type="checkbox"/> ชาติ <input checked="" type="checkbox"/> นานาชาติ สถานที่ Sunworld Hotel, Beijing, China วันที่ 1๖-1๗ พฤษภาคม ๒๕๕๖ หัวข้อการบรรยาย Basic Guidelines for Structuring a Scientific Paper โดย Prof. Esteban Breitman ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้) ในจำนวนสไลด์ที่ส่งมาให้นักศึกษาได้ มากกว่า 3 สไลด์หรือมีเนื้อหาใน 3 เทคนิควิธีการวิจัยที่ได้อ่านหรือมีเนื้อหาเกี่ยวกับงานวิจัยที่ส่งมาจะต่อประเด็นด้วย หัวข้อที่วิจัยที่มีคนหรือสนใจตรงประเด็นกันเนื้อหา, ต่อมีประโยชน์ของเนื้อหา ที่มาของงานวิจัย, งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่งานนั้น, มีประโยชน์ของงานวิจัยอื่น, มีเหตุผลหรือข้อดีของงาน หรือมีประโยชน์ในลักษณะอื่นที่เป็นการทำเนื้อหา ที่อื่นแล้ว มีประโยชน์ต่องานวิจัยที่ส่งมาอีกอย่างไรบ้าง</p>	
<p>วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก Prof. Nuggeshalli M. Ravindra หน่วยงาน Materials Science and Engineering, New Jersey Institute of Technology, U.S.A. ติดต่อ n.m.ravindra@njit.edu</p>	
<p>ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก 1) A. Gautham Shankar หน่วยงาน Mechanical Engineering, School of Mechanical and Building Sciences, VIT University, India ติดต่อ gautham.shankar@yahoo.com 2) Hairul Abral หน่วยงาน Mechanical Engineering, Andalas University, Padang, Indonesia ติดต่อ abral@ft.unand.ac.id</p>	

<p>3) Fuke Hong</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>หน่วยงาน Institute of Materials Research and Engineering, Agency for Science, Technology and Research, ติดต่อ hongf@imre.a-star.edu.sg Singapore</p>	
<p>งานวิจัยที่สนใจ</p> <p>หน้าที่ในหัวข้อ "Investigation and modeling of moisture sorption behaviour of rice starch / carboxy-methyl chitosan blend films" โดย Porndchai Rachtanapun ซึ่งทำการศึกษา biopolymer film จาก rice starch และ carboxymethyl chitosan ที่สัดส่วนผสมต่างๆ จากนั้นเริ่มศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ และ ความชื้น ของฟิล์มที่ได้ โดย ใช้ model ของ Lenicki, Peleg, Guggenheim - Anderson-deBoer ยก: Osmin</p> <p>แนวคิดในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย</p> <p>จากหน้าที่ของหน้าที่ ไล่ทำการศึกษาในโปรเจกต์ทำฟิล์มของ PBS/PLA blend โดยเพิ่ม reactive agent ชนิดต่างๆ ที่มีความหนาแน่นของไฮดรอกซิลโดยความถี่ในรูปฟิล์ม และ ทำการศึกษาแบบโปร่งรู หรือ สกัดรูพรุน การต้านทานการดูดซับน้ำ การซึมผ่านของไอน้ำ และ ความชื้น นอกจากนี้ยังศึกษาการนำไปผสมผสานกับฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ช่วยลดการดูดซับน้ำหรือความชื้นได้อีกด้วย</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	
<p>ลงชื่อ วรศักดิ์ แสงขุนทด</p> <p>(น.ส. วรศักดิ์ แสงขุนทด)</p> <p>วันที่ 21 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558</p>	
<p>แนบส่งต่อ</p> <p>ลงชื่อ </p> <p>(ดร. วรศักดิ์ แสงขุนทด)</p> <p>อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์</p> <p>วันที่ 21 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558</p>	<p>ทิม นิตินันท์ นิตินันท์</p> <p>ลงชื่อ </p> <p>(ศึกษาศาสตราจารย์ ดร. นิตินันท์ นิตินันท์)</p> <p>หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ</p> <p>วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558</p>

หมายเหตุ

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



แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประจำภาคการศึกษา.....1.....ปีการศึกษา.....2558.....

ชื่อ-นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว)..... พลิกษณ์ เดอชนก..... รหัสประจำตัวนักศึกษา..... 51402103.....
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่.....3..... สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ	
การประชุมวิชาการ "Eco Innovation and Solution 2015"	
ระดับ <input checked="" type="checkbox"/> ชาติ <input type="checkbox"/> นานาชาติ	สถานที่..... ศูนย์นวัตกรรมและธุรกิจนวัตกรรมเทคโนโลยี
วันที่..... 2 ตุลาคม 2558.....	
หัวข้อการบรรยาย..... RDF สลัดกับที่ใส่ใย	
โดย..... นาย พิรย์ สิ้นสินธุ์	
ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้)..... RDF (Refuse Derived Fuel) เป็นกรณีศึกษา จากชุมชนขยะรีไซเคิลเป็นเชื้อเพลิงโรงกลั่น โดยเริ่มจากกรณีของชุมชนที่เน้นการคัดแยกขยะอินทรีย์อย่างสม่ำเสมอ ประมาณ 50 ตัน/เดือน (ขนาด 30 ตัน) จากนั้นนำขยะที่เหลือมาเผาเพื่อผลิต RDF แล้วนำ RDF ไปใช้ผลิตปูนซีเมนต์ ที่โรงผลิตปูนซีเมนต์แห่งหนึ่ง (3-5 ชม) จากนั้น RDF จะถูกนำกลับไปใช้เผาผลาญที่โรงกลั่นด้วยเช่นกันจนกระทั่งได้ ตัวซีไอ	
วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก	
..... นาย สิ้นสินธุ์ มุคสัน	
หน่วยงาน..... คณะสหกรณ์และประเทศไทย	
ติดต่อ..... 90msittichorn@hotmail.com	
ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก	
1)..... นาย พิรย์ สิ้นสินธุ์	
.....	
หน่วยงาน..... คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร	
ติดต่อ..... chantavree.arlit@gmail.com	
2)..... นาย พิรย์ สิ้นสินธุ์	
.....	
หน่วยงาน..... วิทยาลัยเทคโนโลยี อีสานพาณิชย์ อีอีอี (ม.เทคโนโลยี)	
ติดต่อ..... kmh-kanokhan@hotmail.com	

3) ทอย ฉีกวีร์ นิสิตพันธ์

.....

.....

หน่วยงาน ภาควิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ติดต่อ tanite@engr.tu.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ

การประเมินการปล่อยก๊าซ CO₂ จากการเดินทางโดยรถไฟฟ้า BTS แล้วนำผลคำนวณค่าผลกระทบต่อการปล่อยก๊าซ CO₂ ต่อผู้โดยสารในรูปของปริมาณ $gCO_2/passenger/km$ ของผู้โดยสารที่โดยสารรถไฟฟ้า CO₂ ของการเดินทางรถไฟฟ้า BTS ในเขตกรุงเทพมหานคร เพื่อเปรียบเทียบกับการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคล ซึ่งมีการเดินทางโดยรถไฟฟ้า BTS ๑เที่ยวตลอดปริมาณ CO₂ ได้ถึง 36 เท่า นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ไปรถส่วนตัวให้ทราบต้นทุนที่รถไฟฟ้ามีค่าที่น้อยกว่าอีกด้วย

แนวคิดในการพัฒนาต่อของงานวิจัย

จากงานวิจัยที่กล่าวถึงค่าการปล่อย CO₂ โดยรถไฟฟ้าที่ไว้กับผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยประเมินการปล่อยก๊าซ CO₂ ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วยการผลิต การผลิต การกระจายสินค้า การใช้งาน และการจัดการผลิตภัณฑ์นั้นทิ้งไปจาก โดยคำนวณการปล่อย gCO_2 ต่อผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยที่การเปรียบเทียบปริมาณ CO₂ ที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีคุณสมบัติกันน้ำได้ หรือผลิตภัณฑ์ที่สามารถลดของหนักใหม่ได้ หรือผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายตัวตามธรรมชาติได้ไม่รบกวนสิ่งแวดล้อม หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้

ลงชื่อ วิรัตน์ นิสิตพันธ์

(น.ส.วิรัตน์ นิสิตพันธ์)

วันที่ ๙ เดือน ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๖๕

1๕๖๐๐

ลงชื่อ [Signature]

(ศ.ดร. รุทธีระวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

วันที่ 12 เดือน พ.ค. พ.ศ. ๒๕๖๕

นางสาววิมลวรรณ นิสิตพันธ์

ลงชื่อ [Signature]

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ นิสิตพันธ์)

หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

วันที่ 14 เดือน ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๖๕

หมายเหตุ

1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดยนักศึกษาต้องทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาคสาขา) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้งกับนักวิชาการและนักศึกษาที่มีการศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ตามเกณฑ์การสำเร็จการศึกษาตามหลักสูตร
2. นักศึกษาแบบรูปถ่ายแสดงการทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแนบเอกสารลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล นางสาววรลักษณ์ เฉยขุนทด
ที่อยู่ 63/1 หมู่ที่ 10 ตำบลบ้านครัว อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนแสนโกศิกนุสรณ์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเส้าไห้ “วิมลวิทยานุกูล” จังหวัดสระบุรี
พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิบูลวิทยาลัย จังหวัดลพบุรี
พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2556 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

ประวัติการฝึกงาน

พ.ศ. 2554 บริษัท กังวาลโพลีเอสเตอร์ จำกัด ฝ่ายควบคุมกระบวนการผลิต Poly(ethylene terephthalate) (PET)

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

พ.ศ. 2556-2558 ทุนนักศึกษาผู้ช่วยวิจัยของ ผศ.ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และ รศ.ดร.มนัส แซ่ด่าน จากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

การนำเสนอผลงานวิจัย

1. W Cherykhunthod, M Seadan and S Suttiruengwong.
“Effect of peroxide and chain extender on mechanical properties and morphology of poly (butylene succinate)/poly (lactic acid) blends”
2nd Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM2015), Beijing, China, May 16-19, 2015

การตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

1. W Cherykhunthod, M Seadan and S Suttiruengwong.

“Effect of peroxide and chain extender on mechanical properties and morphology of poly (butylene succinate)/poly (lactic acid) blends”

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

