



ศึกษาคำเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ โดยใช้แ่งมันสำปะหลังที่ผ่าน
และไม่ผ่านการตัดแปลง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ โดยใช้แป้งมัน
สำหรับทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลง



โดย
นายกวินทร์ กิรติพินิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร



A STUDY OF THERMOPLASTIC STARCH PREPARATION IN TWIN SCREW
EXTRUDER USING NATIVE AND MODIFIED TAPIOCA STARCH.



By
MR. Kawin KEERATIPINIT

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 2018
Copyright of Graduate School, Silpakorn University



58402202 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์, พอลิแลคติกแอซิด, เบลนด์

นาย กวินทร์ กิรติพิณิจ: ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทซ์ ในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณและชนิดพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทซ์ (TPS) จากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลง (NT, KFM) ที่เตรียมผ่านเครื่องผสมแบบปิด แล้วศึกษาอิทธิพลของการเติมยาง Ethylene vinyl acetate (EVA) และสารรีแอคทีฟทั้งชนิดและปริมาณที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างการผลิต สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของ TPS อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังศึกษาผลของการเบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP) กับ TPS ในสัดส่วนไม่เกิน 50 % wt. โดยสารรีแอคทีฟและสารเพิ่มความเข้ากันที่ใช้ได้แก่ กรดซิตริก, maleic anhydride, Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (peroxide) และ Joncryl® ADR-4368 โดยในการทดลองจะแบ่งเป็น 5 ส่วนคือ ศึกษาผลการเตรียม TPS จากแป้งที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลง ผลของการผสม PLA/TPS HDPE/TPS และ PP/TPS รวมถึงการจำลองการไหลโดยโปรแกรม Ansys fluent จากการผสมยาง EVA ลงไปใน TPS สามารถช่วยให้ TPS สามารถขึ้นรูปและปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ แต่จากสัญญาณวิทยาของ TPS แสดงการแยกเฟสอย่างชัดเจนระหว่าง TPS และ EVA แต่เมื่อเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride สามารถช่วยให้ยาง EVA มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลให้ TPS ที่ได้มีสมบัติการต้านทานการดึงยึดที่ดีขึ้น เมื่อเปลี่ยนชนิดแป้งเป็น KFM พบว่าโดยรวมสมบัติการต้านทานการดึงยึดมีผลที่ดีสูงกว่า TPS ที่มาจาก NT เล็กน้อย จากสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/TPS แสดงการแยกเฟสอย่างชัดเจนส่งผลให้สมบัติการต้านทานการดึงยึดและสมบัติการไหล (MFI) นั้นด้อยลง แต่เมื่อเติม peroxide หรือ Joncryl สามารถช่วยให้อนุภาคของ TPS มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอมากขึ้นในเฟสหลัก PLA และมีการยึดเกาะที่ฉิวรอยต่อระหว่างเฟสที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากัน ส่งผลให้สมบัติการต้านทานการดึงยึด สมบัติการไหลและการดูดซับความชื้นที่ดีขึ้น จากการศึกษาการเบลนด์ระหว่าง HDPE, PP/TPS พบว่าสมบัติการต้านทานการดึงยึดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อผสม TPS ลงไปโดยจากสัญญาณวิทยาแสดงการแยกเฟสอย่างชัดเจน แต่เมื่อเติม peroxide และเพิ่มปริมาณ maleic anhydride สามารถทำให้เฟส TPS มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่เห็นเด่นชัดในผลสมบัติการต้านทานการดึงยึด สุดท้ายทำการศึกษาการจำลองการไหลของพอลิแลคติกแอซิดในเครื่องผสมแบบปิดโดยใช้โปรแกรม Ansys fluent โดยสามารถติดตามการไหลและคำนวณค่า shear stress ได้ โดยผลที่ได้แนวโน้มเดียวกันกับค่า shear stress จากการคำนวณค่าแรงบิด

58402202 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : thermoplastic starch, poly(lactic acid), blends

MR. KAWIN KEERATIPINIT : A STUDY OF THERMOPLASTIC STARCH PREPARATION IN TWIN SCREW EXTRUDER USING NATIVE AND MODIFIED TAPIOCA STARCH. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SUPAKIJ SUTRIRUENGWONG

This objective of this work was to study types and contents of plasticizers was effect to prepare thermoplastic starch from native or modified tapioca starch (NT, KFM) by using internal mixer and the effect of Ethylene vinyl acetate (EVA) and types or contents of reactive agents were investigated. The torque value, mechanical and morphology properties of TPS were studied. Also, In this research was to study the blend of Polylactic acid, High density polyethylene, Polypropylene/TPS system, using TPS content below 50 % wt. Reactive agents and compatibilizers such as citric acid, maleic anhydride, Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (peroxide) and Joncryl® ADR-4368 were selected for comparison. This research studied about the preparation of TPS with native and modified starch, the properties of PLA/TPS, HDPE/TPS, PP/TPS blends. and the simulation of flow and properties of PLA with Ansys fluent. When adding EVA in TPS, it help improving processing and mechanical properties of TPS but when observing morphology of TPS, was found phase separation between TPS and EVA. When adding citric acid and maleic anhydride in TPS resulted in reducing particle size and more uniform EVA particles dispersed in TPS matrix, was resulted in improved tensile properties. When TPS was made by KFM, it was found that tensile properties of TPS from KFM were slightly higher than TPS from NT. By observing morphology of the blend between PLA and TPS, it showed the phase separation between PLA and TPS. This result can affect the reduced mechanical and flow properties (MFI). When adding peroxide and Joncryl in the blend, it can improved phase separation by reducing particle size of TPS and more uniform TPS particles dispersed in PLA matrix. The better morphology of the blends provided the higher tensile properties, drop in flow properties and water absorption. The blends of HDPE/TPS, PP/TPS were shown reducing tensile properties. It can be observed phase separation of HDPE/TPS and PP/TPS blends. When adding peroxide and increase maleic anhydride contents, it can be slightly reducing particle size of TPS in HDPE, PP matrix but not significant change in tensile properties of HDPE/TPS, PP/TPS blends. Finally, PLA flow and shear stress were simulated in internal mixer by using Ansys fluent. From results were shown shear stress has same tendency as shear stress from the calculation by torque value.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และรองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่านและดร.ศรารุช ภูไพจิตรกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมผู้ให้คำปรึกษา และชี้แนะวิธีวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทำวิจัยมาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบความเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียด

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอนข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ สถานที่ และทุนในการทำงานวิจัย

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

ขอขอบคุณบริษัท สยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัดและโครงการเพื่อขอทุนสนับสนุนจากโปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม (ITAP) สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและวัสดุดิบในการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท Total Corbion PLA (Thailand) จำกัดสำหรับการสนับสนุนเม็ดพลาสติก PLA ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอก และเพื่อน ๆ น้องปริญญาโท รวมถึงรุ่นน้องปริญญาตรีที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา รวมถึงกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุก ๆ คนในครอบครัวที่ส่งเสียเลี้ยงดู สั่งสอน และให้กำลังใจผู้ทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมาทำให้การศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กวินทร์ กิรัตพินิจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	15
สารบัญตาราง.....	23
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	2
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1. สตาร์ช [1, 2].....	5
2.2. เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช[1, 6-11].....	7
2.3. พลาสติกไซเซออร์ [19, 20]	8
2.4. สารรีแอคทีฟ (Reactive agent).....	9

2.5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.2. เครื่องผสมและขึ้นรูป.....	26
3.3. เครื่องมือวิเคราะห์.....	26
3.4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	37
4.1. ผลการศึกษาเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ.....	37
4.1.1. ผลการศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ.....	37
4.1.2. ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติด้วยเทคนิค SEM.....	39
4.1.3. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม.....	39
4.1.4. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่มีสมบัติเชิงกล.....	41
4.1.5. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเทคนิค SEM.....	42
4.1.6. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม.....	43

4.1.7. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล.....	48
4.1.8. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่มีต่อสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเทคนิค SEM	52
4.2. ผลการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (Etherified starch: Kreation FM: KFM).....	53
4.2.1. ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมเทอร์โม พลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง.....	54
4.2.2. ผลการศึกษาสัญญาณวิทยาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติด้วย เทคนิค SEM	55
4.2.3. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลงที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม	56
4.2.4. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีต่อสมบัติเชิงกล	57
4.2.5. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีสมบัติสัญญาณวิทยาดูด้วยเทคนิค SEM	59
4.2.6. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการ ผสม	61
4.2.7. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล.....	61
4.2.8. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีต่อสัญญาณวิทยาดูด้วยเทคนิค SEM.	63

4.3. ผลของการเบลนด์พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลัง ธรรมชาติแบบ two-step process	64
4.3.1. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โม พลาสติกสตาโรล (TPS) ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมแบบ two-step process	65
4.3.2. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โม พลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ two-step process ที่มีต่อค่าดัชนีการไหล Melt flow index (MFI)	66
4.3.3. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โม พลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ two-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกล.....	67
4.3.4. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โม พลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ two-step process ที่มีต่อสมณฐานวิทยา	68
4.3.5. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการ ผสมแบบ two-step process ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติก สตาโรล (TPS).....	70
4.3.6. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติก สตาโรล (TPS) แบบ two-step process	71
4.3.7. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ two-step process	72
4.3.8. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อสมณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ two-step process	74

4.4. ผลของการเบลนด์พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง ธรรมชาติแบบ one-step process	77
4.4.1. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อค่าดัชนีการไหล (melt flow index).....	77
4.4.2. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์	78
4.4.3. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์.....	81
4.4.4. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อการดูดซับความชื้นและผลของการดูดซับความชื้นที่มีต่อสมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์เบลนด์.....	83
4.4.5. การศึกษาความเข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้ง มันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปลงด้วยเทคนิค Molau test และ เทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR).....	86
4.5. การศึกษาการเบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process	89
4.5.1. การศึกษาผลการเบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างการผสม.....	89

- 4.5.2. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ 90
- 4.5.3. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์..... 92
- 4.5.4. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างการผสม เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride 93
- 4.5.5. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อเปลี่ยนแปลง ปริมาณ maleic anhydride..... 94
- 4.5.6. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์เมื่อเปลี่ยนแปลง ปริมาณ maleic anhydride..... 97
- 4.5.7. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) และเทอร์โมพลาสติก สตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างการผสม 98
- 4.5.8. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ 99

4.5.9. การศึกษาผลการเบลนด์ระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) และเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process ที่มีต่อ	
สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์.....	102
4.6. การศึกษาการจำลองการไหลในเครื่องผสมแบบปิดของพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้โปรแกรม Ansys fluent.....	103
4.6.1. การศึกษา cross-flow model เพื่อหา parameter ต่างๆ.....	104
4.6.2. การศึกษาผลของความเร็วและอุณหภูมิที่มีต่อความเร็วและ shear stress.....	106
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....
5.1. สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	110
รายการอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก ข้อมูลและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทและพอลิเมอร์เบลนด์ ...	117
ภาคผนวก ข. การคำนวณ.....	126
ภาคผนวก ค. การเผยแพร่งานวิจัย.....	128
ประวัติผู้เขียน.....	136

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน[3].....	6
ภาพที่ 2.2 ลักษณะผลึกของแป้ง อนุภาคแป้ง และโครงสร้างทางเคมีของแป้ง[5]	7
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล[21].....	8
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริก	10
ภาพที่ 2.5 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อช่วงอุณหภูมิในกระบวนการ[23].....	11
ภาพที่ 2.6 ผลการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งน้ำตาลปาล์ม[24].....	11
ภาพที่ 2.7 ภาพ SEM ของ TPS ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ (A) EG, (B) PG, (C) BUT, (D) DEG และ (E) SOR[8].....	14
ภาพที่ 2.8 ภาพสัณฐานวิทยาของ PLA/DTPS โดย A PLA, B PLA/DTPS (50:50), C PLA/DTPS (40:60), D PLA/DTPS (50:50)+MA0.5 DCP0.05 และ D PLA/DTPS (40:60)+MA0.4 DCP0.04	16
ภาพที่ 2.9 สมบัติเชิงกลของ PLA/DTPS ที่สัดส่วนต่างๆ.....	16
ภาพที่ 2.10 ภาพสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันด้วย maleic anhydride และ peroxide L101 ปริมาณ 2 และ 0.25 wt.% ตามลำดับบน PLA	17
ภาพที่ 2.11 แผนภูมิแสดง Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/TPS ในสัดส่วนต่างๆ	18
ภาพที่ 2.12 IR spectrum ของแป้งแต่ละชนิด (a) TPAS, (b)TPCS และ (c)TPMS[4].....	20
ภาพที่ 2.13 X-ray diffraction ของแป้งแต่ละชนิด(a) TPAS, (b)TPCS และ (c)TPMS[4].....	20
ภาพที่ 2.14 ภาพ SEM ของแป้งแต่ละชนิด (a) TPMS, (b) TPCS, และ (c) TPAS[4].....	21

ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของอัตราการซึมผ่านของน้ำกับเวลา[4]	21
ภาพที่ 2.16 สมบัติเชิงกลของ LDPE/TPS ที่แตกต่างกัน[4]	22
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง (starch).....	23
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA).....	23
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล (glycerol)	24
ภาพที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริก (citric acid)	24
ภาพที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของ maleic anhydride	24
ภาพที่ 3.6 โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene	24
ภาพที่ 3.7 โครงสร้างทางเคมีของ Joncryl® ADR-4368 โดยที่ R ₁ -R ₅ เป็น H, CH ₂ หรือหมู่ alkyl และ R ₆ เป็นหมู่ alkyl[28]	25
ภาพที่ 3.8 โครงสร้างทางเคมีของ Ethylene vinyl acetate (EVA).....	25
ภาพที่ 3.9 โครงสร้างทางเคมีของ Polysorb® ID46	26
ภาพที่ 3.10 รูปทรงของใบกวนและผนังในการจำลองการไหลโดยโปรแกรม Ansys fluent	35
ภาพที่ 4.1 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ กลีเซอรอลจากเครื่องผสมแบบปิด	38
ภาพที่ 4.2 สันฐานวิทยาของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง (ด้านซ้าย) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ ปริมาณกลีเซอรอล 30 phr (NT100/30) (ด้านขวา)	39
ภาพที่ 4.3 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ ยาง EVAโดยมีปริมาณกลีเซอรอล 25 phr จากเครื่องผสมแบบปิด	40
ภาพที่ 4.4 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ ยาง EVAโดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด	40

ภาพที่ 4.5 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่เติม Ethylene vinyl acetate ใน ปริมาณ 5 10 และ 15 phr ของแป้ง.....	41
ภาพที่ 4.6 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมยาง EVA โดย ภาพ a. NT100/30 b. NT95/30 c. NT90/30 และ d. NT85/30.....	43
ภาพที่ 4.7 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิตริก ปริมาณ 0.5 phr โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด.....	44
ภาพที่ 4.8 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิตริก ปริมาณ 1 phr โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด.....	44
ภาพที่ 4.9 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิตริก ปริมาณต่างๆ โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด	45
ภาพที่ 4.10 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติม maleic anhydride ปริมาณ 0.1 phr โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด	46
ภาพที่ 4.11 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติม maleic anhydride ปริมาณต่างๆ โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่อง ผสมแบบปิด	46
ภาพที่ 4.12 ปฏิกิริยา hydrolysis และ glucosidation เป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างการเตรียมเทอร์โม พลาสติกสตาร์ช[35].....	47
ภาพที่ 4.13 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิ ตริกและ maleic anhydride โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จาก เครื่องผสมแบบปิด	47
ภาพที่ 4.14 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เติมกรดซิตริกในปริมาณ 0.5 และ 1 phr ของแป้ง โดยมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง	49

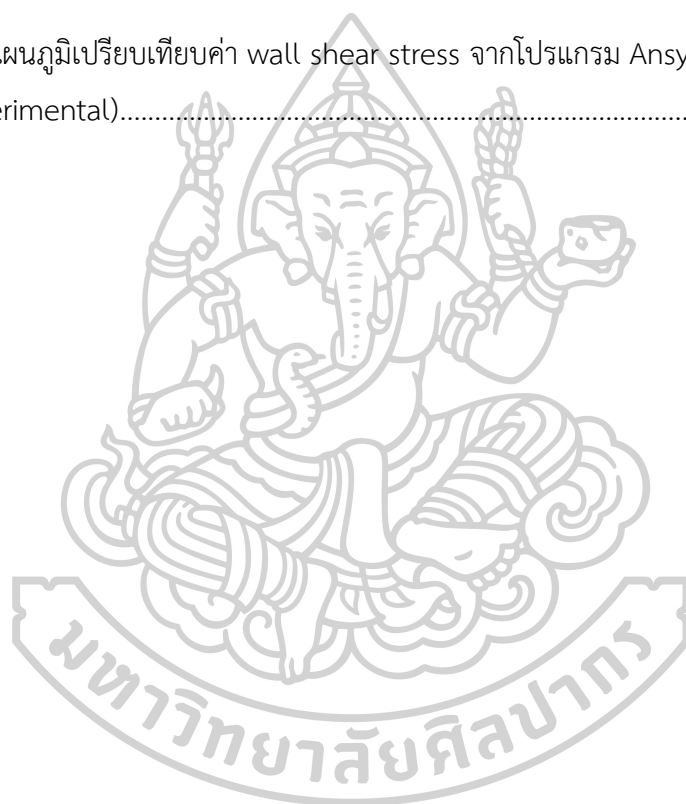
ภาพที่ 4.15 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เติม maleic anhydride ในปริมาณ 0.1 0.3 และ 0.5 phr ของแป้ง โดยมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง	50
ภาพที่ 4.16 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เติมกรดซิตริกและ maleic anhydride โดยมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง	50
ภาพที่ 4.17 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมยาง EVA 5 % wt. ของแป้งโดยเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้งตามลำดับ	53
ภาพที่ 4.18 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณกลีเซอรอลจากเครื่องผสมแบบปิด.....	54
ภาพที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง(ภาพบนซ้าย) แป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM)(ภาพบนขวา) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปริมาณกลีเซอรอล 30 phr (KFM100/30) (ภาพล่าง).....	55
ภาพที่ 4.20 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณยาง EVA โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 25 phr จากเครื่องผสมแบบปิด	56
ภาพที่ 4.21 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณยาง EVA โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด	57
ภาพที่ 4.22 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีกลีเซอรอล 25 phr และมียาง EVA ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้ง	58
ภาพที่ 4.23 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีกลีเซอรอล 30 phr และมียาง EVA ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้ง	59
ภาพที่ 4.24 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมยาง EVA โดยภาพ a. KFM100/30 b. KFM95/30 c. KFM90/30 และ d. KFM85/30	60

ภาพที่ 4.25 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง ดัดแปลง (KFM) ที่เติมกรดซิตริกและ maleic anhydride โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณ กลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด.....	61
ภาพที่ 4.26 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีกลีเซอรอล 30 phr และมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง โดยมีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้ง.....	62
ภาพที่ 4.27 ภาพสัณฐานวิทยาที่กล้องขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมัน สำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติมยาง EVA 5 % wt. ของแป้ง โดยเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้งตามลำดับ.....	64
ภาพที่ 4.28 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนดิ่งระหว่างพอลิแลคติก แอซิดกับ TPS จากแป้งมัน สำปะหลังธรรมชาติในสัดส่วน 30 50 และ 70 %wt. ของ TPS.....	65
ภาพที่ 4.29 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนดิ่งในสัดส่วนต่างๆ.....	66
ภาพที่ 4.30 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนดิ่งระหว่างพอลิแลคติก แอซิดและเทอร์โม พลาสติกสตาโรซแบบ two-step process.....	68
ภาพที่ 4.31 ภาพสัณฐานวิทยาที่กล้องขยาย 2000 เท่าของพอลิแลคติก แอซิดและพอลิเมอร์เบลนดิ่ง ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสัดส่วนต่างๆ.....	69
ภาพที่ 4.32 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนดิ่งระหว่าง PLA กับ TPS จากแป้งมันสำปะหลัง ธรรมชาติในสัดส่วน 70 %wt. ของ TPS ที่มีการเติม peroxide หรือ Joncryl ในปริมาณต่างๆ.....	71
ภาพที่ 4.33 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนดิ่งที่เติมสารเพิ่มความเข้ากัน ในปริมาณต่างๆ.....	72
ภาพที่ 4.34 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนดิ่งระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โม พลาสติกสตาโรซในสัดส่วน 30 % wt. ของ TPS โดยเติมสารเพิ่มความเข้ากันแบบ two-step process.....	73

ภาพที่ 4.35 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลในสัดส่วน 30 % wt. ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันแบบ two-step process.....	75
ภาพที่ 4.36 ภาพสัณฐานวิทยาหลังการกัดผิวด้วย DMSO ที่กำลังขยาย 2000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลในสัดส่วน 30 % wt. ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันแบบ two-step process.....	76
ภาพที่ 4.37 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process...	78
ภาพที่ 4.38 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแบบ one-step process.....	80
ภาพที่ 4.39 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลในสัดส่วนต่างๆ. ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันแบบ one-step process.....	82
ภาพที่ 4.40 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 1000 และ 10000 เท่าของ 1LX7NT3_P0.2J1.0.....	83
ภาพที่ 4.41 กราฟการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแบบ one-step process.....	84
ภาพที่ 4.42 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ 1LX7NT3_P0.2J1.0 แบบ one-step process ที่ผ่านการทดสอบดูดซับความชื้นที่เวลาต่างๆ.....	85
ภาพที่ 4.43 กราฟ FTIR spectrum ของพอลิเมอร์เบลนด์หลังผ่านการสกัดแบ่งออกด้วย DMSO..	88
ภาพที่ 4.44 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณต่างๆ.....	90
ภาพที่ 4.45 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันปริมาณต่างๆ.....	91

ภาพที่ 4.46 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันวปริมาณต่างๆ	91
ภาพที่ 4.47 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันวปริมาณต่างๆ	92
ภาพที่ 4.48 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 4000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณต่างๆ.....	93
ภาพที่ 4.49 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride.....	94
ภาพที่ 4.50 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ.....	95
ภาพที่ 4.51 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ.....	96
ภาพที่ 4.52 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ.....	96
ภาพที่ 4.53 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 4000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ.....	97
ภาพที่ 4.54 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนด์ระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่มีการเติม peroxide และเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride	99
ภาพที่ 4.55 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	100
ภาพที่ 4.56 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	101

ภาพที่ 4.57 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	101
ภาพที่ 4.58 ภาพสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	103
ภาพที่ 4.59 กราฟ complex viscosity กับ angular frequency ที่อุณหภูมิต่างๆ ของ PLA และผลการ fitting curve โดยจุดแสดงผลการทำ DMA ส่วนเส้นกราฟเป็นผลจากการ fitting curve	105
ภาพที่ 4.60 แผนภูมิเปรียบเทียบค่า wall shear stress จากโปรแกรม Ansys กับการคำนวณจากค่าแรงบิด (experimental).....	107



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งแต่ละชนิด[4]	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอล[20]	8
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของกรดซิตริก[22].....	10
ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะเฉพาะของ TPS[8].....	12
ตารางที่ 2.5 ลักษณะเฉพาะของ TPS ที่พลาสติกไซค์ด้วยพลาสติกไซเซอร์ชนิดต่างๆ[23].....	15
ตารางที่ 2.6 ผลของกรดซิตริกที่มีต่อค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุล[17]	15
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งแต่ละชนิด[4]	19
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลัง ธรรมชาติ.....	28
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง	29
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโมพลาสติกสตา์ชและพอลิแล คติก แอซิดแบบ two-step process	30
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโมพลาสติกสตา์ชและพอลิแล คติก แอซิดแบบ one-step process	31
ตารางที่ 3.5 สัดส่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโมพลาสติกสตา์ชและพอลิเอ ทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแบบ one-step process.....	32
ตารางที่ 3.6 สัดส่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโมพลาสติกสตา์ชและพอลิโ พริลีนแบบ one-step process.....	33

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่เติม Ethylene vinyl acetate ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr ของแป้ง	42
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติที่มีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ	51
ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติมยาง EVA ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr ของแป้ง.....	59
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ	62
ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วนต่างๆ.....	66
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วนต่างๆ	68
ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันปริมาณต่างๆ	72
ตารางที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันปริมาณต่างๆ	73
ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process.....	78
ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process.....	80
ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ 1LX7NT3_P0.2J1.0 ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการทดสอบการดูดซับความชื้น.....	85
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบ Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ในปัจจุบันปัญหาขยะพลาสติกเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมและมลพิษอย่างมากเนื่องจากปริมาณและเวลาในการย่อยสลายที่ใช้เวลานานของขยะพลาสติกจากปิโตรเลียม (Petroleum-based polymer) เพื่อแก้ปัญหาขยะพลาสติกและทรัพยากรที่มีจำกัดจึงมีการนำพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradable polymer) เช่น พอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิซัคซินิคแอซิด (PBS) พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลต (PBAT) และพอลิคาร์โพรแลคโตน (PCL) เป็นต้น มาใช้งาน แป้งได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายเพื่อที่จะทำเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ซึ่งมีทั้งความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ และต้นทุนต่ำ แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากพืชซึ่งเป็นผลิตผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช แป้งที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็น แป้งข้าวโพด, แป้งมันฝรั่ง, แป้งมันสำปะหลัง และแป้งจากข้าว เป็นต้น แป้งมีส่วนประกอบหลักเป็นโมเลกุลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลพอลิแซคคาไรด์ พอลิแซคคาไรด์จะจับกลุ่มรวมตัวกันเป็นอนุภาค (granules) เรียกว่าอนุภาคแป้ง พอลิแซคคาไรด์ที่อยู่ในอนุภาคแป้งประกอบด้วยสองส่วนคือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin) ผลึกที่เกิดขึ้นมาจากส่วนของอะไมโลเพคติน ชนิดของผลึกและสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีผลึกและมีพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างทำให้อุณหภูมิของการหลอมผลึกแป้งสูงกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายของแป้ง ทำให้แป้งเสื่อมสลายก่อนเกิดการหลอมของผลึกของแป้ง ดังนั้นการที่จะทำให้อุณหภูมิการหลอมผลึกของแป้งลดลงสามารถทำได้โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ เช่น น้ำ กลีเซอรอล ทำให้อนุภาคแป้งและผลึกของแป้งหลอมเกิดเป็นของเหลวใส มีความหนืดสูงซึ่งนั้นเป็นการทำเจลลาทีไนซ์ (gelatinization) หรือคือการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสามารถทำได้ด้วยการผสมพลาสติกไซเซอร์กับแป้งโดยมีการให้แรงเฉือนและความร้อนช่วยในการทำลายอนุภาคแป้งหรือทำการหลอมผลึกของแป้ง แรงเฉือนแบบต่อเนื่อง โดยมาจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่หรือเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว หรือมาจาก internal mixer แต่ยังไม่มีการอธิบายอย่างแน่ชัดถึงผลของแป้งที่มีการเปลี่ยนหมู่แทนที่แป้งเช่นหมู่ etherified starch หรือ hydroxypropyl group และน้ำหนักโมเลกุลของแป้ง รวมถึงชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่างๆที่จะส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน, สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยจากการทดลอง preliminary test โดยทดลองนำแป้งชนิดต่างๆ มาผสมกับกลีเซอรอลในปริมาณ 30 phr

แล้วทำการผสมในเครื่องผสมแบบปิดพบว่าแป้งที่สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ในปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จะเป็นแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและ etherified starch หรือ KFM เท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกแป้งทั้งสองชนิดนี้มาใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้และผลของน้ำหนักโมเลกุลของแป้ง ชนิดของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลง ที่มีต่อการกระบวนการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและ สมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงสัญญาณวิทยา, สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงรีโอโลยีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้จะศึกษาผลการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิโพรพิลีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีต่อค่าดัชนีการไหล สมบัติเชิงกล สัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์และศึกษาการไหลในเครื่องผสมแบบปิด โดยใช้ไมเดลจำลองโดยคอมพิวเตอร์

1.2. วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่มีผลต่อการกระบวนการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลังและมีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงสัญญาณวิทยา และสมบัติเชิงรีโอโลยี

1.2.2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของแป้งและผลของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลงที่มีผลต่อการกระบวนการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงสัญญาณวิทยา และสมบัติเชิงรีโอโลยี

1.2.3. ศึกษาการไหลและการผสมในเครื่องผสมแบบปิดโดยใช้ไมเดลจำลองโดยคอมพิวเตอร์

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1. ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชใช้ปริมาณกลีเซอรอลไม่เกิน 35 % wt. ของแป้ง

1.3.2. แป้งที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังตัดแปลงชนิด etherified

1.3.3. โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการไหลของพอลิเมอร์ใช้โปรแกรม Ansys fluent 17.1 โดยพอลิเมอร์ที่ใช้จำลองเป็นพอลิแลคติกแอซิด

1.4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2. ออกแบบวิธีการและวางแผนงานวิจัย

1.4.3. ดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ นำมาสู่การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้และผลของน้ำหนักโมเลกุลของแป้ง ชนิดของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลง ที่มีต่อการกระบวนการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและ สมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงสัณฐานวิทยา, สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงรีโอโลยีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อีกทั้งยังศึกษาผลการผสมระหว่างพอลิแลคติก แอซิด พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิโพรพิลีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีต่อค่าดัชนีการไหล สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ และศึกษาการไหลในเครื่องผสมแบบปิด โดยใช้โมเดลจำลองโดยคอมพิวเตอร์

ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ และแป้งมันสำปะหลังตัดแปลง โดยเติมและไม่เติมสารรีแอกทีฟ

ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังตัดแปลงโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer)

ศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแบบเติมและไม่เติมรีแอกทีฟได้แก่สมบัติการไหลจากค่าแรงบิด สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกล

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของการผสมพอลิแลคติก แอซิด พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิโพรพิลีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังตัดแปลง โดยเติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากัน

ศึกษาผลของการผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิโพรพิลีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder)

ศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์เบลนด์แบบเติมและไม่เติมรีแอกทีฟได้แก่สมบัติการไหลจากค่าแรงบิด สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกล

ส่วนที่ 3 ศึกษาการจำลองการไหลในเครื่องผสมแบบปิดโดยใช้โปรแกรม Ansys

ทำการศึกษาการจำลองการไหลในโปรแกรม Ansys โดยแทนค่าตัวแปรพอลิเมอร์ลงไปและสถานะที่เกี่ยวข้องในด้านอุณหภูมิ ความเร็วในการหมุนและรูปทรงของใบกวนในเครื่องผสมแบบปิดในโปรแกรมและเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดในเครื่องผสมแบบปิด

1.4.4. วิเคราะห์ผลการวิจัย

1.4.5. สรุปผลการวิจัย

1.4.6. รายงานผลการวิจัย

1.5. ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังดัดแปลงที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและ ศึกษาผลของการผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิโพรพิลีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติการไหลและสมบัติทางความร้อนที่ดี และสามารถจำลองการไหลของพอลิเมอร์ในเครื่องผสมแบบปิดผ่านโปรแกรม Ansys ได้

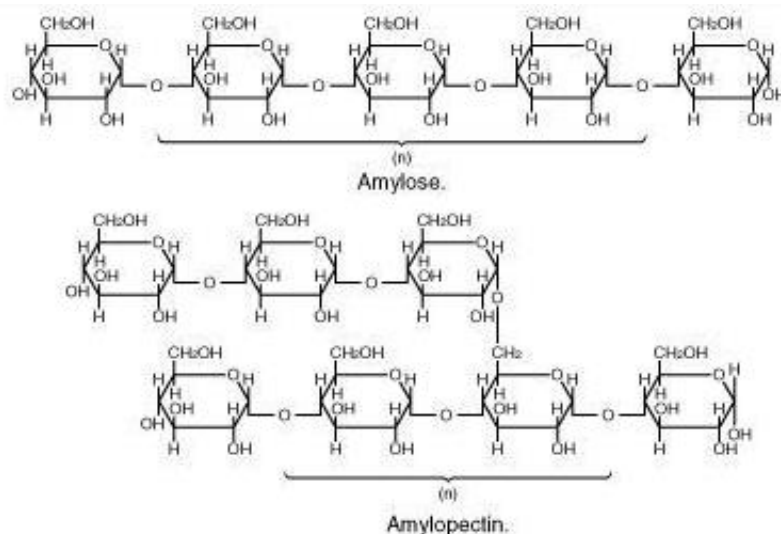


บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. สตาร์ช [1, 2]

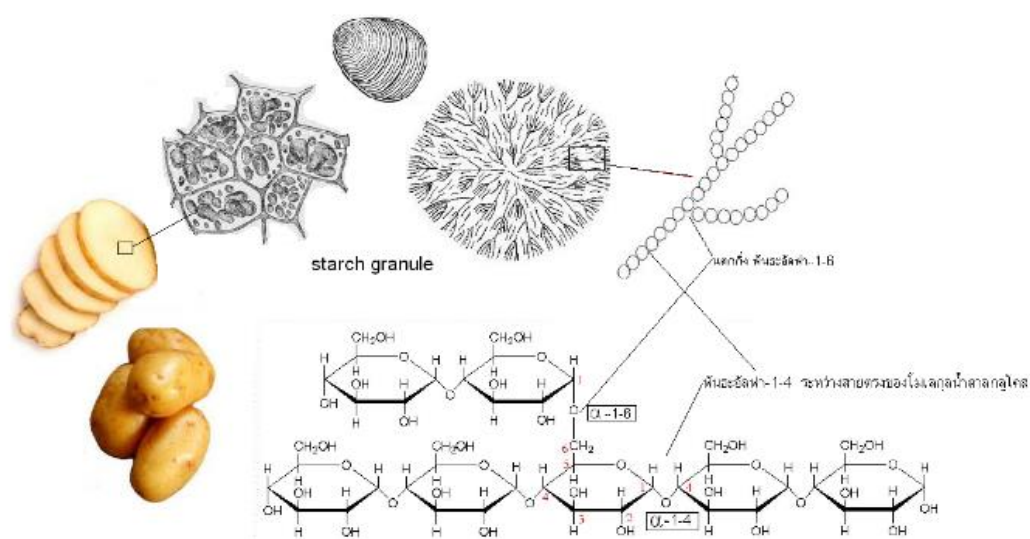
แป้งได้มาจากผลิตผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช แป้งที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็น แป้งข้าวโพด, แป้งมันฝรั่ง, แป้งมันสำปะหลัง และแป้งจากข้าว เป็นต้น ทัวไปแป้งธรรมชาติประกอบด้วยอนุภาคแป้ง ไชมัน โปรตีน อื่นๆ แสดงใน ตารางที่ 2.1 เมื่อนำองค์ประกอบอื่นๆออกจนเหลือแต่อนุภาคแป้งพอลิแซคคาไรด์จะเรียกใหม่ว่า สตาร์ช สตาร์ชจึงมีองค์ประกอบหลักเป็นอนุภาคแป้ง โดยแต่ละอนุภาคของแป้งจะประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) พอลิแซคคาไรด์มี 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin) อะไมโลส (Amylose) คือ พอลิแซคคาไรด์ที่มีลักษณะเป็นโซ่เส้นตรง Poly(α -1,4-glycopyranosyl) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) คือพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นโซ่กิ่งของ α -1,6-glycopyranosyl สตาร์ชทัวไปจะมีสัดส่วนของอะไมโลสจะน้อยกว่าอะไมโลเพคติน โดยทัวไปโมเลกุลโซ่ตรงหรืออะไมโลสจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 g/mol ส่วนอะไมโลเพคตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^8 g/mol แสดงในภาพที่ 2.1และภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีและลักษณะของผลึกของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน สายโซ่ของพอลิแซคคาไรด์จะมีลักษณะเป็นเกลียว ในอนุภาคแป้งจะมีส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐานอยู่ด้วยกัน ส่วนที่เป็นผลึกส่วนใหญ่จะเป็นอะไมโลเพคติน โดยมีอะไมโลสที่เป็นอสัณฐานอยู่แทรกระหว่างผลึก ชนิดของผลึกแป้งจะแบ่งตามที่มาของสตาร์ช ประกอบด้วยชนิด A (เมล็ดธัญพืช : cereal starch), B (พืชหัว : tuber starch), C (เป็นการรวมกันของชนิด A, B) และ V (มาจากการ retrograde ของสตาร์ช) อะไมโลสจะสามารถละลายน้ำได้มากกว่าผลึกอะไมโลเพคติน เพราะน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปในอสัณฐานได้ดีกว่า



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน[3]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งแต่ละชนิด[4]

Chemical composition (%)	Cassava starch	Arrowroot starch	Mungbean starch
Moisture	0.5	8.6	9.3
Carbohydrate	85.0	94.4	82.3
Amylose	16.4	19.9	37.9
Amylopectin	83.6	75.4	62.1
Protein	0.3	4.2	23.3
Fat	1.1	0.2	1.9
Ash	0.2	2.4	3.0
Others	0.6	0.5	0.9



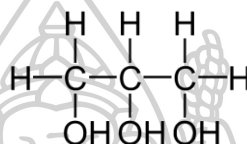
ภาพที่ 2.2 ลักษณะผลึกของแป้ง อนุภาคแป้ง และโครงสร้างทางเคมีของแป้ง[5]

2.2. เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช[1, 6-11]

การทำแป้งให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch; TPS) สามารถทำได้ด้วยการเติมพลาสติกไซเซอรลงไปในแป้งและให้ความร้อนและแรงเฉือน เพื่อทำลายอนุภาคและหลอมผลึกของแป้ง ซึ่งพลาสติกไซเซอรที่นิยมใช้ น้ำ กลีเซอรอล[12, 13] sorbitol[8, 14] sugar[15] urea[16] และกรดซิตริก[17] เมื่อแป้งถูกพลาสติกไซเซอรหลอมผลึกและทำลายอนุภาคแป้ง จะเรียกว่า การทำเจลลาทีไนเซชัน (gelatinization) หรือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจะเสถียรเพราะด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโครงสร้างโมเลกุลแป้งมีความเสถียรมากกว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับโมเลกุลแป้ง ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการเกิดผลึกใหม่ของสตาร์ช (recrystallization of starch) ทำให้เกิดรูปแบบผลึกชนิด V หรือเรียกว่าการรีโทรเกรดเดชัน (retrogradation) การรีโทรเกรดของแป้งเกิดจากการที่โมเลกุลของพลาสติกไซเซอรถูกดันออก ทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดผลึกขึ้นใหม่อีกครั้ง สาเหตุมาจากแรงยึดเหนี่ยวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างพลาสติกไซเซอรเช่นน้ำ กับโมเลกุลแป้ง มีความเสถียรภาพน้อยกว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งกันเองกระบวนการและความเสถียรภาพของแป้งสามารถปรับปรุงได้ด้วยการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymer) เช่น พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol)[18] และ พอลิคาโพลแลคโตน (polycaprolactone)[9]

2.3. พลาสติกไซเซอร์ [19, 20]

กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นชื่อที่มาจากคำภาษากรีกว่า glykys ซึ่งหมายถึงสารให้ความหวาน กลีเซอรอลมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวหนืด สีใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ มีรสหวานเล็กน้อย กลีเซอรอล เป็นสารจำพวกพอลิไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) โดยสูตรอย่างง่ายเป็น $C_3H_8O_3$ น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 92.09 กรัมต่อโมล ชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-propanetriol โดยภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล จากโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ โดยมี 2 หมู่เป็นไฮดรอกซิลปฐมภูมิ (primary hydroxyl) และอีก 1 หมู่เป็นไฮดรอกซิลทุติยภูมิ (secondary hydroxyl)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล[21]

โดยตารางแสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลแสดงในตารางที่ 2.2 สมบัติการละลายของกลีเซอรอลสามารถละลายในน้ำ, เมทานอล, เอทานอล, โพรพานอล, บิวทานอล, รวมถึงฟีนอล, โกลคอล และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก ไดเอทิลอีเทอร์ เอทิลอีเทอร์และไดออกเซน กลีเซอรอลไม่ละลายในตัวทำละลายจำพวกฮาโลเจน เช่นคลอโรฟอร์ม การผลิตกลีเซอรอลมีหลากหลายวิธี เช่น ผลิตจากการหมักจุลินทรีย์ หรือสังเคราะห์จากปิโตรเลียม หรือผลพลอยได้จากการผลิตสบู่ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอล[20]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
สูตรเคมี	$CH_2OH-CHOH-CH_2OH$ หรือ $C_3H_8O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	92.09 g/mol
สถานะและสี	ของเหลว ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.2605
ค่าดัชนีหักเหแสง	1.4746
จุดหลอมเหลว	17.9 °C
จุดเดือด	290 °C
สมบัติการละลายใน 100 ส่วน	
น้ำ	ละลายดีมาก

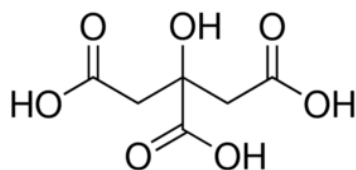
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอล[20]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ข้อมูล
แอลกอฮอล์	ละลายดีมาก
อีเทอร์	ไม่ละลาย
ความร้อนของการหลอมเหลวที่ 18.07 °C	47.49 cal/g
ความหนืดของกลีเซอรอลเหลวที่	
ความบริสุทธิ์ 100%	10 cP
ความบริสุทธิ์ 50%	25 cP
การแพร่กระจายใน	
i-Amyl alcohol	$0.12 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
เอทานอล	$0.56 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
น้ำ	$0.94 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$

2.4. สารรีแอคทีฟ (Reactive agent)

สารรีแอคทีฟ เป็นสารที่ช่วยในการทำปฏิกิริยาต่างๆในระบบผสม ซึ่งช่วยในการปรับปรุงความเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ได้ รวมถึงอิทธิพลที่มีต่อแบ่งทั้งการทำหน้าที่เป็นตัวเร่งช่วยตัดสายโซ่โมเลกุลแบ่งอีกด้วย

2.4.1. กรดซิตริก (citric acid) [22] เป็นกรดอ่อนที่ถูกนำมาใช้ในการถนอมอาหาร ทั่วไปใช้ในการเพิ่มรสชาติให้กับอาหารให้อาหารมีรสเปรี้ยวและมีกลิ่นหอม กรดซิตริกเป็นที่ยอมรับในด้านความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกสามารถพบได้ในธรรมชาติ ในผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว โดยเฉพาะมะนาว สับปะรด ในช่วงแรกๆการผลิตกรดซิตริกทำโดยการคั้นน้ำมะนาวโดยตรง น้ำมะนาวมีกรดซิตริกอยู่ 7-9 % แต่ทั่วไปนิยมใช้วิธีสังเคราะห์กรดซิตริกจากน้ำตาลกลูโคสผ่านวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis pathway) จะได้สารออกซิอะโลอะซิเตท (Oxalacetate) และสะสมเป็นกรดซิตริก โดยจุลินทรีย์ที่นิยมใช้คือ เชื้อรา *Aspergillus Niger* และยีสต์ *Candida Lypolitica*



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริก

กรดซิตริกที่ผลิตอยู่ในปัจจุบันอยู่ในรูปผลึก Monohydrate ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) ซึ่งมีน้ำอยู่หนึ่งโมเลกุล มีสีใส ไม่มีกลิ่น มีรสเปรี้ยว สามารถละลายในน้ำเย็นได้ดี (133 g/ml) มากกว่าในน้ำร้อน ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของกรดซิตริก

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของกรดซิตริก[22]

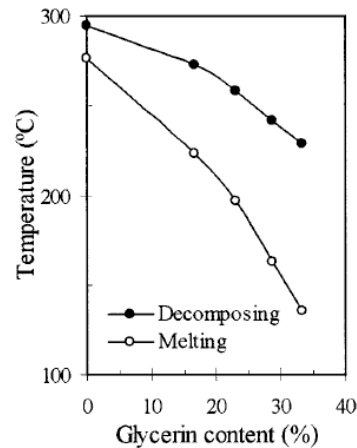
รายละเอียด	Anhydrous	Monohydrate
Molecular weight	192.12	210.14
Specific gravity	1.665	1.542
Melting point	153 °C	70-75 °C
Boiling point	-	175 °C

กรดซิตริกมีคุณสมบัติที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลายทาง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เพื่อเป็นสารให้กลิ่นรสในผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป นอกจากนั้นยังใช้เป็นสารลดความฝืด ลดการตกผลึกของน้ำผลไม้ และสามารถควบคุมระดับค่า pH ในผลิตภัณฑ์อาหารทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นโทษไม่สามารถเติบโตได้ จึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อการถนอมอาหารและเครื่องดื่ม กรดซิตริกยังมีคุณสมบัติแก้้้น้ำกระด้างโดยกรดซิตริกจะจับกับโลหะหนักในน้ำ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนกลายเป็นตะกอน Citric Complex ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงนิยมนำมาใช้ในการทำสบู่ และน้ำยาล้างจาน และกรดซิตริกยังมีคุณสมบัติในการขัดคราบสนิม และคราบสกปรกที่พื้นและผนัง จึงนิยมนำมาใช้ขัดสนิมในอุปกรณ์วัสดุเหล็กในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ด้วย

2.5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

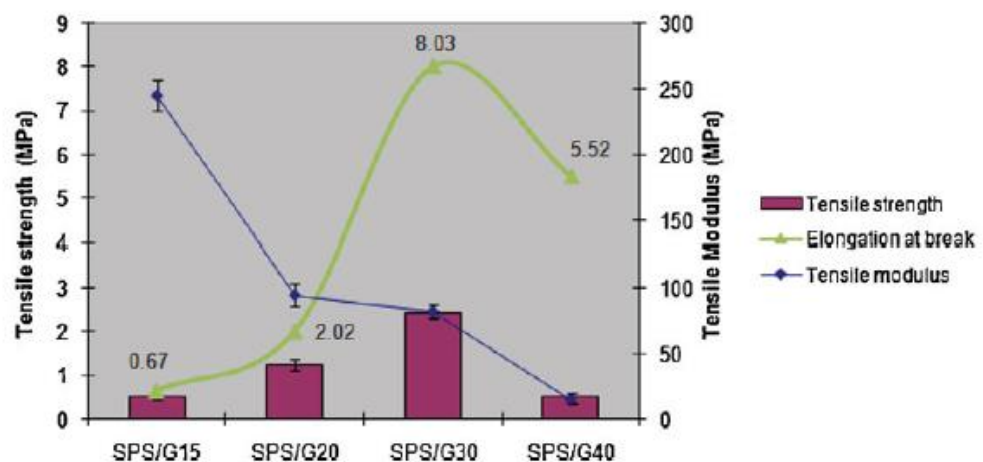
จากงานวิจัยของ Z. Q. LIU และคณะ[23] ทำการศึกษาการเติมกลีเซอรอลที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซของแป้งข้าวสาลี จากผลการทดลองสมบัติทางความร้อนโดย DSC T_m ของผลึกแป้งลดลงจาก 197 เป็น 136 องศาเซลเซียสเมื่อเติมกลีเซอรอลลงไปจาก 23% เป็น 33% และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจะลดลงตามปริมาณ

พลาสติกไซเซอรต์ด้วยเช่นกัน จากภาพที่ 2.5 แสดงช่วงอุณหภูมิในกระบวนการแปรรูปที่เป็นไปได้จากภาพจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ช่วงอุณหภูมิในกระบวนการแปรรูปมีช่วงที่กว้าง



ภาพที่ 2.5 ผลของกลีเซอรอลที่มีต่อช่วงอุณหภูมิในกระบวนการ[23]

จากงานวิจัยของ J. Sahari และคณะ[24] ได้ศึกษาการเติมกลีเซอรอล 15-40 wt. % ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจาก แป้งปาล์มน้ำตาลผลการทดลองสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช พบว่าค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชมีค่าลดลงตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้นและจากผลการทดสอบสมบัติการดึงยืดของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชแสดงในภาพที่ 2.6 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้นค่า Elongation at break และ tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมไปที่ 40 wt. % กลีเซอรอลพบว่าค่าสมบัติเชิงกลลดลงแสดงถึงปริมาณมากที่สุดที่จะใส่กลีเซอรอลลงไปได้คือไม่เกิน 30 wt. %



ภาพที่ 2.6 ผลการทดสอบการดึงยืดของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งน้ำตาลปาล์ม[24]

จากงานวิจัยของ A.L. Da Roz และคณะ[8] ทำการศึกษาชนิดและปริมาณของพลาสติกไฮเซออร์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน และสมบัติการดูดซับน้ำ ที่มีต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แป้งที่ใช้เป็นแป้งจากข้าวโพด โดยพลาสติกไฮเซออร์ที่ใช้มี 1,4-butanediol (BUT), ethylene glycol (EG), propylene glycol (PG), diethyleneoxide glycol (DEG), triethyleneoxide glycol (TEG), D-sorbitol (SOR), poliethyleneoxide glycol (PEG) 300 และ 600 และ polypropylene-oxide glycol (PPG) เริ่มจากผสมแป้งกับพลาสติกไฮเซออร์ใน batch mixer ที่ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm ผสมเป็นเวลา 6 นาที โดยเติม stearic acid ลงไป 0.5 wt. % เพื่อเป็น processing agent และกดอัดที่ 160 องศาเซลเซียสได้แผ่นบางหนา 1-2 mm ตารางที่ 2.4 แสดงผลการผสมจะเห็นว่า ethylene glycol, propylene glycol, 1,4-butanediol, diethyleneoxide glycol และ sorbitol แสดงการทำลายและพลาสติกไฮเซออร์อนุภาคแป้งได้ นอกจากพลาสติกไฮเซออร์เหล่านี้ พลาสติกไฮเซออร์ตัวอื่นไม่สามารถทำลายอนุภาคแป้งลงได้ กรณี TEG เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้มีความเปราะสูงและไม่สามารถจับต้องได้ จากภาพสัณฐานวิทยาแสดงในภาพที่ 2.7 ของ TPS จากพลาสติกไฮเซออร์ชนิดต่างๆ จะเห็นว่า TPS ที่มาจาก EG จะมีผิวที่สม่ำเสมอกว่า และใสกว่าพลาสติกไฮเซออร์ตัวอื่นๆ และ TPS ที่มาจาก PG และ SOR มีความใสและสะอาดที่ปริมาณ 15, 20 และ 30 wt. % แต่ BUT และ DEG สามารถเตรียม TPS ได้ที่ปริมาณ 15, 20 wt. % เท่านั้น ผล XRD จะเห็นว่า แป้งข้าวโพด มีผลึกเกิดขึ้น 2 แบบชนิด A และ B หลังการทำ TPS พบว่าเกิดการ recrystallization เป็นผลึกรูปแบบ V และ B เกิดขึ้น และทำการคำนวณปริมาณผลึกแสดงในตารางที่ 2.5 จากผลจะเห็นว่าชนิดของพลาสติกไฮเซออร์ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของ TPS ยกเว้น EG และ PG ที่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น ผลึกจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากการทดสอบ DSC EG และ PG มีค่า ΔH_m เพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกไฮเซออร์ซึ่งผลตรงกับ XRD ส่วน BUT, DEG และ SOR ความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณพลาสติกไฮเซออร์ที่เพิ่มขึ้น

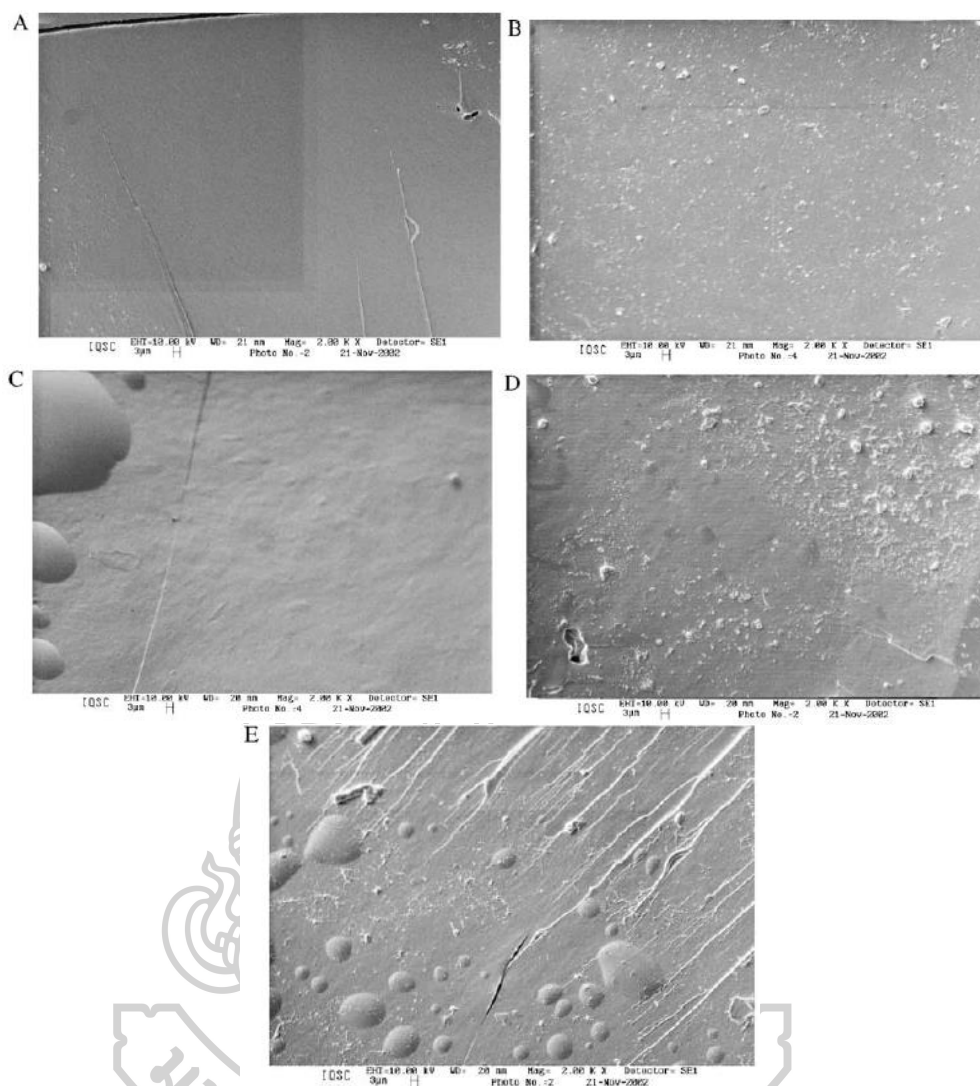
ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะเฉพาะของ TPS[8]

Sample identification	Plasticizer content (%)	Characteristic of ensuring compound	Visual and handling characteristics of pressed plates
EG	15	Homogeneous mass	Opaqua and fragile
	20		Transparent and flexible
	30		Transparent and flexible
	40		Transparent and fragile
PG	15	Homogeneous mass	Transparent and flexible

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะเฉพาะของ TPS[8]

Sample identification	Plasticizer content (%)	Characteristic of ensuring compound	Visual and handling characteristics of pressed plates
	20		Opaqua and fragile
	30		Transparent and flexible
	40	Heterogeneous, partially plasticized	-
BUT	15	Homogeneous mass	Transparent and flexible
	20		Opaqua and fragile
	30	Un-plasticized powder form	in -
	40		-
DEG	15	Homogeneous mass	Transparent and fragile
	20	Homogeneous mass ^a	Transparent and flexible
	30	Un-plasticized powder form	in -
	40		-
SOR	15	Homogeneous mass	Transparent and flexible
	20		Transparent and flexible
	30	Homogeneous mass ^a	Transparent and flexible
	40	Un-plasticized powder form	in -

^aWith the Presence of a certain amount of un-plasticized material.



ภาพที่ 2.7 ภาพ SEM ของ TPS ที่เติมพลาสติกไซเซอร์ (A) EG, (B) PG, (C) BUT, (D) DEG และ (E) SOR[8]

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 2.5 จากผล EG และ PG ทำให้ TPS มี modulus เพิ่มมากขึ้นตามพลาสติกไซเซอร์ที่มากขึ้น จากค่า modulus มี 2 ทางที่เกิดขึ้นคือ 1. ลดลงเนื่องจากการพลาสติกไซเซอร์ 2. เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลพลาสติกไซเซอร์ตัวอื่นๆจะเป็นไปตามทางที่สอง ยกเว้น EG ที่ 40 wt. % แต่ส่วน BUT, DEG และ SOR ค่า modulus ลดลงตามปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เพิ่มมากขึ้น จากผล DMA แสดงผล storage modulus และ $\tan \delta$ จากกราฟ $\tan \delta$ จะเห็นกราฟ 2 ช่วง ที่อุณหภูมิสูงเป็น T_g ของ TPS และที่อุณหภูมิต่ำเกิดจากส่วนกลีเซอรอลที่รวมตัวกันมาก จากผลของ BUT, DEG และ SOR แสดงลักษณะ anti-plasticizing เกิดขึ้น หรือคือ T_g มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.5 ลักษณะเฉพาะของ TPS ที่พลาสติกไซค์ด้วยพลาสติกไซเซอร์ชนิดต่างๆ[23]

Sample identification	Plasticizer content (%)	tan δ (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	$X_c B^a$	$X_c V_h^a$	E (MPa)	σ_r (MPa)	ε_r (%)	Water uptake in equilibrium (%)		
										43RH	53 RH	75 RH
EG	15	45±1.0	160	–	0.73	0.88	63±8	1.1±0.4	10±2	2.8	6.1	10.5
	20	20±1.2	149	102	0.73	0.89	83±21	2.6±0.5	30±7	11.9	17.5	38.2
	30	10±1.1	142	107	0.83	0.94	126±23	3.3±0.5	47±7	15.7	22.7	50.2
	40	10±0.6	133	115	0.87	0.95	74±33	2.0±0.7	31±7	16.2	23.3	51.3
PG	15	4±0.6	104	73	0.67	0.87	90±14	3.2±0.5	36±3	2.7	10.9	11.5
	20	35±1.1	162	78	0.75	0.92	158±88	3.1±1.5	34±16	5.4	11.4	26.0
	30	25±0.9	130	100	0.80	0.94	202±36	3.7±0.9	38±8	11.1	17.2	40.0
BUT	15	5±0.8	153	104	0.76	0.92	147±87	3.3±0.8	32±23	2.7	13.5	14.7
	20	25±1.2	158	110	0.78	0.92	34±8	0.9±0.3	35±12	3.8	17.0	18.0
DEG	15	10±1.1	102	140	0.76	0.89	178±49	3.9±0.9	21±5	1.1	5.5	12.8
	20	30±0.9	108	144	0.76	0.91	54±11	1.7±0.2	23±3	1.5	5.9	13.3
SOR	15	15±1.0	172	–	0.72	0.85	219±15	4.8±0.8	28±8	≈0	0.5	5.6
	20	61±0.8	161	85	0.72	0.85	118±10	3.2±0.7	24±7	≈0	1.0	7.6
	30	77±0.9	151	97	0.68	0.84	59±7	1.1±0.3	10±3	0.5	2.5	11.4

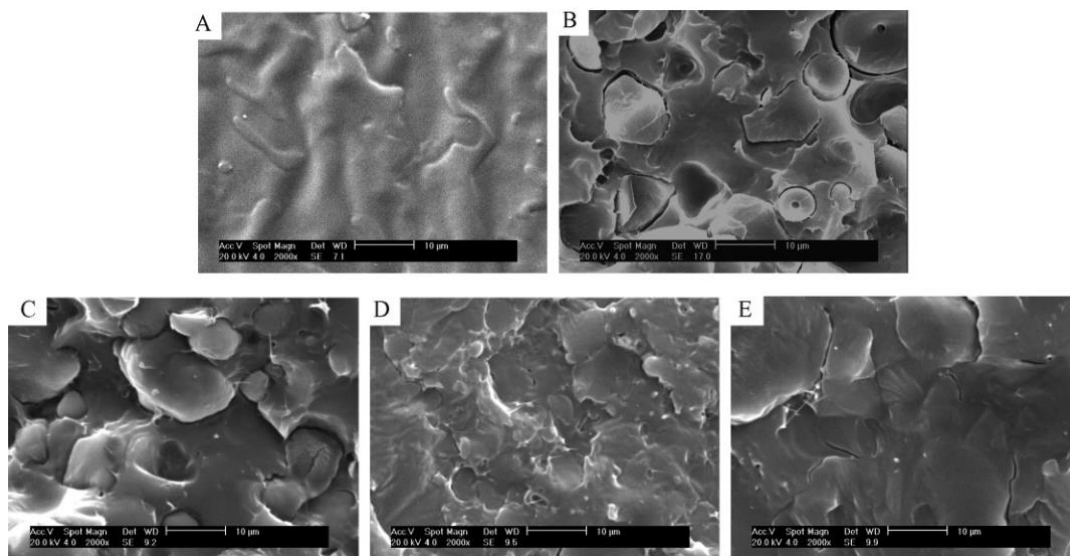
จากงานวิจัยของ Rui Shi และคณะ[17] ทำการศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ร่วมระหว่างกรดซิตริกและกลีเซอรอลที่ส่งผลต่อการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวโพด ให้กลีเซอรอลคงที่ที่ 30 wt. % ปริมาณน้ำในแป้งอยู่ที่ 20 wt. % และเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดซิตริกเป็น 10-40 wt. % จากผลการทดลองค่าความหนืดโดยใช้ Ubbelodhe viscometer แสดงในตารางที่ 2.6 พบว่าค่าความหนืดลดลงเมื่อเติมกรดซิตริกในปริมาณที่มากขึ้น รวมถึงน้ำหนักโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมกรดซิตริกปริมาณ 20 wt. % มีค่าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่เติมกรดซิตริกถึง 10 เท่า หรือคือกรดซิตริกอาจไปช่วยเร่งปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ (hydrolysis) ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่เติมกรดซิตริกพบว่าค่า T_g จะอยู่ที่ 45 องศาเซลเซียส เมื่อเติมกรดซิตริกลงไปปริมาณที่เพิ่มขึ้น ค่า T_g ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชมีค่าลดลงตามลำดับ โดยสาเหตุอาจมาจาก 3 เหตุผลคือ 1. การลดลงของหมู่ hydroxyl 2. การเพิ่มขึ้นของปริมาณพลาสติกไซเซอร์ และ 3. การที่สายโซ่ของแป้งสั้นลงทำให้สายโซ่สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 2.6 ผลของกรดซิตริกที่มีต่อค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุล[17]

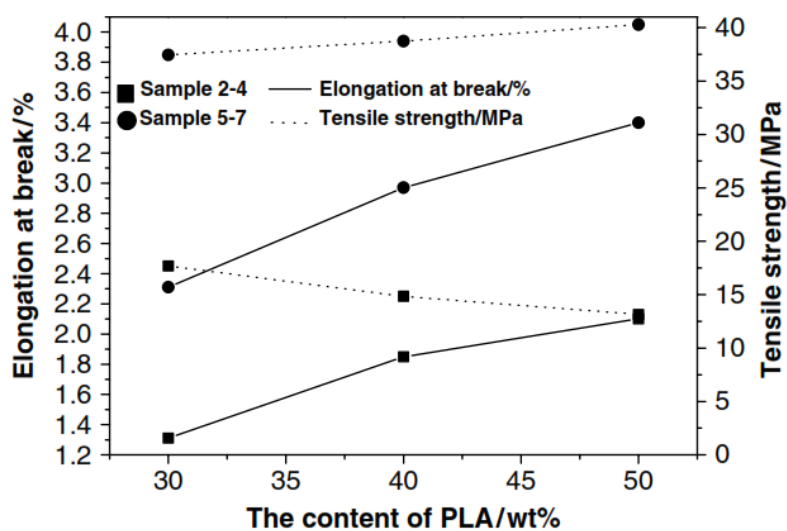
	Native starch	CA0	CA1	CA2	CA3	CA4
$[\eta]/(dL \times g^{-1})$	0.132	0.105	0.052	0.014	0.013	0.010
MW/(g \times mol ⁻¹)	-	(1.48±0.19) $\times 10^6$	-	(1.85±0.87) $\times 10^5$	-	-

จากงานวิจัยของ Jiugao Yu และคณะ[25] ได้ทำการศึกษาผลของการมี dicumyl peroxide ที่เบลนด์ dry thermoplastic starch (DTPS) กับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยมี

maleic anhydride ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากัน โดยทำการเบลนด์ผ่าน single screw extruder แบบ one-step process โดยจากภาพสัณฐานวิทยาแสดงดังภาพที่ 2.8 พบว่าการเติม maleic anhydride ลงไปสามารถเพิ่มความเข้ากันของ PLA/DTPS ได้โดยดูจากภาพ D และ E โดยสัมพันธ์กับผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันแสดงดังภาพที่ 2.9

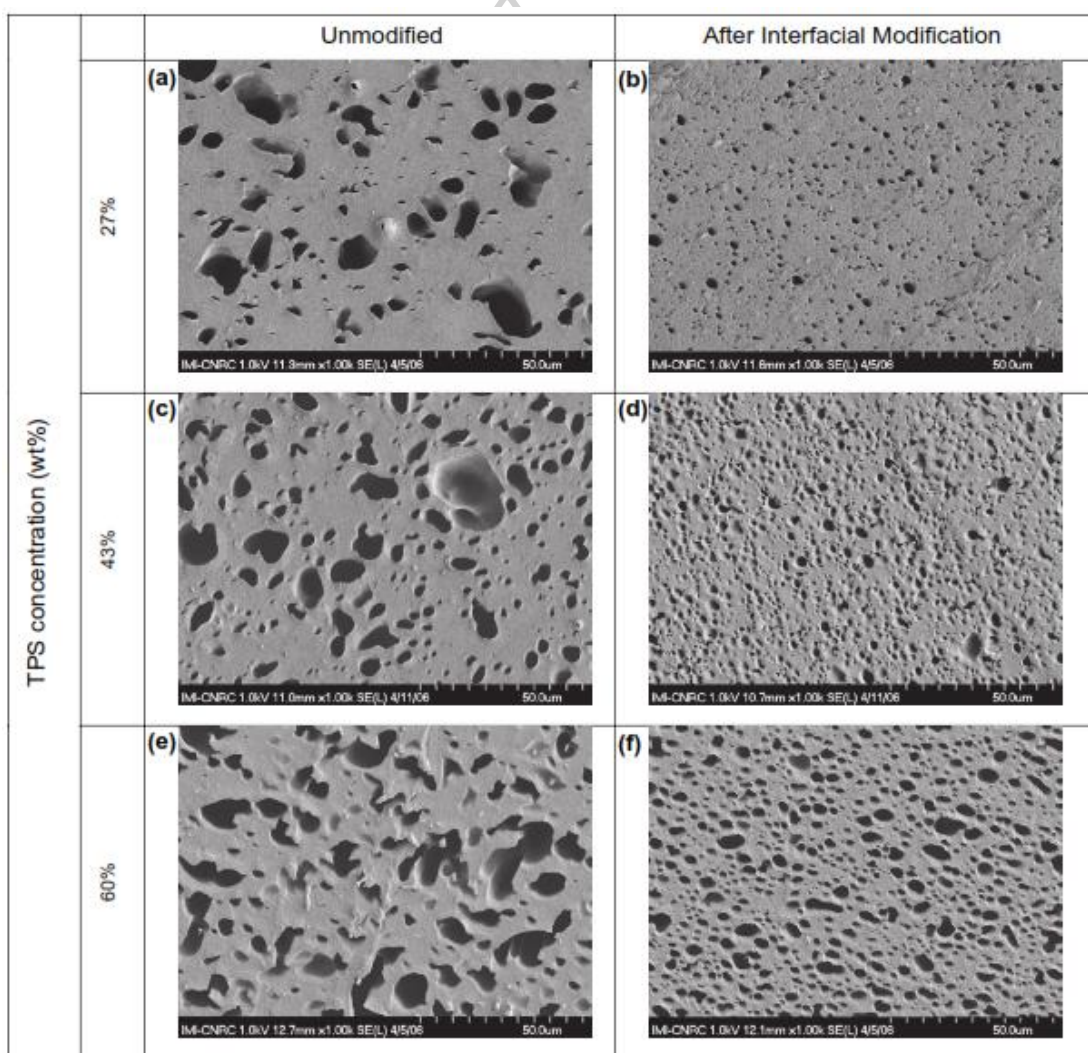


ภาพที่ 2.8 ภาพสัณฐานวิทยาของ PLA/DTPS โดย A PLA, B PLA/DTPS (50:50), C PLA/DTPS (40:60), D PLA/DTPS (50:50)+MA0.5 DCP0.05 และ E PLA/DTPS (40:60)+MA0.4 DCP0.04

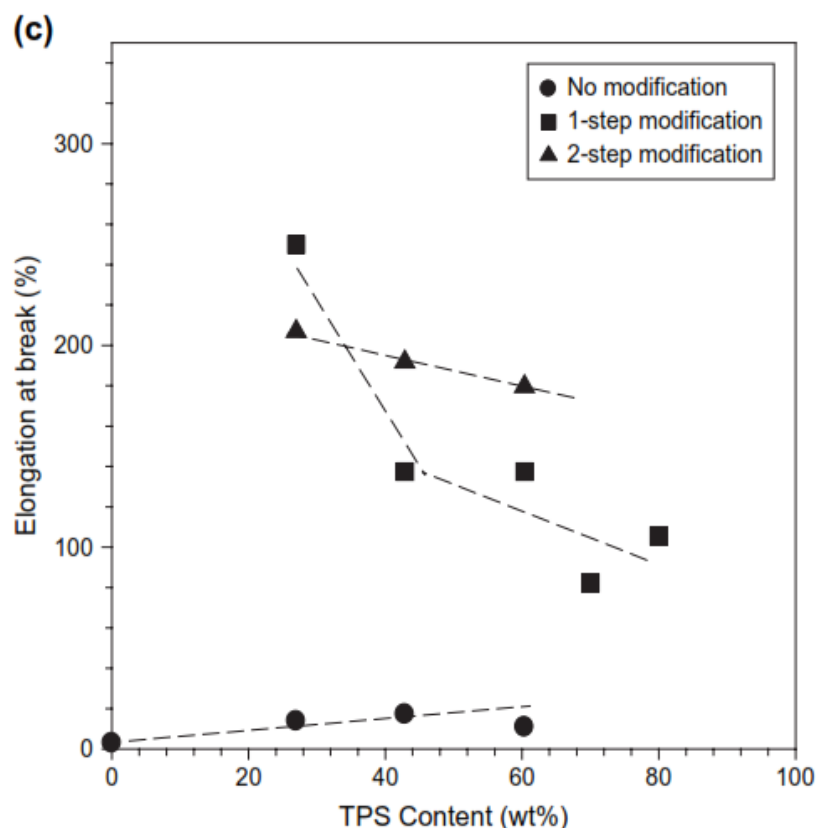


ภาพที่ 2.9 สมบัติเชิงกลของ PLA/DTPS ที่สัดส่วนต่างๆ

จากงานวิจัยของ Michel A. Huneault และ Hongbo Li[26] ทำการศึกษาการเบลนด์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) กับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยผ่านเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ ให้สัดส่วนของ TPS อยู่ในช่วง 27 ถึง 60 wt.% และติดตามผลการเติม maleic anhydride ที่ทำการกราฟฟอยู่บน PLA จากผลสัมฤทธิ์ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงดังภาพที่ 2.10 พบว่าขนาดอนุภาคของ TPS มีขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 5 ถึง 30 ไมโครเมตร โดยมีรูปร่างของอนุภาคที่ไม่แน่นอนแต่เมื่อปรับปรุงความเข้ากันด้วย maleic anhydride บน PLA ที่มี initiator เป็น peroxide แสดงการกระจายตัวของอนุภาค TPS ที่มีขนาดที่เล็กเหลือ 1 ถึง 3 ไมโครเมตรซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มความเหนียวของพอลิเมอร์เบลนด์ได้อย่างเด่นชัดแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 ภาพสัมฤทธิ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันด้วย maleic anhydride และ peroxide L101 ปริมาณ 2 และ 0.25 wt.% ตามลำดับบน PLA



ภาพที่ 2.11 แผนภูมิแสดง Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/TPS ในสัดส่วนต่างๆ

จากงานวิจัยของ M. Knitter และ M. Dobrzynska-Mizera[27] ได้ทำการศึกษา isotactic polypropylene (iPP) ที่ผ่านการดัดแปลงผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) จากแป้งมันฝรั่ง โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า Young's modulus ของ iPP มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม TPS ในปริมาณที่มากขึ้น อาจเนื่องจากการที่อนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชบางส่วนยังไม่หลอมทำให้อนุภาคแป้งนี้ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม รวมถึงผลของการเกาะกลุ่มรวมตัวกันของสารตัวเติมทำให้สมบัติการดึงยืด Elongation at maximum stress และ yield strength ของชิ้นงานมีค่าลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

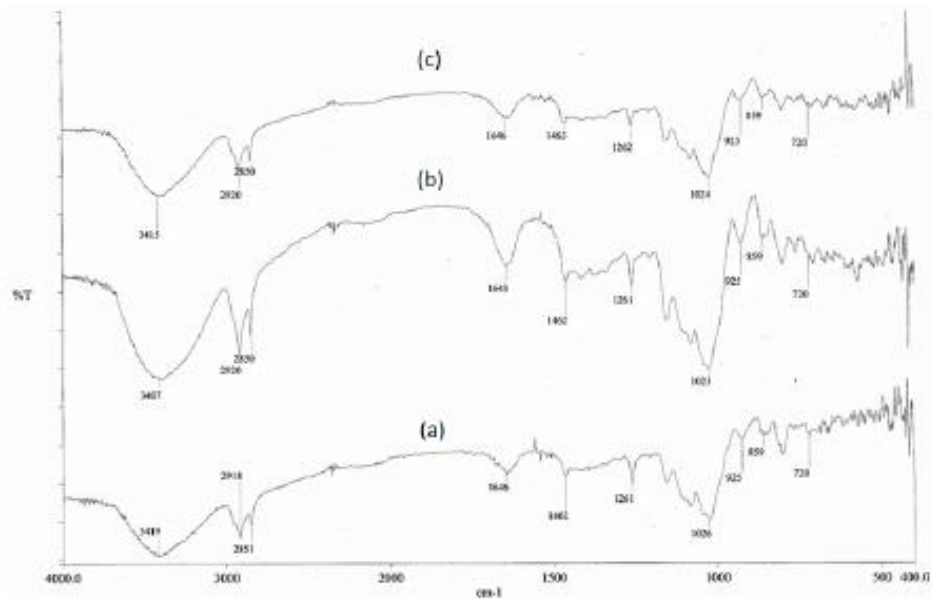
งานวิจัยของ Yossathorn Tanetrungroj และ Jutarat Prachayawarakorn[4] ได้ทำการศึกษามลของชนิดของแป้งที่มีต่อการสมบัติเชิงกล, สัณฐานวิทยา และสมบัติการซึมผ่านของน้ำของ LDPE เบลนด์กับ TPS ความต่างของชนิดแป้งนี้เป็นผลมาจากสัดส่วนของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน แป้งที่ใช้ประกอบไปด้วย Cassava starch (TPCS), Arrowroot starch (TPAS) และ Mungbean starch (TPMS) ข้อมูลของแป้งแต่ละชนิดแสดงใน ตารางที่ 2.1 โดยเตรียมจากแป้งผสมกลีเซอรอลที่สัดส่วน 70 : 30 แล้วนำไปผสมกับ LDPE และ MAPE (maleic anhydride graft

polyethylene) ใน internal mixer ที่ 40 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที และนำไปฉีดใน เครื่องฉีดแม่พิมพ์ที่ 150-170 องศาเซลเซียส

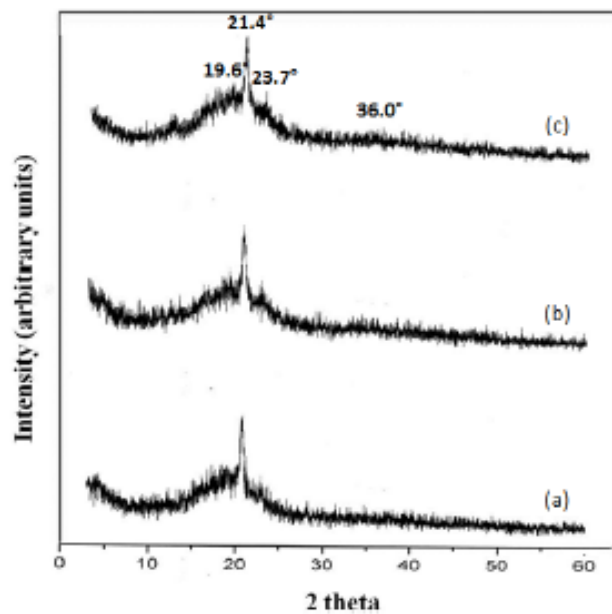
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งแต่ละชนิด[4]

Chemical composition (%)	Cassava starch	Arrowroot starch	Mungbean starch
Moisture	0.5	8.6	9.3
Carbohydrate	85.0	94.4	82.3
Amylose	16.4	19.9	37.9
Amylopectin	83.6	75.4	62.1
Protein	0.3	4.2	23.3
Fat	1.1	0.2	1.9
Ash	0.2	2.4	3.0
Others	0.6	0.5	0.9

ผลจากการทดสอบ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) แสดงในภาพที่ 2.12 และ X-ray diffraction (XRD) แสดงในภาพที่ 2.13 ไม่พบความแตกต่างของ LDPE ที่ผสมกับ เทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งแต่ละชนิดอย่างมีนัยแต่เมื่อคำนวณความเป็นผลึกจาก XRD ของแป้งแต่ละชนิดพบว่า TPMS มีค่า 38.7%, TPCS มีค่า 36.2% และ TPAS มีค่า 37.4% จะเห็นว่า TPMS มีปริมาณผลึกมากที่สุด เนื่องจากแป้งชนิดนี้มีสัดส่วนของอะไมโลสมากที่สุดเมื่อเทียบกับแป้งชนิดอื่น การที่มีอะไมโลสมากจะช่วยให้เกิดผลึกมากขึ้น

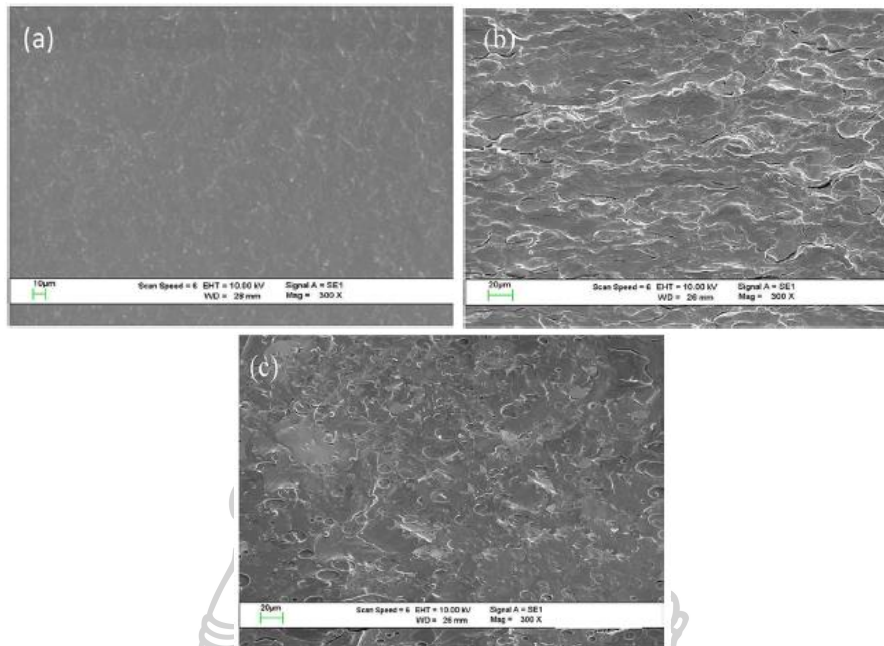


ภาพที่ 2.12 IR spectrum ของแป้งแต่ละชนิด (a) TPAS, (b)TPCS และ (c)TPMS[4]

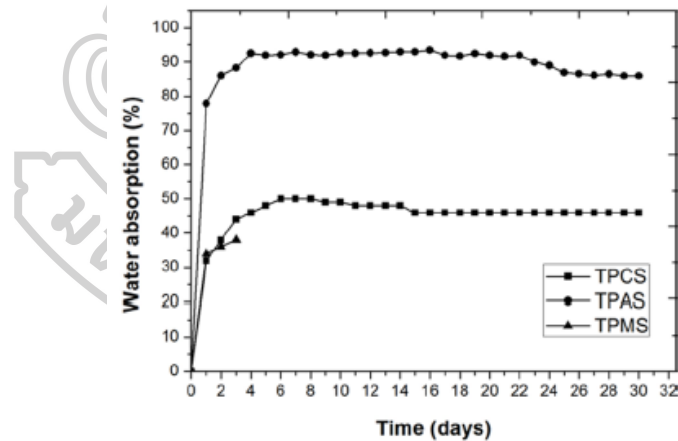


ภาพที่ 2.13 X-ray diffraction ของแป้งแต่ละชนิด(a) TPAS, (b)TPCS และ (c)TPMS[4]

จากภาพสัณฐานวิทยาของแป้งแต่ละชนิดของส่วนที่แตกหัก แสดงในภาพที่ 2.14 จากภาพ จะเห็นว่า TPMS จะมีพื้นผิวที่เรียบมากที่สุดซึ่งเกี่ยวกับสมบัติการไหลของ TPMS ดีที่สุดเนื่องจาก แป้งชนิดนี้มีสัดส่วนอะไมโลสมากที่สุด จากผลการซึมผ่านของน้ำแสดงในภาพที่ 2.15 จะเห็นว่า TPMS มีอัตราการซึมผ่านของน้ำน้อยที่สุดและ TPAS มีอัตราการซึมผ่านของน้ำมากที่สุด

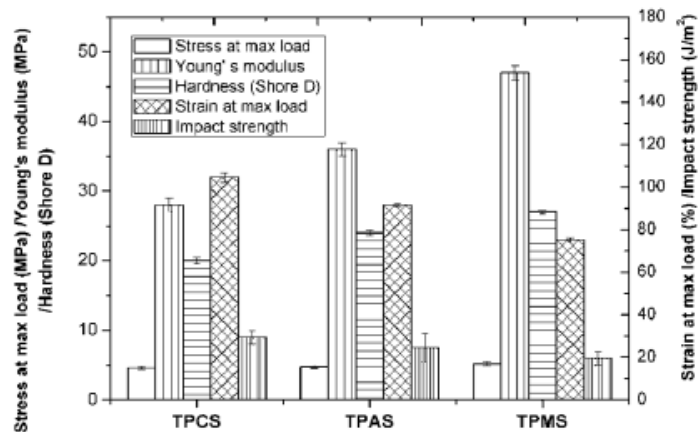


ภาพที่ 2.14 ภาพ SEM ของแป้งแต่ละชนิด (a) TPMS, (b) TPCS, และ (c) TPAS[4]



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของอัตราการซึมผ่านของน้ำกับเวลา[4]

ผลสมบัติเชิงกลของ LDPE ผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งแต่ละชนิดแสดงในภาพที่ 2.16 จากผลจะเห็นว่า TPMS มีค่า Young's modulus มากที่สุด, ค่า Hardness มากที่สุด แต่ strain at max load และ impact strength น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแป้งชนิดอื่นซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสัดส่วนของอะไมโลสที่มากที่สุดของ TPMS ยืนยันผลด้วยภาพ SEM และปริมาณผลึกที่มากที่สุดของ TPMS



ภาพที่ 2.16 สมบัติเชิงกลของ LDPE/TPS ที่แตกต่างกัน[4]

จากงานวิจัยของ Ming-Meng Pang และคณะ[28] ได้ศึกษาการเสื่อมสลายของพอลิโพรพิลีนที่ผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มาจากแป้งชนิดต่างๆ พบว่าการเสื่อมสลายของนี้ขึ้นกับองค์ประกอบของสตาร์ช เช่น สัดส่วนอะไมโลส อะไมโลเพคติน ขนาดอนุภาค ขนาดอนุภาค การกระจายตัวและอัตลักษณ์กิริยาระหว่างเฟสทั้งสองการเสื่อมสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์เบลนจะขึ้นกับพฤติกรรมการดูดซึมน้ำและโครงสร้างของแป้ง

จากงานวิจัยของ M. Bousmina และคณะ[29] ทำการศึกษาโมเดลที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงเฉือนภายในเครื่องผสมแบบปิดจากค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสม จากผลการทดลองพบว่าในการติดตามโมเดลที่สามารถคำนวณหา shear rate และ shear stress ได้โดยใช้ Couette ตามสมการดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดยสมการที่ 2.1 แสดงการค่า shear rate ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมและสมการที่ 2.2 แสดงค่า shear stress เฉลี่ยระหว่างการผสม โดยจะเห็นว่าทั้งสองสมการที่บริเวณ small gap ตัวแปรที่มีผลจากตัวแปรของเครื่องผสมเป็นหลัก ซึ่งสมการคำนวณเทียบค่ากับผลจาก cone and plate และ capillary rheometer ผลว่ามีผลมีความใกล้เคียงกันมากในหลายชนิดพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{1/2} = \frac{2^{2(1+1/n)} \pi N}{n} \frac{\beta^{2/n}}{(1+\beta)^{2/n} (\beta^{2/n} - 1)}$$

สมการที่ 2.1 สมการคำนวณ shear rate ที่ตำแหน่ง $r = R_{1/2}$

$$\tau_{r\theta} \left(\frac{R_1}{2} \right) = \frac{2\Gamma}{\pi L (R_e + R_i)^2 (1 + g^{n+1})}$$

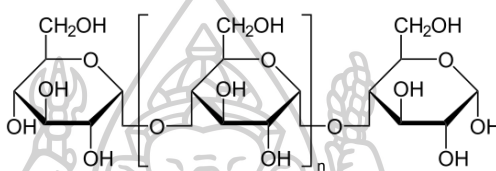
สมการที่ 2.2 สมการคำนวณ shear stress ที่ตำแหน่ง $r = R_{1/2}$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

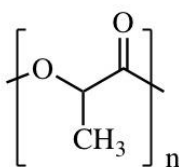
3.1.1. แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (Native tapioca starch; NT) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท สยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัด ประเทศไทย โดยมีความชื้นตั้งต้นอยู่ที่ 12 % MC มี amylose content อยู่ที่ 17-19 %



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง (starch)

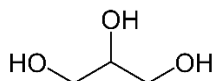
3.1.2. แป้งมันสำปะหลังดัดแปลงแบบ etherified starch (Kreation FM; KFM) ผลิตโดยบริษัท สยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัด ประเทศไทย โดยมีความชื้นตั้งต้นอยู่ที่ 12 % MC เป็นแป้งที่ผ่านการทำ etherification มี degree of substitution อยู่ที่ 0.1 และมีผล Brookfield viscosity 100-200 mPa.s ที่อุณหภูมิ 80 °C ปริมาณของแข็ง 5%

3.1.3. พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid; PLA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เกรด LX175 เป็นเกรดสำหรับ extrusion ใช้ในการผสมบน twin screw extruder ในตอนที่ 4.4 และ L130 เป็นเกรด injection ใช้ในการศึกษาผลการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ตอนที่ 4.3 ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท corbion purac Thailand ประเทศไทย มีดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ISO 1133-A เท่ากับ 3 g/10 min (ที่สภาวะ 190 °C/2.16 kg) และ 7 g/10 min ที่สภาวะเดียวกันตามลำดับ -ขณะที่ PLA เกรด 3052D เพื่อใช้ในการคำนวณ viscosity model สำหรับแทนค่าลงในโปรแกรม Ansys ผลิตโดยบริษัท NatureWorks LLC ประเทศสหรัฐอเมริกา มีดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D-1238 เท่ากับ 14 g/10 min (ที่สภาวะ 210 °C/2.16 kg)



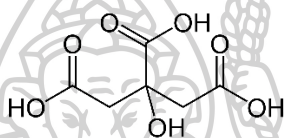
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)

3.1.4. กลีเซอรอล (Glycerol) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของเหลวใส หนืด ไม่มีกลิ่น จากบริษัท Akzo Nobel มีความหนาแน่นอยู่ที่ 1.25 g/cm^3 มีจุดเดือดเท่ากับ 290 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล (glycerol)

3.1.5. กรดซิตริก (citric acid; C) หรือ 2-Hydroxypropane-1,2,3-tricarboxylic acid ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น citric acid monohydrate มีลักษณะเป็นผลึกใส จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 70-75 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นอยู่ที่ 1.542 g/cm^3 ใช้เป็นตัวเร่งกรดในการตัดสายโซ่โมเลกุลแป้ง



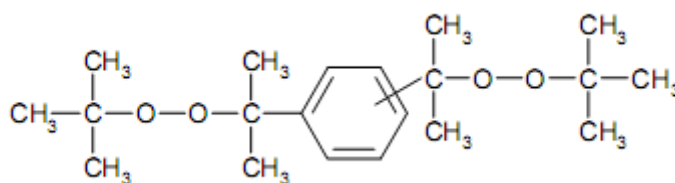
ภาพที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริก (citric acid)

3.1.6. Maleic anhydride (M) หรือ Furan-2,5-dione ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว จากบริษัท Sigma-Aldrich Co. LLC. ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันและตัวเร่งในการตัดสายโซ่โมเลกุลแป้ง



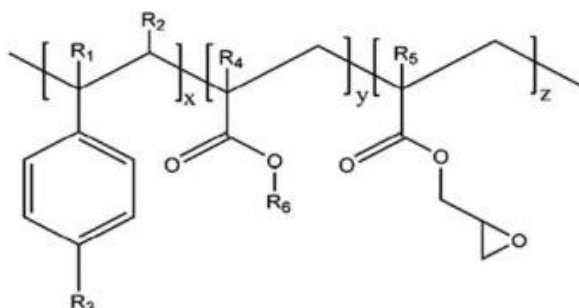
ภาพที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของ maleic anhydride

3.1.7. Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox 14-40B-PD) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ผลิตโดยบริษัท Akzo Nobel มีปริมาณของเปอร์ออกไซด์ 40% ส่วนที่เหลือเป็น แคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา เปอร์ออกไซด์จะแตกตัวให้ free radical ใช้เป็นรีแอคทีฟเอเจนท์ มีครึ่งชีวิต 2.5 นาที ที่ $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$



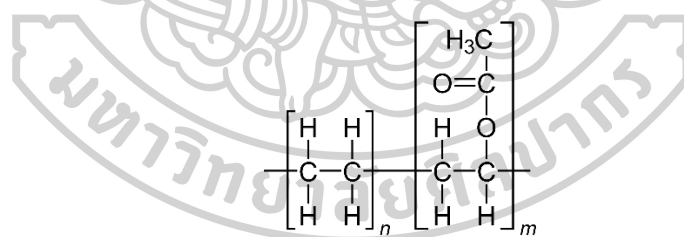
ภาพที่ 3.6 โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene

3.1.8. Joncryl® ADR-4368 หรือ Multifunctional epoxide ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ผลิตโดยบริษัท BASF Chemical Co. ใช้เป็นสารยึดต่อสายโซ่โมเลกุล (Chain extender)



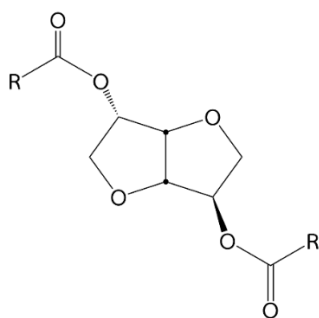
ภาพที่ 3.7 โครงสร้างทางเคมีของ Joncryl® ADR-4368 โดยที่ R₁-R₅ เป็น H, CH₂ หรือหมู่ alkyl และ R₆ เป็นหมู่ alkyl[30]

3.1.9. เอทิลีน ไวนิล อะซิเตท โคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer; EVA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของผลึกสีขาว เกรด Escorene™ Ultra UL04533EH2 ผลิตโดย ExxonMobil Chemical Company ประเทศสหรัฐอเมริกา มีความหนาแน่นอยู่ที่ 0.956 g/cm³ มีดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D-1238 เท่ากับ 45 g/10 min ปริมาณ vinyl acetate อยู่ 33 wt. %



ภาพที่ 3.8 โครงสร้างทางเคมีของ Ethylene vinyl acetate (EVA)

3.1.10. Polysorb® ID46 หรือ isosorbide diesters เป็น biobased plasticizer ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้เป็นของเหลวใส ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท Roquette Singapore Pte. Ltd ประเทศ สิงคโปร์ ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์จากอนุพันธ์ของกลูโคสหรือ sorbitol



ภาพที่ 3.9 โครงสร้างทางเคมีของ Polysorb® ID46

3.2. เครื่องผสมและขึ้นรูป

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

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

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

3.2.4. เครื่องตีแป้ง (cooking machiner) รุ่น Homemade® model HQW-158122 ใช้สำหรับการตีแป้งให้เป็นเนื้อเดียวกับสารอื่นๆ

3.3. เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Hitachi TM3030 ประเทศเยอรมนี ใช้วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชและพอลิเมอร์เบลนด์

3.3.2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) รุ่น TESCAN MIRA3 LMH Schottky, Brno, Czech Republic ใช้วิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่กำลังขยายสูง

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

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

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

3.3.6. เครื่องควบคุมความชื้น (weathering oven) รุ่น SH-242 จากบริษัท Espec North America, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในการเก็บและทดสอบชิ้นงาน

3.4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1. กระบวนการผสมและการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

3.4.1.1. ขั้นตอนการเตรียมและขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง ที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลง ทั้งที่เติมและไม่เติมยาง EVA กรดซิตริกและ maleic anhydride

นำแป้งที่ยังไม่ผ่านการอบมาผสมกับกลีเซอรอลในปริมาณ 25 และ 30 phr ของแป้งและเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในสัดส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 จนได้แป้งที่เป็นเนื้อเดียวกันและนำแป้งที่ผ่านการผสมมาใส่ไว้ในถุงซิปลเป็นเวลาหนึ่งคืนที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทำการบ่มแป้งให้กลีเซอรอลมีเวลาซึมเข้าไปในเนื้อแป้ง

นำแป้งที่ผ่านการบ่มแล้วมาชั่งสัดส่วนกับยาง EVA ในปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ของแป้งแล้วนำแป้งป้อนลงในเครื่องผสมแบบปิดโดยตั้งอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาบดและอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืนโดยระหว่างนี้จะทำการวิเคราะห์ผลค่าแรงบิดที่ได้ระหว่างกระบวนการผสม

นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ได้มาขึ้นรูปสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานการดึงยึด (Tensile) ด้วยเครื่องอัดเข้าแม่พิมพ์ด้วยความร้อนเป็นรูปทรง dumbbell ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสโดยมีเวลา pre-heat 6 นาที

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (NT)

Sample	NT (wt.%)	EVA (wt.%)	Glycerol (phr)	Citric acid (phr)	Maleic anhydride (phr)
NT100/25	100	0	25	-	-
NT100/30	100	0	30	-	-
NT95/25	95	5	25	-	-
NT90/25	90	10	25	-	-
NT85/25	85	15	25	-	-
NT95/30	95	5	30	-	-
NT90/30	90	10	30	-	-
NT85/30	85	15	30	-	-
NT95/25(C0.5)	95	5	25	0.5	-
NT90/25(C0.5)	90	10	25	0.5	-
NT85/25(C0.5)	85	15	25	0.5	-
NT95/30(C0.5)	95	5	30	0.5	-
NT90/30(C0.5)	90	10	30	0.5	-
NT85/30(C0.5)	85	15	30	0.5	-
NT95/25(C1)	95	5	25	1	-
NT90/25(C1)	90	10	25	1	-
NT85/25(C1)	85	15	25	1	-
NT95/30(C1)	95	5	30	1	-
NT90/30(C1)	90	10	30	1	-
NT85/30(C1)	85	15	30	1	-
NT95/30(M0.1)	95	5	30	-	0.1
NT90/30(M0.1)	90	10	30	-	0.1
NT85/30(M0.1)	85	15	30	-	0.1
NT95/30(M0.3)	95	5	30	-	0.3
NT90/30(M0.3)	90	10	30	-	0.3
NT85/30(M0.3)	85	15	30	-	0.3
NT95/30(M0.5)	95	5	30	-	0.5

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (NT)

Sample	NT (wt.%)	EVA (wt.%)	Glycerol (phr)	Citric acid (phr)	Maleic anhydride (phr)
NT90/30(M0.5)	90	10	30	-	0.5
NT85/30(M0.5)	85	15	30	-	0.5
NT95/30(C1M0.1)	95	5	30	1	0.1
NT90/30(C1M0.1)	90	10	30	1	0.1
NT85/30(C1M0.1)	85	15	30	1	0.1

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM)

Sample	KFM (wt.%)	EVA (wt.%)	Glycerol (phr)	Citric acid (phr)	Maleic anhydride (phr)
KFM100/25	100	0	25	-	-
KFM100/30	100	0	30	-	-
KFM95/30	95	5	30	-	-
KFM90/30	90	10	30	-	-
KFM85/30	85	15	30	-	-
KFM80/30	80	20	30	-	-
KFM95/30(C1)	95	5	30	1	-
KFM90/30(C1)	90	10	30	1	-
KFM85/30(C1)	85	15	30	1	-
KFM95/30(M0.1)	95	5	30	-	0.1
KFM90/30(M0.1)	90	10	30	-	0.1
KFM85/30(M0.1)	85	15	30	-	0.1

*สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น NT95/30(C1M0.1)

NT95/30 หมายถึง native tapioca starch ที่ปริมาณแป้ง 95 wt.% ที่มีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr ของแป้ง, KFM หมายถึง Kreation FM modified starch, C1 หมายถึงกรดซิตริกปริมาณ 1 phr ของแป้งและ M0.1 หมายถึง maleic anhydride ปริมาณ 0.1 phr ของแป้ง

3.4.1.2. ขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตา์ซทั้งที่เติมและไม่เติม peroxide หรือ Joncryl ด้วยเครื่องผสมแบบปิดแบบ two-step process

เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากตอนก่อนหน้าโดยเทอร์โมพลาสติกสตา์ซเลือกในสัดส่วน NT95/30(C1M0.1) จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสตา์ซและ PLA เกรด L130 มาอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืน

ทำการผสมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซและ PLA ที่สัดส่วนต่างๆ (เติม peroxide หรือ Joncryl) ตามตารางที่ 3.3 และเขย่าให้กระจายทั่วกันแล้วป้อนลงเครื่องผสมแบบปิดโดยตั้งอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาอบและอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืนโดยระหว่างนี้จะทำการวิเคราะห์ผลค่าแรงบิดที่ได้ระหว่างกระบวนการผสม

นำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มาขึ้นรูปสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานการดึงยืด (Tensile) ด้วยเครื่องอัดเข้าแม่พิมพ์ด้วยความร้อนเป็นรูปทรง dumbbell ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสโดยมีเวลา pre-heat 6 นาที

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโพลีแลคติกแอซิดและพอลิแลคติกแอซิดแบบ two-step process

Sample	PLA (wt.%)	TPS (wt.%)	peroxide (phr)	Joncryl (phr)
Neat PLA L130	100	-	-	-
2L7TPS3	70	30	-	-
2L5TPS5	50	50	-	-
2L3TPS7	30	70	-	-
2L7TPS3_P0.1	70	30	0.1	-
2L7TPS3_P0.2	70	30	0.2	-
2L7TPS3_J0.5	70	30	-	0.5
2L7TPS3_J1.0	70	30	-	1.0
2L7TPS3_P0.1J1.0	70	30	0.1	1.0

*สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น 2L7TPS3_P0.1J1.0

เลข 2 หน้าสุดหมายถึง two-step process, L7 หมายถึงปริมาณ PLA L130 70 wt.% และ TPS3 หมายถึงปริมาณ TPS 30 wt.%, P0.1 หมายถึง peroxide 0.1 phr และ J1.0 หมายถึง Joncryl ปริมาณ 1.0 phr

3.4.1.3. ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซทั้งที่เติม peroxide หรือ Joncryl ด้วยเครื่องผสมแบบปิดแบบ one-step process

ในการผสมแบบ one-step process จะต่างจากการเตรียมแบบ two-step process ตรงที่ไม่จำเป็นต้องเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซก่อนแล้วจึงนำมาผสมกับ PLA เกรด LX175 แต่สามารถนำแป้งที่ผ่านการหมักมาผสมกับ PLA ในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ได้โดยตรง โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการทำการหมักแป้งสัสด่วน NT95/30(C1M0.1) ตามขั้นตอนที่ 3.4.1.1. จากนั้นนำแป้งที่หมักและ PLA เกรด LX175 มาอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืน

ทำการผสมแป้งหมักและ PLA ที่สัสด่วนต่างๆ (เติม peroxide หรือ Joncryl) และเขย่าให้กระจายทั่วกันแล้วป้อนลงเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่โดยตั้งอุณหภูมิในโซนต่างๆ เป็น 175, 175, 180, 180, 175, 170, 160, 150, 130, 110 องศาเซลเซียส ความเร็วมอเตอร์ 400 rpm ป้อนด้วยมือ จากนั้นอัดรีดสารผสมผ่านหัวตายให้เป็นเส้น หล่อเย็นด้วยน้ำ แล้วตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องตัดเม็ด

นำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มาขึ้นรูปสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานการดึงยืด (Tensile) ด้วยเครื่องอัดเข้าแม่พิมพ์ด้วยความร้อนเป็นรูปทรง dumbbell ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสโดยมีเวลา pre-heat 6 นาที

ตารางที่ 3.4 สัสด่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโพลีแลคติกแอซิดแบบ one-step process

Sample	PLA (wt.%)	TPS (wt.%)	peroxide (phr)	Joncryl (phr)
Neat PLA LX175	100	-	-	-
1LX7NT3	70	30	-	-
1LX7NT3_P0.2J1.0	70	30	0.2	1.0
1LX6NT4_P0.2J1.0	60	40	0.2	1.0
1LX7KFM3_P0.2J1.0	70	30	0.2	1.0
1LX6KFM4_P0.2J1.0	60	40	0.2	1.0

*สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น 1LX7NT3_P0.2J1.0

เลข 1 หน้าสุดหมายถึง one-step process, LX7 หมายถึงปริมาณ PLA LX175 70 wt.% และ NT3 หมายถึงปริมาณแป้งที่ผ่านการหมักแล้วจากสูตร NT95/30(C1M0.1) ปริมาณ 30 wt.%, P0.2 หมายถึง peroxide 0.2 phr และ J1.0 หมายถึง Joncryl ปริมาณ 1.0 phr

3.4.1.4. ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซทั้งที่เติม peroxide ด้วยเครื่องผสมแบบปิดแบบ one-step process

ทำการหมักแป้งสัสด่วน NT95/30(C1M0.1) ตามขั้นตอนที่ 3.4.1.1. จากนั้นนำแป้งที่หมัก HDPE เกรด 2308J และ PP เกรด 1102H มาอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืน

ทำการผสมแป้งหมัก HDPE และ PP ที่สัสด่วนต่างๆ (เติม peroxide) และเขย่าให้กระจายทั่วกันแล้วป้อนลงเครื่องผสมแบบปิดโดยตั้งอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาอบและอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืนโดยระหว่างนี้จะทำการวิเคราะห์ผลค่าแรงบิดที่ได้ระหว่างกระบวนการผสม

นำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มาขึ้นรูปสำหรับการทดสอบความสามารถในการต้านทานการดึงยืด (Tensile) ด้วยเครื่องอัดเข้าแม่พิมพ์ด้วยความร้อนเป็นรูปทรง dumbbell ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสโดยมีเวลา pre-heat 6 นาที

ตารางที่ 3.5 สัสด่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแบบ one-step process

Sample	HDPE (wt.%)	TPS (wt.%)	peroxide (phr)	Maleic anhydride (phr ของ TPS)
Neat HDPE	100	-	-	-
1HD7NT3	70	30	-	0.1
1HD7NT3_P0.02	70	30	0.02	0.1
1HD7NT3_P0.05	70	30	0.05	0.1
1HD7NT3_P0.1	70	30	0.10	0.1
1HD7NT3_P0.2	70	30	0.20	0.1
1HD7NT3(M0.2)_P0.05	70	30	0.05	0.2
1HD7NT3(M0.3)_P0.05	70	30	0.05	0.3
1HD7NT3(M0.5)_P0.05	70	30	0.05	0.5
1HD7NT3(M1.0)_P0.05	70	30	0.05	1.0

*สัญลักษณ์ตัวย่อ เช่น 1HD7NT3(M0.2)_P0.05

เลข 1 หน้าสุดหมายถึง one-step process, HD7 หมายถึงปริมาณ HDPE 70 wt.% และ NT3 หมายถึงปริมาณแป้งที่ผ่านการหมักแล้วจากสูตร NT95/30(C1M0.1) ปริมาณ 30 wt.% ในกรณี (M0.2) หมายถึงปริมาณ maleic anhydride จากสูตร NT95/30(C1M0.1) เปลี่ยนจากปริมาณ 0.1 เป็น 0.2 phr ของแป้งและ P0.05 หมายถึง peroxide 0.05 phr

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนของการผสมในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างโพลีเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนแบบ one-step process

Sample	PP (wt.%)	TPS (wt.%)	peroxide (phr)	Maleic anhydride (phr ของ TPS)
Neat PP	100	-	-	-
1PP7NT3	70	30	-	0.1
1PP7NT3_P0.05	70	30	0.05	0.1
1PP7NT3(M0.2)	70	30	-	0.2
1PP7NT3(M0.2)_P0.05	70	30	0.05	0.2

*สัญลักษณ์ตัวอย่าง เช่น 1PP7NT3(M0.2)_P0.05

เลข 1 หน้าสุดหมายถึง one-step process, PP7 หมายถึงปริมาณ PP 70 wt.% และ NT3 หมายถึงปริมาณแป้งที่ผ่านการหมักแล้วจากสูตร NT95/30(C1M0.1) ปริมาณ 30 wt.% ในกรณี (M0.2) หมายถึงปริมาณ maleic anhydride จากสูตร NT95/30(C1M0.1) เปลี่ยนจากปริมาณ 0.1 เป็น 0.2 phr ของแป้งและ P0.05 หมายถึง peroxide 0.05 phr

3.4.1.5. การศึกษาการจำลองการไหลของพอลิแลคติกแอซิดในเครื่องผสมแบบปิดโดยใช้โปรแกรม Ansys fluent

การจำลองการไหลของ PLA เกรด 3052D ในเครื่องผสมแบบปิดจะใช้โปรแกรม Ansys fluent ในการจำลองการไหล ความเร็วการไหลในแต่ละตำแหน่ง อัตราเฉือน และความเค้นเฉือนในแต่ละตำแหน่ง สมบัติการไหลของ PLA จะใช้ crossflow model ในการคำนวณความหนืดที่สัมพันธ์กับอัตราเฉือนและอุณหภูมิ โดยสมการของ crossflow model ที่แสดงความสัมพันธ์ในสมการ 3.1 นั้นแสดงดังต่อไปนี้

$$\eta = H(T) \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}}$$

สมการที่ 3.1 สมการความหนืด crossflow model

โดยที่ $H(T)$ เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนืดเป็นฟังก์ชันแบบกฎของ Arrhenius แสดงดังสมการที่ 3.2

$$H(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_\alpha - T_0} \right) \right]$$

สมการที่ 3.2 สมการแสดงค่าอิทธิพลทางความร้อนจากกฎของ Arrhenius โดยที่ T_0 เป็นอุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้หา Zero shear rate viscosity โดยทั่วไปจะตั้งค่าเริ่มต้นเป็น 0 และ T_α ใช้เป็น glass transition temperature ของ PLA

โดยค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการ 3.1 แสดงดังตารางที่ 3.7 ต่อไปนี้
ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องใน crossflow model

ตัวแปร	ความหมาย
η_0	Zero shear rate viscosity
λ	Natural time
$\dot{\gamma}$	Shear rate
n	Power law number
α	Ratio of the activation energy
T_0	Reference temperature for which $H(T) = 1$
T_α	The temperature shift

โดยตัวแปรของพอลิเมอร์จากการทดลองโดยใช้ DMA แบบ frequency sweep ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถนำมาหาพารามิเตอร์ต่างๆของ crossflow model หลังจากนั้นทำการจำลองการไหลในเครื่องผสมแบบปิดโดยใช้โปรแกรม Ansys fluent เพื่อคำนวณหาอัตราเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆ และจากสมบัติการไหลจาก crossflow model สามารถคำนวณหาค่า shear stress ที่พื้นที่ผิวของใบกวนในแบบจำลอง เพื่อนำไปคำนวณต่อหาทอร์กที่เกิดขึ้นบนใบกวนและความเค้นเฉือนเฉลี่ยจากโปรแกรม Ansys fluent แล้วนำเปรียบเทียบกับค่าเค้นเฉือนเฉลี่ย ที่คำนวณจากค่าแรงบิดในเครื่องผสมแบบปิดตามทฤษฎี Couette analogy[29] ที่แสดงตามสมการที่ 3.3

$$\tau_{r\theta} \left(\frac{R_1}{2} \right) = \frac{2\Gamma}{\pi L (R_e + R_i)^2 (1 + g^{n+1})}$$

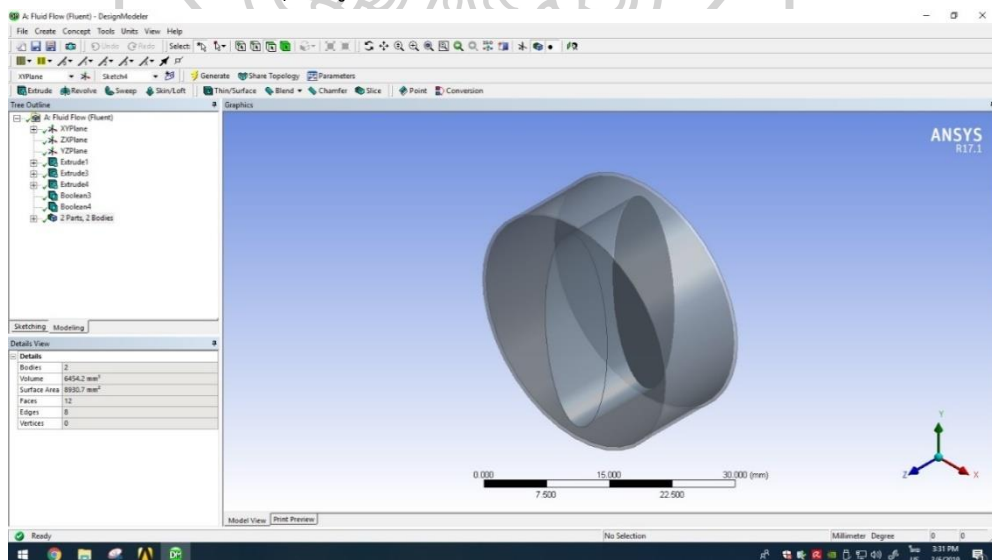
สมการที่ 3.3 สมการคำนวณ shear stress ที่ตำแหน่ง $r = R_{1/2}$

โดยค่าตัวแปรต่างๆ แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ shear stress จากทฤษฎี Couette analogy

ตัวแปร	ความหมาย
$\tau_{r\theta} \left(R_{\frac{1}{2}} \right)$	ค่า shear stress ที่เปลี่ยนแปลงตามทิศ $r\theta$ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกระบอก couette
Γ	ค่าแรงบิด
L	ความยาวของกระบอก couette
Re	รัศมีของใบกวนหรือ bob ของ couette
R_i	รัศมีของผนังหรือ cup ของ couette
g	Gear ratio
n	Power law number

ส่วนการกำหนดรูปทรงในการจำลองการไหลในเครื่องผสมแบบปิด จะเลือกใบกวนเป็นรูปทรงวงรี ที่หมุนอยู่ในทรงกระบอก เป็นตัวแทนลักษณะเครื่องผสมแบบปิดตามภาพที่ 3.10 แล้วทำการจำลองการไหล โดยให้ใบกวนหมุนด้วยความเร็วที่กำหนด (40, 60 และ 80 rpm) รวมถึงกำหนดอุณหภูมิของผนัง (140, 160 และ 180 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 3.10 รูปทรงของใบกวนและผนังในการจำลองการไหลโดยโปรแกรม Ansys fluent

3.4.2. กระบวนการในการทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ

3.4.2.1. ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ ด้วยเทคนิค SEM ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากชิ้นงานที่หักในไนโตรเจนเหลวโดยทำการทดสอบภายใต้โหมด back scattering ที่ความต่างศักย์ 15.00 kV ที่กำลังขยาย 1000 และ 2000 เท่า

3.4.2.2. นำชิ้นงานรูปทรง dumbbell ที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงยืด (Tensile) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D-638 Type V โดยใช้ Load cell 5 kN และอัตราเร็วในการดึง 1 mm/min

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

3.4.2.4. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) โดยเตรียมตัวอย่างโดยการตะไบให้เป็นผงบดรวมกับ KBr ที่ผ่านการอบแล้ว โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วงหรือ wave number 4,000 ถึง 400 cm^{-1}

3.4.2.5. การศึกษาความเข้ากันของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเทคนิค Molau test โดยนำชิ้นงานปริมาณ 0.5 กรัมในสารละลาย dichloromethane ที่สามารถละลาย PLA ได้แต่ไม่สามารถละลาย TPS ได้แล้วทำการแช่ตัวอย่างไว้ในสารละลาย 48 ชั่วโมงแล้วถ่ายรูปเก็บผล

3.4.2.6. การทดสอบการดูดซับความชื้นด้วยเครื่อง weathering oven ที่สภาวะ 25 องศาเซลเซียส 50 %RH เป็นเวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักและมาทดสอบสมบัติการต้านทานการดึงยืดในเวลาต่างๆ

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชหรือ TPS จากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปลงโดย ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาด้านปริมาณและชนิดของพลาสติกไซเซออร์รวมถึงอิทธิพลของสารเติมแต่งและยาง (Ethylene vinyl acetate) ที่มีผลต่อการเตรียมสมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ศึกษาการเบลนดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลคติก แอซิด (Poly lactic acid: PLA) และการเบลนดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) หรือพอลิโพรพิลีน (Poly Propylene: PP) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนดและสุดท้ายศึกษาการจำลองการไหลในคอมพิวเตอรืของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) โดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent

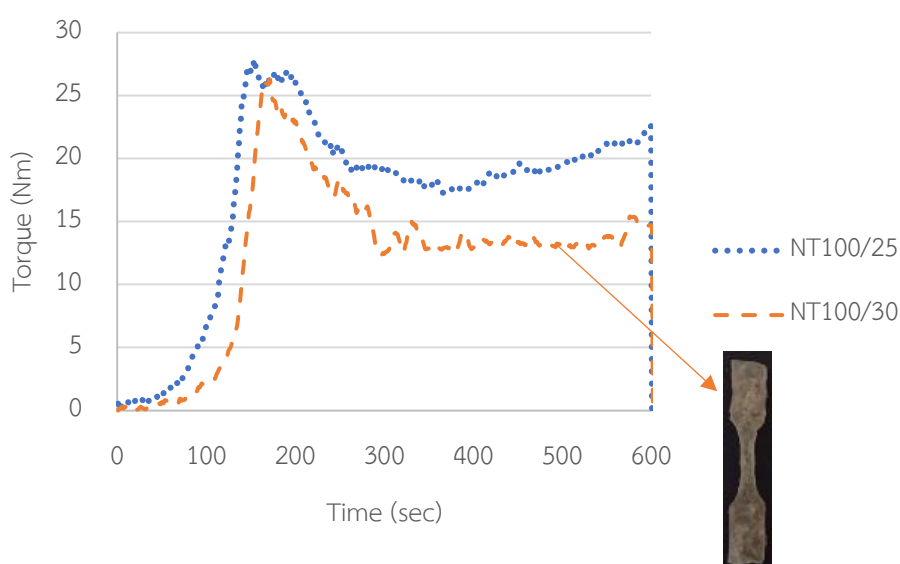
4.1. ผลการศึกษาเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

การศึกษาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านการอบหรือคือ แป้งมันสำปะหลังที่มีความชื้นตั้งต้นที่ 10-12 % ความชื้น โดยใช้พลาสติกไซเซออร์คือกลีเซอรอลที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งที่ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเช่นกัน รวมถึงการเติมสารเติมแต่งอื่นๆลงไปเช่น กรดซิตริก maleic anhydride เป็นต้น โดยผลที่ได้จะดูจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมแบบปิดและทำการศึกษาสมบัติการไหล สมบัติเชิงกลและสมบัติสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่ได้

4.1.1. ผลการศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

จากการศึกษาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติโดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลาสติกไซเซออร์หรือ กลีเซอรอล โดยศึกษาจากค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นของเครื่องผสมแบบปิดหรือ internal mixer ระหว่างกระบวนการผสมดังแสดงในภาพที่ 4.1 จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ 25 phr ของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติมีค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นตามเวลาการผสมโดยเฉพาะช่วงหลัง 5 นาที เนื่องจากปริมาณ

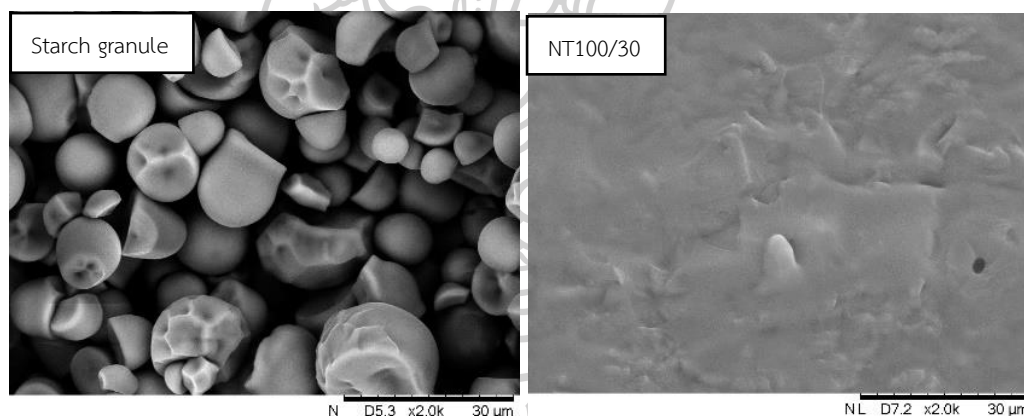
กลีเซอรอลที่ไม่เพียงพอต่อการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ทำให้เกิดความหนืดสูงระหว่างกระบวนการผสมและสีของ TPS ที่ได้เปลี่ยนสีจากใสออกน้ำตาลเป็น น้ำตาลไหม้ เมื่อเทียบปริมาณที่เพิ่มขึ้นของกลีเซอรอลเป็น 30 phr ของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติพบว่า ค่าแรงบิดมีค่าคงที่ซึ่งแสดงถึงมีความเสถียรในกระบวนการเตรียม ดังนั้นปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติคือ ปริมาณขั้นต่ำ 30 phr ของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ จากการศึกษาในบทความวิจัยอื่นๆ[31, 32] พบว่าที่ปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ได้เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่มีสมบัติแข็งที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิคล้อยแก้วมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง โดยไม่ควรเติมปริมาณพลาสติกไซเซอร์เกิน 35 % ดังนั้นจึงเลือกปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ 30 phr เทียบแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ ในกรณีเปลี่ยนชนิดพลาสติกไซเซอร์จากกลีเซอรอลเป็น polysorb ID46 ซึ่งเป็น isosorbide ที่ปริมาณ 25 และ 30 phr ของแป้งพบว่า แป้งไม่สามารถหลอมได้หรือคือ isosorbide ไม่สามารถพลาสติกไซค์แป้งได้เหมือนกลีเซอรอลที่ปริมาณเท่ากัน โดยจากงานวิจัยของ Daniele Battagazzore และคณะ[33] ได้ทำการศึกษาการเตรียม TPS จากแป้ง maize โดยใช้ isosorbide เปรียบเทียบโดยพบว่าปริมาณ isosorbide ที่เหมาะสมอยู่ที่ 40 wt.% อีกทั้งชิ้นงาน TPS ที่ได้มีความแข็งเปราะมากจึงเป็นไปได้ในการทดสอบสมบัติต่างๆที่อุณหภูมิห้องถ้าชิ้นงานมีความชื้นต่ำ ดังนั้นจึงเลือกกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์หลัก แต่เมื่อจะทำการขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ (compression molding) พบว่าชิ้นงานมีการหลอมและไหลไม่สมบูรณ์ในแม่พิมพ์ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณกลีเซอรอลจากเครื่องผสมแบบปิด

4.1.2. ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ ด้วยเทคนิค SEM

จากภาพสัณฐานวิทยาของอนุภาคแป้งก่อนผ่านกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ช แสดงดังภาพที่ 4.2 จะพบว่าอนุภาคแป้งมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยมีความเฉลี่ยอยู่ที่ 5 ถึง 15 ไมโครเมตร ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ปริมาณกลีเซอรอล 30 phr (NT100/30) ด้วย cryo-fracture surface จะเห็นพื้นผิวเรียบ แสดงถึงการไม่หลงเหลือของอนุภาคของแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นด้วยกระบวนการนี้ สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชได้ดี โดยมีส่วนที่เป็นกลีเซอรอลมาก (glycerol rich phase) และส่วนที่มีกลีเซอรอลน้อย (glycerol lean phase) ปนกันอยู่[34, 35] แสดงดังภาพที่ 4.2 ด้านขวาโดยเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ได้มีอุณหภูมิคล้ายแก้วอยู่ที่ 61.63 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เทอร์โมพลาสติกสตา์ชนี้มีคุณสมบัติแข็งที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามจากกระบวนการดังกล่าวไม่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีการ compression molding เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ดังนั้นจึงต้องศึกษาเพิ่มถึงการเติมยางลงไปในระบบนี้เพื่อช่วยในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ช

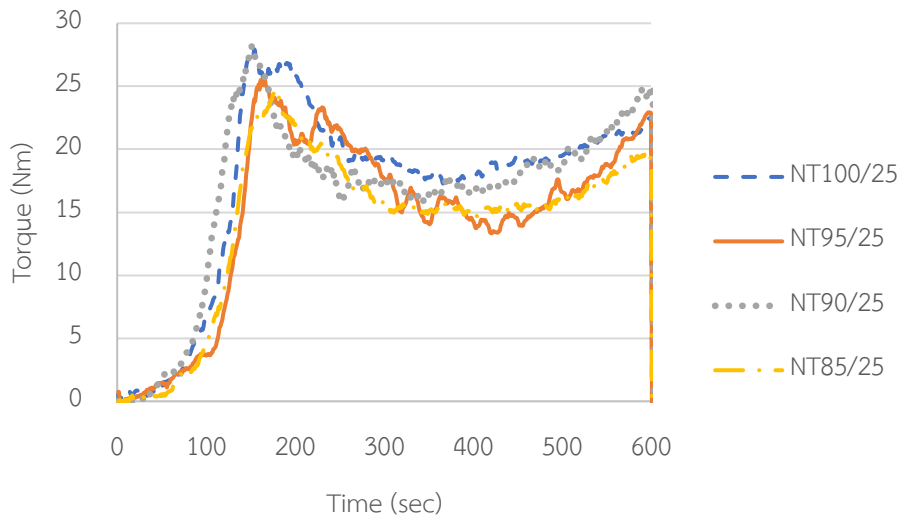


ภาพที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง (ด้านซ้าย) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ ปริมาณกลีเซอรอล 30 phr (NT100/30) (ด้านขวา)

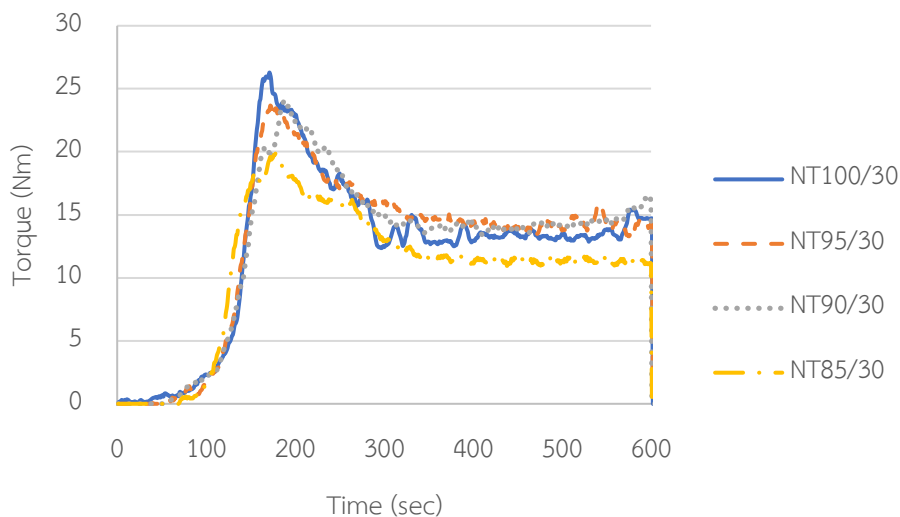
4.1.3. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติก สตา์ชที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม

จากการศึกษาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้ง มันสำปะหลังธรรมชาติโดยศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate (EVA) ให้ปริมาณ พลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) ที่ 25 และ 30 phr ของแป้งซึ่งส่งผลต่อค่าแรงบิดดังแสดงในภาพที่ 4.3 จากภาพจะเห็นว่าที่ปริมาณกลีเซอรอล 25 phr ของแป้งเมื่อเติมยางลงไปที่มีปริมาณต่างๆ ยังคง

แสดงพฤติกรรมเดิมคือ ค่าแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยเฉพาะช่วงหลัง 5 นาทีของเวลาผสมซึ่งแสดงถึงยางที่ใส่ลงไม่สามารถช่วยในการเกิดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ดีขึ้นเนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลที่ไม่เพียงพอ



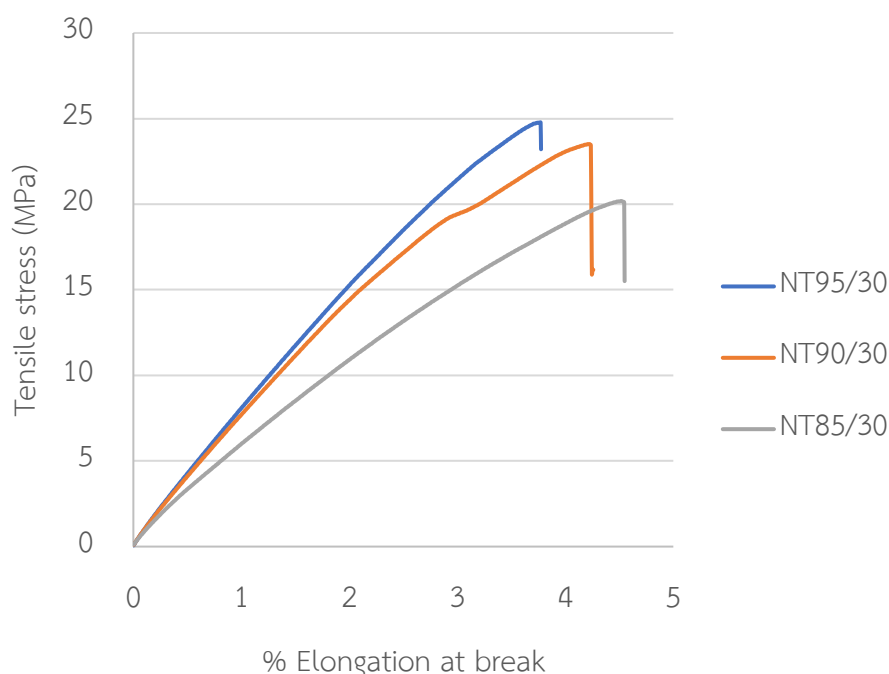
ภาพที่ 4.3 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณยาง EVA โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 25 phr จากเครื่องผสมแบบปิด



ภาพที่ 4.4 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณยาง EVA โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

4.1.4. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติก สไตร์ชที่มีสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช (TPS) ที่ผสมกับยาง Ethylene vinyl acetate ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของปริมาณแป้ง โดยเลือกปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (กลี เซอรอล) เป็น 30 phr ของแป้งแสดงดังภาพที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.1 จากภาพพบว่า จากกราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่มีการเติม Ethylene vinyl acetate ที่ปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้งแสดงถึงสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชโดยเมื่อเติม Ethylene vinyl acetate ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 10 และ 15 % wt. ตามลำดับ ผล tensile strength มีค่าลดลงจาก 24 เป็น 23 และ 19 MPa ตามลำดับ โดยการลดลงนี้มีผลเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการลดลงของ Young's modulus จากเดิม 875 เป็น 804 และ 660 MPa ตามลำดับ ส่วนค่า % Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องด้วยอิทธิพลของการเติมยาง Ethylene vinyl acetate ที่มี tensile strength และ Young's modulus ที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชอยู่มาก แต่ ethylene vinyl acetate และเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชไม่มีความเข้ากันได้ อย่างที่เติมลงไปจึง ไม่ได้ช่วยเรื่องความยืดหยุ่นหรือไม่ได้เพิ่มค่า Elongation at break อย่างเด่นชัด



ภาพที่ 4.5 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติก สไตร์ช ที่เติม Ethylene vinyl acetate ใน ปริมาณ 5 10 และ 15 phr ของแป้ง

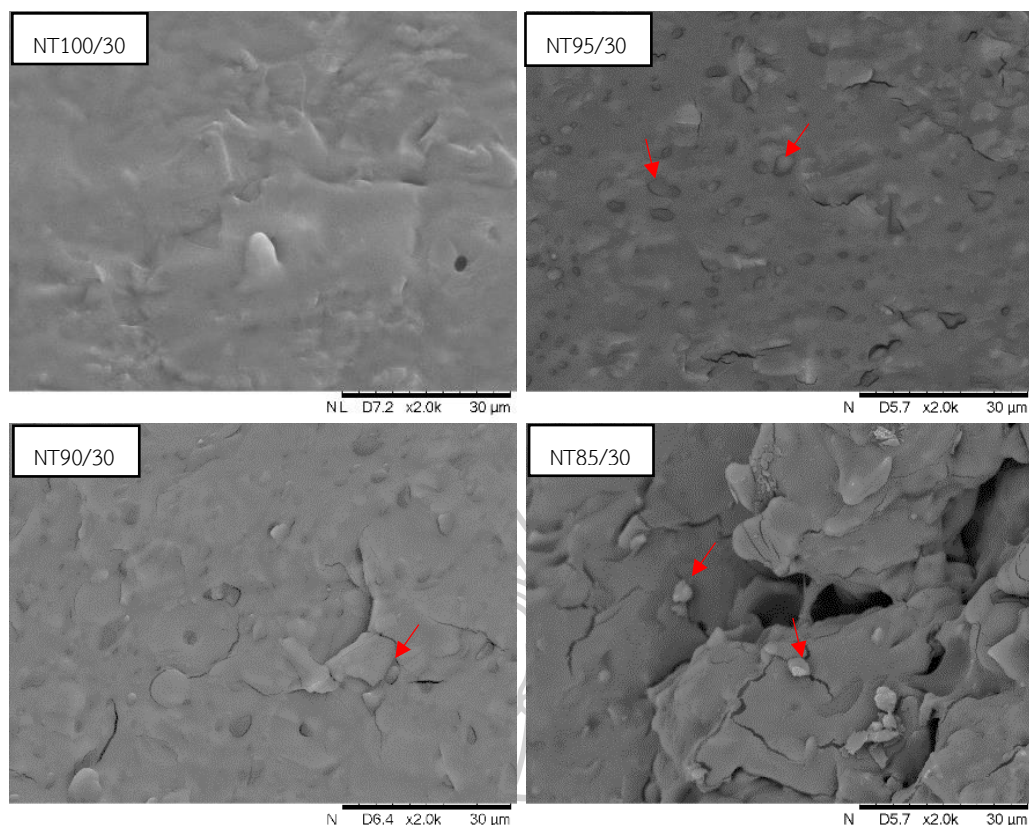
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่เติม Ethylene vinyl acetate ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้ง

Samples	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
NT95/30	24 ± 4.0	3.6 ± 0.5	875 ± 72.3
NT90/30	23 ± 3.2	3.9 ± 0.4	804 ± 34.4
NT85/30	19 ± 1.6	4.1 ± 0.3	660 ± 32.6

4.1.5. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเทคนิค SEM

การศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมยาง Ethylene vinyl acetate (EVA) ลงไปเป็นปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของปริมาณแป้ง โดยมีพลาสติกไซเซออร์เป็นกลีเซอรอล 30 phr ที่มาจากการแช่ไนโตรเจนเหลวด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า เพื่อดูสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและการกระจายตัวของยาง EVA บนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแสดงดังภาพที่ 4.6

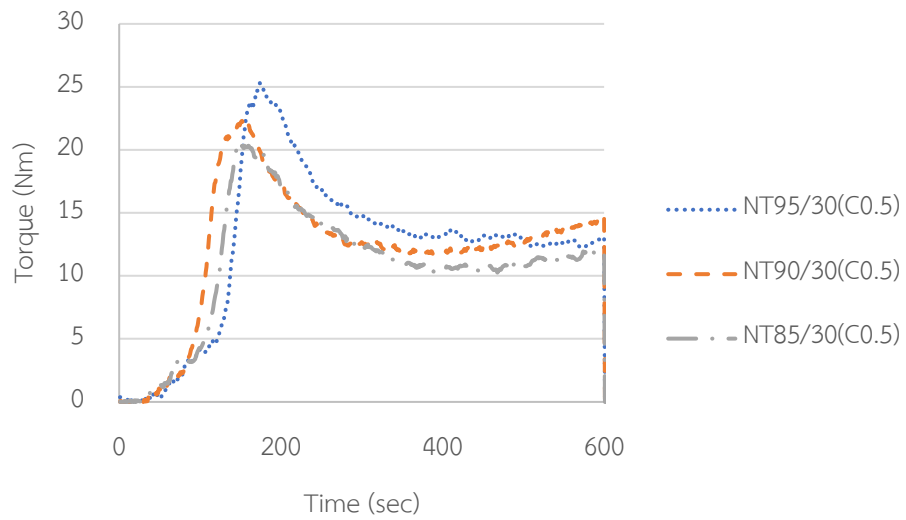
จากการผลการทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมยาง EVA ลงไป 5 % wt. ของแป้งแสดงการแตกแบบพื้นผิวเรียบโดยยาง EVA กระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอและมีรูปร่างลักษณะไม่แน่นอน โดยขนาดของยาง EVA บนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีขนาดในช่วง 3 ถึง 5 ไมโครเมตรโดยเห็นการแยกเฟสอย่างชัดเจนซึ่งแสดงถึงยาง EVA ไม่สามารถเข้ากันกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ เมื่อเติมยาง EVA ลงไปในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะยังเห็นขนาดอนุภาคของยาง EVA ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นและยังเห็นการแยกเฟสที่เด่นชัดขึ้นเมื่อปริมาณยาง EVA เพิ่มขึ้นเช่นกัน



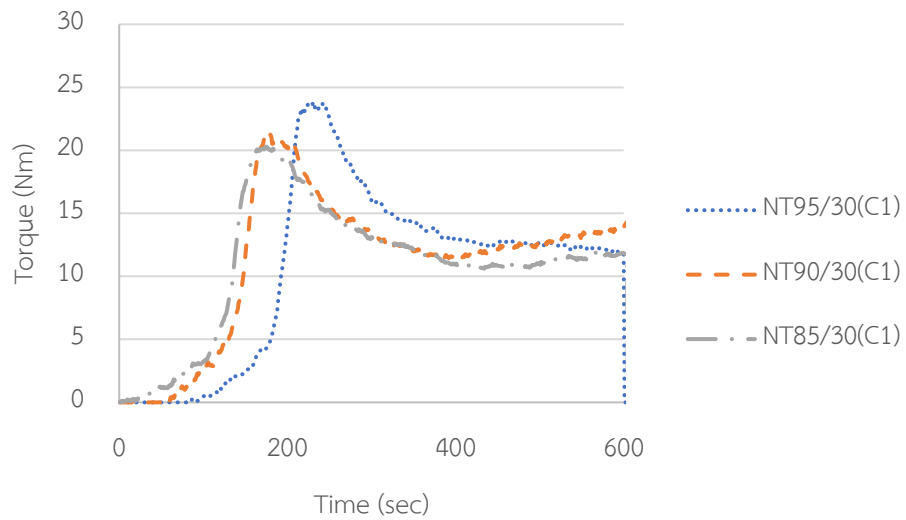
ภาพที่ 4.6 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมยาง EVA โดย ภาพ a. NT100/30 b. NT95/30 c. NT90/30 และ d. NT85/30

4.1.6. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม

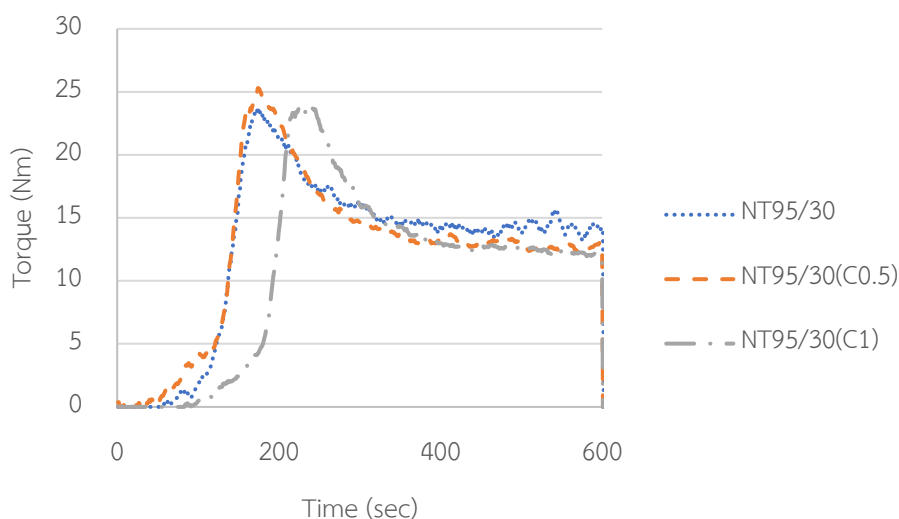
จากการศึกษาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติโดยศึกษาผลของการเติมกรดซิตริก (citric acid) (C) และ maleic anhydride (M) ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งทั้งสองทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันให้กับ TPS และ EVA จะแสดงดังภาพที่ 4.7 ภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 จากกราฟจะพบว่า เมื่อดูที่ปริมาณกลีเซอรอลที่ 30 phr ของแป้งที่ปริมาณยาง EVA 5 10 และ 15 % wt. ของแป้งที่เติมกรดซิตริกลงไปปริมาณ 0.5 และ 1 phr จะแสดงดังภาพที่ 4.7 จากกราฟเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงบิดระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปริมาณกรดซิตริกที่เท่ากันจะพบว่าค่าแรงบิดมีค่าไม่ต่างกันอย่างเป็นนัยสำคัญแต่เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณกรดซิตริกโดยให้ปริมาณยาง EVA เท่ากันจะพบว่า การเติมกรดซิตริกลงไปยังไม่เห็นความแตกต่างอย่างเด่นชัดของค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสม



ภาพที่ 4.7 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิตริก ปริมาณ 0.5 phr โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

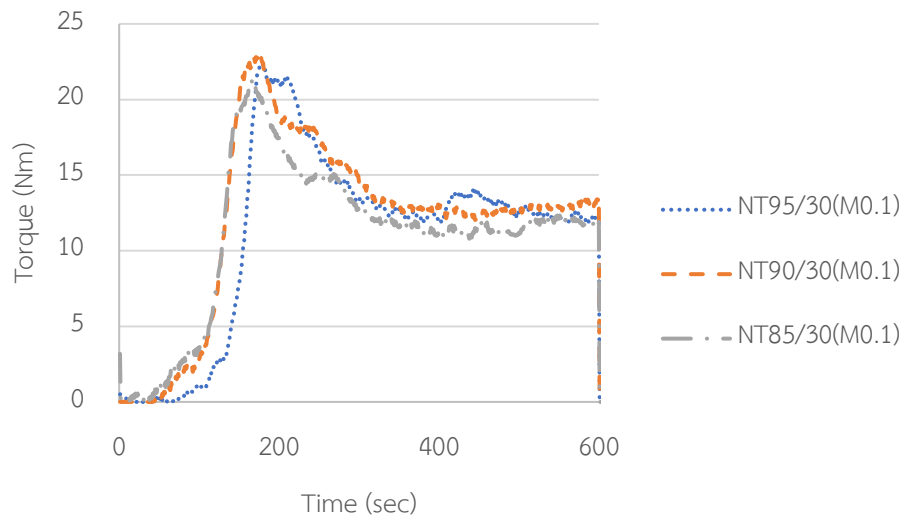


ภาพที่ 4.8 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิตริก ปริมาณ 1 phr โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

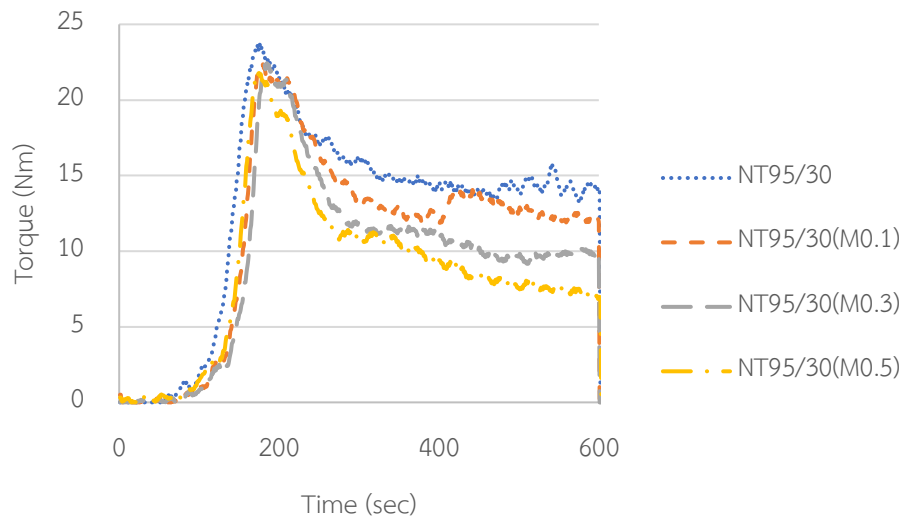


ภาพที่ 4.9 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิตริก ปริมาณต่างๆ โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

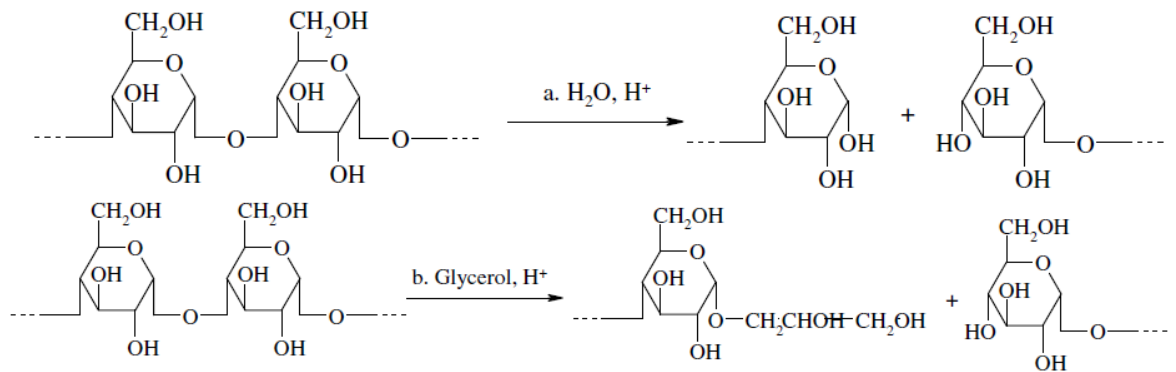
เมื่อศึกษาอิทธิพลของการเติม maleic anhydride ในปริมาณ 0.1 0.3 และ 0.5 phr ของ แป้งลงไปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปริมาณยาง EVA 5 10 และ 15 % wt. ของแป้งโดยมี พลาสติกไซเซอร์เป็นกลีเซอรอล 30 phr แสดงดังภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11 จากกราฟพบว่าค่า แรงบิดระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติม maleic anhydride ปริมาณ 0.1 phr ของแป้งโดยเปรียบเทียบที่มีปริมาณยาง EVA ที่ต่างกันไม่แสดงผลความต่างของค่าแรงบิดอย่างเด่นชัด แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม maleic anhydride ที่มีปริมาณยาง EVA เท่ากันแสดงดังภาพที่ 4.11 พบว่าค่าแรงบิดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติม maleic anhydride มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ ค่าแรงบิดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการเติม maleic anhydride และเมื่อเพิ่มปริมาณ maleic anhydride ลงไปแสดงการลดลงของค่าแรงบิดตามปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจากกราฟนี้แสดง ถึง maleic anhydride สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำและสายโซ่โมเลกุลของแป้งทำให้เกิดการตัด สายโซ่ของแป้ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าแรงบิดมีค่าลดลงแสดงดังปฏิกิริยาต่อไปนี้[36] (ภาพที่ 4.12) ซึ่งมีความเป็นไปได้ ผ่านปฏิกิริยาของกรดที่มาจาก maleic anhydride เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำหรือกลี เซอรอลซึ่งจะถูกเรียกว่าปฏิกิริยา hydrolysis และ glucosidation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างหมู่ ฟังก์ชัน hydroxymethylene ของกลีเซอรอลกับโครงสร้างของแป้งที่ตำแหน่ง ether bond ระหว่าง repeating unit ของแป้ง



ภาพที่ 4.10 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติม maleic anhydride ปริมาณ 0.1 phr โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

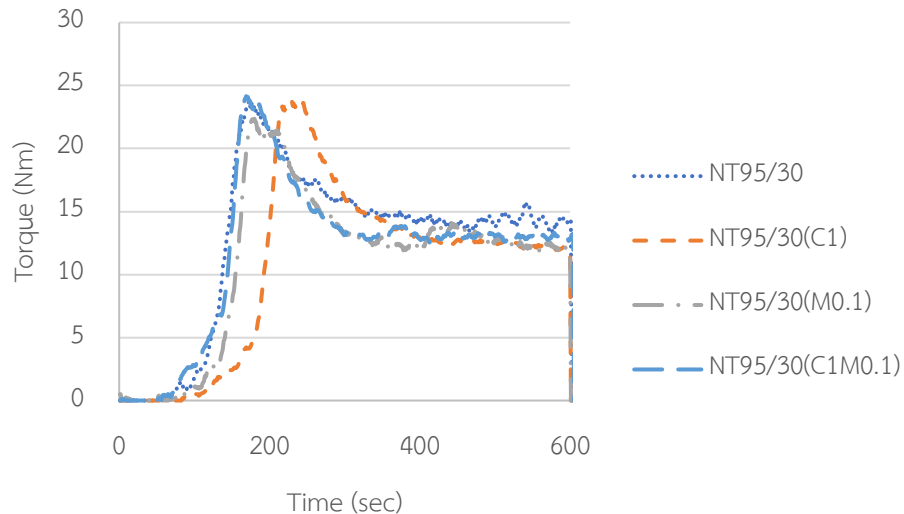


ภาพที่ 4.11 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติม maleic anhydride ปริมาณต่างๆ โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด



ภาพที่ 4.12 ปฏิกริยา hydrolysis และ glucosidation เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช[36]

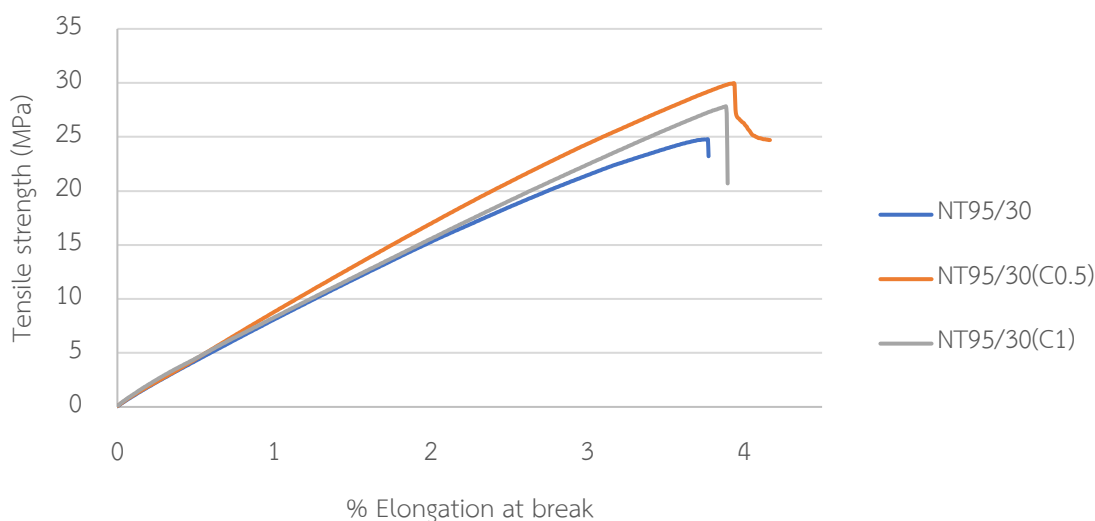
เมื่อดูอิทธิพลร่วมกันของทั้งกรดซิตริกและ maleic anhydride ที่ปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้งตามลำดับแสดงดังภาพที่ 4.13 พบว่า ค่าแรงบิดของการผสมสารทั้งสองลงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชไม่แสดงความแตกต่างมากนักเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมกรดซิตริกและ maleic anhydride อย่างเดียว



ภาพที่ 4.13 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ศึกษาผลการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

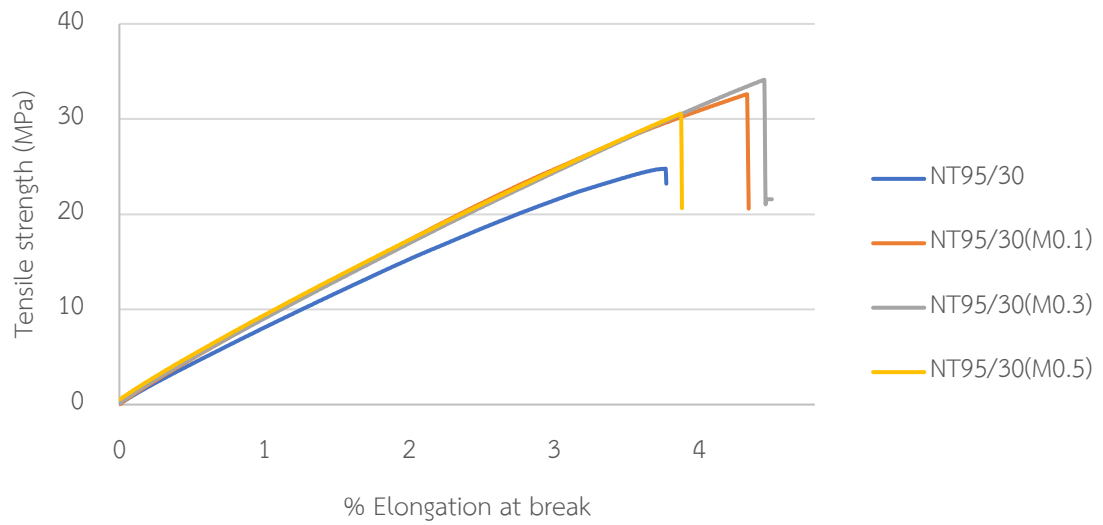
4.1.7. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ (TPS) ที่มียาง Ethylene vinyl acetate ในปริมาณต่างๆ และมีพลาสติกไซเซออร์เป็นกลีเซอรอล ปริมาณ 30 phr ของแบงก์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลแสดงดังภาพที่ 4.14 และตารางที่ 4.2 พบว่าจากกราฟ stress-strain แสดงการแตกหักแบบแข็งเปราะของเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซที่มีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ เมื่อดูผลของการเติมกรดซิตริกในปริมาณ 0.5 และ 1 phr ของแบงก์ที่มีกลีเซอรอล 30 phr และยาง EVA ในปริมาณต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อเทียบที่ปริมาณยาง EVA ที่เท่ากันแสดงผลการเติมกรดซิตริกลงไป ในเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซจะแสดงผลการเพิ่มขึ้นของค่า tensile strength ไปทางเดียวกันเล็กน้อยแต่ไม่แตกต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งต่างจาก % Elongation at break และ Young's modulus จากผล % Elongation at break เมื่อเติมกรดซิตริก ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ เมื่อเทียบที่ปริมาณยาง EVA ที่เท่ากัน จะแสดงผลการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพิ่มขึ้นปริมาณ 2 เท่าจาก % Elongation at break เดิมโดยเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดซิตริกที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.5 phr ของแบงก์เป็น 1 phr ของแบงก์พบว่าค่า % Elongation at break มีค่าที่ลดลงในบางสัดส่วนโดยมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อดูค่า Young's modulus ที่เติมกรดซิตริก ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซ จะแสดงผลการลดลงของค่า Young's modulus อย่างมาก โดยเมื่อเทียบที่ปริมาณยาง EVA เท่ากัน จะแสดงค่า Young's modulus ที่ลดลงจาก 875 MPa เป็น 550 MPa ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันในทุกปริมาณของยาง EVA แต่การเพิ่มปริมาณกรดซิตริก ลงในยาง EVA จาก 0.5 phr เป็น 1 phr จะแสดงค่า Young's modulus ที่ลดลงเล็กน้อย จากงานวิจัยของ Yu Jiu gao และคณะ[35] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกใน TPS ที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์โดยพบว่าเมื่อเติมกรดซิตริก ลงไปใน TPS ส่งผลให้ tensile strength ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมี % Elongation at break ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งอาจเนื่องจากผลการเป็นพลาสติกไซเซออร์ร่วมของกรดซิตริกและกลีเซอรอลจึงส่งผลให้ Young's modulus ลดลงเช่นกัน[17, 37] ซึ่งสอดคล้องกับที่พบในงานวิจัยนี้

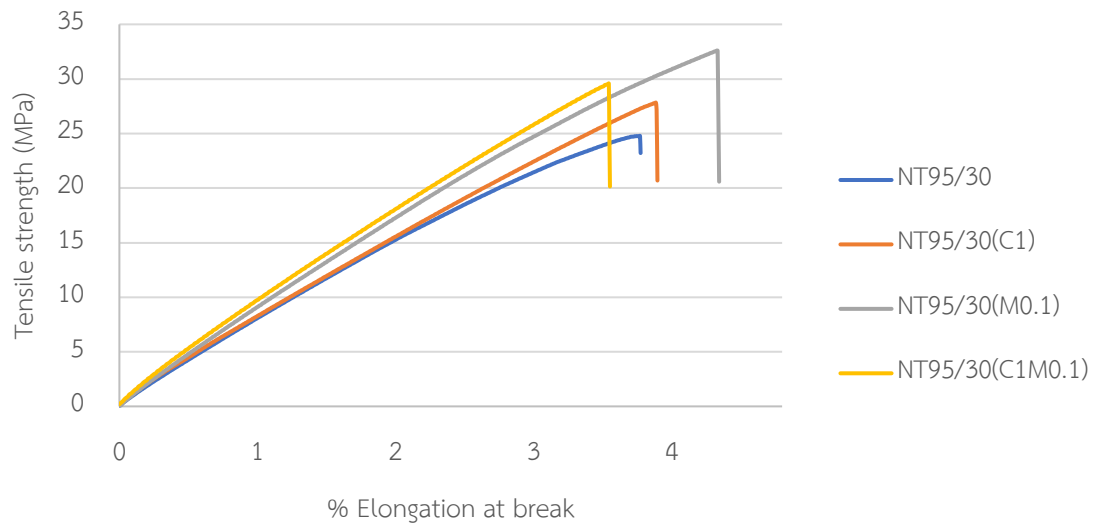


ภาพที่ 4.14 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เติมกรดซิตริกในปริมาณ 0.5 และ 1 phr ของแป้ง โดยมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง

เมื่อดูผลของการเติม maleic anhydride ที่ปริมาณ 0.1 0.3 และ 0.5 phr ของแป้งลงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีกลีเซอรอล 30 phr และยาง EVA ในปริมาณต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า เมื่อเทียบที่ปริมาณยาง EVA ที่เท่ากันที่ 5 % wt. ของแป้งแสดงการเพิ่มขึ้นของค่า tensile strength จาก 24 MPa เป็น 31 MPa แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ maleic anhydride จาก 0.1 phr เป็น 0.3 และ 0.5 phr ตามลำดับ แสดงการลดลงของค่า tensile strength ตามปริมาณ maleic anhydride ที่เพิ่มขึ้น ค่า Elongation at break แสดงการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ tensile strength เมื่อเติม maleic anhydride ลงไป โดยการเพิ่มขึ้นของค่า Elongation at break จะเห็นได้ชัดที่ปริมาณยาง EVA 15 % wt. ส่วนค่า Young's modulus แสดงความแตกต่างเมื่อเติม maleic anhydride ลงไปไม่มาก โดยเมื่อดูที่ปริมาณยาง EVA 5 % wt. ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ maleic anhydride ที่เพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของค่า tensile strength และ % Elongation at break เนื่องมาจากการเติม maleic anhydride ลงไปช่วยให้ยาง EVA และแป้งมีความเข้ากันมากขึ้นซึ่งจะแสดงในผลสัมฤทธิ์งานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่จะแสดงในส่วนต่อไป เมื่อดูอิทธิพลร่วมกันของกรดซิตริก และ maleic anhydride โดยให้กรดซิตริกมีปริมาณ 1 phr ของแป้งและมี maleic anhydride ปริมาณ 0.1 phr ของแป้งโดยมีปริมาณ กลีเซอรอล 30 phr ของแป้งจะแสดงในภาพที่ 4.16 จากผลสมบัติเชิงกลแสดงอิทธิพลร่วมกันของทั้งสองคือการเพิ่มขึ้นของ tensile strength และ Young's modulus



ภาพที่ 4.15 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เติม maleic anhydride ในปริมาณ 0.1 0.3 และ 0.5 phr ของแป้ง โดยมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง



ภาพที่ 4.16 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เติมกรดซิตรีกและ maleic anhydride โดยมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง

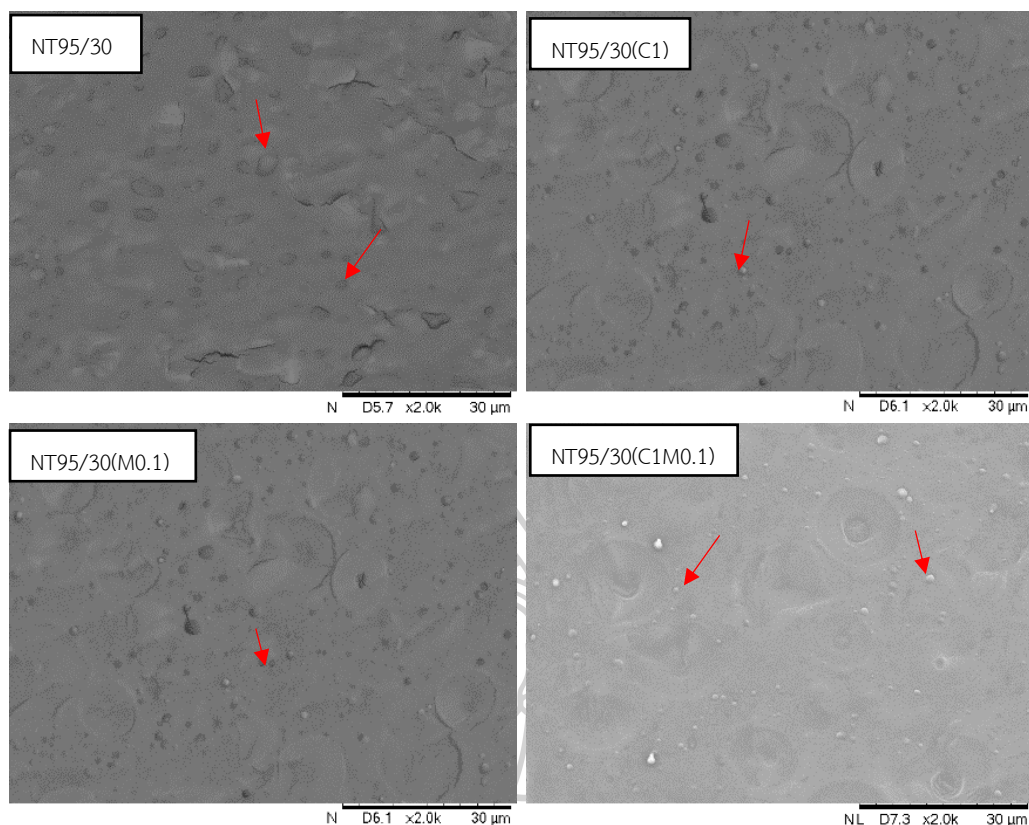
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติที่มีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ

Sample	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
NT95/30	24 ± 4.0	3.6 ± 0.5	875 ± 72.3
NT90/30	23 ± 3.2	3.9 ± 0.4	804 ± 34.4
NT85/30	19 ± 1.6	4.1 ± 0.3	660 ± 32.6
NT95/30(C0.5)	26 ± 2.6	6.5 ± 0.9	551 ± 28.2
NT90/30(C0.5)	23 ± 1.2	6.7 ± 1.1	535 ± 23.1
NT85/30(C0.5)	21 ± 1.5	6.1 ± 0.8	520 ± 14.2
NT95/30(C1)	26 ± 2.1	5.2 ± 0.4	604 ± 24.7
NT90/30(C1)	25 ± 1.7	5.8 ± 0.5	551 ± 12.9
NT85/30(C1)	20 ± 2.6	6.5 ± 0.6	487 ± 20.3
NT95/30(M0.1)	31 ± 3.6	4.2 ± 0.4	914 ± 36.8
NT90/30(M0.1)	29 ± 1.9	5.0 ± 0.3	712 ± 38.2
NT85/30(M0.1)	25 ± 2.3	4.8 ± 0.4	648 ± 33.8
NT95/30(M0.3)	29 ± 5.1	3.9 ± 0.6	903 ± 57.3
NT90/30(M0.3)	26 ± 2.6	4.7 ± 0.3	707 ± 34.6
NT85/30(M0.3)	20 ± 2.0	5.9 ± 0.5	493 ± 48.3
NT95/30(M0.5)	28 ± 3.2	3.5 ± 0.5	971 ± 44.6
NT90/30(M0.5)	26 ± 3.0	4.2 ± 0.4	767 ± 13.5
NT85/30(M0.5)	19 ± 2.5	5.7 ± 0.4	497 ± 47.6
NT95/30(C1M0.1)	29 ± 2.3	3.6 ± 0.4	942 ± 36.9
NT90/30(C1M0.1)	29 ± 2.0	5.2 ± 0.4	733 ± 147.6
NT85/30(C1M0.1)	21 ± 1.7	4.6 ± 0.3	646 ± 22.9

4.1.8. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเทคนิค SEM

การศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ลงไปในปริมาณ 1 phr และ 0.1 phr ตามลำดับ โดยเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมียาง Ethylene vinyl acetate (EVA) ลงไปเป็นปริมาณ 5 % wt. ของปริมาณแป้งและมีพลาสติกไซเซออร์เป็นกลีเซอรอล 30 phr ที่มาจากการแช่ไนโตรเจนเหลวด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 ภาพที่ 4.17 แสดงภาพสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมยาง EVA ลง 5 % wt. ของแป้งพบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคยางแบบไม่สม่ำเสมอโดยมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีขนาดเฉลี่ยในช่วง 6-10 ไมโครเมตรแต่เมื่อเติมกรดซิตริกปริมาณ 1 phr ของแป้งพบว่า อนุภาคของยาง EVA มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นและขนาดอนุภาคของยาง EVA มีขนาดเล็กลงอยู่ในช่วง 1 ไมโครเมตร ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับการเติม maleic anhydride ปริมาณ 0.1 phr ของแป้ง และเมื่อเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้งตามลำดับ แสดงการกระจายตัวของอนุภาคที่ละเอียดและมีอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอนุภาคที่สองที่ดีขึ้นซึ่งแสดงถึงการเติมกรดซิตริก และ maleic anhydride ช่วยในการเพิ่มความเข้ากันของอนุภาคทั้งสองได้เพิ่มขึ้น





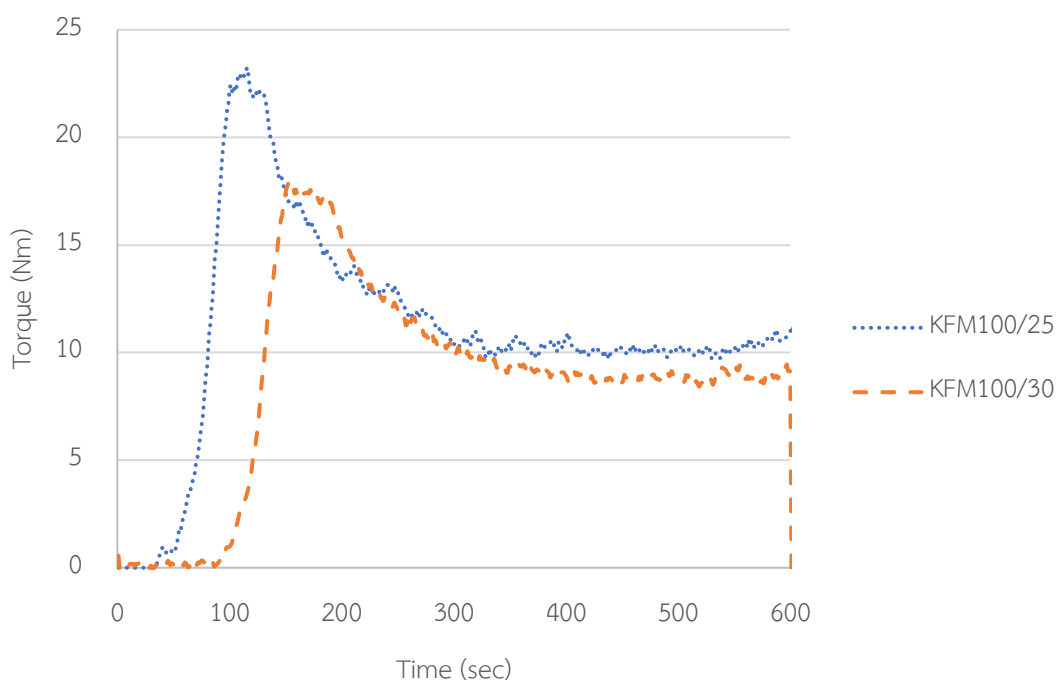
ภาพที่ 4.17 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมยาง EVA 5 % wt. ของแป้งโดยเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้งตามลำดับ

4.2. ผลการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (Etherified starch: Kreation FM: KFM)

การศึกษากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง Kreation FM ของบริษัท สยามมอดิฟายด์ สตาร์ช ที่ยังไม่ผ่านการอบหรือคือแป้งมันสำปะหลังนี้มีความชื้นตั้งต้นที่ 10-12 % และมี degree of substitution เท่ากับ 0.1 โดยใช้พลาสติกไซเซอร์คือ กลีเซอรอลที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งที่ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเช่นกัน รวมถึงการเติมสารเติมแต่งอื่นๆลงไปเช่น กรดซิตริกและ maleic anhydride เป็นต้น โดยผลที่ได้จะดูจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมแบบปิดและทำการศึกษาผลสมบัติการไหล สมบัติเชิงกลและสมบัติสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้

4.2.1. ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง

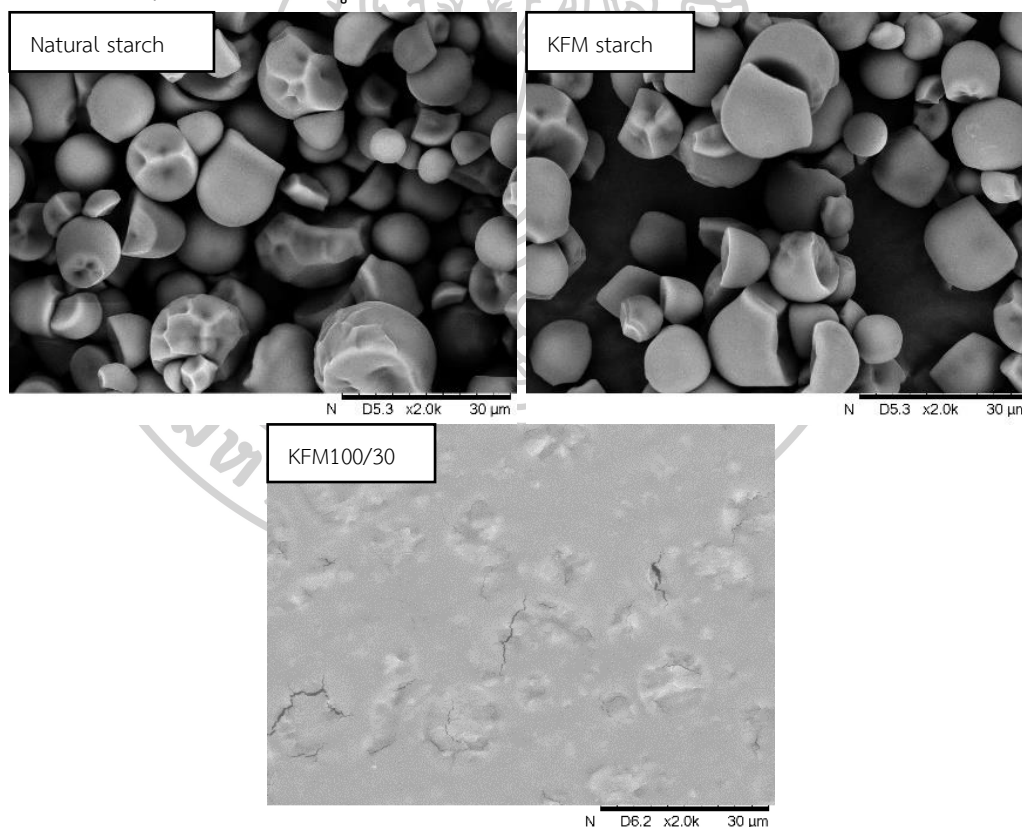
จากการศึกษาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (etherified starch: Kreation FM ; KFM) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลาสติกไซเซออร์หรือ กลีเซอรอล (glycerol) โดยศึกษาจากค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นของเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ระหว่างกระบวนการเตรียมแสดงดังภาพที่ 4.18 จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ 25 phr ของแป้ง KFM แสดงการไหลที่มีความเสถียรซึ่งแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ อีกทั้งการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจาก 25 phr เป็น 30 phr ของแป้งยังแสดงการลดลงของค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลาสติกไซเซออร์ส่งผลให้ลดความหนืดในระบบ อาจเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยของแป้ง KFM ที่ทำให้ปริมาณพลาสติกไซเซออร์หรือ กลีเซอรอลที่ต้องใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซนั้นน้อยลง จึงสามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ได้โดยใช้ปริมาณกลีเซอรอลที่น้อยลงได้



ภาพที่ 4.18 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณกลีเซอรอลจากเครื่องผสมแบบปิด

4.2.2. ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ ด้วยเทคนิค SEM

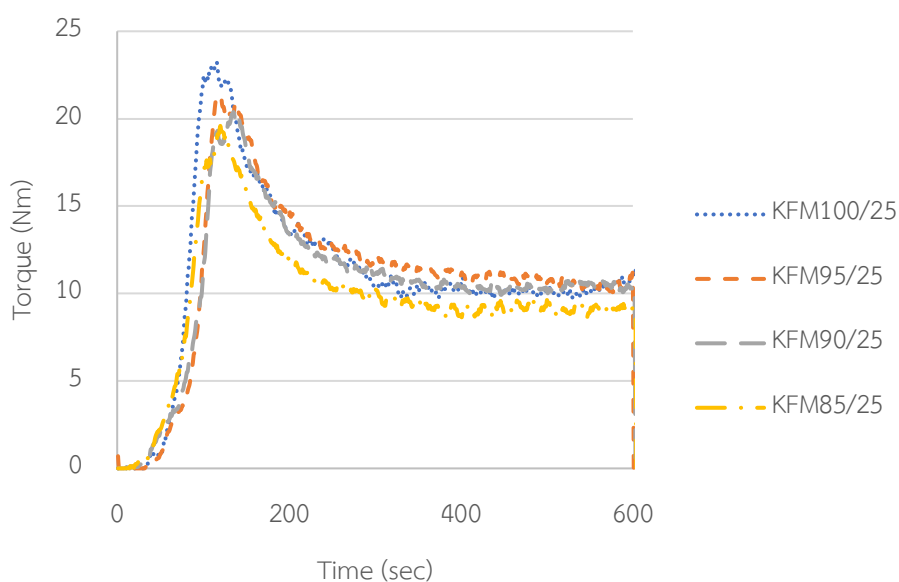
จากภาพสัณฐานวิทยาของอนุภาคแป้งก่อนผ่านกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ช แสดงดังภาพที่ 4.19 จะพบว่าขนาดอนุภาคแป้งเฉลี่ยอยู่ที่ 5 ถึง 15 ไมโครเมตรโดยมีรูปร่างไม่แน่นอน มีทั้งทรงกลมและเป็นเหลี่ยมมุมซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปลงมาเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกสตา์ชด้วยการเติมกลีเซอรอล 30 phr พบว่า อนุภาคแป้งหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันทั้งชิ้นงานและมีผิวแตกหักแบบเรียบ อีกทั้งพบร่องรอยอนุภาคแป้งบางส่วนที่หลอมรวมไม่ดีโดยส่วนที่หลอมไม่ดีมีขนาดเดียวกันกับอนุภาคแป้งก่อนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากภาพแสดงถึงมีอนุภาคแป้งเปลี่ยนเป็นเทอร์โมพลาสติกสตา์ชได้ทั้งหมดโดยมีส่วนที่เป็นกลีเซอรอลมาก (glycerol rich phase) และส่วนที่มีกลีเซอรอลน้อย (glycerol lean phase) ปนกันอยู่



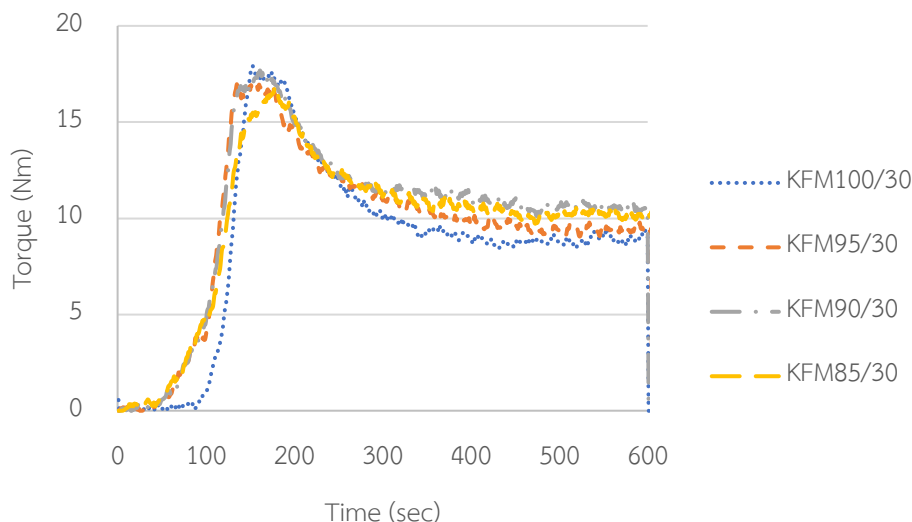
ภาพที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง (บนซ้าย) แป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) (บนขวา) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ปริมาณกลีเซอรอล 30 phr (KFM100/30) (ล่าง)

4.2.3. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติก สไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปลงที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม

จากการศึกษาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปลง (KFM) โดยศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate (EVA) ให้ปริมาณพลาสติกไซเซอรอล (กลีเซอรอล) ที่ 25 และ 30 phr ของแป้งซึ่งส่งผลต่อค่าแรงบิดดังแสดงในภาพที่ 4.20 และภาพที่ 4.21 จากกราฟจะเห็นว่าที่ปริมาณกลีเซอรอล 25 phr ของแป้ง KFM แสดงค่าแรงบิดที่สม่ำเสมอไม่เหมือนแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติที่ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นตามเวลาซึ่งไม่เสถียรต่อกระบวนการผสม เมื่อเติมยาง EVA ลงไปในปริมาณต่างๆ จะพบว่าค่าแรงบิดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากอย่างมีนัยสำคัญซึ่งจะเป็นผลแบบเดียวกับเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่มาจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ



ภาพที่ 4.20 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปลง (KFM) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณยาง EVA โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 25 phr จากเครื่องผสมแบบปิด



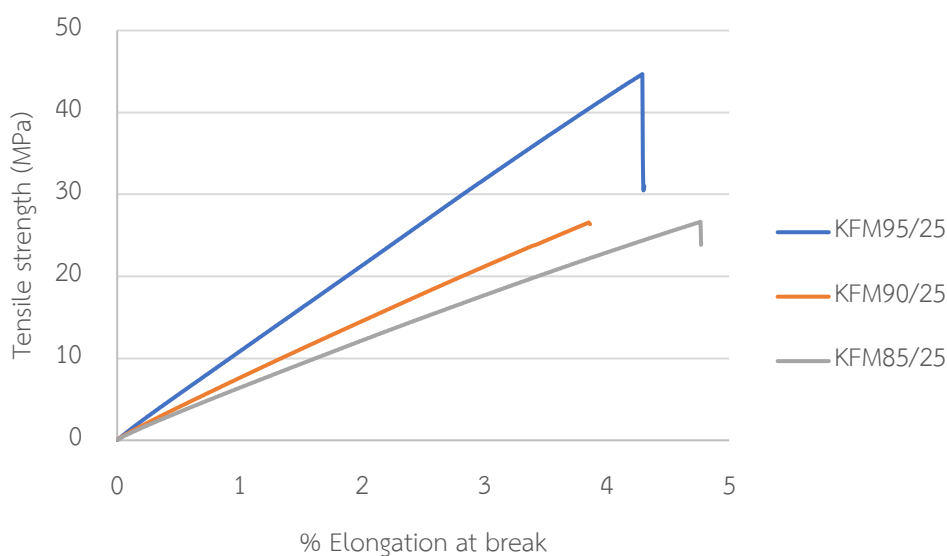
ภาพที่ 4.21 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณยาง EVA โดยมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

4.2.4. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

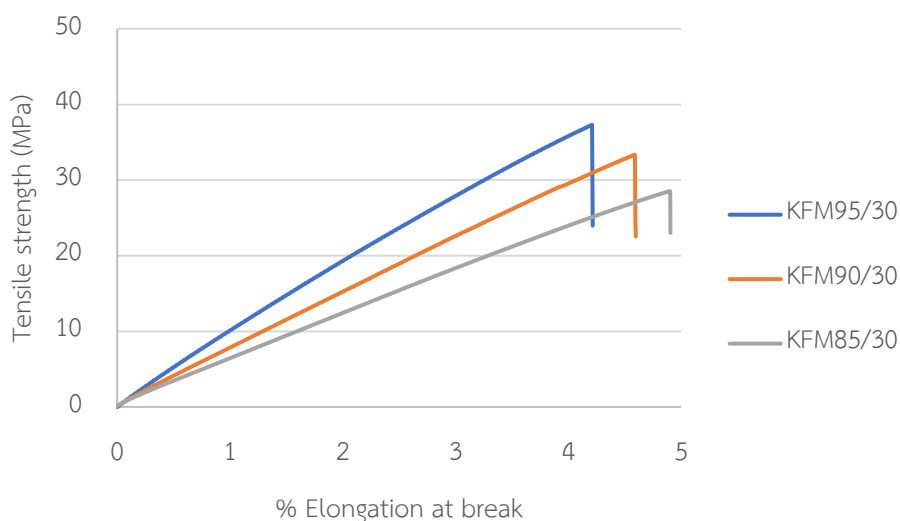
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่ผสมกับยาง Ethylene vinyl acetate ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของปริมาณแป้ง โดยเลือกปริมาณพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) เป็น 25 และ 30 phr ของแป้งแสดงดังภาพที่ 4.22 และภาพที่ 4.23 รวมถึงตารางที่ 4.3 จากภาพพบว่ากราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มาจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติม Ethylene vinyl acetate ที่ปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้งแสดงถึงสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มาจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

เมื่อเปรียบเทียบผลการเติมยาง EVA ลงในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้งที่ปริมาณกลีเซอรอล 25 และ 30 phr พบว่าค่า tensile strength และ Young's modulus มีค่าลดลงตามปริมาณยาง EVA ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ค่า % Elongation at break มีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลที่เกิดขึ้นอาจเนื่องด้วยอิทธิพลของการเติมยาง Ethylene vinyl acetate ที่มี tensile strength และ Young's modulus ที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชอยู่มาก แต่ ethylene vinyl acetate และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ไม่มีความเข้ากันได้ ยางที่เติมลงไปจึงไม่ได้ช่วยเรื่องความ

ยืดหยุ่นหรือไม่ได้เพิ่มค่า Elongation at break เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มาจากแป้งมันปะหลังธรรมชาติ แต่เมื่อเปรียบเทียบผลสมบัติเชิงกลกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มาจากแป้งมันปะหลังธรรมชาติพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มาจากแป้งมันปะหลังธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลด้าน tensile strength ที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งมันปะหลังดัดแปลง อาจเนื่องจากแป้งมันปะหลังดัดแปลงมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่าจึงส่งผลให้สามารถขึ้นรูปได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มาจากแป้งมันปะหลังธรรมชาติ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งมันปะหลังดัดแปลงดีกว่า



ภาพที่ 4.22 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งมันปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีกลีเซอรอล 25 phr และมียาง EVA ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้ง



ภาพที่ 4.23 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีกลีเซอรอล 30 phr และมียาง EVA ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้ง

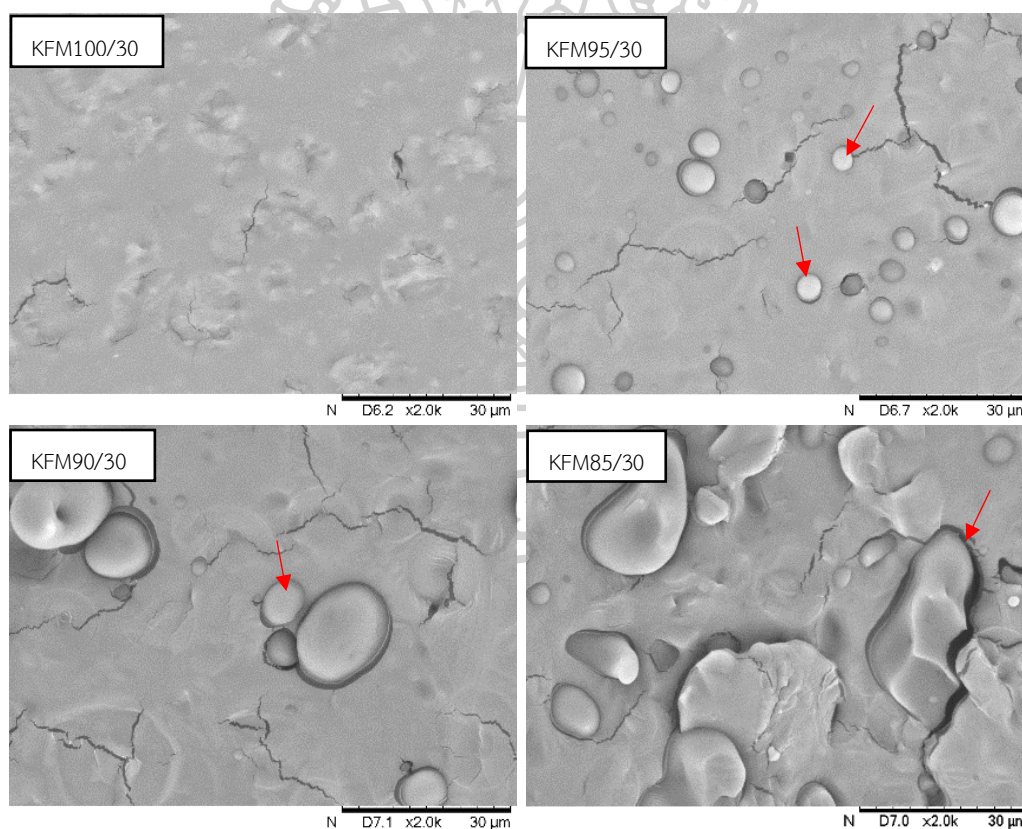
ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติมยาง EVA ในปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของแป้ง

Sample	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
KFM95/25	37 ± 5.5	3.9 ± 0.7	1032 ± 72.3
KFM90/25	32 ± 5.2	4.2 ± 0.7	821 ± 62.9
KFM85/25	29 ± 4.7	3.1 ± 0.6	689 ± 59.2
KFM95/30	34 ± 1.4	4.4 ± 0.2	886 ± 36.2
KFM90/30	31 ± 1.6	4.3 ± 0.2	837 ± 39.2
KFM85/30	28 ± 1.5	4.4 ± 0.3	735 ± 37.6

4.2.5. การศึกษาผลของการผสมยาง Ethylene vinyl acetate ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีสมบัติสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

การศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มาจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) เติมยาง Ethylene vinyl acetate (EVA) ลงไปเป็นปริมาณ 5 10 และ 15 % wt. ของ

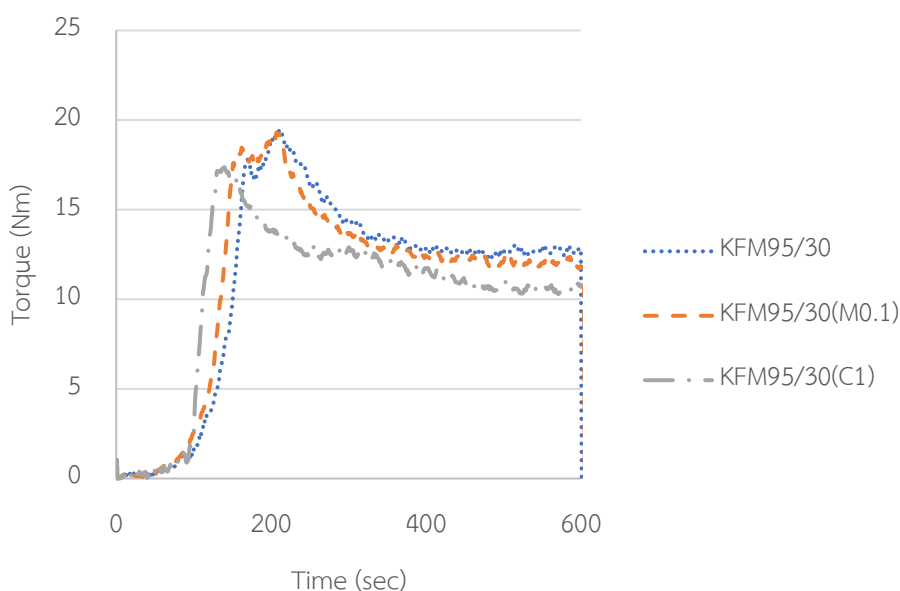
ปริมาณแป้ง โดยมีพลาสติกไซเซอร์เป็นกลีเซอรอล 30 phr ที่มาจากการแช่ไนโตรเจนเหลวด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่าโดยก่อนทดสอบจะทำการเคลือบทอง/พาราเดียมก่อนทดสอบ เพื่อดูสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและการกระจายตัวของยาง EVA บนเทอร์โมพลาสติกสตา์ชแสดงดังภาพที่ 4.24 จากผลการทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมยาง EVA ลงไป 5 % wt. ของแป้งแสดงการแตกแบบพื้นผิวเรียบเช่นเดิมโดยมีขนาดอนุภาคของยาง EVA อยู่ในช่วง 3 ถึง 10 ไมโครเมตรโดยมีลักษณะทรงกลมและพบว่าอนุภาคยาง EVA มีการแยกเฟสอย่างชัดเจนกับแป้งซึ่งแสดงถึงแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ไม่เข้ากันกับยาง EVA เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มปริมาณยาง EVA จาก 5 เป็น 10 และ 15 % wt. ตามลำดับ พบว่าขนาดอนุภาคของยาง EVA มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีขนาดไม่แน่นอนอยู่ในช่วง 10 ถึง 15 ไมโครเมตรที่ปริมาณยาง EVA 10 % wt. และลักษณะของอนุภาคแป้งมีรูปร่างไม่แน่นอนเมื่อเพิ่มยาง EVA เป็น 15 % wt. ของแป้ง



ภาพที่ 4.24 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เติมยาง EVA โดยภาพ a. KFM100/30 b. KFM95/30 c. KFM90/30 และ d. KFM85/30

4.2.6. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม

จากการศึกษาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (Kreation FM: KFM) โดยศึกษาผลของการเติมกรดซิตริก (citric acid) (C) และ maleic anhydride (M) ที่ปริมาณต่างๆ จะแสดงดังภาพที่ 4.25 พบว่า ค่าแรงบิดเมื่อมีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride มีค่าลดลงอย่างเด่นชัด โดยการลดลงของค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการตัดสายโซ่ของแป้งที่เกิดจากกรดซิตริกและ maleic anhydride เช่นเดียวกับการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

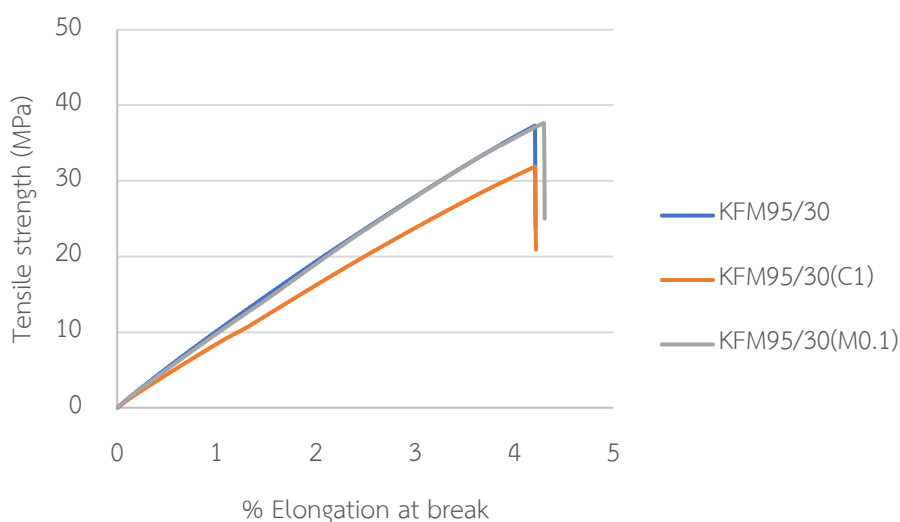


ภาพที่ 4.25 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่เติมกรดซิตริกและ maleic anhydride โดยมียาง EVA ที่ 5 % wt. และมีปริมาณกลีเซอรอล 30 phr จากเครื่องผสมแบบปิด

4.2.7. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) โดยศึกษาผลของการเติมกรดซิตริก (C) และ maleic anhydride (M) ที่ปริมาณต่างๆ จะแสดงดังภาพที่ 4.26 และตารางที่ 4.4 จากกราฟ stress-strain แสดงสมบัติเชิงประาของเทอร์โมพลาสติก

สตาร์ช (KFM) ที่เติมกรดซิตริกและ maleic anhydride 1 และ 0.1 phr ของแป้ง การเติมกรดซิตริก กลงไปปริมาณ 1 phr ของแป้งส่งผลให้ค่า tensile strength และ Young's modulus มีค่าลดลง แต่มี % Elongation at break เพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกับการเติมกรดซิตริกในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติไม่ดัดแปลง แต่การเติม maleic anhydride ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมไม่เปลี่ยนแปลง แต่การไหลตีซึ่งอาจเนื่องจากการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของแป้งลดลง ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีการลดลงเล็กน้อย



ภาพที่ 4.26 กราฟ stress-strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีกลีเซอรอล 30 phr และมียาง EVA ในปริมาณ 5 % wt. ของแป้ง โดยมีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้ง

ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ

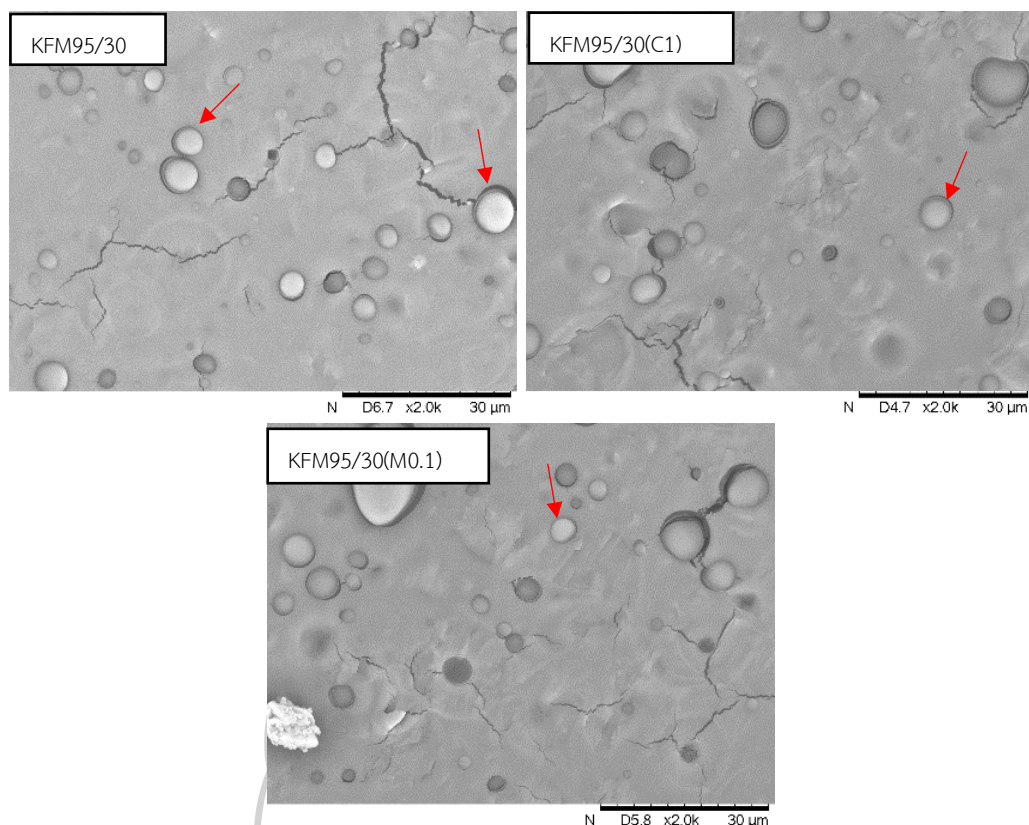
Sample	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
KFM95/30	34 ± 1.4	4.4 ± 0.2	886 ± 36.2
KFM90/30	31 ± 1.6	4.3 ± 0.2	837 ± 39.2
KFM85/30	28 ± 1.5	4.4 ± 0.3	735 ± 37.6
KFM95/30(C1)	28 ± 3.6	3.5 ± 0.5	911 ± 66.5
KFM90/30(C1)	33 ± 3.9	5.3 ± 1.2	776 ± 81.5
KFM85/30(C1)	28 ± 2.7	5.8 ± 0.6	655 ± 32.1

ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ

Sample	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
KFM95/30(M0.1)	33 ± 3.7	3.8 ± 0.5	976 ± 30.7
KFM90/30(M0.1)	34 ± 1.6	4.6 ± 0.3	844 ± 25.1
KFM85/30(M0.1)	24 ± 4.0	3.7 ± 0.6	759 ± 36.2

4.2.8. การศึกษาผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีต่อสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

การศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มาจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) เติมยาง Ethylene vinyl acetate (EVA) ลงไปเป็นปริมาณ 5 % wt. ของปริมาณแป้ง โดยมีพลาสติกไซเซอร์เป็นกลีเซอรอล 30 phr ที่มาจากการแช่ในไตรเจนเหลวด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ภาพที่ 4.27 พบว่าการผลการทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า จากผลการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ลงไปไม่ส่งผลความแตกต่างอย่างเด่นชัดของขนาดอนุภาคยาง EVA และรูปร่างของอนุภาคยาง EVA รวมถึง interaction ระหว่างสองวัสดุภาคนี้



ภาพที่ 4.27 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ที่มีการเติมยาง EVA 5 % wt. ของแป้ง โดยเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในปริมาณ 1 และ 0.1 phr ของแป้งตามลำดับ

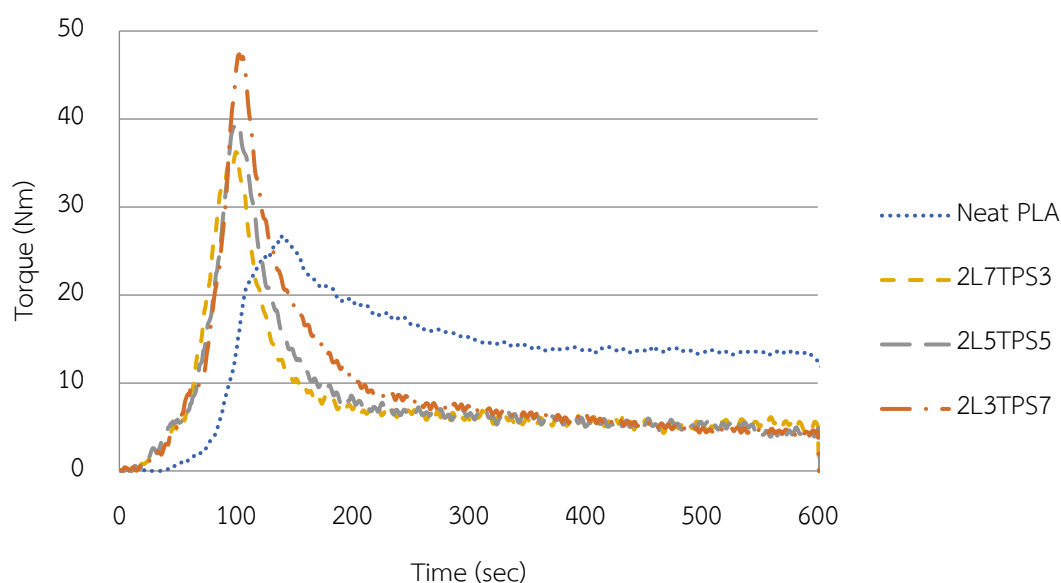
4.3. ผลของการเบลนด์พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ two-step process

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการเบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid ; PLA) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (Thermoplastic starch ; TPS) โดยศึกษาผลของสัดส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในปริมาณต่างๆ ที่เบลนด์กับพอลิแลคติกแอซิดและผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ เปอร์ออกไซด์ (peroxide) และ Multifunctional epoxide (Joncryl) ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยาและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยการเบลนด์นี้จะเบลนด์ในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ซึ่งเริ่มจากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติที่ผสมกับกลีเซอรอล 30 phr ยาง EVA 5 % wt. ของแป้งและ

สารเติมแต่งกรดซิติริกและ maleic anhydride 1 และ 0.1 phr ของแป้งตามลำดับ แล้วจึงนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซไปอบแล้วจึงนำมาผสมกับพอลิแลคติกแอซิดในเครื่องผสมแบบปิดอีกครั้งแล้วจึงนำมาพิสูจน์เอกลักษณ์ต่อไปโดยวิธีการนี้เรียกว่า two-step process โดย two-step process คือ การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์โดยเริ่มจากเตรียม TPS ก่อนจนได้เม็ดของ TPS แล้วจึงนำเม็ด TPS มาอบแล้วจึงเบลนด์กับ PLA ที่หลัง

4.3.1. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมแบบ two-step process

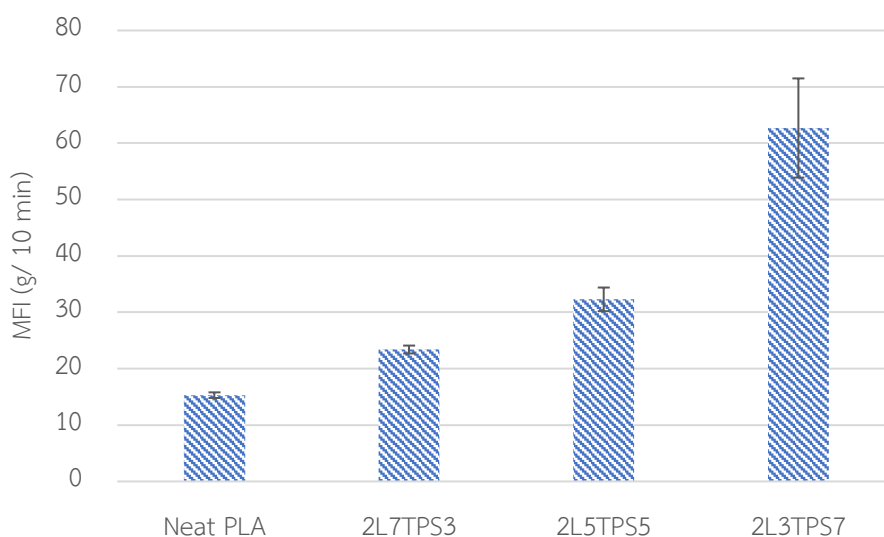
ผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมแสดงดังภาพที่ 4.28 จากกราฟพบว่า ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเบลนด์เมื่อผสม TPS เป็นสัดส่วน 30 %wt. ลงไปทำให้ค่าแรงบิดมีค่าลดลงอย่างมากแสดงถึงที่อุณหภูมิผสม 190 องศาเซลเซียสความหนืดของ TPS มีค่าน้อยกว่าของ PLA มาก แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ TPS จาก 30 % wt. เป็น 50 และ 70 % wt. ของ TPS ค่าแรงบิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TPS



ภาพที่ 4.28 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนด์ระหว่างพอลิแลคติก แอซิดกับ TPS จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติในสัดส่วน 30 50 และ 70 %wt. ของ TPS

4.3.2. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ (TPS) แบบ two-step process ที่มีต่อค่าดัชนีการไหล Melt flow index (MFI)

จากการศึกษาค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิแลคติกแอซิดเบลนด์กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ แบบ two-step process แสดงดังภาพที่ 4.29 และ ตารางที่ 4.5 จากผลพบว่า ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม TPS มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่มีการผสมเนื่องจากความหนืดของ TPS มีค่าน้อยกว่า PLA จึงทำให้ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณของ TPS ขึ้นจาก 30 % wt. เป็น 50 และ 70 % wt. ส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงบิดระหว่างการเบลนด์ในเครื่องผสมแบบปิด



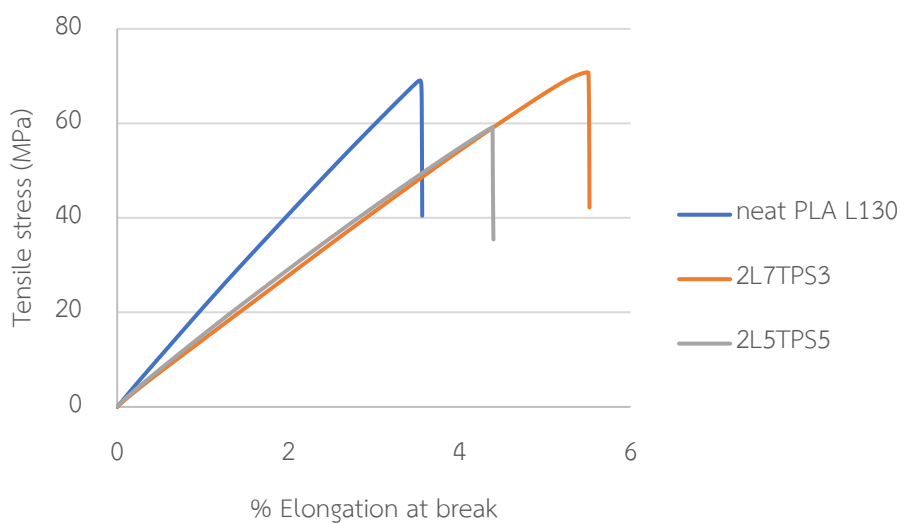
ภาพที่ 4.29 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วนต่างๆ

Samples	MFI (g/ 10 min)
Neat PLA L130	15.3 ± 0.5
2L7TPS3	23.4 ± 0.7
2L5TPS5	32.3 ± 2.1
2L3TPS7	62.7 ± 8.8

4.3.3. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) แบบ two-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) โดยการผสมแบบ two-step process ในเครื่องผสมแบบปิด ในสัดส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ 70 % wt. ของ TPS ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการอัดด้วยแม่พิมพ์ (compression molding) เนื่องจากชิ้นงานที่ได้มีสมบัติแตกเปราะมาก ดังนั้นสมบัติเชิงกลของสูตรที่สามารถขึ้นรูปได้จะมีแสดงดังภาพที่ 4.30 จากกราฟ stress-strain แสดงสมบัติเชิงประของ PLA รวมถึงพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองสัดส่วน จากกราฟแผนภูมิแสดงค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่า เมื่อดูสัดส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ 30 % wt. ของ TPS แสดงการเพิ่มขึ้นของ Elongation at break จากเดิม 3.6 % เป็น 5.7 % อีกทั้งค่า tensile strength มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผสมใน PLA/TPS แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนเป็น 50 % wt. ของ TPS แสดงการลดลงของ tensile strength และ % Elongation at break อาจเนื่องจากปริมาณสัดส่วน TPS มีมากเกินไป ในส่วนค่า Young's modulus พบว่าเมื่อดูพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วน 30 และ 50 % wt. ของ TPS แสดงการลดลงของค่า Young's modulus จาก 2.1 GPa เป็น 1.4 GPa สอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Reza, A. Moghaddam และคณะ[38] ทำการศึกษาผลของการผสม PLA/TPS ที่สัดส่วน 70/30 w/w พบว่าค่า tensile strength ของ PLA/TPS ลดลงจาก 26.6 MPa เป็น 10.2 MPa เมื่อเบลนด์ TPS ลงไปใน PLA สัดส่วน 30 wt.% และค่า Young's modulus ลดลงจาก 814 เหลือ 331 MPa เช่นกันซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของ PLA/TPS และงานวิจัยของ M.A. Huneault และ H. Li แสดงการลดลงของ tensile strength และ tensile modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/TPS เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ TPS ที่มากขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ผล tensile strength มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด อาจเนื่องจากการที่ TPS มี maleic anhydride อยู่ส่งผลให้เพิ่มความเข้ากันได้บางส่วนจึงส่งผลให้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ได้



ภาพที่ 4.30 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติก แอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาเรชแบบ two-step process

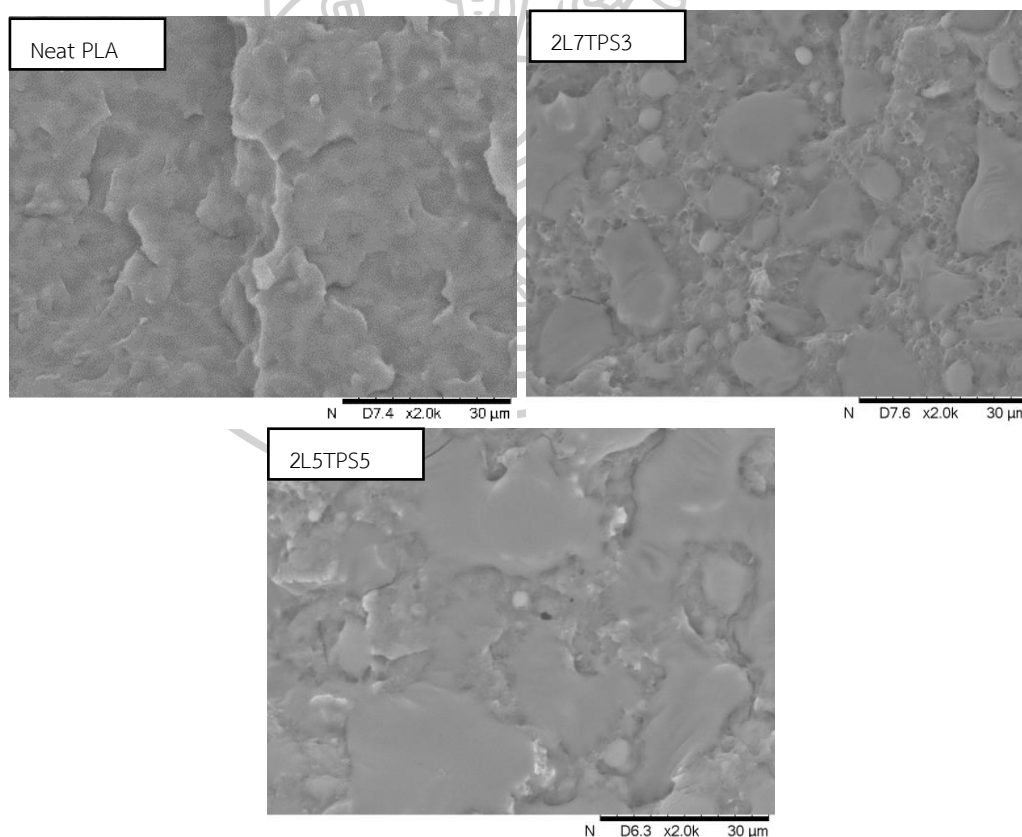
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วนต่างๆ

Sample	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
Neat PLA L130	68 ± 7.1	3.6 ± 0.3	2,142 ± 42.0
2L7NT3	70 ± 3.9	5.7 ± 0.5	1,424 ± 89.6
2L5NT5	56 ± 4.3	4.4 ± 0.3	1,433 ± 87.3

4.3.4. การศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) แบบ two-step process ที่มีต่อสัญญาณวิทยา

การศึกษาสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) ในสัดส่วนต่างๆ ขึ้นงานมาจากการแช่ไนโตรเจนเหลวแล้วทดสอบด้วยเทคนิค

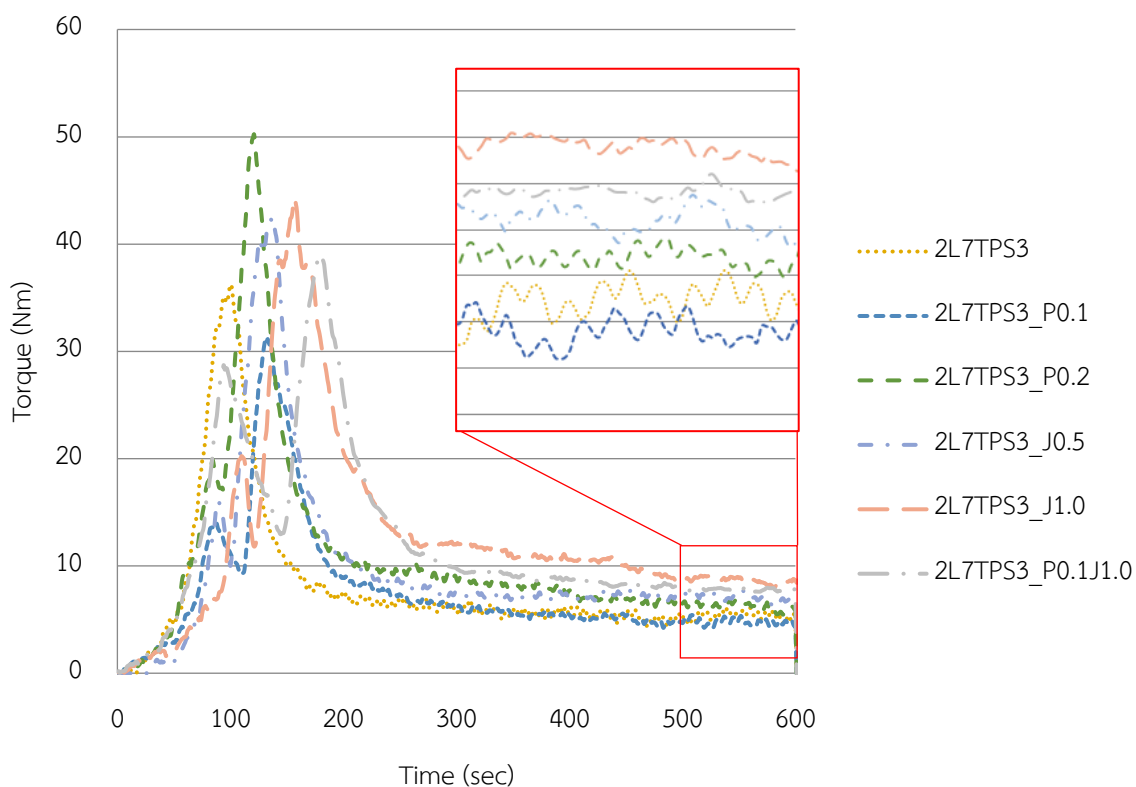
Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่าโดยก่อนทดสอบจะทำการเคลือบทอง/พาราเดียมก่อนทดสอบ เพื่อดูสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของ TPS ในพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงดังภาพที่ 4.31 จากการผลการทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า PLA มีพื้นผิวแตกหักแบบเรียบแสดงถึงความแข็งแรงเปราะของ PLA เมื่อผสม TPS ลงไปเป็นสัดส่วน 30 % wt. แสดงการกระจายตัวของ TPS โดยอนุภาคจะมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 3 ถึง 15 ไมโครเมตร อีกทั้งจะเห็นว่า interaction ระหว่างเฟส PLA และ TPS ไม่ดีและเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ TPS จาก 30 เป็น 50 % wt. แสดงการกระจายตัวของ TPS อย่างไม่สม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน บางส่วนมีขนาดที่ใหญ่ถึง 30 ไมโครเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับผลสมบัติเชิงกลของของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ TPS จะเห็นได้ว่าสมบัติเชิงกลทั้ง Tensile strength และ % Elongation at break มีค่าลดลง จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสม PLA/TPS คือ 30 % wt. ของ TPS ซึ่งแสดงผลสมบัติเชิงกลในด้าน tensile strength และ % Elongation at break ที่สูงโดยเพิ่มขึ้นเป็น 2.94% และ 58.33% เมื่อเทียบ neat PLA



ภาพที่ 4.31 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของพอลิแลคติก แอซิดและพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ซสัดส่วนต่างๆ

4.3.5. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมแบบ two-step process ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS)

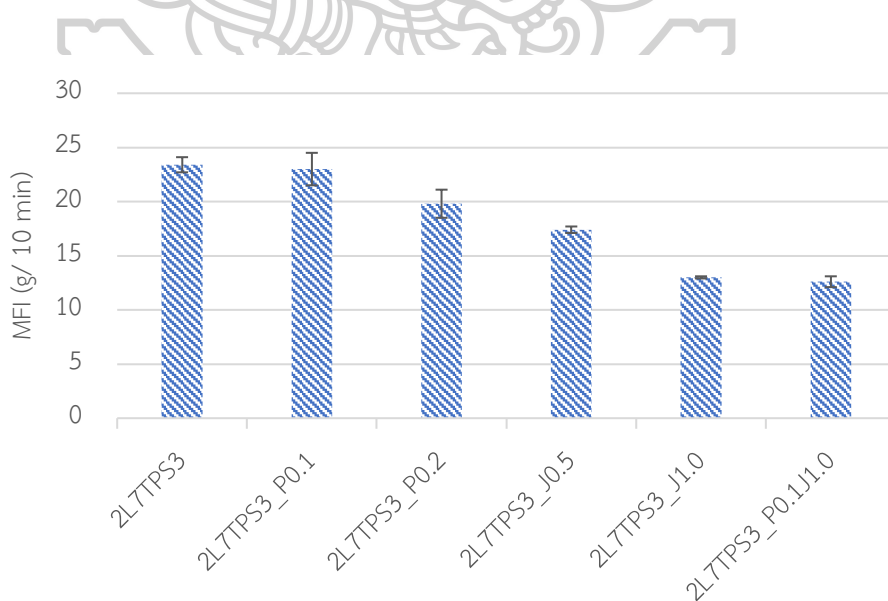
จากผลค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างการผสมของพอลิเมอร์เบลนด์ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) ในสัดส่วน 30 % wt. ของ TPS โดยศึกษาผลของค่าแรงบิดที่เกิดจากการเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ Perkadox 14s หรือ peroxide (P) และ Multifunctional epoxide หรือ Joncryl (J) ในสัดส่วนต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.32 จากกราฟพบว่า เมื่อเติม peroxide ปริมาณ 0.1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อยและไม่มีความสำคัญแต่เมื่อเพิ่มปริมาณ peroxide เป็น 0.2 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าแรงบิดขึ้น โดยปกติ peroxide ไม่ส่งผลต่อความเหนียวของ PLA จึงอาจแสดงถึงการเพิ่มความเข้ากันของ PLA/TPS และเมื่อเปลี่ยนจาก peroxide เป็น Joncryl ปริมาณ 0.5 phr แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าแรงบิดอย่างชัดเจนอาจแสดงถึงอีกทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Joncryl จาก 0.5 phr เป็น 1 phr ยังแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าแรงบิดอย่างเด่นชัด ซึ่งอาจแสดงถึงการเพิ่มความเข้ากันของ PLA/TPS อีกทั้ง Joncryl ยังสามารถเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ PLA ได้อีกด้วยส่งผลให้ค่าความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น[30]



ภาพที่ 4.32 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนดิ่งระหว่าง PLA กับ TPS จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติในสัดส่วน 70 %wt. ของ TPS ที่มีการเติม peroxide หรือ Joncryl ในปริมาณต่างๆ

4.3.6. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ของพอลิเมอร์เบลนดิ่งระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) แบบ two-step process

จากการศึกษาค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนดิ่งระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาเรชในสัดส่วน 30 % wt. ของ TPS ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ Perkadox หรือ peroxide และ Multifunctional epoxy หรือ Joncryl ในปริมาณต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.33 และตารางที่ 4.7 จากแผนภูมิพบว่า เมื่อเติม peroxide ลงไปยังไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนดิ่งและเมื่อเพิ่มปริมาณ peroxide จาก 0.1 phr เป็น 0.2 phr ส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงแสดงผลอย่างเดียวกันกับค่าแรงบิดระหว่างการผสมของพอลิเมอร์เบลนดิ่งซึ่งอาจแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความเข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) และเมื่อเติม Joncryl ลงไปยังแสดงการลดลงของค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนดิ่งอย่างชัดเจนและดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนดิ่งยังลดลงเมื่อเติม Joncryl จาก 0.5 phr เป็น 1 phr แสดงถึง Joncryl อาจช่วยเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ PLA และยังสามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันของพอลิเมอร์เบลนดิ่งได้



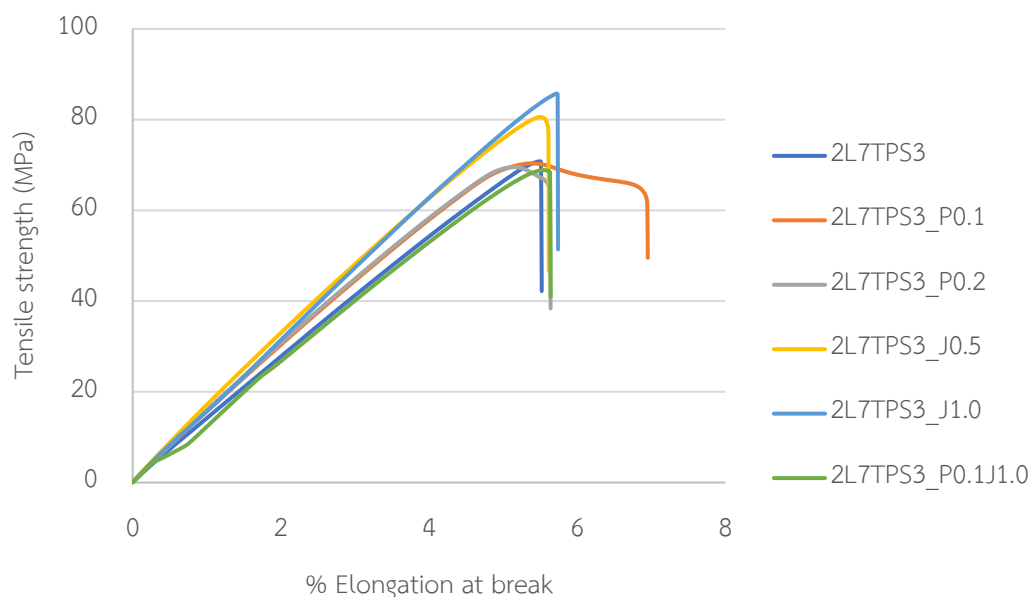
ภาพที่ 4.33 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณต่างๆ

Samples	MFI (g/ 10 min)
Neat PLA L130	15.3 ± 0.5
2L7TPS3	23.4 ± 0.7
2L7TPS3_P0.1	22.9 ± 1.5
2L7TPS3_P0.2	19.8 ± 1.3
2L7TPS3_J0.5	17.4 ± 0.3
2L7TPS3_J1.0	13.0 ± 0.1
2L7TPS3_P0.1J1.0	12.6 ± 0.5

4.3.7. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) แบบ two-step process

การศึกษานี้ศึกษาผลของสารเพิ่มความเข้ากัน peroxide และ Joncryl ในปริมาณต่างๆ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) ในสัดส่วน 30 % wt. ของ TPS แสดงดังภาพที่ 4.34 และตารางที่ 4.8 จากกราฟ stress-strain แสดงสมบัติเชิงเปราะของพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ peroxide และ Joncryl กราฟ stress-strain ยังคงแสดงสมบัติเชิงเปราะเช่นเดิม แต่จากแผนภูมิพบว่าเมื่อเติม peroxide ลงในปริมาณ 0.1 และ 0.2 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์ ไม่ส่งผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลอย่างเด่นชัดในค่า tensile strength และ Young's modulus แต่มีการเพิ่มขึ้นของ % Elongation at break อย่างเด่นชัด เมื่อเติมผลการเติม Joncryl ในปริมาณ 0.5 และ 1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์ จากผลการทดลองพบว่าค่า tensile strength และ Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



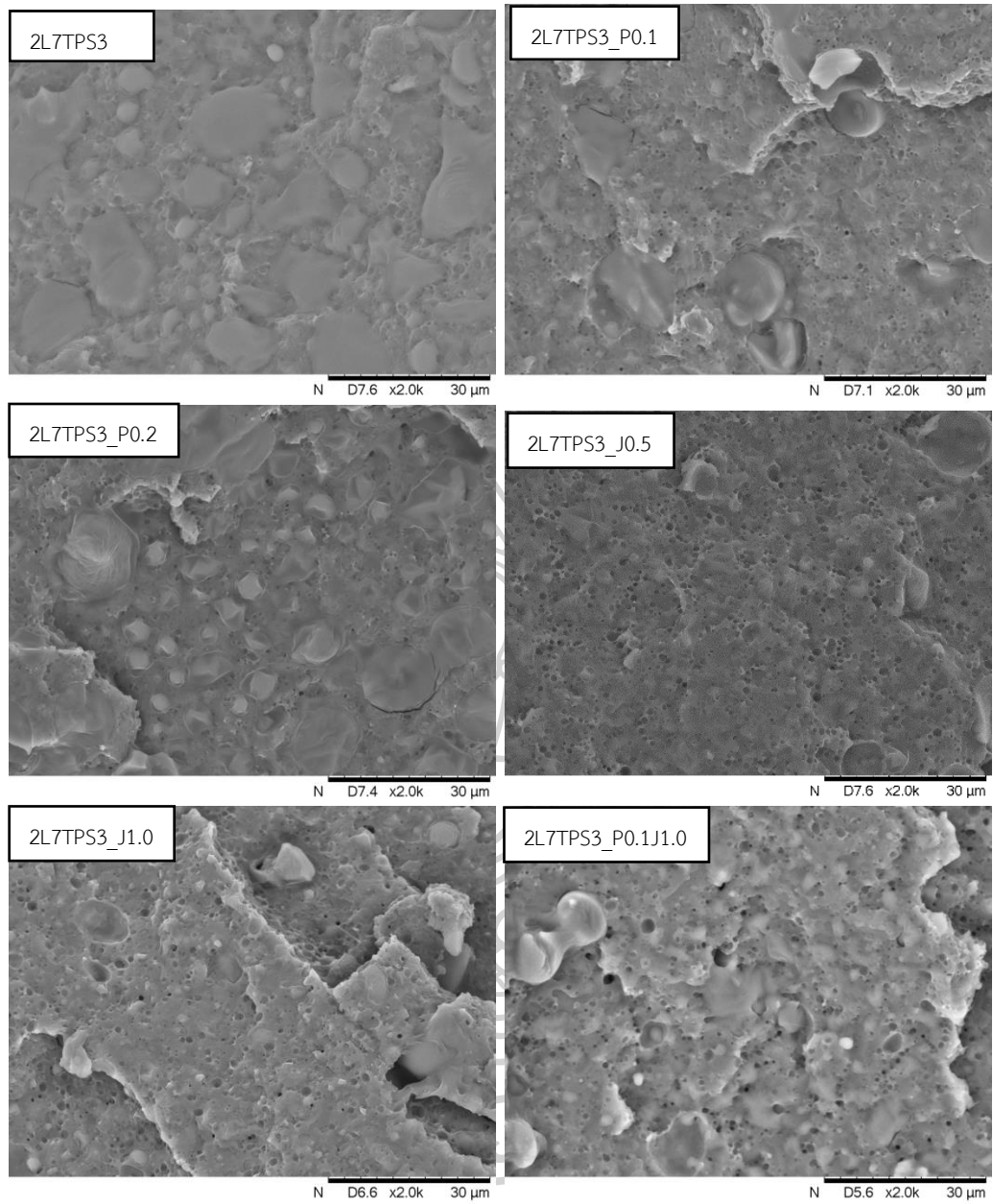
ภาพที่ 4.34 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลในสัดส่วน 30 % wt. ของ TPS โดยเติมสารเพิ่มความเข้ากันแบบ two-step process

ตารางที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณต่างๆ

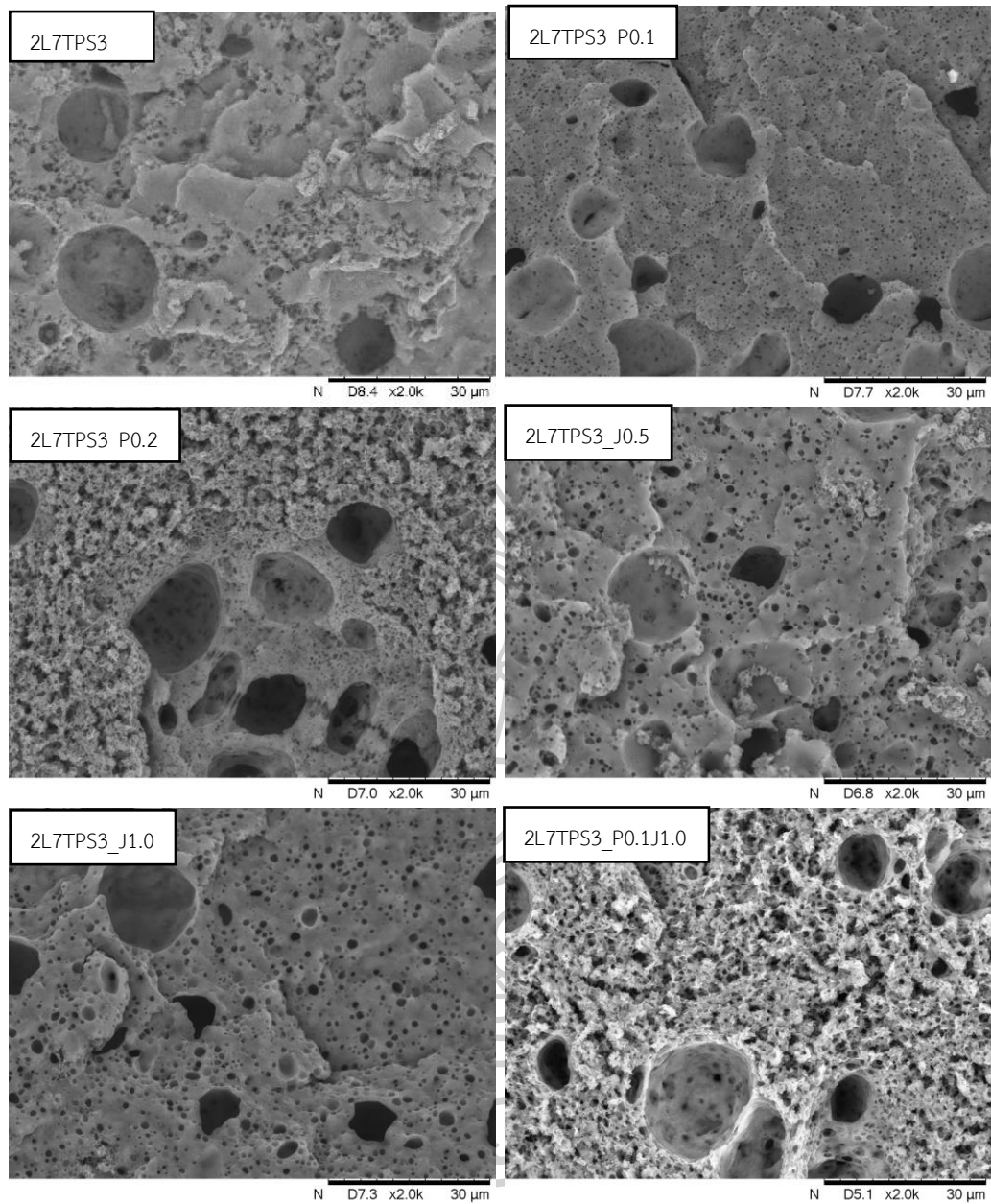
Sample	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
2L7TPS3	70 ± 3.9	5.7 ± 0.5	1,424 ± 89.6
2L7TPS3_P0.1	67 ± 3.0	7.0 ± 0.7	1,505 ± 82.4
2L7TPS3_P0.2	66 ± 4.1	6.3 ± 0.9	1,550 ± 97.6
2L7TPS3_J0.5	74 ± 5.0	5.2 ± 0.5	1,623 ± 91.6
2L7TPS3_J1.0	80 ± 6.6	5.6 ± 0.4	1,571 ± 62.3
2L7TPS3_P0.1J1.0	65 ± 4.6	5.2 ± 0.5	1,533 ± 51.8

4.3.8. การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) แบบ two-step process

การศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันเป็น peroxide และ Joncryl ในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) ที่มีต่อสัณฐานวิทยาโดยขึ้นงานมาจากการแช่ไนโตรเจนเหลวแล้วทดสอบด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ภาพที่ 4.35 พบว่าภาพสัณฐานวิทยาพบว่า เมื่อเติม peroxide ในปริมาณ 0.1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงการกระจายตัวของอนุภาค TPS ในขนาดที่ละเอียดเล็กและเมื่อเพิ่มปริมาณ peroxide เป็น 0.2 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงการกระจายตัวแบบละเอียดเช่นเดิมแต่จากภาพนั้นยากที่จะแยกแยะเฟสที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำการกัดผิวหรือ etching ด้วย Dimethyl sulfoxide (DMSO) จะแสดงดังภาพที่ 4.36 จากการกัดผิวพบว่า จะเห็นอนุภาคแบ่งบางส่วนที่ โดยดูจากช่องว่างขนาดใหญ่ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร และเมื่อเติม peroxide ลงไป 0.1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอย่างละเอียด โดยมีขนาดน้อยกว่า 1 ไมโครเมตรอีกทั้งการเพิ่มปริมาณ peroxide จาก 0.1 เป็น 0.2 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงการกระจายตัวที่ละเอียดขึ้น เนื่องจาก peroxide สามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่างเฟส PLA/TPS ในการเติม Joncryl นั้นผลของการเติมและปริมาณของ Joncryl จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาค TPS เล็กน้อยหรือคือ Joncryl นั้นมีแสดงผลการเพิ่มความเข้ากันน้อยกว่า peroxide ซึ่งอาจส่งผลในการเพิ่มขึ้นของผลสมบัติเชิงกลทั้ง tensile strength และ Young's modulus ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Yachuan Zhang และคณะ[39] ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของ multifunctional epoxide ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/TPS โดยพบว่า multifunctional epoxide ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนของ surface tension อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง PLA/TPS ในสัดส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4.35 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของพอลิเมอร์เบนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตา์ซในสัดส่วน 30 % wt. ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันแบบ two-step process



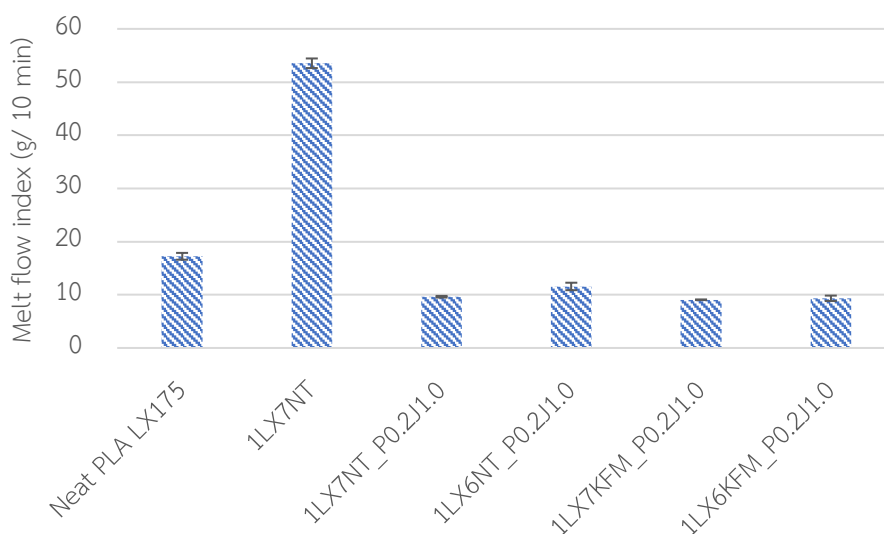
ภาพที่ 4.36 ภาพสัณฐานวิทยาหลังการกัณผิวด้วย DMSO ที่กำลังขยาย 2000 เท่าของพอลิเมอร์ เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลในสัดส่วน 30 % wt. ที่มีการเติมสาร เพิ่มความเข้ากันแบบ two-step process

4.4. ผลของการเบลนด์พอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process

จากผลการทดลองในส่วนก่อนหน้านี้แสดงสัดส่วนของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) ไม่เกิน 50 % wt. แสดงสมบัติเชิงกล สัมฐานวิทยาและ สมบัติการไหลที่ดี อีกทั้งการเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ peroxide และ Joncryl ยังแสดงการเพิ่มความเข้ากันระหว่างเฟส PLA/TPS และการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลของ PLA โดยก่อนหน้านี้จะเริ่มจากการเตรียม TPS ในเครื่องผสมแบบปิดก่อนและจึงนำมาผสมเข้ากับ PLA ในเครื่องผสมแบบปิด ด้วยวิธีการและเวลาในการเตรียมที่นานและยุ่งยาก ในหัวข้อนี้จึงเปลี่ยนวิธีการเบลนด์ โดยเริ่มจากการหมักแป้งกับกลีเซอรอลและเติมสารต่างๆให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงนำแป้งที่หมักแล้วมาผสมกับ PLA โดยตรงในสัดส่วนไม่เกิน 50 % wt. ของ TPS วิธีการเบลนด์นี้จะถูกเรียกว่า one-step process และศึกษาโดยการเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูปจากเครื่องผสมแบบปิดเป็นเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) โดยจะศึกษาถึงผลของชนิดแป้งที่มีต่อการสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งกรณีแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM)

4.4.1. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อค่าดัชนีการไหล (melt flow index)

จากการศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ one-step process แสดงดังภาพที่ 4.37 และตารางที่ 4.9 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดเมื่อผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแบบ one-step process แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีการไหลอย่างมากเมื่อผสมในสัดส่วน 30 % wt. ของ TPS จากเดิม 17 g/10 min เป็น 53 g/10 min ซึ่งแสดงถึง TPS ที่ผสมแบบ one-step process มีความหนืดที่ลดลงอย่างมาก เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ peroxide และ Joncryl ในปริมาณ 0.2 และ 1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์ แสดงการลดลงของค่าดัชนีการไหลอย่างเห็นได้ชัดจาก 53 g/10 min เป็น 9.63 g/ 10 min เพราะ Joncryl สามารถช่วยเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ PLA ได้จึงส่งผลให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนสัดส่วนของ TPS จาก 30 เป็น 40 % wt. พบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้นจาก 9.63 g/ 10 min เป็น 11.6 g/ 10 min แสดงถึงปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเปลี่ยนชนิดแป้งจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติเป็นแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ซึ่งแสดงผลอย่างเดียวกันกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม TPS จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ



ภาพที่ 4.37 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process

Samples	Melt flow rate (g/ 10 min)
Neat PLA LX175	17.2 ± 0.65
1LX7NT	53.5 ± 0.47
1LX7NT_P0.2J1.0	9.63 ± 0.15
1LX6NT_P0.2J1.0	11.6 ± 0.70
1LX7KFM_P0.2J1.0	9.07 ± 0.06
1LX6KFM_P0.2J1.0	9.33 ± 0.51

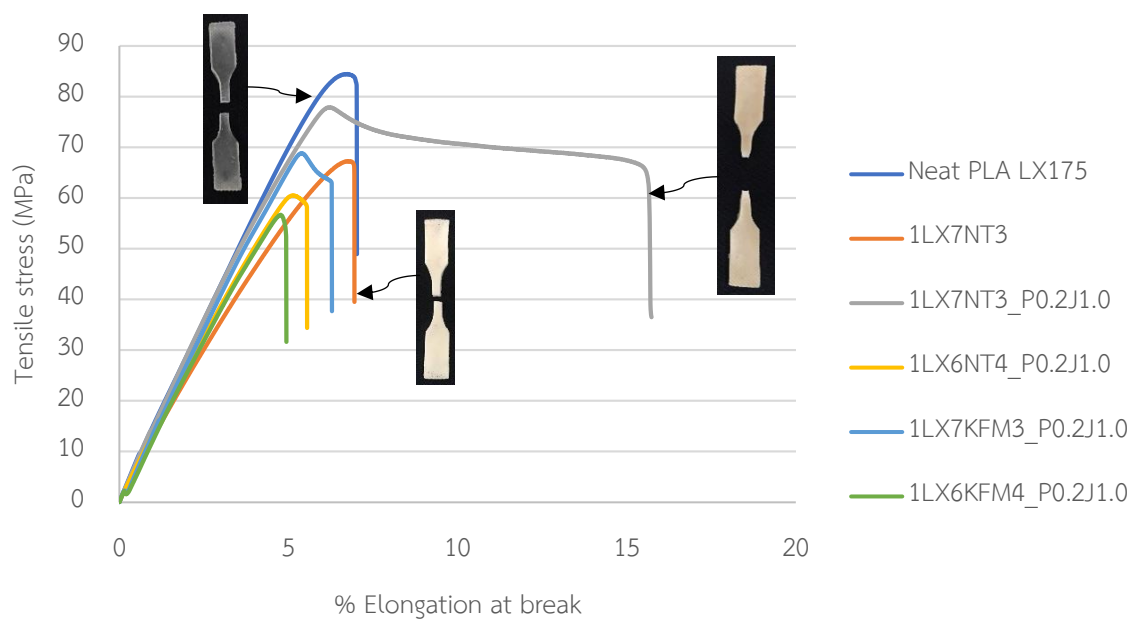
4.4.2. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) ในสัดส่วน 30 และ 40 % wt. ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์โดยการผสมแบบ one-step process แสดงดังภาพที่ 4.38 และตารางที่ 4.10 จากกราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่า PLA และ PLA/TPS แสดงพฤติกรรมแตกหักแบบเปราะ ยกเว้นพอลิเมอร์เบลนด์สัดส่วน 30 % wt. ของ TPS ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันแสดงการแตกหักแบบเหนียวหรือเกิด

ปรากฏการณ์ cold-drawing ระหว่างการดึงยืดขึ้นซึ่งการเปลี่ยนพฤติกรรมแข็งเปราะเป็นแข็งเหนียว เมื่อการเบลนด์นี้เติม peroxide และ Joncryl

ในส่วนผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อผสม PLA/TPS แสดงการลดลงของค่า tensile strength และ Young's modulus อย่างมากถึง 24% และ 20% ของ PLA และ Elongation at break ไม่มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ peroxide และ Joncryl ในปริมาณ 0.2 และ 1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์ตามลำดับ แสดงการเพิ่มขึ้นของ tensile strength % Elongation at break และ Young's modulus เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากัน โดย tensile strength เพิ่มขึ้นจาก 64 MPa เป็น 76 MPa หรือ 18.75 % ค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นจาก 1238 MPa เป็น 1449 MPa หรือ 17% และ Elongation at break เพิ่มขึ้นจาก 7.4 % เป็น 13.7 % หรือเพิ่มขึ้นถึง 85% ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความเข้ากัน PLA/TPS แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ TPS จาก 30 % wt. เป็น 40 % wt. โดยยังคงเติมสารเพิ่มความเข้ากันเพื่อดูผลของปริมาณ TPS พบว่าการเพิ่มปริมาณ TPS แสดงการลดลงของ Tensile strength และ % Elongation at break ซึ่งปริมาณ TPS ที่มากเกินไปส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่ลดลง ซึ่งจะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Michel A. Huneault และ Hongbo Li[40] โดยพบว่าเมื่อทำการปรับปรุงความเข้ากันระหว่าง PLA/TPS ด้วย maleic anhydride โดยมี peroxide ค่า % Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มสัดส่วน TPS มากขึ้นสมบัติเชิงกลโดยรวมนั้นลดลงด้วยปริมาณ TPS ที่มากเกินไปซึ่งจะยืนยันผลด้วยสัญญาณวิทยาต่อไป

ในกรณีเปลี่ยนชนิดแป้งทำเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติเป็นแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) โดยยังคงเติมสารเพิ่มความเข้ากัน พบว่าที่สัดส่วน 30 % wt. ของ TPS แสดงการลดลงของค่า tensile strength และ % Elongation at break เมื่อเทียบกับสัดส่วนเดียวกันกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่มาจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ ส่วนค่า Young's modulus มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงถึงแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) นั้นเข้ากับ PLA ได้ไม่ตีเท่าแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแม้จะเติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณเดียวกัน เช่นเดียวกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่มาจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ เมื่อเพิ่มปริมาณแป้ง KFM จาก 30 % wt. เป็น 40 % wt. ของ TPS จากแป้ง KFM ค่า Tensile strength และ % Elongation at break จะลดลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณ TPS ที่มากเกินไป ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่ลดลงเช่นเดียวกันเพราะ TPS มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่า PLA



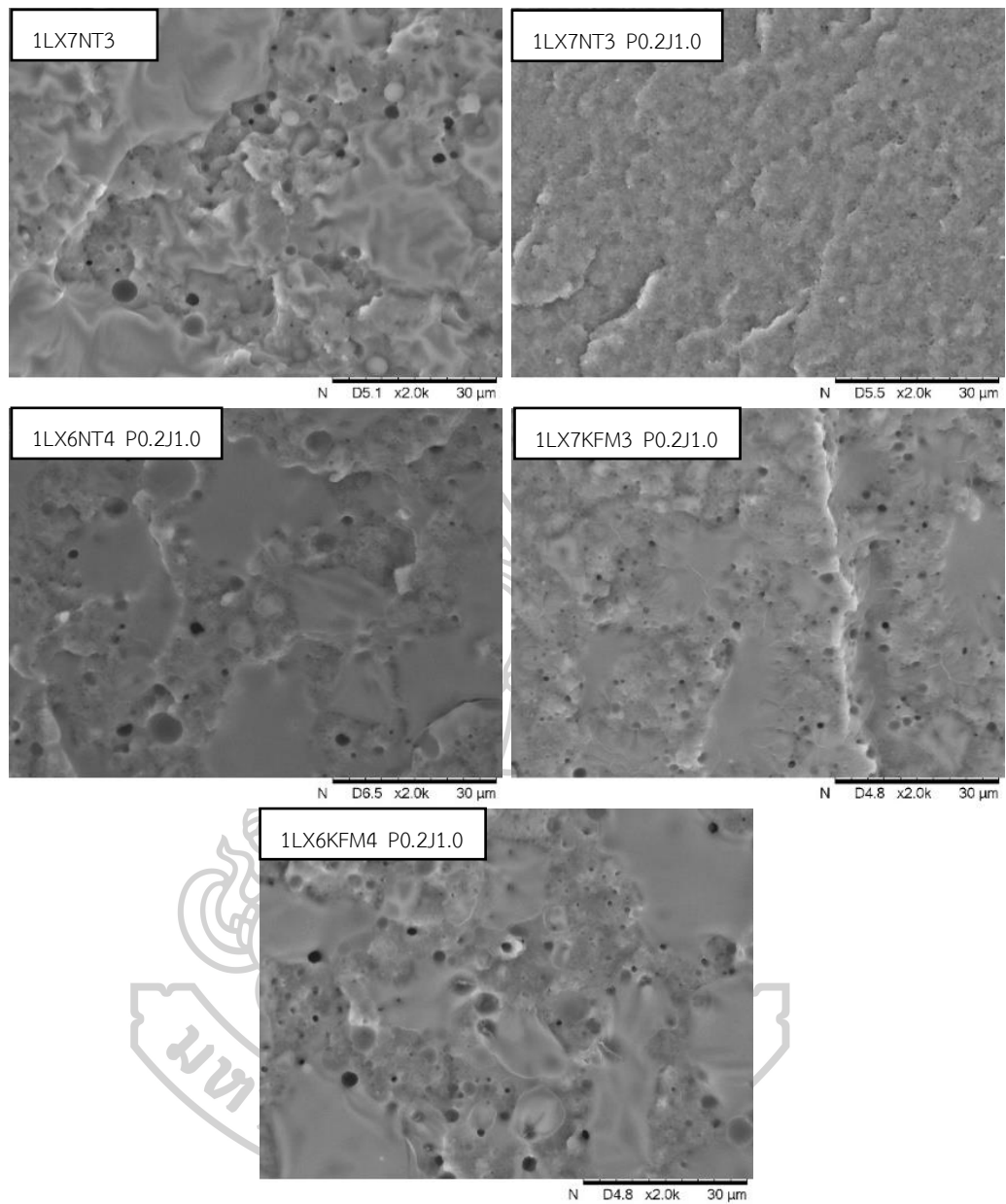
ภาพที่ 4.38 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซแบบ one-step process

ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์แบบ one-step process

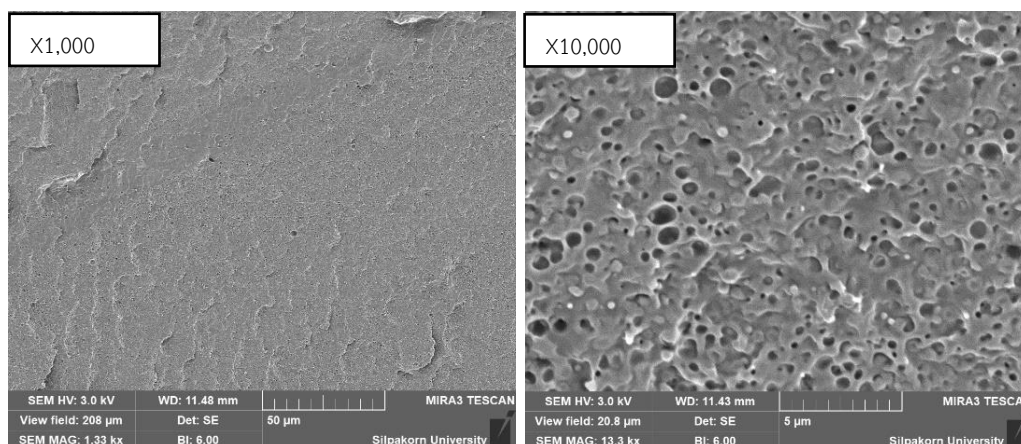
Sample	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
Neat PLA LX175	84 ± 3.6	7.5 ± 0.7	$1,538 \pm 68.9$
1LX7NT	64 ± 6.8	7.4 ± 0.9	$1,238 \pm 74.4$
1LX7NT_P0.2J1.0	76 ± 3.5	13.7 ± 2.7	$1,449 \pm 60.5$
1LX6NT_P0.2J1.0	57 ± 3.4	4.9 ± 0.5	$1,383 \pm 67.9$
1LX7KFM_P0.2J1.0	66 ± 2.1	6.1 ± 0.6	$1,428 \pm 52.7$
1LX6KFM_P0.2J1.0	53 ± 2.5	4.7 ± 0.4	$1,334 \pm 40.4$

4.4.3. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

จากการศึกษาสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) ในสัดส่วน 30 และ 40 % wt. ของ TPS โดยเติมสารเพิ่มเข้ากันแบบ one-step process แสดงดังภาพที่ 4.39 จากภาพพบว่า ที่ปริมาณแบ่ง 30 % wt. กับพอลิแลคติกแอซิดแบบ one-step process พบอนุภาคมีขนาด 3 ถึง 6 ไมโครเมตรกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอและพบการแยกเฟสระหว่างเฟสทั้งสองอย่างชัดเจน แสดงถึงความไม่เข้ากันของ PLA/TPS แต่เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันคือ peroxide และ Joncryl ปริมาณ 0.2 และ 1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์ตามลำดับพบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวขนาดเล็กและละเอียดมาก ซึ่งเมื่อเพิ่มกำลังขยายไปเข้าไปอีกจะแสดงดังภาพที่ 4.40 พบว่าขนาดอนุภาคของ TPS มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรซึ่งแสดงถึงการใส่สารเพิ่มความเข้ากันช่วยให้เฟสทั้งสองมีความเข้ากันที่มากขึ้นซึ่งจะอธิบายผลสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นของสัดส่วนนี้ กรณีการเพิ่มปริมาณ TPS จาก 30 เป็น 40 % wt. แสดงการเพิ่มของขนาดอนุภาค TPS โดยการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วนนี้ อีกทั้งการเปลี่ยนแบ่งที่ใช้เตรียม TPS จากแบ่งมันสำปะหลังธรรมชาติเป็นแบ่งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) ยังคงแสดงขนาดอนุภาคในช่วง 3 ถึง 6 ไมโครเมตรซึ่งไม่แตกต่างจากพอลิเมอร์เบลนด์จากแบ่งมันสำปะหลังธรรมชาติที่ยังไม่ได้เติมสารเพิ่มความเข้ากันและเช่นเดียวกับพอลิเมอร์เบลนด์จากแบ่งมันสำปะหลังธรรมชาติการเพิ่มปริมาณ TPS จาก 30 เป็น 40 % wt. พบว่าขนาดอนุภาคของ TPS มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น โดยขนาดอนุภาคที่ใหญ่จะเป็นจุดเริ่มของการแตกหักบนชิ้นงานได้เช่นกัน ซึ่งจะสัมพันธ์กับผลสมบัติเชิงกลที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TPS ที่มากขึ้น ซึ่งมีผลในแนวเดียวกันกับงานวิจัยของ Michel A. Huneault และ Hongbo Li[40] พบว่าขนาดอนุภาคของ TPS ในเฟสหลัก PLA มีขนาดที่เล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันเป็น maleic anhydride และ peroxide



ภาพที่ 4.39 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในสัดส่วนต่างๆ. ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันแบบ one-step process



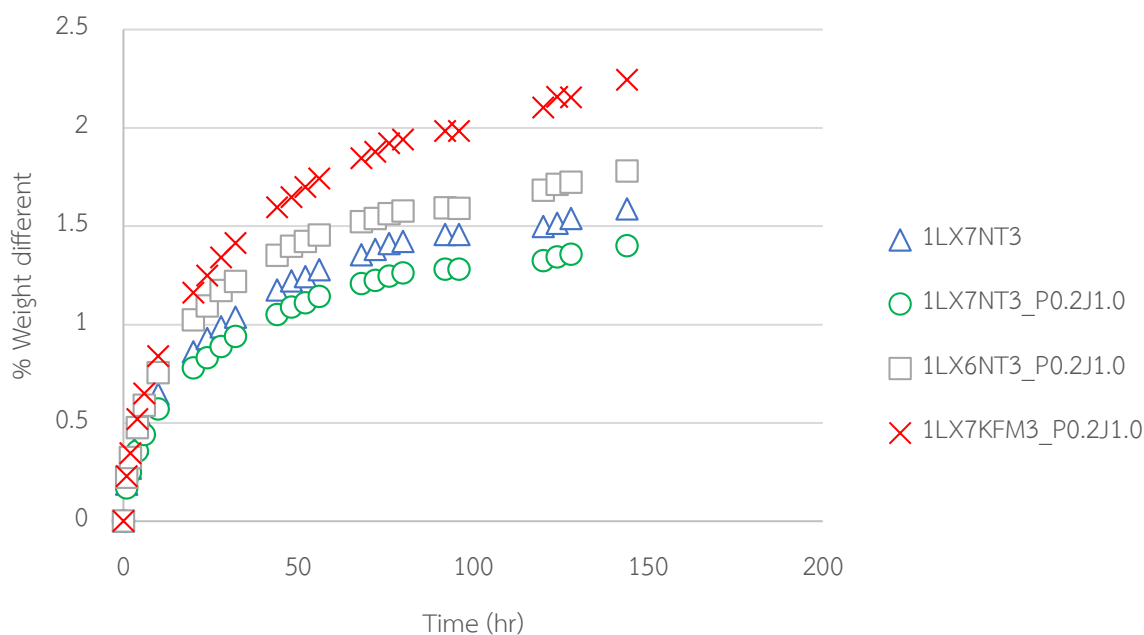
ภาพที่ 4.40 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 1000 และ 10000 เท่าของ 1LX7NT3_P0.2J1.0

4.4.4. การศึกษาผลของการเตรียมแบบ one-step process ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่มีต่อการดูดซับความชื้นและผลของการดูดซับความชื้นที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

จากการศึกษาการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) ในสัดส่วน 30 และ 40 % wt. ของ TPS โดยเติมสารเพิ่มเข้ากันแบบ one-step process โดยเตรียมชิ้นงานเป็นเม็ด extrudate ปริมาณ 10 กรัมบนจานแก้วในสภาวะ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 50 %RH โดยจะเก็บตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักที่มีการเปลี่ยนแปลงไปแล้วจดบันทึกแสดงดังภาพที่ 4.41 เพื่อติดตามการผลการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ อีกทั้งในขณะเดียวกันจะนำชิ้นงาน tensile จากสูตร 1LX7NT3_P0.2J1.0 มาทดสอบการดูดซับความชื้นเพื่อดูผลของการดูดซับความชื้นที่มีต่อสมบัติเชิงกลซึ่งจะแสดงดังในภาพที่ 4.42 และตารางที่ 4.11 โดยมีวัตถุประสงค์ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีผลมาจากการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์

จากการทดสอบการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) ในสภาวะที่กำหนด โดยติดตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นพบว่า ในช่วง 0 ถึง 4 ชั่วโมงแรก ทุกสูตรของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงการดูดซับความชื้นในอัตราที่เท่ากัน แต่เมื่อครบเวลา 144 ชั่วโมงซึ่งคาดว่าชิ้นงานจะดูดซับน้ำจนอิ่มตัวแล้วโดยดูจากกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เริ่มคงที่ โดยแต่ละสูตรมีการดูดซับความชื้นที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยพอลิเมอร์เบลนด์จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง (KFM) มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักชิ้นงานมากที่สุด หรือมีการดูดซับความชื้นมากที่สุด และรองลงมาเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วน TPS 40 % wt. พอลิเมอร์เบลนด์ที่

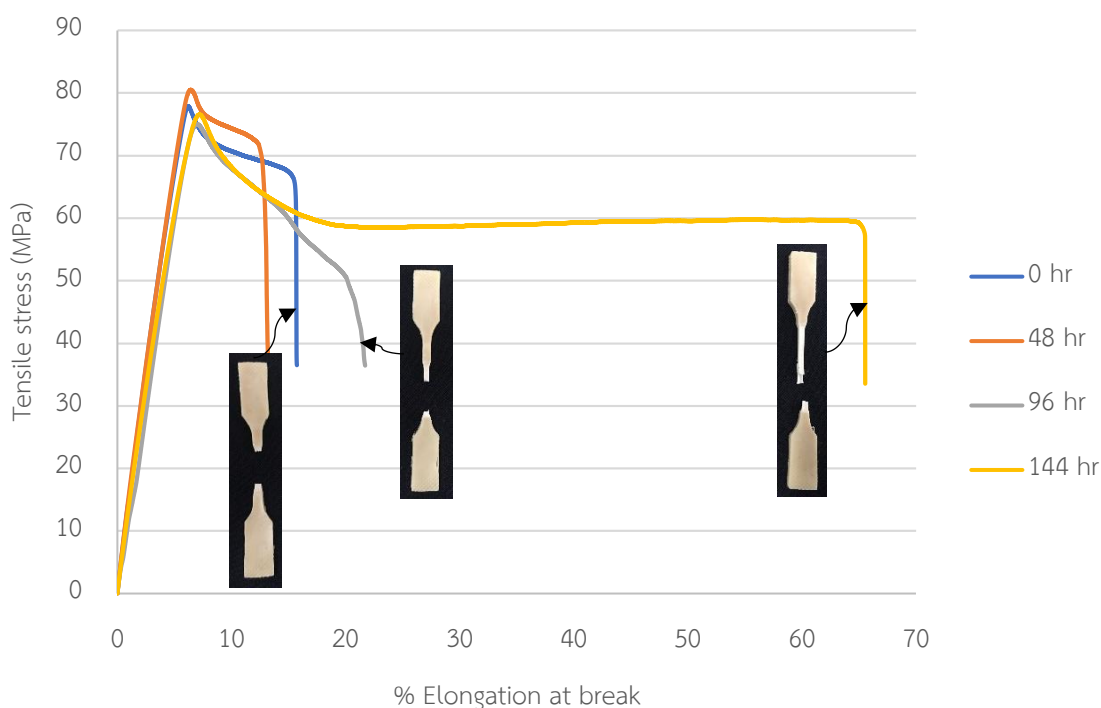
มีสัดส่วน TPS 30 % wt. โดยไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากัน และสูตรที่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยที่สุดเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วน TPS 30 % wt. ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากัน จากผลนี้แสดงถึงแป้งมันสำปะหลังดัดแปลงหรือ KFM มีผลการดูดซับความชื้นมากกว่าแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ อาจเนื่องจากแป้ง KFM มีความสามารถในการ absorption น้ำได้มากกว่าแป้งธรรมชาติด้วยการที่ hydroxypropyl group แทนที่หมู่ hydroxyl group ส่งผลให้สายโซ่แป้งมีความสามารถในการอุ้มน้ำมากขึ้นเนื่องจาก hydrogen bond ระหว่างโมเลกุลแป้งที่ลดลง[41-44] ในกรณีการเพิ่มปริมาณ TPS จาก 30 % wt. เป็น 40 % wt. แสดงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่แนวโน้มมากขึ้นเนื่องจากปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น กรณีการใส่และไม่ใส่สารเพิ่มความเข้ากันพบว่า การใส่สารเพิ่มความเข้ากันในพอลิเมอร์เบลนด์สามารถช่วยลดการดูดซับความชื้นได้อย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องจากการเพิ่มความเข้ากันระหว่าง PLA/TPS ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของเฟส TPS มีขนาดเล็กมากและทำให้เฟสของ PLA เป็นเฟสต่อเนื่องสามารถห่อหุ้มเฟส TPS ได้ดีมากขึ้นส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์นี้สามารถลดการดูดซับความชื้นอีกประการหนึ่งคือเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีทำให้หมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วลดยาลงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 4.41 กราฟการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาเรชแบบ one-step process

จากการติดตามผลของการดูดซับความชื้นที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์สูตร 1LX7NT3_P0.2J1.0 แสดงดังภาพที่ 4.42 และตารางที่ 4.11 จากกราฟ stress-strain จะเห็นว่าช่วง cold-drawing ของชิ้นงานมีความยาวมากขึ้นอย่างมากเมื่อเวลาในการทดสอบนานมากขึ้นหรือช่วง

144 ชั่วโมง พบว่าค่า tensile strength มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ในกรณี % Elongation at break พบว่าในช่วง 0 ถึง 48 ชั่วโมงไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า % Elongation at break แต่เมื่อเวลาผ่านไป 96 ชั่วโมงค่า % Elongation at break มีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 14 % เป็น 25 % หรือเพิ่มขึ้น 46% ของค่าเดิมอีกทั้งเมื่อเพิ่มเวลาไปอีกเป็น 144 ชั่วโมงค่า % Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 25 % เป็น 82 % หรือเพิ่มขึ้น 228 % ของค่าเดิม ซึ่งแสดงถึงการดูดซับความชื้นนี้ส่งผลจากน้ำที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ในเฟสแข็งได้ ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าสามารถยืดหยุ่นได้มากขึ้น ส่วนค่า Young's modulus มีค่าที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 96 ชั่วโมงขึ้นไปเช่นกัน



ภาพที่ 4.42 กราฟ stress-strain ของพอลิเมอร์เบลนด์ 1LX7NT3_P0.2J1.0 แบบ one-step process ที่ผ่านการทดสอบดูดซับความชื้นที่เวลาต่างๆ






ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ 1LX7NT3_P0.2J1.0 ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการทดสอบการดูดซับความชื้น

Time for testing	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
0 hr	76 ± 3.5	14 ± 2.7	1449 ± 60.5
48 hr	78 ± 6.8	14 ± 0.8	1537 ± 73.6
96 hr	76 ± 4.5	25 ± 5.4	1254 ± 43.0
144 hr	73 ± 4.6	81.8 ± 38.0	1353 ± 63.3





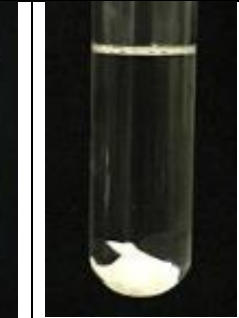
4.4.5. การศึกษาความเข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปลงด้วยเทคนิค Molau test และ เทคนิค Fourier- transform infrared spectroscopy (FTIR)

จากการภาพสัณฐานวิทยาและผลสมบัติเชิงกลแสดงการเพิ่มขึ้นของความเข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (TPS) จากการเติม peroxide หรือ Joncryl ที่สามารถทำปฏิกิริยากับ maleic anhydride ที่ผสมอยู่ในแป้ง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกันระหว่าง PLA/TPS ทำให้การเบลนด์เข้ากันได้ ซึ่งทำการพิสูจน์การมีความเข้ากันของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเทคนิค Molau test โดยจะละลายสารตัวอย่างใน Dichloromethane ที่สามารถละลาย PLA ได้แต่ไม่สามารถละลาย TPS ได้ ดังนั้นถ้าทั้งสองเฟสไม่เข้ากันจะเกิดการแยกเฟสหรือเกิดตะกอนของเฟสที่ไม่ละลายหรือ TPS จากตารางที่ 4.12 พบว่า neat PLA สามารถละลายได้ใน Dichloromethane แต่ TPS ไม่สามารถละลายได้เราจึงเห็น TPS ในสภาพเดิม เมื่อดูที่พอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันพบว่าสารละลายมีสีขุ่นเล็กน้อยและมีตะกอนอยู่ที่ก้นหลอดทดลอง ซึ่งแสดงถึงพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันจะทำให้ทั้งสองเฟสไม่เข้ากันจึงเกิดการแยกเฟส แต่เมื่อเติม peroxide และ Joncryl พบว่าสารละลายที่ได้นั้นมีสีขุ่นเหมือนสีนมและไม่เห็นตะกอนที่ก้นหลอดทดลอง แสดงถึงการเติม peroxide หรือ Joncryl ทำให้ PLA/TPS สามารถเข้ากันได้ดี ในกรณีของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มาจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปลง (KFM) ที่เติม peroxide หรือ Joncryl จะเห็นว่าสารละลายมีสีขุ่นแต่ก็มีตะกอนอยู่บ้าง ซึ่งบ่งบอกถึง PLA/TPS จากแป้งมันสำปะหลังตัดแปลงนั้นเข้ากันได้ไม่ดีเท่าระบบเบลนด์ของ PLA/TPS จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

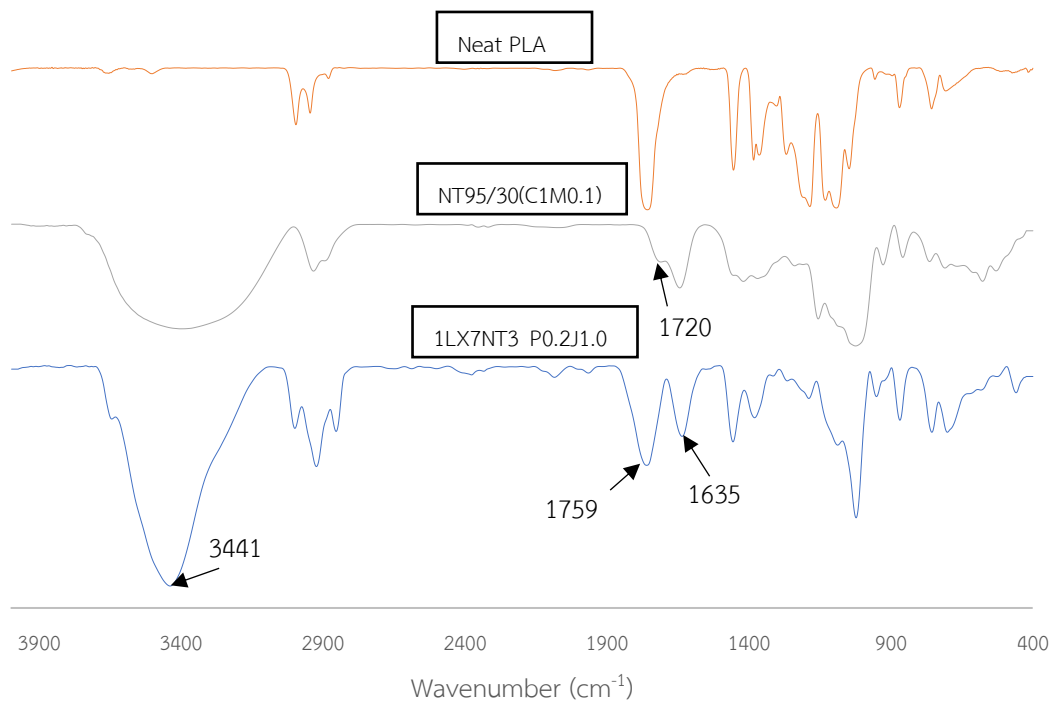
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบ Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์

Samples	PLA LX175	1LX7NT3	1LX7NT3_ P0.2J1.0	1LX7KFM3_ P0.2J1.0	TPS
24 hr					

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบ Molau test ของพอลิเมอร์เบลนด์

Samples	PLA LX175	1LX7NT3	1LX7NT3_ P0.2J1.0	1LX7KFM3_ P0.2J1.0	TPS
48 hr					

ด้วยเทคนิค Molau test แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/TPS สามารถเข้ากันได้มากขึ้นเมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ดังนั้นจะเริ่มพิสูจน์โครงสร้างหรือสิ่งที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) โดยนำตัวอย่างมาสกัดด้วย Dimethyl sulfoxide (DMSO) เพื่อนำเฟสแบ่งออก แล้วนำตะกอนที่ได้มาทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.43 จากกราฟ FTIR spectrum พบว่า เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของ PLA/TPS โดยแสดงจากพีคที่ 1759 และ 1635 cm^{-1} ของพอลิเมอร์เบลนด์หลังสกัดเอาเฟส TPS ออกแล้ว โดยตำแหน่งพีคที่ 1720 cm^{-1} แสดงถึงการมี maleic anhydride เชื่อมติดอยู่บนสายโซ่หลักของแป้งซึ่งอาจช่วยให้ TPS และ PLA สามารถเข้ากันได้มากขึ้น[36] โดยอาจผ่านการเกิดการโคพอลิเมอร์ระหว่าง TPS และ PLA [45]



ภาพที่ 4.43 กราฟ FTIR spectrum ของพอลิเมอร์เบลนด์หลังผ่านการสกัดแบ่งออกด้วย DMSO

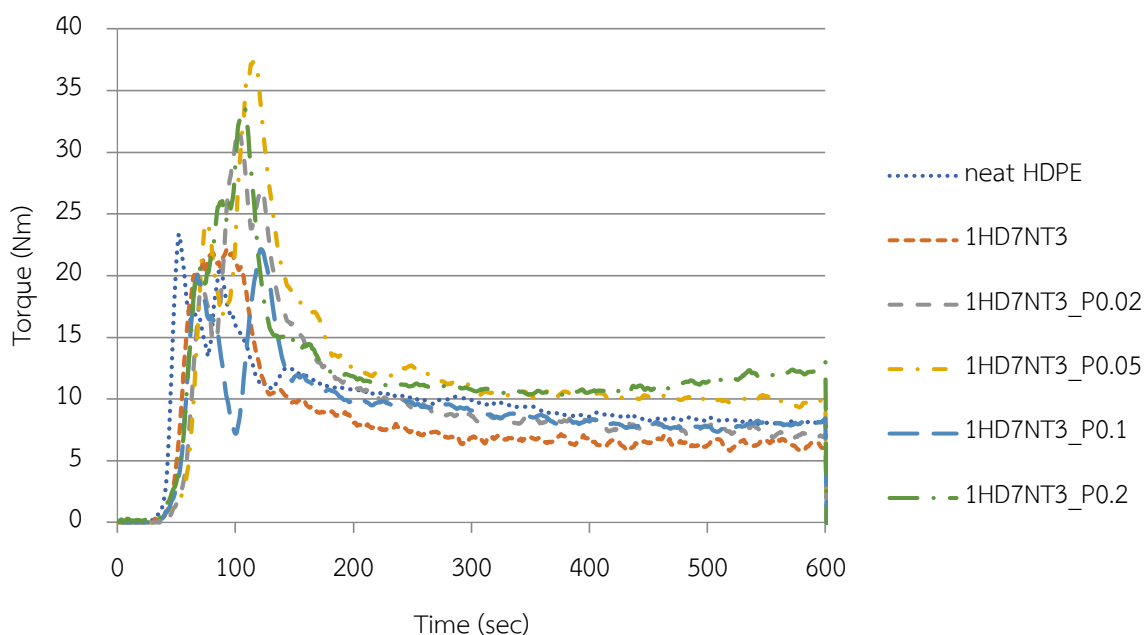


4.5. การศึกษาการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process

จากการศึกษาผลของการเบลนดระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแบบ one-step process และการเติมสารเพิ่มความเข้ากันสามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนดที่มีสมบัติที่ดีได้ โดยสัดส่วนในการผสมแป้งไม่เกิน 30 % wt. ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการศึกษาการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (high density polyethylene; HDPE) กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS ในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และผลของการใส่สารเพิ่มความเข้ากันหรือเปอร์ออกไซด์ (peroxide) ในปริมาณต่างๆ โดยศึกษาผลที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสม สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด

4.5.1. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างการผสม

จากการศึกษาการผสมระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมแสดงดังภาพที่ 4.44 จากกราฟพบว่า เมื่อผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลใน HDPE แสดงการลดลงของค่าแรงบิดอย่างเด่นชัด เนื่องจากเทอร์โมพลาสติก สตาโรลมีความหนืดที่น้อยกว่า HDPE ที่อุณหภูมิผสมนี้เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide ลงไปปริมาณ 0.02 phr ของพอลิเมอร์เบลนดพบว่า ค่าแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนดที่ไม่เติม peroxide และเมื่อเพิ่มปริมาณ peroxide มากขึ้นพบว่าค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ peroxide นั้นอาจแสดงถึงการใส่ peroxide ใน HDPE ทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันบางส่วนของสายโซ่ HDPE จากกราฟค่าแรงบิดพบว่า ถ้าใส่ peroxide ปริมาณ 0.2 phr ของพอลิเมอร์เบลนดแสดงค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นตามเวลาแสดงความไม่เสถียรของกระบวนการผสม ซึ่งแสดงถึงปริมาณ peroxide ที่มากเกินไปอาจส่งผลภายหลังต่อกระบวนการอื่น นอกจากนี้เช่นการเกิดเจลในกระบวนการเป่าฟิล์ม ดังนั้นปริมาณ peroxide ไม่ควรเติมเกิน 0.1 phr ของพอลิเมอร์เบลนด

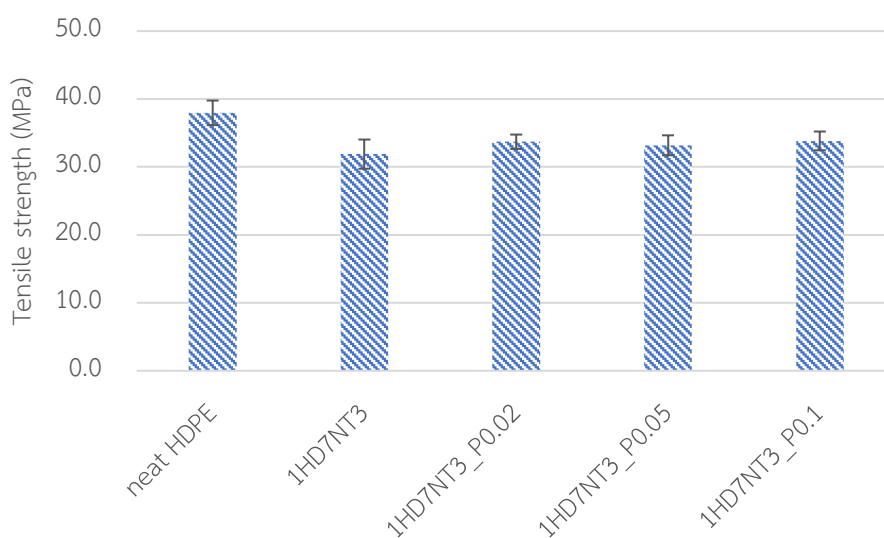


ภาพที่ 4.44 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนดระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณต่างๆ

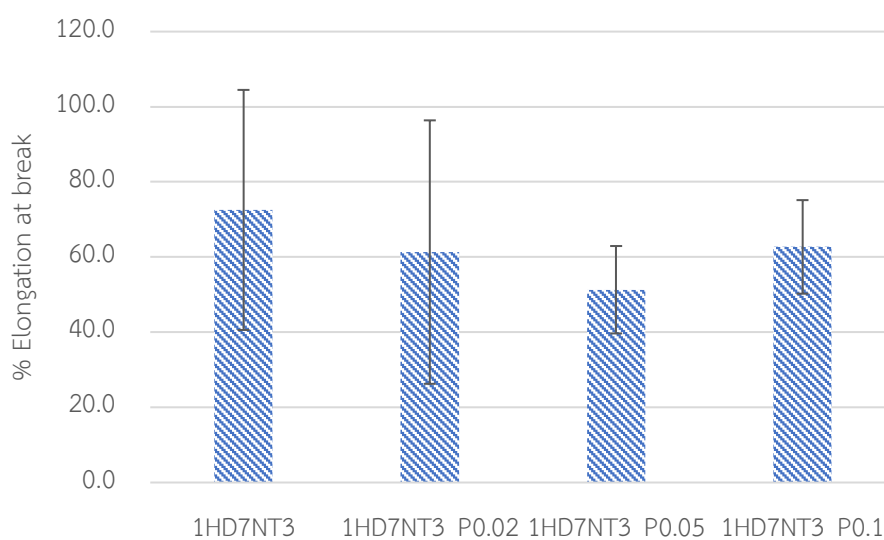
4.5.2. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด

จากการศึกษาผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS แสดงดังภาพที่ 4.45 ถึงภาพที่ 4.47 จากกราฟพบว่าเมื่อผสม TPS ลงใน HDPE สัดส่วน 30 % wt. ค่า tensile strength มีค่าลดลงจาก 38 MPa เป็น 32 MPa หรือลดลง 16% ของค่าเดิม อีกทั้งค่า % Elongation at break มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยลดลงจาก 958 % หรือเพียง 72 % ซึ่งผลการลดลงนี้แสดงถึง HDPE/TPS นี้ไม่เข้ากัน เมื่อเทียบงานวิจัยของ Aurélie Taguet และคณะ[46] ทำการผสม HDPE/TPS ในสัดส่วน (80/20) พบว่า Elongation at break มีค่าลดลงอย่างมากเช่นเดียวกันจาก >900% ลดลงเป็น 160% และ tensile strength ก็ลดลงจาก 19.5 MPa เหลือ 18.0 MPa เช่นเดียวกัน เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide ปริมาณ 0.02 phr ของพอลิเมอร์เบลนดพบว่าค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณ peroxide เป็น 0.05 และ 0.1 phr ของพอลิเมอร์เบลนดแสดง

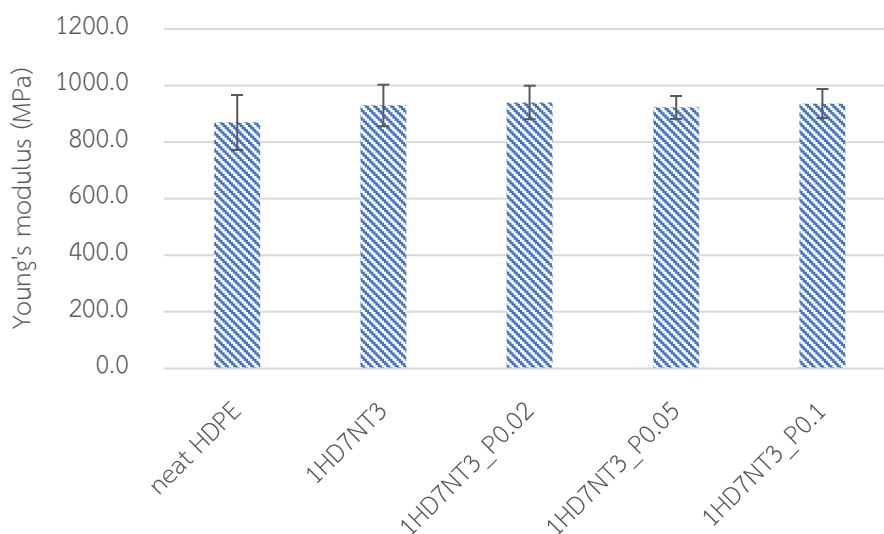
การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของ % Elongation at break โดยมีค่าที่ลดลงและมีส่วนเบี่ยงเบนน้อยลงและเมื่ออิงจากค่าความแรงบิดที่เกิดขึ้นแสดงถึงที่ปริมาณ peroxide 0.5 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าแรงบิดที่สูงสุด ดังนั้นค่าปริมาณ peroxide ที่น่าจะเหมาะสมกับพอลิเมอร์เบลนด์สัดส่วนนี้คือ 0.05 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์



ภาพที่ 4.45 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซซีที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันวปริมาณต่างๆ



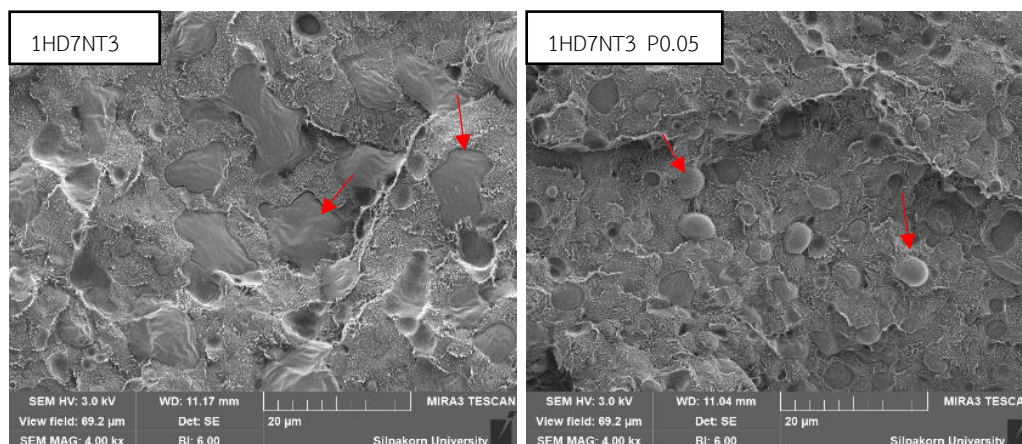
ภาพที่ 4.46 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซซีที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันวปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 4.47 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันปริมาณต่างๆ

4.5.3. การศึกษาผลการเบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

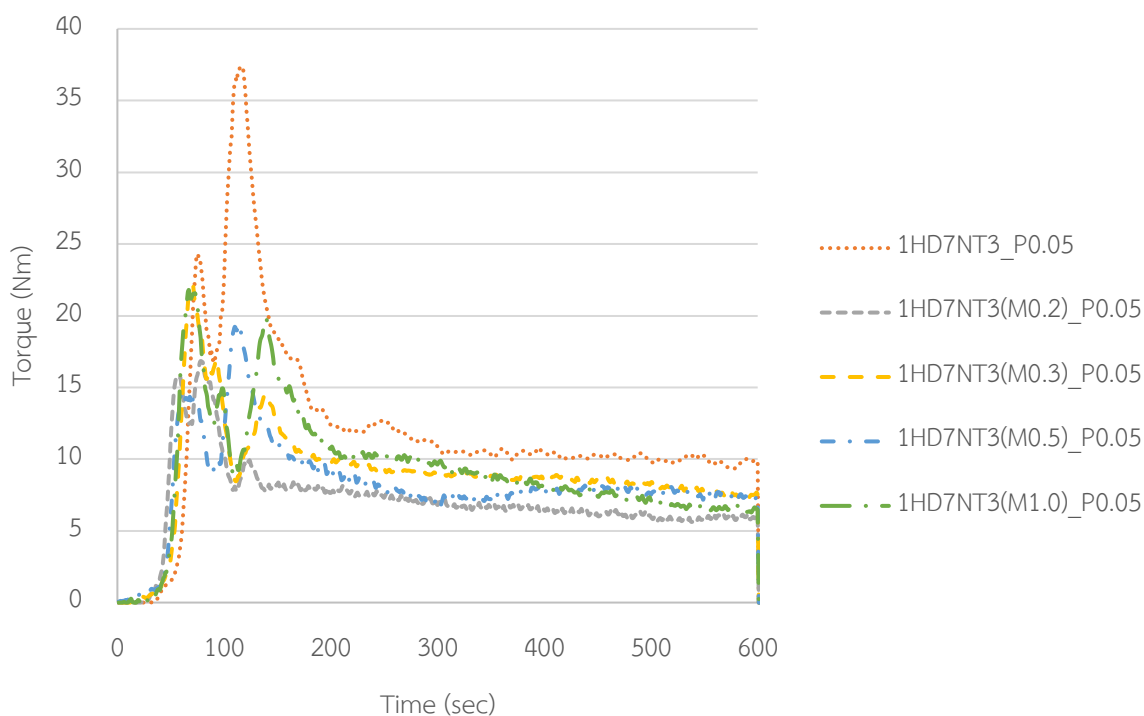
จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS แสดงดังภาพที่ 4.48 จากภาพแสดงการแยกเฟสอย่างชัดเจนระหว่าง HDPE/TPS แสดงถึงทั้งสองตัวนี้ไม่มีความเข้ากันและขนาดอนุภาคของ TPS อยู่ในช่วง 10 ถึง 15 ไมโครเมตร ซึ่งยืนยันผลสมบัติเชิงกลที่ลดลงของพอลิเมอร์เบลนด์นี้ เมื่อผสมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide ลงไปพบว่าขนาดอนุภาคของ TPS มีขนาดที่เล็กลงหรือ 5 ไมโครเมตร ซึ่งอาจแสดงถึงทั้งสองเฟสที่มีความเข้ากันที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 4.48 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 4000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันในปริมาณต่างๆ

4.5.4. การศึกษาผลการเบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างการผสม เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride

จากผลการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ เทียบกับแป้งที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการผสมแสดงดังภาพที่ 4.49 จากกราฟพบว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride จาก 0.1 phr ของแป้งเป็น 0.2 phr ของแป้งแสดงการลดลงของค่าแรงบิดแต่เมื่อเพิ่มปริมาณ maleic anhydride เป็น 0.3 0.5 และ 1 phr ของแป้งพบว่าค่าแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีแนวโน้มอย่างเด่นชัด

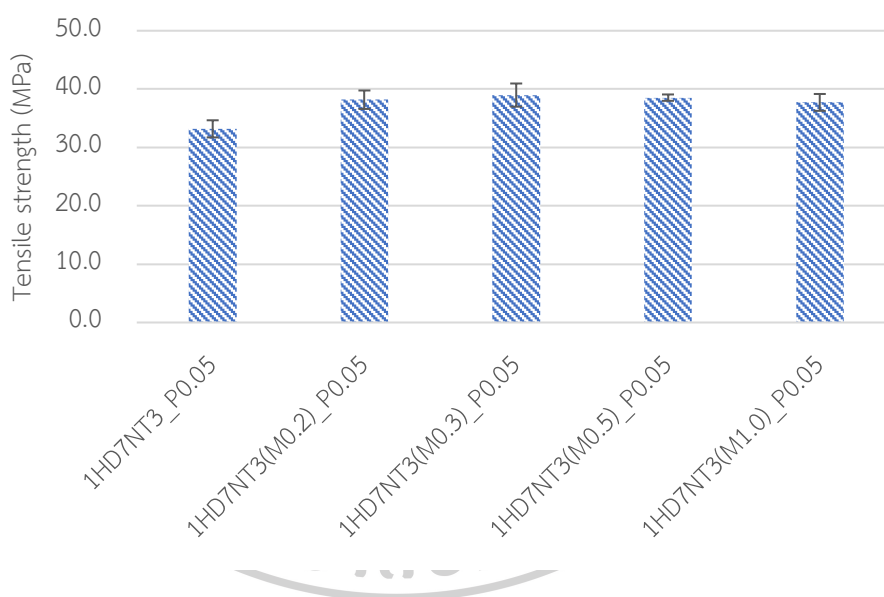


ภาพที่ 4.49 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนดิ่งระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride

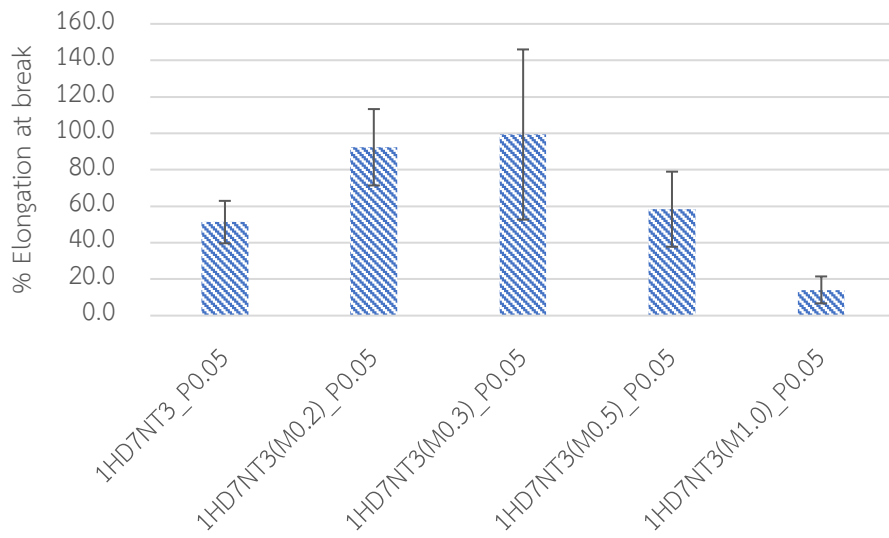
4.5.5. การศึกษาผลการเบลนดิ่งระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนดิ่ง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ของพอลิเมอร์เบลนดิ่งระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS ที่มีต่อสมบัติเชิงกลแสดงดังภาพที่ 4.50 ถึงภาพที่ 4.52 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride จากเดิม 0.1 phr ของแป้งเป็น 0.2 phr ของแป้งแสดงการเพิ่มขึ้นของ tensile strength และ % Elongation at break โดยค่า tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 33 MPa เป็น 38 MPa และค่า % Elongation at break มีค่าเพิ่มจาก 51% เป็น 92% ซึ่งบ่งบอกถึงการเพิ่มปริมาณ maleic anhydride ส่งผลให้การเพิ่มความเข้ากันของ HDPE และ TPS ด้วย peroxide มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ maleic anhydride จาก 0.2 phr ของแป้งเป็น 0.3 phr ค่า tensile strength

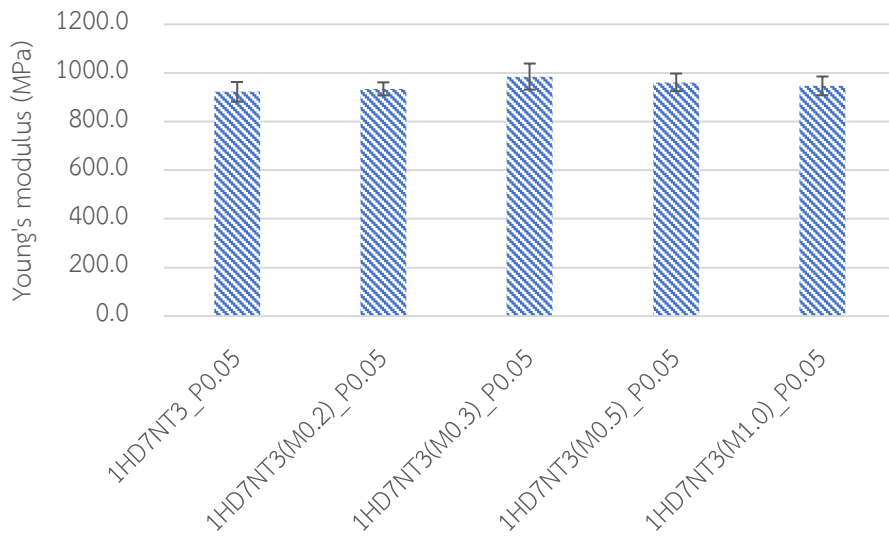
ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่มีการเพิ่มขึ้นของ % Elongation at break และ Young's modulus เล็กน้อยแต่การเพิ่มปริมาณ maleic anhydride อีกเป็น 0.5 และ 1 phr ของแบ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลงเล็กน้อยอาจเนื่องด้วยปริมาณ maleic anhydride ที่มากเกินไปส่งผลให้ TPS มีสมบัติเชิงกลและความหนืดที่ลดลง เมื่อเทียบงานวิจัยของ Aurélie Taguet และคณะ[46] ทำการผสม HDPE/TPS ในสัดส่วน (80/20) โดยศึกษาผลการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่เป็น HDPE grafted maleic anhydride (HDPE-g-MA) พบว่าการเติมสารเพิ่มความเข้ากันที่ปริมาณ 9 wt.% สามารถเพิ่ม tensile strength จาก 18.0 MPa เป็น 19.0 MPa และ Elongation at break เพิ่มขึ้น จาก 160% เป็น 310% เมื่อเทียบกับ HDPE/TPS ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากัน วิธีการในงานวิจัยนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยอื่นในด้านการเติม maleic anhydride ลงไปในชั้นหมักแป้งเพื่อเตรียม TPS โดยจำเป็นต้องเตรียม HDPE-g-MA ก่อน โดยวิธีนี้มีผลการปรับปรุงความเข้ากันได้ โดยจะยืนยันในผล สันฐานวิทยาในส่วนตัวไป



ภาพที่ 4.50 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ



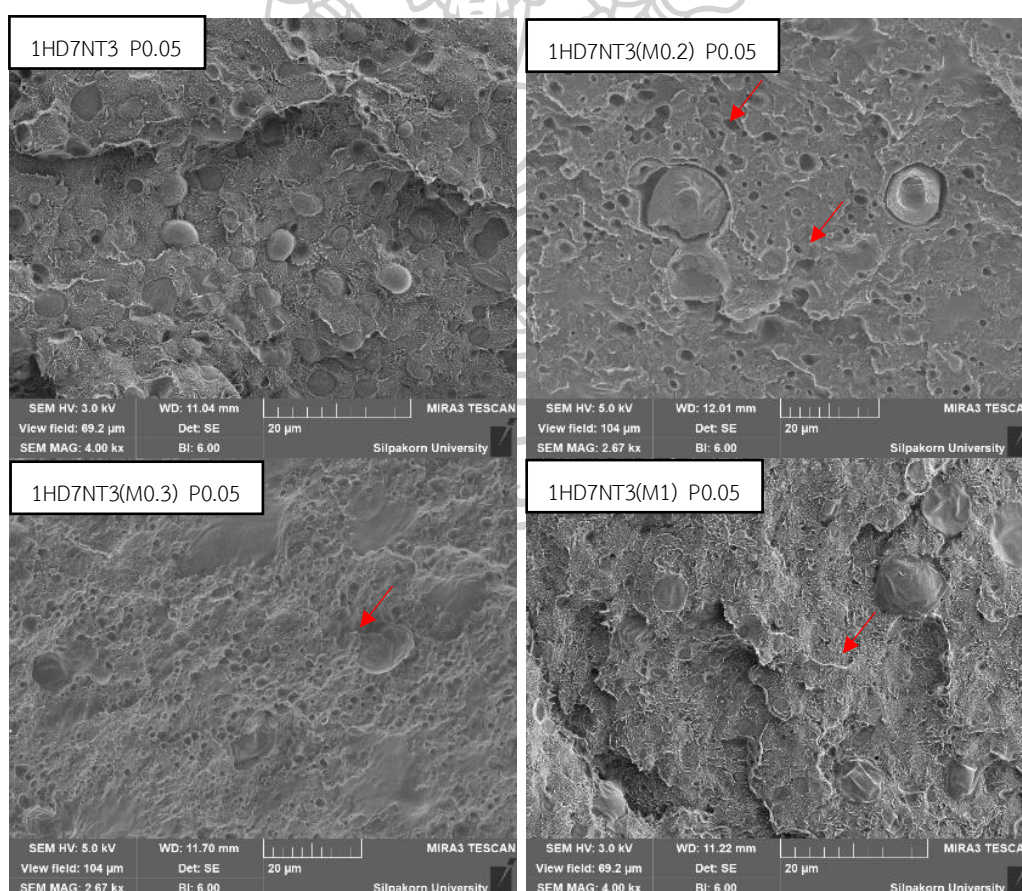
ภาพที่ 4.51 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาซซึที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 4.52 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาซซึที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ

4.5.6. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (High density polyethylene: HDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แบบ one-step process ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride

จากการทดสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิเอทิลีน แบบความหนาแน่นสูง (high density polyethylene; HDPE) กับเทอร์โมพลาสติกสตา์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆเทียบกับแป้งแสดงดังภาพที่ 4.53 จากภาพพบว่าการเพิ่มปริมาณ maleic anhydride จาก 0.1 phr ของแป้งเป็น 0.2 และ 0.3 phr ของแป้งขนาดอนุภาคของ TPS มีขนาดที่เล็กลงเป็น 3 ถึง 5 ไมโครเมตรซึ่งแสดงถึงการเพิ่มความเข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองด้วยการเพิ่มปริมาณ maleic anhydride ซึ่งสัมพันธ์กับผลการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกล

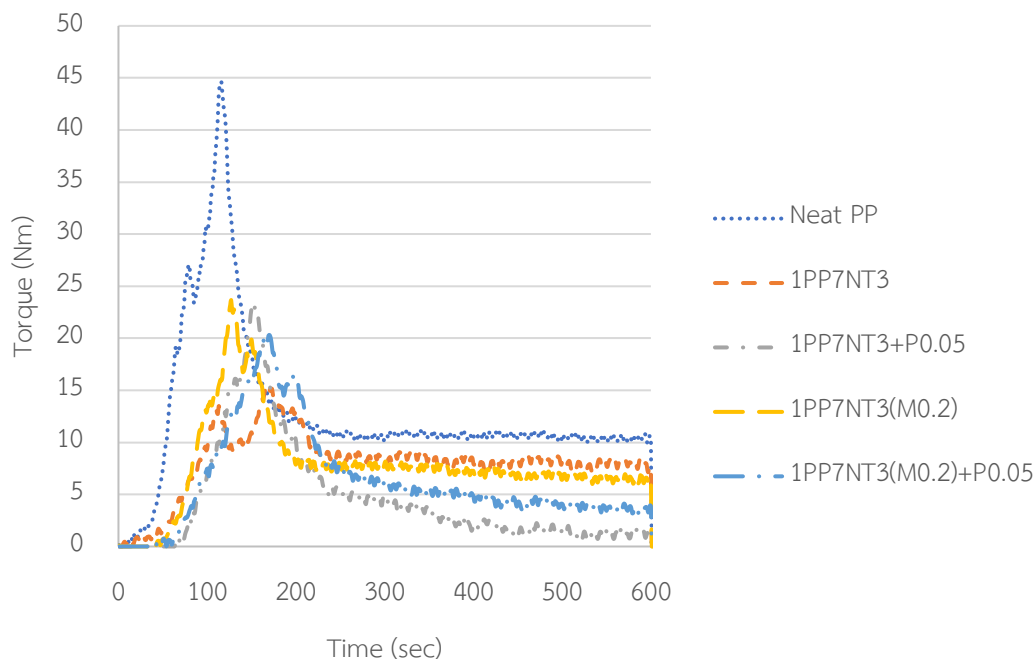


ภาพที่ 4.53 ภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 4000 เท่าของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ

4.5.7. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) และเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process ที่มีต่อค่าแรงบิดระหว่างการผลิต

จากการศึกษาการผลิตในส่วนพอลิเมอร์เบลนดระหว่างพอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผลิตอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS ในเครื่องผสมแบบปิดพบว่า การเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide ในปริมาณต่ำสามารถเพิ่มความเข้ากันระหว่าง HDPE และ TPS เล็กน้อยโดยดูจากผลสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยา อีกทั้งการเพิ่มปริมาณ maleic anhydride ยังสามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่าง HDPE และ TPS ได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นปริมาณ peroxide ที่ควรใช้ในปริมาณต่ำเนื่องจาก peroxide ทำปฏิกิริยากับ HDPE และ PP ที่แตกต่างกันโดยในกรณี PP peroxide สามารถทำให้เกิดการสลายตัวอย่างมากและเพิ่มปริมาณ maleic anhydride เพิ่มดูผลของการปรับปรุงความเข้ากันระหว่างเฟส

จากการติดตามค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมของพอลิเมอร์เบลนดระหว่างพอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผลิตอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS ในเครื่องผสมแบบปิดที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide และเปลี่ยนแปลงปริมาณของ maleic anhydride แสดงดังภาพที่ 4.54 จากกราฟพบว่า PP ที่ผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงไปเป็นสัดส่วน 30 % wt. ทำให้ค่าแรงบิดมีค่าลดลงเนื่องจาก TPS มีความเหนียวน้อยกว่า PP ที่อุณหภูมิผสมนี้ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับการผสมของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง HDPE และ TPS เมื่อดูอิทธิพลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide ในปริมาณ 0.05 phr ของพอลิเมอร์เบลนด พบว่าค่าแรงบิดมีค่าลดลงอย่างมากแสดงถึงการใส่ peroxide ใน PP ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของ PP อย่างมากแต่เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของ maleic anhydride จาก 0.1 phr ของแป้งเป็น 0.2 phr ของแป้งพบว่าค่าแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย

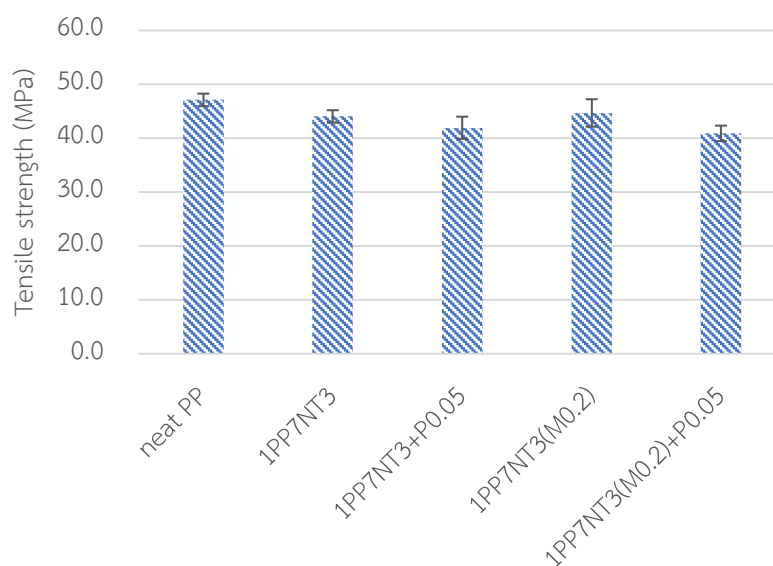


ภาพที่ 4.54 ค่าแรงบิดระหว่างกระบวนการเบลนระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่มีการเติม peroxide และเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride

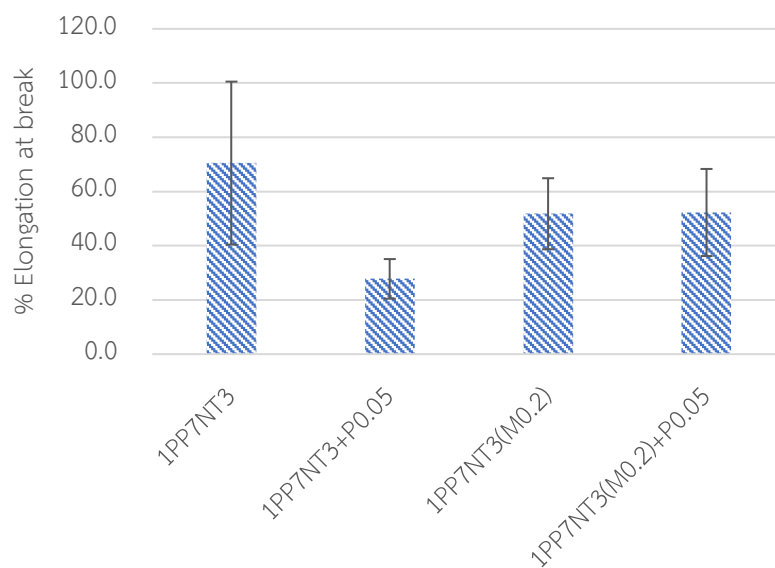
4.5.8. การศึกษาผลการเบลนระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนระหว่างพอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS และศึกษาอิทธิพลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide และผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride แสดงดังภาพที่ 4.55 ถึงภาพที่ 4.57 จากกราฟพบว่า PP ที่ผสม TPS ลงไปส่งผลให้ค่า tensile strength ลดลงจาก 47 MPa เป็น 44 MPa และ % Elongation at break ลดลงจาก 800% เหลือ 70% ซึ่งแสดงถึง PP และ TPS นี้ไม่เข้ากัน แต่ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 781 MPa เป็น 898 MPa จากการเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide ลงไปปริมาณ 0.05 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่าค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมลดลงอย่างเด่นชัดเนื่องจากการเติม peroxide ลงไปใน PP ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง ในกรณีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride จาก 0.1 phr ของแป้งเป็น 0.2 phr ของแป้งพบว่าค่าสมบัติเชิงกลต่างๆมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมที่ปริมาณ maleic anhydride 0.1

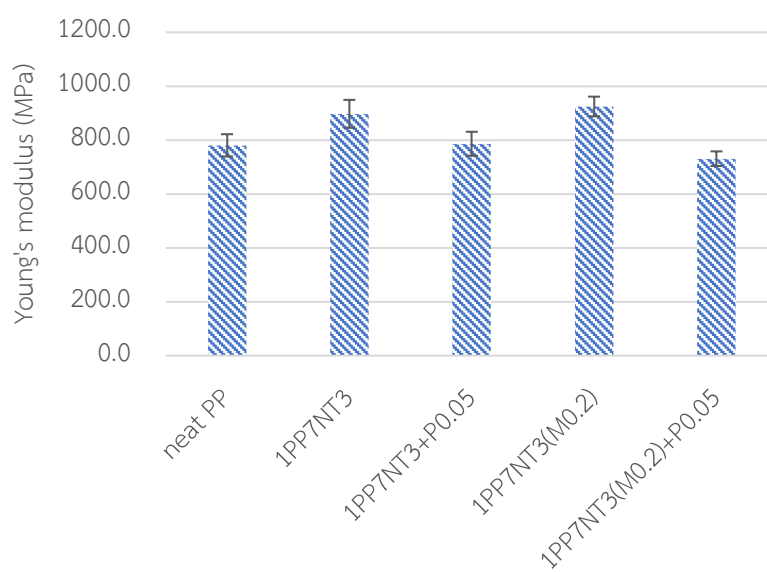
phr ของแบง์เมื่อใส่ peroxide ลงไปร่วมกับการเพิ่มปริมาณ maleic anhydride พบว่าไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดของสมบัติเชิงกล จากงานวิจัยของ M. Xi และคณะ[47] พบว่า PP/TPS ในสัดส่วน (70/30) แสดงการลดลงของ tensile strength จาก 21.3 MPa เป็น 17.8 MPa และจากงานวิจัยของ A. B. Martins และ Ruth Marlene Campomanes Santana[48] ทำการผสม PP/TPS ในสัดส่วน (70/30) โดยศึกษาผลการเติม PP-g-MA ในปริมาณ 3 wt.% พบว่า tensile strength ลดลงจาก 30.4 MPa เหลือ 15.5 MPa และ Elongation at break ลดลงจาก 536% เหลือ 73.4% เมื่อเทียบกับ neat PP แต่เมื่อเติม PP-g-MA พบว่าสามารถเพิ่ม tensile strength และ % Elongation at break เป็น 18.9 MPa และ 216% ตามลำดับแสดงถึงการเพิ่มความเข้ากันของ PP/TPS ด้วย PP-g-MA โดยยืนยันด้วยผลสัณฐานวิทยา



ภาพที่ 4.55 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ



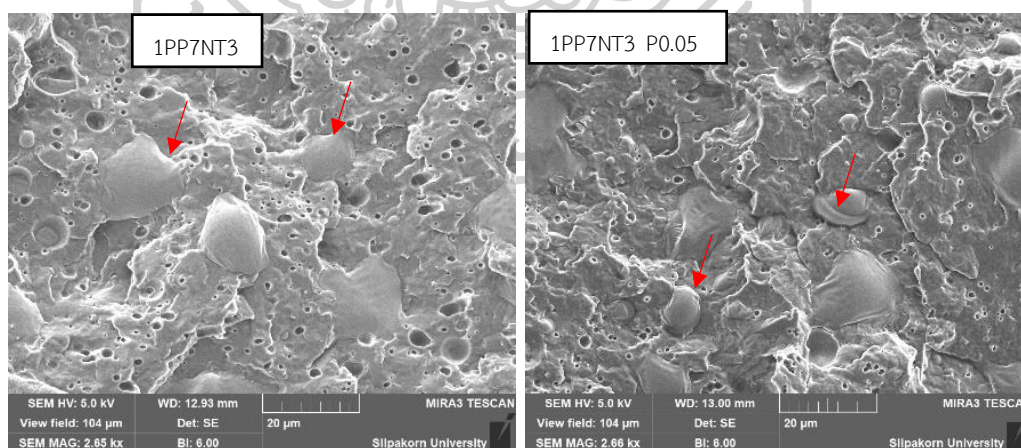
ภาพที่ 4.56 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

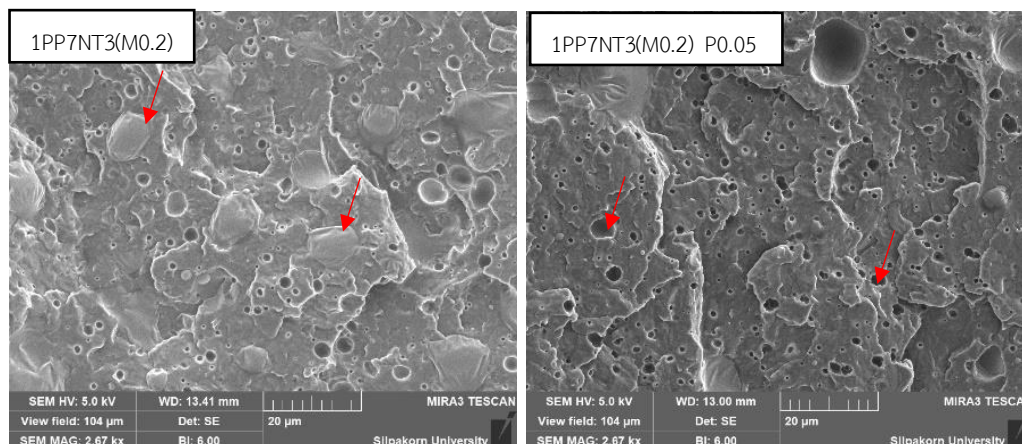


ภาพที่ 4.57 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PP และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

4.5.9. การศึกษาผลการเบลนดระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) และเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทชจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติแบบ one-step process ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

จากการทดสอบผลของการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทช (TPS) แบบ one-step process โดยให้สัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 % wt. ของ TPS และผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงดังภาพที่ 4.58 จากภาพพบว่าพอลิโพรพิลีนมีการแยกเฟสจาก TPS อย่างชัดเจนโดยขนาดอนุภาคของ TPS อยู่ในช่วง 10 ถึง 15 ไมโครเมตรและมีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันหรือ peroxide ภาพสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดมาก แต่เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride จาก 0.1 phr ของแป้งเป็น 0.2 phr ของแป้งพบว่าขนาดอนุภาคของ TPS มีขนาดที่เล็กลงเหลือ 3 ถึง 5 ไมโครเมตรซึ่งอาจแสดงถึงการเพิ่มความเข้ากันระหว่างเฟสทั้งสอง เมื่อดูผลของการใส่ peroxide ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride เป็น 0.2 phr ของแป้งแสดงขนาดอนุภาคที่มีแนวโน้มจะเล็กลงซึ่งแสดงถึงการใส่ปริมาณ peroxide ปริมาณ 0.05 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์และ maleic anhydride ปริมาณ 0.2 phr ของแป้งสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันระหว่างเฟสทั้งสองได้เล็กน้อย โดยสัมพันธ์กับผลสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด





ภาพที่ 4.58 ภาพสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติก
สตาร์ช

4.6. การศึกษาการจำลองการไหลในเครื่องผสมแบบปิดของพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้โปรแกรม Ansys fluent

ในการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม Ansys fluent พบว่าจะจำเป็นต้องหาค่าตัวแปรต่าง ๆ มาใช้ในการคำนวณตัวอย่างเช่นสมบัติการไหลหรือ viscosity model ที่ใช้ในการคำนวณ จากการศึกษาพบว่า viscosity model ที่ใช้กับ non-newtonian fluid ได้ดีคือ cross flow model โดยตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในสมการต้องนำมาจากการทำ non-linear fitting curve โดย Microsoft excel โดยเทียบกับผลจาก DMA ระหว่าง viscosity กับ shear rate แบบ frequency sweep ที่อุณหภูมิต่างๆ แต่เนื่องจาก TPS ที่เลือกทำในงานวิจัยนี้มี processing window ที่แคบหรืออุณหภูมิต่างๆ สามารถใช้ขึ้นรูปและทดสอบมีอยู่จำกัด อีกทั้งด้วยข้อจำกัดเรื่องเครื่องมือทดสอบจึงทำให้ยากต่อการทดสอบชิ้นงาน TPS ดังนั้นจึงเลือกใช้ผลจาก PLA ในการ fitting curve

จากการศึกษาการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys fluent ของพอลิแลคติกแอซิด โดยแบ่งการจำลองเป็นสองส่วนคือ shear stress ของพอลิแลคติกแอซิดโดยเทียบผลการจำลองกับผลค่าแรงบิดจากเครื่องผสมแบบปิดโดยติดตามค่า shear stress และ viscosity ของพอลิแลคติกแอซิดระหว่างกระบวนการผสมความสัมพันธ์ของความหนืด อุณหภูมิและแรงเฉือนจะคำนวณตาม cross flow model ตัวแปรที่ได้เหล่านั้นจะถูกนำมาแทนสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด การจำลองนี้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 140 160 และ 180 องศาเซลเซียสและความเร็วในการหมุน 40 60 และ 80 rpm อีกส่วนหนึ่งเป็นการศึกษาการไหลของพอลิแลคติกแอซิดโดยติดตามการจำลองการไหลและค่า shear stress และการเปลี่ยนแปลงเฟสจากของแข็งเป็นของเหลวโดยใช้ Solidification model ของ Ansys fluent

4.6.1. การศึกษา cross-flow model เพื่อหา parameter ต่างๆ

จากสมการ cross-flow model โดยทำการหาตัวแปรต่างๆ จากวิธีการ non-linear fitting curve ให้ผลการทดลองที่นำมาเทียบเป็นผลจาก dynamic mechanical analysis (DMA) ของพอลิแลคติกแอซิดทดลองแบบ frequency sweep ที่อุณหภูมิ 100 120 140 160 180 องศาเซลเซียส ในช่วงแรงเฉือนตั้งแต่ 300 ถึง 0.1 rad⁻¹ จากสมการเมื่อทำการ fitting curve พบว่าค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.13 พบว่า ค่า lamhda ไม่สามารถเป็นค่าเดียวได้ตามสมการของ cross-flow model ได้แต่ค่า lamhda จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างมากดังภาพที่ 4.59 ดังนั้น ในการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำการเปลี่ยนค่า lamhda ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองแต่ละครั้ง ซึ่งวิธีนี้อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการคำนวณได้ ในกรณีตัวแปรอื่นเช่นค่า power law index ค่า n มีค่าประมาณ 0.135 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจากการอ่านความชันของกราฟโดยแสดงดัง

สมการต่อไปนี้ โดยจากกราฟของ log-log viscosity กับ shear rate จะเห็นว่าความชันของเส้นตรงหรือช่วง pseudoplastic จะเท่ากับ $n - 1$

จากสมการ power law $\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}$

โดยที่ η หมายถึง ความหนืด

k หมายถึง consistency

n หมายถึง power law index

$\dot{\gamma}$ หมายถึง shear rate

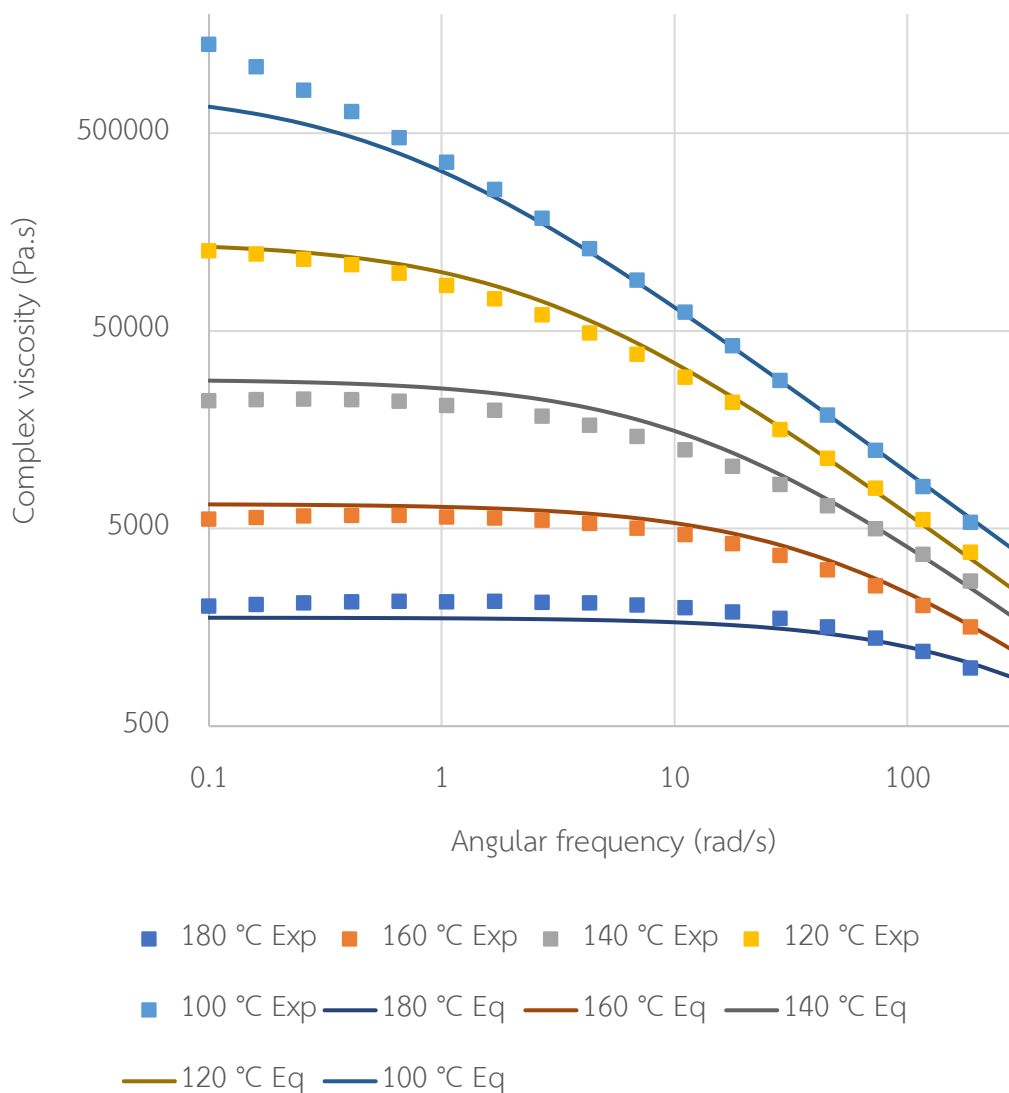
ดังนั้นจากความชันของกราฟที่ตำแหน่ง shear rate เท่ากับ 100 และ 10 s⁻¹ ที่ 100 องศาเซลเซียส

$$\text{slope} = \frac{\log \eta_1 - \log \eta_2}{\log \dot{\gamma}_1 - \log \dot{\gamma}_2}$$

$$\text{slope} = \frac{\log(12600) - \log(60500)}{\log(73) - \log(11.1)}$$

$$\text{slope} = \frac{4.100 - 4.782}{1.863 - 1.045} = \frac{-0.682}{0.818} = 0.834$$

ดังนั้นจากผลการคำนวณความชันจะได้ power law index เท่ากับ $1 - 0.834 = 0.166$ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลการ fitting curve ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qi Fang และ Milford A. Hanna[49] โดยทางผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางรีอโลยีของ amorphous และ semicrystalline PLA พบว่า ที่ 150 และ 170 องศาเซลเซียสมีค่า power law index อยู่ที่ 0.1668 และ 0.2903 ตามลำดับ



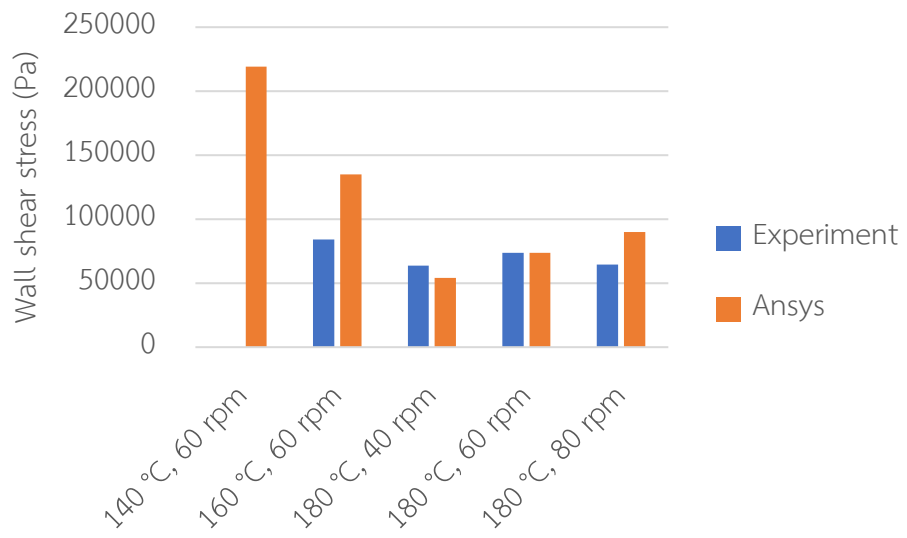
ภาพที่ 4.59 กราฟ complex viscosity กับ angular frequency ที่อุณหภูมิต่างๆ ของ PLA และผลการ fitting curve โดยจุดแสดงผลการทำ DMA ส่วนเส้นกราฟเป็นผลจากการ fitting curve

ตารางที่ 4.13 Viscosity (kg/m.s) parameters จาก cross-flow model

Parameters	Values
Zero-shear viscosity (η_0)	6.401068×10^7 kg/m.s
Power law index (n)	0.135
Time constant, lambda (λ)	
At 180 °C (453 K)	0.0035
At 160 °C (433 K)	0.02
At 140 °C (413 K)	0.1
At 120 °C (393 K)	0.5
At 100 °C (373 K)	1.7
Reference time (T_α)	331.5868 K
Activation energy/R, (α)	12,985.49 K

4.6.2. การศึกษาผลของความเร็วและอุณหภูมิที่มีต่อความเร็วและ shear stress

จากผลการจำลองในโปรแกรม Ansys โดยศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วในการหมุนเทียบกับการคำนวณจากค่าแรงบิดในเครื่องผสมแบบปิดแสดงดังภาพที่ 4.60 จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการจำลองการไหลโดยให้อุณหภูมิที่ผนังและใบกวนเป็น 140 160 และ 180 องศาเซลเซียสแสดงการ wall shear stress ที่ลดลงตามอุณหภูมิอย่างมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบการคำนวณจาก Ansys กับการคำนวณจากค่าแรงบิดจะพบว่าที่ 140 องศาเซลเซียสในเครื่องผสมแบบปิดไม่สามารถหลอมเม็ด PLA ได้ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่า wall shear stress จากค่าแรงบิดได้ เมื่อเปรียบเทียบ wall shear stress จากผลทั้งสองอุณหภูมิพบว่าค่า wall shear stress จากโปรแกรม Ansys มีค่ามากกว่าการคำนวณจากค่าแรงบิดโดยรวมโดยที่สภาวะ 180 องศาเซลเซียส ความเร็วใบกวน 60 rpm มีค่า wall shear stress ใกล้เคียงมากที่สุด ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเนื่องจากการคำนวณของโปรแกรม Ansys ในช่วงที่จำลองเป็นเพียงเวลาส่วนหนึ่งในช่วงเวลาในการผสมแค่ 1 วินาทีเทียบกับความเป็นจริงโดยถ้าสามารถคำนวณต่อโดยให้เวลาในการคำนวณมากกว่านี้อาจมีค่า wall shear stress ที่ลดลงจนใกล้เคียงได้ เช่นเดียวกันเมื่อดูผลของความเร็วใบกวนที่ 40 60 และ 80 rpm จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Ansys แสดงการลดลงของ wall shear stress ตามความเร็วของใบกวนที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบค่า wall shear stress มีค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณจากค่าแรงบิด



ภาพที่ 4.60 แผนภูมิเปรียบเทียบค่า wall shear stress จากโปรแกรม Ansys กับการคำนวณจากค่าแรงบิด (experimental)



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตรช์โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (NT) โดยเติมและไม่เติมกรดซิตริกและ maleic anhydride จากการศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซออร์ปริมาณ 25 และ 30 phr เพื่อเตรียม TPS จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติพบว่า ที่ปริมาณกลีเซอรอล 25 phr ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นตลอดการผสมเพื่อทำ TPS แสดงว่ากลีเซอรอล 25 phr ไม่เพียงพอต่อการเตรียม TPS ที่เสถียร ปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมสำหรับเตรียม TPS จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติคือ 30 phr ของแป้ง แต่ TPS ที่ได้มีความเหนียวสูง จากการศึกษาเติมยาง EVA ลงไปเพื่อช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงาน TPS และปรับปรุงสมบัติที่เปราะของ TPS พบว่าการเติมยาง 5 phr ไม่ส่งผลต่อค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างการผสม แต่การเติมยาง EVA ส่งผลให้สามารถเตรียมชิ้นตัวอย่างจากการอัดเข้าเบ้าได้ และส่งผลสมบัติเชิงกล tensile strength และ Young's modulus มีค่าลดลง เพื่อลดความเหนียวของ TPS และเพิ่มความเข้ากันของ TPS กับ EVA จึงเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride พบว่าความเหนียวลดลงจาก hydrolysis reaction อีกทั้งการเติมกรดซิตริก (1 phr) และ maleic anhydride (0.1phr) ยังช่วยปรับปรุงความเข้ากันระหว่าง TPS และยาง EVA และเพิ่มสมบัติเชิงกลโดยรวมของ TPS โดย TPS สูตร NT95/30(C1M0.1) มีขนาดอนุภาคยาง EVA เล็กสุดการเข้ากันดีที่สุดและมีสมบัติเชิงกลที่ดี

เมื่อเปลี่ยนแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติเป็นแป้งมันสำปะหลังดัดแปลง etherified หรือในชื่อ Kreation FM; KFM โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์โดยเติมและไม่เติม กรดซิตริกและ maleic anhydride พบว่าที่ปริมาณกลีเซอรอลทั้ง 25 และ 30 phr สามารถเตรียม TPS เสถียรได้ ซึ่งต่างจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ อาจเนื่องจากแป้ง KFM น้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า การเติมยาง EVA (5phr) พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่า TPS จากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ การเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่ไม่แสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนถึงผลของการเติมกรดซิตริกและ maleic anhydride ในสัณฐานวิทยา

การเบลนดระหว่าง TPS และ PLA แบบ two step process โดยเติมหรือไม่เติม peroxide และ/หรือ Joncryl พบว่าการเพิ่มปริมาณ TPS ส่งผลให้ค่าแรงบิดและค่าดัชนีการไหล และ สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก Young's modulus และ Tensile strength มีค่าลดลง การเติม peroxide และ Joncryl ส่งผลโดยตรงต่อความเหนียวของเบลนด์ โดยเฉพาะ Joncryl และส่งผลต่อการเพิ่ม

สมบัติเชิงกล โดยเฉพาะที่ปริมาณ TPS 30 % wt. Tensile strength และ elongation at break ที่มีค่าสูงอย่างเด่นชัด แสดงถึง peroxide (0.2 phr) และ Joncryl (1 phr) ช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่าง PLA และ TPS ซึ่งยืนยันด้วยสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ ที่มีขนาดอนุภาค TPS เล็กและละเอียด การเบลนด์ PLA/TPS ใน one step process ไม่ต้องมีขั้นตอนการเตรียม TPS ในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ พบว่าเมื่อพอลิเมอร์เบลนด์ที่สัดส่วน TPS 30 % wt. ที่เติม peroxide (0.2 phr) และ Joncryl (1 phr) มีค่าดัชนีการไหล 9.63 g/10 min มีสมบัติเชิงกล Tensile strength และ Young's modulus ใกล้เคียงกับ neat PLA อีกทั้งที่สัดส่วนนี้ยังเกิด cold drawing ขณะทดสอบ tension แสดงถึงสมบัติที่เหนียวของพอลิเมอร์เบลนด์ จากสัญญาณวิทยาพบว่าการกระจายตัวของอนุภาค TPS ที่ละเอียดน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงถึงการเข้ากันระหว่าง TPS และ PLA และยืนยันด้วยผล Molau test และ FTIR โดยสูตรที่ดีที่สุดคือ 1LX7NT3_P0.2J1.0

การศึกษาระบบเบลนด์ระหว่าง HDPE PP กับ TPS ที่ปริมาณ 30 wt.% พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ maleic anhydride ในแบ่งเป็น 0.2 phr ของแบ่งโดยมี peroxide ในระบบปริมาณ 0.05 phr ของพอลิเมอร์เบลนด์แสดงถึงการเพิ่มความเข้ากันของ HDPE PP กับ TPS ได้โดยดูจากสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ในด้าน Tensile strength และ Young's modulus มีค่าลดลงไม่มาก

ในส่วนการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys fluent ของพอลิแลคติกแอซิดโดยติดตามการคำนวณ wall shear stress จากโปรแกรมเทียบกับการคำนวณจากค่าแรงบิดพบว่าจากการเปลี่ยนตัวแปรอุณหภูมิและความเร็วในการหมุนใบกวนแสดงถึงการค่า wall shear stress จากโปรแกรม Ansys จะมีค่ามากกว่าผลจากการคำนวณค่าแรงบิด โดยค่าที่ใกล้เคียงที่สุดอยู่ที่สภาวะ 180 องศาเซลเซียส ความเร็วใบกวนอยู่ที่ 60 rpm โดยรวมค่า wall shear stress มีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับผลจากการคำนวณจากค่าแรงบิด ในส่วนการติดตามการหลอมของพอลิเมอร์หรือ solidification ในโปรแกรม Ansys พบว่าเราสามารถติดตามการหลอมของพอลิเมอร์ได้แต่ค่า wall shear stress ยังไม่แม่นยำเนื่องจากสภาวะและ assumption ที่ตั้งไว้

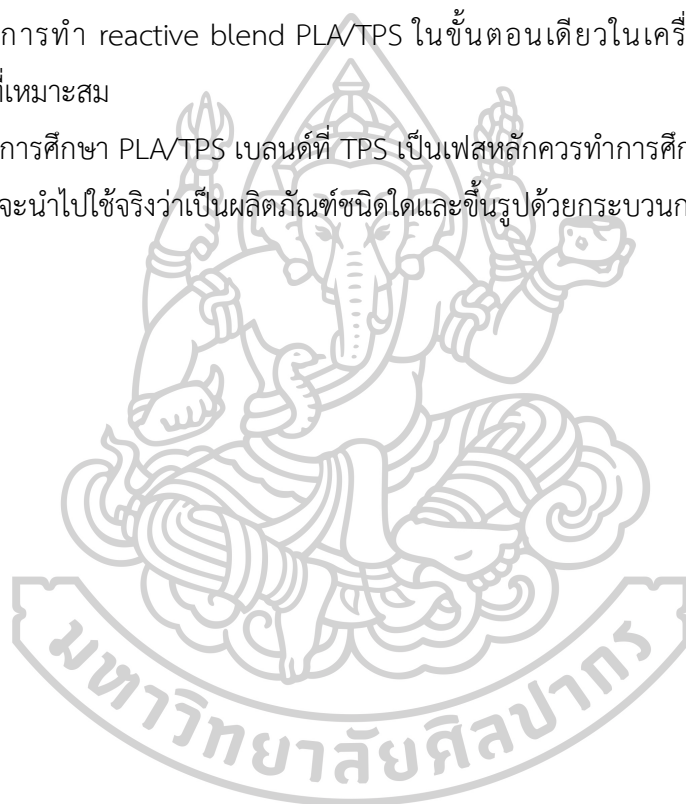
5.2. ข้อเสนอแนะ

5.2.1. จากการศึกษาพบว่าแป้ง และ TPS มีการดูดซับความชื้นที่รวดเร็ว ความชื้นที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของ PLA/TPS เบลนด์อีกด้วยดังนั้นควรมีการเก็บตัวอย่างและควบคุมสภาวะในการทดสอบให้แม่นยำและแน่นอน

5.2.2. การติดตามผล retrogradation ของ TPS ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและผลึกที่อาจเกิดด้วยการผสมพลาสติกไซเซอร์สองชนิดคือกลีเซอรอลและ polysorb เข้าด้วยกันเป็น การศึกษาต่อไป

5.2.3. การทำ reactive blend PLA/TPS ในขั้นตอนเดียวในเครื่องอัดรีดสกรูคู่จึงเป็น กระบวนการที่เหมาะสม

5.2.4. การศึกษา PLA/TPS เบลนด์ที่ TPS เป็นเฟสหลักควรทำการศึกษาต่อไป การศึกษาควร คำนึงถึงการที่จะนำไปใช้จริงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใดและขึ้นรูปด้วยกระบวนการใด



รายการอ้างอิง

Reference

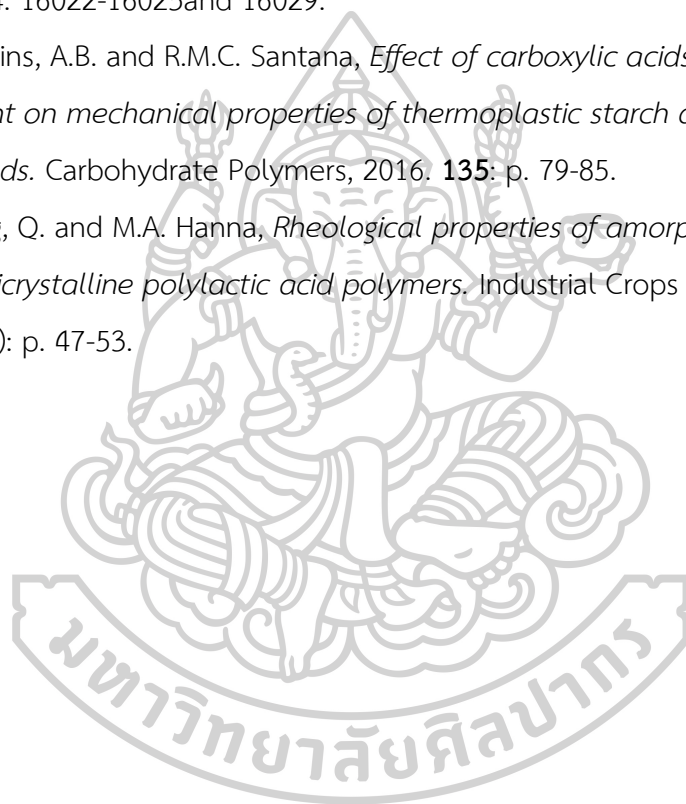
1. Kong, R.S.a.I., *Thermoplastic Starch*. Thermoplastic elastomers. 2012: InTech. 416.
2. Souza, R.C.R. and C.T. Andrade, *Processing and properties of thermoplastic starch and its blends with sodium alginate*. Journal of Applied Polymer Science, 2001. **81**(2): p. 412-420.
3. NIPPON STARCH CHEMICAL CO., L. *Amylose & Amylopectin*. 2012; Available from: <http://www.nichidene.com/eng-approach.htm>.
4. Prachayawarakorn, Y.T.a.J., *Effect of starch types on properties of biodegradable polymer based on thermoplastic starch process by injection molding technique*. Songklanakarin J. Sci. Technol., 2015. **37**(2): p. 193-199.
5. รัตนาปนนท์, ผ.ด.พ.พ.แ.ศ.ด.น. สตาร์ช/*Starch*. 2556; Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0501/starch-%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%8B>.
6. Rempel, Y.Z.a.C., *Retrogradation and Antiplasticization of Thermoplastic Starch*. Thermoplastic Elastomers. 2012: InTech. 416.
7. Hulleman, S.H.D., F.H.P. Janssen, and H. Feil, *The role of water during plasticization of native starches*. Polymer, 1998. **39**(10): p. 2043-2048.
8. Da Roz, A.L., et al., *The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing*. Carbohydrate Polymers, 2006. **63**(3): p. 417-424.
9. Averous, L., et al., *Properties of thermoplastic blends: starch-polycaprolactone*. Polymer, 2000. **41**(11): p. 4157-4167.
10. Zuo, Y.F., et al., *Preparation and characterization of dry method esterified starch/poly(lactic acid) composite materials*. International Journal of Biological Macromolecules, 2014. **64**: p. 174-180.
11. Zuo, Y.F., et al., *Synthesis and characterization of maleic anhydride esterified*

- corn starch by the dry method*. International Journal of Biological Macromolecules, 2013. **62**: p. 241-247.
12. Shi, R., et al., *Ageing of soft thermoplastic starch with high glycerol content*. Journal of Applied Polymer Science, 2007. **103**(1): p. 574-586.
 13. Ortega-Toro, R., et al., *Improvement of properties of glycerol plasticized starch films by blending with a low ratio of polycaprolactone and/or polyethylene glycol*. Food Hydrocolloids, 2016. **56**: p. 9-19.
 14. Viguie, J., S. Molina-Boisseau, and A. Dufresne, *Processing and characterization of waxy maize starch films plasticized by sorbitol and reinforced with starch nanocrystals*. Macromolecular Bioscience, 2007. **7**(11): p. 1206-1216.
 15. Teixeira, E.M., et al., *The effect of glycerol/sugar/water and sugar/water mixtures on the plasticization of thermoplastic cassava starch*. Carbohydrate Polymers, 2007. **69**(4): p. 619-624.
 16. Ma, X.F., J.G. Yu, and F. Jin, *Urea and formamide as a mixed plasticizer for thermoplastic starch*. Polymer International, 2004. **53**(11): p. 1780-1785.
 17. Shi, R., et al., *Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch prepared by melt blending*. Carbohydrate Polymers, 2007. **69**(4): p. 748-755.
 18. Mao, L.J., et al., *Extruded cornstarch-glycerol-polyvinyl alcohol blends: Mechanical properties, morphology, and biodegradability*. Journal of Polymers and the Environment, 2000. **8**(4): p. 205-211.
 19. Rungrojchaipon, P., *Glycerol: Utilization for Hydrogen Production*. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 23, 2014(2): p. 140-159.
 20. Perry, R.H., Green, D.W., Maloney, J.O.H., *Perry's chemical engineers' handbook*, ed. 7. 1997: McGraw-Hill.
 21. Kullabs. *GLYCEROL AND ETHER*. 2016; Available from: <https://www.kullabs.com/class-10/science/chemistry/hydrocarbon-and-their-derivatives/glycerol-and-ether>.
 22. กระทรวงอุตสาหกรรม, ส. กรดซิตริก. 2559; Available from: <http://www.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/146-6034.pdf>.
 23. Liu, Z.Q., X.S. Yi, and Y. Feng, *Effects of glycerin and glycerol monostearate on*

- performance of thermoplastic starch*. Journal of Materials Science, 2001. **36**(7): p. 1809-1815.
24. Sahari, J., et al., *Thermo-mechanical behaviors of thermoplastic starch derived from sugar palm tree (Arenga pinnata)*. Carbohydrate Polymers, 2013. **92**(2): p. 1711-1716.
 25. Wang, N., J. Yu, and X. Ma, *Preparation and characterization of thermoplastic starch/PLA blends by one-step reactive extrusion*. Vol. 56. 2007. 1440-1447.
 26. Li, H. and M. A. Huneault, *Effect of Chain Extension on the Properties of PLA/TPS Blends*. Vol. 122. 2011. 134-141.
 27. Knitter, M. and M. Dobrzynska-Mizera, *Mechanical Properties of Isotactic Polypropylene Modified with Thermoplastic Potato Starch*. Mechanics of Composite Materials, 2015. **51**(2): p. 245-252.
 28. Pang, M.M., M.Y. Pun, and Z.A.M. Ishak, *Degradation studies during water absorption, aerobic biodegradation, and soil burial of biobased thermoplastic starch from agricultural waste/polypropylene blends*. Journal of Applied Polymer Science, 2013. **129**(6): p. 3656-3664.
 29. Bousmina, M., A. Ait-Kadi, and J. B. J. Faisant, *Determination of Shear Rate and Viscosity From Batch Mixer Data*. Vol. 43. 1999. 415-433.
 30. Arruda, L.C., et al., *Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends*. Polymer Testing, 2015. **43**: p. 27-37.
 31. Zullo, R. and S. Iannace, *The effects of different starch sources and plasticizers on film blowing of thermoplastic starch: Correlation among process, elongational properties and macromolecular structure*. Carbohydrate Polymers, 2009. **77**(2): p. 376-383.
 32. Forsell, P.M., et al., *Phase and glass transition behaviour of concentrated barley starch-glycerol-water mixtures, a model for thermoplastic starch*. Carbohydrate Polymers, 1997. **34**(4): p. 275-282.
 33. Battegazzore, D., et al., *Isosorbide, a green plasticizer for thermoplastic starch that does not retrograde* Carbohydrate Polymers. 2014.

34. Altskär, A., et al., *Some effects of processing on the molecular structure and morphology of thermoplastic starch*. Carbohydrate Polymers, 2008. **71**(4): p. 591-597.
35. Yu, J.G., N. Wang, and X.F. Ma, *The effects of citric acid on the properties of thermoplastic starch plasticized by glycerol*. Starch-Starke, 2005. **57**(10): p. 494-504.
36. Raquez, J.M., et al., *Maleated thermoplastic starch by reactive extrusion*. Carbohydrate Polymers, 2008. **74**(2): p. 159-169.
37. Olivato, J.B., et al., *Citric acid and maleic anhydride as compatibilizers in starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends by one-step reactive extrusion*. Carbohydrate Polymers, 2012. **87**(4): p. 2614-2618.
38. Abdollahi Moghaddam, M.R., S. Razavi, and Y. Jahani, *Effects of Compatibilizer and Thermoplastic Starch (TPS) Concentration on Morphological, Rheological, Tensile, Thermal and Moisture Sorption Properties of Plasticized Polylactic Acid/TPS Blends*. 2018.
39. Zhang, Y., et al., *The Effect of Polymeric Chain Extenders on Physical Properties of Thermoplastic Starch and Polylactic Acid Blends*. Vol. 19. 2011.
40. Huneault, M.A. and H.B. Li, *Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends*. Polymer, 2007. **48**(1): p. 270-280.
41. S. Schmitz, C., et al., *Cassava starch functional properties by etherification - Hydroxypropylation*. Vol. 41. 2006. 681-687.
42. Senanayake, S., et al., *Effect of Hydroxypropylation on Functional Properties of Different Cultivars of Sweet Potato Starch in Sri Lanka*. 2014.
43. Gunaratne, A. and H. Corke, *Effect of hydroxypropylation and alkaline treatment in hydroxypropylation on some structural and physicochemical properties of heat-moisture treated wheat, potato and waxy maize starches*. Vol. 68. 2007. 305-313.
44. Kishida, T., Y. Nakai, and K. Ebihara, *Hydroxypropyl-Distarch Phosphate from Tapioca Starch Reduces Zinc and Iron Absorption, but not Calcium and Magnesium Absorption, in Rats*. Vol. 131. 2001. 294-300.
45. Wootthikanokkhan, J., et al., *Preparation of modified starch-grafted poly(lactic*

- acid*) and a study on compatibilizing efficacy of the copolymers in poly(lactic acid)/thermoplastic starch blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012. **126**: p. E388-E395.
46. Taguet, A., et al., *Toughening mechanisms in interfacially modified HDPE/thermoplastic starch blends*. *Carbohydrate Polymers*, 2014. **114**: p. 222-229.
47. Xi, M., et al., *Effect of compatibilizer on properties of PP/TPS blends*. Vol. 45. 2014. 16022-16025 and 16029.
48. Martins, A.B. and R.M.C. Santana, *Effect of carboxylic acids as compatibilizer agent on mechanical properties of thermoplastic starch and polypropylene blends*. *Carbohydrate Polymers*, 2016. **135**: p. 79-85.
49. Fang, Q. and M.A. Hanna, *Rheological properties of amorphous and semicrystalline polylactic acid polymers*. *Industrial Crops and Products*, 1999. **10**(1): p. 47-53.





ภาคผนวก

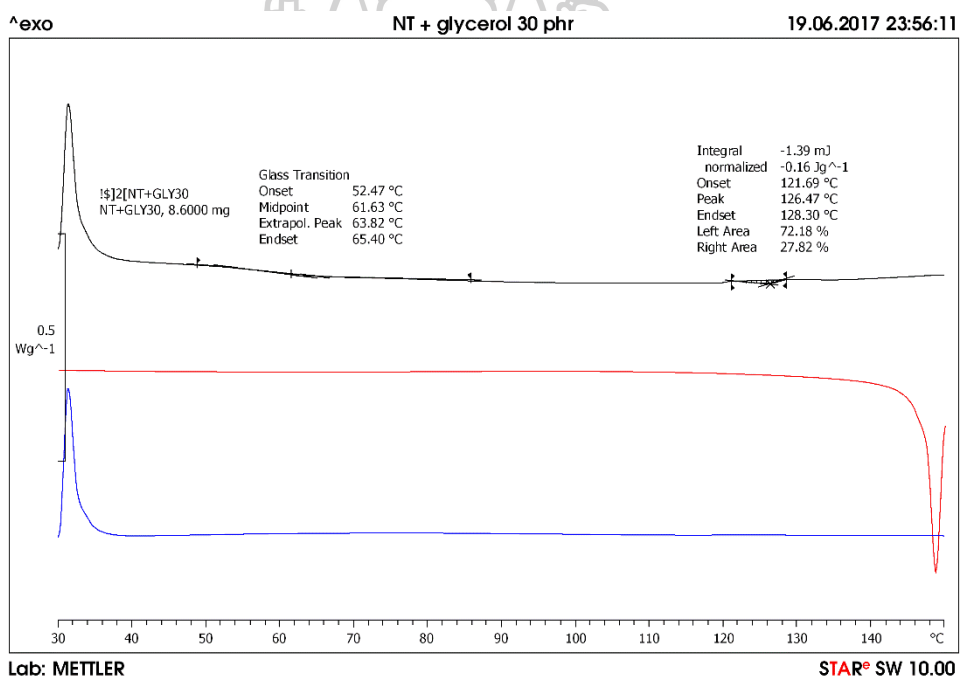


ภาคผนวก ก

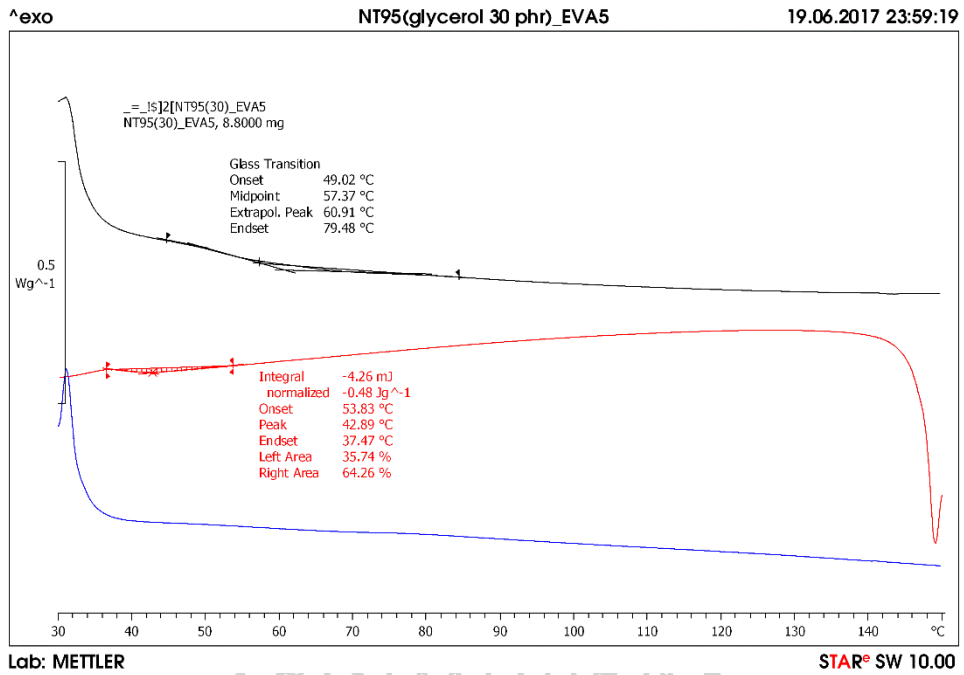
ข้อมูลและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเมอร์เบลนด์

ตารางภาคผนวก ก. 1 ผล DSC ของ
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

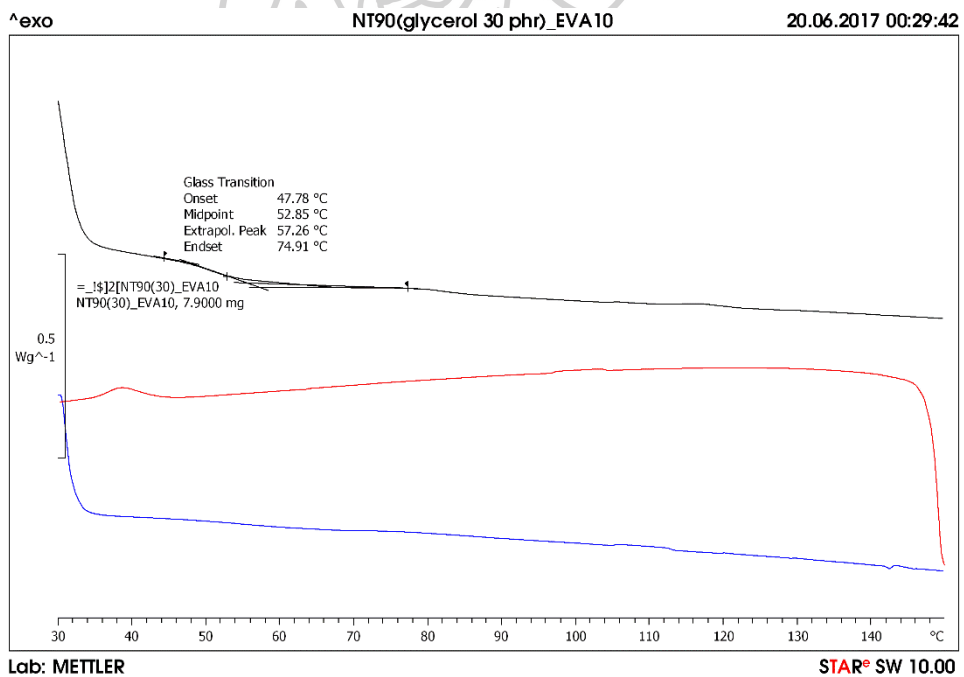
สูตรในการทดลอง	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
NT100/30	61.63
NT95/30	57.97
NT90/30	52.85
NT95/30(C1)	51.85
NT95/30(M0.1)	48.65
NT95/30(C1M0.1)	50.35



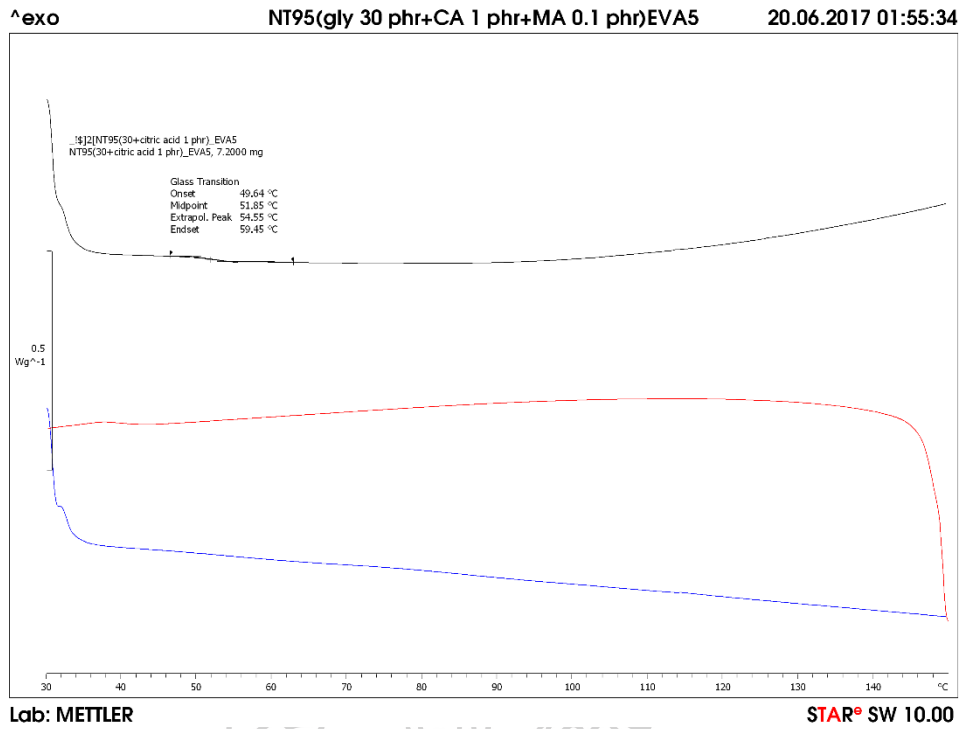
ภาพภาคผนวก ก. 1 DSC thermograph ของ NT100/30



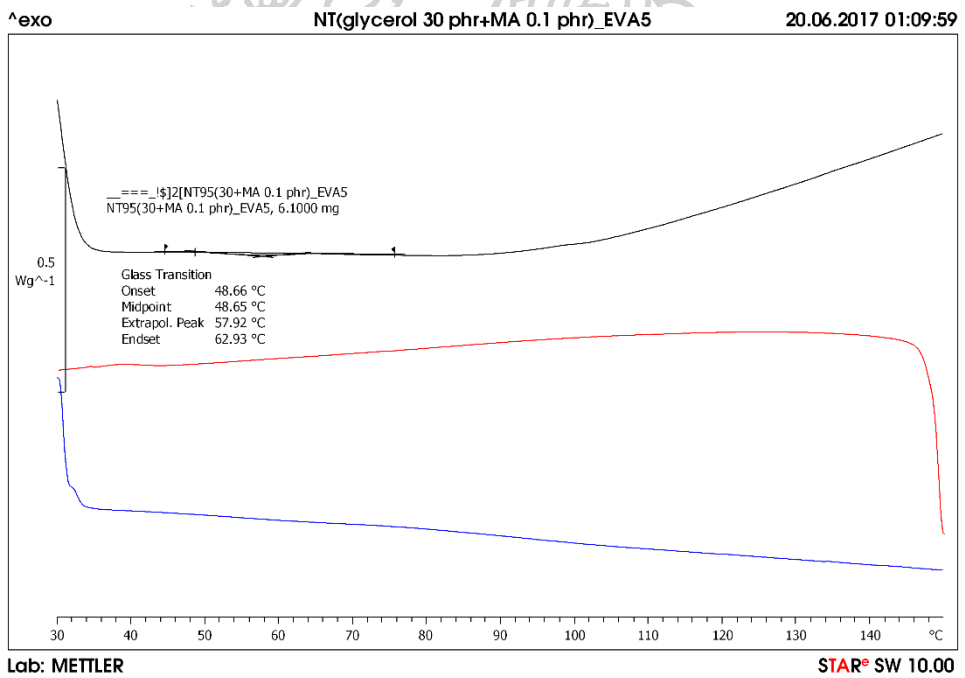
ภาพภาคผนวก ก. 2 DSC thermograph ของ NT95/30



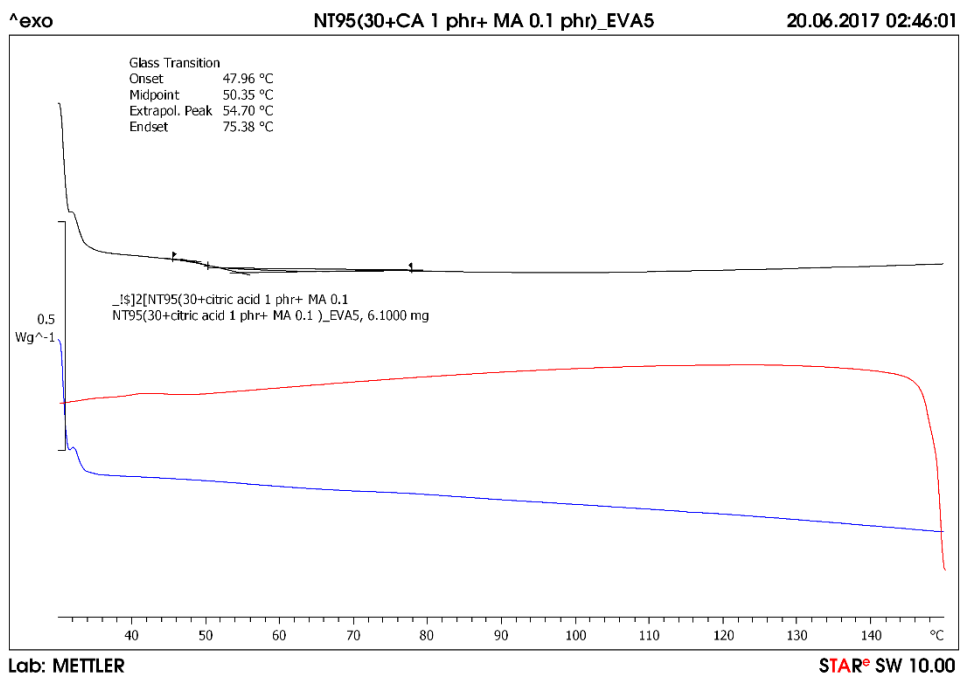
ภาพภาคผนวก ก. 3 DSC thermograph ของ NT90/30



ภาพภาคผนวก ก. 4 DSC thermograph ของ NT95/30(C1)



ภาพภาคผนวก ก. 5 DSC thermograph ของ NT95/30(M0.1)



ภาพภาคผนวก ก. 6 DSC thermograph ของ NT95/30(C1M0.1)

ตารางภาคผนวก ก. 2 ผลการคำนวณการดูดซับความชื้นเทียบกับเวลาในการทดสอบ

วัน/เวลา	ΔT (hr)	ΣT (hr)	%weight difference			
			1	2	3	4
Start	0	0	0	0	0	0
22/11/60, 14.00	1	1	0.186443	0.169321	0.22407	0.228938
22/11/60, 15.00	1	2	0.268256	0.246592	0.323927	0.345602
22/11/60, 17.00	2	4	0.392657	0.356685	0.474484	0.518787
22/11/60, 19.00	2	6	0.488976	0.439659	0.588743	0.648598
22/11/60, 23.00	4	10	0.645416	0.571179	0.754388	0.838616
23/11/60, 09.00	10	20	0.860192	0.778395	1.023948	1.161758
23/11/60, 13.00	4	24	0.927164	0.831134	1.093139	1.248512
23/11/60, 17.00	4	28	0.987443	0.887971	1.173122	1.340765
23/11/60, 21.00	4	32	1.037903	0.937808	1.218432	1.415131
24/11/60, 09.00	12	44	1.173792	1.049817	1.350673	1.596585
24/11/60, 13.00	4	48	1.220217	1.089045	1.397021	1.64657

ตารางภาคผนวก ก. 2 ผลการคำนวณการดูดซับความชื้นเทียบกับเวลาในการทดสอบ

วัน/เวลา	ΔT (hr)	ΣT (hr)	%weight difference			
			1	2	3	4
24/11/60, 17.00	4	52	1.243143	1.110279	1.422862	1.697587
24/11/60, 21.00	4	56	1.279088	1.142542	1.453899	1.740739
25/11/60, 09.00	12	68	1.35499	1.208141	1.523122	1.845603
25/11/60, 13.00	4	72	1.38037	1.224072	1.538733	1.878829
25/11/60, 17.00	4	76	1.410324	1.246495	1.563971	1.920166

โดย Sample 1 คือ 1LX7NT3

Sample 2 คือ 1LX7NT3_P0.2J1.0

Sample 3 คือ 1LX6NT4_P0.2J1.0

Sample 4 คือ 1LX7KFM3_P0.2J1.0

ตารางภาคผนวก ก. 3 ผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันโรปริมาณต่างๆ

Samples	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
neat HDPE	38 ± 1.8	958 ± 176.3	869 ± 97.1
1HD7NT	32 ± 2.1	72.5 ± 31.9	930 ± 73.4
1HD7NT_P0.02	34 ± 1.1	61.3 ± 35.1	940 ± 59.3
1HD7NT_P0.05	33 ± 1.5	51.3 ± 11.6	922 ± 40.5
1HD7NT_P0.1	34 ± 1.4	62.7 ± 12.5	936 ± 51.6

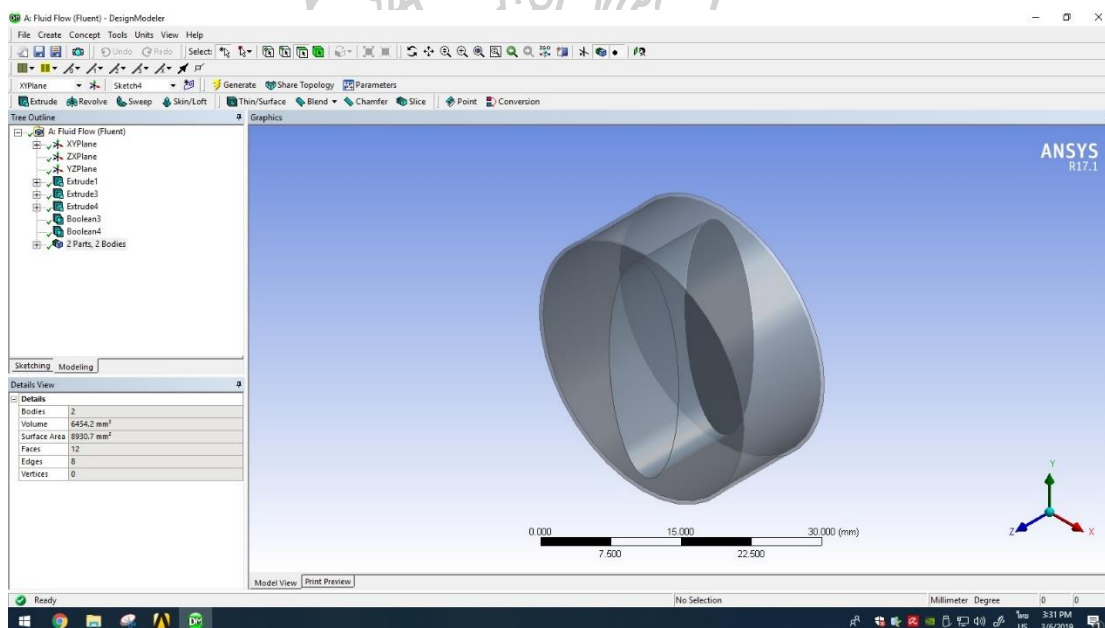
ตารางภาคผนวก ก. 4 ผลสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง HDPE และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณ maleic anhydride ในปริมาณต่างๆ

Samples	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
1HD7NT3_P0.05	33 ± 1.5	51.3 ± 11.6	922 ± 40.5
1HD7NT3(M0.2)_P0.05	38 ± 1.6	92.3 ± 20.9	935 ± 26.7
1HD7NT3(M0.3)_P0.05	39 ± 2.0	99.3 ± 46.7	985 ± 53.6

1HD7NT3(M0.5)_P0.05	39 ± 0.5	58.4 ± 20.6	962 ± 36.2
1HD7NT3(M1.0)_P0.05	38 ± 1.4	14.1 ± 7.4	947 ± 38.5

ตารางภาคผนวก ก. 5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิโพรพิลีนและเทอร์โมพลาสติกสตาอรัซ

Samples	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
neat PP	47 ± 1.2	807 ± 27.0	781 ± 41.4
1PP7NT3	44 ± 1.2	70.5 ± 30.1	898 ± 51.8
1PP7NT3+P0.05	42 ± 2.1	27.8 ± 7.3	787 ± 44.5
1PP7NT3(M0.2)	45 ± 2.5	51.8 ± 13.1	925 ± 36.6
1PP7NT3(M0.2)+P0.05	41 ± 1.4	52.3 ± 16.1	731 ± 27.1



ภาพภาคผนวก ก. 7 รูปทรงของไบควอนและผนังในการจำลองการไหลโดยโปรแกรม Ansys fluent

ตารางภาคผนวก ก. 6 สมมติฐานการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys fluent

Assumption	
Ansys fluent	ให้ผนังและใบกวนมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนด ให้ผนังทุกส่วนไม่มีการลื่นหรือ No slip
Polymer properties	กำหนดการไหลแบบ laminar flow ให้ตัวแปร density, heat capacity ของพอลิเมอร์มีค่าคงที่

ตารางภาคผนวก ก. 7 เงื่อนไขของขอบเขตของการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys fluent

Boundary condition	
Ansys fluent	<p>กำหนดการคำนวณแบบสามมิติ</p> <p>กำหนดการคำนวณ Pressure based</p> <p>กำหนดตัวแปรเวลาเป็น time-transcient</p> <p>กำหนดให้เปิด rotating mesh หมุนตามแกน z ด้วยความเร็ว 40 ถึง 80 rpm</p> <p>ให้อุณหภูมิผนังและใบกวนอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส</p> <p>ให้อุณหภูมิพอลิเมอร์เริ่มต้นเป็น 127 องศาเซลเซียสเพื่อดูการหลอมหรือ Solidification และ 180 องศาเซลเซียสเพื่อดู shear stress ที่เกิดในระบบ</p> <p>กำหนดให้พอลิเมอร์มีเฟสเดียว (พอลิเมอร์เท่านั้น)</p> <p>กำหนด Solution</p> <p>Time step size: 0.001 s</p> <p>Number of time step: 10,000</p> <p>Max iteration/time step: 5</p> <p>Reporting interval: 1</p> <p>Profile update interval: 1</p>
Polymer Properties (Polylactic acid)	<p>ความหนาแน่นมีค่า $1,250 \text{ kg/m}^3$</p> <p>Heat capacity มีค่า 4182 J/kg.K</p> <p>Thermal conductivity มีค่า 0.13</p> <p>Viscosity (kg/m.s) จาก cross-flow model</p>

ตารางภาคผนวก ก. 7 เงื่อนไขของขอบเขตของการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม Ansys fluent

Boundary condition

Zero-shear viscosity (η_0):	6.401068x10 ⁷	kg/m.s
Power law index (n):	0.135	
Time constant, lambda (λ):	0.003536 s	
Reference time (T_α):	331.5868 K	
Activation energy/R, (α)	12,985.49 K	
Pure solvent melting point:	6160 J/kg	
Solidus temperature:	420.21 K	
Liquidus temperature:	434.32 K	

ตารางภาคผนวก ก. 8 ผลการคำนวณ shear stress จากโปรแกรม Ansys fluent เปรียบเทียบผลการคำนวณจากค่าแรงบิด

condition	shear stress (MPa)	
	experiment	Ansys
140 °C, 60 rpm	n/a	219193.2
160 °C, 60 rpm	84288.91	135076.5
180 °C, 40 rpm	63502.22	54244.63
180 °C, 60 rpm	73552.93	73897.86
180 °C, 80 rpm	64415.92	90084.88



ข-1 การคำนวณค่า wall shear stress จากค่าแรงบิด

$$\tau_{r\theta} \left(R_{\frac{1}{2}} \right) = \frac{2\Gamma}{\pi L (R_e + R_i)^2 (1 + g^{n+1})}$$

เมื่อกำหนดให้

$\tau_{r\theta} \left(R_{\frac{1}{2}} \right)$	คือ ค่า shear stress ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกระบอก
Γ	คือ ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้น
L	คือ ความยาวของใบกวน
R_e	คือ ความยาวรัศมีของผนังกระบอก
R_i	คือ ความยาวรัศมีของใบกวนเฉลี่ย
g	คือ gear ratio
n	คือ power law index

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณ shear stress จากค่าแรงบิดของพอลิแลคตีดแอซิด โดยกำหนดตัวแปรดังต่อไปนี้

$$L = 0.048 \text{ m}$$

$$R_e = 0.021 \text{ m}$$

$$R_i = 0.0167 \text{ m}$$

$$g = 0.67$$

$$n = 0.135$$

จากสภาวะที่ 180 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของใบกวน 60 rpm ที่เวลาผ่านไป 10 นาที

พบว่าค่าแรงบิด (Γ) มีค่า 12.88 N.m

$$\tau_{r\theta} \left(R_{\frac{1}{2}} \right) = \frac{2\Gamma}{\pi L (R_e + R_i)^2 (1 + g^{n+1})}$$

$$\tau_{r\theta} \left(R_{\frac{1}{2}} \right) = \frac{2 \times 12.88}{3.14 \times 0.048 \times (0.021 + 0.0167)^2 (1 + (0.67^{0.135+1}))}$$

$$\tau_{r\theta} \left(R_{\frac{1}{2}} \right) = 73,552.9263 \text{ Pa}$$



The First Materials Research Society of Thailand International Conference
 (1st MRS Thailand International Conference)
 October 31 – November 3, 2017
 The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand

Preparation of High Strength Thermoplastic Starch

Kawin Keeratipinit^{1, a}, Manus Seadan^{2, b}, Werawat Lertwanawatana^{3,4, c}
 and Supakij Suttiruengwong^{1, d*}

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakorn Pathom, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakorn Pathom, Thailand,

³Innovation Center, Siam Modified Starch Co., Ltd., Pathum Thani, Thailand

⁴SMS Corporation, Co., Ltd., Pathum Thani, Thailand

*Corresponding Author's E-mail: ^ak.keeratipinit@gmail.com, ^bmanus_sc.su@hotmail.com, ^cwerawat@smcor.com, ^dsuttiruengwong_s@su.ac.th

Keywords: Thermoplastic starch, Ethylene-vinyl acetate copolymer, Reactive processing, High strength.

Abstract

Native Tapioca Starch (NT) is largely produced in Thailand and can be used in a wide spectrum of applications, ranging from food industry to construction and textile sectors. Its renewability and the ease of modification make them attractive to various applications. In terms of the packaging materials, starch is a good candidate. However, starch cannot be melt-processed to form a rigid packaging. A plasticizer is normally added to starch to allow for the thermal processing. Depending on the plasticizer types and contents, thermoplastic starch (TPS) with various mechanical properties can be prepared. This work aimed to prepare the high strength TPS. To obtain the high strength TPS, T_g of TPS should be higher than the room temperature and the glycerol content should be less than 30 %wt. Thus, in this study 30 phr of glycerol was used. Ethylene-vinyl acetate (EVA), the effect of Maleic anhydride (MA) and Citric acid (CA) on TPS properties were investigated. NT, glycerol, EVA, and reactive agents such as MA and CA were all dry-mixed at room temperature prior to the melt-blending in an internal mixer at 110^o C for 10 min. The influence of EVA contents and reactive agent types on the mixing torque value, morphological, mechanical and thermal properties of TPS were investigated. The results showed that MA could effectively reduce the mixing torque value. EVA could act as the soft segment in the high strength TPS and the processing aid. The adhesion between TPS and EVA was improved in the presence of CA alone or both CA and MA. The addition of 1 phr CA and 0.1 phr MA in TPS provided the high tensile strength of 29 MPa and Young's modulus of 942 MPa.

Introduction.

Tapioca starch is one of the most abundant crops in Thailand. Its relatively low cost, renewability, and biodegradability makes starch a good candidate for an application in materials such as packaging. Starch itself does not show a thermoplastic behavior due to its intra- and intermolecular hydrogen bonds between starch macromolecules. It will be degraded before coming to flow temperature, therefore the native starch shows poor processing ability. Thermoplastic starch (TPS) can be obtained by the destruction of granules in the presence of plasticizers. The main plasticizer used in TPS compositions is glycerol [1] but several other compounds, like ethylene glycol [2], urea [3] as well as sorbitol [4] and other sugars [5] have also been widely employed. To obtain hard TPS where T_g of TPS higher than room temperature, glycerol content should be less than 30 wt.% of starch [1]. In addition, TPS exhibits poor mechanical properties and moisture resistance due to the plasticizer contents.

Jiu Y. et al. prepared TPS from corn starch by using 30 wt.% glycerol as a plasticizer. It exhibited a tensile strength of 4.81 MPa [6]. Zuo Y. et al. can obtain the tensile strength of TPS about 5.19 MPa by using 30 wt.% glycerol in corn starch [7]. R. Jumaidin et al. prepared TPS from sugar palm starch by using 30 wt.% glycerol. They can obtain the tensile strength about 10 Mpa [8]. Liu Z. Q. et al. studied effect of glycerine on properties of anhydrous wheat starch. They found that the tensile strength about 10 Mpa at glycerol 33.0 wt.% of starch [9]. The preparation of TPS with adding PLA nanofiber 10 wt.% TPS blend

The First Materials Research Society of Thailand International Conference
(1st MRS Thailand International Conference)
October 31 – November 3, 2017
The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand

exhibited the tensile strength as high as 34 MPa [10]. According to the reported values of the high tensile strength, there are yet any reports on the high strength TPS based on tapioca starch without nanocomposites. Therefore, the aim of this work was to prepare the high strength thermoplastic starch. The effect of the reactive agents such as citric acid and maleic anhydride and Ethylene vinyl acetate copolymer on the flow and mechanical properties was of interest together with the physical appearance of the prepared TPS.

Experimental.

Materials. Native tapioca starch (NT) with 17% amylose and 83% amylopectin and glycerol were kindly provided by SMS Corporation Co., Ltd (Thailand). The starting moisture content of as-received tapioca starch was 12 wt.%. Citric acid (C) was purchased from Chemipan corporation Co. Ltd (Thailand), and Maleic anhydride (M) was purchased from Sigma-Aldrich Co. LLC. Ethylene vinyl acetate (EVA), Escorene™ Ultra UL 04533EH2, was purchased from Exxon Mobil Corporation.

Sample preparations. Native Tapioca starch, glycerol and reactive agent were firstly pre-mixed in plastics bags with various ratios as illustrated in Table 1. Glycerol concentration was fixed at 30 phr. The mixture was kneaded until a homogeneous material was obtained. The mixtures were kept overnight at room temperature. The mixtures and Ethylene vinyl acetate (EVA) were melted mixed at 110 °C in an internal mixer with a rotor speed of 80 rpm for 7 min. The obtained samples were dried overnight in a hot air oven at 60 °C and kept in a desiccator before further analysis. The tensile specimens were prepared according to ASTM D638 types V by compression molding at 150 °C for 6 min.

Table 1. Symbols and sample compositions.

Samples	TPS						EVA [wt. % of TPS]
	Native [12 wt.% moisture content]	Tapioca starch	Glycerol [phr]	Citric acid [phr][C]	Maleic [phr][M]	anhydride	
TPS	100		30	0	0		0
TPS95	100		30	0	0		5
TPS95C0.5	100		30	0.5	0		5
TPS95C1.0	100		30	1	0		5
TPS95M0.1	100		30	0	0.1		5
TPS95M0.3	100		30	0	0.3		5
TPS95M0.5	100		30	0	0.5		5
TPS95C1M0.1	100		30	1	0.1		5

Characterization. Tensile properties were measured using tensile tester (Instron UTM Model 5969, USA) at 1 mm/min crosshead speed. The dog-bone shaped samples were prepared by compression molding according to ASTM D638 type V. At least seven specimens were tested for each composition. Sample condition before testing in polyethylene bag at room temperature in desiccator. The morphology of samples was observed by scanning electron microscopy (SEM) (TM3030, Hitachi High-Technologies Europe GmbH, Germany), using 15 kV backscattering electron. The samples were cryo-fractured and sputter-coated with Platinum. DSC tests were performed with a TGA/DSC1 Mettler Toledo, Switzerland. The sample (5-10 mg) was accurately weighed into aluminium pans and sealed. The procedure was heating at 30 °C to 150 °C at 10 °Cmin⁻¹ in a nitrogen flow.

The First Materials Research Society of Thailand International Conference
 (1st MRS Thailand International Conference)
 October 31 – November 3, 2017
 The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand

Results and discussion

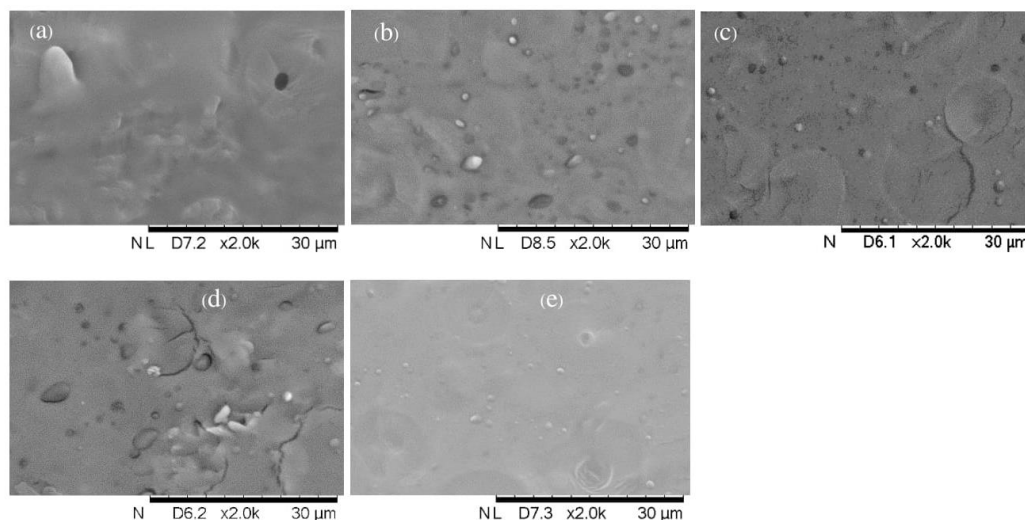


Fig 1. SEM micrograph of TPS with (a). TPS, (b).TPS95, (c).TPS95C1 (d) TPS95M0.1, and (e) TPS95C1M0.1

Morphological properties. SEM micrographs of cryo-fractured surface TPS were shown in Fig.1. From Fig.1a, the morphology of TPS reveal the smooth surface without residual starch particles. The sample was fully plasticized and becomes thermoplastic. The fractured surface was smooth. In the case of TPS95, the addition of EVA 5 wt.% (fig.1b) shown the clear dispersed-phase of EVA. This phase separation was related to poor interfacial compatibility between TPS and EVA. With adding citric acid lead to more finely dispersed phase of EVA. When adding maleic anhydride, the dispersed phase showed similar behavior to those without maleic anhydride. With adding both citric acid and maleic anhydride, the morphology was found to show finely disperse phase of EVA and improved the adhesion between two phases. This effect could affect the mechanical properties of TPS (Table 2).

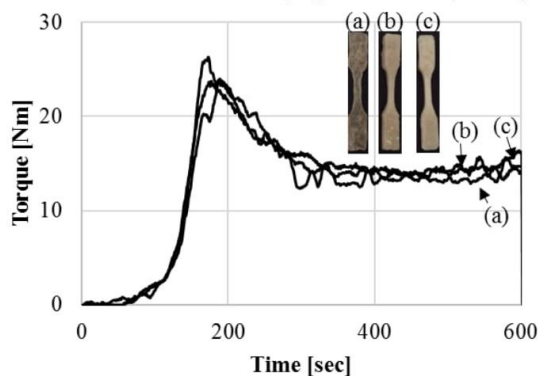


Fig 2. Torque values of TPS with (a) TPS, (b) TPS95, and (c) TPS90

The First Materials Research Society of Thailand International Conference
 (1st MRS Thailand International Conference)
 October 31 – November 3, 2017
 The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand

Torque values of TPS. Fig.2 showed the mixing torque of TPS in an internal mixer with and without EVA 5 and 10 wt.%. The torque values of plasticized starch immediately increased to maximum and decreased to a stable value, due to melting and plasticizing of starch. Torque values did not vary significantly with EVA loading. From the compression-molded specimen pictures as shown in Fig. 2, it demonstrated the dimensional stability of the specimens with 5 wt. % EVA loading. The dimensional instability of plasticized starch is normally arisen from the moisture absorption of plasticized starch. Therefore, EVA could reduce the moisture absorption and act as processing aids for preparing TPS.

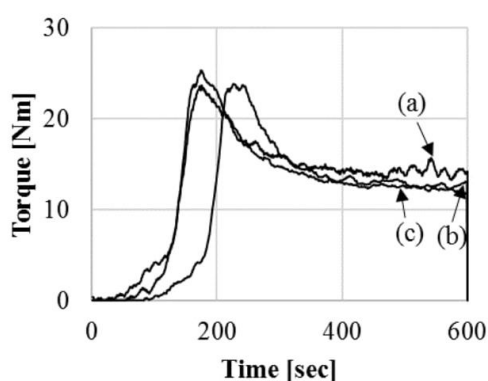


Fig. 3 Torque values of TPS adding citric acid with (a) TPS95, (b) TPS95C0.5, and (c) TPS95C1

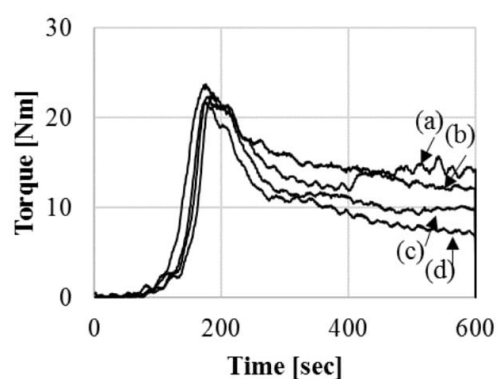


Fig.4 Torque values of TPS adding maleic anhydride with (a) TPS95, (b) TPS95M0.1, (c) TPS95M0.3, and (d) TPS95M0.5

Fig.3 and 4 showed the mixing torques of TPS with the addition of various ratios of citric acid and maleic anhydride respectively. The decrease in the mixing torques was observed for both TPS with citric acid or TPS with maleic anhydride. The mixing torque was decreased slightly when 0.5 and 1 phr of citric acid contents were used. The result indicated the reduction of the melt viscosity, which could result from the hydrolysis reaction with citric acid. Citric acid could also act as co-plasticizer with glycerol [11]. The reduction in the mixing torque was more pronounced when increasing the concentration of maleic anhydride. In this case, the acid-catalyzed reactions of starch with water and glycerol could occur during the maleation of starch undergo some partial depolymerization reactions [12].

The First Materials Research Society of Thailand International Conference
(1st MRS Thailand International Conference)
October 31 – November 3, 2017
The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand

Table 2 : Mechanical properties of the TPS

Samples	σ [MPa]	ϵ [%]	E [MPa]
TPS*	-	-	-
TPS95	23.8±4.0	3.6±0.5	875±72
TPS95C0.5	25.6±2.6	6.5±0.9	551±28
TPS95C1	26.0±2.1	5.2±0.4	604±25
TPS95M0.1	30.7±3.6	4.2±0.4	914±37
TPS95M0.3	29.0±5.1	3.9±0.6	903±57
TPS95M0.5	27.8±3.2	3.5±0.5	971±45
TPS95C1M0.1	29.2±2.3	3.6±0.4	942±37

*samples could not prepared due to high moisture contents in the mix.

Table 3

Thermal properties of TPS

Samples	T_g [°C]
TPS	61.6
TPS95	58.0
TPS95C1	51.9
TPS95M0.1	48.7
TPS95C1M0.1	50.4

Mechanical properties. From table 2, with adding citric acid 0.5 and 1 phr tensile strength were increased to 25.6 and 26.0 MPa, respectively. With regard to Young's modulus of TPS, it changed from 875 MPa for without citric acid to 551 and 604 MPa for 0.5 and 1 phr of citric acid, respectively. With adding maleic anhydride 0.1, 0.3 and 0.5 phr tensile strength increased to 30.7, 29.0 and 27.8 MPa, respectively. The combination of 1 phr citric acid and 0.1 phr maleic anhydride led to the high tensile strength of 29.2 MPa and Young's modulus of 942 MPa. With the addition of citric acid and maleic anhydride in TPS, the improved phase separation of TPS and EVA was obtained as shown in the SEM micrograph. The increase in an interfacial adhesion in TPS with adding citric acid and maleic anhydride was attributed to acid-hydrolysis of starch [13].

Thermal properties. From table 3, the glass transition temperature (T_g) of TPS was 61.6 °C, which was above room temperature. Therefore, TPS was in the glassy state at and below room temperature. The T_g decreased with adding citric acid and maleic anhydride about 51.9 and 48.7 °C, respectively. The decrease in T_g of TPS confirmed the co-plasticizing effect caused by citric acid with glycerol. The starch could be more mobile. In addition, the molecular weight of starch might also decreased. The shorter chain length after acid hydrolysis resulted in better mobility [14], hence lowering the glass transition temperature.

Conclusion.

The high strength TPS was prepared by using native tapioca starch and glycerol as a plasticizer via heating and shearing process along with adding Ethylene-vinyl acetate (EVA) as a processing aid, citric acids as a co-plasticizer and maleic anhydride as compatibilizer. The morphology properties of TPS exhibited the smooth surface without starch granules. The samples were fully plasticized and became thermoplastic. The incorporation of both citric acid and maleic anhydride resulted in finely dispersed phase of EVA together with the improved adhesion between two phases. The torque values of TPS with and without citric acid and maleic anhydride decreased with citric acid and maleic anhydride contents, implying the partial acid-hydrolysis reaction or the reduction of the molecular weight of starch. The mechanical properties of TPS with both citric acid and maleic anhydride showed the high tensile strength and Young's modulus of TPS (29.2 MPa and 942 MPa, respectively). The increased interfacial adhesion in TPS with citric acid and maleic anhydride was possibly attributed to acid-hydrolysis of starch. The improvement in the interface adhesion led to an increase in the tensile strength and Young's modulus. The glass transition temperature of all TPS was above room temperature. These results confirmed the role of citric acid as a co-plasticizer with glycerol whereas maleic anhydride acted as a compatibilizer.

The First Materials Research Society of Thailand International Conference
 (1st MRS Thailand International Conference)
 October 31 – November 3, 2017
 The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand

Acknowledgments.

The authors would like to thank the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology and Department of physics, Faculty of Science, Silpakorn University for a financial support. The staffs of SMS Corporation Co., Ltd. were gratefully acknowledged.

References

- [1] M. Mitrus, Glass transition temperature of thermoplastic starches, Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences Lublin 19 (2005) 237-241.
- [2] A.L. Da Roz, A.J.F. Carvalho, A. Gandini, and A.A.S. Curvelo, The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing, *Carbohydr. Polym.* 63 (2006) 417-424.
- [3] X.F. Ma, J.G. Yu, The effects of plasticizers containing amide groups on the properties of thermoplastic starch, *Starch-Starke* 56 (2004) 545-551.
- [4] X.F. Ma, J.G. Yu, K. He, and N. Wang, The effects of different plasticizers on the properties of thermoplastic starch as solid polymer electrolytes, *Macromol. Mater. Eng.* 292 (2007) 503-510.
- [5] E.M. Teixeira, A.L. Da Roz, A.J.F. Carvalho, and A.A.S. Curvelo, The effect of glycerol/sugar/water and sugar/water mixtures on the plasticization of thermoplastic cassava starch, *Carbohydr. Polym.* 69 (2007) 619- 624.
- [6] J.G. Yu, N. Wang, and X.F. Ma, The effects of citric acid on the properties of thermoplastic starch plasticized by glycerol, *Starch-Starke* 57 (2005) 494-504.
- [7] Y.F. Zuo, J.Y. Gu, H.Y. Tan, and Y.H. Zhang, Thermoplastic Starch Prepared with Different Plasticizers: Relation between Degree of Plasticization and Properties, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 30 (2015) 423-428.
- [8] R. Jumaidin, S.M. Sapuan, M. Jawaid, M.R. Ishak, and J. Sahari, Characteristics of thermoplastic sugar palm Starch/Agar blend: Thermal, tensile, and physical properties, *Int. J. of Biol. Macromol.* 89 (2016) 575-581.
- [9] Z.Q. Liu, X.S. Yi, and Y. Feng, Effects of glycerin and glycerol monostearate on performance of thermoplastic starch, *J. Mater. Sci.* 36 (2001) 1809-1815.
- [10] L. Jiang, B. Liu, and J.W. Zhang, Novel High-Strength Thermoplastic Starch Reinforced by in situ Poly(lactic acid) Fibrillation, *Macromol. Mater. Eng.* 294 (2009) 301-305.
- [11] J.B. Olivato, C.M.O. Muller, F. Yamashita, M.V.E. Grossmann, and M.M. Nobrega, Study of the Compatibilizer Effect in the Properties of Starch/Polyester Blends, *Polimeros.* 23 (2013) 346-351.
- [12] J.M. Raquez, Y. Nabar, M. Srinivasan, B.Y. Shin, R. Narayan, and P. Dubois, Maleated thermoplastic starch by reactive extrusion, *Carbohydr. Polym.* 74 (2008) 159-169.
- [13] N. Wang, J.G. Yu, X.F. Ma, and C.M. Han, High performance modified thermoplastic starch/linear low-density polyethylene blends in one-step extrusion, *Polym. Compos.* 28 (2007) 89-97.
- [14] R. Shi, Z.Z. Zhang, Q.Y. Liu, Y.M. Han, L.Q. Zhang, D.F. Chen, and W. Tian, Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch prepared by melt blending, *Carbohydr. Polym.* 69 (2007) 748-755.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กวินทร์ กীরติพินิจ
วัน เดือน ปี เกิด	14 Jun 1992
สถานที่เกิด	กรุงเทพ
ที่อยู่ปัจจุบัน	105/26 สมเด็จพระเจ้าตากสิน 41 แขวงบางปะกอก เขตราชบุรีบูรณะ กรุงเทพ 10140
ผลงานตีพิมพ์	Kawin Keeratipinit, Manus Seadan, Werawat Lertwanawatana and Supakij Suttiruengwong Preparation of High Strength Thermoplastic Starch The First Materials Research Society of Thailand International Conference (1st MRS Thailand International Conference) October 31 – November 3, 2017 The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand

