



การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบเบรนด์สามองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ/
พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์



โดย
นางสาวอิสริยา พวงมะลิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร





การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบเบแลนด์สามองค์ประกอบของเทอร์โม
พลาสติกสตาร์ช/พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์



โดย
นางสาวอิสริย์ พวงมะลิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF TERNARY BLEND OF
THERMOPLASTIC STARCH/POLY(HYDROXYBUTYRATE-CO-
HYDROXYVALERATE)/POLY(VINYL ALCOHOL)



By

MISS Itsari PHUANGMALI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบเบเลนดสาม
องค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ/พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-
โค-ไฮดรอกซีวารีเลต/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
โดย อีสริย์ พวงมะลิ
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยาณี สิริสิงห)

61402233 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์, โพลีไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, โพลีบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, โพลีบิวทิลีนซัคซิเนต, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์, ความว่องไวต่อความชื้น, การย่อยสลายด้วยการหมัก

นางสาว อิศรีย์ พวงมะลิ: การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบเบลนด์สามองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์/โพลีไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต/โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมสารรีแอคทีฟ 2 ชนิด คือ Joncryl[®]ADR-4300 และ Dicumyl peroxide และเติมโพลีไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต (PHBV), โพลีบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) และโพลีบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ตามลำดับ ในส่วนแรกทำการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์เพื่อลดความหนืดและเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทเพื่อช่วยในการไหล และศึกษาการปรับปรุงสมบัติพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการเติมกลีเซอรอล 20 phr และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr และจากการทดสอบทางความร้อนทำให้ทราบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีอุณหภูมิหลอมผลึกลดลงเหลือ 164 องศาเซลเซียส และทำการเบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ปรากฏว่าเมื่อทำการเติม PVOH ไปเพียง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่านั้น ทำให้ค่า tensile strength และค่า elongation at break เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อมีการเติมสารรีแอคทีฟลงไปปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีค่า Young's modulus และค่า tensile strength สูงขึ้น แต่มีค่าดัชนีการไหลลดลงและเข้ากันได้ดีมากขึ้น ในส่วนสุดท้ายทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ผ่านเครื่องอัดขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงไปส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีอัตราการระเหยน้ำลดลง, สามารถย่อยสลายโดยการหมักเพียง 28 วัน และจากภาพถ่ายลักษณะสัญญาณวิทยาปรากฏว่า PHBV, PBAT และ PBS เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เบลนด์ และมีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ

61402233 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : TPS, PVOH, PHBV, PBAT, PBS, water durability, biodegradability

MISS ITSARI PHUANGMALI : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF TERNARY BLEND OF THERMOPLASTIC STARCH/POLY(HYDROXYBUTYRATE-CO-HYDROXYVALERATE)/POLY(VINYL ALCOHOL) THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR SUPAKIJ SUTTIRUENGWONG, Dr.Ing.

This research aims to study the preparation of thermoplastic starch (TPS)/polyvinyl alcohol (PVOH) blend with the reactive agent as Joncryl[®] ADR-4300 and Dicumyl peroxide by adding poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHBV), poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and poly(butylene succinate) (PBS). In the first part, thermoplastic starch properties were improved by adding plasticizer to reduce viscosity and ethylene vinyl acetate to improve flowability. PVOH properties were improved by adding glycerol 20 phr and maleic anhydride 0.5 phr. It had a melting temperature of around 164 °C. When the reactive agent was added TPS/PVOH blend showed a lower melt flow index with a higher Young's modulus and tensile strength. The last part was to prepare TPS/PVOH with PHBV, PBS and PBAT reactive blend film. It showed a high melt flow index and lower water solubility rate but the changes in mechanical property changes were insignificant. It biodegraded in compost in only 28 days. SEM shows that PHBV, PBAT and PBS are compatible with the TPS/PVOH reactive blend film.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน ทั้งให้คำชี้แนะ และให้คำแนะนำสำหรับแนวทางในการทำวิจัย, แก้ไขปัญหาในระหว่างที่ทำงานวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดสอบ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส ประธานกรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร.กัลยาณี สิริสิงห์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ทั้งให้คำชี้แนะ และคำแนะนำสำหรับการทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา, เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชา และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่คอยสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในด้านวัสดุ, อุปกรณ์, สารเคมี, การทำเอกสาร รวมถึงการทำเรื่องในการเบิกค่าใช้จ่ายทุนสำหรับการดำเนินงานวิจัย และเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย

และขอขอบคุณบริษัทสยามโมดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แบ่งปันสำปะหลังธรรมชาติ และกลีเซอรอลสำหรับการดำเนินงานวิจัย อาจารย์ ดร.รัตติกาล ชันธุ์เครือ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่อำนวยความสะดวกในการทดสอบทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ และศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งอ่าวไทยฝั่งตะวันออก อำเภอกาหลง จังหวัดระยอง ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่และคำแนะนำในการวางชิ้นงานฟิล์มที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายในน้ำทะเล

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมชั้นปริญญาโทด้วยกัน รุ่นพี่ และรุ่นน้องทั้งปริญญาโทและปริญญาตรี ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา การช่วยเหลือ และกำลังใจมาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครอบครัวรวมถึงโซดา ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้การช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องและให้กำลังใจกับผู้วิจัยมาโดยตลอดจนทำให้วิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ณ
1. บทที่ 1	21
บทนำ	21
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	21
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	22
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	22
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	24
2. บทที่ 2	25
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.1 แป้ง (Starch)	25
สมบัติของแป้ง.....	26
2.2 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch).....	27
2.3 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)	28
2.4 พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวาเลอเรต (Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)).....	28

2.5	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol))	30
2.6	พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)	32
	กลีเซอรอล (glycerol)	32
	กรดซิตริก (citric acid)	32
2.7	สารเพิ่มความเข้ากันได้ (blend compatibilizer)	32
	มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride)	32
	ไดคิวมีว เพอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide)	32
	สารช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์ (multifunctional epoxide chain extender)	33
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
3.	บทที่ 3	42
	วิธีการดำเนินงานวิจัย	42
	3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	42
	3.2 เครื่องผสม และขึ้นรูปชิ้นงาน	45
	3.3 เครื่องมือวิเคราะห์	46
	3.4 การดำเนินงานวิจัย	46
	3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์	57
	3.6 สัญลักษณ์และตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้	58
4.	บทที่ 4	60
	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	60
	4.1 ศึกษาผลของการเตรียมคอมพาวด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิล แอลกอฮอล์	61
	4.1.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และศึกษาสมบัติเชิงกล	61
	4.1.1.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากการเติมกลีเซอรอล	61

4.1.1.2. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์	62
4.1.1.3. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์.....	64
4.1.1.4. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมกรดซิตริก.....	65
4.1.1.5. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมกรดซิตริก	66
4.1.1.6. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท	67
4.1.1.7. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท	68
4.1.2 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล	70
4.1.2.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์	70
4.1.2.2. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์	72
4.1.2.3. ศึกษาผลสมบัติทางความร้อนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์	74
4.1.2.4. ศึกษาผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์	76
4.1.3. เปรียบเทียบการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process	77
4.1.3.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process.....	77
4.1.3.2. ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process	78

4.1.3.3. ศึกษาผลลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process	79
4.1.3.4 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process	80
4.1.4 อิทธิพลของ reactive agent ต่อ TPS และ mPVOH	81
4.1.4.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียม TPS และ mPVOH ที่มีการเติม reactive agent.....	81
4.1.4.2 ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของ TPS และ mPVOH ที่มีการเติม reactive agent	83
4.1.5 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 และศึกษาสมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยาในระบบ reactive blend แบบ one-step process	84
4.1.5.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process ...	84
4.1.5.2 ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process.....	88
4.1.5.3. ศึกษาผลลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process ...	89
4.1.5.4. ศึกษาผลจากเทคนิค Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process ...	93
4.1.5.5. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process.....	95
4.2 ศึกษาการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process.....	99
4.2.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA แบบ one-step process	99

4.2.2	ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA แบบ one-step process.....	103
4.2.3	ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA แบบ one-step process	105
4.3	ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ผ่านเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder).....	109
4.3.1	ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process	109
4.3.2	ศึกษาผลลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process.....	110
4.3.3	ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process	112
4.3.4	ศึกษาผลสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process.....	113
4.3.5	ศึกษาอัตราการระเหยน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process	114
4.3.6	ศึกษาผลการย่อยสลายโดยการหมักของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process.....	117

4.3.7 ศึกษาผลการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิดของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ในระบบ reactive blend แบบ one-step process..... 120

5. บทที่ 5 121

 สรุปผลการทดลอง..... 121

 5.1 สรุปผลการวิจัย..... 121

 5.2 ข้อเสนอแนะ 123

รายการอ้างอิง 151

ประวัติผู้เขียน..... 157



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง [11]	27
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของ 3-HV และ 3-HB ที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน [14].....	29
ตารางที่ 2.3 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [15].....	31
ตารางที่ 2.4 ผลจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [25].....	33
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/กลีเซอรอล [10].....	35
ตารางที่ 2.6 สูตรการผสมของฟิล์มคอมโพสิตสูตรต่าง ๆ [26].....	36
ตารางที่ 2.7 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทกของ PHBV และ PHBV/Starch ในระบบ non-reactive blend [28]	38
ตารางที่ 2.8 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทกของ PHBV และ PHBV/Starch ในระบบ reactive blend [28].....	39
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ด้วยกลีเซอรอล, กรดซิตริก, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท	47
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนในการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์	48
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม reactive agent ในอัตราส่วนต่าง ๆ	50
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม reactive agent ในอัตราส่วนต่าง ๆ	51
ตารางที่ 3.5 สัดส่วนในการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	52
ตารางที่ 3.6 สัดส่วนในการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับ	

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มผ่านเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)	54
ตารางที่ 3.7 อุณหภูมิและความเร็วรอบที่ใช้ในการผลิตเม็ดคอมพาวด์จากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder)	54
ตารางที่ 3.8 อุณหภูมิและความเร็วรอบที่ใช้ในการผลิตฟิล์มจากเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)	55
ตารางที่ 4.1 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr และมาเลอิก แอนไฮไดรต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ	64
ตารางที่ 4.2 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรต์ 0.1 phr และกรดซิตริกในอัตราส่วนต่าง ๆ	66
ตารางที่ 4.3 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรต์ 0.1 phr, กรดซิตริก 1.0 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนต่าง ๆ	68
ตารางที่ 4.4 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรต์, กรดซิตริก และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท	70
ตารางที่ 4.5 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 0.5 phr	72
ตารางที่ 4.6 ค่า Tg, Tc และ Tm ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 0.5 phr	74
ตารางที่ 4.7 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process	80
ตารางที่ 4.8 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend	97

ตารางที่ 4.9 ค่า Young’s modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิเมอร์
 เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 และ 0.2
 phr และ peroxide 0.1 และ 0.05 phr และเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ปริมาณ 5 และ 10
 phr..... 105

ตารางที่ 4.10 ค่า Young’s modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์
 เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ
 PBS..... 112

ตารางที่ 4.11 ความชื้น, อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสเฉลี่ยของปุ๋ยหมักในถุงที่ใช้ในการหมัก
 ชีงงานฟิล์มที่ทำการวัดและเก็บค่าทุก ๆ 7 วันจนครบ 28 วันตามลำดับ..... 117



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 (ก) โครงสร้างของอะไมโลส และ (ข) โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [11].....	25
ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อได้รับความร้อน [11]	27
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวาลิเลต [14].....	28
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [16].....	30
ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต [15].....	30
ภาพที่ 2.6 ความสามารถในการละลายต่อระดับการไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส [15].....	31
ภาพที่ 2.7 Onset melting temperature, End-point melting temperature และ Enthalpy of melting ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [10].....	35
ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง starch/EVA/MA [26]	36
ภาพที่ 2.9 กราฟที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลเมื่อฟิล์มผสมมีปริมาณแป้งที่สูงขึ้น [27].....	38
ภาพที่ 2.10 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยา (a) PHBV/starch 80/20 ในระบบ non-reactive blend และ (b) PHBV/starch 80/20 ในระบบ reactive blend [28]	39
ภาพที่ 2.11 ค่าคงที่สมดุลน้ำของฟิล์มผสมเมื่อมีความชื้นสูงขึ้น [3]	40
ภาพที่ 2.12 น้ำหนักที่หายไปของ PHBV, Starch และ PHBV/starch [29]	41
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างแป้งมันสำปะหลัง [11].....	42
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างกลีเซอรอล [19]	42
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างมาเลอิก แอนไฮไดรด์ [22]	42
ภาพที่ 3.4 โครงสร้างกรดซิตริก [20].....	43
ภาพที่ 3.5 โครงสร้างเอทิลีน ไวนิล อะซิเตต [24]	43
ภาพที่ 3.6 โครงสร้างพอลิบิวทิลีน อะดิเพต-โค-เทเรพทาเลต [30]	43
ภาพที่ 3.7 โครงสร้างพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต [30]	44

ภาพที่ 3.8 โครงสร้างพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปต [31].....	44
ภาพที่ 3.9 โครงสร้างพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ [16].....	44
ภาพที่ 3.10 โครงสร้างพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต [14]	45
ภาพที่ 3.11 โครงสร้างไดควิมิว เพอร์ออกไซด์ [23].....	45
ภาพที่ 3.12 โครงสร้าง Joncryl® ADR-4300 [24].....	45
ภาพที่ 4.1 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 30, 35 และ 40 phr.....	61
ภาพที่ 4.2 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ในอัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr.....	62
ภาพที่ 4.3 (a) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (b) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับความชื้นภายในโครงสร้างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ และ (c) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับกลีเซอรอลตามลำดับ [32] ...	63
ภาพที่ 4.4 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมกรดซิตริกในอัตราส่วน 0.5, 1.0 และ 1.5 phr	65
ภาพที่ 4.5 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วน 0.5 และ 1.0 phr	67
ภาพที่ 4.6 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท	69
ภาพที่ 4.7 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท	69
ภาพที่ 4.8 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr.....	70
ภาพที่ 4.9 กราฟ stress-strain ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr.....	73
ภาพที่ 4.10 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับมาเลอิก แอนไฮไดรด์ [16].....	74

ภาพที่ 4.11 กราฟที่ได้จากเครื่อง FTIR ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 20 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr 76

ภาพที่ 4.12 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process..... 77

ภาพที่ 4.13 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process..... 78

ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process..... 79

ภาพที่ 4.15 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียม (a) TPS ที่มีการเติม reactive agent และ (d) mPVOH ที่มีการเติม reactive agent 82

ภาพที่ 4.16 ค่าดัชนีการไหลของ a) TPS ที่มีการเติม reactive agent และ (d) mPVOH ที่มีการเติม reactive agent..... 83

ภาพที่ 4.17 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend (a) ที่มีการเติม Joncryl ในอัตราส่วน 0.5 และ 1.0 phr และ (b) ที่มีการเติม dicumyl peroxide ในอัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr..... 85

ภาพที่ 4.18 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend (a) ที่มีการเติม Joncryl คงที่ที่ 0.5 phr และมีปริมาณ dicumyl peroxide แตกต่างกัน และ (b) มีการเติม Joncryl คงที่ที่ 1.0 phr และมีปริมาณ dicumyl peroxide แตกต่างกัน..... 87

ภาพที่ 4.19 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl และ dicumyl peroxide ในอัตราส่วนต่าง ๆ 88

ภาพที่ 4.20 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS70/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl และ dicumyl peroxide ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แบบ one-step process..... 91

ภาพที่ 4.21 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend แบบ one step process..... 93

ภาพที่ 4.22 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process ดังนี้ (a) ที่มีการเติม joncryl ในอัตราส่วนที่มากขึ้น, (b) ที่มีการเติม peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น, (c)) ที่มีการเติม joncryl คงที่ที่ 0.5 และ peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น และ (d) ที่มีการเติม joncryl คงที่ที่ 1.0 และ peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น..... 96

ภาพที่ 4.23 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA (a) ปริมาณ 5 phr และ (b) ปริมาณ 10 phr..... 100

ภาพที่ 4.24 ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr และเติม PBS และ PBSA ปริมาณ 5 และ 10 phr 102

ภาพที่ 4.25 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และเติม PHBV และ PBAT ปริมาณ 5 และ 10 phr 103

ภาพที่ 4.26 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr และเติม PHBV และ PBAT ปริมาณ 5 และ 10 phr 104

ภาพที่ 4.27 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และเติม PHBV และ PBAT ปริมาณ 5 และ 10 phr..... 107

ภาพที่ 4.28 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr และเติม PBS และ PBSA ปริมาณ 5 และ 10 phr..... 108

ภาพที่ 4.29 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่ได้จากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder)..... 109

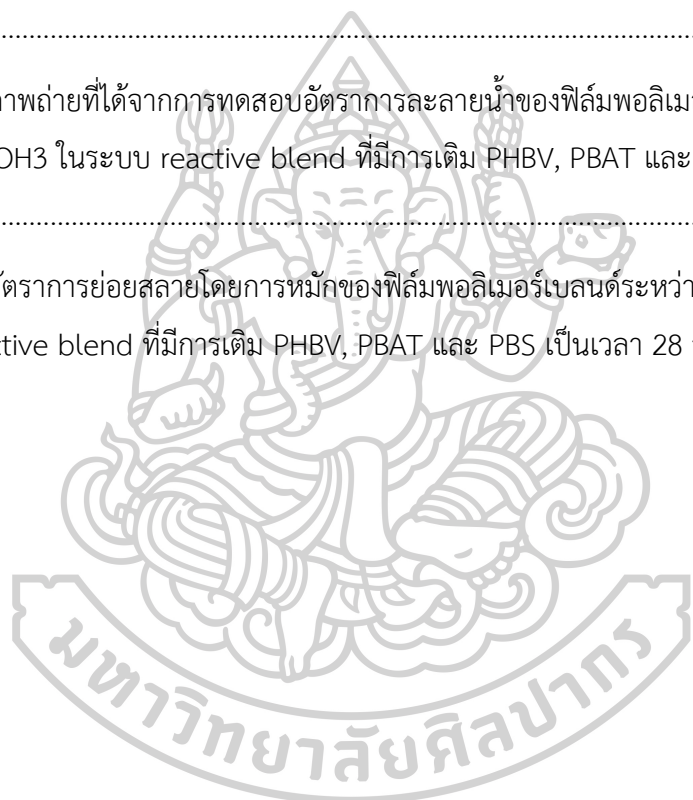
ภาพที่ 4.30 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่ได้จากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) 110

ภาพที่ 4.31 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS 113

ภาพที่ 4.32 อัตราการละลายน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที..... 114

ภาพที่ 4.33 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบอัตราการละลายน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่เวลา 15 นาที 115

ภาพที่ 4.34 อัตราการย่อยสลายโดยการหมักของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS เป็นเวลา 28 วัน..... 118



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

แป้งมันสำปะหลังมีราคาถูก หาได้ง่ายในธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ และสามารถปลูกมันสำปะหลังขึ้นมาทดแทนใหม่ได้ทั้งปี [1] แต่สายโซ่โมเลกุลแป้งมีพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากทำให้แป้งมีคุณสมบัติห่อหุ้มผลึกสูงกว่าคุณสมบัติละลายตัว ส่งผลให้แป้งละลายตัวก่อนที่ผลึกแป้งจะหลอม [2] ดังนั้นการทำให้คุณสมบัติของแป้งลดลงสามารถทำได้โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ภายใต้ความร้อนและแรงเฉือนที่เหมาะสมจะเรียกวิธีนี้ว่าการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ที่ละลายตัวได้ทางชีวภาพ แต่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีข้อเสีย คือ เปราะ ไม่ทนต่อสภาพอากาศและนำไปแปรรูดยาก จึงนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH) มาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ซึ่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เข้ากับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ดี [3-5] และสามารถใส่พลาสติกไซเซอร์ตัวเดียวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ [6, 7] อีกทั้งยังสามารถละลายน้ำได้ และมีความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนได้สูง [8] แต่การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะต้องใช้คุณสมบัติในระหว่างกระบวนการผสมที่ไม่สูงมากนักเพื่อป้องกันการไหม้ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและการระเหยของกลีเซอรอลในองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แต่อย่างไรก็ตามพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติ 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่างๆ และมาเลอิก แอนไฮไดรด์ เพื่อลดคุณสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลง [9, 10] แต่พอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังมีข้อเสียในเรื่องความว่องไวต่อความชื้นสูง และมีความหนืดในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต (PHBV), พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT), พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปต (PBSA) ลงไป เนื่องจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท, พอลิบิวทิลีนซักซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตเป็นพอลิเมอร์ที่ละลายตัวได้ทางชีวภาพ และมีความเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์, พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์, ศึกษาการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) และทดสอบสมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงความร้อน, ลักษณะสัญญาณวิทยา, อัตราการละลายน้ำ, การย่อยสลายโดยการหมัก และการย่อยสลายในน้ำทะเลเปิด (open sea)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ reactive agent (Joncryl[®] ADR-4300 และ Dicumyl peroxide) ของสูตรคอมพาวด์ระหว่าง thermoplastic starch กับ poly(vinyl alcohol) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล
2. ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มผสมระหว่าง thermoplastic starch, poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) กับ poly(vinyl alcohol) ที่เตรียมได้
3. ศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่าง thermoplastic starch, poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) กับ poly(vinyl alcohol) ผ่านกระบวนการ cast film extrusion
4. ศึกษา biodegradability (การย่อยสลายโดยการหมัก และการย่อยสลายในน้ำทะเลเปิด) ของฟิล์มผสมระหว่าง thermoplastic starch, poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) กับ poly(vinyl alcohol) ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ ซึ่งใช้พลาสติกไซเซอร์เป็นกลีเซอรอลปริมาณ 30 phr
2. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีร้อยละไวนิลแอลกอฮอล์ 70-80 mol% และที่เหลือคือไวนิลอะซิเตท
3. ในงานวิจัยนี้ใช้สัดส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 70:30 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4. ในงานวิจัยนี้มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซักซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตในปริมาณ 5 - 10 phr

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการและวางแผนงานวิจัย
3. ดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของการเตรียมคอมพาวด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์, สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน

- 1.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและศึกษาสมบัติเชิงกล
- 1.2 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล
- 1.3 เปรียบเทียบการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แบบ one-step และ two-step process
- 1.4 อิทธิพลของ reactive agent ต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
- 1.5 การเบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์, สมบัติเชิงกล และลักษณะสัญญาณวิทยาโดยทำการผสมแบบ one-step process

ตอนที่ 2 ศึกษาการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซักซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซักซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และศึกษาค่าดัชนีการไหลและสมบัติเชิงกล

ตอนที่ 3 ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตผ่านเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)

นำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงความร้อน, ลักษณะสัญญาณวิทยา, อัตราการละลายน้ำ, การย่อยสลายโดยการหมัก และการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิด

4. วิเคราะห์ผลการวิจัย
5. สรุปผลการวิจัย
6. รายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้สูตรคอมพาวด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี
2. สามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนที่ดี และมีความสามารถในการย่อยสลายได้
3. สามารถผลิตฟิล์มในห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ได้



บทที่ 2

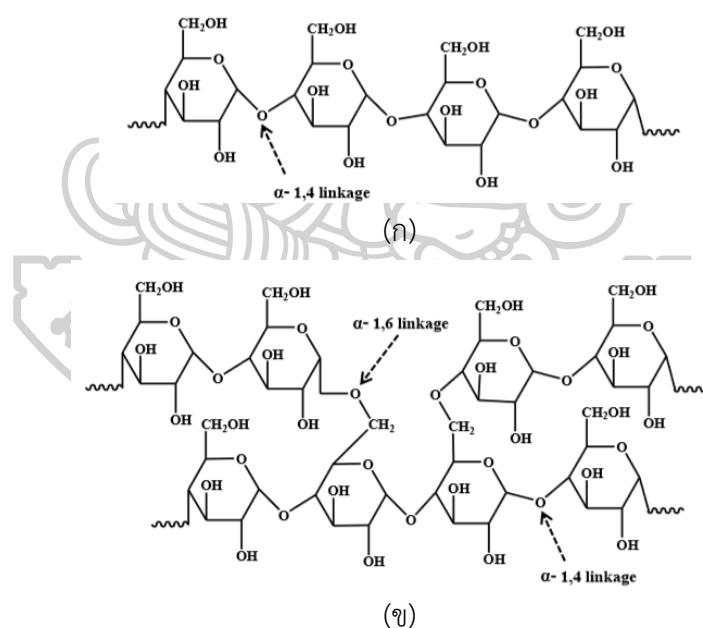
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง (Starch)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ที่ถูกสะสมไว้ในส่วนต่างๆของพืช เช่น เมล็ด ลำต้น หัว ราก และผล เป็นต้น ซึ่งภายในเม็ดแป้งประกอบไปด้วยกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกทิน และภายในโครงสร้างแป้งนั้นประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งมีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ตามลำดับ [1], [11]

โครงสร้างของแป้ง

โครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพกทิน (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 2.1 (ก) โครงสร้างของอะไมโลส และ (ข) โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน [11]

อะไมโลส (ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 2.1(ก)) เป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นสายโซ่ตรงที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ซึ่งปริมาณอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน โดยแป้งที่ผลิตจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลังจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ

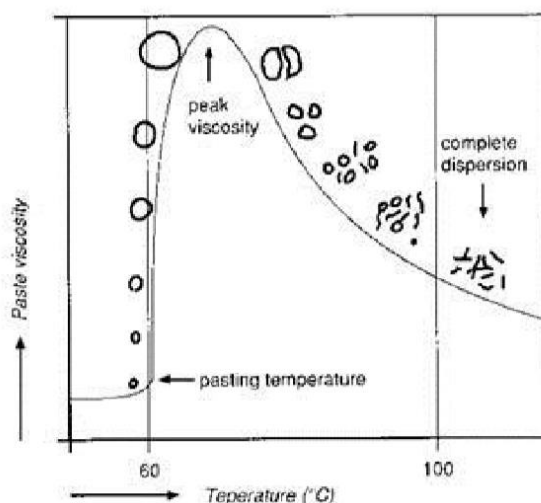
ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แต่แป้งที่ผลิตจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีจะมีปริมาณอะไมโลสอยู่ที่ประมาณร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก

อะไมโลเพคติน (ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 2.1(ข)) เป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นสายโซ่ตรง และเป็นกิ่ง ที่เชื่อมต่อด้วยพันธะที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ เชื่อมต่อด้วยพันธะกลูโคซิติกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับ 4 และพันธะกลูโคซิติกที่เชื่อมต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับ 6 ตามลำดับ [11]

สมบัติของแป้ง

พฤติกรรมความหนืดของแป้งซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 2.2 เป็นสมบัติเฉพาะตัวที่มีความแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้งดังนี้ เมื่อเม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำนั้นได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวอย่างรวดเร็วทำให้แป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งเรียกอุณหภูมินี้ว่า pasting temperature โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) แล้วความหนืดอาจจะลดลงหรือคงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเม็ดแป้งหรือโครงสร้างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินภายในแป้งบางส่วนเกิดการแตกหักและออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อเม็ดแป้งส่วนที่แตกละลายออกมามีปริมาณมากกว่าแป้งที่เกิดการพองตัวส่งผลให้ความหนืดของแป้งเริ่มลดลง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเกิดจากการพองตัวของเม็ดแป้งและการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง [12]

การคืนตัว (Retrogradation) ของแป้ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อน้ำแป้งสุกมีอุณหภูมิต่ำลง ในขณะที่อุณหภูมิต่ำลงโมเลกุลอิสระภายในโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโมเลกุลขึ้นมาใหม่ โดยเปลี่ยนลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลมาเป็นแบบผลึก ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวต่างกัน [11] โดยทั่วไปแป้งจากรากและหัว ได้รับความร้อนจะพองตัวในปริมาณมากและเร็ว และเม็ดแป้งสามารถแตกง่ายทำให้โมเลกุลแป้งส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในน้ำและกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ได้ยาก แต่แป้งจากธัญพืชเมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อย ดังนั้นเมื่อเกิดการคลายตัวโมเลกุลยังอยู่ใกล้ชิดกันทำให้สามารถกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ได้ง่ายกว่า โดยทั่วไปแล้วแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินจำนวนมากจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งช้าลงเนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะก่ ส่งผลให้โมเลกุลกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ได้ยากขึ้นตามลำดับ [12]



ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อได้รับความร้อน [11]

2.2 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากในหัวมันสำปะหลังประกอบไปด้วยแป้งมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก มีโปรตีนและไขมันปริมาณน้อยมาก ดังนั้นแป้งมันสำปะหลังจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ค่อนข้างมากเนื่องจากสกัดง่ายและสามารถลดต้นทุนในการกำจัดโปรตีนและไขมันได้ นอกจากนี้ยังสามารถเก็บรักษาและนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย และแป้งมันสำปะหลังมีราคาถูกกว่าพืชผลิตแป้งชนิดอื่นๆ ซึ่งสมบัติของแป้งมันสำปะหลังจะถูกแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง [11]

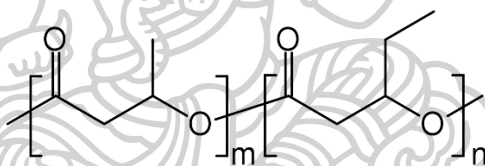
การทดสอบ	ปริมาณและสมบัติ
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	4-35
ขนาดเม็ดแป้งเฉลี่ย (ไมครอน)	20
ไขมัน (ร้อยละ)	0.1
โปรตีน (ร้อยละ)	0.10
อะไมโลเพคติน (ร้อยละ)	80
อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำให้เกิดเจลลาตินไนซ์ (องศาเซลเซียส)	65-70
ความหนืดของน้ำแป้ง	สูง
ความใสของน้ำแป้งและฟิล์ม	ใส
อัตราการคืนตัว	ต่ำ

2.3 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)

โดยทั่วไปแล้วแป้งที่ไม่มีกรดไขมันจะไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้นการนำแป้งไปใช้งานจะต้องมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไป ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ ซอร์บิทอล, น้ำ และกลีเซอรอล เป็นต้น และการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจะผลิตภายใต้อุณหภูมิและแรงเฉือนเพียงพอที่จะทำให้แป้งหลอมและไหลได้ โดยทั่วไปแล้วจะเรียกแป้งที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า “เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช” [13]

2.4 พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวาลิเรต (Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate))

พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวาลิเรต [P(HB-co- HV)] เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มระหว่างการเกิดผลึกโมโนเมอร์ของ 3-hydroxybutyrate (3-HB) และ 3-hydroxyvalerate (3-HV) ซึ่งมีโอกาสเกิดได้สูง (มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์) โดยเฉพาะ 3-hydroxyvalerate (3-HV) เกิดได้ตั้งแต่ 0-95 เปอร์เซ็นต์โมล ดังในภาพที่ 2.3 [14]



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวาลิเรต [14]

โครงสร้างและคุณสมบัติของโคพอลิเมอร์ 3HB และ 3HV ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงนี้ ซึ่งโคพอลิเมอร์ P(3HB-co-3HV) มีจำนวนไฮโมพอลิเมอร์ใกล้เคียงกันประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ โคพอลิเมอร์ 3HB และ 3HV มีลักษณะโครงสร้างแบบ isodimorphic และเมื่อมีสัดส่วน 3HV ที่สูงนั้นทำให้โคพอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงตามตารางที่ 2.2 นอกจากนี้เมื่อมีสัดส่วนของ 3HV เพิ่มขึ้นทำให้จุดหลอมเหลวลดลงเช่นกัน ดังนั้นสามารถเพิ่มคุณภาพของ Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) ได้โดยการควบคุมสัดส่วนของ 3HV ให้เหมาะสม

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของ 3-HV และ 3-HB ที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน [14]

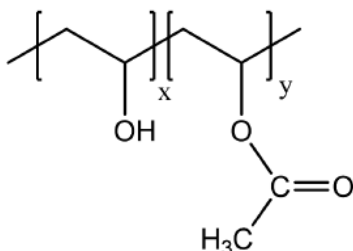
Polymer	Melting temperature (°C)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Glass transition temperature (°C)
P(3HB)	179	3.5	40	5	4
P(3HB-co-3HV)					
3 mol%3HV	170	2.9	38	-	-
9 mol%3HV	162	1.9	37	-	-
14 mol%3HV	150	1.5	35	-	-
20 mol%3HV	145	1.2	32	-	-
25 mol%3HV	137	0.7	30	-	-
P(3HB-co-4HB)					
3 mol%3HB	166	-	28	45	-
10 mol%3HB	159	-	24	242	-
16 mol%3HB	-	-	26	444	-
64 mol%3HB	50	30	17	591	-
90 mol%3HB	50	100	65	1080	-
P(4HB)	53	149	104	1000	-
P(3HH _x -co-3HO)	61	-	10	300	-
P(3HB)-co-6mol%3HA	133	0.2	17	680	-8
P(3HB)-co-67mol% HP	44	-	-	-	-19
P(3HB)-co-3HH _x	52	-	20	850	-4
Polypropylene	170	1.7	34.5	400	45

สำหรับกระบวนการเกิดโคพอลิเมอร์ของ PHBV สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการใช้แหล่งคาร์บอน 2 ชนิด เพื่อเป็นอาหารให้กับจุลินทรีย์ส่งผลให้เกิดหน่วยย่อย 2 ชนิดต่างกัน คือ B-hydroxybutyrate และ B-hydroxyvalerate ตามลำดับ ในการเกิดโคพอลิเมอร์ชนิด PHBV นั้นจำเป็นต้องอาศัยสารตัวกลางที่สำคัญคือ Propionyl-CoA โดยการผลิต Propionyl-CoA สามารถทำได้โดยการเติมกรดโพรพิโอนิก, กรดวาเลอริก หรือกรดไขมันระเหยง่ายสายสั้นๆ ที่มีจำนวนคาร์บอนเลขคู่ รวมถึงสามารถ

ใช้กรดอะมิโนตัวอื่นได้เช่นกัน ซึ่งกรดอะมิโนที่สามารถเป็นสารตั้งต้นได้นั้น เช่น ไอโซลิวซีน, วาลีน, เมทไทโอนีน และทรีโอนีน เป็นต้น

2.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol))

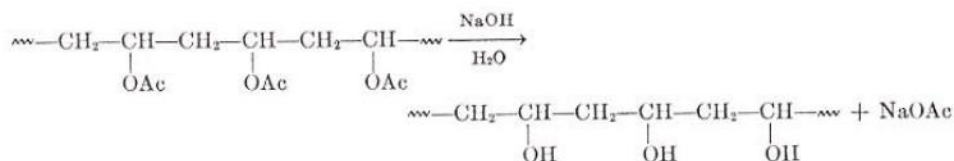
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้, ทนทานต่อสารเคมี, กรดและตัวทำละลายได้ดีมาก ป้องกันการซึมผ่านน้ำมันได้สูงมาก สามารถเก็บรักษากลิ่นได้ดีมาก และมีความเหนียวสูง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารลดแรงตึงผิว และสารที่ทำให้คงตัวในอนุภาคแขวนลอย, ใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ และใช้เป็นสารยึดติด เป็นต้น นอกจากนี้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังถูกนำมาใช้งานเกี่ยวกับทางการแพทย์และเภสัชกรรม เนื่องจากไม่เป็นพิษและไม่เป็นสารก่อมะเร็ง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้นมีวงไวต่อความชื้นสูง [15]



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [16]

โครงสร้างและสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถผลิตจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตท (PVA_c) ดังปฏิกิริยาที่แสดงดังภาพที่ 2.5 ซึ่งการแทนที่หมู่อะซิเตท (-OAc) ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะสามารถนำไปหาระดับการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และมีผลต่อความสามารถในการเกิดผลึกและการละลายของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ [17]



ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตท [15]

อัตราการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถคำนวณตามสมการดังนี้ [4], [15]

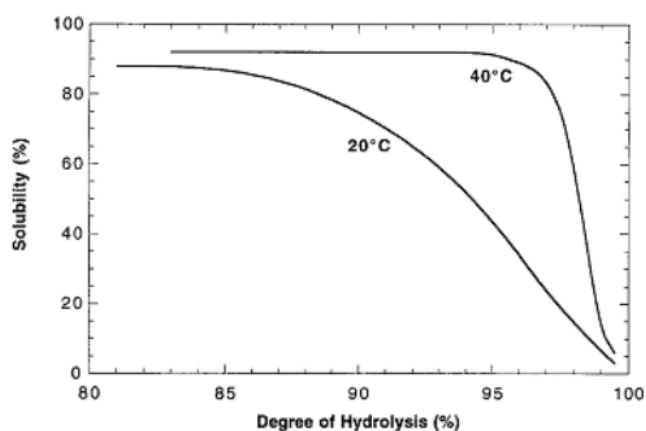
$$\text{Degree of Hydrolysis} = \frac{x}{x+y} \times 100\%$$

โดยที่ x และ y คือ สัดส่วนโดยโมลของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะซิเตตตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนโดยโมลของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะซิเตตตามจะต้องเป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์ [4], [15] ระดับการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ส่งผลให้หมู่อะซิเตตในสายโซ่โมเลกุลเหลือจำนวนน้อย โดยจะมีผลต่อสมบัติทางความร้อน และเชิงกลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วย [9]

ตารางที่ 2.3 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [15]

Melt flow index (190°C, 21.6 kg) (g/10min)	Melting temperature (°C)	Glass transition Temperature (°C)	Bulk density (g/cm ³)	Volatile content (wt.%)	Methanol content (wt.%)
14-20	170	60	0.6 - 0.9	<1	<1

โดยทั่วไปแล้วพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถละลายในตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น น้ำ, Dimethy sulfoxide, Etheylene glycol หรือ N-Methyl pyrrolidone เป็นต้น โดยความสามารถในการละลายของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสารละลายจะขึ้นอยู่กับระดับการไฮโดรไลซิสและอุณหภูมิของสารละลาย [15]



ภาพที่ 2.6 ความสามารถในการละลายต่อระดับการไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส [15]

2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารที่ทำให้พอลิเมอร์ไหลได้ง่ายขึ้น พอลิเมอร์มีความหนืดลดลงและง่ายต่อการนำไปขึ้นรูป และสามารถลดอุณหภูมิหลอมผลึกและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ได้ พลาสติไซเซอร์จึงได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก [18]

กลีเซอรอล (glycerol)

กลีเซอรอล เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ มีสูตรมีโครงสร้างทางเคมีทั่วไป คือ $C_3H_8O_3$ โดยทั่วไปแล้วกลีเซอรอลเป็นของเหลวใส หนืด และไม่มึนกลิ่น ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้เป็นตัวถ่ายเทความร้อน [19]

กรดซิตริก (citric acid)

กรดซิตริก เป็นกรดอ่อนที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกพบได้ตามธรรมชาติ เช่น ผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว กรดซิตริกนิยมผลิตด้วยวิธีการสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคสผ่าน glycolysis pathway ได้เป็นสาร oxaloacetate แล้วสะสมเป็นกรดซิตริก โดยจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในการผลิตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อรา *Aspergillus Niger* และยีสต์ *Candida Lypolitica* [20], [21]

2.7 สารเพิ่มความเข้ากันได้ (blend compatibilizer)

สารเพิ่มความเข้ากันได้ เป็นสารที่ช่วยในการปรับปรุงให้พอลิเมอร์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้สามารถเกิดพันธะเคมีระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เบลนด์ขึ้น, เกิดการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ได้ และเกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ได้ตามลำดับ สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่นิยมใช้ เช่น สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride)

มาเลอิก แอนไฮไดรด์ เป็น polyfunctional monomer โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะถูกนำมากราฟต์กับพอลิเมอร์ต่าง ๆ เช่น พอลิโอลิฟิน พอลิสไตรีน พอลิแซคคาไรด์ ยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ เป็นต้น [22]

ไดคิวมิว เปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide)

ไดคิวมิว เปอร์ออกไซด์ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนสองอะตอมติดกันในหมู่โครงสร้าง เปอร์ออกไซด์จะถูกใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์และยาง เป็นต้น เปอร์ออกไซด์ส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) สำหรับปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ออกไซด์มักจะถูกแสดงในรูปแบบของครึ่งชีวิต (half-life) ที่อุณหภูมิต่างๆ [23]

สารช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์ (multifunctional epoxide chain extender)

สารช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นโครงสร้างอีเทอร์ที่เป็นวงสามเหลี่ยมและมีความเครียดสูงทำให้อะตอมออกซิเจนของโครงสร้าง epoxide นี้มีความว่องไวสูงกว่าอะตอมออกซิเจนของโครงสร้างอีเทอร์แบบทั่วไป โดยสารช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลบริเวณปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นและมีความเสถียรทางความร้อนมากขึ้น [24]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ L. Mao และคณะ [25] ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาρχกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Starch/PVOH) ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ เริ่มจากนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10 กรัมมาเคลงไปในเครื่อง hand blender เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาผสมกับแป้งและกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้ 0, 15, 20, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักตามลำดับ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติกสกรูคู่ กำหนดให้อุณหภูมิหัวตายและอุณหภูมิโซน 1, 2 และ 3 มีค่าดังนี้ 121, 135, 129 และ 110°C ตามลำดับ และมีค่าความเร็วรอบเท่ากับ 30 rpm นำชิ้นงานฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลที่ความชื้น 50%RH พบว่าชิ้นงาน Starch/PVOH ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า tensile strength ลดลง และมีค่า elongation at break เพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนการทดสอบทางความร้อนพบว่าชิ้นงาน Starch/PVOH มีค่า T_g อยู่ที่ปริมาณ 65 – 86 องศาเซลเซียส โดยจะขึ้นอยู่กับความชื้นในชิ้นงานและปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไปด้วยเช่นกันตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 ผลจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาρχกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [25]

Starch-glycerol-PVOH ratio	T_1^a (°C)	T_2^b (°C)	T_g (estimated from E' and $\tan \delta$)
0-0-100	55	75	65
80-20-0	38	60	49
100-0-10	61	70	66
85-15-10	48	70	59
80-20-10	15	57	36
70-30-10	8	35	22
65-35-10	-4	6	5

^a Temperature at the onset of drop of storage modulus (E').

^b Temperature at the peak of strain/stress phase difference $\tan \delta$.

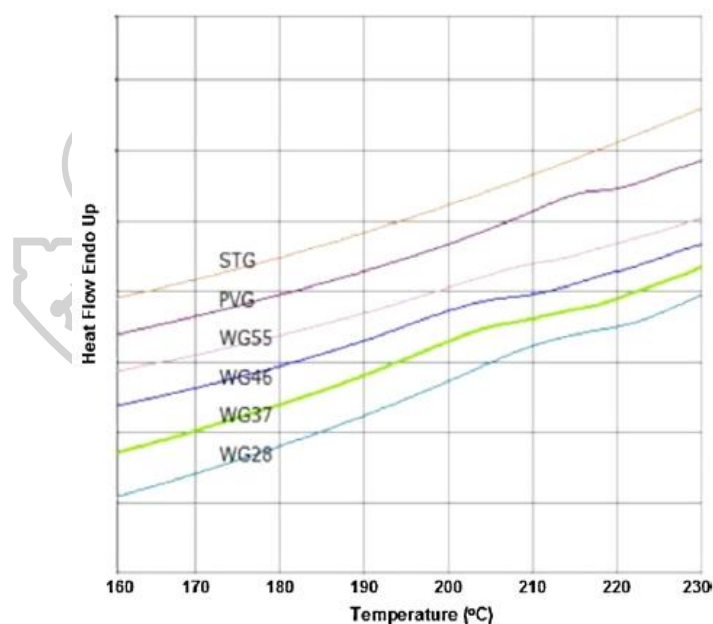
งานวิจัยของ G.X. Zou และคณะ [5] ศึกษาการเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวโพดกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CSS/PVOH) โดยใช้พลาสติกไซเซอรต์ต่างชนิดกันดังนี้ กรดซิตริก, กลีเซอรอล และน้ำ จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มคอมโพสิตที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลจะมีสมบัติเชิงกลต่ำ ดังนี้ มีค่า tensile strength และมีค่า elongation at break ที่ต่ำกว่าฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติมพลาสติกไซเซอรต์ ดังนั้นสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมโพสิตจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล จากการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลสูงขึ้นส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำมากขึ้นตามลำดับ และเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างกลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำได้ ทำให้ฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติมกลีเซอรอลสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติมกรดซิตริก พบว่ากรดซิตริกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่ และมีหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ทำให้ทราบว่ากรดซิตริกสามารถเกิดปฏิกิริยากับเทอร์โมพลาสติกสตาบิล และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ ทำให้ฟิล์มคอมโพสิตดูดซึมน้ำได้น้อยลง ดังนั้นกรดซิตริกสามารถเป็นได้ทั้งตัวเชื่อมขวางและพลาสติกไซเซอรต์ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ และจากการทดสอบทางความร้อนพบว่าฟิล์มคอมโพสิตที่มีการเติมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลในอัตราส่วนมากขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการเกิดผลึกภายในโครงสร้างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของฟิล์มคอมโพสิตได้ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลมากขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความสามารถเกิดผลึกลดลงมากกว่า neat PVOH ซึ่งเห็นว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถผสมเข้ากันได้ดี และเมื่อมีอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะผสมเข้ากับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลได้ดีที่สุด

จากงานวิจัยของ W.A. Rahman และคณะ [10] ทำการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อแป้งเท่ากับ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรต์ ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 2.5 โดยทำการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยวิธี solution casting ก่อนจะขึ้นรูปตอ้งนำพลาสติกไซเซอรต์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาผสมกันที่อุณหภูมิ 97 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมแป้งมันสำปะหลังและให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 97 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้เทลงไปในภาตกรกระจกใส แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ นำฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้ใส่ถุงพลาสติกใสแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 65 %RH ก่อนนำไปทดสอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/กลีเซอรอล [10]

Sample	PVOH:CSS (wt.%)	PVOH (g)	CSS (g)	Glycerol (g)
WG28	20:80	2	8	0.857
WG37	30:70	3	7	1.286
WG46	40:60	4	6	1.714
WG55	50:50	5	5	2.143
PVG	100:0	10	0	4.286
STG	0:100	0	10	4.286

จากการทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กำหนดให้ที่อุณหภูมิ 50 – 250 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 2.7 พบว่าเมื่อฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์มีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น จะมี Onset melting temperature และ End-point melting temperature ลดลง เนื่องจากกลีเซอรอลสามารถทำให้สายโซ่ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้มีอุณหภูมิในการหลอมผลึกและความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ลดลง



ภาพที่ 2.7 Onset melting temperature, End-point melting temperature และ Enthalpy of melting ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [10]

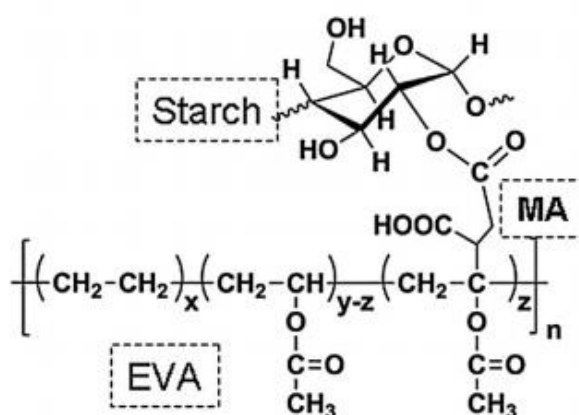
จากงานวิจัยของ P. Ma และคณะ [26] ทำการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของ polyhydroxybutyrate/poly(ethylene-co-vinyl acetate)/starch ซึ่งจะทำ Pre-mixing โดยการนำ EVA, starch, glycerol, MA และ BPO มาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 135

องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 100 rpm ซึ่งเรียกคอมพาวด์ที่ได้ทำการ Pre-mixing นี้ว่า PHB/EVA ตามลำดับ จากนั้นนำ PHB/EVA ที่เตรียมได้มาผสมกับ polyhydroxybutyrate ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 90 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำคอมพาวด์ PHB/EVA/starch ที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ตารางที่ 2.6 สูตรการผสมของฟิล์มคอมโพลีเมอร์สูตรต่าง ๆ [26]

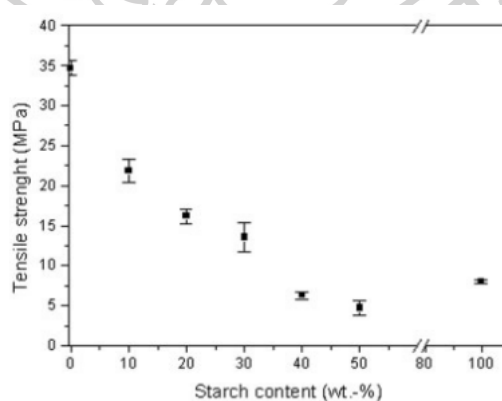
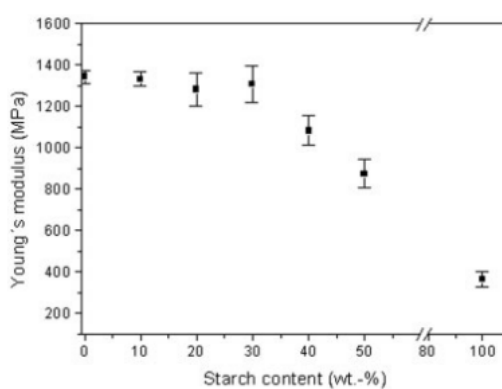
Sample code	PHB (wt%)	EVA (wt%)	Starch (wt%)	Glycerol (wt%)	MA (wt%)	BPO (wt%)
1#	-	45.5	45.5	9.0	0.00	0.000
2#	-	45.5	45.5	9.0	0.23	0.023
3#	-	45.0	45.0	9.0	0.45	0.045
4#	-	45.0	45.0	9.0	0.90	0.090
5#	60.0	18.2	18.2	3.6	0.00	0.000
6#	60.1	18.1	18.1	3.6	0.09	0.009
7#	60.0	18.1	18.1	3.6	0.18	0.018
8#	60.0	18.0	18.0	3.6	0.36	0.036

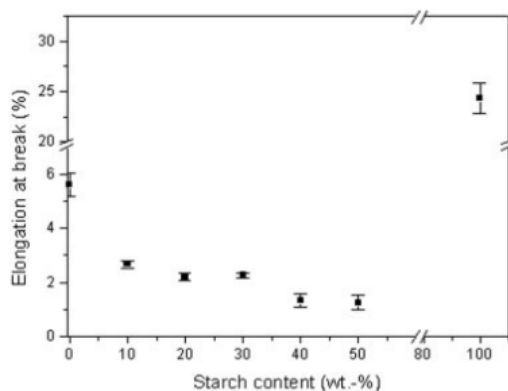
จากการทำ Pre-mixing พบว่า maleic anhydride สามารถกราฟต์ลงบนสายโซ่ poly(ethylene-co-vinyl acetate) ผ่านปฏิกิริยา free radical และสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลภายในโครงสร้างแป้งผ่านปฏิกิริยา esterification ได้เช่นกัน ทำให้แป้งสามารถเกิดการเจลลาคีโนซิสได้มากขึ้น และเมื่อเติม maleic anhydride ในปริมาณ 0.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิภายในโครงสร้างพอลิเมอร์เบลนด์มีขนาดเล็กลง และเมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ PHB/EVA/Starch พบว่าเมื่อมีการเติม maleic anhydride ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนมากขึ้น ส่งผลให้ค่า tensile strength ลดลง แต่มีค่า elongation at break สูงขึ้น [26]



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง starch/EVA/MA [26]

งานวิจัยของ R.M. Thire และคณะ [27] ศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งข้าวโพด (TPS) กับ polyhydroxybutyrate (PHB) ที่มีสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซเท่ากับ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้กลีเซอรอลและน้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ กำหนดให้ใช้กลีเซอรอลและน้ำปริมาณ 15 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อฟิล์มผสมมีปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ซเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า elongation at break และค่า tensile strength ลดลงตามลำดับเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของ PHB กับ TPS ลดลง ทำให้เมื่อได้รับแรงแล้วฟิล์มผสมเกิดการส่งผ่านแรงได้แยกลง และสายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้นตามลำดับ และจากการทดสอบทางความร้อนพบว่าเมื่อฟิล์มผสมมีปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ซมากขึ้นส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการกระจายตัวแบบ heterogeneous ในเมทริกซ์ PHB ซึ่งการเติมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซลงไปปริมาณมากสามารถช่วยลดปริมาณความเป็นผลึกของ PHB ลงตามได้





ภาพที่ 2.9 กราฟที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลเมื่อฟิล์มผสมมีปริมาณแป้งที่สูงขึ้น [27]

จากงานวิจัยของ M. Avella และคณะ [28] ศึกษาการขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PHBV กับแป้งข้าวโพดในอัตราส่วน PHBV ต่อแป้งมันข้าวโพดเท่ากับ 70:30 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยใช้ Bis(tert-butylperoxyisopropyl)benzene เป็น reactive agent ซึ่งจะขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิด กำหนดให้ที่อุณหภูมิ 185°C ความเร็วรอบ 32 rpm เป็นเวลา 15 นาที โดยพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม reactive agent คือ non-reactive blend ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม reactive agent ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ reactive blend จากการทดสอบแรงกระแทกกำหนดให้วางชิ้นงานในแนวระดับ (Charpy impact test) และมีความเร็วในการกระแทกเท่ากับ 1 m/s ตามลำดับ พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม reactive agent มีค่า impact resilience ลดลง เนื่องจากเม็ดแป้งไม่สามารถเกิดเจลลิตีในซีได้ ส่งผลให้อุณหภูมิเป็น defects ในชิ้นงานได้ซึ่งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทกของ PHBV และ PHBV/Starch ในระบบ non-reactive blend [28]

Sample	Resilience (kJ/m ²)
PHBV	1.82
PHBV/starch 80/20 NR	1.20
PHBV/starch 70/30 NR	0.90

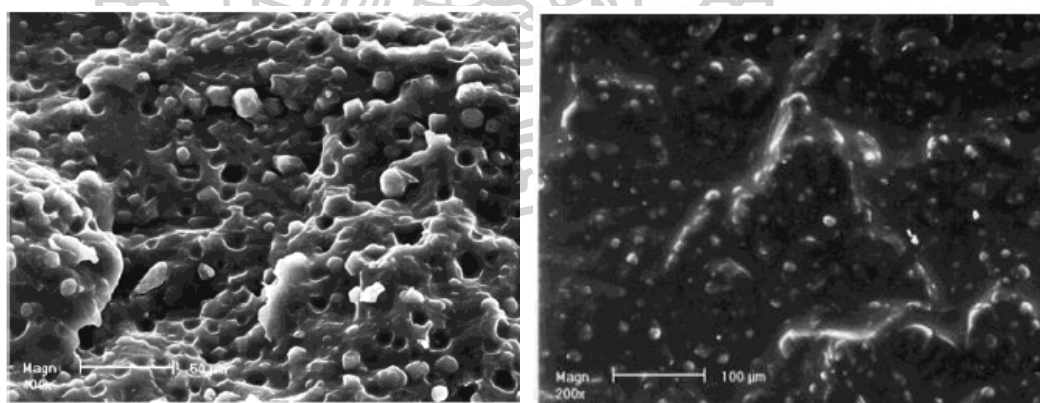
จากตารางที่ 2.8 พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม reactive blending พบว่ามีค่า impact resilience ค่อนข้างใกล้เคียงกับ PHBV และมีค่ามากขึ้นเมื่อพอลิเมอร์เบลนด์มีปริมาณแป้ง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ทราบว่าพอลิเมอร์เบลนด์เข้ากันได้ดีขึ้นเมื่อมีการเติม Bis(tert-butylperoxyisopropyl) โดยจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่หมู่คาร์บอนิลในสายโซ่โมเลกุลของ PHBV กับหมู่

ไฮดรอกซิลของแป้ง และ Bis(tert-butylperoxyisopropyl) ที่เติมลงไปนั้นสามารถแตกตัวเป็นเปอร์ออกไซด์ได้ ซึ่งเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้นระหว่าง PHBV กับแป้ง อีกทั้ง Bis(tert-butylperoxyisopropyl) สามารถลดขนาดของอนุภาคแป้งลง ส่งผลให้แป้งสามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.8 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกระแทกของ PHBV และ PHBV/Starch ในระบบ reactive blend [28]

Sample	Resilience (kJ/m ²)
PHBV	1.82
PHBV/Starch 80/20 (RB)	2.10
PHBV/starch 70/30 (RB)	1.85

จากภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 2.10 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม reactive agent มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง PHBV กับแป้งไม่ดีซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบแรงกระแทก ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม reactive agent จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง PHBV กับแป้งได้ดีขึ้นเนื่องจากเม็ดแป้งแตกออกจากกันและมีขนาดเล็กทำให้กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ [28]

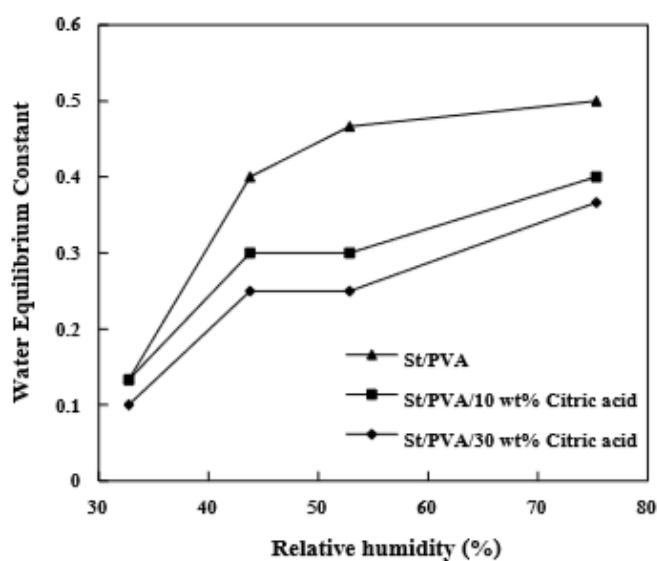


(a)

(b)

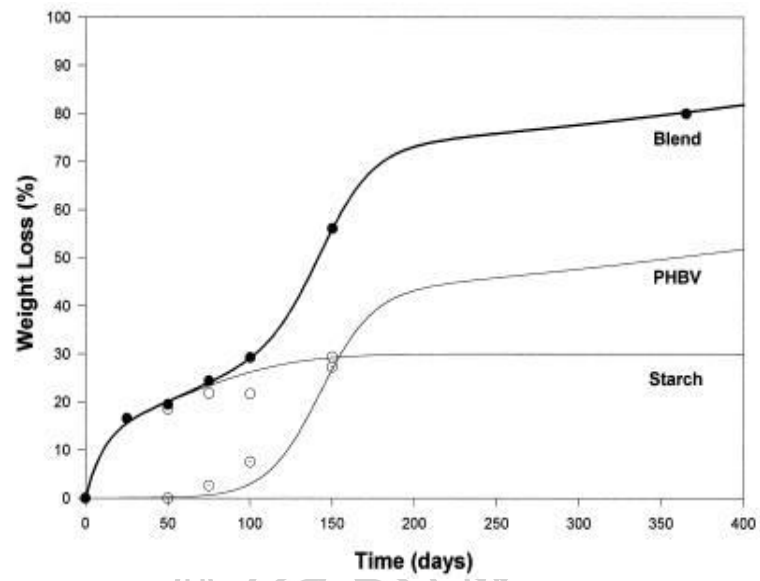
ภาพที่ 2.10 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยา (a) PHBV/starch 80/20 ในระบบ non-reactive blend และ (b) PHBV/starch 80/20 ในระบบ reactive blend [28]

งานวิจัยของ O. Artijima และคณะ [3] ศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกรดซิตริกในปริมาณต่าง ๆ ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี solvent casting จากการทดสอบค่าคงที่สมดุลน้ำพบว่าฟิล์มผสม St/PVA ที่ไม่มีการเติมกรดซิตริกมีค่าคงที่สมดุลของน้ำสูงที่สุด แต่เมื่อเติมกรดซิตริกในอัตราส่วนที่มากขึ้นในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฟิล์มผสม St/PVA มีค่าคงที่สมดุลของน้ำลดลงตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มผสม St/PVA ที่ไม่มีการเติมกรดซิตริก เนื่องจากกรดซิตริกสามารถเกิดปฏิกิริยากับฟิล์มผสม St/PVA ได้ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างฟิล์มผสมมากขึ้นและดูดซึมน้ำได้น้อยลงตามลำดับ



ภาพที่ 2.11 ค่าคงที่สมดุลน้ำของฟิล์มผสมเมื่อมีความชื้นสูงขึ้น [3]

งานวิจัยของ H. Imam และคณะ [29] ศึกษาการเตรียมฟิล์มแป้งข้าวโพดกับ (hydroxybutyrate-co-hydroxy valerate) โดยมีอัตราส่วน PHBV ต่อแป้งเท่ากับ 70:30 และ 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และมีการเติมพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ลงไป เนื่องจาก PEO ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกาะติดของเม็ดแป้งกับ PHBV ได้ และจากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายในน้ำทะเล พบว่ามีความสามารถในการย่อยสลายในน้ำทะเล ดังนี้ แป้ง 100% > แป้ง 50% > แป้ง 30% > 100% PHBV ตามลำดับ และ PHBV มีความสามารถในการย่อยสลายในน้ำทะเลช้ากว่าแป้งประมาณ 50 วัน ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 50 วัน PHBV พังเริ่มเกิดการย่อยสลายในน้ำทะเล ในขณะที่แป้งเกิดการย่อยสลายในน้ำทะเลไปแล้วถึง 80% ซึ่งอัตราการย่อยสลายในน้ำทะเลของแป้งอยู่ที่ประมาณ 2% ต่อวัน และ PHBV อยู่ที่ประมาณ 0.1% ต่อวัน และเมื่อมีการเติม PEO ลงไปในฟิล์มคอมโพสิต พบว่า PEO สามารถชะลอความสามารถในการย่อยสลายในน้ำทะเลได้เล็กน้อยตามลำดับ



ภาพที่ 2.12 น้ำหนักที่หายไปของ PHBV, Starch และ PHBV/starch [29]

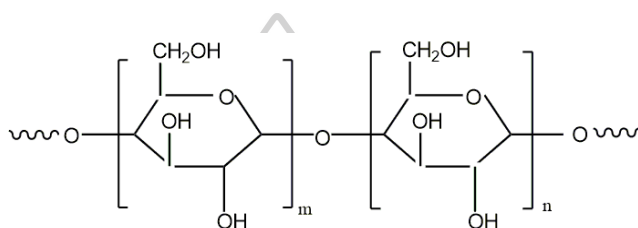


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

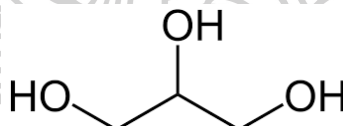
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (Native tapioca starch) มีความชื้นเริ่มต้น 12%MC และมีปริมาณอะไมโลส 17-19 % ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัด ประเทศไทย



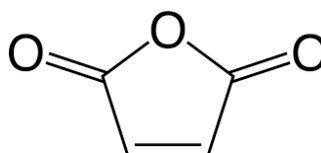
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างแป้งมันสำปะหลัง [11]

กลีเซอรอล (Glycerol) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของเหลวหนืดใส ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัด ประเทศไทย



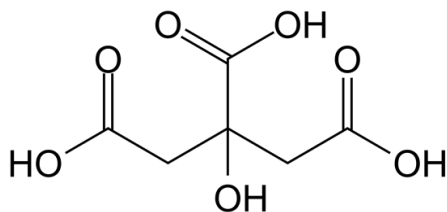
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างกลีเซอรอล [19]

มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงสีขาวละเอียด จากบริษัทซิกม่า-อัลดริช จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา



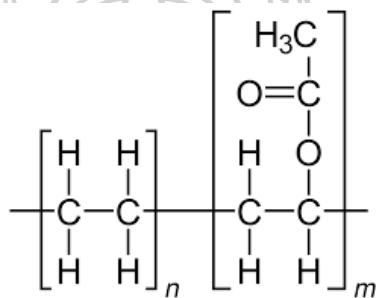
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างมาเลอิก แอนไฮไดรด์ [22]

กรดซิตริก (Citric acid) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผลึกใส จากบริษัทเคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย



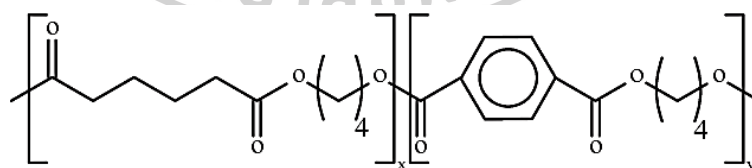
ภาพที่ 3.4 โครงสร้างกรดซิตริก [20]

เอทิลีน ไวนิล อะซิเตท (Ethylene vinyl acetate) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงสีขาวละเอียดเกรด Escorene™ Ultra UL04533EH2 และมี vinyl acetate อยู่ 33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากบริษัทเอ็กซอนโมบิล เคมีคอล คอมปะนี ประเทศสหรัฐอเมริกา



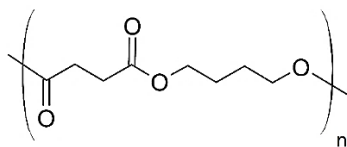
ภาพที่ 3.5 โครงสร้างเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท [24]

พอลิบิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเม็ดกลมสีขาว มีอุณหภูมิหลอมผลึกอยู่ที่ 115 องศาเซลเซียส เกรด Ecoflex® F Blend C1200 จากบริษัทพอลิเมทส์ จำกัด ประเทศไทย



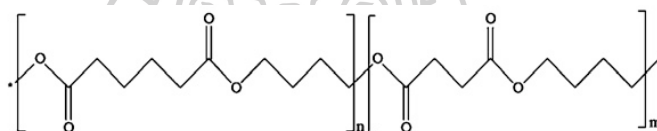
ภาพที่ 3.6 โครงสร้างพอลิบิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท [30]

พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต (Polybutylene succinate) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเม็ดสีขาว มีอุณหภูมิหลอมผลึกอยู่ที่ 120 องศาเซลเซียส เกรด FZ91PM จากบริษัทพีซี โพลีเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด ประเทศไทย



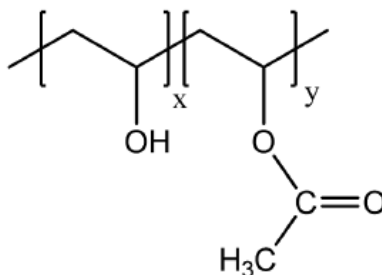
ภาพที่ 3.7 โครงสร้างพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต [30]

พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปต (Polybutylene succinate-co-adipate) ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้เป็นเม็ดสีขาว มีอุณหภูมิหลอมผลึกอยู่ที่ 114 องศาเซลเซียส เกรด FD91PM จากบริษัทพีซี โพลีเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด ประเทศไทย



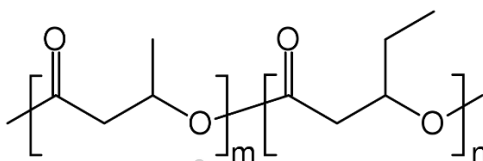
ภาพที่ 3.8 โครงสร้างพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปต [31]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเม็ดสีเหลืองใส ที่มีร้อยละ ไวนิลแอลกอฮอล์ 70-80 mol%. และมีอุณหภูมิหลอมผลึกอยู่ที่ 190 องศาเซลเซียส จากบริษัทคูรา เร่ จำกัด ประเทศสิงคโปร์



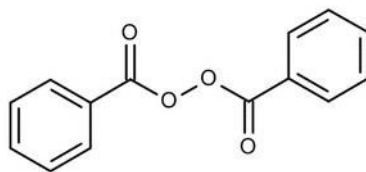
ภาพที่ 3.9 โครงสร้างพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ [16]

พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวาลิเลต (Poly(hydroxybutyrate -co-hydroxyvalerate)) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเม็ดสีขาวที่มี HV ปริมาณ 3 mol% เกรด ENMAT™ Y1000P มีอุณหภูมิหลอมผลึกอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส จากบริษัทเทียนอัน ไบโอบีโอดีส์ มณฑลเหอเป่ย์ ประเทศจีน



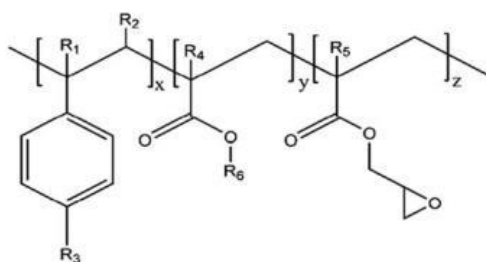
ภาพที่ 3.10 โครงสร้างพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวาลิเลต [14]

ไดคิวมีล เพอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) 99% ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเกล็ดสีขาว จากบริษัทซิกม่า-อัลดริช จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 3.11 โครงสร้างไดคิวมีล เพอร์ออกไซด์ [23]

Joncryl® ADR-4300 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผลึกสีขาวที่มีน้ำหนักโมเลกุลอีพอกไซด์ประมาณ 445 g/mol จากบริษัทบีเอเอสเอฟ เคมีคอล จำกัด ประเทศไทย



ภาพที่ 3.12 โครงสร้าง Joncryl® ADR-4300 [24]

3.2 เครื่องผสม และขึ้นรูปชิ้นงาน

3.2.1 เครื่องตีแป้ง (Cooking machine) รุ่น Homemade® model HQW-158122

3.2.2 เครื่องผสมภายในแบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX 105-D40L50 บริษัทเจริญทัศน์ ประเทศไทย

3.2.3 เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Compression molding) รุ่น PR10-W300L350 บริษัทเจริญทัศน์ ประเทศไทย

3.2.4 เครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) บริษัท Labtech engineering ประเทศไทย

3.2.5 เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) รุ่น SE-D28L540 บริษัทเจริญทัศน์ ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.1 เครื่อง Melt Flow Index (MFI) รุ่น Plastometer (MFR 1) บริษัทเจริญทัศน์ ประเทศไทย

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

3.3.3 กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น MIRA3 TESCAN ประเทศออสเตรีย

3.3.4 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น Metter Toledo 3+ บริษัท TA instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.5 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น Metter Toledo บริษัท TA instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.4 การดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของการเตรียมคอมพาวด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์, สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน

1.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและศึกษาสมบัติเชิงกล

เริ่มจากนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับกลีเซอรอล, กรดซิตริก, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนต่าง ๆ [24] ตามตารางที่ 3.1 มาผสมในเครื่องตีแป้งจนเข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน [32] จากนั้นนำมาเขย่าในถุงซิปล้างให้กระจายทั่วกันทั้งหมดก่อนเทลงในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ตั้งอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำคอมพาวด์ที่ได้มาบดและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานที่ได้ไปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH เป็นเวลา 24

ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อดูความเปราะของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแต่ละสูตร ก่อนนำสูตรที่ดีที่สุดไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อไป

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยกลีเซอรอล, กรดซิตริก, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท

Sample	Native tapioca starch (g)	Glycerol (phr)	Maleic anhydride (phr)	Citric acid (phr)	EVA (phr)
NT(G30)	100	30	-	-	-
NT(G35)	100	35	-	-	-
NT(G40)	100	40	-	-	-
NT(G30MA0.1)	100	30	0.1	-	-
NT(G30MA0.2)	100	30	0.2	-	-
NT(G30MA0.3)	100	30	0.3	-	-
NT(G30MA0.1CA0.5)	100	30	0.1	0.5	-
NT(G30MA0.1CA1.0)	100	30	0.1	1.0	-
NT(G30MA0.1CA1.5)	100	30	0.1	1.5	-
NT(G30MA0.1CA1.0EVA5)	100	30	0.1	1.0	5.0
NT(G30MA0.1CA1.0EVA10)	100	30	0.1	1.0	10

สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น NT(G30MA0.1CA1.0EVA5)

NT หมายถึงแป้งมันสำปะหลัง 100 g, G30 หมายถึงกลีเซอรอล 30 phr, CA1.0 หมายถึงกรดซิตริก 1.0 phr, MA0.1 หมายถึงมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr และ EVA5 หมายถึงเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท 5 phr

1.2 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล

เริ่มจากนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาผสมกับกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ และเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr ตามตารางที่ 3.2 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาเทลงไปในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ตั้งอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำคอมพาวด์ที่ได้มาบดและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน

(compression molding) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานที่ได้ไปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบทางความร้อน เพื่อดูความเปราะและอุณหภูมิหลอมผลึกของคอมพาวด์แต่ละสูตร ก่อนนำสูตรที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีที่สุดไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่อไป

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนในการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์

Sample	Polyvinyl alcohol (g)	Glycerol (phr)	Maleic anhydride (phr)
PVOH	100	-	-
PVOH(G10)	100	10	-
PVOH(G20)	100	20	-
PVOH(G30)	100	30	-
PVOH(G10MA)	100	10	0.5
PVOH(G20MA)	100	20	0.5
PVOH(G30MA)	100	30	0.5

สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น PVOH(G20MA)

PVOH หมายถึงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 100 g, G20 หมายถึงกลีเซอรอล 20 phr และ MA หมายถึงมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr

1.3 เปรียบเทียบการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แบบ one-step และ two-step process เพื่อนำไปเตรียมฟิล์มในขั้นตอนต่อไป

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process จะต่างจากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ two-step process ตรงที่ไม่จำเป็นต้องเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชก่อนแล้วค่อยนำมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แต่สามารถนำแป้งมาผสมกับกลีเซอรอล, กรดซิตริก, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.1) ในเครื่องตีแป้งจนเข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืนเรียบร้อยแล้วนำมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.2) ที่อบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืนได้เลย ในสัดส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 70:30 เฟอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาเข้าใน

ถูงชิบให้กระจายทั่วกันทั้งหมดก่อนเทลงในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ตั้งอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที

แต่การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ two-step process จะต้องเริ่มจากเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชก่อน โดยเริ่มจากนำแป้งมาผสมกับกลีเซอรอล, กรดซิตริก, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.1) ในเครื่องตีแป้งจนเข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำมาเทลงในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ตั้งอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำคอมพาวด์ที่ได้มาบดและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน แล้วนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการอบแล้วมาซึ่งสัดส่วนกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.2) ที่อบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน ในสัดส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 70:30 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำมาเขย่าในถูงชิบให้กระจายทั่วกันทั้งหมดก่อนเทลงในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ตั้งอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที

จากนั้นนำคอมพาวด์ทั้งแบบ one-step และ two-step process ที่ได้มาบดและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสและนำชิ้นงานที่ได้ไปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล และลักษณะสัณฐานวิทยา เพื่อดูความเปราะและการกระจายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ในแต่ละสูตรก่อนเลือกวิธีการเตรียมที่ดีที่สุดไปใช้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ในตอนต่อไป

1.4 อิทธิพลของ reactive agent ต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เริ่มจากนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากตอนที่ 1.1 ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน และนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมได้จากตอนที่ 1.2 ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำมาผสมกับ reactive agent ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.3 แล้วนำมาเทลงในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที นำคอมพาวด์ที่ได้มาบดและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน แล้วนำคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบค่าดัชนีการไหลเพื่อดูความหนืดของคอมพาวด์แต่ละสูตรต่อไป

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม reactive agent ในอัตราส่วนต่าง ๆ

sample	TPS (g)	mPVOH (g)	Joncryl (phr)	Dicumyl peroxide (phr)
TPS	100	-	-	-
TPSJ0.5	100	-	0.5	-
TPSDCP0.1	100	-	-	0.1
mPVOH	-	100	-	-
mPVOHJ0.5	-	100	0.5	-
mPVOHDCP0.1	-	100	-	0.1

*สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น TPSJ0.5

TPS หมายถึง NT(G30MA0.1CA1.0EVA5) 100 g, และ J0.5 หมายถึง Joncryl 0.5 phr

1.5 การเบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และศึกษาสมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยา โดยทำการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process

เริ่มจากนำแป้งมาผสมกับกลีเซอรอล, กรดซิตริก, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.1) ในเครื่องตีแป้งจนเข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน มาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.2) ที่อบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน ในสัดส่วน 70:30 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำมาผสมกับ Joncryl และ Peroxide ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.4 และเขย่าในถุงซิปลให้กระจายทั่วกันทั้งหมดก่อนเทลงในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ตั้งอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำคอมพาวด์ที่ได้มาบดและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสและนำชิ้นงานที่ได้ไปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล, ลักษณะสัณฐานวิทยา และค่าดัชนีการไหลเพื่อดูความเปราะ ความเข้ากันได้ และความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ในแต่ละสูตรก่อนนำสูตรที่ดีที่สุดไป

ผสมกับพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตต่อไป

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม reactive agent ในอัตราส่วนต่าง ๆ

sample	TPS (wt.%)	mPVOH (wt.%)	Joncryl (phr)	Dicumyl peroxide (phr)
1TPS7/mPVOH3	70	30	-	-
1TPS7/mPVOH3J0.5	70	30	0.5	-
1TPS7/mPVOH3J1.0	70	30	1.0	-
1TPS7/mPVOH3DCP0.1	70	30	-	0.1
1TPS7/mPVOH3DCP0.3	70	30	-	0.3
1TPS7/mPVOH3DCP0.5	70	30	-	0.5
1TPS7/mPVOH3J0.2DCP0.05	70	30	0.2	0.05
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.1	70	30	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.3	70	30	0.5	0.3
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.5	70	30	0.5	0.5
1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.1	70	30	1.0	0.1
1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.3	70	30	1.0	0.3
1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.5	70	30	1.0	0.5

*สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น 1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.1

1 หมายถึง one-step process, TPS7 หมายถึง NT(G30MA0.1CA1.0EVA5) สัดส่วน 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, mPVOH3 หมายถึง PVOH(G20MA) สัดส่วน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, J0.5 หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ DCP0.1 หมายถึง Dicumyl peroxide ปริมาณ 0.1 phr

ตอนที่ 2 ศึกษาการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เริ่มจากนำแป้งมาผสมกับกลีเซอรอล, กรดซิตริก, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และเอทิลีน ไวนิลอะซิเตท (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.1) ในเครื่องตีแป้งจนเข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำมาซังสัดส่วนกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1.2) ที่อบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน ในสัดส่วน 70:30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก แล้วเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืนแล้ว และเติม Joncryl และ Peroxide ในสัดส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.5 แล้วนำมาเขย่าในถุงซิปลงให้กระจายทั่วกันทั้งหมดก่อนเทลงในเครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) กำหนดให้ตั้งอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำคอมพาวด์ที่ได้มาบดและอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืนแล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานที่ได้ไปเก็บในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและค่าดัชนีการไหล เพื่อดูความเปราะและความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ในแต่ละสูตรก่อนนำสูตรที่ดีที่สุดไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนในการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

Sample	TPS (wt.%)	mPVOH (wt.%)	PHBV (phr)	PBAT (phr)	PBS (phr)	PBSA (phr)	Joncryl (phr)	Dicumyl peroxide (phr)
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5	70	30	5	-	-	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV10	70	30	10	-	-	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5	70	30	-	5	-	-	0.5	0.1

1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT10	70	30	-	10	-	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBS5	70	30	-	-	5	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBS10	70	30	-	-	10	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBSA5	70	30	-	-	-	5	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBSA10	70	30	-	-	-	10	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5	70	30	-	-	5	-	0.2	0.05
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS10	70	30	-	-	10	-	0.2	0.05
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBSA5	70	30	-	-	-	5	0.2	0.05
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBSA10	70	30	-	-	-	10	0.2	0.05

*สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น 1TPS7/mPVOH3R₁PHBV5

1 หมายถึง one-step process, TPS7 หมายถึง NT(G30MA0.1CA1.0EVA5) สัดส่วน 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, mPVOH3 หมายถึง PVOH(G20MA) สัดส่วน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr, และ Dicumyl peroxide 0.1 phr และ PHBV5 หมายถึงพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต 5.0 phr

ตอนที่ 3 ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท และพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)

นำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (สูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 2) ในอัตราส่วนต่าง ๆ มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 3.6 โดยเริ่มจากการผลิตเม็ดคอมพาวด์จากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) กำหนดให้อุณหภูมิอยู่ที่ 80-180 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 30 - 35 rpm ตามตารางที่ 3.7 แล้วทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) กำหนดให้อุณหภูมิ 165 - 180 องศาเซลเซียส, ความเร็วรอบ 40 - 60 rpm, ใช้ความเร็วของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์ม (nip roll

speed) เท่ากับ 2.6 m/min และความเร็วในการม้วนเก็บฟิล์ม (wind up roll speed) เท่ากับ 0.7 m/min ตามตารางที่ 3.8 จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงความร้อน, ลักษณะสัณฐานวิทยา, อัตราการละลายน้ำ (water solubility rate), การย่อยสลายโดยการหมัก และการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิด

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนในการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทีลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มผ่านเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)

Sample	TPS (wt.%)	mPVOH (wt.%)	PHBV (phr)	PBAT (phr)	PBS (phr)	Joncryl (phr)	Dicumyl peroxide (phr)
1TPS7/mPVOH3R ₁	70	30	-	-	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5	70	30	5	-	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5	70	30	-	5	-	0.5	0.1
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5	70	30	-	-	5	0.2	0.05

หมายเหตุ R₁ และ R₂

R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr, และ Dicumyl peroxide 0.1 phr และ R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr, และ Dicumyl peroxide 0.05 phr

ตารางที่ 3.7 อุณหภูมิและความเร็วรอบที่ใช้ในการผลิตเม็ดคอมพาวด์จากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

Sample	Temperature (°C)	Screw speed (rpm)
1TPS7/mPVOH3R ₁	90,170,170,170	30
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5		
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5		
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5	80,175,180,180	35

ตารางที่ 3.8 อุณหภูมิและความเร็วรอบที่ใช้ในการผลิตฟิล์มจากเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)

Sample	Temperature (°C)	Chill roll		screw speed (rpm)
		Temperature (°C)	speed (m/min)	
1TPS7/mPVOH3R ₁	165,165,170,175,180,180	20	1.0	60
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5	165,165,170,175,180,180	20	1.0	40
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5	165,165,170,175,180,180	20	1.0	50
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5	170,170,175,180,185,185	20	1.0	50

3.1 การทดสอบอัตราการละลายน้ำ (water solubility rate)

เริ่มจากตัดชิ้นงานฟิล์มให้มีขนาด 5x5 เซนติเมตร ที่มีความหนาประมาณ 200±50 ไมครอน ซึ่งก่อนทำการทดสอบจะต้องนำชิ้นงานฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานฟิล์มไปชั่งน้ำหนัก (W_1) หลังจากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มไปแช่ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทำการกวนที่ความเร็วเบอร์ 3 และที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบตามกำหนดเวลาจากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มที่แช่ในน้ำกลั่นไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และใช้กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำกระดาษกรองที่มีชิ้นงานอยู่ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานอีกครั้ง (W_2) เพื่อคำนวณอัตราการละลายน้ำ (%) ตามสมการ

$$\text{อัตราการละลายน้ำ} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \% \quad (\text{อุณหภูมิ } 80 \text{ องศาเซลเซียส เป็นเวลา } 15 \text{ นาที})$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่น้ำ (กรัม) และน้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ (กรัม) ตามลำดับ [33]

3.2. การทดสอบการย่อยสลายโดยการหมัก

เริ่มจากตัดชิ้นงานฟิล์มให้มีขนาด 5x5 เซนติเมตร ที่มีความหนาประมาณ 200±50 ไมครอน ซึ่งก่อนทำการทดสอบจะต้องนำชิ้นงานฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มที่ถูกบรรจุในถุงตาข่ายไปชั่งน้ำหนัก (W_1) แล้วนำถุงตาข่ายไปหมักในถุงปุ๋ยซึ่ง

ทำการเตรียมปุ๋ยหมักจากชุมชนบ้านหัวอ่าว 37/1 ม.5 บางช้าง อ.สามพราน จังหวัดนครปฐม 73110 (13.702870971976838, 100.19857203302745) ที่ความลึก 5 เซนติเมตร จากนั้นทำการเก็บถุงขึ้นงานฟิล์มทุก ๆ 7 วัน เป็นเวลา 28 วัน โดยทำการรดน้ำอาทิตย์ละ 1 ครั้งปริมาณ 2 ลิตรต่อครั้ง ณ เวลา 9:00 น. แล้วนำถุงตาข่ายที่บรรจุขึ้นงานฟิล์มมาทำความสะอาดโดยการปิดปุ๋ยหมักออกจนหมด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก (W_2) เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย (%) ตามสมการดังนี้ และทำการวัดอุณหภูมิ ความชื้น และค่า pH ในปุ๋ยหมักด้วยในทุก ๆ 7 วันที่เก็บขึ้นงาน

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

โดยที่ W_2 คือ น้ำหนักขึ้นงานฟิล์มเริ่มต้น และ W_1 คือ น้ำหนักขึ้นงานฟิล์มที่เหลือ ณ เวลาที่เก็บตามลำดับ [34]

3.3 การทดสอบการย่อยสลายในน้ำทะเลเปิด

เริ่มจากตัดขึ้นงานฟิล์มให้มีขนาด 5x5 เซนติเมตร ที่มีความหนาประมาณ 200 ± 50 ไมครอน ซึ่งก่อนทำการทดสอบจะต้องนำขึ้นงานฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นงานฟิล์มที่ถูกบรรจุในถุงตาข่ายไปชั่งน้ำหนัก (W_1) แล้วนำถุงตาข่ายที่บรรจุขึ้นงานฟิล์มไปแช่น้ำทะเลที่ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งอ่าวไทยฝั่งตะวันออก 309 ม.1 ต.ปากน้ำกระแสะ อ.แกลง จ.ระยอง 21170 (12.698820386279044, 101.70362309068943) ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 บริเวณ ดังนี้ บริเวณที่ขึ้นงานลอยอยู่ในน้ำทะเล (open sea water) และบริเวณที่ขึ้นงานถูกฝังในป่าชายเลน (mangrove field) จากนั้นทำการเก็บถุงขึ้นงานฟิล์มทุก ๆ 7 วัน เป็นเวลา 28 วัน แล้วนำถุงตาข่ายที่บรรจุขึ้นงานฟิล์มมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก (W_2) เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย (%) ตามสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

โดยที่ W_2 คือ น้ำหนักขึ้นงานฟิล์มเริ่มต้น และ W_1 คือ น้ำหนักขึ้นงานฟิล์มที่เหลือ ณ เวลาที่เก็บตามลำดับ [34]

3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์

3.5.1 การทดสอบทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC)

นำเม็ดคอมพาวด์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ และเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blending ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปริมาณ 8-10 มิลลิกรัม มาศึกษาสมบัติทางความร้อนในโหมดการทดสอบแบบ Nonisothermal แบบ Heat-Cool-Heat โดยขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1-3 จะเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 - 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที การหล่อเย็นจะลดอุณหภูมิจาก 200 - 20 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการหล่อเย็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 - 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.5.2 การศึกษาลักษณะการละลายด้วยเทคนิค Molau test

นำเม็ดคอมพาวด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 แบบเติมและไม่เติม reactive agent ปริมาณ 0.25 กรัม ไปละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปริมาณ 15 มิลลิลิตร และทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลและศึกษาลักษณะความเข้ากันได้

3.5.3 การทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเครื่อง Melt Flow Indexer (MFI)

นำเม็ดคอมพาวด์ 1TPS7/mPVOH3 แบบเติมและไม่เติม reactive agent และที่มีการเติม PHBV, PBS, PBSA และ PBAT มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำมาหาค่าดัชนีการไหลด้วยเครื่อง melt flow indexer ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่ใช้กด 2.16 กิโลกรัม และใช้เวลาในการ Pre-heat 5 นาที

3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM)

นำเม็ดคอมพาวด์ 1TPS7/mPVOH3 แบบเติมและไม่เติม reactive agent และที่มีการเติม PHBV, PBS, PBSA และ PBAT มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปเป็น dog bone ตามมาตรฐาน ASTM D638 ขนาด Type V ที่มีความยาวเกจ (gauge length) 17.5 มิลลิเมตร และมีความหนาประมาณ 3.00 มิลลิเมตร และฟิล์มที่มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) ตามมาตรฐาน ASTM D882 ที่มีความยาวเกจ (gauge length) 127 มิลลิเมตร และมีระยะตัวจับ 25.4 มิลลิเมตร และชิ้นงานมีความหนาประมาณ 20 ± 50 ไมครอน กำหนดให้ใช้อัตราเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที และขนาดโหลดเซลล์ 5 กิโลนิวตัน

3.5.5 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

นำชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 แบบเติมและไม่เติม reactive agent และที่มีการเติม PHBV, PBS, PBSA และ PBAT มาแช่ในไนโตรเจนเหลวจนแข็งตัว จากนั้นนำไปทุบให้เกิดการแตกหัก (cryo-fracture) และนำชิ้นงานจากการทดสอบสมบัติเชิงกล (tensile fracture) ตามลำดับ ไปเคลือบด้วยแพลตินัม ก่อนนำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยใช้กำลังขยาย 2500 และ 5000 เท่า ตามลำดับ

3.5.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)

นำเม็ดคอมพาวด์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ และเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ มาบดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำคอมพาวด์มาบดและนำไปผสมกับ KBr ในอัตราส่วน 1:9 เมื่อผสมเข้ากันดีแล้ว จึงนำไปอัดเป็นแผ่นกลมด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิคนขนาดเล็ก แล้วนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer กำหนดให้สแกนในช่วงความยาวคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$, resolution 4 cm^{-1} และทำการสแกน 64 รอบต่อครั้งตามลำดับ

3.6 สัญลักษณ์และตัวย่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.6.1 TPS ย่อมาจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับกลีเซอรอล 30 phr, กรดซิตริก 1.0 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท 5 phr หรือ NT(G30MA0.1CA1.0EVA5)

3.6.2 mPVOH ย่อมาจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับกลีเซอรอล 20 phr และมาเลอิก แอนไฮไดรด์ปริมาณ 0.5 phr หรือ PVOH(G20MA)

3.6.3 J และ DCP ย่อมาจาก reactive agent ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่ง J หมายถึง Joncryl® ADR-4300 และ DCP หมายถึงไดควิมิว เปอร์ออกไซด์ และตัวเลขที่ตามหลัง J และ DCP คือปริมาณสารที่เติมลงไปมีหน่วยเป็น phr เช่น J0.5 หมายถึงเติม Joncryl ปริมาณ 0.5 phr เป็นต้น

3.6.4 1TPS7/mPVOH3 ย่อมาจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ในอัตราส่วน 70 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และจำนวนตัวเลขด้านหน้าพอลิเมอร์เบลนด์แสดงถึงวิธีการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ 2 แบบ คือการผสมแบบ one-step process และ two-step process ดังนั้น เลข 1 คือการเตรียมแบบ one-step process และเลข 2 คือการเตรียมแบบ two-step process

ตามลำดับ เช่น 1TPS7/mPVOH3 หมายถึงการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process ที่มีเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นต้น

3.6.5 1TPS7/mPVOH3R ย่อมาจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีการเตรียมแบบ one-step process และมีการเติม reactive agent

3.6.6 1TPS7/mPVOH3R₁ ซึ่ง R₁ ย่อมาจาก reactive agent ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดให้ R₁ คือพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม Joncryl ปริมาณ 0.5 phr และมี DCP ปริมาณ 0.1 phr เป็นต้น

3.6.7 1TPS7/mPVOH3R₂ ซึ่ง R₂ ย่อมาจาก reactive agent ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดให้ R₂ คือพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม Joncryl ปริมาณ 0.2 phr และมี DCP ปริมาณ 0.05 phr เป็นต้น

3.6.8 1TPS7/mPVOH3R₁PHBV5 ซึ่ง PHBV ย่อมาจากชนิดพอลิเมอร์ที่เติมลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเติมพอลิเมอร์ลงไป 4 ชนิด คือ PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ตามลำดับ และจำนวนตัวเลขด้านหลังพอลิเมอร์แสดงถึงปริมาณพอลิเมอร์ที่เติมลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเติมพอลิเมอร์ลงไปเพียง 5 หรือ 10 phr เท่านั้น เช่น 1TPS7/mPVOH3R₁PHBV5 พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีการเตรียมแบบ one-step process และมีการเติม Joncryl ปริมาณ 0.5 phr และมี DCP ปริมาณ 0.1 phr และเติม PHBV ปริมาณ 5 phr ตามลำดับ



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถขึ้นรูปได้ง่ายนั้นจะต้องทำการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกด้วยการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีนไวโนลอะซิเตท ซึ่งพลาสติกไซเซออร์และสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกครั้งนี้ถูกอ้างอิงมาจากงานวิจัยที่ผ่านมาของนายกวิทร์ กิรติพิณี [24] และนายกิตวรา โดคุเวียง [32] ตามลำดับ และศึกษาการเบลนด์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงในเทอร์โมพลาสติก เพราะจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและยืดหยุ่นสูงสามารถเข้ากับเทอร์โมพลาสติกได้ดีและใช้พลาสติกไซเซออร์ตัวเดียวกับเทอร์โมพลาสติกได้ แต่การเบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนที่มีเทอร์โมพลาสติกต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะต้องใช้อุณหภูมิในการผสมที่ไม่สูงมากนัก เพื่อป้องกันการไหม้ของเทอร์โมพลาสติกและการระเหยของกลีเซอรอลในองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติก แต่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีอุณหภูมิหลอมผลึกที่ 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงศึกษาการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่างๆ และมาเลอิก แอนไฮไดรด์ เพื่อลดอุณหภูมิหลอมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีผลต่อการขึ้นรูปของพอลิเมอร์เบลนด์ แต่พอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความว่องไวต่อความชื้นและความหนืดในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป จึงศึกษาการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซักซิเนตและพอลิบิวทิลีน ซักซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยขั้นตอนงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของการเตรียมเทอร์โมพลาสติกด้วยการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีนไวโนลอะซิเตทในอัตราส่วนต่าง ๆ [24, 32] และศึกษาการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ และเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr เพื่อลดอุณหภูมิหลอมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน และศึกษาการเบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แบบเติมและไม่เติม reactive agent โดยทำการผสมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step และ two-step process จากนั้นนำไปทดสอบค่าดัชนีการไหล สมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยา

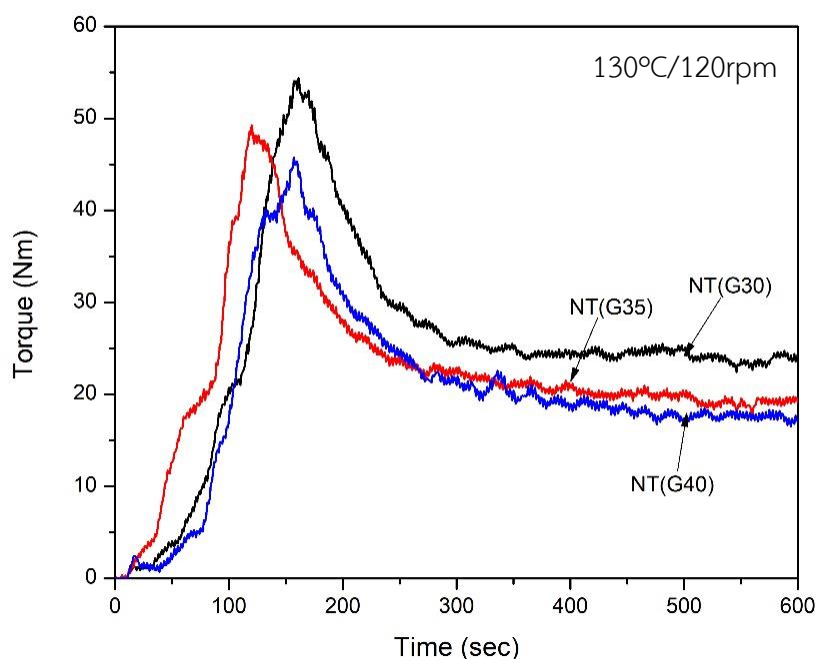
ตอนที่ 2 ศึกษาการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท, พอลิบิวทิลีนซักซิเนต และพอลิบิวทิลีน ซักซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และสมบัติเชิงกลและดัชนีการไหล

ตอนที่ 3 ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผ่านเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงความร้อน, ลักษณะสัณฐานวิทยา, อัตราการละลายน้ำ (water solubility rate), การย่อยสลายโดยการหมัก และการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบปิด

4.1 ศึกษาผลของการเตรียมคอมพาวด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

4.1.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และศึกษาสมบัติเชิงกล

4.1.1.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมกลีเซอรอล

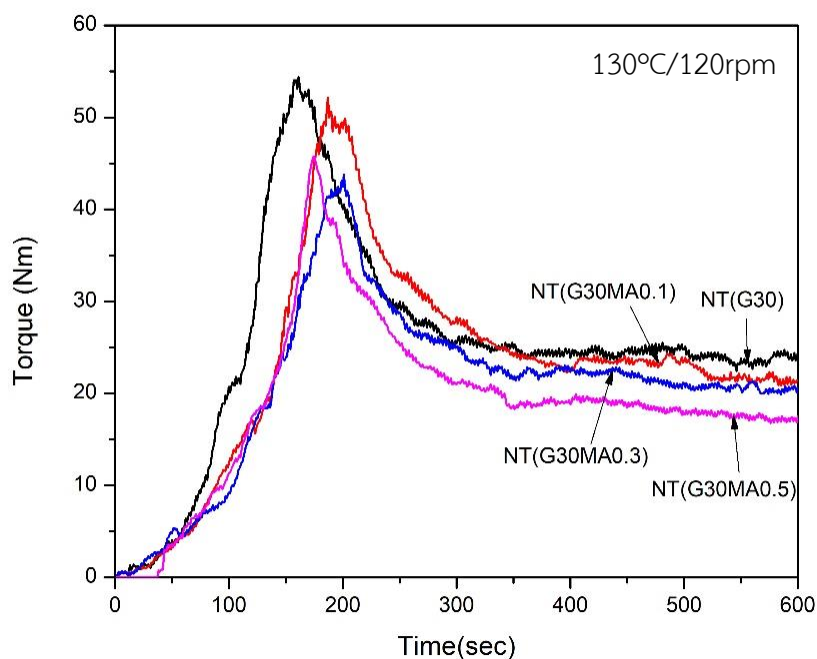


ภาพที่ 4.1 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 30, 35 และ 40 phr

จากภาพที่ 4.1 แสดงค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ จากเครื่องผสมภายในแบบปิด กำหนดให้อุณหภูมิการผสม 130 องศาเซลเซียสและความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที เมื่อเติมกลีเซอรอลลงในแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 30 phr ปรากฏว่าค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีนั้นค่อนข้างคงที่ที่

24.2 Nm ซึ่งแสดงถึงความเสถียรในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล แต่เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่มากขึ้นเป็น 35 และ 40 phr ตามลำดับ ปรากฏว่าค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีที่มีค่าลดลงไปถึง 19.3 และ 17.5 Nm ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาคอมพาวด์เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่มากขึ้นเป็น 35 และ 40 phr ที่ได้จากเครื่องผสมภายในแบบปิด ปรากฏว่าคอมพาวด์มีความยืดหยุ่นคล้ายยางหรือมีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลในงานวิจัยนี้ คือ 30 phr [35, 36] แต่การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 30 phr ยังมีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมที่สูงมาก ส่งผลให้ไม่เหมาะสมในการนำไปแปรรูป

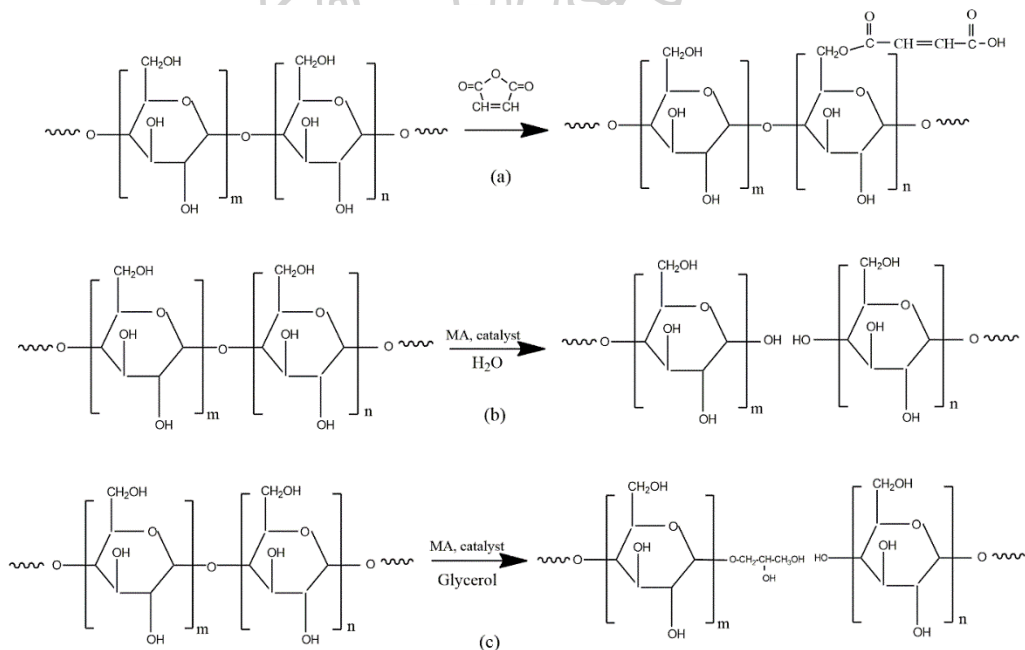
4.1.1.2. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากการเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์



ภาพที่ 4.2 ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากการเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ในอัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr

จากภาพที่ 4.2 แสดงค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของมาเลอิกแอนไฮ

ไตรด์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนเดียวกัน ปรากฏว่าเมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีลดลง ดังนี้ 21.3, 20.7 และ 17.3 Nm ตามลำดับ เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับกลีเซอรอลและความชื้นภายในโครงสร้างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลได้ โดยผ่านปฏิกิริยา glucosidation และ hydrolysis ตามลำดับ [24, 32] แสดงให้เห็นว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถตัดสายโซ่โมเลกุลและเป็นตัวเร่งในการตัดสายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลได้ ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะถูกแสดงในภาพที่ 4.3 [32] ดังนั้นความหนืดและค่าแรงบิดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในระหว่างกระบวนการผสมจึงมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนายกิตติวรา โตะคูเวียง [32] ได้ทำการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วน ๆ ผ่านเครื่องผสมภายในแบบปิด ปรากฏว่าเมื่อทำการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมลดลง เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเข้าไปตัดสายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลได้



ภาพที่ 4.3 (a) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (b) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับความชื้นภายในโครงสร้างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และ (c) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับกลีเซอรอลตามลำดับ [32]

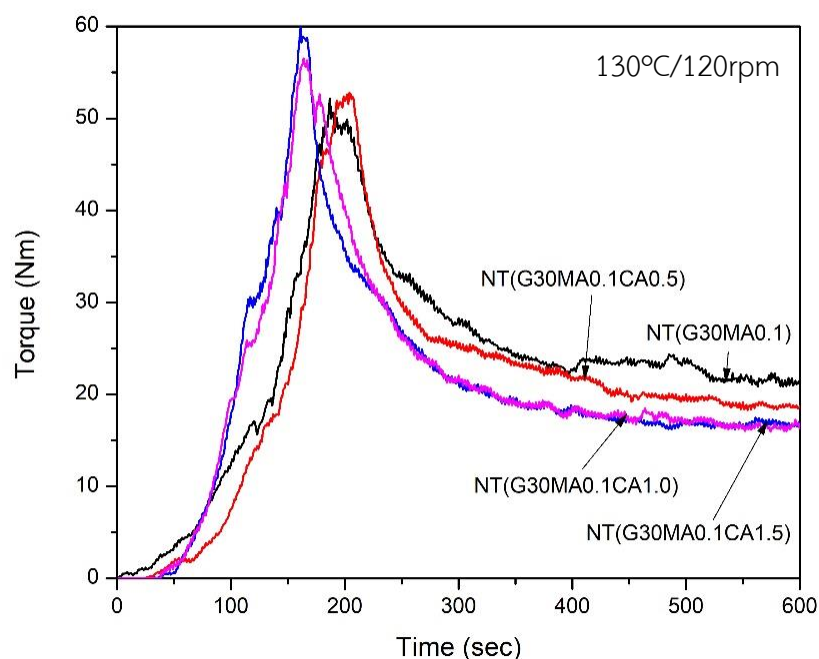
4.1.1.3. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากการเติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์

ตารางที่ 4.1 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr และมาเลอิก แอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
NT(G30)	924 ± 36	18.8 ± 1.5	2.2 ± 0.1
NT(G30MA0.1)	826 ± 25	18.0 ± 0.8	2.6 ± 0.1
NT(G30MA0.2)	692 ± 76	16.9 ± 0.6	3.1 ± 0.4
NT(G30MA0.3)	557 ± 77	15.9 ± 0.5	4.4 ± 0.3

จากตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ปรากฏว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น มีค่า tensile strength ลดลงตามลำดับ ดังนี้ 18.0, 16.9 และ 15.9 MPa เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus ปรากฏว่ามีค่า Young's modulus ลดลงเมื่อมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า elongation at break ปรากฏว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นมีค่า elongation at break เพิ่มขึ้นเป็น 2.6, 3.1 และ 4.4% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่โพลีเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ลดลง

4.1.1.4. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมกรดซิตริก



ภาพที่ 4.4 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมกรดซิตริกในอัตราส่วน 0.5, 1.0 และ 1.5 phr

จากภาพที่ 4.4 แสดงค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.1 phr และกรดซิตริกในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรดซิตริกที่มีการเติมกลีเซอรอล และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนเดียวกัน ปรากฏว่าเมื่อมีการเติมกรดซิตริกในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีลดลง ดังนี้ 18.7, 16.6 และ 16.2 Nm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากรดซิตริกสามารถลดความหนืดของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ได้

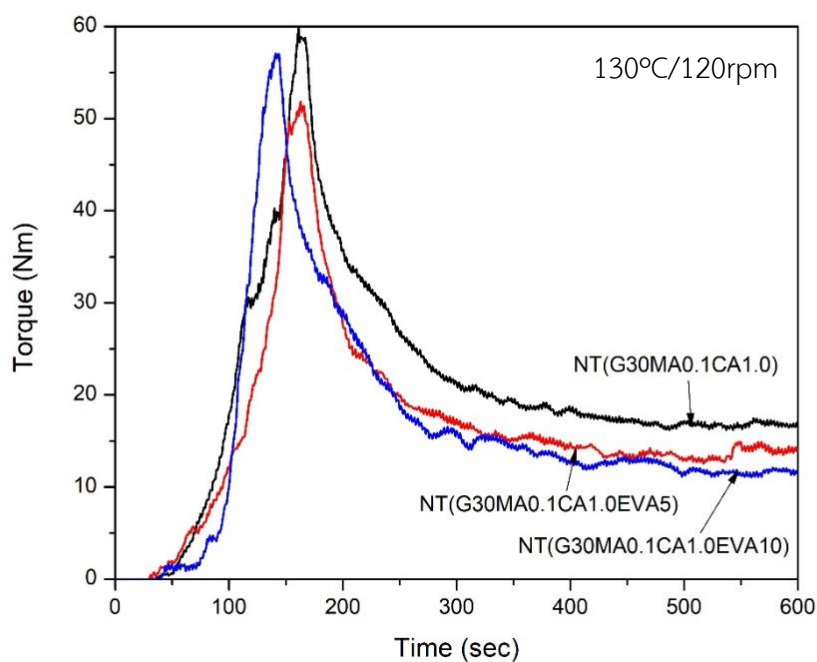
4.1.1.5 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมกรดซิตริก

ตารางที่ 4.2 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr และกรดซิตริกในอัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
NT(G30MA0.1)	826 ± 25	18.0 ± 0.8	2.6 ± 0.1
NT(G30MA0.1CA0.5)	787 ± 75	18.7 ± 0.8	2.8 ± 0.1
NT(G30MA0.1CA1.0)	742 ± 74	18.0 ± 1.1	2.9 ± 0.2
NT(G30MA0.1CA1.5)	682 ± 99	16.4 ± 1.4	3.2 ± 0.8

จากตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr และกรดซิตริกในอัตราส่วน 0.5, 1.0 และ 1.5 phr ปรากฏว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.1 phr และกรดซิตริกในอัตราส่วนที่มากขึ้น มีค่า tensile strength และค่า Young's modulus ลดลง แต่มีค่า elongation at break เพิ่มขึ้นตามลำดับ [37-39] ทำให้ทราบว่ากรดซิตริกสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ได้ และจากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.1 phr และกรดซิตริกในอัตราส่วน 1.0 phr นั้นทำให้ความหนืดในระหว่างกระบวนการผสมลดลงในขณะที่ค่า tensile strength แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนายกวิทร์ กิรติพินิจ [24] ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิกแอนไฮไดรด์, เอทิลีน ไวนิล อะซิเตทและกรดซิตริกด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิด และสมบัติเชิงกลปรากฏว่าเมื่อมีการเติมกรดซิตริกในปริมาณที่มากขึ้น จะมีค่า tensile strength และค่า Young's modulus ลดลง แต่มีค่า elongation at break เพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดซิตริกสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ร่วมกับกลีเซอรอลให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ได้

4.1.1.6. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท



ภาพที่ 4.5 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วน 0.5 และ 1.0 phr

จากภาพที่ 4.5 แสดงค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr, กรดซิติริก 1.0 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทที่มีการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ และกรดซิติริกในอัตราส่วนเดียวกัน ปรากฏว่าเมื่อมีการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีลดลง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเอทิลีน ไวนิล อะซิเตททำหน้าที่เป็น processing aid ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ไหลได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ปรากฏว่าค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

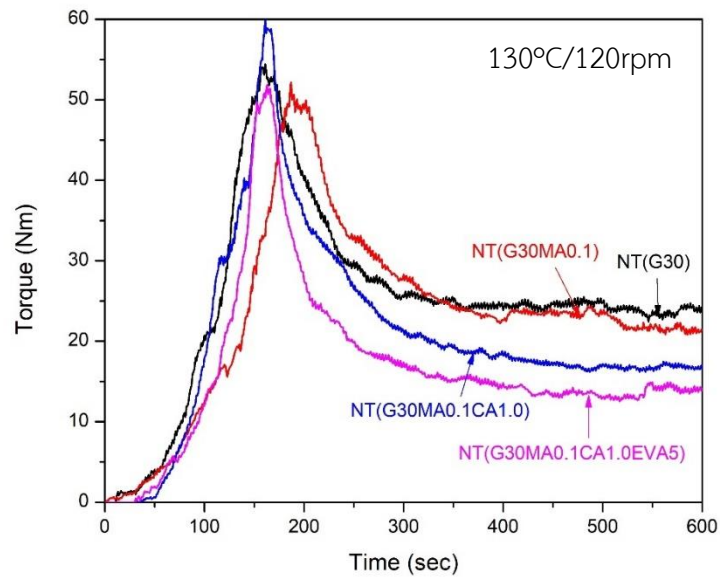
4.1.1.7. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท

ตารางที่ 4.3 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr, กรดซิตริก 1.0 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนต่าง ๆ

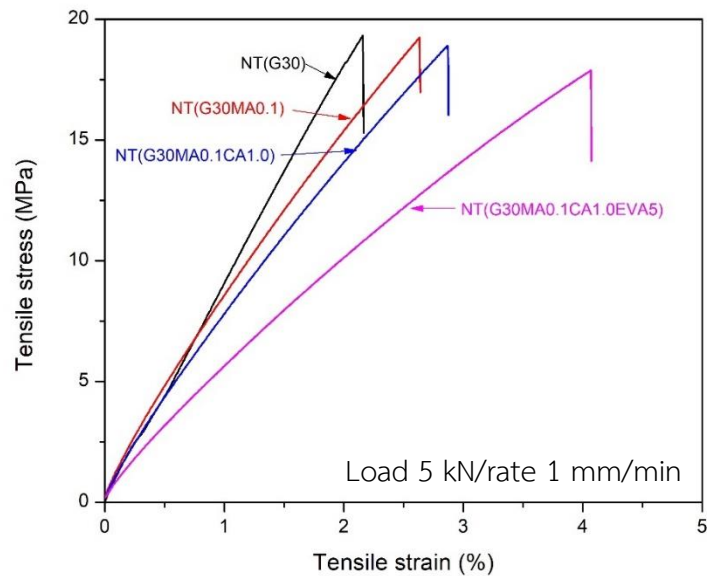
Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
NT(G30MA0.1CA1.0)	742 ± 74	18.0 ± 1.1	2.9 ± 0.2
NT(G30MA0.1CA1.0EVA5)	668 ± 30	19.8 ± 0.4	4.0 ± 0.2
NT(G30MA0.1CA1.0EVA10)	647 ± 41	19.2 ± 0.9	4.2 ± 0.5

จากตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr, กรดซิตริก 1.0 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วน 5.0 และ 10 phr ปรากฏว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.1 phr, กรดซิตริก 1.0 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนที่มากขึ้น มีค่า tensile strength เพิ่มขึ้น ดังนี้ 19.8 และ 19.2 MPa ตามลำดับ แต่มีค่า Young's modulus ลดลงตามลำดับเมื่อมีการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทมีค่า tensile strength และค่า Young's modulus ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ แต่การเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์และกรดซิตริกเข้าไปในเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ด้วยนั้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์กับเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทเข้ากันได้ดีมากขึ้นจึงมีค่า tensile strength เพิ่มขึ้น [24, 32] และมีค่า elongation at break เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ไม่มีการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท [40]

ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ในงานวิจัยนี้ คือ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.1 phr, กรดซิตริก 1.0 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท 5.0 phr ตามลำดับ และกำหนดให้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 30 phr, มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.1 phr, กรดซิตริก 1.0 phr และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท 5.0 phr นี้ว่า TPS ซึ่งค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมจะถูกแสดงในภาพที่ 4.6 และสมบัติเชิงกลจะถูกแสดงในภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 ดังนี้



ภาพที่ 4.6 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสแตร์ชจากการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท



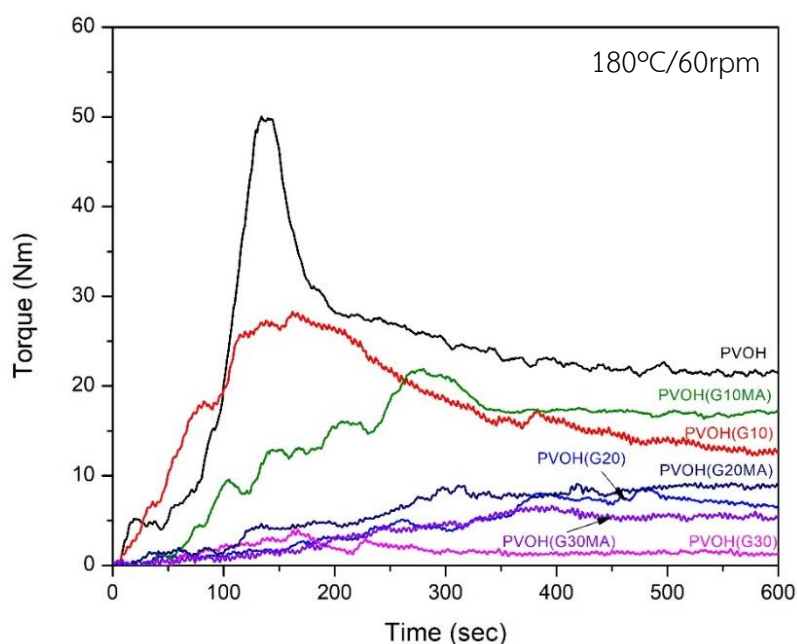
ภาพที่ 4.7 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสแตร์ชที่มีการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท

ตารางที่ 4.4 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
NT(G30)	924 ± 36	18.8 ± 1.5	2.2 ± 0.1
NT(G30MA0.1)	826 ± 25	18.0 ± 0.8	2.6 ± 0.1
NT(G30MA0.1CA1.0)	742 ± 74	18.0 ± 1.1	2.9 ± 0.2
NT(G30MA0.1CA1.0EVA5)	668 ± 30	19.8 ± 0.4	4.0 ± 0.2

4.1.2 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล

4.1.2.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์



ภาพที่ 4.8 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ แต่อย่างไรก็ตามต้องใช้อุณหภูมิในการผสมที่ไม่สูงมากนัก เพื่อป้องกันการไหม้ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และการระเหยของกลีเซอรอลในองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ แต่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้นมีอุณหภูมิหลอมผลึกประมาณ 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงอุณหภูมิหลอมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และทำการทดสอบดังต่อไปนี้ จากภาพที่ 4.8 แสดงถึงค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ แบบเติมและไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที ปรากฏว่าเมื่อเติมกลีเซอรอลในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมลดลงตามลำดับ เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ส่งผลให้ความหนืดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีลดลงตามลำดับ ค่าแรงบิดที่ใช้ในระหว่างกระบวนการผสมจึงลดลงตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาคอมพาวด์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากเครื่องผสมภายในแบบปิดที่มีการเติมกลีเซอรอลมากกว่า 20 phr คอมพาวด์ที่ได้จะมีความยืดหยุ่นคล้ายยางหรือมีอุณหภูมิล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง แต่เมื่อเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr ปรากฏว่าค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในอัตราส่วนกลีเซอรอลเดียวกัน แสดงให้เห็นว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้ความหนืดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดนี้เป็นผลมาจากการที่มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ ทำให้ประสิทธิภาพการเป็นพลาสติกไซเซอร์ของกลีเซอรอลลดลงตามลำดับ [41]

4.1.2.2 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิกแอนไฮไดรด์

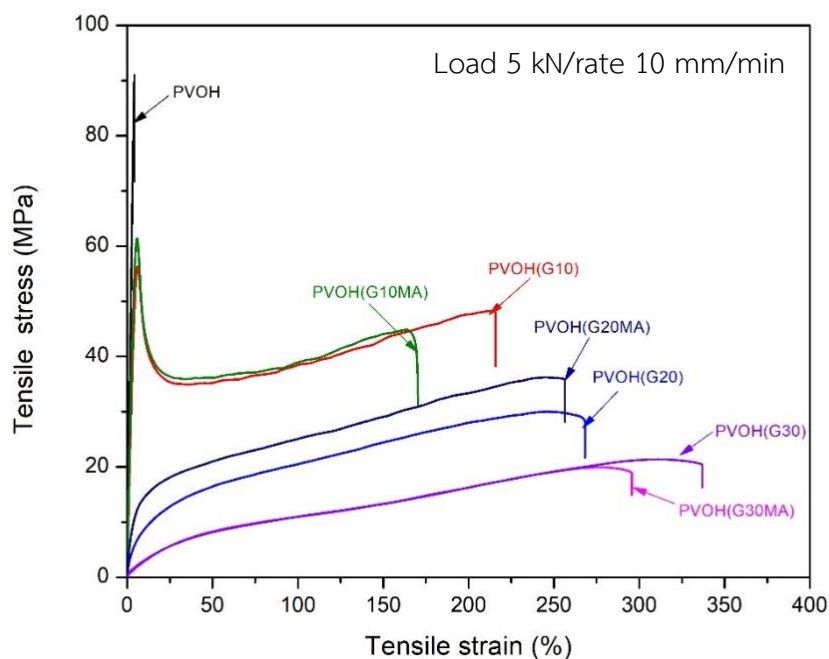
ตารางที่ 4.5 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr

sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PVOH	2,195 ± 148	97.0 ± 4.52	4.91 ± 0.44
PVOH(G10)	1,347 ± 91.1	49.0 ± 4.46	198 ± 11
PVOH(G20)	194.3 ± 27.2	29.0 ± 0.63	249 ± 20
PVOH(G30)	23.41 ± 1.52	20.7 ± 1.01	308 ± 20
PVOH(G10MA)	1,570 ± 80.5	60.0 ± 5.06	164 ± 31
PVOH(G20MA)	302.7 ± 34.5	34.5 ± 1.63	256 ± 19
PVOH(G30MA)	27.24 ± 1.72	19.9 ± 0.72	288 ± 12

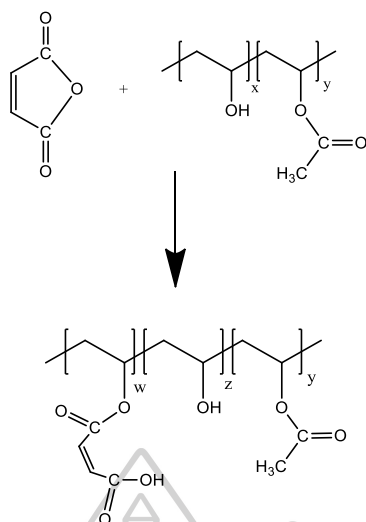
จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ แบบเติมและไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ปรากฏว่าเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีพฤติกรรมการแตกหักที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนดังนี้ ชิ้นงาน PVOH เกิดการแตกหักแบบ brittle และเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10 phr ที่มีการเติมและไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr ชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบ ductile แต่เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่มากขึ้นเป็น 20 และ 30 phr ที่มีการเติมและไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr ชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบ elastomer ตามลำดับ และจากตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ แบบเติมและไม่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปรากฏว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น มีค่า tensile strength และค่า Young's modulus ลดลง แต่มีค่า elongation at break มากขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hongguang D. และคณะ [42] ทำการทดสอบ

สมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมพลาสติกไซเซออร์ประเภทคาร์โบไฮเดรตหลายชนิด ปรากฏว่าเมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซออร์ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์ที่เติมลงไปสามารถลดแรงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยืดหยุ่นได้มากขึ้น

แต่เมื่อพิจารณากรณีที่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr ในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ ปรากฏว่ามีค่า tensile strength และค่า Young's modulus มากกว่าแต่มีค่า elongation at break น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กลีเซอรอลในอัตราส่วนเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผ่านปฏิกิริยา esterification ได้ [16] ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.9 กราฟ stress-strain ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr



ภาพที่ 4.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับมาเลอิก แอนไฮไดรด์ [16]

4.1.2.3 ศึกษาผลสมบัติทางความร้อนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์

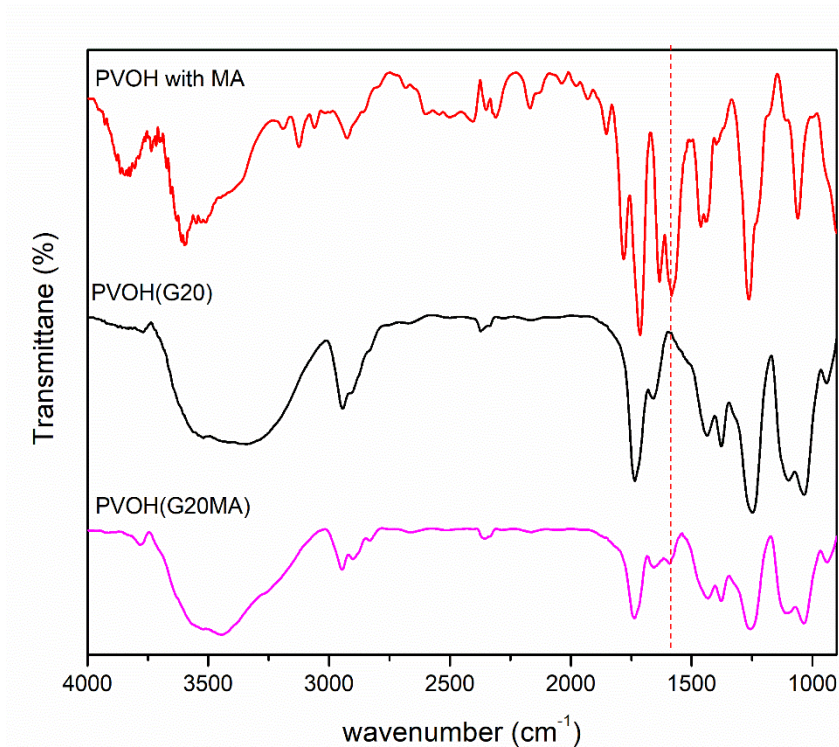
ตารางที่ 4.6 ค่า T_g , T_c และ T_m ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr แบบเต็มและไม่เต็มมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr

Sample	Cooling scan	2 nd heating scan	
	T_c , (PVOH) (°C)	T_g , (PVOH) (°C)	T_m , (PVOH) (°C)
PVOH	149.0	56.7	179.9
PVOH(G10)	137.2	38.2	171.6
PVOH(G20)	132.1	30.4	170.0
PVOH(G30)	122.7	22.6	165.3
PVOH(G10MA)	131.5	43.9	170.9
PVOH(G20MA)	110.3	34.1	164.0
PVOH(G30MA)	105.3	30.1	158.5

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry ที่ตั้งสภาวะการทดสอบแบบ Heat-Cool-Heat ที่อุณหภูมิ 20 – 200 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 5 องศาต่อนาที และจากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ แบบเติมและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ซึ่งจะถูกแสดงในตารางที่ 4.6 ปรากฏว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะมีค่า T_g , T_c และ T_m ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลมาจากการเป็นพลาสติกไซเซอร์ของกลีเซอรอล ทำให้พันธะไฮโดรเจนในสายโซ่โมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อยู่ห่างกันมากขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปนั้นสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนสายโซ่โมเลกุลเกิดการสั่นไหวและเลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดการจัดเรียงตัวของผลึกได้ยากขึ้น ส่งผลให้ใช้อุณหภูมิในการเกิดผลึกและอุณหภูมิในการหลอมผลึกลดลงตามลำดับ [9, 43]

แต่เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr ปรากฏว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่าง ๆ และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะมีค่า T_g มากกว่าแต่มีค่า T_c และ T_m น้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างมาเลอิกแอนไฮไดรด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นไปได้ว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในระหว่างสายโซ่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ เมื่อได้รับความร้อนสายโซ่โมเลกุลเกิดการสั่นไหวและเลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น และทำให้ผลึกเกิดการจัดเรียงตัวได้ยากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิในการเกิดผลึกและอุณหภูมิในการหลอมผลึกน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์แต่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่เท่ากันตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 20 phr และมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 0.5 phr และกำหนดให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 20 phr และมีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 0.5 phr นี้ว่า mPVOH

4.1.2.4 ศึกษาผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอลและมาเลอิก แอนไฮไดรด์

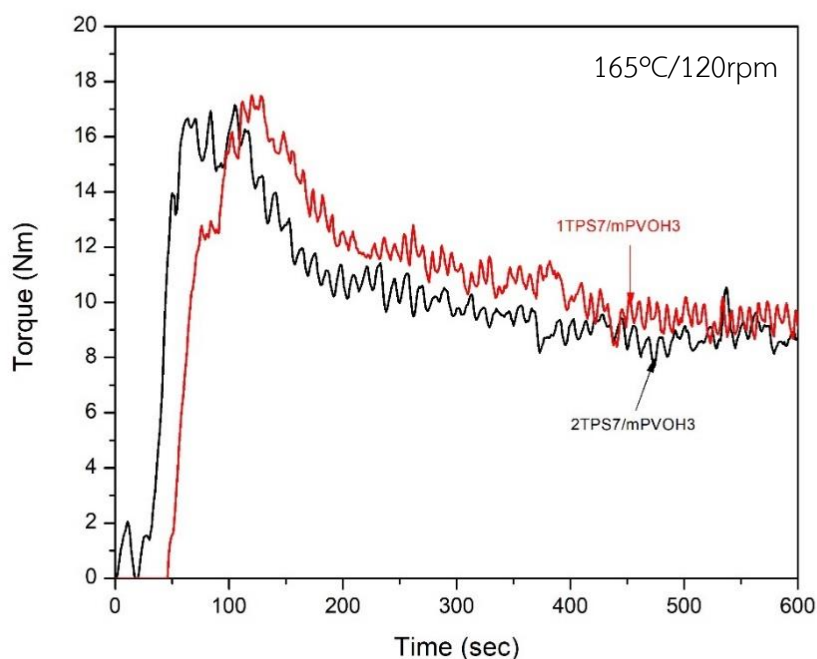


ภาพที่ 4.11 กราฟที่ได้จากเครื่อง FTIR ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 20 phr แบบเต็มและไม่เติมมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 0.5 phr

จากนั้นนำ PVOH(G20MA) หรือ mPVOH ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มายืนยันว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ด้วยเทคนิค FTIR และจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.11 กำหนดให้ PVOH with MA หมายถึงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่คลุกกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปรากฏว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วน 20 phr แบบเต็มมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.5 phr นั้นจะปรากฏเลขคลื่นที่ 1590 ซึ่งแสดงถึงพีก C=C stretching ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ แสดงให้เห็นว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ และทำให้ PVOH(G20MA) หรือ mPVOH ที่เตรียมได้นั้นมีความริแอกทีฟมากขึ้น เนื่องจากการเปิดวงออกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลิกและพันธะคู่เกิดขึ้นตามลำดับ

4.1.3. เปรียบเทียบการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process

4.1.3.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process

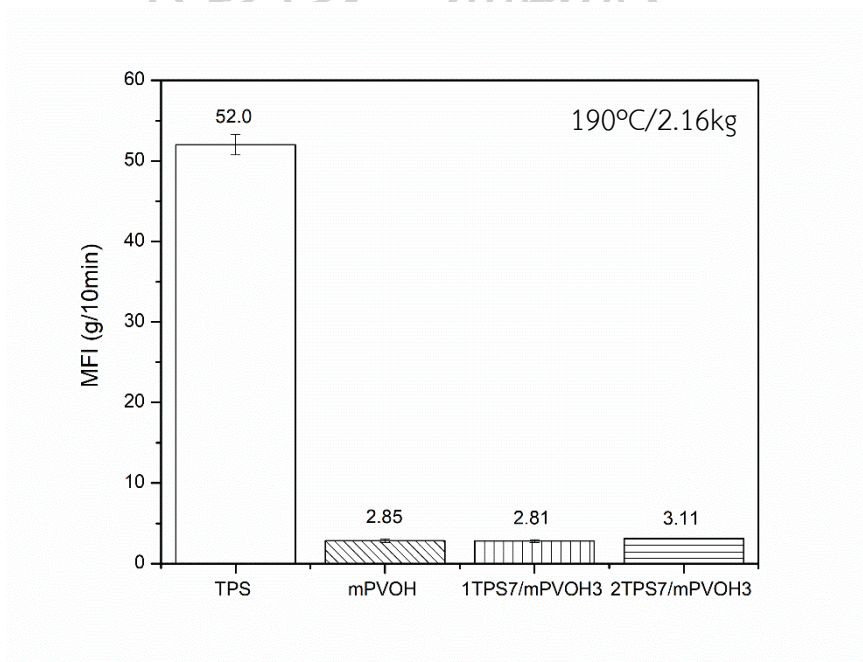


ภาพที่ 4.12 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process

จากผลการทดลองก่อนหน้านี้จะเห็นว่ามีการปรับความหนืดของ TPS และ mPVOH ให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมที่ได้จากเครื่องผสมภายในแบบปิดในช่วง 10 นาทีที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสและความเร็วรอบ 120 เป็นเวลา 10 นาทีเท่ากับ 5.68 และ 9.14 Nm ตามลำดับ เนื่องจากต้องการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความเข้ากันได้ดี โดยอ้างอิงจากทฤษฎีเทเลย์ กล่าวคือ พอลิเมอร์เมทริกซ์ และเฟสกระจายควรมีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน หรือควรมีค่า viscosity ratio เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เฟสกระจายสามารถขาด (break down) เป็นทรงกลมได้ง่ายที่สุด แต่หากความหนืดของเฟสกระจายมากหรือน้อยเกินไปจะทำให้แรงเฉือนในเครื่องผสมแบบปิดไม่เพียงพอ ทำให้เฟสกระจายสามารถขาด (break down) ออกได้ [44, 45] และในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process ซึ่งการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step และ two-

step process นั้นมีความแตกต่างกัน คือ การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process จะเริ่มจากผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล, มาเลอิก แอนไฮไดรด์, กรดซิตริก และเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทตามลำดับ แล้วนำมาผสมกับ mPVOH ได้โดยตรงเลย แต่การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ two-step process นั้นจะต้องทำการผสมและเตรียม TPS ก่อนด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิด แล้วค่อยนำมาผสมกับ mPVOH ตามลำดับ เพื่อเลือกระบบในการผสมที่ดีที่สุดในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend ต่อไป ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend ในเครื่องผสมภายในแบบปิดที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที แบบ one-step และ two-step process ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.12 ซึ่งมีสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรากฏว่าการผสม TPS7/mPVOH3 ที่มีการเตรียมแบบ one-step และ two-step process ไม่ส่งผลต่อค่าแรงบิดในระหว่างการผสม

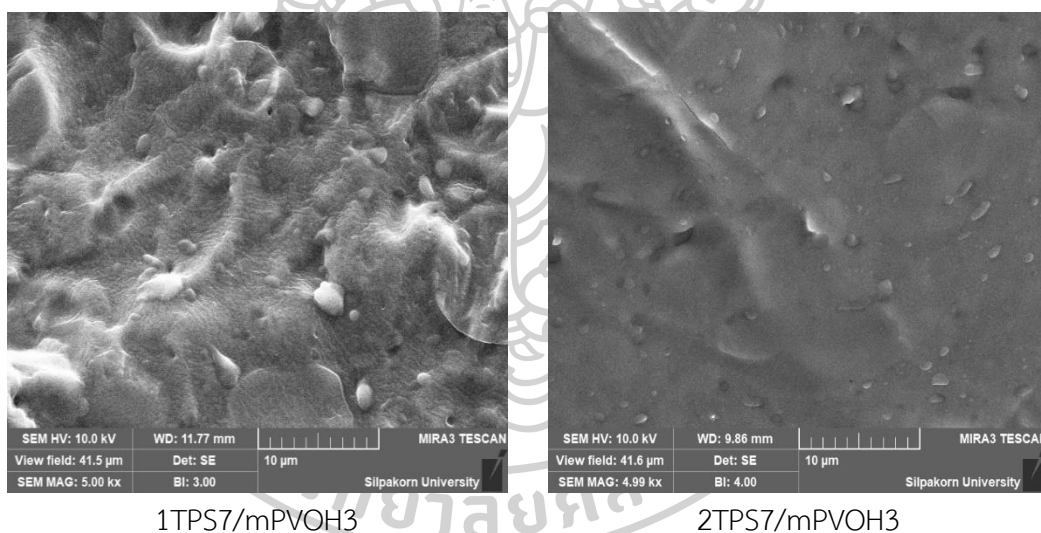
4.1.3.2 ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process



ภาพที่ 4.13 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process

จากภาพที่ 4.13 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process กำหนดให้ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส, โหลดหนัก 2.16 กิโลกรัม ปรากฏว่า TPS มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 52.0 g/10min และ mPVOH มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 2.85 g/10min ทำให้ทราบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน TPS มีค่าดัชนีการไหลมากกว่า mPVOH ทำให้ทราบว่า TPS มีความหนืดต่ำกว่าและไหลได้ง่ายกว่า mPVOH แต่เมื่อทำการพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process ปรากฏว่าการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ TPS7/mPVOH3 แบบ one-step process และ two-step process มีค่าดัชนีการไหลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4.1.3.3. ศึกษาผลลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process



ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process

จากภาพที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process ที่กำลังขยาย 5000 เท่าปรากฏว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบเปราะ โดยชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเตรียมแบบ one-step process ยังคงปรากฏเม็ดแป้งมันสำปะหลังอยู่บางส่วน โดยเม็ดแป้งจะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 12-14 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดของอนุภาคแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ [46] จึงอาจเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิในการผสมด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิดที่อุณหภูมิ 165 องศา

เซลเซียส และความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที ยังไม่พอสำหรับการทำให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ได้ทั้งหมด

เมื่อพิจารณาในกรณีพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเตรียมแบบ two-step process ไม่ปรากฏเม็ดแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากการเตรียมแบบ two-step process ต้องมีการเตรียม TPS ด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิดก่อนนำมาผสมกับ mPVOH ทำให้เม็ดแป้งผ่านความร้อนและแรงเฉือนถึง 2 ครั้ง ทำให้เม็ดแป้งได้รับแรงเฉือนและความร้อนมากกว่าการผสมแบบ one-step process ชิ้นงานจึงปรากฏเม็ดแป้งน้อยกว่าการเตรียมแบบ one-step process ทำให้ทราบว่า การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ two-step process มีความเข้ากันระหว่างเฟสได้ดีกว่าเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process

4.1.3.4 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 แบบ one-step และ two-step process

ตารางที่ 4.7 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
TPS	668 ± 30	19.8 ± 0.4	3.99 ± 0.26
1TPS7/mPVOH3	749 ± 27	22.0 ± 0.7	9.14 ± 0.72
2TPS7/mPVOH3	770 ± 32	23.4 ± 0.4	8.79 ± 1.6
mPVOH	312 ± 34	34.5 ± 1.5	258 ± 19

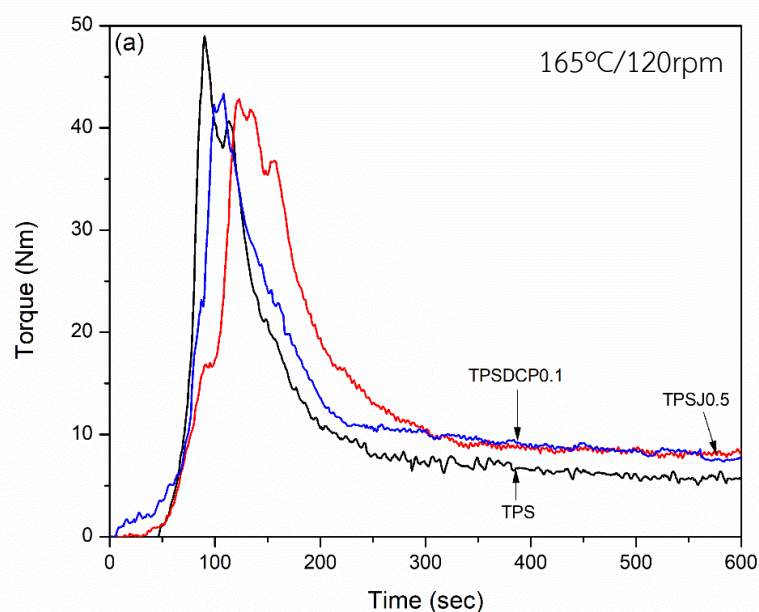
จากตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend แบบ one-step และ two-step process ปรากฏว่าเมื่อทำการเติม mPVOH ในสัดส่วน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงใน TPS แสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะผสม mPVOH ไปเพียง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเท่านั้น แต่ทำให้ค่า tensile strength และค่า elongation at break เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 ที่มีการเตรียมแบบ one-step และ two-step process ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเตรียมแบบ one-step และ two-

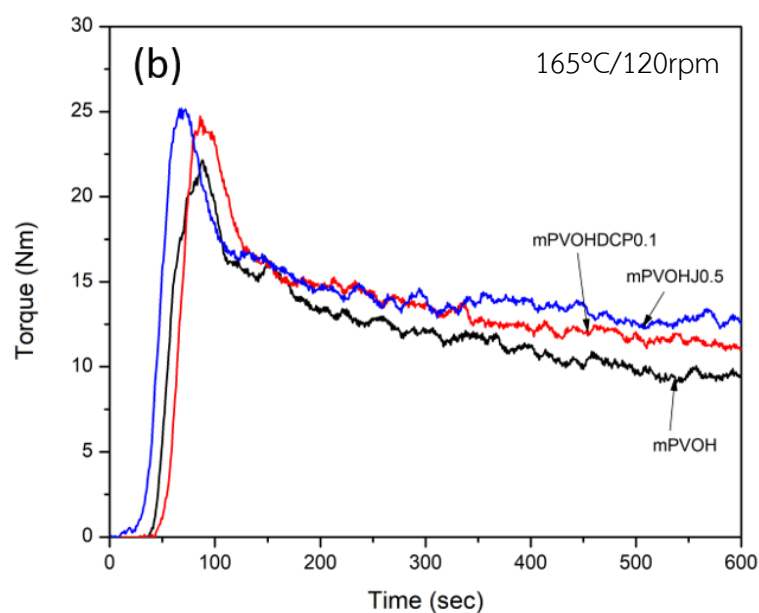
step process มีค่า elongation at break ใกล้เคียงกัน แต่มีค่า Young's modulus และค่า tensile strength แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเตรียมแบบ two-step process มีค่า Young's modulus และค่า tensile strength สูงกว่าที่มีการเตรียมแบบ one-step process เนื่องจากการเตรียมแบบ two-step process จะต้องมีการเตรียม TPS ก่อนจะนำไปผสมกับ mPVOH ทำให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ได้มากกว่าการเตรียมแบบ one-step process ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์เกิดการผสมเข้ากันได้ดีและกลายเป็นเฟสต่อเนื่องได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อได้รับแรง พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS7/mPVOH3 สามารถเกิดการส่งผ่านแรงระหว่างเฟสได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะฐานวิทยาเนื่องจากการเตรียมแบบ two-step process ไม่ปรากฏเม็ดแป้งหลงเหลืออยู่เลยเมื่อเปรียบเทียบกับเตรียมแบบ one-step process ตามลำดับ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process เนื่องจากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process มีสมบัติที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับการเตรียมแบบ two-step process แต่มีขั้นตอนในการเตรียมง่ายกว่าการเตรียมแบบ two-step process ตามลำดับ

4.1.4 อิทธิพลของ reactive agent ต่อ TPS และ mPVOH

4.1.4.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียม TPS และ mPVOH ที่มีการเติม reactive agent

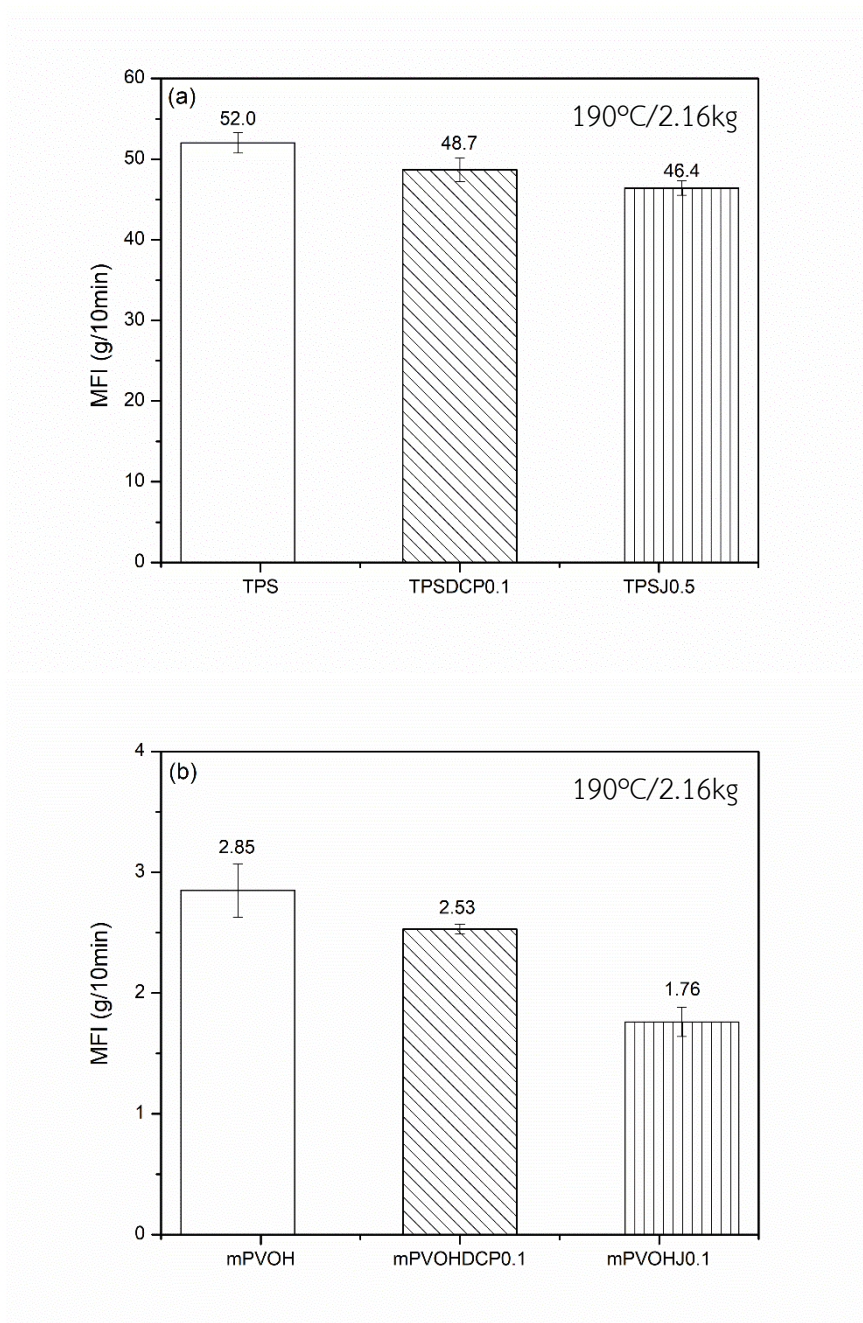




ภาพที่ 4.15 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียม (a) TPS ที่มีการเติม reactive agent และ (d) mPVOH ที่มีการเติม reactive agent

จากภาพที่ 4.15(a) แสดงค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียม TPS ที่มีการเติม reactive agent ในเครื่องผสมภายในแบบปิดที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที ปรากฏว่า TPS ที่มีการเติม Joncryl และ peroxide มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมเพิ่มขึ้น ทำให้ทราบว่า reactive agent ทำให้ TPS มีความหนืดและค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อพิจารณาในกรณีการผสม mPVOH ที่มีการเติม reactive agent ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.15(b) ปรากฏว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่มีการเติม reactive agent ลงใน TPS ดังนั้น Joncryl และ peroxide ทำให้ mPVOH มีความหนืดมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า Joncryl และ peroxide ที่เติมลงไปนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล และพันธะคู่ภายในโครงสร้าง TPS และ mPVOH ได้ผ่านปฏิกิริยา condensation และ free radical ตามลำดับ ทำให้ความหนืดและค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมเพิ่มขึ้น

4.1.4.2 คีษามผลค่าดัชนีการไหลของ TPS และ mPVOH ที่มีการเติม reactive agent



ภาพที่ 4.16 ค่าดัชนีการไหลของ a) TPS ที่มีการเติม reactive agent และ (d) mPVOH ที่มีการเติม reactive agent

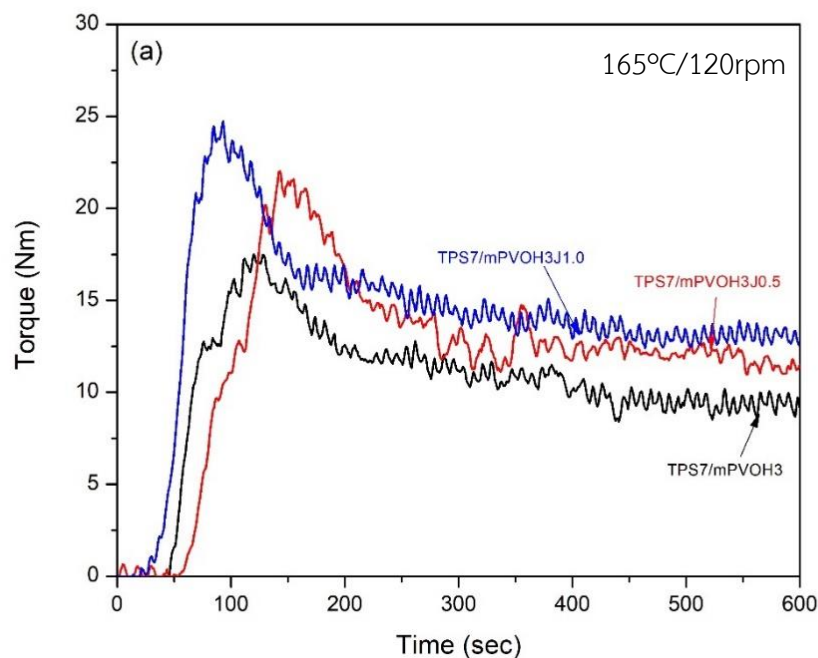
จากภาพที่ 4.16(a) แสดงค่าดัชนีการไหลของ TPS ที่มีการเติม reactive agent กำหนดให้ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และไหลดหนัก 2.16 กิโลกรัม ปรากฏว่า TPS และ mPVOH มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 52.0 และ 2.85 g/10min ตามลำดับ และเมื่อมีการเติม Joncryl และ peroxide ลง

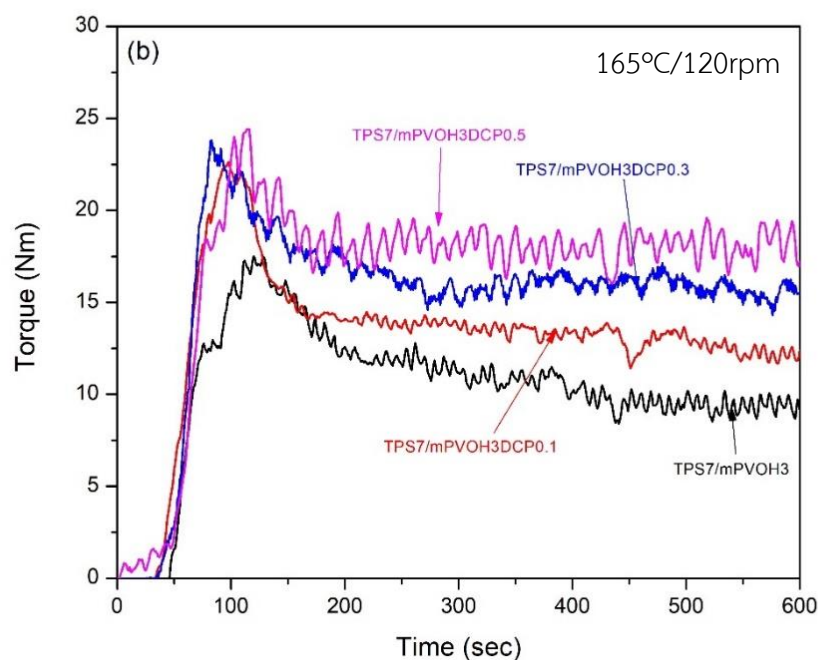
ใน TPS และ mPVOH จะมีค่าดัชนีการไหลลดลงตามลำดับ ทำให้ทราบว่า Joncryl และ peroxide ที่เติมลงใน TPS และ mPVOH ส่งผลให้ TPS และ mPVOH มีความหนืดมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมดังนี้ เมื่อมีการเติม Joncryl และ peroxide ลงใน TPS และ mPVOH ส่งผลให้มีค่าแรงบิดและความหนืดในระหว่างกระบวนการผสมมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบ TPS และ mPVOH ที่ไม่มีการเติม reactive agent ตามลำดับ

ดังนั้นพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในงานวิจัยนี้จะทำการเติม reactive agent ลงไป ดังนี้ Joncryl และ peroxide ตามลำดับ เพื่อศึกษาและเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ต่อไป

4.1.5 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 และศึกษาสมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยาในระบบ reactive blend แบบ one-step process

4.1.5.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process

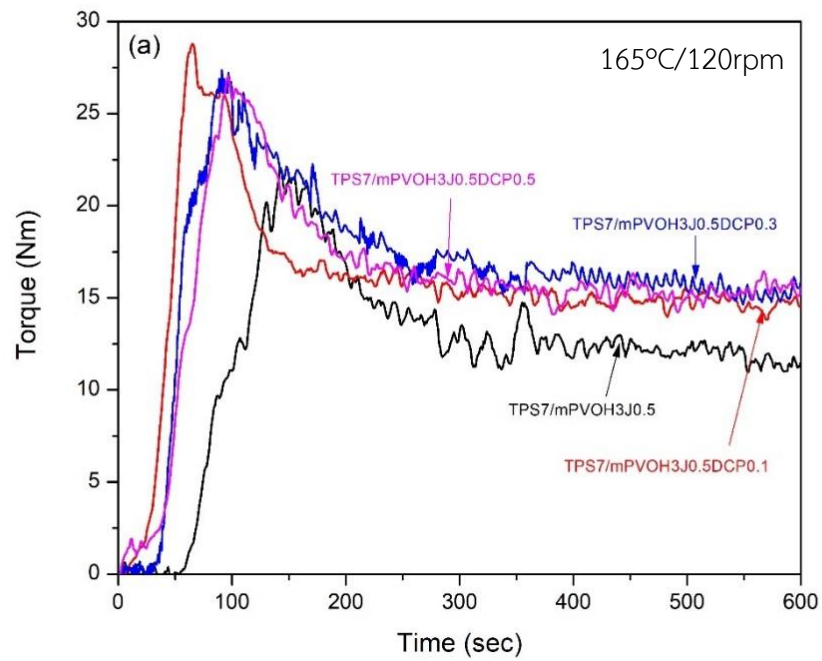


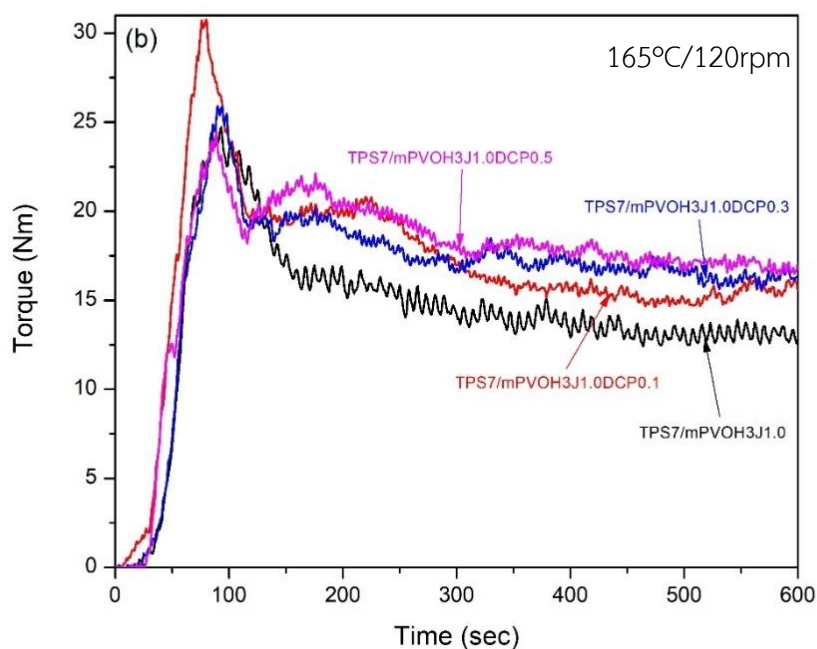


ภาพที่ 4.17 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend (a) ที่มีการเติม Joncryl ในอัตราส่วน 0.5 และ 1.0 phr และ (b) ที่มีการเติม dicumyl peroxide ในอัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr

จากภาพที่ 4.17 แสดงค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl ในอัตราส่วน 0.5 และ 1.0 phr และ peroxide ในอัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr ตามลำดับ ในเครื่องผสมภายในแบบปิดที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที แบบ one-step process ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม Joncryl ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีเพิ่มขึ้นจาก 9.22 Nm ในระบบ non-reactive blend ไปเป็น 12.8 และ 13.5 Nm ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติม peroxide ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาทีมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีที่มีการเติม Joncryl ลงไป ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 9.22 Nm ในระบบ non-reactive blend ไปเป็น 11.7, 14.5 และ 18.2 Nm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า Joncryl และ peroxide ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 เพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมที่ใช้จึงมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาชนิดของ

reactive agent ปรากฏว่า peroxide ส่งอิทธิพลต่อความหนืดของ TPS และ mPVOH มากกว่า Joncryl ตามลำดับ

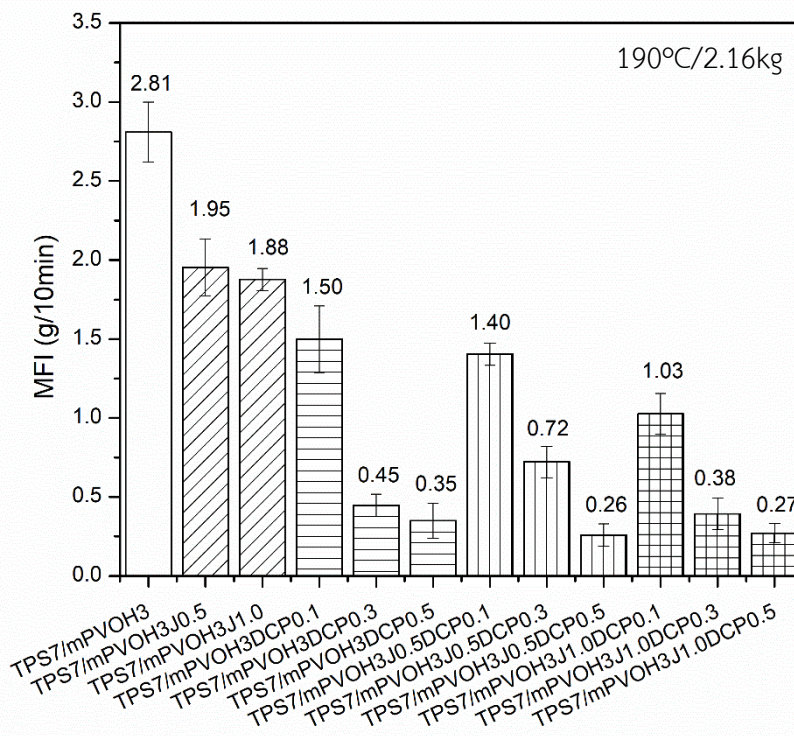




ภาพที่ 4.18 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend (a) ที่มีการเติม Joncryl คงที่ที่ 0.5 phr และมีปริมาณ dicumyl peroxide แตกต่างกัน และ (b) มีการเติม Joncryl คงที่ที่ 1.0 phr และมีปริมาณ dicumyl peroxide แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาในกรณีพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.5 และ 1.0 phr และ peroxide ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.18 ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม Joncryl คงที่ที่ 0.5 phr และมีปริมาณ peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาที เพิ่มขึ้นจาก 12.8 Nm ในระบบ non-reactive blend ไปเป็น 15.7, 15.8 และ 15.7 Nm ตามลำดับ และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม Joncryl คงที่ที่ 1.0 phr และมีปริมาณ peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมในช่วง 10 นาที เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนี้ 17.4, 16.3 และ 13.6 Nm ตามลำดับ ทำให้ทราบว่า reactive agent สามารถเพิ่มความหนืดและค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมให้กับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ได้

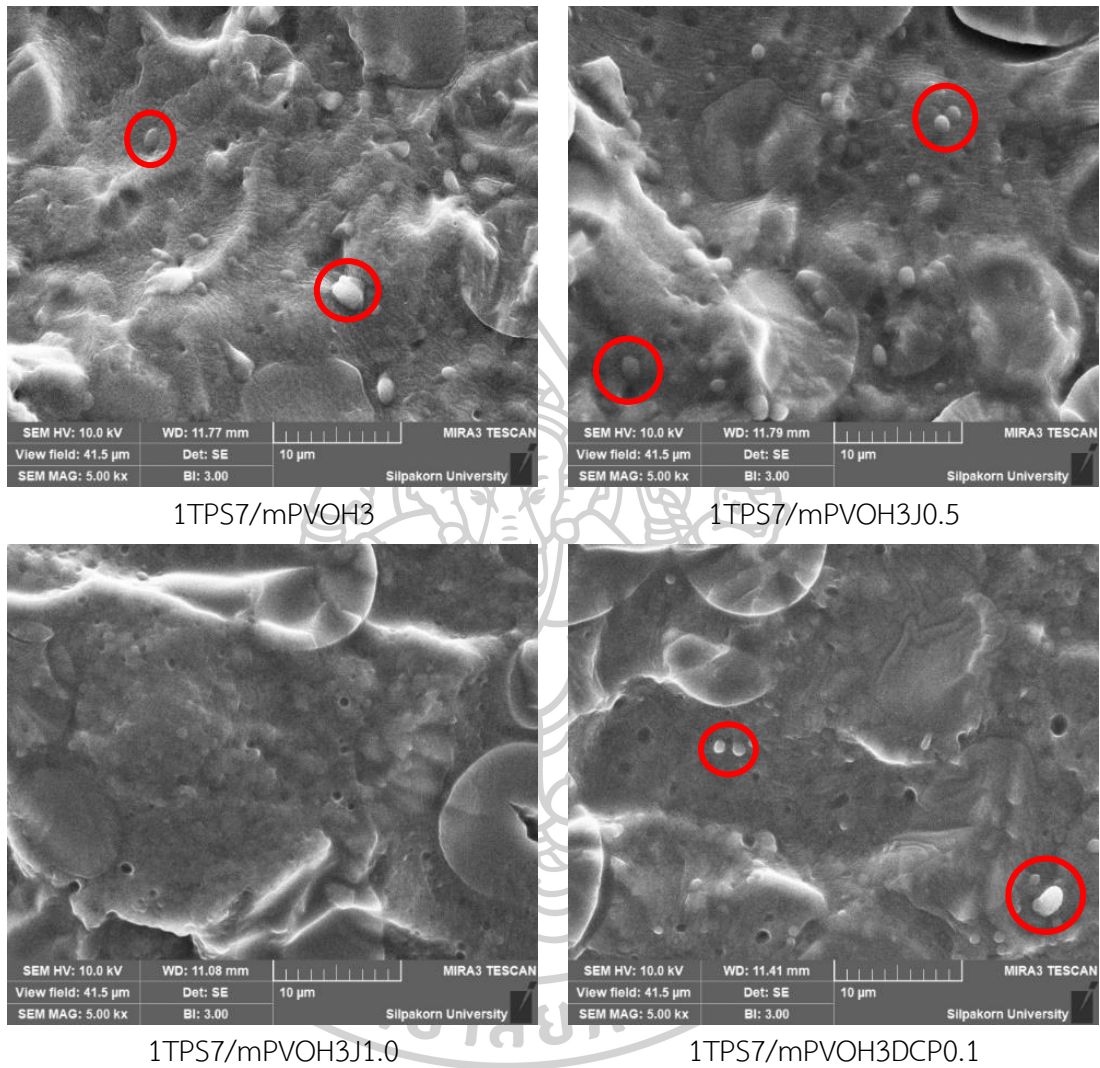
4.1.5.2 ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process

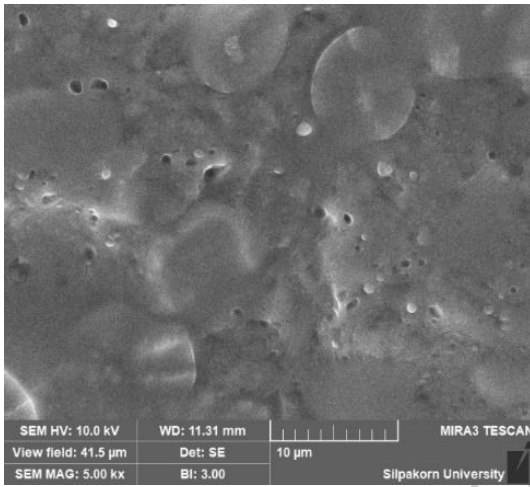


ภาพที่ 4.19 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend ที่มีการเติม Joncyl และ dicumyl peroxide ในอัตราส่วนต่าง ๆ

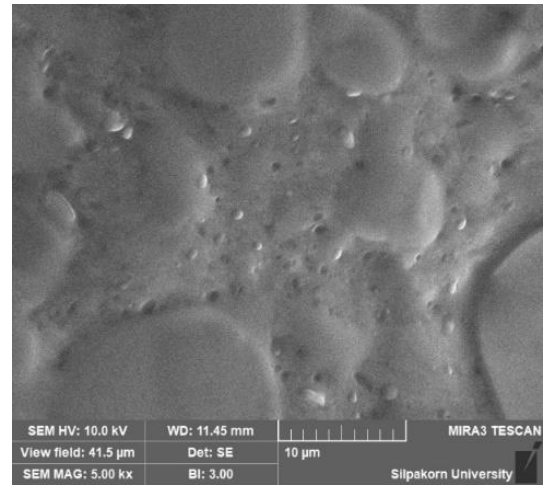
จากภาพที่ 4.19 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncyl และ peroxide ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน กำหนดให้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และโหลดหนัก 2.16 กิโลกรัม ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 2.81 g/10min และเมื่อมีการเติม reactive agent ในปริมาณมากขึ้นจะมีค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงตามลำดับ ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความหนืดมากขึ้นและไหลได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมเมื่อมีการเติม reactive agent มากขึ้น ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมมีค่ามากขึ้นตามลำดับเช่นกัน

4.1.5.3. ศึกษาผลลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process

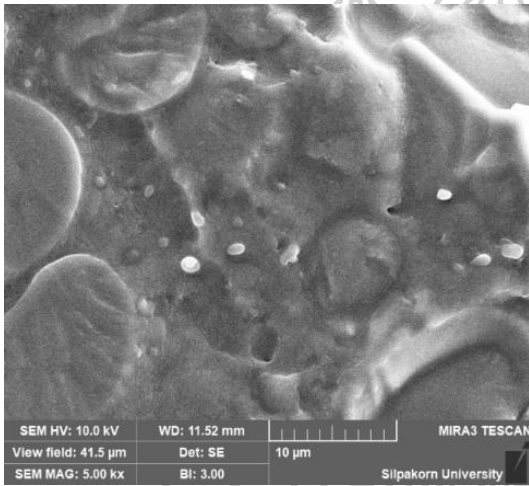




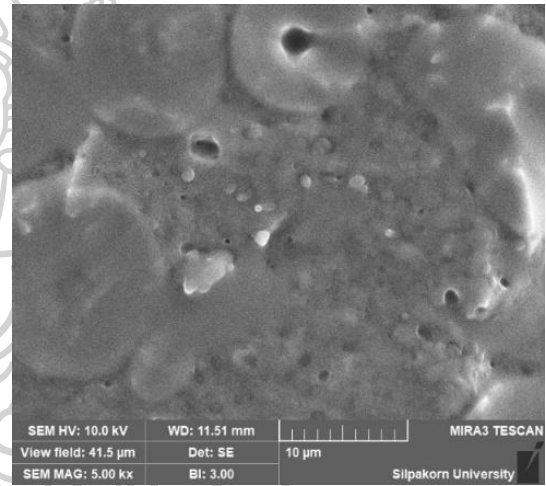
1TPS7/mPVOH3DCP0.3



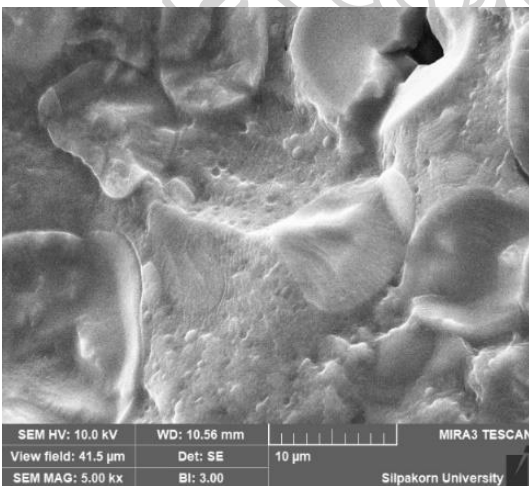
1TPS7/mPVOH3DCP0.5



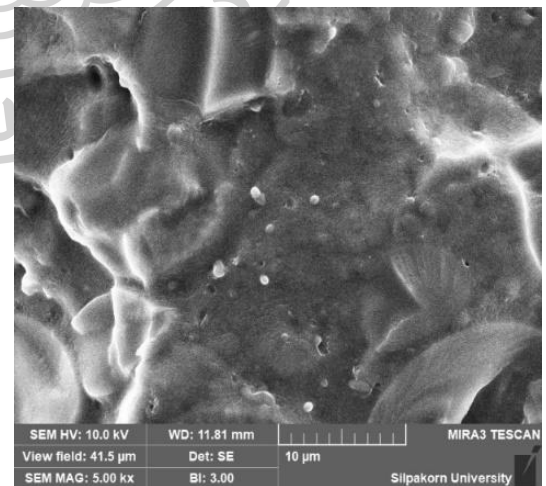
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.1



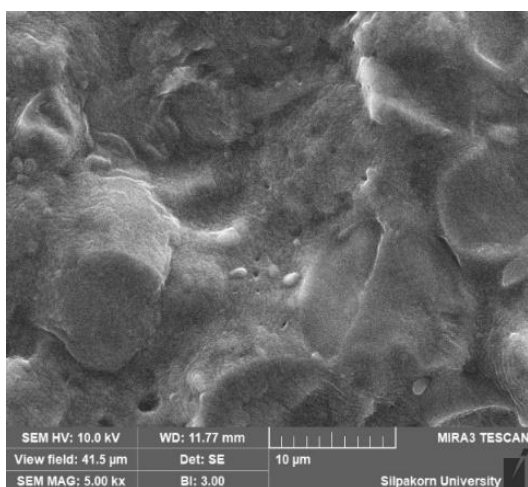
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.3



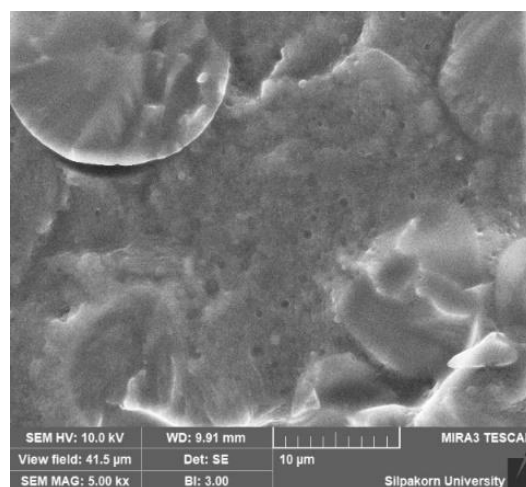
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.5



1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.1



1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.3



1TPS7/mPVOHJ1.0DCP0.5

ภาพที่ 4.20 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS70/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl และ dicumyl peroxide ในอัตราส่วนที่ต่างกััน แบบ one-step process

จากภาพที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl และ peroxide ในอัตราส่วนที่ต่างกัันแบบ one-step process ที่ได้จากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชิ้นงานจากการทดสอบสมบัติเชิงกล (tensile facture) ปรากฏว่ารอยแตกหักของชิ้นงานเป็นผิวเรียบซึ่งแสดงการแตกหักแบบเปราะ และพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend และ reactive blend ยังคงปรากฏเม็ดของแป้งมันสำปะหลังอยู่ ซึ่งกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานและมีขนาดไม่เท่ากัน โดยมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12-14 ไมครอน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิในการผสมด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิดที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที ยังไม่พอสำหรับการทำให้เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ได้ทั้งหมด

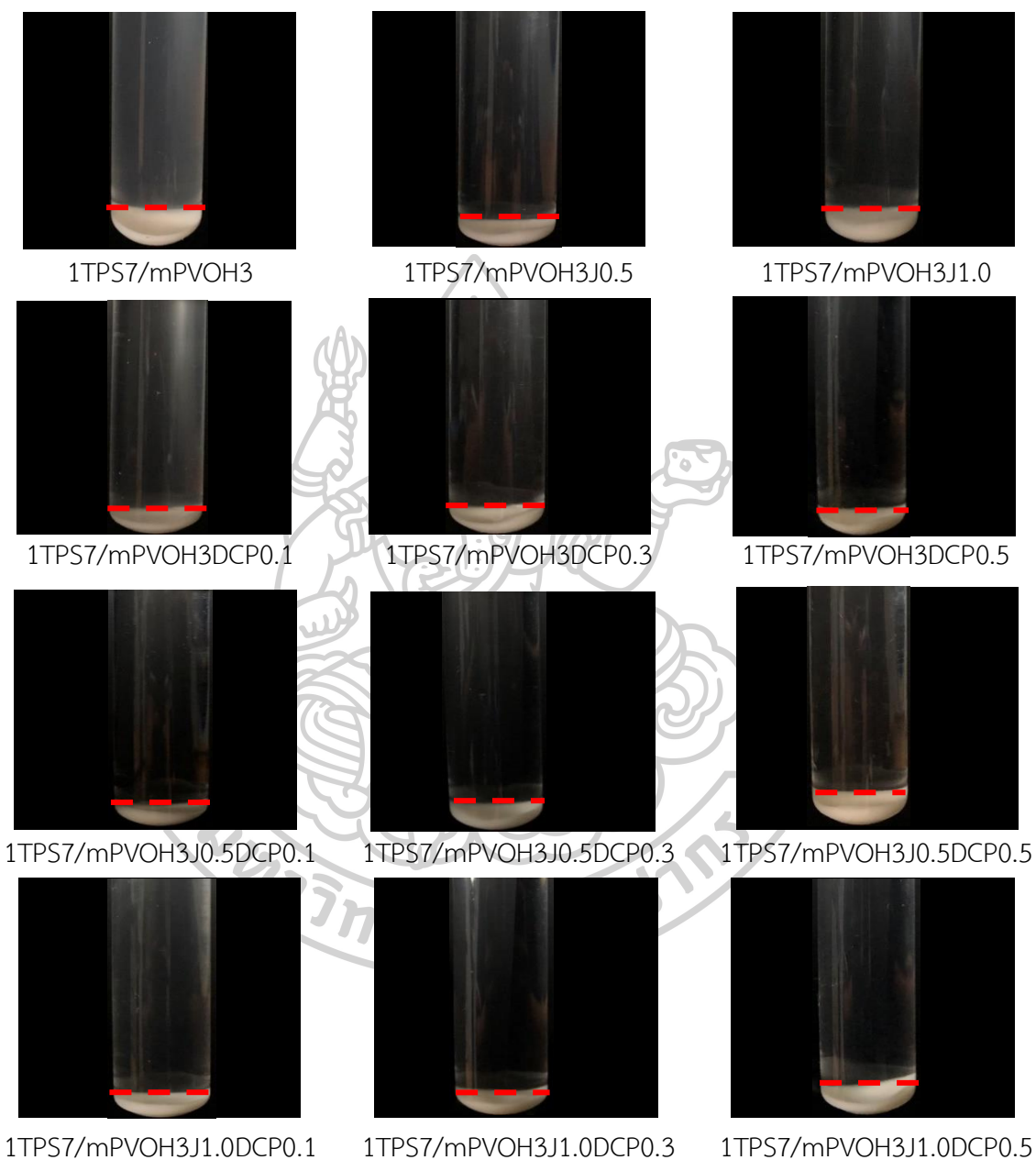
เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend จะสังเกตเห็นอนุภาค mPVOH กระจายอยู่ในเฟสของ TPS โดยมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.5 ไมครอน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีที่มีการเติม peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้นในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ปรากฏว่าชิ้นงานมีความเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากอนุภาค mPVOH มีขนาดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend และเมื่อพิจารณากรณีที่มีการเติม Joncryl ในอัตราส่วนที่มากขึ้นในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ปรากฏว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่มี

การเติม peroxide ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่า peroxide และ Joncryl ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความเข้ากันได้มากขึ้นเช่นกัน

และเมื่อพิจารณากรณีที่พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 มีการเติม Joncryl และ peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ปรากฏว่าชิ้นงานเข้ากันได้มากกว่าในกรณีที่มีการเติม reactive agent ชนิดใดชนิดหนึ่ง เนื่องจาก Joncryl และ peroxide ทำให้อนุภาค mPVOH ซึ่งเป็นเฟสกระจายในงานวิจัยนี้มีขนาดและการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น



4.1.5.4. ศึกษาผลจากเทคนิค Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3
ในระบบ reactive blend แบบ one-step process



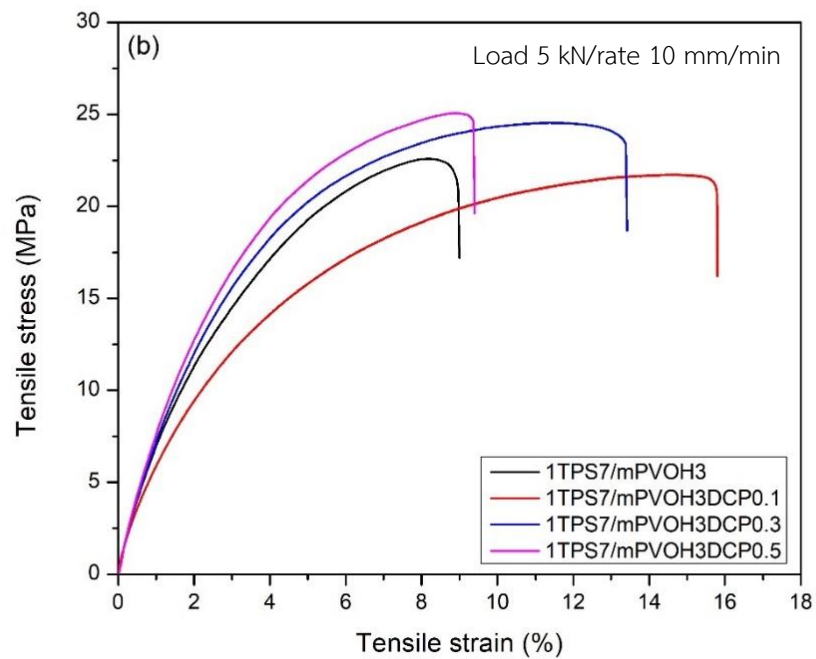
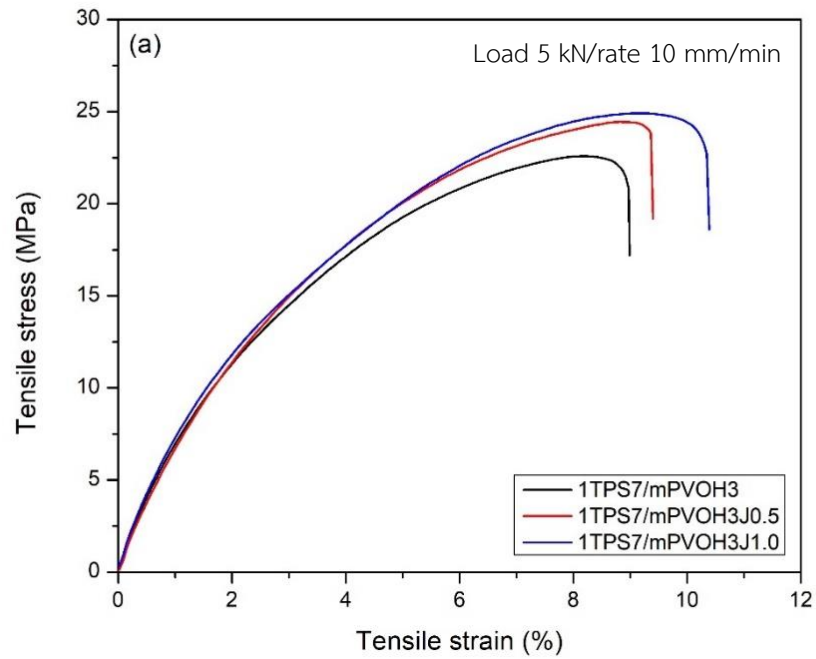
ภาพที่ 4.21 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ใน
ระบบ non-reactive และ reactive blend แบบ one step process

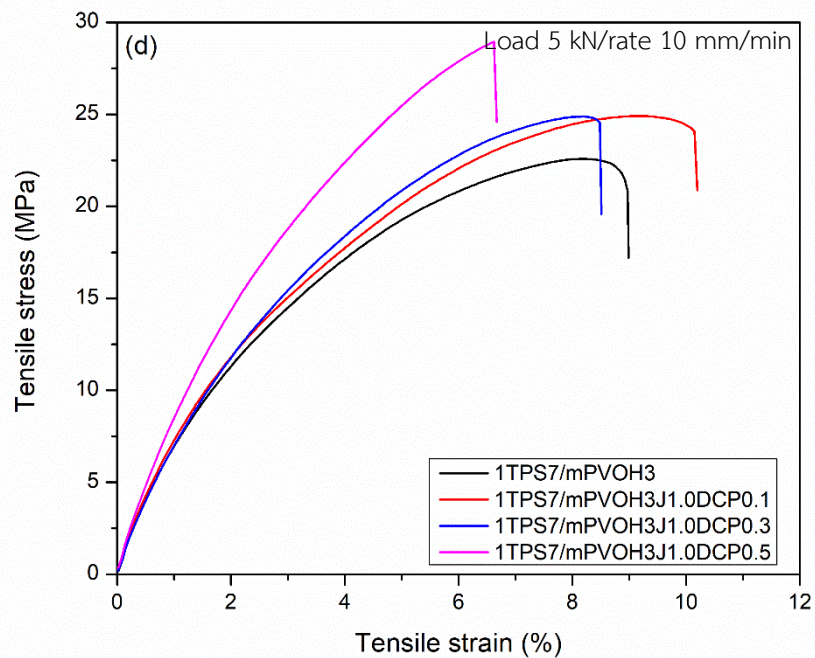
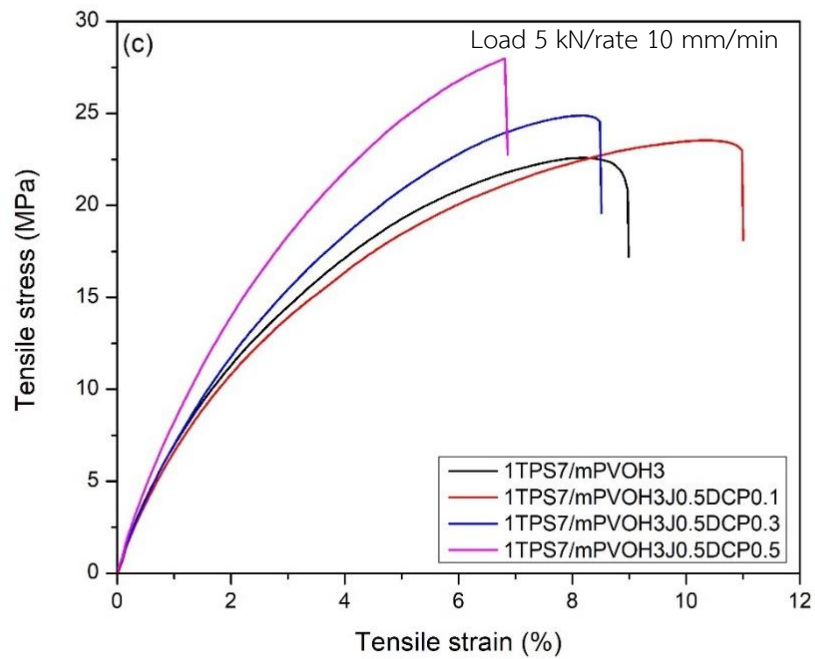
จากการทดสอบด้วยเทคนิค Molau test ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายในน้ำที่อุณหภูมิสูงได้ [47] จากภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม reactive agent ในปริมาณต่างๆ จะถูกแสดงในภาพที่ 4.20 ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive และ reactive blend แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยด้านบนจะมีลักษณะเป็นสารละลาย และด้านล่างจะมีลักษณะเป็นตะกอน

เมื่อพิจารณาสารละลายด้านบนของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend ปรากฏว่าสารละลายขุ่นมากกว่าในระบบ reactive blend อาจเป็นไปได้ว่าแป้งมันสำปะหลังบางส่วนไม่ได้เจลาติไนซ์เป็น TPS ส่งผลให้อนุภาคแป้งมันสำปะหลังนั้นเกิดการกระจายตัวอยู่ในน้ำกลั่น สารละลายจึงขุ่นมากขึ้น และเมื่อพิจารณากรณีพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม reactive agent ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ปรากฏว่าสารละลายพอลิเมอร์เบลนด์ใสมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งมันสำปะหลังสามารถเจลาติไนซ์เป็น TPS ได้มากขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นเมื่อมีการเติม reactive agent ส่งผลให้สารละลายใสมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม reactive agent ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความเข้ากันได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาตะกอนของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม reactive agent ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณตะกอนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ non-reactive blend เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังสามารถเจลาติไนซ์เป็น TPS ได้มากขึ้น ส่งผลให้ TPS สามารถเกิดปฏิกิริยากับ mPVOH ได้มากขึ้นและเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend จึงสามารถตกตะกอนได้มากขึ้นตามลำดับ

4.1.5.5. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process





ภาพที่ 4.22 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process ดังนี้ (a) ที่มีการเติม joncryl ในอัตราส่วนที่มากขึ้น, (b) ที่มีการเติม peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น, (c) ที่มีการเติม joncryl คงที่ที่ 0.5 และ peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น และ (d) ที่มีการเติม joncryl คงที่ที่ 1.0 และ peroxide ในอัตราส่วนที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิเมอร์ เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1TPS7/mPVOH3	749 ± 27	22.0 ± 0.7	9.98 ± 0.7
1TPS7/mPVOH3J0.5	781 ± 32	24.6 ± 1.0	9.40 ± 0.6
1TPS7/mPVOH3J1.0	802 ± 53	26.0 ± 1.0	10.4 ± 0.6
1TPS7/mPVOH3DCP0.1	630 ± 12	22.9 ± 1.0	15.8 ± 1.7
1TPS7/mPVOH3DCP0.3	789 ± 36	24.2 ± 1.2	13.4 ± 0.8
1TPS7/mPVOH3DCP0.5	817 ± 37	26.8 ± 1.8	9.37 ± 0.7
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.1	710 ± 38	23.0 ± 1.1	11.0 ± 1.2
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.3	731 ± 53	24.6 ± 1.0	8.48 ± 0.6
1TPS7/mPVOH3J0.5DCP0.5	798 ± 80	28.0 ± 1.4	6.82 ± 0.9
1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.1	698 ± 66	23.3 ± 1.4	10.2 ± 1.4
1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.3	724 ± 34	24.1 ± 1.1	8.34 ± 1.4
1TPS7/mPVOH3J1.0DCP0.5	795 ± 93	28.9 ± 1.2	6.62 ± 1.7

จากกราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.22 ปรากฏว่าชิ้นงานมีการแตกหักแบบเปราะ และจากตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม joncryl ในอัตราส่วนที่มากขึ้น มีค่า tensile strength และค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจาก joncryl ทำให้อนุภาค mPVOH มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น และทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เข้ากันได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ปรากฏว่ากรณีที่มีการเติม joncryl ในอัตราส่วนที่มากขึ้น มีค่า elongation at break ลดลง

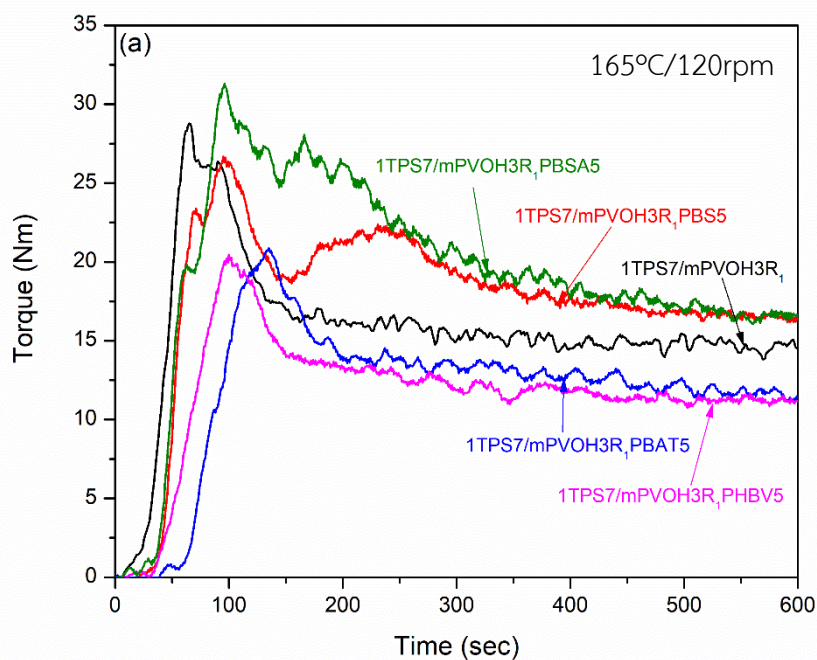
เมื่อพิจารณากรณีที่มีการเติม peroxide ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม peroxide ในปริมาณที่มากขึ้น มีค่า tensile strength และค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น และมีค่า elongation at break ลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่มีการเติม joncryl ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 คือมีค่า tensile strength และค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น และมีค่า elongation at break ลดลง เมื่อมีการเติม peroxide ในปริมาณมากขึ้น

และเมื่อพิจารณากรณีที่มีการเติม joncryl ในอัตราส่วน 0.5 และ 1.0 phr และ peroxide ในอัตราส่วน 0.1, 0.3 และ 0.5 phr ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ตามลำดับ ปรากฏว่ามีค่า tensile strength และค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น เนื่องจาก reactive agent ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เข้าได้ดีมากขึ้นตามลำดับ จากผลการทดสอบค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสม, ค่าดัชนีการไหล, ลักษณะสีฐานวิทยา, molau test และสมบัติเชิงกล ปรากฏว่าการเติม reactive agent ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 นั้นทำให้พอลิเมอร์เข้ากันได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม reactive agent อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติม reactive agent ในปริมาณมากเกินไปส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความหนืดสูงเกินไป และมีความเปราะมากเกินไปทำให้ไม่เหมาะสมในการนำไปแปรรูปได้ ดังนั้นปริมาณ reactive agent ที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 คือ joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr ตามลำดับ

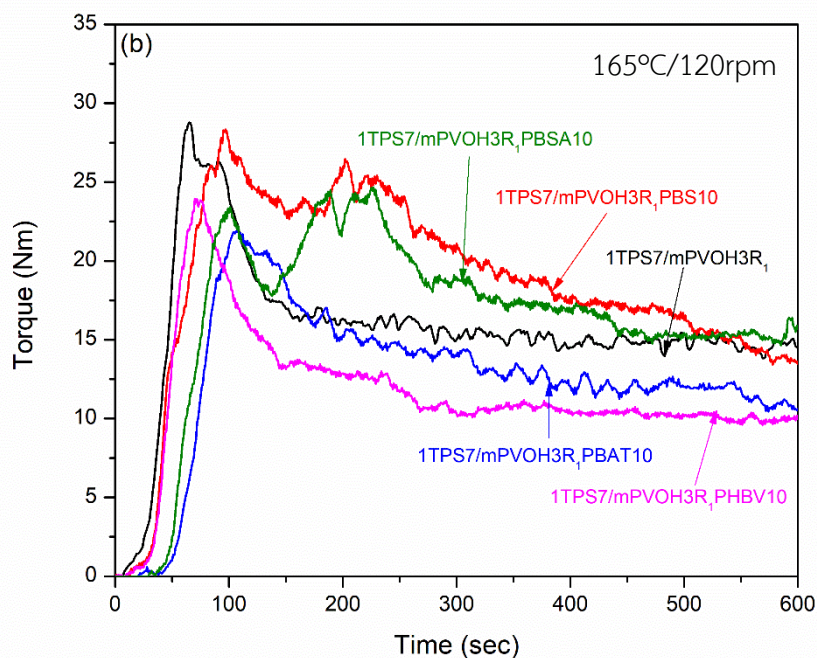


4.2 ศึกษาการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend แบบ one-step process

4.2.1. ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA แบบ one-step process



หมายเหตุ R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr



หมายเหตุ R_1 หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr

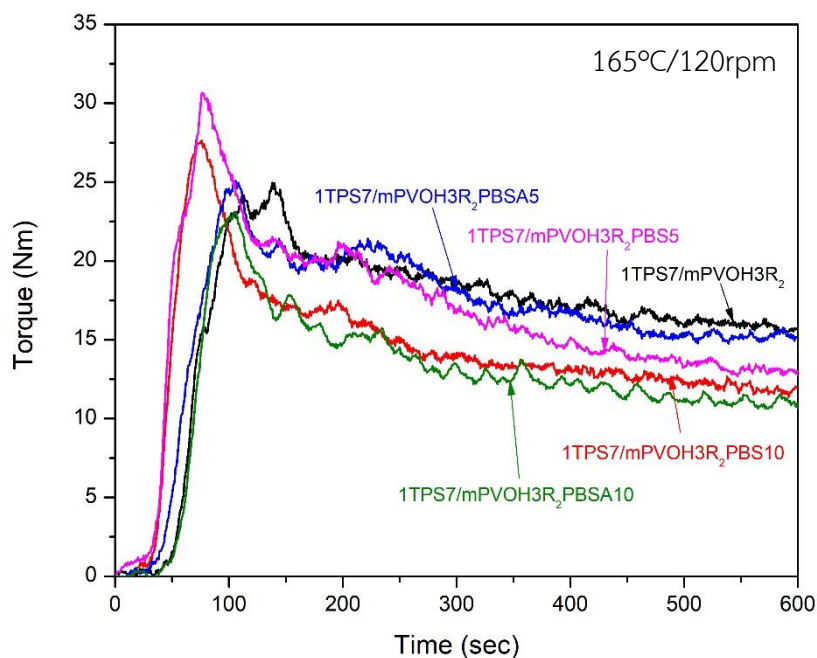
ภาพที่ 4.23 ค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA (a) ปริมาณ 5 phr และ (b) ปริมาณ 10 phr

จากผลการทดลองก่อนหน้านี้แสดงพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม reactive agent ดังนี้ Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr ตามลำดับ นั้นมีความหนืดค่อนข้างสูงซึ่งมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ในอัตราส่วน 5 และ 10 phr ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.23 แสดงค่าแรงบิดในระหว่างการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ทั้งสองอัตราส่วนในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องผสมภายในแบบปิดที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที แบบ one-step process ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PHBV และ PBAT ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 R_1 ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ลดลง ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมที่ใช้จึงลดลงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า 1TPS7/mPVOH3 R_1 PHBV จะมีค่าแรงบิดลดลงมากกว่า 1TPS7/mPVOH3 R_1 PBAT เนื่องจาก PHBV มีความหนืดต่ำกว่า PBAT มาก ส่งผลให้มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมของพอลิเมอร์

เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁PHBV ต่ำกว่าค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมของพอลิเมอร์ เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁PBAT เมื่อพิจารณาปริมาณของการเติม PHBV และ PBAT ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.22(b) ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PHBV และ PBAT ในปริมาณมากขึ้น มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมลดลงตามลำดับด้วยเช่นกัน ทำให้ทราบว่า PHBV และ PBAT ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ มีความเหนียวลดลงและไหลได้ง่ายขึ้น ลำดับ เนื่องจาก PHBV และ PBAT มีความเหนียวต่ำกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ หรือ PHBV และ PBAT ที่เติมลงไปนั้นสามารถทำหน้าที่เป็น processing aid ให้กับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ได้

และเมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติม PBS และ PBSA ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ทั้งสองอัตราส่วนในระบบ reactive blend ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PBS และ PBSA ในอัตราส่วน 5 และ 10 phr ตามลำดับ มีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมมากกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ อย่างชัดเจน ทำให้ทราบว่าเมื่อมีการเติม PBS และ PBSA ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ นั้นทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความเหนียวเพิ่มขึ้น และมีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า reactive agent ในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ มีปริมาณมากเกินไป เนื่องจาก peroxide นั้นสามารถแตกตัวเป็น free radical ซึ่ง free radical ที่เกิดขึ้นนั้นมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากทำให้สายโซ่โมเลกุล PBS หรือ PBSA เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ขึ้นภายในโครงสร้างพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ได้





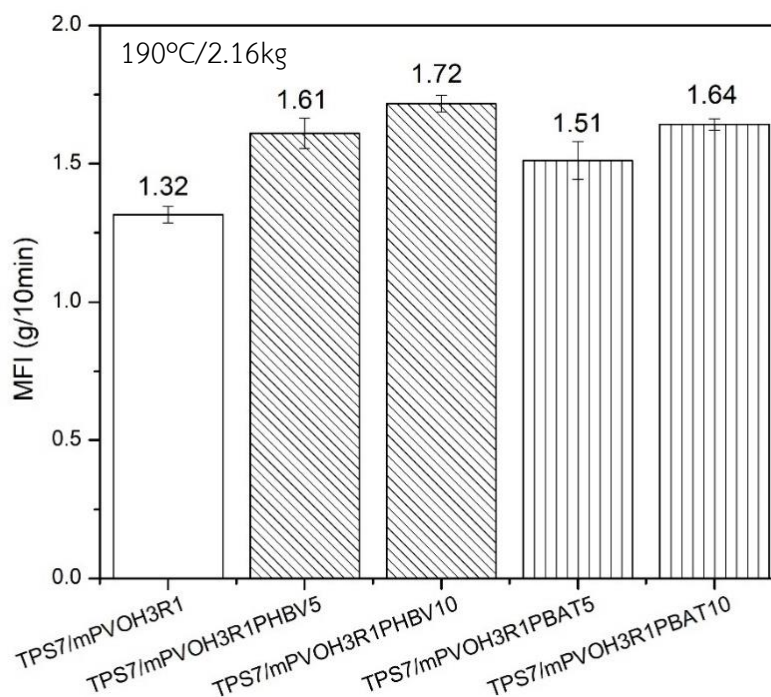
หมายถึง R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

ภาพที่ 4.24 ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr และเติม PBS และ PBSA ปริมาณ 5 และ 10 phr

ดังนั้นจึงทำการลดปริมาณ reactive agent ที่เติมในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ลงจาก Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr เป็น Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr ตามลำดับ ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.24 ปรากฏว่าเมื่อลดปริมาณ reactive agent ลงทำให้ทราบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂PBS และ 1TPS7/mPVOH3R₂PBSA มีความหนืดและค่าแรงบิดในระหว่างการผสมลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ เนื่องจาก PBS และ PBSA ที่เติมลงไปนั้นมีความหนืดต่ำกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ อย่างมาก

เมื่อพิจารณาปริมาณในการเติม PBS และ PBSA ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PBS และ PBSA ในปริมาณมากขึ้น มีค่าแรงบิดในระหว่างการผสมลดลงตามลำดับด้วยเช่นกัน ทำให้ทราบว่า PBS และ PBSA ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ มีความหนืดลดลงและไหลได้ง่ายขึ้นเมื่อมีปริมาณมากขึ้น

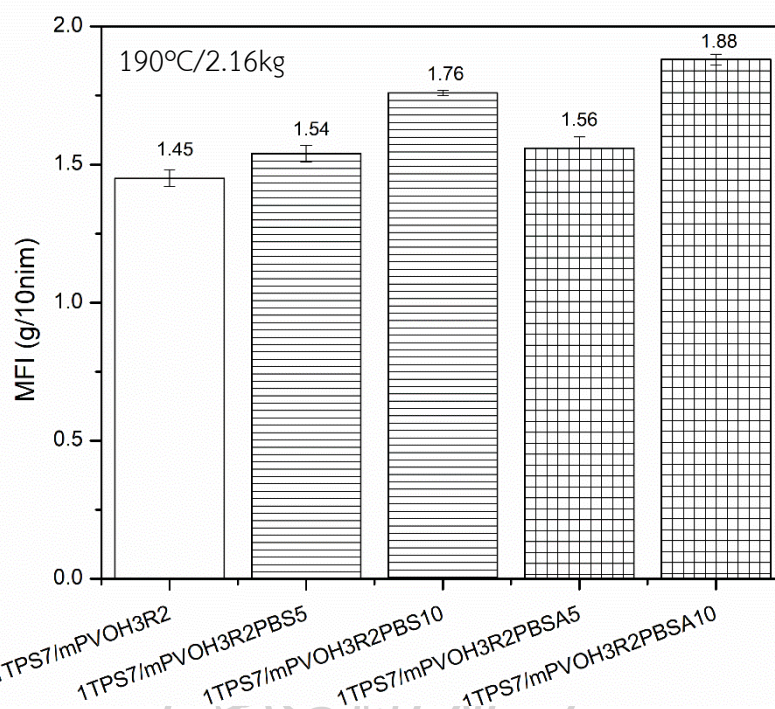
4.2.2 ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA แบบ one-step process



หมายเหตุ R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr

ภาพที่ 4.25 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และเติม PHBV และ PBAT ปริมาณ 5 และ 10 phr

จากภาพที่ 4.25 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และเติม PHBV และ PBAT ทั้งสองอัตราส่วนตามลำดับ กำหนดให้ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และไหลดหนัก 2.16 กิโลกรัม ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PHBV และ PBAT ในปริมาณที่มากขึ้น พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend มีค่าดัชนีการไหลมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจาก PHBV และ PBAT นั้นมีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 52.7 และ 5.22 g/10min ตามลำดับ ซึ่งถูกแสดงในภาพผนวกที่ ก.8 แสดงให้เห็นว่า PHBV และ PBAT มีค่าดัชนีการไหลสูงกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3R₁ อยู่มาก ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ที่มีการเติม PHBV และ PBAT มีความหนืดลดลงและไหลได้ง่ายขึ้นตามลำดับ



หมายเหตุ R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

ภาพที่ 4.26 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr และเติม PHBV และ PBAT ปริมาณ 5 และ 10 phr

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr และเติม PBS และ PBSA ทั้งสองอัตราส่วนตามลำดับซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.26 ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PBS และ PBSA ในปริมาณที่มากขึ้น จะมีค่าดัชนีการไหลมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจาก PBS และ PBSA นั้นมีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 5.35 และ 4.43 g/10min ซึ่งถูกแสดงในภาพผนวกที่ ก.8 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า PBS และ PBSA มีความหนืดต่ำกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3R₂ อยู่มาก ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ ที่มีการเติม PBS และ PBSA มีความหนืดลดลงและไหลได้ง่ายขึ้นตามลำดับ

4.2.3. ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA แบบ one-step process

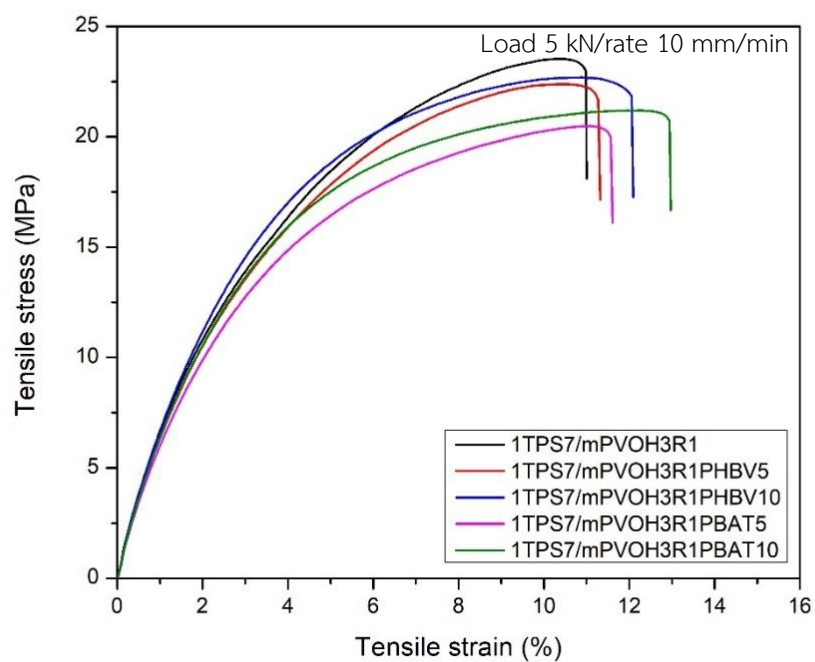
ตารางที่ 4.9 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 และ 0.2 phr และ peroxide 0.1 และ 0.05 phr และเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ปริมาณ 5 และ 10 phr

sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1TPS7/mPVOH3R ₁	710 ± 38 ^a	23.0 ± 1.1 ^a	11.0 ± 1.2 ^a
PHBV	1,414 ± 77	42.4 ± 1.8	11.7 ± 1.6
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5	697 ± 69 ^a	21.7 ± 1.4 ^a	11.3 ± 1.3 ^a
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV10	689 ± 57 ^a	21.8 ± 0.70 ^a	12.1 ± 1.5 ^a
PBAT	175 ± 8.6	28.9 ± 0.8	554 ± 48.6
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5	666 ± 77 ^a	20.3 ± 1.3 ^a	11.6 ± 0.53 ^a
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT0	662 ± 80 ^a	21.0 ± 1.0 ^a	13.0 ± 0.86 ^a
1TPS7/mPVOH3R ₂	749 ± 87 ^a	22.0 ± 0.96 ^a	11.2 ± 1.0 ^a
PBS	494 ± 16	39.4 ± 1.6	403 ± 9.9
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5	690 ± 42 ^a	20.2 ± 1.2 ^a	11.8 ± 1.3 ^a
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS10	667 ± 47 ^a	20.7 ± 0.93 ^a	12.0 ± 1.7 ^a
PBSA	189 ± 7.9	30.7 ± 1.0	500 ± 30
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBSA5	619 ± 78 ^a	16.3 ± 1.4 ^b	13.0 ± 1.0 ^b
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBSA10	561 ± 68 ^a	16.0 ± 1.2 ^b	15.3 ± 1.7 ^b

หมายเหตุ R₁ คือ Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และ R₂ คือ Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr ตามลำดับ

จากกราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ทั้งสองอัตราส่วนซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.27 และ 4.28 ปรากฏว่าชิ้นงานมีการแตกหักแบบเปราะ และจากตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 และ 0.2 phr และ peroxide 0.1 และ 0.05 phr และเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ตามลำดับที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งเมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ทั้งสองอัตราส่วน ปรากฏว่ามีค่า Young's modulus, ค่า tensile strength และค่า elongation at break แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PBSA ปรากฏว่ามีค่า tensile strength ต่ำกว่าแต่มีค่า elongation at break สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ตามลำดับ แต่มีค่า Young's modulus แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

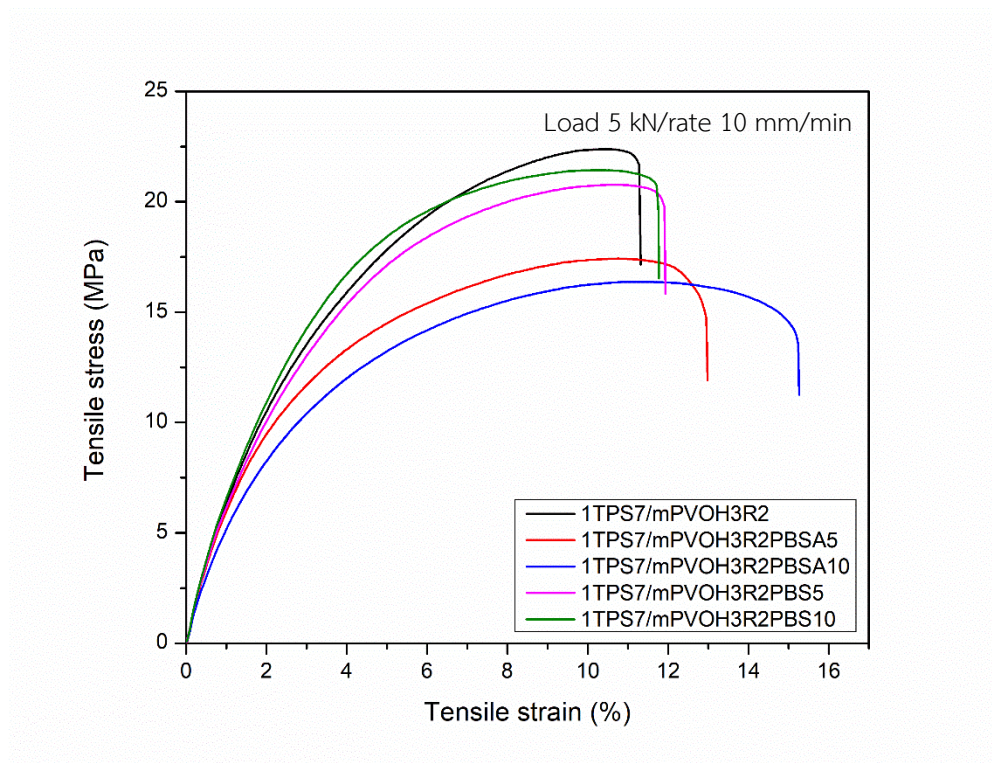
และเมื่อมีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ปรากฏว่ามีค่า Young's modulus, ค่า tensile strength และค่า elongation at break แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อมีการเติม PHBV, PBAT, PBS และ PBS ในปริมาณ 5 และ 10 phr ตามลำดับ



หมายเหตุ R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr

ภาพที่ 4.27 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และเติม PHBV และ PBAT ปริมาณ 5 และ 10 phr





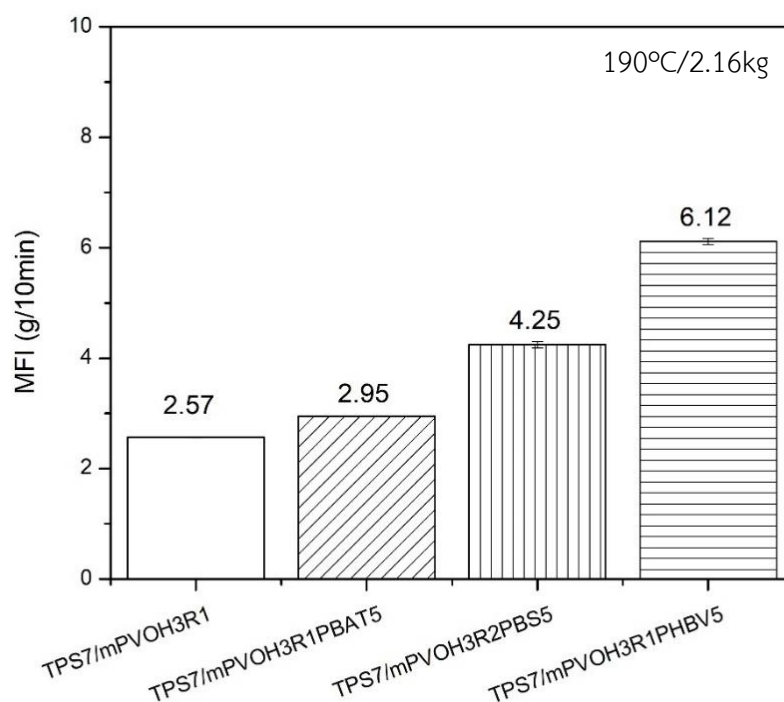
หมายเหตุ R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

ภาพที่ 4.28 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบสตรงระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr และเติม PBS และ PBSA ปริมาณ 5 และ 10 phr



4.3 ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ผ่านเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder)

4.3.1 ศึกษาผลค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process



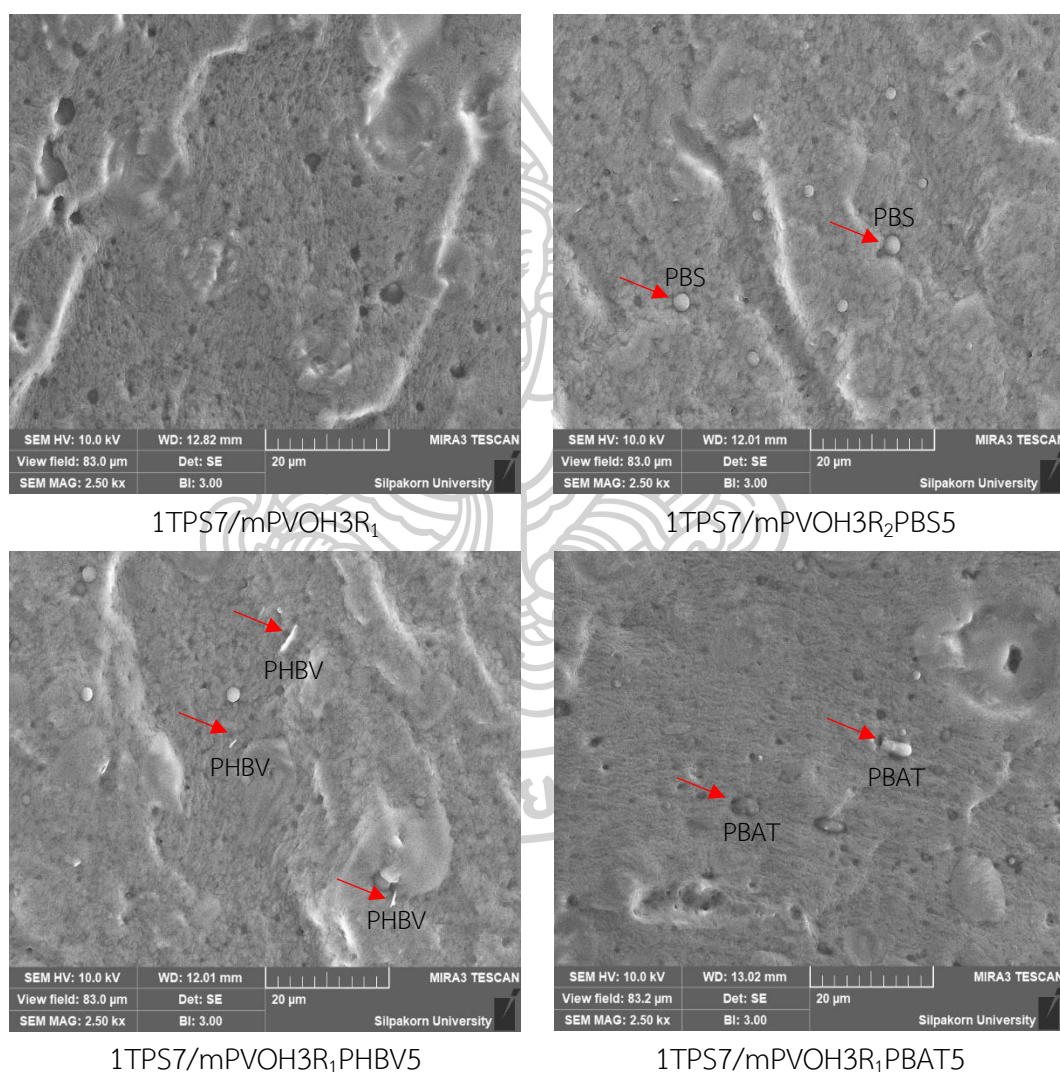
หมายเหตุ R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และ R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

ภาพที่ 4.29 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่ได้จากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

จากภาพที่ 4.29 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่ได้จากเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) ที่ตั้งสภาวะอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และไหลตหนัก 2.16 กิโลกรัม ปรากฏว่าเมื่อมีการเติม PHBV, PBS และ PBAT ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend จะมีค่าดัชนีการไหลมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเติม PHBV, PBS และ PBAT เนื่องจาก PHBV, PBS และ PBAT มีค่าดัชนีการไหลสูงกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend [30] ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ

reactive blend มีความหนืดลดลง และไหลได้ง่ายขึ้น ทำให้ทราบว่าการเติม PHBV, PBS และ PBAT ลงในพอลิเมอร์เบส 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend มีความหนืดลดลงและไหลได้ง่ายขึ้นตามลำดับ

4.3.2 ศึกษาผลลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์เบสระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process



ภาพที่ 4.30 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบสระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่ได้จากเครื่องอัดรีดสกรูเดียว (single screw extruder)

จากภาพที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ปรากฏว่าชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS มีผิวเรียบซึ่งแสดงการแตกหักแบบเปราะ

เมื่อพิจารณาชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ปรากฏว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ในชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ถูกเจลาติไนซ์มากกว่าการขึ้นรูปด้วยเครื่องผสม ภายในแบบปิดอาจเป็นไปได้ว่า TPS ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (single screw extruder) นั้นได้รับแรงเฉือนและอุณหภูมิที่เพียงพอในการทำลายเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้ ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ กลายเป็นเฟสต่อเนื่องทั่วทั้งชิ้นงานทำให้ทราบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ เข้ากันได้ดีมาก

เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติม PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ ปรากฏว่า PBS สามารถกระจายตัวได้ดีทั่วทั้งชิ้นงาน เนื่องจาก PBS มีความหนืดน้อยกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ และอนุภาค PBS มีขนาดสม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 2 ไมครอน ทำให้ทราบว่า PBS เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติม PBAT ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ปรากฏว่ามีแนวโน้มเดียวกับกรณีที่มีการเติม PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ แต่อนุภาค PBAT มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาค PBS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติม PBAT นั้น PBAT สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ เช่นกันตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเติม PHBV ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ปรากฏว่า PHBV มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีขนาดประมาณ 2 – 4 ไมครอน และกระจายตัวได้ดีในเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ทำให้ทราบว่า PHBV สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr ตามลำดับ

4.3.3 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process

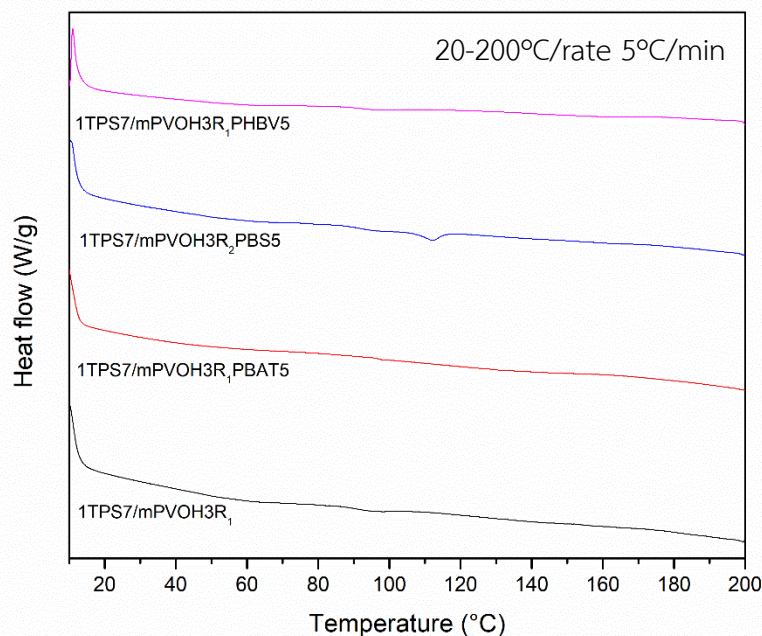
ตารางที่ 4.10 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS

sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1TPS7/mPVOH3R ₁	759 ± 53 ^a	17.2 ± 0.7 ^a	6.05 ± 0.3 ^a
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5	768 ± 15 ^a	16.7 ± 0.3 ^a	6.22 ± 1.3 ^a
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5	607 ± 36 ^a	15.9 ± 0.7 ^a	7.28 ± 1.3 ^a
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5	660 ± 27 ^a	15.5 ± 0.6 ^a	6.32 ± 0.7 ^a

หมายเหตุ R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr และ R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

จากตารางที่ 4.10 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) ตามมาตรฐาน ASTM D882 ปรากฏว่าชิ้นงานแบบฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่เป็นแนวโน้มเดียวกับกรณีชิ้นงานแบบ dog bone ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ดังนั้น พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS มีค่า Young's modulus, ค่า tensile strength และค่า elongation at break ใกล้เคียงกับกรณีของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 มีค่า Young's modulus, ค่า tensile strength และค่า elongation at break แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ

4.3.4 ศึกษาผลสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process



หมายเหตุ R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr
และ R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

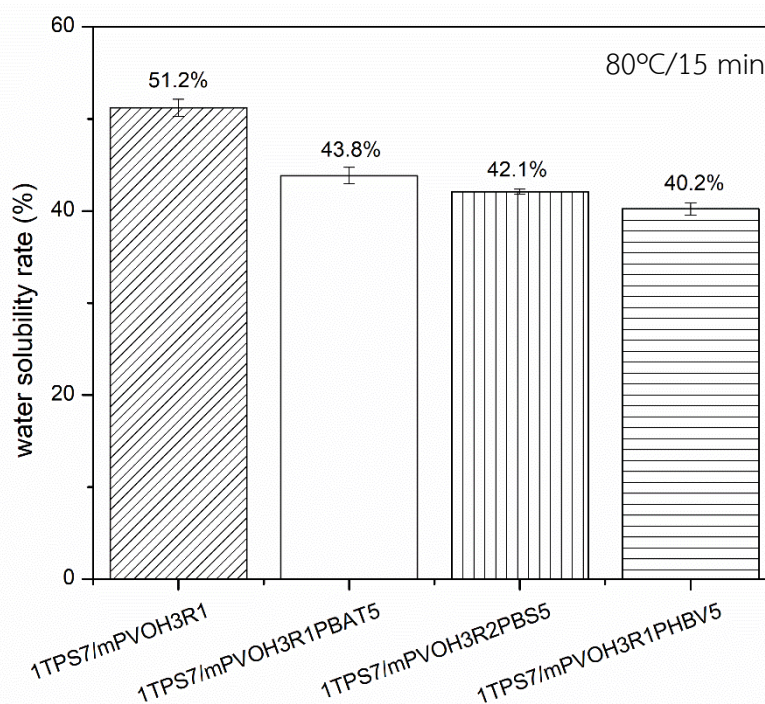
ภาพที่ 4.31 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่ตั้งสภาวะอุณหภูมิ 20 ถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาต่อนาที และศึกษาในชั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.30 ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ไม่ปรากฏค่า T_m ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าส่วนอสัณฐานของ TPS ในโครงสร้างฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ นั้นสามารถเข้าไปขัดขวางการเกิดผลึกของสายโซ่โมเลกุล mPVOH ภายในโครงสร้างพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ทำให้ mPVOH เกิดผลึกได้น้อยลง [48] และ TPS ในสัดส่วน 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ มากเพียงพอที่ทำให้ mPVOH เกิดผลึกได้น้อยมากจนไม่สามารถมองเห็นพีค T_m ได้ [49]

เมื่อพิจารณาค่า T_g ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีและไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ไม่ปรากฏค่า T_g เนื่องจากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า T_g เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอิทธิพลของกลีเซอรอลในองค์ประกอบของ mPVOH และ TPS ซึ่งมีอัตราส่วนที่ค่อนข้างมากส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะค่า T_g เล็กน้อยมาก [50]

และจะเห็นว่าไม่ปรากฏค่า T_m ของ PHBV, PBAT และ PBS ที่ถูกเติมลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend เนื่องจากปริมาณ PHBV, PBAT และ PBS ที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณน้อยมากซึ่งเติมไปเพียง 5 phr เท่านั้น

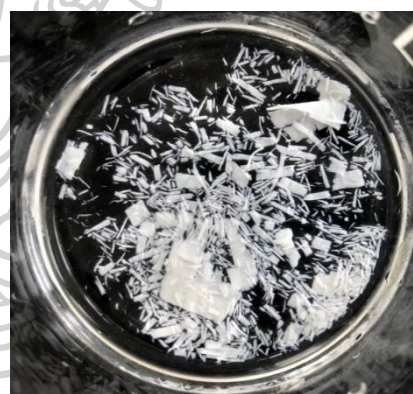
4.3.5 ศึกษาอัตราการละลายน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process



หมายเหตุ R₁ หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr
และ R₂ หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

ภาพที่ 4.32 อัตราการละลายน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที

จากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend นั้นมีความว่องไวต่อความชื้นที่ค่อนข้างสูงจึงทำการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงไปเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จากการทดสอบอัตราการละลายน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.32 เมื่อครบเวลา 15 นาทีแล้วนำชิ้นงานฟิล์มที่เหลืออยู่ในสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณเปอร์เซ็นต์อัตราการละลายน้ำ ปรากฏว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ มีอัตราการละลายน้ำมากถึง 51.2% เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ภายในโครงสร้างจำนวนมากทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนได้ดี แต่เมื่อมีการเติม PHBV, PBS และ PBAT ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ปรากฏว่ามีอัตราการละลายน้ำลดลง ดังนี้ 40.2, 42.1 และ 43.8 % ตามลำดับ เนื่องจาก PHBV, PBS และ PBAT มีความเป็น hydrophobic [51] ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์ละลายน้ำได้น้อยลง

1TPS7/mPVOH3R₁1TPS7/mPVOH3R₂PBS51TPS7/mPVOH3R₁PBAT51TPS7/mPVOH3R₁PHBV5

ภาพที่ 4.33 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบอัตราการละลายน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่เวลา 15 นาที

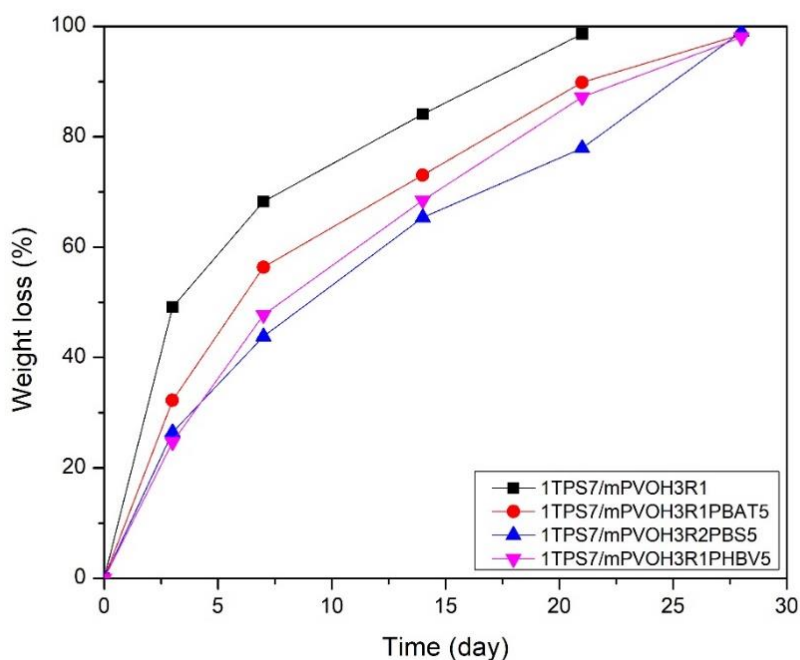
และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบอัตราการละลายน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งถูกแสดงในภาพที่ 4.33 ปรากฏว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ มีการแตกตัวเป็นชิ้นเล็กๆ และมีขนาดค่อนข้างเท่ากัน แต่เมื่อมีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ปรากฏว่าฟิล์มมีการแตกตัวเป็นชิ้นที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงไป และมีลักษณะการแตกตัวที่แตกต่างกันดังนี้ เมื่อมีการเติม PHBV ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ปรากฏว่าฟิล์มมีการแตกตัวเป็นชิ้นและเป็นแผ่นที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงไป เมื่อมีการเติม PBAT ลงในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์จะมีการแตกตัวเป็นชิ้นและเป็นแผ่นที่มีขนาดใหญ่กว่าการเติม PHBV ซึ่งมีขนาดประมาณ 2-3 เซนติเมตร และเมื่อมีการเติม PBS ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ ฟิล์มมีการแตกตัวเป็นเส้นซึ่งมีความแตกต่างจากการเติม PHBV และ PBAT ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₁ ซึ่งลักษณะการแตกตัวและขนาดไม่เท่ากันของชิ้นงานนี้สามารถบ่งบอกถึงการกระจายตัวของเฟสที่ละลายไม่ได้นี้ บริเวณที่มีพอลิเมอร์ไม่ละลายน้ำอยู่มากจะเป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำ คือ PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ ทำให้ชิ้นงานแตกตัวในน้ำได้ยากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานเป็นแผ่นใหญ่ (PVOH lean phase) และบริเวณที่ชิ้นงานแตกตัวเป็นชิ้นเล็กๆ ได้ คือบริเวณที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาก (PVOH rice phase) ตามลำดับ และจากการแตกตัวเป็นเส้นของพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3R₂ ที่มีการเติม PBS ทำให้ทราบว่า PBS หรือส่วนที่ไม่ละลายน้ำนี้ กระจายตัวเป็นเส้นได้ทั่วทั้งชิ้นงานซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PBS ที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (tensile fracture) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก.9 ทำให้ทราบว่าชิ้นงานแตกตัวเป็นเส้นได้มากกว่าแตกตัวเป็นแผ่นตามลำดับ

4.3.6 ศึกษาผลการย่อยสลายโดยการหมักของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แบบ one-step process

การทดสอบการย่อยสลายโดยการหมักจะเริ่มตั้งแต่การเตรียมปุ๋ยหมัก ซึ่งปุ๋ยหมักจะเตรียมจากชุมชนบ้านหัวอ่าว 37/1 ม.5 บางช้าง อ.สามพราน จังหวัดนครปฐม 73110 (13.702870971976838, 100.19857203302745) และทำการติดตามน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานฟิล์มเป็นระยะเวลา 28 วัน ซึ่งจะทำการกลับถุงปุ๋ยหมักและรดน้ำทุกๆ 7 วัน โดยใช้น้ำปริมาณ 2 ลิตร/สัปดาห์ เพื่อควบคุมความชื้นและการเติบโตของจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ความชื้น, อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสเฉลี่ยของปุ๋ยหมักในถุงที่ใช้ในการหมักชิ้นงานฟิล์มที่ทำการวัดและเก็บค่าทุก ๆ 7 วันจนครบ 28 วันตามลำดับ

Time (day)	Moisture (%)	pH	Temperature (°C)
0	99	4.5	31.1 ± 0.6
3	99	3.8	61.0 ± 0.7
7	99	3.4	46.3 ± 0.6
14	99	3.0	44.7 ± 0.5
21	99	6.3	38.4 ± 3.1
28	99	6.0	40.1 ± 1.1



หมายเหตุ R_1 หมายถึง Joncryl 0.5 phr และ peroxide 0.1 phr
 และ R_2 หมายถึง Joncryl 0.2 phr และ peroxide 0.05 phr

ภาพที่ 4.34 อัตราการย่อยสลายโดยการหมักของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS เป็นเวลา 28 วัน

จากภาพที่ 4.34 แสดงอัตราการย่อยสลายโดยการหมักของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS เป็นเวลา 28 วัน ปรากฏว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 R_1 มีอัตราการย่อยสลายอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก ซึ่งขึ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ 1TPS7/mPVOH3 R_1 มีอัตราการย่อยสลายสูงถึง 68.3% เนื่องจากเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ชนิดเทอร์โมฟิลิกในปุ๋ยหมักสามารถเติบโตได้ดีทำให้สารอินทรีย์ในปุ๋ยหมักเกิดการย่อยสลายได้ดีที่สุดในช่วงนี้ [52] และจากการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์นี้ส่งผลให้อุณหภูมิและความเป็นกรดของปุ๋ยหมักเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกันซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.11 คือในช่วง 7 วันแรกปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิสูงและความเป็นกรดมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ N. A. Azahari [53] ได้ทำการศึกษการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอลและน้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี solvent casting ในอัตราส่วนต่างๆ และอัตราการย่อยสลายโดยการหมักปรากฏว่าเมื่อมีปริมาณแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายมากขึ้นด้วยเช่นกัน และในช่วง 7 วันแรกขึ้นงาน PVOH/CS ในอัตราส่วน

30/70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความสามารถในการย่อยสลายในปุ๋ยหมักถึง 85% แต่เมื่อเวลาผ่านไปปรากฏว่าปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิและความเป็นกรดลดลงเนื่องจากเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ชนิดเมโซฟิลิกทำงานได้ดีซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 45 องศาเซลเซียส [52] และเมื่อเวลาผ่านไป 21 วันปรากฏว่าชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3R₁ มีอัตราการย่อยสลายถึง 98.7% แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไป 21 หรือ 28 วันจะเห็นว่าชิ้นงานฟิล์มมีอัตราการย่อยสลายช้าลงกว่าในช่วงแรกเนื่องจากเป็นช่วงที่จุลินทรีย์บางส่วนเริ่มตายลง และสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายเกือบทั้งหมด ส่งผลให้อุณหภูมิและความเป็นกรดของปุ๋ยหมักลดลงตามตารางที่ 4.11

เมื่อพิจารณากรณีที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ปรากฏว่าในช่วง 7 วันแรกชิ้นงานฟิล์มมีอัตราการย่อยสลายที่เป็นแนวโน้มเดียวกับกรณีที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงไป คือ ในช่วง 7 วันแรกฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ มีอัตราการย่อยสลายดังนี้ 43.8, 47.2 และ 56.4% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานฟิล์มมีอัตราการย่อยสลายถึง 98.0, 98.5 และ 99.1% เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกรณีที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend กับกรณีที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ปรากฏว่ากรณีที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend มีอัตราการย่อยสลายในปุ๋ยหมักช้ากว่ากรณีที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า PHBV, PBAT และ PBS มีความสามารถในการย่อยสลายในปุ๋ยหมักช้ากว่า TPS และ mPVOH [51] ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์มีอัตราการย่อยสลายในปุ๋ยหมักช้าลงเมื่อมีการเติม PHBV, PBAT และ PBS แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ใช้เวลาในการย่อยสลายในปุ๋ยหมักทั้งหมดเพียง 28 วันเท่านั้น

แต่อย่างไรก็ตามปุ๋ยหมักมีความชื้นสูงถึง 99% ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าความชื้นของปุ๋ยหมักส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำได้เนื่องจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติมและไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ยังคงมีความว่องไวต่อความชื้นที่ค่อนข้างสูงอยู่ ทำให้ชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติมและไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS สามารถละลายน้ำได้ในบางส่วน ดังนั้นน้ำหนักชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์บางส่วนที่หายไปเกิดจากอิทธิพลของการละลายน้ำในปุ๋ยหมัก

4.3.7 ศึกษาผลการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิดของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ในระบบ reactive blend แบบ one-step process

การย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิดจะนำชิ้นงานฟิล์มไปทดสอบที่ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งอ่าวไทยฝั่งตะวันออก 309 ม.1 ต.ปากน้ำกระแสะ อ.แกลง จ.ระยอง 21170 (12.698820386279044, 101.70362309068943) ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 บริเวณ ดังนี้ บริเวณที่ชิ้นงานลอยในน้ำทะเล (open sea water) และบริเวณที่ชิ้นงานถูกฝังในป่าชายเลน (mangrove field) ตามลำดับ ซึ่งจะถูกแสดงในภาพภาคผนวกที่ ก.12 จากนั้นทำการติดตามน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานฟิล์มเป็นระยะเวลา 28 วัน แต่หลังจากเก็บชิ้นงานฟิล์มในครั้งแรก (ครบ 7 วัน) ปรากฏว่าถุงตาข่ายไม่ปรากฏชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PBS, PHBV และ PBAT ตามลำดับอยู่เลย ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าชิ้นงานฟิล์มเกิดการละลายน้ำทะเลไปจนหมด ทำให้ไม่สามารถชั่งน้ำหนักชิ้นงานได้ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ ก.11



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยเริ่มจากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและศึกษาสมบัติเชิงกล แต่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ยังเปราะอยู่ จึงทำการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไป แต่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีอุณหภูมิหลอมผลึกสูงถึง 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงศึกษาการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนต่างๆ และมาเลิกแอนไฮไดรต์ลงไป, สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน จากนั้นศึกษาการเบลนด์พอลิเมอร์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม reactive agent, สมบัติเชิงกล, ค่าดัชนีการไหล และลักษณะสัญญาณวิทยา แต่พอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความว่องไวต่อความชื้นและความหนืดในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป จึงศึกษาการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรพทาเลท และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต-โค-อะดิเปตลงในพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งจากการศึกษาทำให้สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากการเติมกลีเซอรอล โดยกลีเซอรอลในอัตราส่วน 30 phr เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเนื่องจากมีค่าแรงบิดที่เสถียรแต่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชยังมีความหนืดสูงอยู่ จึงทำการเติมมาเลิกแอนไฮไดรต์และกรดซिटริกลงไปเนื่องจากมาเลิกแอนไฮไดรต์และกรดซिटริกสามารถทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความหนืดลดลงได้ ซึ่งการเติมมาเลิกแอนไฮไดรต์ไป 0.1 phr และกรดซिटริก 1.0 phr เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความหนืดลดลงแต่มีค่า tensile strength แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการเติมกรดซिटริกและมาเลิก แอนไฮไดรต์ แต่อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ยังคงมีความเปราะ และผิวชิ้นงานที่ได้จากเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ยังมีความขรุขระ จึงทำการเติมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตทลงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชไปเพียง 5 phr เท่านั้น ก็สามารถทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความเปราะลดลง, ไหลและอัดขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

5.1.2 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากการเติมกลีเซอรอล เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความหนืดลดลง และเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลมากกว่า 20 phr ส่งผลให้คอมพาวด์ที่ได้มีความเหนียวหยุ่นคล้ายยาง จึงทำการเติมมาเลิกแอนไฮไดรต์ 0.5 phr เนื่องจากมาเลิกแอนไฮไดรต์สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ ทำให้พอลิ

ไวนิลแอลกอฮอล์มีความหนืด, ค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสม, ค่า tensile strength, ค่า elongation at break และค่า T_g สูงขึ้น และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติมกลีเซอรอล 20 phr และมาเลอิก แอนไฮไดรด์ปริมาณ 0.5 phr มีอุณหภูมิหลอมผลึกอยู่ที่ 164 องศาเซลเซียส

5.1.3 จากการเบลนด์พอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม reactive agent ซึ่งเมื่อมีการเติม reactive agent ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความหนืดสูงขึ้นและไหลได้ยากขึ้น ทั้งยังใช้แรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อมีการเติม reactive agent ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีขนาดอนุภาคเล็กลงและกระจายตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์เข้ากันได้ดีมากขึ้น

5.1.4 ผลจากการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อมีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความหนืดและมีค่าแรงบิดในระหว่างกระบวนการผสมลดลง ในขณะที่มีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ

5.1.5 ผลจากการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อมีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ลงในฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์มีอัตราการละลายน้ำลดลง และสามารถแตกตัวเป็นชิ้นเล็กๆได้ยากขึ้น จากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายโดยการหมัก ปรากฏว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์สามารถย่อยสลายในปุ๋ยหมักภายในเวลาเพียง 28 วันเท่านั้น จากการทดสอบทางความร้อนปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ไม่ปรากฏค่า T_m ของ PHBV, PBAT และ PBS เนื่องจากเติมไปในปริมาณที่น้อยเกินไปซึ่งเติมไปเพียง 5 phr เท่านั้น จากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิดปรากฏว่าฟิล์มส่วนใหญ่เกิดการละลายในน้ำทะเลมากกว่าการย่อยสลายในน้ำทะเลด้วยสิ่งมีชีวิต และจากภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาปรากฏว่า PHBV, PBAT และ PBS ที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

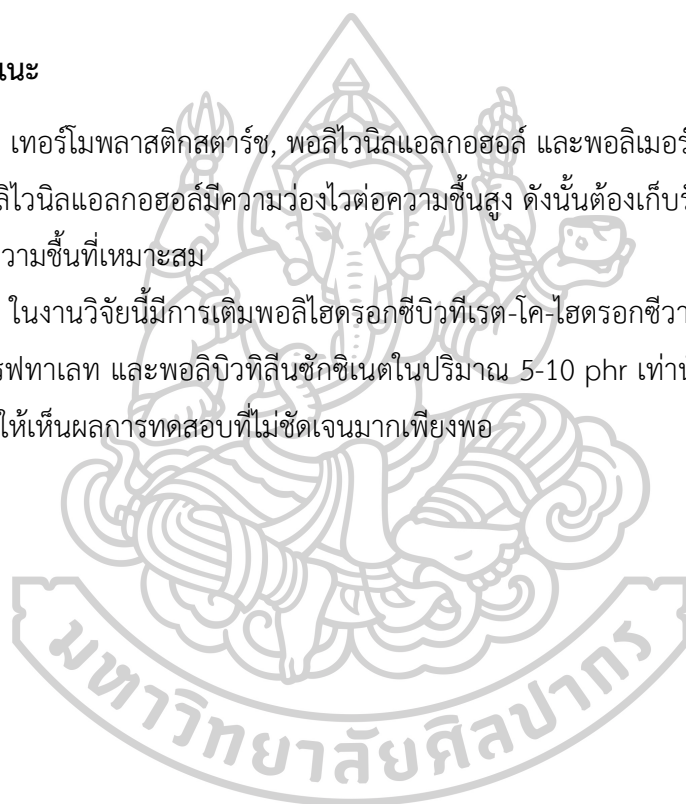
5.1.6 สูตรที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ ปรากฏว่าพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเติม PHBV ในอัตราส่วน 5 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ เนื่องจาก PHBV ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิล

แอลกอฮอล์มีความหนืดลดลงอย่างชัดเจนซึ่งง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูป แต่มีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ จากภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาปรากฏว่า PHBV มีขนาด 2 - 4 ไมครอนและสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเมื่อมีการเติม PHBV พอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีอัตราการละลายน้ำลดลงเหลือ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ซ, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิเมอร์เบลนด์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ซกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความไวต่อความชื้นสูง ดังนั้นต้องเก็บรักษาชิ้นงานในสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม

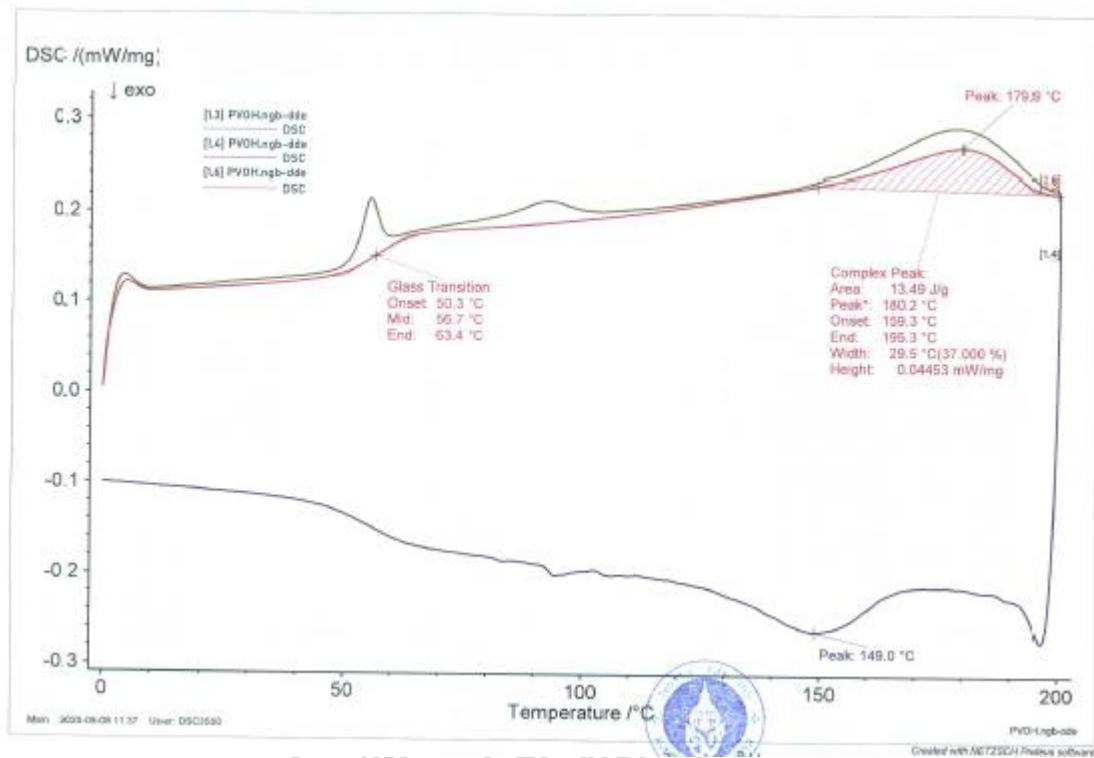
5.2.2 ในงานวิจัยนี้มีการเติมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต-โค-ไฮดรอกซีวารีเลต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทอเรพทาเลท และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณ 5-10 phr เท่านั้น ซึ่งอาจเป็นปริมาณที่น้อยเกินไปทำให้เห็นผลการทดสอบที่ไม่ชัดเจนมากเพียงพอ



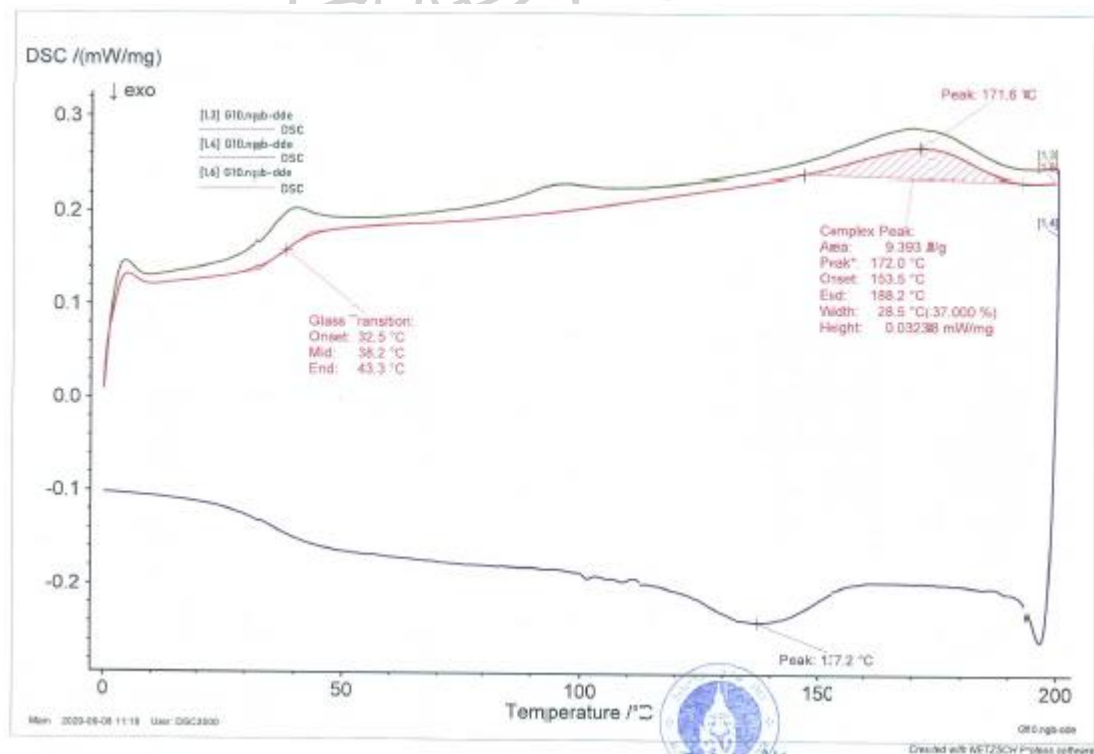
ภาคผนวก ก.

ข้อมูลและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิเมอร์
เบลนด์ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

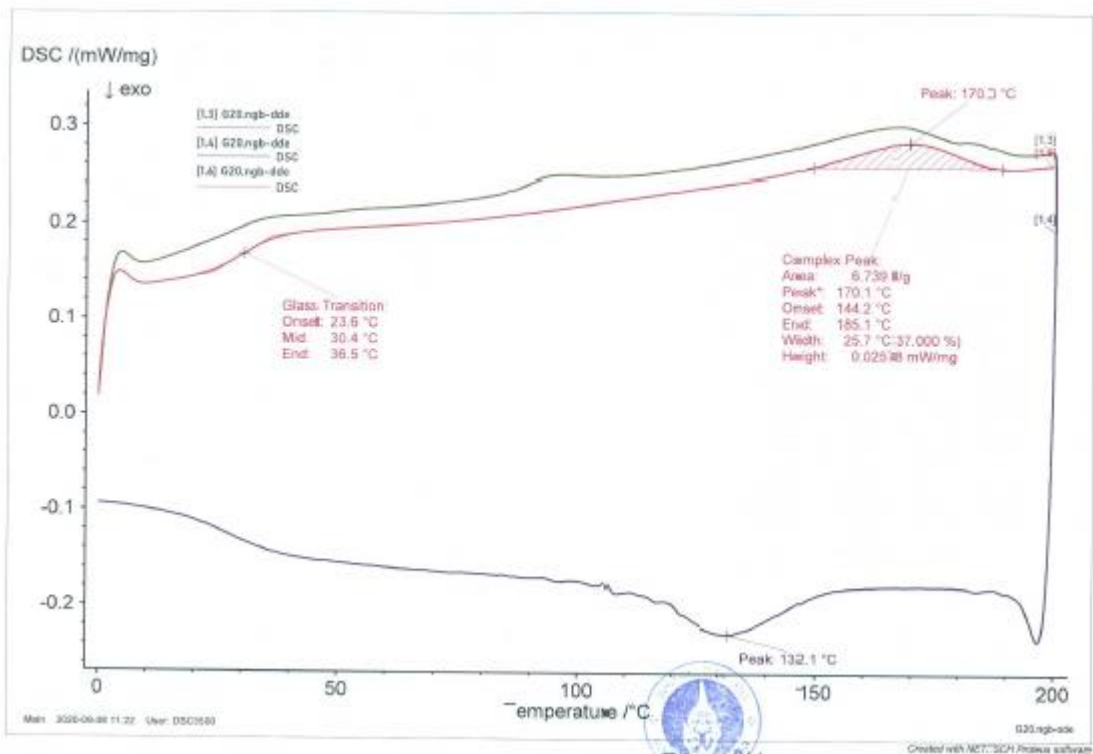




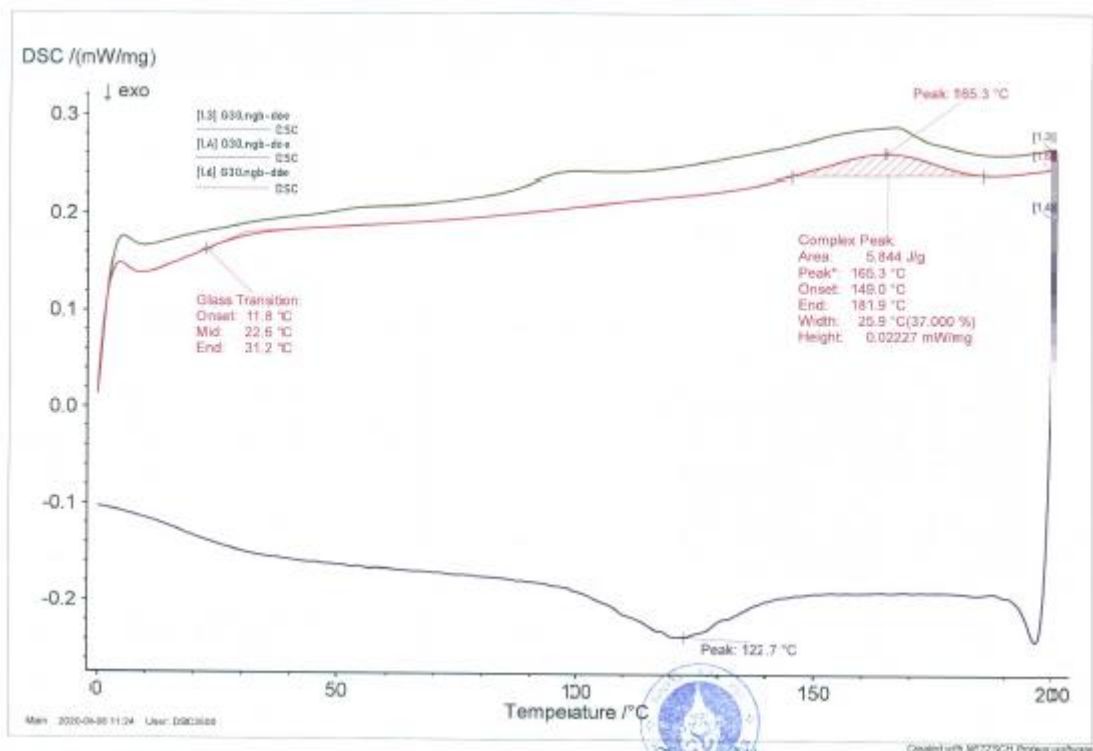
ภาพที่ ก.1 DSC Thermogram ของ PVOH



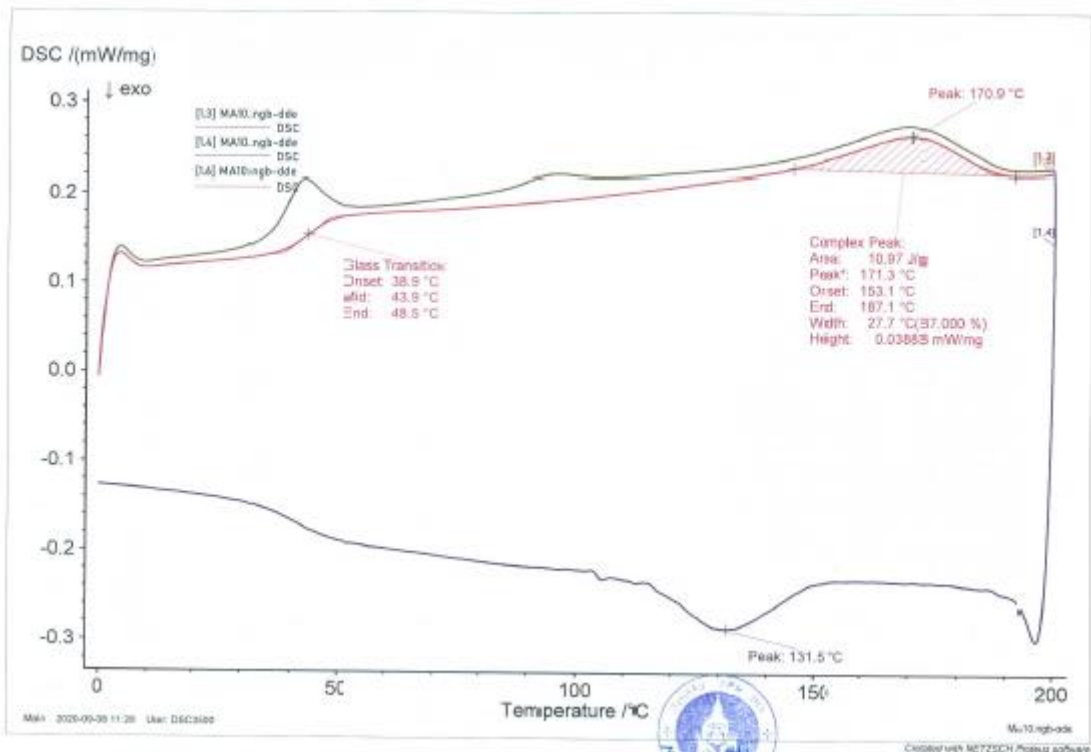
ภาพที่ ก.2 DSC Thermogram ของ PVOH(G10)



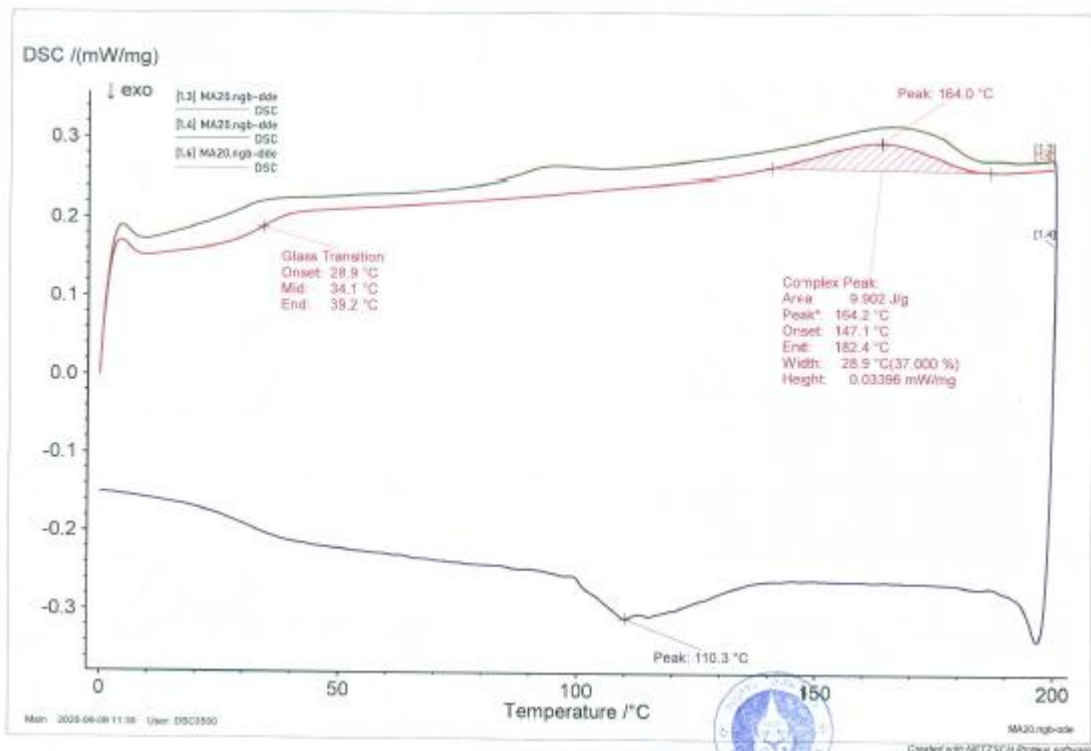
ภาพที่ ก.3 DSC Thermogram ของ PVOH(G20)



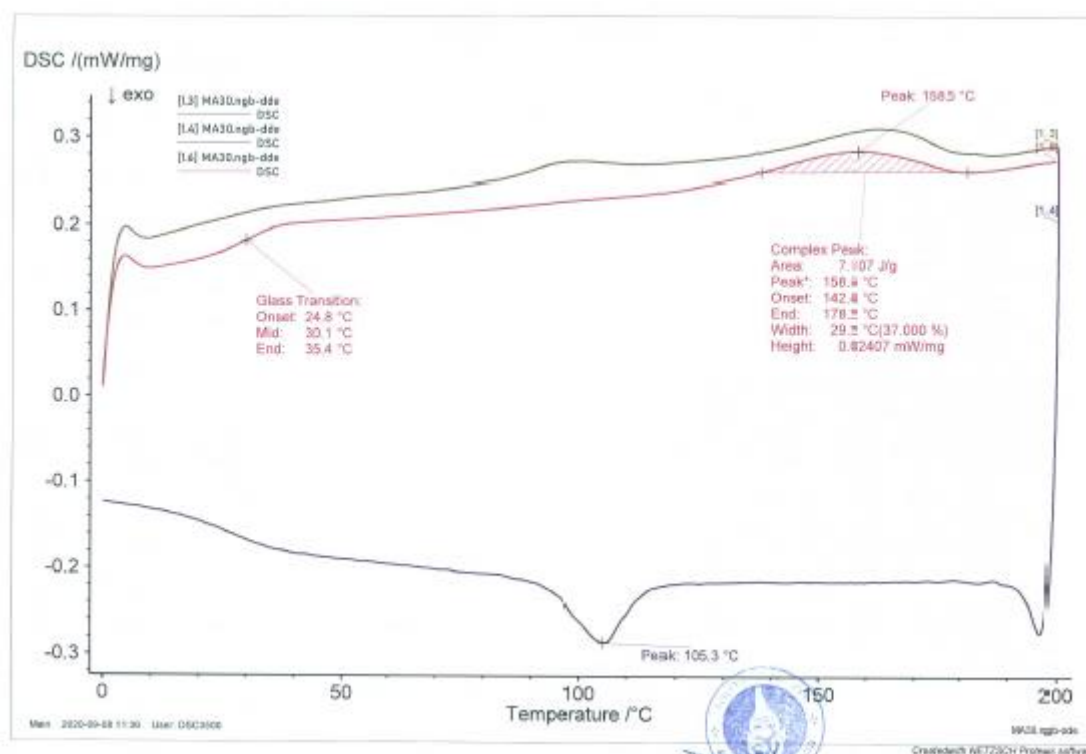
ภาพที่ ก.4 DSC Thermogram ของ PVOH(G30)



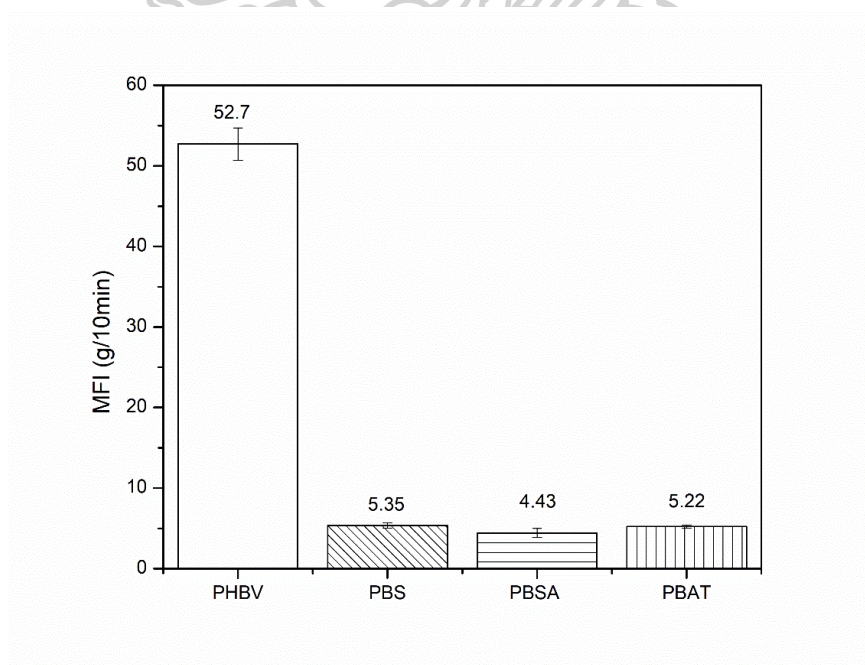
ภาพที่ ก.5 DSC Thermogram ของ PVOH(G10MA)



ภาพที่ ก.6 DSC Thermogram ของ PVOH(G20MA)



ภาพที่ ก.7 DSC Thermogram ของ PVOH(G30MA)



ภาพที่ ก.8 ค่าดัชนีการไหลของ PHBV, PBAT, PBS และ PBSA ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และ โหลดหนัก 2.16 กิโลกรัม

วิธีการผสมปุ๋ยหมัก

1. ทำการผสมมูลค่างควา, รำละเอียด และโดลาไมท์จนเข้ากันก่อนนำไปเทลงในเครื่องผสมปุ๋ยหมัก



2. จากนั้นเติมมูลสุกร, มูลไก่แกลบ และมูลโคในอัตราส่วนที่เท่ากัน และตีจนเข้ากันด้วยเครื่องผสมปุ๋ย



3. เติมน้ำสะอาดจนปุ๋ยหมักมีความชื้นประมาณ 40%RH

5. เติมน้ำหมักปลา (กากน้ำตาล 25 กิโลกรัมต่อน้ำ 200 ลิตร) และหัวเชื้อจุลินทรีย์ลงไปตามลำดับ ทำการคลุกส่วนผสมทั้งหมดจนเข้ากัน และใช้มีดสับจนปุ๋ยหมักละเอียดและมูลมีขนาดเล็กลงตามลำดับ

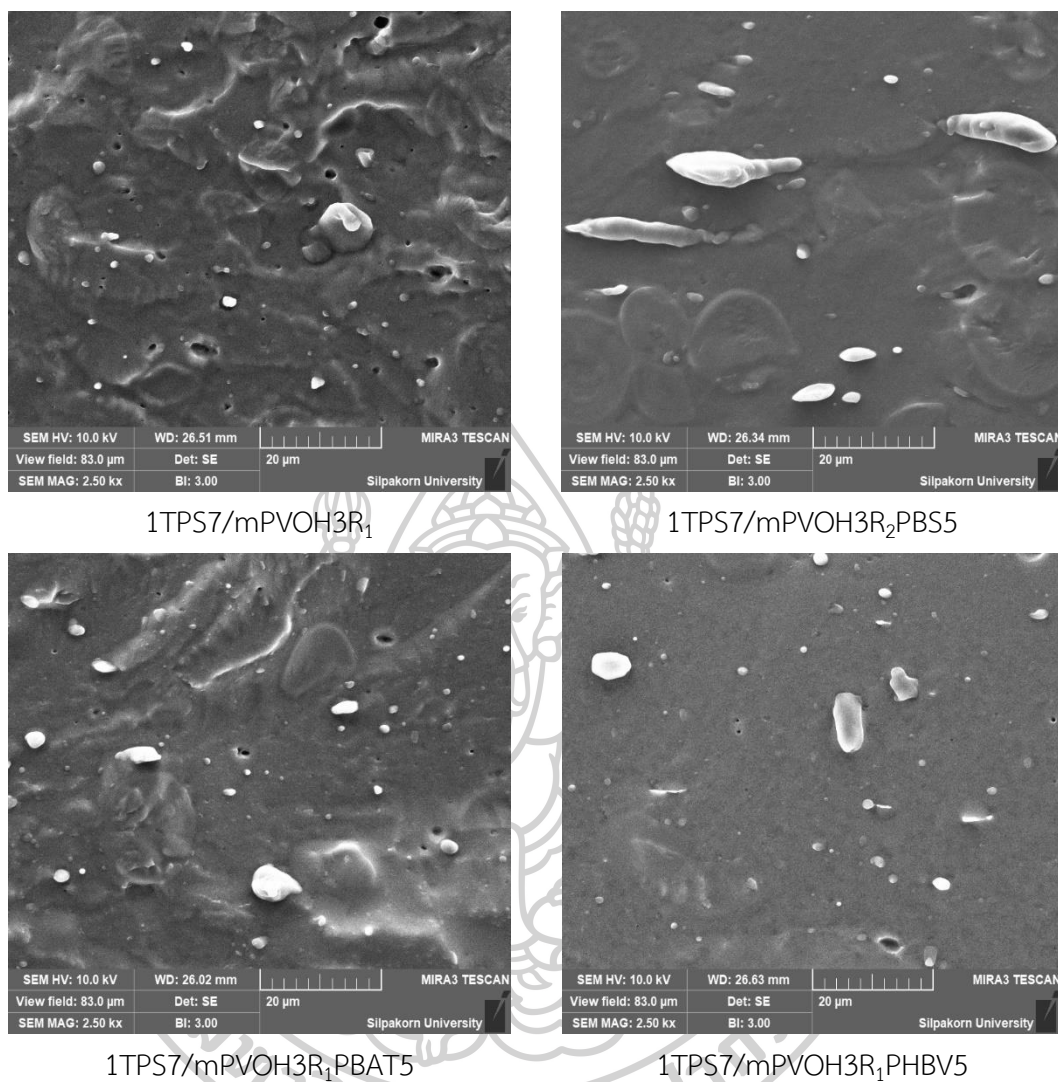
6. เมื่อปุ๋ยหมักเข้ากันได้ดีแล้ว นำปุ๋ยหมักที่ได้มาบรรจุใส่ถุงปุ๋ย และบรรจุขึ้นงานลงไปตามลำดับ

ตารางที่ ก.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการผสมปุ๋ยหมักสำหรับการทดสอบการย่อยสลายโดยการหมัก

ส่วนผสม	ปริมาณ (%)
มูลค่างคว	2.23
มูลไก่แกลบ	9.50
มูลสุกร	19.0
มูลโค	19.0
รำละเอียด	28.5
โดลาไมท์	11.7
ธาตุอาหารรอง	4.47
กากน้ำตาล	2.74
น้ำหมักปลา	2.74
หัวเชื้อจุลินทรีย์	0.112

ตารางที่ ก.2 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังกลบ

Time (day)	0	3	7	14	21	28
1TPS7/mPVOH3R ₁						-
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5						
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5						
1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5						



ภาพที่ ก.9 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบสลดระหว่าง 1TPS7/mPVOH3 ในระบบ reactive blend ที่มีการเติม PHBV, PBAT และ PBS ที่ได้จากทดสอบสมบัติเชิงกล (tensile fracture)

ภาพที่ ก.10 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิด



บริเวณที่ชิ้นงานลอยในน้ำทะเล
(Open sea water)

บริเวณที่ชิ้นงานถูกฝังในป่าชายเลน
(Mangrove field)

ภาพที่ ก.11 ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายในน้ำทะเลแบบเปิดเป็นเวลา 7 วัน



ชิ้นงานลอยในน้ำทะเล
(Open sea water)

ชิ้นงานถูกฝังในป่าชายเลน
(Mangrove field)

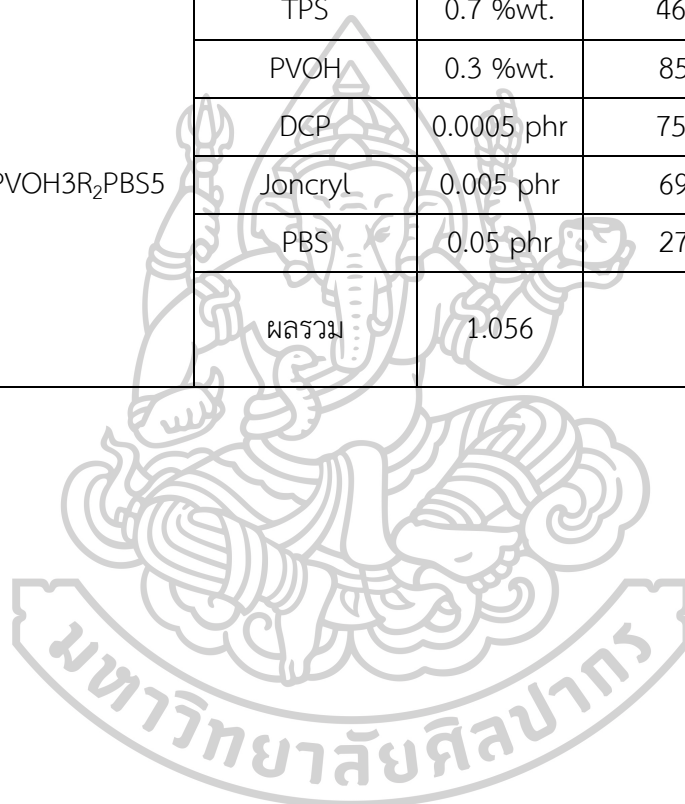


ภาคผนวก ข. คำนำวนต้นทุน

ตารางที่ ข.1 ต้นทุนและราคาของพอลิเมอร์เบลนด์สูตรต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตัวอย่าง	สารเคมี	อัตราส่วน	ราคา/กิโลกรัม (บาท)	ต้นทุน (บาท)
TPS	Native tapioca starch	100 g	35.0	25.7
	glycerol	30 phr	87.2	19.2
	MA	0.1 phr	45.0	0.03
	CA	1 phr	90.0	0.66
	EVA	5 phr	31.0	1.14
	ผลรวม	136.1		46.8 บาท/กิโลกรัม
1TPS7/mPVOH3R ₁	TPS	0.7 %wt.	46.8	32.5
	PVOH	0.3 %wt.	850	254
	DCP	0.001 phr	75.0	0.07
	Joncryl	0.005 phr	692	3.44
	ผลรวม	100.6		290 บาท/กิโลกรัม
1TPS7/mPVOH3R ₁ PBAT5	TPS	0.7 %wt.	46.8	32.5
	PVOH	0.3 %wt.	850	254
	DCP	0.001 phr	75.0	0.07
	Joncryl	0.005 phr	692	3.44
	PBAT	0.05 phr	250	12.4
	ผลรวม	1.056		302 บาท/กิโลกรัม

1TPS7/mPVOH3R ₁ PHBV5	TPS	0.7 %wt.	46.8	32.5
	PVOH	0.3 %wt.	850	254
	DCP	0.001 phr	75.0	0.07
	Joncryl	0.005 phr	692	3.44
	PHBV	0.05 phr	680	33.8
	ผลรวม	1.052		323 บาท/กิโลกรัม
1TPS7/mPVOH3R ₂ PBS5	TPS	0.7 %wt.	46.8	32.5
	PVOH	0.3 %wt.	850	254
	DCP	0.0005 phr	75.0	0.07
	Joncryl	0.005 phr	692	3.44
	PBS	0.05 phr	270	13.42
	ผลรวม	1.056		303 บาท/กิโลกรัม





ภาคผนวก ค. การนำเสนอผลงานวิจัย



Reactive compatibilization of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)/polyvinyl alcohol blends

Itsari Phuangmali, Manus Seadan, Rattikarn Khankrua & Supakij Suttiruengwong

To cite this article: Itsari Phuangmali, Manus Seadan, Rattikarn Khankrua & Supakij Suttiruengwong (2021): Reactive compatibilization of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)/polyvinyl alcohol blends, Polymer-Plastics Technology and Materials, DOI: [10.1080/25740881.2021.1918162](https://doi.org/10.1080/25740881.2021.1918162)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/25740881.2021.1918162>

Published online: 26 May 2021.

Submit your article to this journal

View related articles

View Crossmark data

ARTICLE



Reactive compatibilization of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)/polyvinyl alcohol blends

Itsari Phuangmal^a, Manus Seadan^b, Rattikam Khankruaf, and Supakij Suttiruengwong^{a*}^aDepartment of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand; ^bDepartment of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand; ^cDepartment of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajabangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom, Thailand

ABSTRACT

In this work, di(*tert*-butylperoxypropyl)benzene (DB) and multifunctional Epoxide compound (ECE) were incorporated into Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHEV)/Modified polyvinyl alcohol (mPVOH) (70/30, 30/70) in an internal mixer to improve the compatibility of PHEV/PVOH blend. Prior to blending, glycerol and Maleic anhydride (MA) were added to PVOH (mPVOH). FTIR spectra indicated the reaction of MA grafted PVOH. The addition of DB and ECE showed higher torque values and better interfacial adhesion than nonreactive and reactive blends with DB or ECE. Tensile strength and elongation at break were increased for all reactive blends. The matrix dominated the crystallization whereas the minor phase was not crystallized upon cooling.

ARTICLE HISTORY

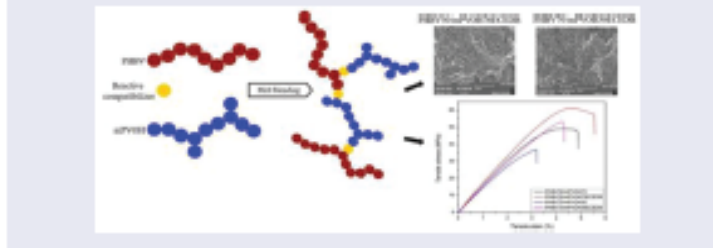
Received 1 February 2021

Revised 5 April 2021

Accepted 13 April 2021

KEYWORDS

Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate); polyvinyl alcohol; reactive blending; compatibilizer; super-cooling effect; immiscibility



1. Introduction

Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHEV) and Polyhydroxybutyrate (PHB) are among the most common members of Polyhydroxyalkanoate (PHAs), which are produced by numerous microorganisms. PHB is the most studied polymer in this family until a medium scale production of thermoplastic PHEV has become available and attracted many researchers owing to their good mechanical properties, biodegradability in both land and marine environment and renewable starting materials. The mechanical properties are similar to some of those petrochemical-derived plastics such as polypropylene.^[1] However, some major drawbacks, such as narrow window thermal processing and low-impact toughness, prevent it from desired applications.^[2,3] The polymer blend is the most practical and common method to modify the polymers.^[4,5] An interesting material for

blending with PHEV is Polyvinyl alcohol (PVOH), which is a biodegradable synthetic polymer obtained by the conversion of polyvinyl acetate by its hydrolysis. PVOH is water soluble, low toxicity, and high tensile strength.^[2,6] A. Sh. Asran et al.^[2] studied PHB/PVOH blends by electrospinning technique. They reported that PHB/PVOH blends were immiscible in the crystalline phase but are compatible in the amorphous state due to the existence of the hydrogen bond between both of them. Similar to the work carried out by H. H. Huang et al.^[6] they prepared PHB/PVOH, by the solution casting method and found that PHB/PVOH blend was miscible in the amorphous phase as a result of hydrogen bonds formed between hydroxyl groups of PVOH and carbonyl groups of PHB. The melt blends of PHB/PVOH have also been described only in a few studies. One of these included A. A. Ol'khov and his coworkers.^[7] They

prepared PHB/PVOH blends using a single-screw extruder and found that PHB/PVOH was partly miscible blending. Adding 20 and 30 wt% of PHB in the blends, phase inversion appeared and was accompanied with transition from an oriented PVA domain to an isotropic PHB domain. However, in their work, PHB and PVOH blends were prepared without reactive agent. To the best of our knowledge, reactive blending of PHBV/mPVOH blends has not yet been reported so far.

The aim of this work was to investigate the PHBV/mPVOH blend with and without reactive blends by torque values, morphology, and mechanical and thermal properties. PVOH was first modified by 1.0 phr of glycerol and 0.5 phr of maleic anhydride (MA) in a hot air oven under 100°C overnight, referred to as mPVOH. The ratios of 70/30 and 30/70 of PHBV/mPVOH were melt-blended with and without reactive agents. Di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene (DB) and multifunctional Epoxy chain extender (ECE) were chosen to improve the compatibility between PHBV and mPVOH through free radical and condensation reactions, respectively.

2. Materials and methods

2.1. Material section

PVOH, MOWIFLEX[®] C17 at 70–80 mol% hydrolysts with a melting temperature of 170°C and Melt flow index (MFI) (190°C/21.6 kg) 14–20 g/10 min was purchased from Kuraray Co., Ltd., Singapore. PHBV with 3 mol% of HV and a melting temperature of around 175–180°C was purchased from Tianan Biologic Materials Co. Ltd., China. Glycerol (G) was kindly supplied by SMS Corporation Co., Ltd. MA powder for synthesis was purchased from Sigma-Aldrich Co., Ltd. with density 1.5 g/cm³ and melting point at 53°C. Multifunctional ECE grade JONCRYL[®]ADR-4300 and DB, Perkadox 145-FI were purchased from BASF and AkzoNobel, respectively. ECE contains the epoxy equivalent weight of 445 g/mol. DB was received in slightly white flake form with active oxygen content peroxide ≥9.45%.

2.2. Preparation of modified PVOH

mPVOH was prepared by mixing and kneading PVOH with 1.0 phr of glycerol and 0.5 phr of MA in a hot air oven at 100°C overnight. For the sake of comparison, PVOH with glycerol 1.0 phr was prepared and denoted as PVOH(G1). PVOH with 1.0 phr of glycerol and 0.5 phr of MA is referred to as mPVOH. The sample was

then transferred to an internal mixer at 180°C with the rotor speed at 60 rpm for 10 min. The samples were ground, washed with distilled water for three times, and dried in an oven overnight before FTIR analysis.

2.3. Preparation of PHBV/mPVOH blends

PHBV/mPVOH ratios of 70/30 and 30/70 incorporated with and without reactive agents were prepared in an internal mixer at 180°C with a rotor speed of 60 rpm for 10 min. The ECE and DB contents were kept constant at 0.5 phr for all reactive blend samples. The compositions are represented in Table 1. The blend specimens were kept to equilibrate in the humidity and temperature chamber under room temperature 25°C at 50–55% relative humidity before further analysis.

2.4. Mechanical properties

The tensile testing was performed by the universal testing machine (Instron UTM Model 5969) at rate 1 mm/min according to ASTM D-638. The type V specimens were prepared using compression molding machine at 205°C. Twelve specimens each were used for the testing. The average cross-sectional area of specimen type V was 3.29 ± 0.25 mm wide and 2.88 ± 0.03 mm thick, whereas the total length was 7.62 ± 0.25 mm.

2.5. Morphology

To investigate the morphology of PHBV/mPVOH blends, all blended samples were cryo-fractured in liquid nitrogen and sputter coated with Au/Pd. Subsequently, the fracture surface was investigated by Field emission scanning electron microscopy (FESEM) (MIRA3 TESCAN) with a chamber pressure < 0.009 Pa under high vacuum mode. A 1000× magnification was used for all samples. The

Table 1. Compositions of all studied samples.

Sample	PHBV (Wt%)	mPVOH (Wt%)	ECE (phr)	DB (phr)
mPVOH	-	100	-	-
PHBV70/mPVOH30	70	30	-	-
PHBV70/mPVOH30/E2	70	30	0.5	-
PHBV70/mPVOH30/DB	70	30	-	0.5
PHBV70/mPVOH30/E2/DB	70	30	0.5	0.5
PHBV30/mPVOH70	30	70	-	-
PHBV30/mPVOH70/E2	30	70	0.5	-
PHBV30/mPVOH70/DB	30	70	-	0.5
PHBV30/mPVOH70/E2/DB	30	70	0.5	0.5
PHBV	100	-	-	-

diameters of the minor phase particles were analyzed using the ImageJ program.

2.6. Chemical structure analysis

FTIR spectroscopy analysis was performed using Vertex 70, Bruker Optic Germany, with a resolution of 4 cm^{-1} and 64 scans to confirm the grafting reaction between PVOH and MA. Samples were prepared into potassium bromide (KBr) disc.

2.7. Thermal analysis

The thermal analysis of PHBV/mPVOH blends was performed with Mettler DSC3⁺ from TA instruments under nitrogen gas. The samples have an average weight of $9.81 \pm 0.52\text{ mg}$. All samples were first heated from -20 to 200°C at the heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$, then cooled to -20°C and reheated to 200°C . The cooling and reheating rate was $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

3. Results and discussion

3.1. Chemical structure analysis of mPVOH

In order to compare the reaction result, PVOH was mixed with MA in FTIR spectrum shown in Figure 1. As shown in Figure 1, the peak of PVOH with MA (no reaction) showed C–O stretching in PVOH, which appeared at the same wave number of MA at 1720 cm^{-1} . The peaks at 1784 and 1853 cm^{-1} were corresponding to an unsaturated asymmetric C–O stretching and an unsaturated symmetric C–O stretching in MA, respectively. However, these two peaks disappeared in mPVOH. The peak at 1735 cm^{-1} in PVOH(G1) and mPVOH were assigned to carbonyl groups belonging to the residual polyvinyl acetate, but for mPVOH the broader peak at 1735 cm^{-1} was observed probably due to overlapping of the peak of C–O stretching in MA and the increased ester linkage. The carbonyl peak of mPVOH shifted toward higher wavenumber, indicating the carbonyl of ester linkage O–C–O. Barra and coworkers^[8] prepared EPDM-g-MA and found the peaks at 1707 , 1780 , and 1856 cm^{-1} .

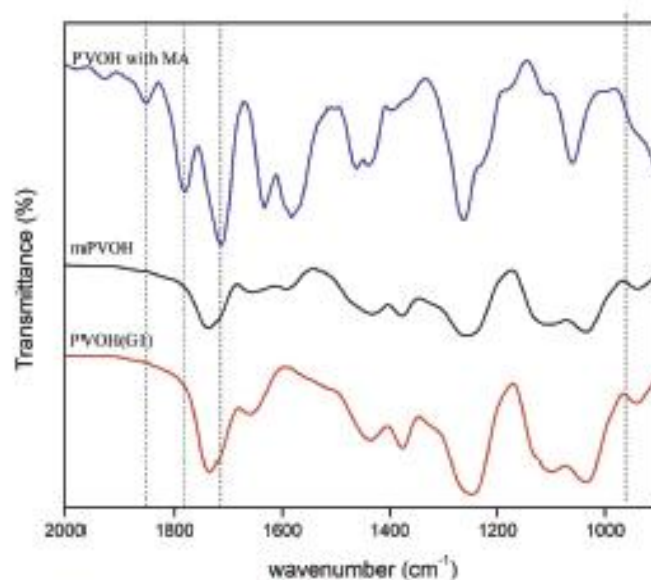
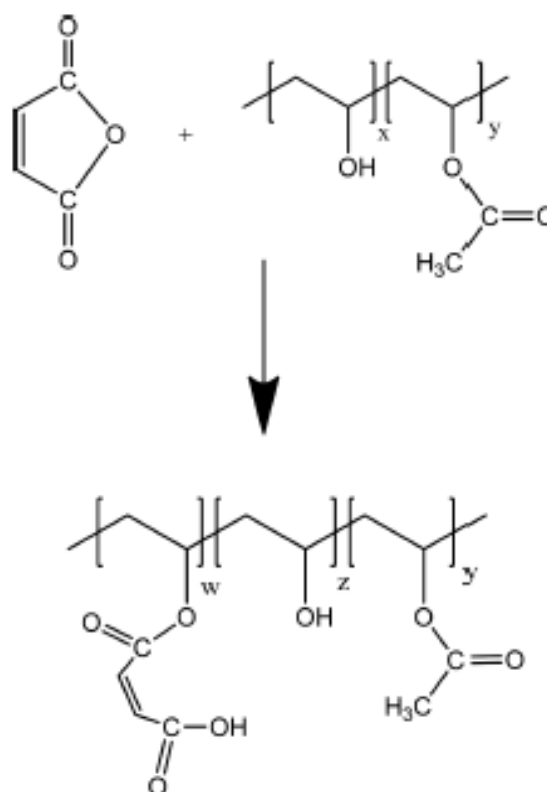


Figure 1. FTIR spectra of PVOH(G1), mPVOH, and PVOH with MA (solid mixture).

in grafting polymer, which corresponded to C–O stretching group of MA. In addition, when MA was converted to maleic acid, the peak at 1720 cm^{-1} was shifted down to 1707 cm^{-1} , which was assigned to C–O stretching group of maleic acid. For mPVOH, although the characteristics peaks of MA disappeared and were expected to convert to maleic acid, the peak at 1707 cm^{-1} was not observed in our case. W. Sukhlaited et al.³⁰ studied the syntheses of maleated PVOH in aqueous solution. They found the peak at 920 cm^{-1} in the spectrum of MA grafted PVOH, which was assigned to carboxylic groups due to copolymerization of PVOH and MA. The particular peak was also observed at 940 cm^{-1} for mPVOH. Based on the findings, the reaction was proposed as illustrated in Scheme 1.

3.2. Mixing torque values

The mixing torque of the internal mixer can be correlated to the molten polymer viscosity. The evolution of neat PVOH, PVOH(G1), and mPVOH mixing torque curves is shown in Figure 2. The mixing torque of PVOH(G1) was lower than neat PVOH as a result of the lubrication effect of glycerol. This result was similar to that found by W. Wu et al.,¹¹⁰ who studied the flexibility of PVOH films with different polyol plasticizers. They found that the mixing torque decreased when glycerol was added due to the reduction of interaction between molecular chains, which subsequently led to the improved melt flowing ability. A slight increase of mixing torque was observed in mPVOH compared with PVOH(G1), which may be the result of maleic acid



Scheme 1. Proposed reaction of PVOH and MA.

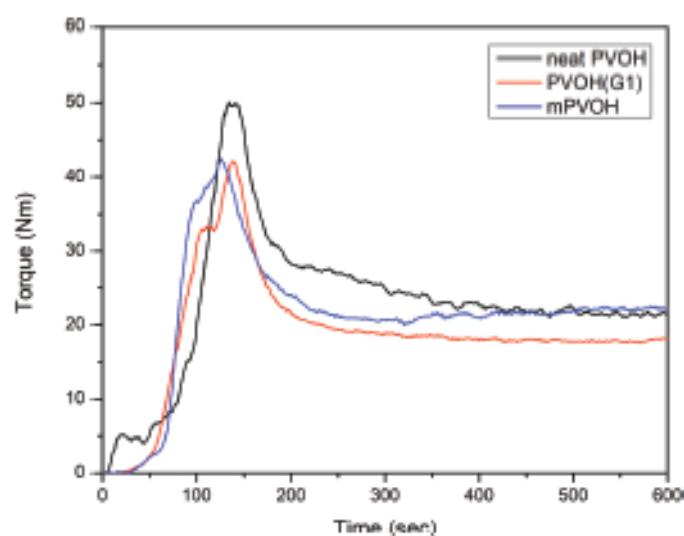


Figure 2. Mixing torque curves of neat PVOH, PVOH(G1), and mPVOH.

groups hindering the lubrication effect of glycerol. During melt blending, the grafted maleic acid groups and residual anhydride group from free MA might form the strong hydrogen bonding with hydroxyl groups of glycerol or possibly react with glycerol through the condensation reaction.

The effect of the torque values on the addition of ECE or DB at 0.5 phr in PVOH(G1) and mPVOH is shown in Figure 3a, b. The increased mixing torque values of mPVOH and PVOH(G1) with reactive agents were observed when compared with PVOH(G1) as shown in Figure 3a. On the other hand, the equilibrium torque value of mPVOH was higher than mPVOH with ECE or DB. In the case of the addition of DB, the reduction of the melt viscosity was still unclear, but it might be a result of the decrease in the molecular weight due to alkoxy radical. The existence of double bonds of maleic acid did not promote the crosslinking as was anticipated. For the addition of ECE in mPVOH, the melt viscosity also dropped below that of mPVOH. The reaction of ECE with PVOH was unclear, but the possibility of the molecular weight reduction of PVOH has not yet been reported.

The torque values at 10 min of PHBV, PVOH(G1), and mPVOH were 2.31, 18.2, and 22.1 Nm, respectively. The mixing torque curves of polymer blends with and without ECE and DB are shown in Figure 4 and Figure 5.

For PHBV70/mPVOH30 (Figure 4), the mixing torque of reactive blends incorporated with both reactive agents ECE and DB increased when compared with nonreactive and reactive blends loading with either ECE or DB.

The same results were obtained for PHBV30/mPVOH70 as shown in Figure 5. The increase in the torque values on polymer blends was evident for the effectiveness of the reactive agents used. The extent of which was reflected by the increased melt viscosity and possible increased molecular weight of reactive blends. During melt blending, the epoxy functionalized from the ECE chain could react with carboxylic terminal groups of PHBV and mPVOH through condensation reaction with maleic acid groups. Upon adding DB, the free radical reaction might consequently promote the partial crosslinking reaction.

3.3. Morphology

SEM micrographs of nonreactive and reactive blends of PHBV70/mPVOH30 are presented in Figure 6a, b. It was shown that the dispersed mPVOH particles within the PHBV domain ranged between 2.5 and 100 μm (see Figure 6a). PVOH particles were not uniformly dispersed and particles void and holes resulted from poor interfacial wetting of both polymers could be observed. In addition, large particles of dispersed mPVOH phase

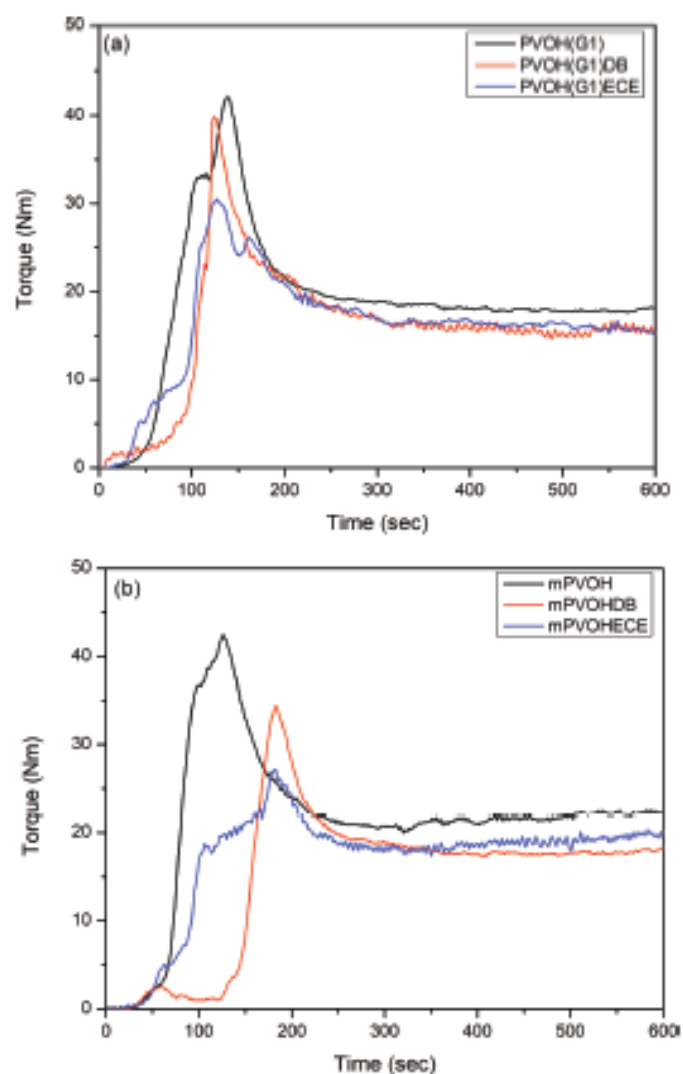


Figure 3. Mixing torque curves of (a) PVOH(G1) with and without ECE or DB (b) mPVOH with and without ECE or DB.

were a result of high melt viscosity of mPVOH compared to PHBV as mentioned earlier. mPVOH particles tended to agglomerate when shear force is applied. In

the case of reactive ECE and DB in PHBV70/mPVOH30 blend, the uniformly fine dispersed mPVOH with smaller particle size lower than $5.0 \mu\text{m}$ of mPVOH could be

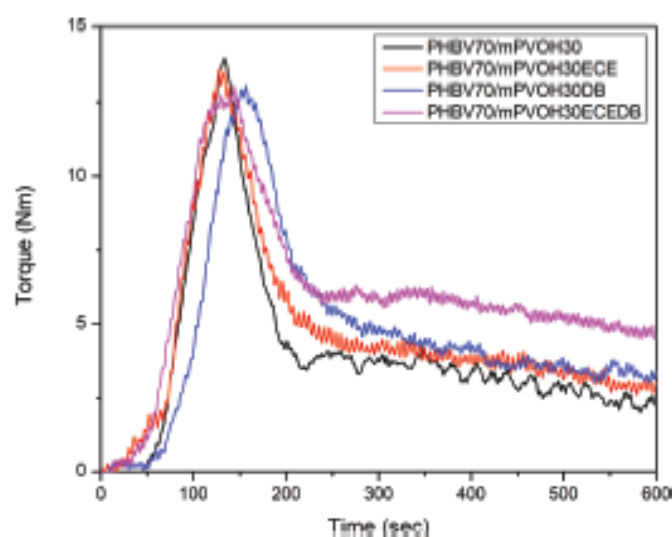


Figure 4. Mixing torque curves of PHBV70/mPVOH30 with and without ECE and DB.

seen (Figure 6b). This implied that the interfacial adhesion between PHBV and mPVOH phases was improved by the possible reaction between ECE and DB with PHBV or mPVOH chains through the condensation and the free radical reaction.^[11,12]

For the reverse ratio, PHBV30/mPVOH70 with and without ECE and DB showed different micrographs as depicted in Figure 7a, b. PHBV was a dispersion phase with mPVOH as a matrix. Nonuniform PHBV phase could be observed with some voids, indicating poor interfacial adhesion. Since mPVOH had much more viscosity than PHBV, PHBV particle sizes ranged from 5 to 20 μm as shown Figure 7a. In Figure 7b, PHBV30/mPVOH70 incorporated with ECE and DB illustrated finer morphology (particle size <2.6 μm) and improved interfacial interaction between PHBV and mPVOH due to the reaction of the reactive groups of ECE and DB with mPVOH and PHBV as aforementioned.

3.4. Mechanical properties

The stress-strain plots of polymer blends with both ratios with and without reactive agents are shown in Figure 8. It was obvious that when PVOH contents were increased in polymer blends, the stress-strain curve exhibited the high Young's modulus and tensile strength. Considering that

Young's modulus of neat PHBV was 300 MPa whereas mPVOH had Young's modulus of 1900 MPa. (data not shown), the blend with higher PHBV content would make materials less stiff. Elongation at break was better when mPVOH became matrix. This result agrees with Y. Li and coworkers,^[13] who studied the binary blend between Poly (3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) (P34HB) and amorphous Poly(vinyl acetate) (PVAc) using melt compounding. They demonstrated that when PVAc content was increased, the blends showed a drastic improvement in elongation at break, but only a slight decrease in strength and modulus. The high mPVOH content loaded with ECE and DB caused even higher tensile strength and Young's modulus. Meanwhile, the elongation at break was also much improved. This was due to the better load transfer after the modification of interfacial adhesion between two polymers.^[14,15] The mechanical properties of all samples are summarized in Table 2. The reactive blends incorporated with ECE and DB showed the significant improvement on tensile strength, elongation at break and toughness when compared with the nonreactive system. The reason for this could be explained by the uniformly dispersed phase and improved wettability.^[16,17] This result was consistent with SEM images discussed previously. For both ratios, no matter which polymer was a matrix, the toughness calculated from the area under the tensile stress-strain curve indicated that the addition of ECE and DB led

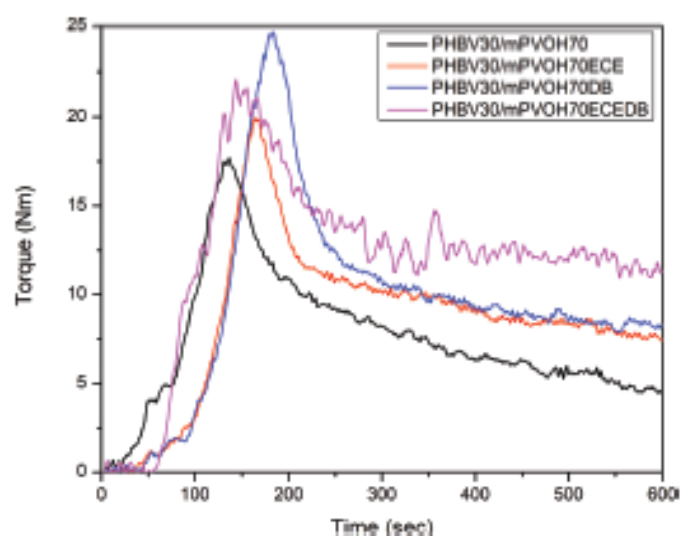


Figure 5. Mixing torque curves of PHBV30/mPVOH70 with and without ECE and DB.

to the improvement of the energy absorbed by the materials. The toughness of PHBV70/mPVOH30 was increased from 0.67 to $1.3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ upon adding both ECE and DB. Similarly, the toughness of PHBV30/mPVOH70 was also improved to $2.2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ for the reactive blend system.

3.5. Thermal analysis

Thermal properties of neat PHBV, mPVOH, and their blends are summarized in Table 3. The DSC thermograms of neat PHBV and mPVOH exhibited the melting temperature (T_m) of neat PHBV and mPVOH at 173°C and 179°C , respectively. Neat PHBV showed the crystallization temperature (T_c) at 123°C whereas T_c of mPVOH was revealed at 139°C . Interestingly, the higher content of PHBV prevented mPVOH from crystallization. T_c and T_m of mPVOH could not be observed when the blend incorporated reactive agents. Similarly, for PHBV30/mPVOH70 blend system, T_m of PHBV could not be observed. It should also be pointed out that if PHBV was a domain, mPVOH showed more amorphous phase. In contrast, when mPVOH was a matrix, PHBV tended not to crystallize out. T_c of mPVOH in polymer blend was lower when compared with neat mPVOH. T_c of PHBV could still be detected only for PHBV30/mPVOH70 and PHBV30/mPVOH70DB at 92.3°C and 90.4°C , respectively. The addition of BCE for this blend system led to the

disappearance of T_c of PHBV. The crystallization process was hindered or disrupted by mPVOH and reactive agents. The supercooling effect was another reason for the undetected crystallization peaks for both ratios where the high content of each polymer was in the blend.

It should be noted that the glass transition temperature (T_g) of neat PHBV was undetectable in the range of the study, whereas T_g of mPVOH was observed at 56.9°C . For PHBV70/mPVOH30 blend system, T_g of mPVOH was nondetected in all specimens. T_g of mPVOH for PHBV30/mPVOH70 blend was lower when compared with mPVOH. However, T_g of mPVOH for PHBV30/mPVOH70ECE was higher probably due to the reaction of ECE with mPVOH chains, leading to the branching or cross-linking structures. This was also observed by the increase in the melt viscosity in the torque rheometer. It was noteworthy that since T_g of PHBV was not detected, the lower T_g of mPVOH in some cases probably due to the plasticizing effect of the compatibilizer or interfacial wettability.

4. Conclusion

In this work, DB and ECE were successfully used to improve the morphological and tensile properties of

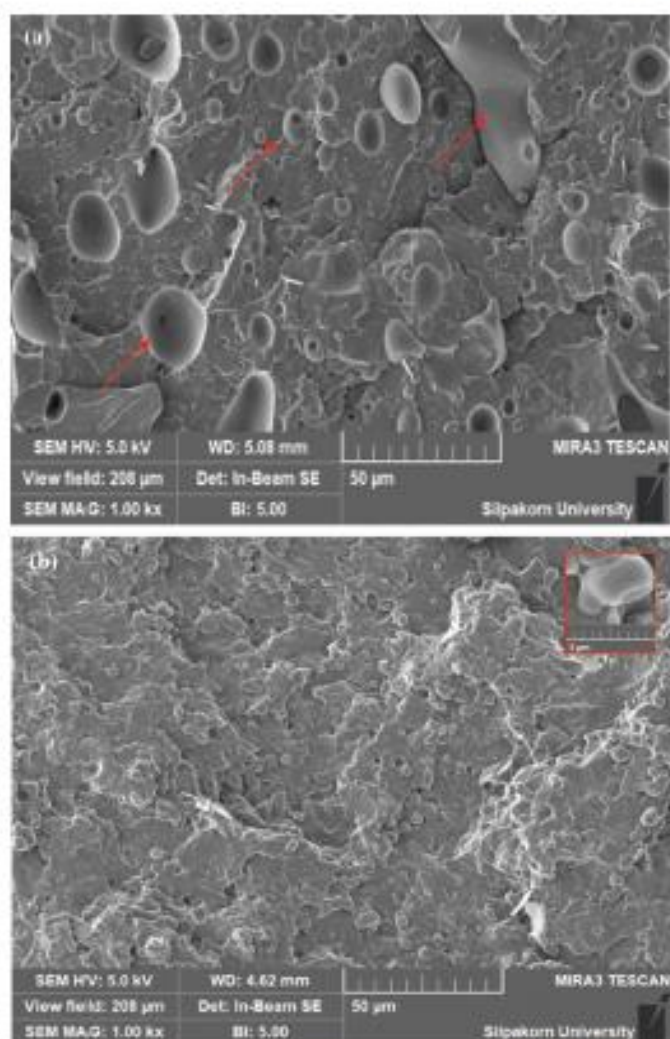


Figure 6. Morphology of (a) PHBV70/mPVOH30 and (b) PHBV70/mPVOH30 incorporated with DB and ECE.

PHBV and mPVOH blends. MA could increase reactive groups of PVOH through condensation reaction between hydroxyl groups of PVOH with Maleic anhydride group of MA. The higher mixing torque of reactive blends when compared with

nonreactives implies that DB and ECE could possibly react with PHBV and mPVOH through the free radical and condensation reaction. No matter which polymers were the major component, the finely dispersed morphology and smaller particle sizes could

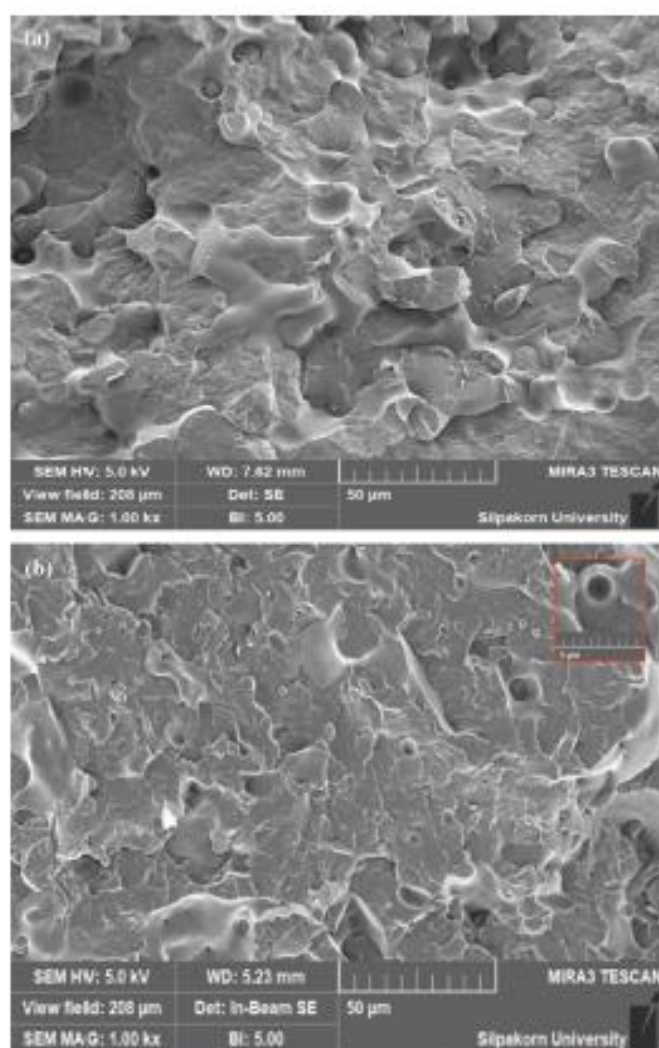


Figure 7. Morphology of (a) PHBV30/mPVOH70 and (b) PHBV30/mPVOH70 incorporated with DB and ECE.

be realized by the addition of ECE and DB. The particle sizes were reduced below 5.0 µm for mPVOH providing PHBV as a matrix, whereas

they were reduced to less than 2.6 µm. The polymer blends with ECE and DB showed an increase in the tensile strength, elongation at break, and toughness

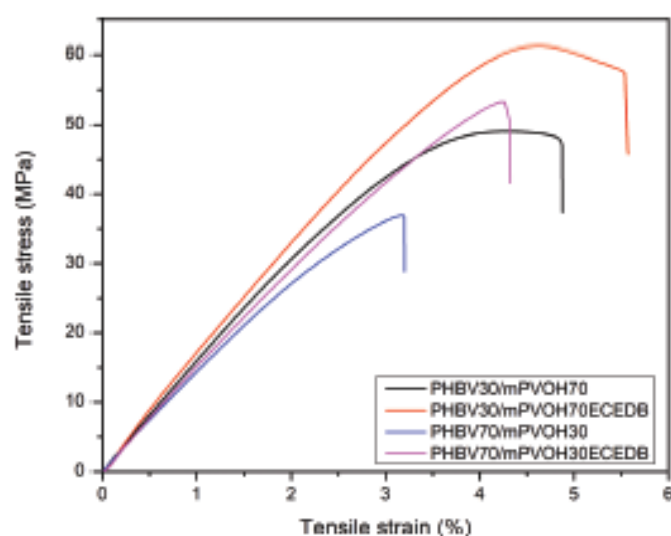


Figure 8. Representative stress-strain curves of reactive and nonreactive PHBV/mPVOH specimens for both ratios.

Table 2. Summary of mechanical properties of PHBV70/mPVOH30 and PHBV30/mPVOH70 with and without ECE and DB.

Sample	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Toughness (MJ/m ³)
PHBV70/mPVOH30	1480 ± 148	43.3 ± 1.6	3.5 ± 0.3	0.67 ± 0.01
PHBV70/mPVOH30ECE	1511 ± 96.0	44.6 ± 4.0	3.7 ± 0.3	0.91 ± 0.01
PHBV70/mPVOH30DB	1538 ± 112	42.4 ± 4.9	3.3 ± 0.4	0.75 ± 0.02
PHBV70/mPVOH30ECEDB	1531 ± 91.0	54.0 ± 1.6	4.6 ± 0.3	1.3 ± 0.02
PHBV30/mPVOH70	1673 ± 104	49.7 ± 0.9	4.1 ± 0.6	1.4 ± 0.01
PHBV30/mPVOH70ECE	1540 ± 83.5	53.9 ± 5.3	4.9 ± 0.3	1.7 ± 0.03
PHBV30/mPVOH70DB	1648 ± 64.3	52.1 ± 4.3	4.4 ± 0.5	1.6 ± 0.02
PHBV30/mPVOH70ECEDB	1614 ± 142	60.6 ± 2.6	6.1 ± 0.3	2.2 ± 0.02

when compared with the nonreactive one due to the better load transfer between two polymers. The thermal properties confirmed that T_m and T_c of reactive blends shifted toward lower temperature when compared with nonreactive blends. Depending on the matrix phase, the minor phase tends to undergo the supercooling effect.

Acknowledgments

We are grateful to the SMS Corporation Co., Ltd. for providing the plasticizer.

Funding

This work was supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology and Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University.

Notes on contributors

Jwari Phuangmafi, Ms. is a Master student at the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand. She is under the supervision of Supakij Sattiratsamee. She is working on the starch-based blends.

Table 3. Thermal properties of PHBV70/MPVOH30 and PHBV30/MPVOH70 with and without ECE and DB.

Sample	T_g (°C)	Cooling scan		Second heating scan	
		T_c (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	T_m (°C)
mPVOH	56.9	179	-	179	-
PHBV70/MPVOH30	-	142	110	-	171
PHBV70/MPVOH30ECE	-	-	114	-	172
PHBV70/MPVOH30DB	-	-	113	-	167
PHBV70/MPVOH30ECEDB	-	-	111	-	167
PHBV30/MPVOH70	50.6	145	92.3	157	-
PHBV30/MPVOH70ECE	59.3	121	-	172	-
PHBV30/MPVOH70DB	50.1	134	90.4	169	-
PHBV30/MPVOH70ECEDB	53.6	135	-	165	-
PHBV	-	-	123	-	173

Mansur Saadon, Dr. was a retired professor at Department of Physics, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand. He is currently working as a researcher at Silpakorn University. His interest includes Polymer interface, Blends and Compounds.

Rattikorn Khankrua, Dr. is a lecturer at the Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom, Thailand. Her research area includes Polymer blends and composites, Polymer reaction.

Sapakij Sattiraengwong, Assoc. Prof. Dr.-Ing. is now a lecturer at the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand. He has strong experiences in both industry and academic researches. His research interest involves Bioplastics compounds, End-of-life options for bioplastics, Bioplastics applications and Circular economy for plastics.

ORCID

Sapakij Sattiraengwong  <http://orcid.org/0000-0002-8175-452X>

Highlights

- (1) MA and glycerol provided the increased reactive sites on PVOH.
- (2) When adding ECE and DB to polymer blends, the interfacial adhesion of polymer blends was significantly improved.
- (3) Reactive blends loading with ECE and DB can improve tensile strength and elongation at break when compared to nonreactive blend while Young's modulus remains unaffected.

References

- [1] Suzuki, M.; Tachibana, Y.; Kasuya, K.-I. Biodegradability of Poly(3-hydroxyalkanoate) and poly(ϵ -caprolactone) via Biological Carbon Cycles in Marine

Environments. *Polym. J.* 2021, 53(1), 47–66. DOI: 10.1038/s41428-020-00396-5.

- [2] Asran, S. A. R.; K.; Aggarwal, N.; Michler, G. H.; Groth, T. Nanofibers from Blends of Polyvinyl Alcohol and Polyhydroxy Butyrate as Potential Scaffold Material for Tissue Engineering of Skin. *Biomacromolecules*. 2010, 3413–3421. DOI:10.1021/bm100912v.
- [3] Zembouai, I.; Brubaud, S.; Kaci, M.; Benhamida, A.; Corre, Y.-M.; Grohens, Y.; Taguet, A.; Lopez-Cuesta, J.-M. Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate)/Polylactide Blends: Thermal Stability, Flammability and Thermo-Mechanical Behavior. *J. Polym. Environ.* 2014, 22(1), 131–139. DOI: 10.1007/s10924-013-0626-7.
- [4] Grabiano, A.; Jaffer, S.; Sain, M. Review on Modification Strategies of Polyethylene/polypropylene Immiscible Thermoplastic Polymer Blends for Enhancing Their Mechanical Behavior. *J. Elastomers Plast.* 2019, 51(4), 291–336. DOI: 10.1177/0095244318783806.
- [5] Muthanj, R.; Mira, M.; Mohanty, A. K. Biodegradable Compatibilized Polymer Blends for Packaging Applications: A Literature Review. *J. Appl. Polym. Sci.* 2017, 135, 24. DOI: 10.1002/app.45726.
- [6] Huang, H. H. Y.; Hongtao, Z.; Hongtao, Z.; Isao, N.; Yukihiko, O. Miscibility and Hydrogen-Bonding Interactions in Biodegradable Polymer Blends of Poly(3-hydroxybutyrate) and a Partially Hydrolyzed Poly(vinyl Alcohol). *J. Polym. Chem. B.* 2005, 43(41), 19175–19183. DOI: 10.1021/jp0532162.
- [7] Of'khov, A. A.; Jordanakii, A. L.; Shatalova, O. V.; Blends Based on Polyvinyl Alcohol and Polyhydroxybutyrate. *Int. Polym. Sci. and Tech.* 2018, 30(8), 47–50. DOI:10.1177/030717460303000811.
- [8] Barra, G. M. O.; Crespo, J. S.; Bertolino, J. R.; Soldi, V.; Pires, A. T. N. Maleic Anhydride Grafting on EPDM: Qualitative and Quantitative Determination. *J. Braz. Chem. Soc.* 1999, 20(1), 31–34. DOI: 10.1590/s0103-5053199900100006.
- [9] Sukhlaxaid, W.; Riyajan, S.-A. Green Synthesis and Physical Properties of poly(Vinyl Alcohol) Maleated in an Aqueous Solutions. *J. Polym. Environ.* 2014, 22(3), 350–358. DOI: 10.1007/s10924-014-0651-1.

- [10] Wu, W.; Tian, H.; Xiang, A. Influence of Polyol Plasticizers on the Properties of Polyvinyl Alcohol Films Fabricated by Melt Processing. *J. Polym. Environ.* 2011, 20(1), 63–69. DOI: 10.1007/s10924-011-0364-7.
- [11] Tselios, C. B. D.; Maslia, V.; Panayiotou, C. In Situ Compatibilization of Polypropylene–polyethylene Blends: A Thermomechanical and Spectroscopic Study. *POLYMER*. 1998, 39(26), 6807–6817.
- [12] Graziano, A.; Tittton Dias, O. A.; Garcia, C.; Jaffer, S.; Tjong, J.; Sain, M. Non-Isenthalpic Crystallization Behavior and Thermal Properties of Polyethylene Tuned by Polypropylene and Reinforced with Reduced Graphene Oxide. *Nanomater. (Basel)*. 2020, 10(8), 8. DOI: 10.3390/nano10081428.
- [13] Li, Y.; Lei, Y.; Yao, S.; Han, C.; Yu, Y.; Xiao, L. Miscibility, Crystallization, Rheological and Mechanical Properties of Biodegradable Poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate)/poly(vinyl Acetate) Blends. *Thermochim. Acta*. 2020, 693, 178755. DOI: 10.1016/j.tca.2020.178755.
- [14] Graziano, A.; Dias, O. A. T.; Garcia, C.; Jaffer, S.; Tjong, J.; Sain, M. Impact of Reduced Graphene Oxide on Structure and Properties of Polyethylene Rich Binary Systems for Performance-based Applications. *Polymer*. 2020, 202, 122622. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122622.
- [15] Graziano, A.; Garcia, C.; Jaffer, S.; Tjong, J.; Yang, W.; Sain, M. Functionally Tuned Nanolayered Graphene as Reinforcement of Polyethylene Nanocomposites for Lightweight Transportation Industry. *Carbon*. 2020, 169, 99–110. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.07.040.
- [16] Graziano, A.; Garcia, C.; Jaffer, S.; Tjong, J.; Sain, M. Novel Functional Graphene and Its Thermodynamic Interfacial Localization in Biphasic Polyolefin Systems for Advanced Lightweight Applications. *Compos. Sci. Technol.* 2020, 188, 107958. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107958.
- [17] Mural, P. K. S.; Banerjee, A.; Rama, M. S.; Shukla, A.; Padmanabhan, B.; Bhadra, S.; Madras, G.; Bose, S. Polyolefin Based Antibacterial Membranes Derived from PE/PBO Blends Compatibilized with Amine Terminated Graphene Oxide and Maleated PE. *J. Mater. Chem. A*. 2014, 2(41), 17635–17648. DOI: 10.1039/c4ta03997a.

รายการอ้างอิง

1. มันสำปะหลัง พืชแห่งศตวรรษที่ 21. [cited 14/06/2019 2017]; Available from: <https://www.nstda.or.th/agritec/technology/plant/casava-21>.
2. พิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช. [cited 7/07/2019 2019]; Available from: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=23710>.
3. Artjima, O., Pongsa, U., *Bioactive Film Based on Polyvinyl Alcohol/Starch Enriched with Antioxidants from Extracted Spent Coffee Ground and Citric Acid* KRU RESEARCH JOURNAL (GRADUATE STUDIES) , 2018. **19**(NO. 1: January-March 2019).
4. Zanela, J., *Biodegradable Sheets of Starch/Polyvinyl Alcohol (PVA): Effects of PVA Molecular Weight and Hydrolysis Degree*. Waste and Biomass Valorization, 2019. **10**(2): p. 319-326.
5. Zou, G.X., Ping, J.Q., Liang, X., *Extruded Starch/PVA Composites: Water Resistance, Thermal Properties, and Morphology*. Journal of Elastomers and Plastics, 2008. **40**(4): p. 303-316.
6. Xiang, A., *Melt processing of high alcoholysis poly(vinyl alcohol) with different polyol plasticizers*. Journal of Polymer Engineering, 2018. **38**(7): p. 659-665.
7. Wu, W., Tian, H., and Xiang, A., *Influence of Polyol Plasticizers on the Properties of Polyvinyl Alcohol Films Fabricated by Melt Processing*. Journal of Polymers and the Environment, 2011. **20**(1): p. 63-69.
8. Daranee K., *Improvement mechanical properties of polyvinyl alcohol (PVA)/sodium carboxymethyl cellulose (Na-CMC) films for active packaging applications* 2015.
9. Jang, J., Lee, D.K., *Plasticizer effect on the melting and crystallization behavior of polyvinyl alcohol*. Polymer, 2003. **44**(26): p. 8139-8146.
10. Rahman, W.A., *Thermal behaviour and interactions of cassava starch filled with glycerol plasticized polyvinyl alcohol blends*. Carbohydrate Polymers, 2010. **81**(4): p. 805-810.
11. เคมีและสมบัติของแป้ง. [cited 14/06/2019 2016]; Available from:

- <https://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>.
12. การจำแนกและการจัดกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติก. [cited 14/06/2019 2017]; Available from: <https://www.great-pet.com>.
 13. แป้งเทอร์โมพลาสติก (*Thermoplastic starch*). [cited 21/06/2019 2006]; Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/226_65-70.pdf.
 14. *Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)* [cited 14/06/2019 2012]; Available from:
http://webpac.library.mju.ac.th:8080/mm/fulltext/research/2556/Somkid_Deejing_2555/fulltext.pdf.
 15. *Ethylene-vinyl alcohol (EVOH)*. [cited 14/06/2019 2019]; Available from: <http://synergysupply.co.th/th/products-th/459>.
 16. Phuangmali, I., *Reactive compatibilization of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)/polyvinyl alcohol blends*. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2021: p. 1-13.
 17. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์. [cited 14/06/2019 2019]; Available from: <http://www.vessel-chemical.com/Default.aspx?pageid=25>.
 18. พ ล ำ ส ต ธิ ไ ซ เ ซ อ ร ์ . [cited 14/06/2019 2538]; Available from: http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_2_001c.asp?info_id=146.
 19. ก ลี เ ซ อ ร อ ล . [cited 14/06/2019 2016]; Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1926/glycerol-A5>.
 20. *citric acid* [cited 14/06/2109 2010]; Available from: <http://www.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/146-6034.pdf>.
 21. ก ร ด ซี ต ริ ก . [cited 14/06/2019 2018]; Available from: http://119.46.166.126/self_all/selfaccess7/m1/497/lesson4/menu3_4/p3.php.
 22. *Maleic anhydride*. [cited 14/06/2019 2014]; Available from: http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Akkhakorn_Sanyarak/Akkhakorn_Sanyarak_fulltext.pdf.
 23. Huang, Y., *Study on the Effect of Dicumyl Peroxide on Structure and Properties of Poly(Lactic Acid)/Natural Rubber Blend*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2012. **21**(2): p. 375-387.
 24. Keeratipinit, K., *A STUDY OF THERMOPLASTIC STARCH PREPARATION IN TWIN*

- SCREW EXTRUDER USING NATIVE AND MODIFIED TAPIOCA STARCH., in *Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)*. 2018, Silpakorn University.
25. Lijun M., Gordon, S.I., Cinelli, P., Chiellini, E., *Extruded Cornstarch–Glycerol–Polyvinyl Alcohol Blends: Mechanical Properties, Morphology, and Biodegradability*. *Polymers and the Environment*, 200. **8**(4): p. 205-211.
 26. Ma, P., *Structure-property relationships of reactively compatibilized PHB/EVA/starch blends*. *Carbohydr Polym*, 2014. **108**: p. 299-306.
 27. Thire, R.M., Ribeiro, T.A., Andrade, C.T., *Effect of starch addition on compression-molded poly(3-hydroxybutyrate)/starch blends*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006. **100**(6): p. 4338-4347.
 28. Avella, M.E., *Preparation of PHBV/Starch Blends by Reactive Blending and Their Characterization*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000. **77**: p. 232–236.
 29. Imam, H., Shogren, R.L., TOSTESON, T.R., GOVIND, N.S., GREENE, R.V., *Degradation of Starch–Poly(b-Hydroxybutyrate-Co-b-Hydroxyvalerate) Bioplastic in Tropical Coastal Waters*. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 1999. **65**(2): p. 431–437.
 30. Muthuraj, R., Misra, M., Mohanty, A.K., *Biodegradable Poly(butylene succinate) and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends: Reactive Extrusion and Performance Evaluation*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2014. **22**(3): p. 336-349.
 31. Brunner, C.T., *Performance of biodegradable microcapsules of poly(butylene succinate), poly(butylene succinate-co-adipate) and poly(butylene terephthalate-co-adipate) as drug encapsulation systems*. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2011. **84**(2): p. 498-507.
 32. Tocuweang, K., *REACTIVE BLENDING OF POLY(LACTIC ACID) AND THERMOPLASTIC STARCH*, in *Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 2019*, Silpakorn University

33. การทดสอบการดูดซึมน้ำ. [cited 07/07/2019 2012]; Available from: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4172/2/Fulltext.pdf>.
34. Milosevic, M., *Biodegradation of cotton and cotton/polyester fabrics impregnated with Ag/TiO₂ nanoparticles in soil*. Carbohydr Polym, 2017. **158**: p. 77-84.
35. Farahnaky, A., Saberi, B., Majzoubi, M., *Effect of Glycerol on Physical and Mechanical Properties of Wheat Starch Edible Films*. Journal of Texture Studies, 2013. **44**(3): p. 176-186.
36. Corradini, A.J., Curvelo, A., Agnelli, M., Mattoso, C., *Preparation and Characterization of Thermoplastic Starch/Zein Blends*. Materials Research, 2007. **10**: p. 227-231.
37. Jiugao, Y., Ning, W., Xiaofei, M., *The Effects of Citric Acid on the Properties of Thermoplastic Starch Plasticized by Glycerol*. Starch - Stärke, 2005. **57**(10): p. 494-504.
38. Zuraida, A., Yusliza, Y., Anuar, H., Muhaimin, R., *The effect of water and citric acid on sago starch bio-plastics*. International Food Research Journal 2012. **19**: p. 715-719
39. Prachayawarakorn, J., *Chemical modification of biodegradable cassava starch films by natural mono-, di- and tri-carboxylic acids*. Songklanakarin J. Sci. Technol. , 2019. **41**: p. 355-362.
40. Hejna, A., *Studies on the Combined Impact of Starch Source and Multiple Processing on Selected Properties of Thermoplastic Starch/Ethylene-Vinyl Acetate Blends*. Journal of Polymers and the Environment, 2019. **27**(5): p. 1112-1126.
41. Lin, G., *Some Nanocomposites Based On a Glycerol-Derived Alkyd Resin and Layered Silicates*. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2008. **483**(1): p. 33-48.
42. Dai, H., Wang, J., Liu, N., *Preparation and properties of poly(vinyl alcohol) films using carbohydrates as plasticizers*. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2019. **25**(S1): p. E181-E187.
43. Jia, B.C., Li, H., Yong, Z., *Properties of Poly(vinyl alcohol) Plasticized by Glycerin*. JOURNAL OF FOREST PRODUCTS & INDUSTRIES, 2014. **3**(3): p. 151-153.

44. Lac, E., Homsy, G.M., *Axisymmetric deformation and stability of a viscous drop in a steady electric field*. Journal of Fluid Mechanics, 2007. **590**: p. 239-264.
45. Moldenaers, P.V., *RHEOLOGY AND MORPHOLOGY DEVELOPMENT IN IMMISCIBLE POLYMER BLENDS*. Rheology Reviews, 2005: p. 101 - 145.
46. Aviara, N.A., *Effect of drying temperature on physicochemical properties of cassava starch*. Int. Agrophys, 2010\; p. 219-225.
47. Eyyup K., Tufan S., Alma, M.H., *The Effects of Novel Additives Used in PVA/Starch Biohybrid Films*. Filler.
48. Ge, C., Lansing, B., Lewis, C.L., *Thermoplastic starch and poly(vinyl alcohol) blends centered barrier film for food packaging applications*. Food Packaging and Shelf Life, 2021. **27**.
49. Jung, B.N., *Physical and mechanical properties of plasticized butenediol vinyl alcohol copolymer/thermoplastic starch blend*. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2018. **25**(2): p. 109-116.
50. Nadras N.A., Anafi, H., *Thermal Properties of Polyvinyl Alcohol (PVOH)/Corn Starch Blend Film*. Malaysian Polymer Journal, 2011. **6**: p. 147-154.
51. Yap, S.Y., *Characterization and Biodegradability of Rice Husk-Filled Polymer Composites*. Polymers (Basel), 2020. **13**(1).
52. การทำปุ๋ยหมัก, จันทรเด่นดวง, Editor. 2007, Design and manufacturing: MTEC.
53. Azahari, N.A., *Biodegradation of Polyvinyl Alcohol/Corn Starch Blend Films*. Journal of Physical Science, 2011. **22**: p. 15-31.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อิสริย์ พวงมะลิ
วัน เดือน ปี เกิด	23 พฤษภาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดภูเก็ต
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	24/2 หมู่ 2 ซอยตาบวน ตำบลราไวย์ อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต 83130
ผลงานตีพิมพ์	Itsari Phuangmali, Manus Seadan, Rattikarn Khankrua and Supakij Suttiruengwong (2021): Reactive compatibilization of poly(hydroxybutyrate-cohydroxyvalerate)/polyvinyl alcohol blends, Polymer-Plastics Technology and Materials, DOI: 10.1080/25740881.2021.1918162

