



การปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด:  
การเปรียบเทียบระหว่างสารปรับปรุงสมบัติรับแรงกระแทกที่แตกต่าง



โดย  
นายนพคุณ ลิขิตธนประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์  
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด:  
การเปรียบเทียบระหว่างสารปรับปรุงสมบัติรับแรงกระแทกที่แตกต่าง



โดย  
นายนพคุณ ลิขิตธนประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์  
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

MODIFICATIONS OF IMPACT PROPERTY OF POLYLACTIC ACID :COMPARISON OF  
DIFFERENT IMPACT MODIFYING AGENTS



By  
Mr.Noppakoon Likittanaprasong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Polymer Science and Engineering

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด: การเปรียบเทียบระหว่างสารปรับปรุงสมบัติรับแรงกระแทกที่แตกต่างกัน” เสนอโดย นายนพคุณ ลิขิตธนประสงค์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

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

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

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

..... กรรมการ

(ดร. อธิพันธ์ คงพันธุ์)

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

..... กรรมการ

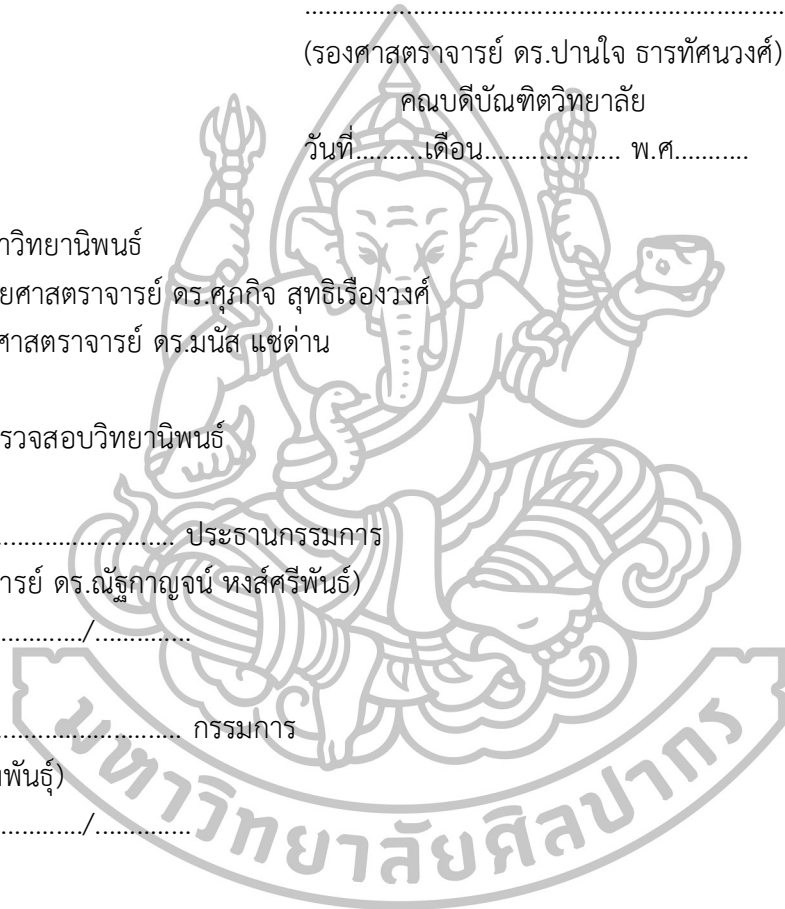
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)

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

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน)

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



56402211: สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด,แรงกระแทก,พอลิเมอร์เบลนด์

นพคุณ ลิขิตธนประสงค์: การปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด:การเปรียบเทียบระหว่างสารปรับปรุงสมบัติรับแรงกระแทกที่แตกต่าง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และ รศ.ดร.มนัส แซ่ด่าน. 113 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดโดยทำการเบลนด์พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น 6 ชนิดในสัดส่วนที่ต่ำกว่า 20% โดยน้ำหนัก ได้แก่ Ethylene acrylic elastomer (EAE), Ethylene vinyl acetate (EVA), Ethylene propylene diene rubber (EPDM), Styrene ethylene butylene styrene (SEBS), Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) และ polyether block amide (PEBAX) และ impact modifiers 2 ชนิด ได้แก่ Biomax®(DuPont™), และ acrylonitrile butadiene styrene (ABS) powder ในสัดส่วนที่ต่ำกว่า 5-20 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีเพียง EVE, Biomax และ PEBAX ที่สามารถเพิ่มค่า impact strength ในอัตราสูง จาก 3 kJ/m<sup>2</sup> เป็น 60 kJ/m<sup>2</sup> , 42 kJ/m<sup>2</sup> และ 39 kJ/m<sup>2</sup> ตามลำดับ แต่เมื่อทำรีเอ็กทีปเบลนด์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (Perkadox 14 ) 0.2 phr พบว่าไม่มีผลต่อ impact strength ของ PLA/EVE และ PLA/Biomax เบลนด์ โดยยังคงค่า impact strength สูงเท่าเดิม ในขณะที่ PLA/PEBAX ค่า impact strength ลดลงเหลือ 10 kJ/m<sup>2</sup> แต่รีเอ็กทีปเบลนด์ด้วยเปอร์ออกไซด์มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มค่า impact strength ของ PLA/EVA และ PLA/PBAT จากประมาณ 10 kJ/m<sup>2</sup> เป็น 40 kJ/m<sup>2</sup> และ 9 kJ/m<sup>2</sup> เป็น 22 kJ/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ในระบบรีเอ็กทีปเบลนด์สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเกือบทุกสูตรยกเว้น PLA/PEBAX เบลนด์ จากงานวิจัยนี้ยังพบว่าสมบัติ impact strength และสมบัติเชิงกลดีขึ้นเล็กน้อยเมื่อเบลนด์ใน twin screw extruder จากการศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงรีโอโลยีจากเครื่อง DMA ของ PLA/EAE และ PLA/Biomax เบลนด์ พบว่า PLA/Biomax เบลนด์ ความหนืดเพิ่มขึ้นทั้งยังปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นสูงกว่า PLA/EAE เบลนด์ ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมของพอลิเมอร์เบลนด์มี melt strength สูงขึ้นทำให้สามารถแปรรูปได้ง่ายขึ้น PLA/Biomax เบลนด์มีสมบัติการไหลเหมาะสำหรับขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าฟิล์มส่วน PLA/EAE เบลนด์เหมาะสำหรับขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีดและกระบวนการฉีดมากกว่า

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

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

56402211: MAJOR: POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD: POLYLACTIC ACID, IMPACT MODIFIER, POLYMERBLENDS, REACTIVE AGENTS

NOPPKOON LIKITTANAORASONG: MODIFICATIONS OF IMPACT PROPERTY OF  
POLYLACTIC ACID: COMPARISON OF DIFFERENT IMPACT MODIFYING AGENTS  
THESIS ADVISOR: ASST. PROF. Dr.- SUPAKIJ SUTTIREUEGWONG AND ASSOC.  
PROF. MANUS SEADAN. 113 pp

In this research, six flexible polymers and two impact modifiers which less than 20wt% were used to improve the impact property of PLA. The six flexible polymers are Ethylene acrylic elastomer (EAE), Ethylene vinyl acetate (EVA), Ethylene propylene diene rubber (EPDM), Styrene ethylene butylene styrene (SEBS), Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and polyether block amide (PEBAX). The two impact modifier which using less than 20wt% are Biomax®(DuPont™) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) powder. It was found that only EVE, Biomax and PEBAX could provide the improved impact strength of PLA from 3 kJ/m<sup>2</sup> to 60 kJ/m<sup>2</sup>, 42 kJ/m<sup>2</sup> and 39 kJ/m<sup>2</sup> respectively. On the other hand, PLA/EAE and PLA/Biomax reactive blends with peroxide (Perkadox 14) at 0.2 phr exhibited the unchanged impact strength. The reactive blend of PLA/PEBAX showed the reduction in the impact strength (10 kJ/m<sup>2</sup>). However, the reactive blends of PLA/PBAT and PLA/EVA showed the improvement of the impact strength. Increasing from 10 kJ/m<sup>2</sup> to 40 kJ/m<sup>2</sup> and 9 kJ/m<sup>2</sup> to 22 kJ/m<sup>2</sup> respectively. For reactive blends system, the mechanical and impact strength of all modifications were improved except for PLA/PEBAX blend. Moreover, the blends using twin screw extruder could also improve some mechanical and impact properties. The flow and rheology (DMA) in molten state analysis showed that the viscosity and melt elasticity of PLA/Biomax was higher than that of PLA/EAE blends. The rheological properties of PLA/Biomax blends are potentially suitable for blow film process whereas the rheological property of PLA/EAE is more applicable for extrusion and injection mould processes.

---

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University

Student's signature.....

Academic Year 2015

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

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดียิ่งด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ ที่ปรึกษางานวิจัยหลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน ที่ปรึกษางานวิจัย รอง เป็นผู้ที่ยกย่องให้คำแนะนำอย่างดียิ่งในทุก ๆ ด้าน ในการตรวจทานข้อมูล รวมถึงชี้แนะแนวทางการ แก้ไขปัญหาในทุก ๆ ด้านจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในความอนุเคราะห์สถานที่ ในการทำวิจัยรวมถึงเครื่องมือและทุนวิจัยอันจำเป็นยิ่งในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน สำหรับความอนุเคราะห์ ABS powder สำหรับการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ Biomax และ EAE สำหรับการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท เจริญทัศน์ สำหรับความอนุเคราะห์ EPDM และ SEBS สำหรับการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คุณ ไพโรจน์ ตั้งสุภวัช นายช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สำหรับการอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องแก้วและบำรุงซ่อมแซมเครื่องจักร รวมถึงเจ้าหน้าที่สำนักงานภาควิชาทุกท่าน ในด้านเอกสารและการเงิน

ขอขอบคุณพี่ปริญญาเอก เพื่อน ๆ ปริญญาโททุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง คุณพ่อ อติสันต์ ลิขิตธนประสงค์ คุณแม่ ดาวรรณ ลิขิตธนประสงค์ พี่ๆและน้องชาย ที่เป็นกำลังใจแรงใจและสนับสนุนด้านการเงินอย่างดีตลอดมาทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเสร็จสิ้นลงได้ด้วยดี

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ .....   | ฉ    |
| สารบัญ .....  | ช    |
| สารบัญตาราง .....   | ญ    |
| สารบัญภาพ .....   | ฎ    |
| บทที่   |      |
| 1 บทนำ.....   | 1    |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 1    |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....  | 4    |
| ขอบเขตของการวิจัย.....  | 4    |
| ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....   | 5    |
| ประโยชน์ที่ได้รับ .....   | 6    |
| 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 7    |
| พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blends).....   | 7    |
| พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA).....   | 7    |
| พอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (Polyamide elastomer, PAE).....  | 11   |
| พอลิบิวทิลีนอะดีเพทโคเทอเรพทาเลต (PBAT).....  | 12   |
| อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ชนิดผง ...                | 13   |
| เอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene-propylene diene rubber, EPDM) .....                                | 13   |
| สไตรีน เอทิลีน บิวทิลีน สไตรีน (styrene-ethylene-butadiene-styrene block<br>Copolymer, SEBS)..... | 14   |
| เอทิลีนไวนิลแอซีเตต (Ethylene vinyl acetate, EVA).....  | 15   |
| เอทิลีน อะครีลิกอีลาสโตเมอร์ (Ethylene acrylic elastomer, EAE).....                               | 16   |
| เปอร์ออกไซด์ .....  | 17   |
| กลไกการแตกหัก .....   | 17   |



| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 19   |
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....   | 28   |
| วัตถุดิบและสารเคมีในการทำงานวิจัย.....  | 28   |
| เครื่องเบลนด์และขึ้นรูป.....  | 30   |
| เครื่องมือวิเคราะห์.....  | 30   |
| ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....   | 31   |
| 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....   | 33   |
| พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์<br>(PLA/Thermoplastic elastomer).....                    | 33   |
| สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ<br>SEBS.....                                    | 33   |
| สมบัติสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS ..<br>.....                                      | 34   |
| สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS... 36  | 36   |
| พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพลาสติกนิ่มและอิมแพคโมดิไฟเออร์<br>(PLA/Soft plastic and PLA/Impact modifiers)..... | 38   |
| สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax<br>และ ABS powder.....                         | 39   |
| สมบัติสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ<br>ABS powder.....                               | 39   |
| สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ<br>ABS powder.....                                 | 41   |
| พอลิเมอร์เบลนด์ที่เกิดปฏิกิริยาในระบบฟรีเรดิคัลและโคเอเจน (free radical and<br>coagent reactive blends).....                | 43   |
| รีเอ็กทีฟเบลนด์ระหว่าง PLA/EAE.....   | 44   |
| รีเอ็กทีฟเบลนด์ระหว่าง PLA/EVA.....   | 47   |

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| รีเอ็กทีพเบลนด์ระหว่าง PLA/PBAT .....   | 51   |
| รีเอ็กทีพเบลนด์ระหว่าง PLA/PEBAX.....   | 55   |
| รีเอ็กทีพเบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax 15 phr ที่มีการเติม perkadox 0.2 phr .....  | 58   |
| พอลิเมอร์เบลนด์ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) .....  | 62   |
| การเบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax 15 phr .....  | 63   |
| การเบลนด์ระหว่าง PLA/EAE ในอัตราส่วน (80:20).....   | 66   |
| สมบัติ Rheology และการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่างพอลิแลคตอคแอซิดกับโคพอลิ<br>เมอร์ 2 ชนิดได้แก่ Biomax และ EAE..... | 72   |
| 5   สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....   | 75   |
| รายการอ้างอิง.....  | 78   |
| ภาคผนวก.....  | 83   |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ .....   | 84   |
| ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ .....  | 92   |
| ภาคผนวก ค การเผยแพร่งานวิจัย .....  | 94   |
| ภาคผนวก ง การพัฒนาตนเอง .....   | 103  |
| ประวัติผู้วิจัย.....  | 1133 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  |  | หน้า |
|-----------|--|------|
| 2. 1      | แสดงตัวอย่างสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดจาก Bandula Wijayarathna และคณะ.....                                     | 10   |
| 2. 2      | แสดงสมบัติของ PAE เกรดPEBAX 2533 SA 01 Med จากบริษัท Arkema .....  | 12   |
| 2. 3      | แสดงสมบัติของเอทิลีนไวนิลแอซีเตต (Ethylene vinyl acetate, EVA) ของบริษัท ExxonMobil.....                     | 16   |
| 2. 4      | แสดงสัดส่วนต่างๆของวัสดุคอมโพสิต .....   | 22   |
| 2. 5      | แสดงค่า Tensile properties และ impact strength ของ PLA, PLA/PBAT และ PLA/PBAT/CaCO <sub>3</sub> .....        | 22   |
| 2. 6      | แสดงค่า Glass transition temperatures และสมบัติเชิงกลของวัสดุเบลนด์ PAE/PLA..                                | 23   |
| 2. 7      | แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA/EVA50 เบลนด์โดยมี EVA50 เป็นองค์ประกอบ .....   | 25   |
| 2. 8      | แสดงสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบ PLA/PU.....  | 25   |
| ตารางผนวก |  |      |
| ก- 1      | สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ ABS powder, Biomax, EPDM, SEBS, PBAT, PEBAX, EVA และ EAE.....  | 85   |
| ก- 2      | สมบัติการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ ABS powder, Biomax, EPDM, SEBS, PBAT, PEBAX, EVA และ EAE ..... | 86   |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2. 1   | แสดงวัฏจักรชีวิตของพอลิแลคติกแอซิด.....   | 8    |
| 2. 2   | แสดงภาพโครงสร้างของ Poly(lactic acid).....  | 9    |
| 2. 3   | โครงสร้างทางเคมีของ PEBAX.....  | 11   |
| 2. 4   | แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะไดเพทโคเทอเรพทาเลต (PBAT).....   | 12   |
| 2. 5   | แสดงโครงสร้างทางเคมีของอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) .....   | 13   |
| 2. 6   | แสดงโครงสร้างทางเคมีของ EPDM.....   | 14   |
| 2. 7   | แสดงโครงสร้างทางเคมีของ SEBS .....  | 14   |
| 2. 8   | แสดงโครงสร้าง EVA.....  | 15   |
| 2. 9   | โครงสร้างทางเคมีของ Ethylene acrylic elastomer.....   | 17   |
| 2. 10  | แสดงการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์.....   | 17   |
| 2. 11  | พฤติกรรมกรรมการแตกหักของโครงสร้างที่มีรอยร้าว.....  | 18   |
| 2. 12  | แสดงผลการทดสอบ impact strength ในอัตราส่วนของอย่างต่างๆกัน ในพอลิเมอร์เบลนด์<br>PBT/rubber .....  | 20   |
| 2. 13  | แสดง Tensile properties ของ PLA, PBAT, ที่สัดส่วนของ PBAT ต่างๆ.....  | 21   |
| 2. 14  | แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA, PLA / PBAT, PLA / PBAT และ PLA / PBAT / CaCO <sub>3</sub> ..   | 22   |
| 2. 15  | แสดง (a)กราฟ Tensile stress-strain ของวัสดุเบลนด์ PAE/PLA และ (b) รูปของการ<br>แตกหักจากการดึง tensile ของ neat PLA และวัสดุเบลนด์โดยมี 10% PAE เบลนด์<br>เป็นองค์ประกอบ..... | 24   |
| 2. 16  | แสดง Notched impact strength (Izod) ระหว่าง PLA/Biomax strong ในอัตราส่วน<br>ต่างๆ.....   | 27   |
| 2. 17  | แสดงค่า impact strength เมื่อเติมปริมาณ Biomax ที่อัตราส่วนต่างๆ.....   | 27   |
| 3. 1   | โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA).....  | 28   |
| 3. 2   | โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyiso-propyl) benzene.....   | 29   |
| 3. 3   | โครงสร้างโมเลกุลของ Maleic anhydride, MA.....   | 30   |
| 4. 1   | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA,<br>EPDM และ SEBS.....  | 34   |
| 4. 2   | สัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากชิ้นงานทดสอบรับแรงกระแทกระหว่าง (ก)<br>PLA/EAE, (ข) PLA/EVA, (ค) PLA/EPDM และ (ง) PLA/SEBS .....  | 35   |

| ภาพที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 4. 3   | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS..... 36  |
| 4. 4   | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS..... 37   |
| 4. 5   | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS ..... 38   |
| 4. 6   | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder..... 39                                     |
| 4. 7   | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากชิ้นงานทดสอบรับแรงกระแทกระหว่าง (ก) PLA/PBAT, (ข) PLA/PEBAX , (ค) PLA/Biomax , (ง) PLA/ABS powder..... 40 |
| 4. 8   | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder..... 41   |
| 4. 9   | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder..... 42                                    |
| 4. 10  | แผนภูมิแสดงค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder..... 43                                 |
| 4. 11  | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เต็ม perkadox ..... 44   |
| 4. 12  | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ทั้งไม่เต็มและเต็ม perkadox..... 45                 |
| 4. 13  | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เต็ม perkadox. 46  |
| 4. 14  | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เต็ม perkadox..... 46   |
| 4. 15  | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เต็ม perkadox ..... 47   |
| 4. 16  | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA เต็ม perkadox..... 48  |

| ภาพที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 4. 17  | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EVA ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความ<br>ต้านทานต่อแรงกระแทก ทั้งไม่เติมและเติม perkadox..... 49   |
| 4. 18  | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA เติม perkadox50  |
| 4. 19  | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA เติม<br>perkadox..... 50  |
| 4. 20  | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA<br>เติม perkadox ..... 51  |
| 4. 21  | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม<br>perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox กับ maleic anhydride ..... 52                                     |
| 4. 22  | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PBAT ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความ<br>ต้านทานต่อแรงกระแทก ที่เติมเฉพาะ perkadox และ เติมทั้ง perkadox กับ<br>maleic anhydride..... 52  |
| 4. 23  | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม perkadox และ<br>PLA/PBAT เติม perkadox และ maleic anhydride..... 53  |
| 4. 24  | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม<br>perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox และ maleic anhydride ..... 54                                    |
| 4. 25  | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม<br>perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox กับ maleic anhydride ..... 54                               |
| 4. 26  | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เติม<br>perkadox และ PLA/PEBAX เติม perkadox กับ maleic anhydride..... 55                                   |
| 4. 27  | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PEBAX ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความ<br>ต้านทานต่อแรงกระแทก ที่เติมเฉพาะ perkadox และ เติมทั้ง perkadox กับ<br>maleic anhydride..... 56 |
| 4. 28  | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เติม perkadox<br>และ PLA/PEBAX เติม perkadox กับ maleic anhydride..... 57   |
| 4. 29  | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เติม<br>perkadox และ PLA/PEBAX เติม perkadox กับ maleic anhydride..... 57                                  |

| ภาพที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 4. 30  | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX<br>เติม perkadox และ PLA/PEBAX เติม perkadox กับ maleic anhydride ..... 58   |
| 4. 31  | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax<br>เติม perkadox ..... 59   |
| 4. 32  | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax ..... 59   |
| 4. 33  | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เติม<br>perkadox ..... 60   |
| 4. 34  | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เติม<br>perkadox ..... 61   |
| 4. 35  | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ<br>PLA/Biomax เติม perkadox ..... 61   |
| 4. 36  | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบ<br>ปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 63   |
| 4. 37  | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax 15 phr ที่ได้จากการทดสอบ<br>สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ที่ได้จากการผสมภายในแบบปิด(ซ้าย) และ<br>เครื่องผสมผ่านระบบสกรูคู่ (ขวา) ..... 64 |
| 4. 38  | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ<br>จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 65  |
| 4. 39  | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบ<br>ปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 65  |
| 4. 40  | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสม<br>แบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 66   |
| 4. 41  | แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I)<br>และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 67   |
| 4. 42  | สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความ<br>ต้านทานต่อแรงกระแทก จากการผสมภายในแบบปิด(ซ้าย) และ เครื่องผสมแบบสกรูคู่<br>(ขวา) ..... 68                      |

| ภาพที่  | หน้า   |
|---------|--|
| 4. 43   | แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 69  |
| 4. 44   | แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 70   |
| 4. 45   | แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) ..... 71  |
| 4. 46   | แสดงรอยแตกของชิ้นงาน Neat PLA (ซ้าย) และ PLA/EAE (80:20) (ขวา) ที่ได้จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่..... 72   |
| 4. 47   | แสดงค่า $G'$ , $G''$ และ $\eta^*$ ของ PLA, PLA/Biomax และ PLA/EAE เบลนด์ที่ 190°C ..... 73   |
| 4. 48   | แสดงค่า storage modulus, loss modulus และ complex viscosity ของ LDPE และ LLDPE..... 74   |
| <br>    |  |
| ภาพผนวก |  |
| ก- 1    | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ ABS powder ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr..... 88  |
| ก- 2    | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ Biomax ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr ..... 88   |
| ก- 3    | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EPDM ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr ..... 89   |
| ก- 4    | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ SEBS ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr ..... 89   |
| ก- 5    | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PBAT ในอัตราส่วน 90:10, 80:20, 90:10+perkadox0.2phr, 80:20+perkadox0.2phr และ 80:20+perkadox0.2phr +maleic anhydride0.05phr ..... 90  |
| ก- 6    | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PEBAX ในอัตราส่วน 90:10, 80:20, 90:10+perkadox0.2phr, 80:20+perkadox0.2phr และ 80:20+perkadox0.2phr +maleic anhydride0.05phr ..... 90 |



| ภาพที่ | หน้า   |
|--------|--|
| ก- 7   | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EVA ในอัตราส่วน 90:10,<br>80:20 และ 80:20+perkadox0.2phr ..... 91 |
| ก- 8   | แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE ในอัตราส่วน 90:10,<br>80:20 และ 80:20+perkadox0.2phr ..... 91 |



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้มากมายในปัจจุบันมีความเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตโดยตรง อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของพลาสติกที่มีราคาถูก สามารถใช้งานได้หลากหลายและสามารถปรับปรุงให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานได้เป็นอย่างดี พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มนุษย์รู้จักกันมานานมากกว่า 130 ปีเพื่อแทนแทนวัสดุอื่นๆเช่น โลหะ ไม้ ยาง หรือวัสดุทางธรรมชาติอื่นๆเช่น ทำเป็นเส้นใย สิ่งทอ ขึ้นรูปเป็นยานพาหนะต่างๆ ภาชนะ และวัสดุบรรจุภัณฑ์ต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์และเครื่องใช้อื่นๆมากมาย ในปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทอย่างยิ่งในชีวิตประจำวัน เราสามารถพบเห็นพลาสติกในรูปของผลิตภัณฑ์มากมายตั้งแต่เราตื่นนอน จนหลับในตอนกลางคืน เช่นแปรงสีฟัน ไดรฟ์เป่าผม กล่องใส่เครื่องสำอาง เครื่องประดับ ฝักบัว หลอดชนิดต่างๆ ชิ้นส่วนมือถือ ภาชนะใส่อาหาร เสื้อผ้าบางชนิดเองก็ทำมาจากพลาสติก ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อไปที่ใดก็ จะพบวัสดุที่ทำจากพลาสติกเป็นองค์ประกอบเสมอ พลาสติกเป็นวัสดุที่ได้มาจากการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม มาแยกเป็นสารประกอบ ซึ่งองค์ประกอบหลักจะประกอบไปด้วยธาตุสองชนิดคือ คาร์บอน (C) กับ ไฮโดรเจน (H) มาผ่านปฏิกิริยาเพื่อให้ได้โมเลกุลขนาดเล็กก่อน จากนั้นทำการเชื่อมต่อให้เป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้นตามที่ต้องการ พลาสติกแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบแตกต่างกันแต่ องค์ประกอบหลักก็ยังคงเป็นธาตุ คาร์บอน (C) กับ ไฮโดรเจน (H) การที่มีองค์ประกอบของธาตุอื่นในสายโซ่โมเลกุลก็จะทำให้ได้คุณสมบัติพลาสติกที่แตกต่างกันด้วย และพลาสติกบางชนิดอาจเกิดจากพลาสติกที่มากกว่า1ชนิดในสายโซ่ก็ได้ (co polymer)

ในปัจจุบันปัญหาหลักของในหลายๆประเทศคือขยะพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก ทำให้ต้องหาที่จัดเก็บและทำลายทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณในปริมาณที่สูง นับวันปัญหานี้ก็มีมากขึ้น พลาสติกที่ใช้แล้วมักถูกทิ้งเป็นขยะพลาสติกในแต่ละวันของทุกคนจะถูกนำกลับมาใช้อีกใน ลักษณะต่างๆ และส่วนที่เหลือก็จะนำไปกำจัดด้วยวิธีอื่นๆ ในวิธีฝังกลบเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายแต่พบว่าข้อเสียคือ มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากขยะพลาสติกมีระยะเวลาในการย่อยสลายได้ยากต้องใช้เวลาจนถึงนับหมื่นปีในดิน ในการกำจัดขยะพลาสติกโดยการเผาพลาสติกก็ก่อให้เกิดมลพิษและเป็นอันตรายอย่างมาก วิธีการแก้ปัญหaxyขยะพลาสติกที่ได้ผลดีที่สุดคือ การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ การนำขยะพลาสติกใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ หรือการเลือกใช้วัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เช่น ส่วนของพืชต่างๆ หรือ พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[1]

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หรือพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable plastic) หมายถึงพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพืช สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ

(biodegradable) วัสดุนี้ช่วยลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมได้ วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิด เช่น cellulose collagen casein polyester แป้ง (starch) โปรตีนจากถั่ว และข้าวโพด ในบรรดาวัสดุธรรมชาติทั้งหลาย แป้ง นับว่าเหมาะสมที่สุดเพราะมีจำนวนมากและราคาถูก เนื่องจากสามารถหาได้จากพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง เป็นต้น พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากแป้งโดยตรงจะมีขีดจำกัด เพราะจะเกิดการพองตัวและเสีรูปร่างเมื่อได้รับความชื้น จึงได้มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายแป้ง แล้วเปลี่ยนแป้งให้กลายเป็นโมโนเมอร์ (monomer) ที่เรียกว่ากรดแลคติก (lactic acid) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการ polymerization ทำให้กรดแลคติกเชื่อมกันเป็นสายยาวที่เรียกว่า พอลิเมอร์ (polymer)[2]

พอลิแลคติกแอซิด หรือ (Poly(lactic acid), (PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่กำลังเป็นที่นิยมผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกลที่ดี และยังมีราคาถูกกว่าพลาสติกชีวภาพอื่นๆ นอกเหนือจากแป้ง พอลิแลคติกแอซิด จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) สามารถผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยพลาสติกชีวภาพชนิดนี้ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ฟิล์มสำหรับหุ้มอาหาร ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหารที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง เช่น กล่อง จาน ช้อน มีด ส้อม ตะเกียบ แก้วน้ำ รวมทั้ง ถุงหูหิ้ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปทำเป็นเส้นใยและสิ่งทอนำมาใช้ในงานด้านการผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์ แต่ข้อด้อยของพลาสติกชนิดนี้คือ 1.ความเปราะ 2. PLA ไม่ทนความร้อนในการนำไปใช้งาน และ ในกระบวนการขึ้นรูป 3.ความแข็งแรงของ PLA ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าต่ำ [3] ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง ดังนั้นก่อนการนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ PLA ควรถูกทำการปรับปรุงสมบัติเสียก่อนเพื่อให้มีความเหมาะสม

สำหรับการใช้งานข้อเสียที่สำคัญของ PLA ที่เห็นได้อย่างเด่นชัดคือ ความเปราะ (brittleness) ซึ่งเกิดจากการตกผลึกได้ช้า รวมถึงมี  $T_g$  ที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้มีสมบัติความต้านทานแรงกระแทกได้ไม่ดี โดยการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกระแทก ของ PLA สามารถทำได้โดย 1.โดยการเติมสาร Impact modifier 2.โดยการเบลนด์กับพอลิเมอร์ ชนิดอื่น โดยการเบลนด์กับกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นแบบมีปฏิกิริยาเคมีจะช่วยเพิ่มความเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ 2 เฟสให้ดีขึ้น[3]และ3.การทำโคพอลิเมอร์เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ให้เปลี่ยนแปลงได้ตามที่ต้องการ

สารปรับปรุงแรงกระแทก (Impact modifier) ทำหน้าที่หลักเป็นสารปรับปรุงแรงกระแทกคือการเพิ่มความต้านทานแรงกระแทก (Impact resistance) ให้แก่พอลิเมอร์ที่ต้องการ ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่จะเป็นพอลิเมอร์พวกอิลาสโตเมอร์ สารปรับปรุงแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน พีวีซี ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีหลายชนิดได้แก่ อคริโลไนไตรล์บิวตะไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) เมธาอคริเลตบิวตะไดอีนสไตรีน (Methacrylate butadiene styrene, MBS) ยางไนไตรลบิวตะไดอีน (Nitrile butadienerubber, NBR) และพอลิเอทิลีนเติมคลอรีน (Chlorinated polyethylene, CPE) ในการคอมพาวด์[4]

ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกระแทกเป็นความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์หรือสารปรับปรุงแรงกระแทก ในบางครั้งมีความจำเป็นเติมสารเพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโพลิเมอร์ หรือสร้างโคพอลิเมอร์ชั้นขณะเบลนด์โดยปฏิกิริยา รีแอคทีฟเอเจนท์ (Reactive agent) ซึ่งอาจเรียกเป็น Compatibilizer ที่จะช่วยเพิ่มความแรงยึดติดระหว่างเฟส จากงานวิจัยในอดีตของ Masaki Harada และคณะ[5] พบว่าสารทำปฏิกิริยาถูกใช้ในปริมาณที่น้อย นับเป็นคุณสมบัติที่ดีเนื่องจากจะเป็นการลดต้นทุนแล้วยังช่วยทำให้รักษาสิ่งแวดล้อมจากการตกค้างของสารเคมีอีกด้วย Reactive agent[5] ที่ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มความเข้ากันได้ ระหว่างพอลิเอสเทอร์กับพอลิเอสเทอร์มีหลายหลากชนิดเช่น maleic anhydride[6-8], triphenyl phosphite (TPP)[9] และ dicumylperoxide (DCP)[10] ในบางระบบจะมีการเติม peroxide เพิ่มลงไปด้วยใน PLA, PCL, และ poly(butylene succinate) (PBS)[11-13]

จากการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า การใช้ Ultra High Rubber ABS ที่ปริมาณ 20wt% จะส่งผลให้ค่า Impact strength เพิ่มจาก 26.7 J/m เป็น 518 J/m และค่า elongation at break เพิ่มจาก 10% เป็น 218% [14] และ การใช้ Biomax ที่ปริมาณ 20wt% จะส่งผลให้ค่า Impact strength เพิ่มจาก 0.2 f.lb/inch. เป็น 5.0 f.lb/inch.[15] แต่ยังไม่มีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง commercial impact modifier เช่น Polimax(IRPC), BiomaxStrong (Dupont) และในกรณีการเบลนด์ PLA กับพอลิเมอร์ชีวภาพ ชนิดอื่นพบว่า การเบลนด์ PBAT กับ PLA ในปริมาณ PLA/PBAT (80/20 wt%) สามารถเพิ่ม impact strength จาก 4J/m เป็น 26 J/m [16] การเบลนด์ PAE กับ PLA ในปริมาณ PLA/PAE (90/10 wt%) สามารถเพิ่ม impact strength จาก 2.6 kJ/mm<sup>2</sup> ไปเป็น 9.3 kJ/mm<sup>2</sup>[17] ซึ่งการใช้สองวิธีการดังกล่าวส่งผลต่อค่าสมบัติความต้านทานแรงกระแทก โดยมีกลไกในการทำงานคือขัดขวางการเกิดรอยแตกที่ต่อเนื่องเปลี่ยนขนาดของมุมที่เป็นรอยแตกให้มุมเป็นมุมขนาดใหญ่ช่วยลดความเครียดในบริเวณรอยแตกลงได้

งานวิจัยจะได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบใน 5 ตอน ในตอนแรกคือ ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับ

ยางและเทอร์โมพลาสติกเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ได้แก่ เอทิลีนอะครีลิกอีลาสโตเมอร์ (EAE) พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (EVA) เอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) และ สไตรีนเอทิลีนบิวทีลีน สไตรีน (SEBS) ซึ่งทุกชนิดจะมีเอทิลีนเป็นองค์ประกอบ EAE และ EPDM จัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดอีลาสโตเมอร์หรือยาง ส่วน EVA และ SEBS จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หรือพลาสติกนิ่มทั้งหมดมีเอทิลีนเป็นส่วนประกอบจึงน่าจะสามารถทำ รีเอ็กทีฟเบลนด์โดยผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคัลจากสารเปอร์ออกไซด์ได้ด้วย ในการศึกษาเบื้องต้นจะเป็นการเบลนด์แบบไม่เกิดปฏิกิริยา โดยทำการเบลนด์ในเครื่องผสมแบบปิด ในอัตราส่วนต่างๆแต่ยังคงให้ PLA เป็นเฟสหลัก ตอนที่สองเป็นการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดกับพลาสติกนิ่มและอิมแพคโมดิฟายเออร์(PLA/Soft plastic and PLA/Impact modifiers) ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) /พอลิบิวทีลีนอะไคเทอเพคโธเทอเพทาเลต (PBAT), พอลิแลคติกแอซิด (PLA) /พอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (PAE), Biomax จากบริษัท DuPont ซึ่ง

เป็นสารประเภท Ethylene Copolymer และ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) / Polimax จากบริษัท IRPC ซึ่งเป็นสารประเภท Ultra High Rubber ABS Impact Modifier Resin ตอนที่สาม ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ที่เกิดปฏิกิริยาในระบบฟรีแรดิคอลและโคเอเจน (free radical and coagent reactive blends) โดยใช้ perkadox 0.2 phr เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ EAE EVA PBAT PAE และ Biomax นอกจากนี้ยังศึกษาผลของ maleic anhydride 0.05 phr ระหว่าง PLA กับ PAE และ PBAT อีกด้วย ในส่วนที่ ตอนที่สี่เป็นการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) โดยเลือกพอลิเมอร์เบลนด์ที่ให้ค่า impact strength สูงสุดที่ได้จากตอนที่ 1-3 ได้แก่ PLA/EAE (80:20) และ PLA/Biomax 15 phr ในตอนสุดท้ายส่วนที่ห้า ทำการศึกษาการศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากตอนที่สี่

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกระแทก และทำการเปรียบเทียบชนิดของโคพอลิเมอร์
- 2) เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงกระแทก โดยวิธี reactive blending และ non-reactive blending
- 3) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณการเติม impact modifier ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงกระแทก
- 4) เพื่อศึกษาผลของพอลิเมอร์เบลนด์ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)
- 5) เพื่อศึกษาการศึกษาสมบัติ Rheology และการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

### 1.3.1 ระบบการเบลนด์ PLA และ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

- 1) ศึกษาสมบัติเชิงกล, สมบัติทางสัณฐานวิทยา และ สมบัติการไหล ระหว่าง PLA และ Copolymers ที่สัดส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ โดยไม่มีการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ (Non-reactive blends)
- 2) ศึกษาสมบัติเชิงกล, สมบัติทางสัณฐานวิทยา และ สมบัติการไหล ระหว่าง PLA และ Copolymers ที่สัดส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ โดยมีการเติม รีแอคทีฟเอเจนท์ (reactive blends) คือ Perkadox ปริมาณ 0.2 phr คงที่ในทุกสูตร

### 1.3.2 ระบบการเบลนด์ PLA/Soft plastic และ PLA/Impact modifiers

- 1) ศึกษาสมบัติเชิงกล, สมบัติทางสัณฐานวิทยา และ สมบัติการไหล ระหว่าง PLA และ Copolymers ที่สัดส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ โดยไม่มีการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ (Non-reactive blends)
- 2) ศึกษาสมบัติเชิงกล, สมบัติทางสัณฐานวิทยา และ สมบัติการไหล ระหว่าง PLA และ Impact modifiers ที่สัดส่วนการเบลนด์ต่าง ๆ โดยมีการเติม รีแอคทีฟเอเจนท์ (reactive blends) คือ

Perkadox ปริมาณ 0.2 phr คงที่ในทุกสูตร และ maleic anhydride 0.05 phr ใน PLA/PBAT และ PLA/PEBAX

### 1.3.3 ระบบการเบลนด์ผ่านเครื่องผสมแบบสกรูคู่

1) ศึกษาสมบัติเชิงกล, สมบัติทางสัณฐานวิทยา, สมบัติการไหล ระหว่าง PLA และ Copolymers ในสูตรที่ให้ค่า Impact strength สูงที่สุด

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบงานวิจัยและวางแผนการวิจัย

1.4.3 ดำเนินงานวิจัย

ส่วนที่ 1 เบลนด์ PLA กับ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เบลนด์ระหว่าง PLA กับ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่สัดส่วนการเบลนด์ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ (Non - reactive blends)

ส่วนที่ 2 เบลนด์ PLA กับ พลาสติกนิ่มและอิมแพคโมดิไฟเออร์ โดยไม่มีการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ (Non - reactive blends)

ส่วนที่ 3 เบลนด์ PLA กับ Copolymer โดยมีการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ โดยการเบลนด์ระหว่าง PLA และ Copolymers ที่สัดส่วนการเบลนด์ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยมีการเติมรีแอคทีฟเอเจนท์ (reactive blends) คือ Perkadox ที่ 0.2 phr และ maleic anhydride ที่ 0.05 phr ทั้งส่วนที่ 1,2 และ 3 จะเบลนด์ด้วย Internal mixer ที่อุณหภูมิ 190°C ความเร็วรอบของการหมุน 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบโดยเครื่องขึ้นรูปโดยการกดอัด ที่อุณหภูมิ 190°C

ส่วนที่ 4 เบลนด์ PLA กับ Copolymer ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)

เบลนด์ระหว่าง PLA และ Copolymers โดยเลือกสูตรที่ให้ค่า impact strength สูงสุดที่ได้จากตอนที่ 1-3 ด้วยเครื่องเบลนด์แบบสกรูคู่ ที่อุณหภูมิ 140-200°C ความเร็วรอบของการหมุน 100 รอบต่อนาที ก่อนนำไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบโดยเครื่องขึ้นรูปโดยการกดอัด ที่อุณหภูมิ 190°C

ส่วนที่ 5 ทดสอบสมบัติการไหลของ PLA กับ Copolymer ที่ได้จากการเบลนด์ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)

ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA และ Copolymers ได้แก่ ลักษณะสัณฐานวิทยา, สมบัติเชิงกล และ ดัชนีการไหล

1.4.5 วิเคราะห์ผลการวิจัยที่ได้

1.4.6 สรุปผลงานวิจัย

1.4.7 รายงานผลงานวิจัย

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานการแตกหักของ PLA ให้มีความเหนียวขึ้นได้เหมาะสมแก่การใช้งานมากขึ้น สามารถปรับปรุง Impact strength ได้โดยการทำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ Copolymers รวมถึงสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ Copolymers โดยใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ สามารถเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานการแตกหักของ PLA ด้วยวิธีต่างๆได้ ซึ่งผลการวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดความรู้เพื่อวิจัยและพัฒนาวัสดุเพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของสินค้ารวมถึงความเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์



## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blends)[18]

พอลิเมอร์เบลนด์ เกิดจากพอลิเมอร์ 2 ชนิดเป็นอย่างน้อยหรือโคพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดมารวมกันในสถานะหลอมหรือสารละลาย หลังจากผสมกันแล้วต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่สามารถแยกแยะด้วยตา สามารถแบ่งประเภทของพอลิเมอร์เบลนด์ในระดับโมเลกุลได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.1.1 พอลิเมอร์เบลนด์แบบเข้ากันได้ (miscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy,  $\Delta G_m$ ) ของการผสมต้องมีค่าเป็นลบ  $\Delta G_m \cong \Delta H_m \leq 0$  miscible polymer blend จะมีความละเอียดของเฟสต่ำกว่า 0.1 ไมโครเมตร และจะส่งผลให้เกิด  $T_g$  เพียงค่าเดียว

2.1.2 พอลิเมอร์เบลนด์ไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิก (immiscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เข้ากันในทางเทอร์โมไดนามิก มีค่าพลังงานอิสระกิบส์มากกว่าศูนย์  $\Delta G_m \cong \Delta H_m > 0$  ถ้าเฟสพอลิเมอร์เบลนด์อยู่ในระดับไมโครเมตรจะเรียกว่า compatible blend หรือพอลิเมอร์อะลอย แต่ถ้ามีเฟสพอลิเมอร์เบลนด์มากกว่า 50 ไมโครเมตรจะเรียกว่า non compatible blend หรือเรียกว่าพอลิเมอร์ผสม (mix polymer)

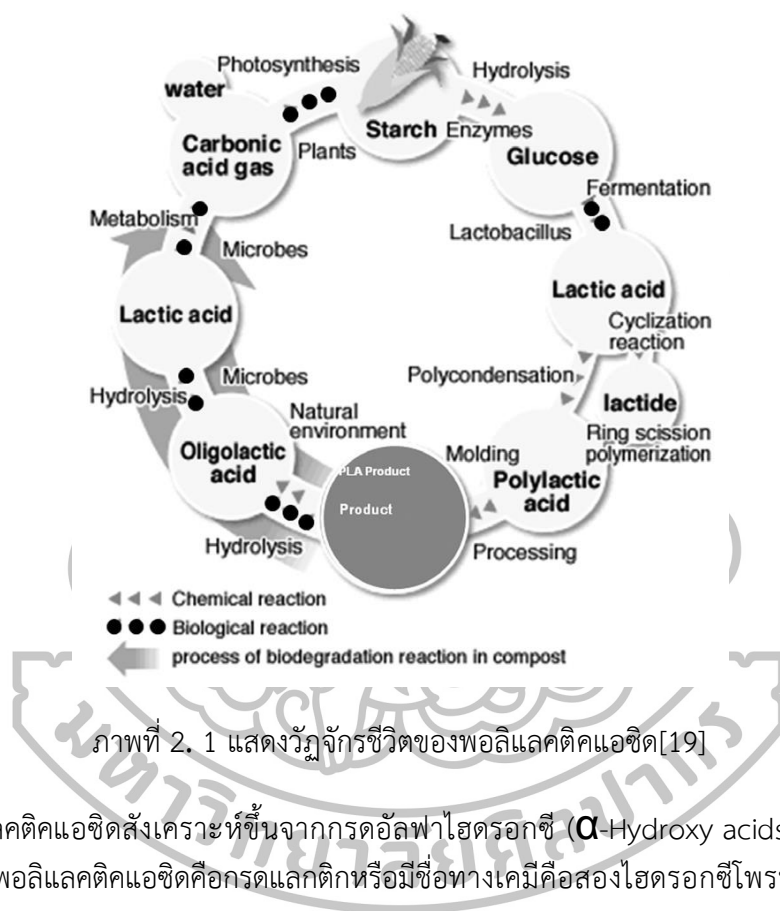
2.1.3 พอลิเมอร์เบลนด์แบบเข้ากันได้บางส่วน (partially miscible blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้บางส่วนที่ต่ำๆ ที่สามารถเบลนด์เข้ากันได้ในระดับโมเลกุลและมีบางส่วนที่เกิดการแยกเฟสเป็น compatible blend หรือ non compatible blend แต่พอลิเมอร์เบลนด์ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีแรงดึงดูดระหว่างภูมิภาคและสมบัติบางประการดีขึ้น

### 2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) [19]

ในปัจจุบันพอลิแลคติกแอซิดสามารถที่จะผลิตได้สองกระบวนการกล่าวคือจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีหรือกระบวนการหมัก การหมักเป็นกระบวนการที่นิยมในปัจจุบันโดยการใช้น้ำตาลจากอ้อย หัวบีท หรือแป้งจากข้าวโพด ข้าวสาลี มันชนิดต่างๆ มาเป็นวัตถุดิบด้วยการหมักด้วยจุลินทรีย์จะทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนจากแป้งเป็นน้ำตาลจากน้ำตาลเป็นกรดแลคติกตามลำดับ หลังจากนั้นก็จะผ่านขั้นตอนการแยกและทำให้มีความบริสุทธิ์ ก่อนที่จะนำกรดแลคติกที่ได้นั้นไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เป็นพอลิแลคติก โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นของแลคติกแอซิด หรือ



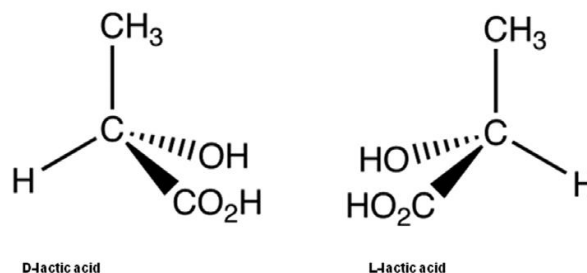
ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนของแลคไทด์ โดยกระบวนการหลังเป็นกระบวนการที่มีความนิยมสูงกว่า กรดแลคติกที่ผลิตได้จะมี 2 ชนิดคือ แอล-แลคติก (L-lactic) ซึ่งเป็นชนิดที่เกิดตามธรรมชาติและเป็นชนิดหลักที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักในอุตสาหกรรมและชนิดที่สองคือ ดี-แลคติก (D-lactic) จะสามารถผลิตจากกระบวนการหมักหรือกระบวนการทางเคมีสังเคราะห์ขึ้น โดยสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดนี้จะมีสมบัติอย่างไรขึ้นกับปริมาณสัดส่วนของ แอล/ดี-แลคติก อันเป็นองค์ประกอบหลักในพอลิแลคติกแอซิด ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2. 1 แสดงวัฏจักรชีวิตของพอลิแลคติกแอซิด[19]

พอลิแลคติกแอซิดสังเคราะห์ขึ้นจากกรดอัลฟาไฮดรอกซี ( $\alpha$ -Hydroxy acids) หน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิดคือกรดแลคติกหรือมีชื่อทางเคมีคือสองไฮดรอกซีโพรพิโอนิกแอซิด (2-Hydroxy propionic acid)

กรดแลคติกมีไอโซเมอร์สองรูปแบบคือแบบดีและแอล (ภาพที่ 2.2) ซึ่งเป็นนิแอนนชิโอเมอร์ (Enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (Optical active) ต่างกันกล่าวคือมีสูตรเคมีเหมือนกันแต่จัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกันและบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกันในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอลไอโซเมอร์หรือพบในรูปของเบลนดระหว่งแอลและดีไอโซเมอร์เรียกว่าของเบลนดระหุขิมิก (Racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL)หรือสารประกอบมีโซ (Meso-compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Optically inactive) ปัจจุบันการผลิตกรดแลคติกอาศัยการหมักเป็นหลักซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ที่ดี



ภาพที่ 2. 2 แสดงภาพโครงสร้างของ Poly(lactic acid)[19]

การผลิตพอลิแลคติกแอซิดอาจกระทำโดยสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซิโอะโทรปิก (Azeotropicdehydrativecon-densation) ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) และ/หรือการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide for-mation) พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (มากกว่า 100,000 ดาลตัน) ในเชิงพาณิชย์สังเคราะห์ได้โดยผ่านการเปิดวง (Ring-opening polymerization) ของแลคไทด์

#### 2.2.1 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ของพอลิแลคติกแอซิดส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางความร้อนสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier pro-perties) พอลิแลคติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอลไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดีไอโซเมอร์ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้นมีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำลงและมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) นอกจากนี้อุณหภูมิการหลอมเหลวอุณหภูมิกลาสทรานสิชันและระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอลไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วยได้กว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเช่นพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) และพอลิสไตรีน (PS) พอลิแลคติกแอซิดมีความใสและมีสมบัติทางกายภาพสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกัน สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีสมบัติได้หลากหลายจึงสามารถปรับให้รองรับความต้องการการใช้งาน

ตารางที่ 2. 1 แสดงตัวอย่างสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดจาก Bandula Wijayarathna และคณะ [20]

|  |                        |
|--|------------------------|
| Specific Gravity                               | 1.23 to 1.26           |
| Melt Mass-Flow Rate (MFR) 210°C/2.16 kg        | 6.0 to 78 g/10 min     |
| Molding Shrinkage Flow: 73°F                   | 0.0040 to 0.0042 in/in |
| Tensile Modulus Yield, 73°F                    | 293000 to 514000 psi   |
| Tensile Modulus Break, 73°F                    | 7080 to 8150 psi       |
| Tensile Elongation Yield, 73°F                 | 3.9 to 10%             |
| Tensile Elongation Break, 73°F                 | 1.5 to 10 %            |
| Flexural Modulus 73°F                          | 347000 to 684000 psi   |
| Flexural Strength                              | 6990 to 14200 psi      |
| Notched Izod Impact 73°F                       | 0.24 to 1.1 ft·lb/in   |
| Thermal 66 psi, Unannealed                     | 123 to 124 °F          |
| Thermal Peak Crystallization Temperature (DSC) | 266 to 332 °F          |

จากข้อมูลข้างต้นสมบัติความต้านทานแรงกระแทก (Izod impact strength) ของ PLA มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ซึ่งกลไกการแตกหักเกิดจากหลังจากที่วัสดุได้รับแรงที่สามารถเอาชนะแรงยึดติดระหว่างอะตอมได้ อะตอมจะเกิดการแยกออกจากกัน หากภายในชิ้นงานมีช่องว่างเกิดขึ้นเมื่อรับแรงกระแทก ที่จุดนี้จะทำให้เกิด stress ที่บริเวณที่จุดขาด และเกิดรอยขาดที่ต่อเนื่องจนชิ้นงานฉีกขาด โดยความเร็วของการฉีกขาดจะขึ้นอยู่กับมุมของการฉีกขาด ในวัสดุที่มีความแข็งเปราะจะมีมุมของการฉีกขาดที่เล็กแหลมเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นที่สูงกว่าลักษณะมุมที่เกิดจากการฉีกขาดจะมีมุมที่กว้าง

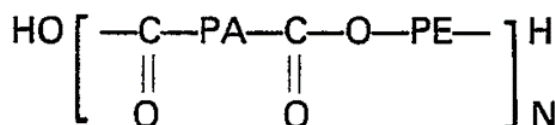
วิธีการแก้สมบัติความต้านทานแรงกระแทก (impact) ที่น้อยของ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) สามารถทำได้หลายวิธีตามที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้อันได้แก่

1. โดยการเติม Impact modifier
2. โดยการเบลนด์กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเบลนด์ระหว่าง PLA/Thermoplastic elastomer ได้แก่ EAE, EVA, EPDM, SEBS, PLA/Soft plastic ได้แก่ Polyamide elastomer (PAE) และ Poly Butylene adipate co terephthalate (PBAT) และ PLA/Impact modifiers ได้แก่ Biomax และ ABS powder

### 2.3 พอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (Polyamide elastomer, PAE) [22, 23]

Polyamide เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือสารประกอบไดเอมีนและสารประกอบไดคาร์บอกซิลิก เกิดปฏิกิริยา polymerization แบบควบแน่น จะเกิดเป็นพันธะเอไมด์ตลอดความยาวสายโซ่ ซึ่งพันธะเอไมด์นี้จะก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ ทำให้พอลิเอไมด์มีความแข็งแรง มีความแข็งแรงสูงรับแรงได้มาก แต่เนื่องจากการแพ็คตัวของสายโซ่ที่แน่น และเกิดผลึกได้มาก ทำให้พอลิเอไมด์มีความแข็ง อุณหภูมิหลอมสูง จึงต้องทำการปรับปรุงให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นโดยการทำ Copolymer แบบบล็อกกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น polyether จะได้เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดี และมีความยืดหยุ่น อุณหภูมิหลอมต่ำลง



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PEBAX[21]

สมบัติเชิงกลของ PEBAX แสดงในตารางที่ 2.2 โคพอลิเมอร์นี้น่าสนใจที่จะเบลนด์กับ PLA เพื่อปรับปรุงสมบัติทนแรงกระแทกเนื่องจากมันมีหมู่เอไมด์ที่น่าจะเกิดแรงพันธะไฮโดรเจนกับหมู่เอสเทอร์ใน PLA ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองเบลนด์เข้ากันได้ดี และ PEBAX ยังมีอนุภาคที่อุณหภูมิห้องต่ำมากและการยืดสูงซึ่งแสดงสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ยังเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทนแรงกระแทกสูงมาก



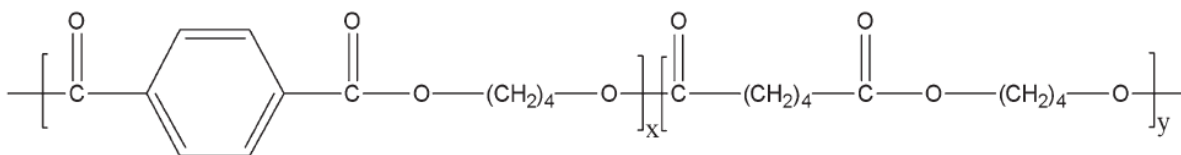
ตารางที่ 2. 2 แสดงสมบัติของ PAE เกรดPEBAX 2533 SA 01 Med จากบริษัท Arkema [22]

| Main Characteristics  | Value  | Unit   | Test Method     |
|---|--|--|-----------------|
| Density   | 1.00   | g/cm <sup>3</sup>  | ISO 1183        |
| Water Absorption at Equilibrium<br>At 20°C and 50 % RH                                  | 0.4  | %  | ISO 62          |
| Water Absorption<br>At 23°C and 24 h in water   | 1.2  | %  |                 |
| Melting Point   | 134  | °C   | ISO 11357       |
| Vicat Point<br>Under 1 daN  | 58   | °C   | ISO 306         |
| Shrinkage (after 24h, 4 mm, mould at 20°C)<br>//<br>⊥                                   | 0.5<br>0.8                                   | %<br>%   | Internal method |
| Hardness Shore (*)<br>Instantaneous<br>After 15 s                                       | 27<br>22                                     | Shore D<br>Shore D   |                 |
| Tensile Test (*)<br>Stress at Break<br>Strain at Break                                  | 32<br>>750                                   | MPa<br>%   | ASTM D 638      |
| Flexural Modulus (*)  | 12   | MPa  | ISO 178         |
| Charpy Impact<br>Unnotched 23°C<br>Unnotched -30°C<br>V-notched 23°C<br>V-notched -30°C | No break<br>No break<br>No break<br>No break | kJ/m <sup>2</sup><br>kJ/m <sup>2</sup><br>kJ/m <sup>2</sup><br>kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179         |

(\*) Samples conditioned 15 days at 23°C - 50 % R.H.

#### 2.4 พอลิบิวทิลีนอะดีเพตโคเทอเรพทาเลต (PBAT) [23, 24]

พอลิบิวทิลีนอะดีเพตโคเทอเรพทาเลตเป็นโคพอลิเอสเตอร์อะลิฟาติก-อะโรมาติกที่สามารถย่อยสลายได้ ที่ผลิตจากแหล่งฟอสซิล พอลิบิวทิลีนอะดีเพตโคเทอเรพทาเลตมีความยืดหยุ่นสูงและเหนียว มักใช้ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตามพอลิบิวทิลีนอะดีเพตโคเทอเรพทาเลตมีค่ามอดูลัสที่ต่ำ และมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูง

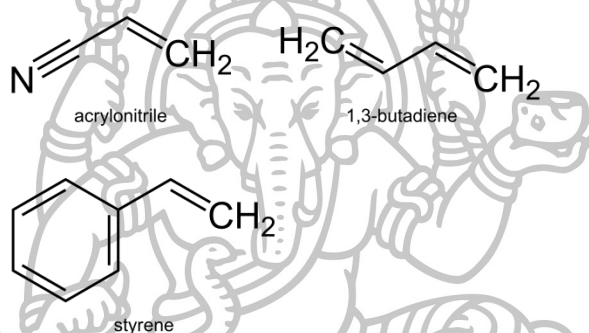


ภาพที่ 2. 4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดีเพตโคเทอเรพทาเลต (PBAT) [25]

บริษัทที่จัดจำหน่ายพอลิบิวทิลีนอะดีเพตโคเทอเรพทาเลต ได้แก่ BASF PlasticsPortal จำหน่ายในนาม Ecoflex®

## 2.5 อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) [26] ชนิดผง

ABS หรือ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene เป็นพลาสติก Thermoplastic หรือ พลาสติกที่มีความแข็งสูงเทียบเท่าพอลิสไตรีนแต่มีสมบัติทนแรงกระแทกที่สูงกว่ามาก มีการใช้ที่แพร่หลาย โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใสและความแข็งแรงสูง มีจุดหลอมเหลวสูง คือ 200-250 องศา เป็นพลาสติกอีกตัวหนึ่งที่ใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printer) นอกเหนือจาก PLA ชิ้นงานที่ทำจาก ABS เช่น ตัวต่อ Lego ที่เราเห็นกันอยู่ทั่วไป เหมาะงานด้าน Engineering และ Mechanics ลักษณะของแข็ง กึ่งยาง และทนต่อสภาพแวดล้อม กรด อุณหภูมิ และแสงแดดได้ จึงสามารถใช้ได้ดีทั้งงานภายนอก และ ภายใน สามารถใช้งานได้ยาวนานกว่า และเก็บรักษาง่ายกว่า แต่ชิ้นงานอาจจะไม่สวย เท่า PLA เนื่องจาก PLA มีความใสหรือเงากว่า [27, 28] โครงสร้างโมเลกุลของ ABS แสดงในรูป 2.5

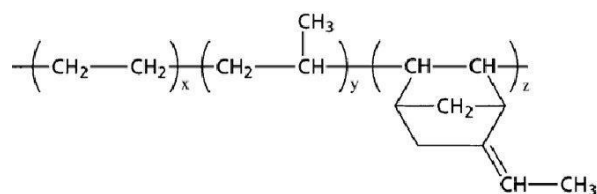


ภาพที่ 2. 5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) [26]

องค์ประกอบของ ABS powder ประกอบด้วย Acrylonitrile 10-12 % Polybutadiene 60-62 % Styrene 28-30 % มีทงกายภาพเป็นผงละเอียดสีขาว ผงสามารถไหลได้อย่างอิสระ มีความหนาแน่น : 0.26-0.36 g/cc ใช้ช่วยปรับปรุงความเหนียว มีความแข็งแรงสูงต้านทานการเสีรูบ มีความทนต่อสารเคมีที่ดี แกนกลางยึดหยุ่นเป็นพอลิบิวตะไดอีน ผิววนอกป็น ABS ที่น่าจะมีหมู่ Acrylonitrile เหลือไว้ทำปฏิกิริยาเคมีกับ PLA

## 2.6 เอธิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene-propylene diene rubber, EPDM)

ในระยะแรกเริ่มที่ได้มีการสังเคราะห์ทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไซนระหว่างโมโนเมอร์ของเอธิลีน (ethylene) กับโพรพิลีน (propylene) จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) และเป็นยางเรียกว่า ยาง EPM แต่ยางที่สามารถ crossling ได้ดีจำเป็นต้องมีพันธะคู่ในสายไซโมเลกุล ในการทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เพอร์ออกไซด์ (peroxide) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาชนิดใหม่โดยการเติมโมโนเมอร์ตัวที่สาม คือ ไดอีน (diene) ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการผลิตปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไซนทำให้ได้ยางที่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในสายไซโมเลกุล จึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน ยางชนิดนี้ คือ ยาง EPDM

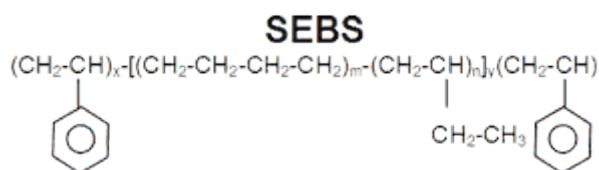


ภาพที่ 2. 6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ EPDM [29]

ยาง EPDM มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอธิลีนและโพรพิลีน รวมถึงปริมาณของ diene โดยทั่วไปยางชนิดนี้จะมีเอธิลีนอยู่ 45-85 % โมล และปริมาณของ diene อยู่ในช่วง 3-11 % โมล ชนิดของ diene ที่ใช้อย่างกว้างขวางมี 3 ชนิดคือ Dicyclopentadiene (DCPD) Ethylidene Norbornene (ENB) และ trans-1,4-hexadiene (1,4 HD) โดยชนิดที่ใช้มากที่สุดคือ ENB เพราะจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนส์ด้วยกำมะถัน (sulphur vulcanization) ยาง EPM และ EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายที่ไม่มีขั้ว เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) จึงมีสมบัติเป็นยางที่มีค่า Tg ต่ำมาก ใช้เบลนด์กับพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก เช่น เพิ่มความเหนียวและความทนต่อแรงกระแทก (impact resistance) เป็นต้น [30] และการที่ยาง EPDM มีพันธะคู่ในโมเลกุลจึงน่าจะสามารรถเบลนด์เข้ากับ PLA โดยมีสารเปอร์ออกไซด์สารทำปฏิกิริยาในรีเอ็กตีพเบลนด์

## 2.7 สไตรีน เอทิลีน บิวทิลีน สไตรีน (styrene-ethylene-butadiene-styrene block Copolymer, SEBS)

สไตรีนกับบล็อกโคพอลิเมอร์เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีราคาถูกกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์กลุ่มอื่น มีสมบัติทนทานต่อการเสียดสี และความล้า สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี วัสดุกลุ่มนี้ถูกประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น เอสบีเอสใช้เป็นสกรูประกอบรองเท้า เอสไอเอสมีสมบัติเหนียวและอ่อนตัวจึงใช้เป็นสารยึดติด ส่วนเอสอีบีเอสมีความแข็งแรง และความทนทานมากกว่าเอสบีเอสและเอสไอเอส จึงใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และส่วนประกอบของสายเคเบิล[31] เนื่องจากมันเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มันจึงสามารถหลอมไหลได้ง่าย น่าจะเบลนด์เข้ากับ PLA ได้ง่ายทั้งยังมีหมู่บิวตะไดอินที่เป็นพันธะคู่อยู่ด้วย จึงน่าสนใจเบลนด์เปรียบเทียบกับ EPDM



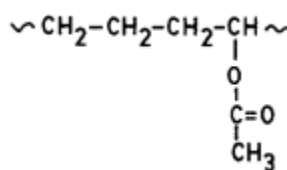
ภาพที่ 2. 7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ SEBS[32]

## 2.8 เอทิลีนไวนิลแอสีเตต (Ethylene vinyl acetate, EVA)

เอทิลีนไวนิลแอสีเตตหรืออีวีเอ (ethylene vinyl acetate EVA) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งได้จากการทำพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ของสารเอทิลีนโมโนเมอร์ (ethylene monomer) กับสารไวนิลแอสีเตตโมโนเมอร์ (vinyl acetate monomer - VAM) แบบ random Copolymer พอลิเมอร์อีวีเอเป็นเป็นผลงานการวิจัยของบริษัท ดูปองท์ (Dupont) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้รับการจดสิทธิบัตรไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2499 (ค.ศ.1956) อีวีเอถูกผลิตออกสู่ตลาดในปี พ.ศ. 2503 (ค.ศ.1960) ในชื่อทางการค้าว่าเอลแวกซ์ (Elvax) ปัจจุบันอีวีเอถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมหีบห่อบรรจุภัณฑ์ กาว เส้นลวด พื้นรองเท้า และอื่น ๆ เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ชนิดหนึ่ง มี  $T_g$  เท่ากับ  $-42^{\circ}\text{C}$  และ  $T_m$  เท่ากับ  $75^{\circ}\text{C}$

### 2.8.1 โครงสร้างของอีวีเอ

เอทิลีนไวนิลแอสีเตตโคพอลิเมอร์มีลักษณะโมเลกุลเป็นสายยาวของเอทิลีน โดยมีไวนิลแอสีเตตเกาะกระจายเป็นหย่อมบนสายโซ่โมเลกุล ในลักษณะโครงสร้างโคพอลิเมอร์แบบไม่เป็นระเบียบ (random Copolymer) และเนื่องจากสารชนิดนี้เกิดจากการรวมโมโนเมอร์ 2 ชนิดคือ เอทิลีนโมโนเมอร์กับไวนิลแอสีเตตโมโนเมอร์ ดังนั้นสมบัติของอีวีเอจึงเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของไวนิลแอสีเตตในโมเลกุล โดยปริมาณของสารไวนิลแอสีเตตในโมเลกุลมีผลกระทบต่ออีวีเอดังนี้ ซึ่งเมื่อมีปริมาณของไวนิลแอสีเตตมากกว่าร้อยละ 40 สารอีวีเอจะมีความเป็นอสัณฐานในโมเลกุลอย่างสมบูรณ์ และมีความสามารถเบลนด์เข้ากับ PLA เมื่ออีวีเอมีปริมาณไวนิลแอสีเตตเพิ่มมากขึ้นอีวีเอสามารถเบลนด์รวมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีสภาพขี้ เช่น พลาสติกไซซ์ฟิวิซี (plasticized PVC) ได้ อีวีเอ เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเป็นเครือข่ายหรือร่างแหโดยการใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ (peroxide) อีวีเอมีสมบัติความอ่อนนุ่มในตัว สูตรโครงสร้างแสดงในภาพ 2.8



ภาพที่ 2. 8 แสดงโครงสร้าง EVA [33]



ตารางที่ 2. 3 แสดงสมบัติของเอทิลีนไวนิลแอสีเตด (Ethylene vinyl acetate, EVA) ของบริษัท ExxonMobil [34]

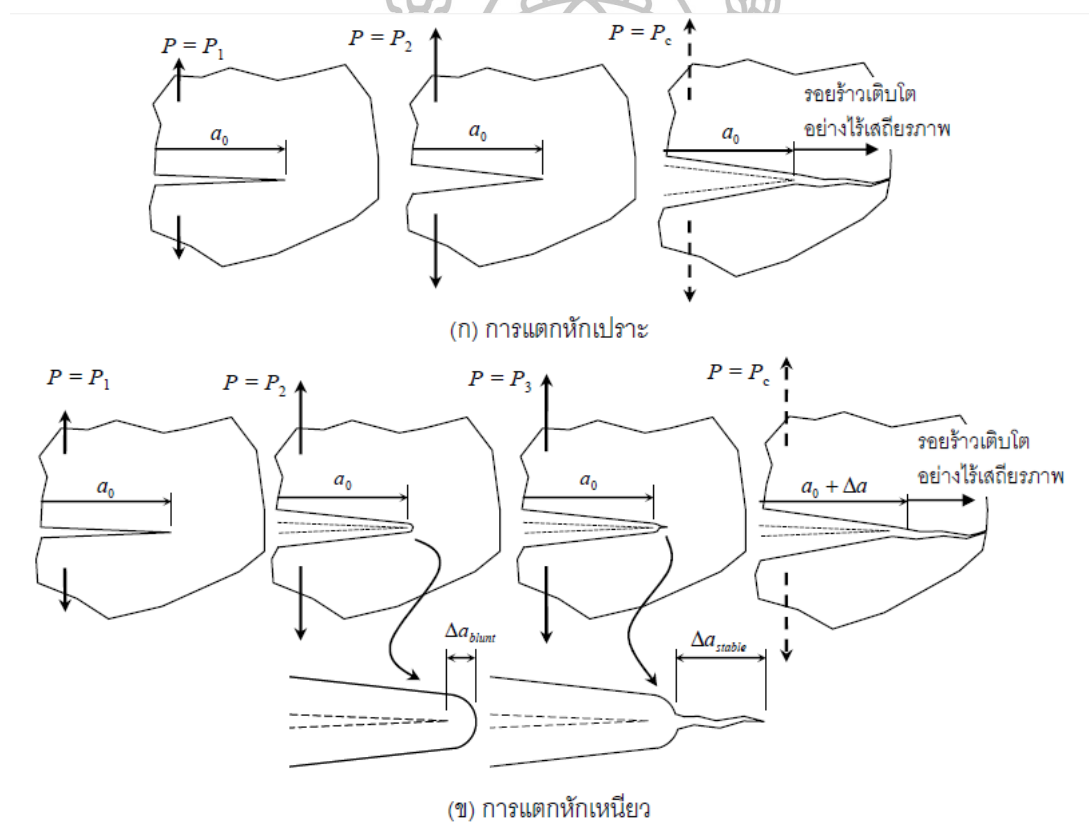
| Resin Properties                       | Typical Value Unit      | Test Based On     |
|--|-------------------------|-------------------|
| Density                                | 0.951 g/cm <sup>3</sup> | ExxonMobil Method |
| Melt Index <sup>2</sup>                | 400 g/10 min            | ExxonMobil Method |
| Vinyl Acetate Content                  | 27.5 wt%                | ExxonMobil Method |
| Peak Melting Temperature               | 71 °C                   | ExxonMobil Method |
| <b>Molded Properties</b>               |                         |                   |
| Molded Properties                      | Typical Value Unit      | Test Based On     |
| Tensile Modulus (5.0 mm/min)           | 15 MPa                  | ASTM D638         |
| Tensile Strength at Break (500 mm/min) | 3.0 MPa                 | ASTM D638         |
| Elongation at Break (500 mm/min)       | 700 %                   | ASTM D638         |

## 2.9 เอทิลีน อะครีลิกอีลาสโตเมอร์ (Ethylene acrylic elastomer, EAE)

EAE เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยบริษัท DuPont™ Vamac® G ซึ่งเป็น terpolymer ของเอทิลีน เมทาคริเลต และ cure site monomer ซึ่งจะเชื่อมขวางโดยใช้ระบบ amine-based vulcanization มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.03 และมีกลืนของอคริลิค ขณะทำการเบลนด์ควรมีการระบายอากาศที่ดี EAE ในการค้ามีชื่อว่า Vamac® G มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อน้ำมันกับสารหล่อลื่น มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ Vamac® G โดยทั่วไปสามารถทนอุณหภูมิสูงถึง 175°C (347°F) มีค่าการบวมตัว 50% ในน้ำมัน IRM 903 คุณสมบัติเหล่านี้ของ G Vamac® ทำให้มันเหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลายทั้ง การใช้งานยานยนต์รวมทั้งระบบส่งกำลัง ซีลปะเก็น, ฝาครอบคันโยก, ซีลลูกสูบ, ท่อน้ำหล่อเย็น, ท่อน้ำมันพวงมาลัยพาวเวอร์, ท่อเทอร์โบ, ท่อระบายอากาศ, ท่อน้ำหล่อเย็น, โอริง, grommets และรองหัวเทียน



non propagation crack ซึ่งรอยแตกร้าวนี้ยังสามารถเติบโตต่อไปภายใต้เงื่อนไขการให้แรงที่คงที่ โดยให้แรงดึงหรือการกดอัด เมื่อชิ้นงานมีพลังงานภายในสูงกว่าที่จำเป็นสำหรับการขยายตัวการร้าว โดยเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ในโครงสร้างก็คือ การเติบโตของรอยร้าวที่มีอัตราเร็วที่สูงมาก หรือสามารถเรียกอีกอย่างได้คือ การเติบโตของรอยร้าวอย่างได้เสถียรภาพ (unstable crack growth) การเติบโตแบบได้เสถียรภาพนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ 1 รอยร้าวมีการเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพจากความยาวเดิมทันทีที่ขนาดของแรงที่ให้ถึงค่าวิกฤติ 2 รอยร้าวมีการเติบโตแบบมีเสถียรภาพ (stable crack growth) จากความยาวเริ่มต้นระยะหนึ่งแล้วเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพต่อไป การแตกหักแบบที่ 1 เป็นการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) แบบที่ 2 เรียกว่า การแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture )



ภาพที่ 2. 11 พฤติกรรมการแตกหักของโครงสร้างที่มีรอยร้าว[39]

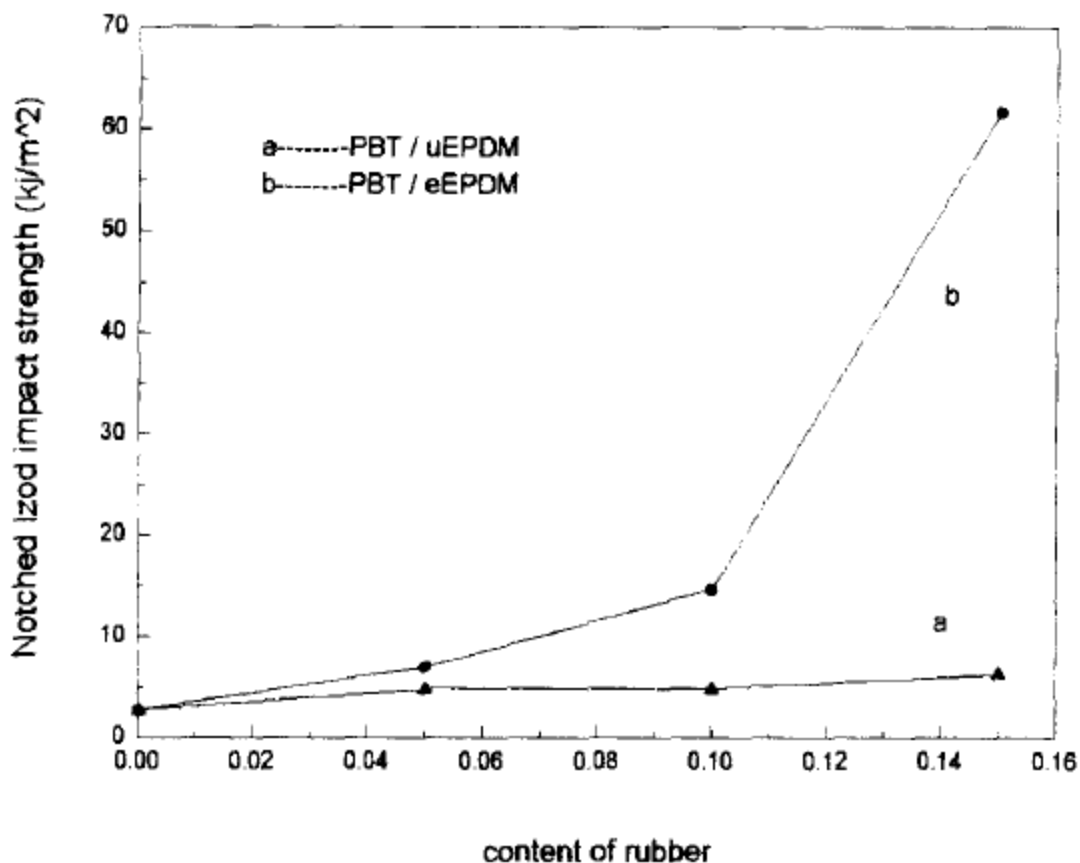
รูปที่ 2.11(ก) และ 1(ข) แสดงการแตกหักแบบเปราะและเหนียว ในรูปที่ 2.11(ก) เมื่อแรงที่ให้เพิ่มจาก  $P_1$  เป็น  $P_2$  ปากของรอยร้าวจะเปิดกว้างเพิ่มมากขึ้นแต่ยังคงมีมุมบริเวณปลายรอยแตกยังคงเป็นมุมแหลมเท่าเดิม เมื่อเพิ่มแรงให้ถึงจุดวิกฤติ  $P_c$  รอยร้าวจะเกิดการเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพจากจุดเดิมคือ  $a_0$  ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเกิดการเสียหาย ในรูป 2.11 (ข) เมื่อแรงที่ให้เท่ากับ  $P_2$  บริเวณ

ปลายของที่เกิดการแตกหักจะเกิดการครากและทำให้มุมของปลายรอยแตกเป็นมุมที่เพิ่มขึ้น ความยาวของรอยร้าวจะเพิ่มมากขึ้นเป็นระยะ  $\Delta a_{blunt}$  เมื่อเพิ่มแรงให้ถึงค่า  $P_3$  ความเครียดที่อยู่บริเวณปลายรอยร้าวที่มุมที่จะถึงค่าวิกฤติทำให้เกิดรอยร้าวใหม่ ซึ่งจะเติบโตต่อไปจนถึงระยะ  $\Delta a_{stable}$  การเติบโตของรอยร้าวที่เกิดขึ้นแบบนี้จะเรียกว่าการเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ เนื่องจากว่าหลังจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นเติบโตไปได้ระยะหนึ่งแล้วจะเกิดการหยุดเติบโต หากต้องการให้รอยร้าวต่อไปอีกต้องให้แรงเพิ่มเข้าไปอีก

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.12.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงแรงกระแทกโดยใช้ EPDM

กลุ่มของ Xue-Hui Wang และคณะ[40] ทำการปรับปรุงพอลิบิวทีลีน เทเลบทาเลต (PBT) โดยใช้ unepoxidized ethylene propylene diene rubber (uEPDM) และ epoxidized ethylene propylene diene rubber (eEPDM) ผสมในเครื่องผสมแบบปิด จากภาพที่ 2.12 พบว่าที่ 15 wt% ของยาง สมบัติความเหนียวของ PBT / uEPDM ดีขึ้นเพียงเล็กน้อยและยังคงมีสมบัติที่เปราะในขณะที่สมบัติความเหนียวของ PBT / eEPDM ได้ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยสูงกว่า pure PBT ประมาณ 23 เท่าและสูงกว่า PBT / uEPDM ประมาณ 10 เท่า จากลักษณะนี้จะแสดงถึง PBT / eEPDM มีขนาดที่เหมาะสมและเกิดการยึดเกาะระหว่างเฟสได้ดีกว่า PBT / uEPDM โดยการเพิ่มปริมาณของยาง uEPDM จะมีขนาดของอนุภาคเพิ่มจาก 1 เป็น 2 ไมโครเมตร ส่วน eEPDM จะได้ผลตรงข้ามคือมีขนาดเล็กลงจาก 1 เหลือ 0.4 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณยางไปถึง 15 wt% การกระจายตัวของอนุภาคยาง eEPDM มีการกระจายตัวของขนาดที่แคบกว่าในยาง uEPDM ในการผสมระหว่าง PBT/uEPDM พบว่าอนุภาคยางมีการเสียรูปที่น้อยและเกิดการยึดออกที่ต่ำแสดงถึงการยึดติดระหว่างเฟสที่น้อยส่งผลต่อค่า impact ที่ต่ำ

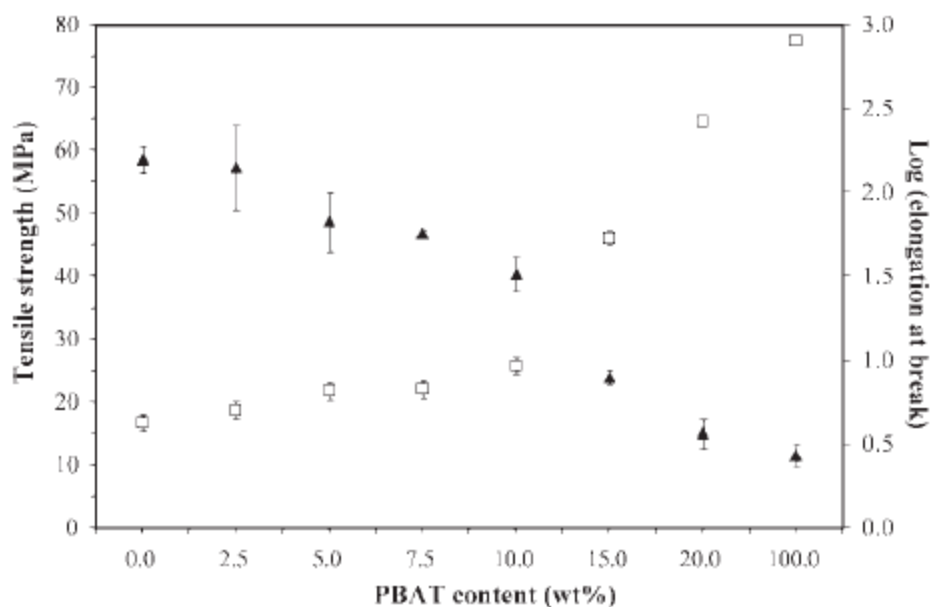


ภาพที่ 2. 12 แสดงผลการทดสอบ impact strength ในอัตราส่วนของยางต่างๆกัน ในพอลิเมอร์เบลนด์ PBT/rubber[40]

ซึ่งจากงานวิจัยของข้าพเจ้าได้เลือกใช้ EPDM เบลนด์กับ PLA เพื่อปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกโดยเพิ่มปริมาณ EPDM ในปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับรวมถึงศึกษาการเพิ่มความเข้ากันได้โดยเติม perkadox ลงไประหว่างการผสมโดยคาดการณ์ว่าจะเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเฟสของ PLA และ EPDM

#### 2.12.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบลนด์ PLA และ PBAT

กลุ่มของ Jen-Taut Yeh [23] ได้ศึกษาความเข้ากันได้และการตกผลึกของวัสดุเบลนด์ระหว่าง PLA และ PBAT พบว่าการใส่ PBAT ในปริมาณ 25 wt% จะทำให้ค่า  $T_g$  ของวัสดุเบลนด์มีค่าลดลงจาก 62.3 เป็น 58.6 องศาเซลเซียส



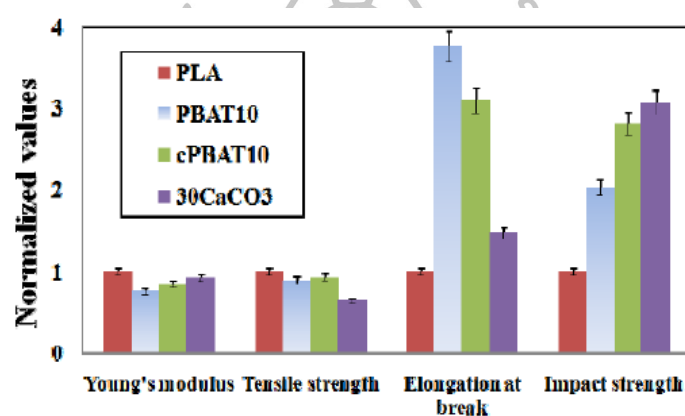
ภาพที่ 2. 13 แสดง Tensile properties ของ PLA<sub>x</sub>PBAT<sub>y</sub> ที่สัดส่วนของ PBAT ต่างๆ [23]

จากภาพที่ 2.13 แสดงค่า Tensile Strength ที่สูงของชิ้นงาน PLA สูงถึง 58.6 MPa แต่มี elongation at break ที่ต่ำคือ 4.3% แต่ในทางตรงกันข้าม PBAT มีค่า Tensile Strength ที่ต่ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.6 MPa แต่มีค่า elongation at break ที่สูงถึง 811% ภายหลังจากเบลนด์ PBAT ลงใน PLA พบว่า PLA<sub>x</sub>PBAT<sub>y</sub> มีค่า Tensile Strength ลดลงแต่มีค่า elongation at break ที่สูงขึ้นเมื่อส่วนของ PBAT มีค่าสูงขึ้นตัวอย่างเช่น ค่าของ Tensile Strength และ elongation at break ของตัวอย่าง PLA<sub>x</sub>PBAT<sub>y</sub> มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นจาก 58.6 ลดลงเหลือ 40.2 และ 23.0 MPa และ จาก 4.3 เพิ่มขึ้นเป็น 9.5 และ 266.0% ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10 และ 20% โดยน้ำหนักซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าผลของการเติม PBAT ในปริมาณที่เหมาะสมลงใน PLA จะช่วยปรับปรุงสมบัติความเปราะของ PLA ได้

กลุ่มของ A. Teamsinsungvon และคณะ[41] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBAT/Calcium carbonate ในการเตรียมวัสดุจะทำใน co-rotating intermeshing twin อุ่นหม้อมีอยู่ที่ 160/165/170/165 / 160°C ความเร็วสกรูเป็น 25 รอบต่อนาที

ตารางที่ 2. 4 แสดงสัดส่วนต่างๆของวัสดุคอมโพสิต[41]

| Designation         | PLA [%wt.] | PBAT [%wt.] | CaCO <sub>3</sub> [%wt.] | PLA-g-MA [phr] |
|---------------------|------------|-------------|--------------------------|----------------|
| PLA                 | 100        | -           | -                        | -              |
| PBAT10              | 90         | 10          | -                        | -              |
| cPBAT10             | 90         | 10          | -                        | 2              |
| 30CaCO <sub>3</sub> | 90         | 10          | 30                       | 2              |



ภาพที่ 2. 14 แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA, PLA / PBAT, PLA / PBAT และ PLA / PBAT / CaCO<sub>3</sub>[41]

ตารางที่ 2. 5 แสดงค่า Tensile properties และ impact strength ของ PLA, PLA/PBAT และ PLA/PBAT/CaCO<sub>3</sub>[41]

| Designation         | Tensile strength [MPa] | Elongation at break [%] | Young's modulus [MPa] | Impact strength [kJ/m <sup>2</sup> ] |
|---------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| PLA                 | 55.49±1.22             | 11.89±1.92              | 643.95±83.13          | 1.58±0.16                            |
| PBAT10              | 49.40±1.37             | 44.72±8.51              | 487.10±36.77          | 3.21±0.18                            |
| cPBAT10             | 51.67±1.85             | 36.85±1.74              | 543.65±24.19          | 4.45±0.33                            |
| 30CaCO <sub>3</sub> | 35.58±2.02             | 17.56±2.91              | 593.34±40.77          | 4.85±0.61                            |

จากตารางที่ 2.4 พบว่าสมบัติเชิงกลของ PLA, PLA/PBAT และ PLA/PBAT/CaCO<sub>3</sub> ค่าของ Elongation at break เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจาก PBAT ที่มีความยืดหยุ่นได้ดีเมื่อเบลนด์ร่วมกับ PLA จะทำให้ PLA มีความสามารถในการดึงยืดได้มากขึ้นเมื่อพิจารณาค่า Impact Strength พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดอันเป็นผลมาจากความยืดหยุ่นที่ดีใน PBAT เมื่อเข้าไปอยู่ในเนื้อวัสดุจะทำให้แรงที่ใส่เข้าไปถูกดูดซับโดย PBAT

### 2.12.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบลนด์ PLA และ PAE

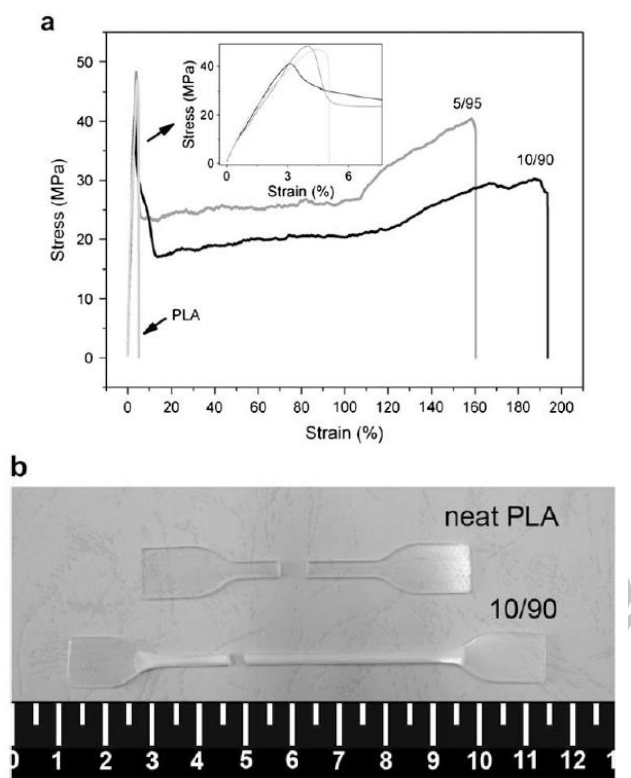
กลุ่มของ Wei Zhang [22] ได้ทำการศึกษา shape-memory โดยใช้ polyamide elastomer งานวิจัยนี้ได้ใช้ polyamide elastomer (PAE) ในปริมาณที่แตกต่างกันและพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ polyamide elastomer (PAE) elongation at break มีค่าสูงขึ้น และการแตกหักเปลี่ยนจากการแตกหักแบบเปราะเป็นการแตกหักแบบเหนียวและเมื่อใช้ PAE 10% โดยน้ำหนักจะทำให้ชิ้นงานยืดได้ถึง 194.6% โดยที่ยังสามารถรับแรงได้ใกล้เคียงกับ PLA ที่ไม่เบลนด์ เนื่องจาก PAE จะทำหน้าที่เป็นจุดรวมความเค้น เมื่อ PAE ได้รับความเค้นจะกระจายความเค้นไปทั้งสามแนวแกน ทำให้พลังงานถูกกระจายออกไป นอกจากนี้เมื่อขึ้นตัวอย่างที่ถูก ยืดได้รับความร้อน จะเกิดการหดตัวกลับไปยังรูปร่างเดิม หรือ ชิ้นงานทดสอบมีสมบัติในการ คืนรูปร่างเดิมเป็นผลมาจากการคงค้างของความเค้นในเฟสของ PAE เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะทำให้สายโซ่เคลื่อนที่และเกิดการปลดปล่อยความเค้น ชิ้นวัสดุจึงกลับไปสู่รูปร่างเดิม และเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่วน PAE จะทำหน้าที่ในการกระจายพลังงานป้องกันการแยกตัวของเนื้อเมทริกซ์ของ PLA

ตารางที่ 2. 6 แสดงค่า Glass transition temperatures และสมบัติเชิงกลของวัสดุเบลนด์ PAE/PLA[22]

| PAE content (%) | $T_{g,PAE}$ (°C) | $T_{g,PLA}$ (°C) | Storage modulus <sup>a</sup> (MPa) | Static modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) |
|-----------------|------------------|------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 0               |                  | 79.48            | 2462                               | 1814                 | 46.8                   | 5.1                     |
| 5               | -47.31           | 77.85            | 2116                               | 1517                 | 48.1                   | 161.5                   |
| 10              | -53.87           | 75.97            | 2017                               | 1633                 | 40.9                   | 194.6                   |
| 20              | -57.89           | 74.47            | 1442                               | 1240                 | 23.7                   | 184.6                   |
| 30              | -60.26           | 73.84            | 1395                               | 1050                 | 24.6                   | 367.2                   |

<sup>a</sup> At 20 °C from DMA measurements.





ภาพที่ 2. 15 แสดง (a)กราฟ Tensile stress–strain ของวัสดุเบลนด์ PAE/PLA และ (b) รูปของการแตกหักจากการดึง tensile ของ neat PLA และวัสดุเบลนด์โดยมี 10% PAE เบลนด์เป็นองค์ประกอบ

[22]

จากตารางที่ 2.5 เป็นการนำข้อมูลจากการทดสอบของภาพที่ 2.15 นำไปใส่เป็นข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PAE เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ polylactide มีความเหนียวมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของ elongation at break ในการทดสอบการดึงเมื่อปริมาณ PAE ในพอลิเมอร์เบลนด์มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับความเค้นของเฟส PAE แทนเนื้อ PLA ทำให้ PLA ไม่แตกหักและเกิดการจืดเรียงตัวใหม่ได้ดีขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ใช้ PEBAX เพื่อปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกโดยเบลนด์ในอัตราส่วน PLA:PEBAX 90:10 และ 80:20 โดยมีระบบที่มีการเติม perkadox และ maleic anhydride เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้เช่นเดียวกับ PBAT

#### 2.12.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบลนด์ PLA และ EVA

Ma, P. และคณะ[42] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยเติม EVA ที่มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ vinyl acetate พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ PLA:EVA50 จากตารางที่ 2.7 พบว่าค่า strength, modulus และ hardness ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ EVA แต่สมบัติการรับแรงกระแทกและค่าการดึงยึดจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่ม

สัดส่วนของ EVA ค่า notched Izod impact ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA50 ยังคงมีค่าที่ต่ำเมื่อทำการเบลนด์ EVA ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจเกิดจากเพราะอนุภาคของ EVA50 ยังมีขนาดที่เล็กอย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า Impact toughness พบเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2. 7 แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA/EVA50 เบลนด์โดยมี EVA50 เป็นองค์ประกอบ[42]

| PLA/EVA50 (wt/wt) | Notched Izod impact toughness (kJ m <sup>-2</sup> ) | Tensile yield strength (MPa) | Elongation at break (%) | Flexural strength (MPa) | Flexural modulus (GPa) | Hardness (Shore D) |
|-------------------|---|------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| 100/0             | 3   | 75                           | 9                       | 105                     | 3.7                    | 86                 |
| 95/5              | 2   | 68                           | 310                     | 90                      | 3.3                    | 85                 |
| 90/10             | 5   | 61                           | 390                     | 75                      | 2.9                    | 84                 |
| 85/15             | 32  | 54                           | 430                     | 70                      | 2.7                    | 82                 |
| 80/20             | 64  | 45                           | 340                     | 65                      | 2.4                    | 80                 |
| 70/30             | 83  | 37                           | 400                     | 50                      | 1.9                    | 76                 |

### 2.13.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบลนด์ PLA และ ABS

Yongjin Li. และคณะ[43] ได้ทำการศึกษาปรับปรุงสมบัติ impact strength และ elongation at break ของ poly(L-lactide) (PLLA) ด้วย acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS) โดยพบว่า PLLA/ABS มีความไม่เข้ากันในทางเทอร์โมไดนามิกส์ จึงได้มีการเติมสาร styrene/acrylonitrile/glycidyl methacrylate copolymer (SAN-GMA) และใช้สารเร่งปฏิกิริยา ethyltriphenyl phosphonium bromide (ETPB) เพื่อเพิ่มความเข้ากันจากตารางที่ 2.7 พบว่า PLLA มีความแข็งที่มากมีค่า tensile strength แต่มีค่า elongation at break ประมาณ 4% ในการผสมระหว่าง PLLA/ABS ที่มีความไม่เข้ากันสูงทำให้เกิดความเปราะง่ายและมีการหักที่การยืดต่ำ เนื่องจากการมีอนุภาคที่ใหญ่และแรงยึดติดระหว่างเฟสที่ต่ำ เมื่อใส่สารเพิ่มความเข้ากันจะเห็นได้ชัดว่าค่า tensile properties มีค่าที่สูงขึ้นจากตารางที่ 2.7 ทำให้ทราบว่าเมื่อผสม PLLA/ABS ในอัตราส่วน 50:50 และ 70:30 จะทำให้ค่าสมบัติเชิงกลแยกลงแต่เมื่อเพิ่มสารช่วยเพิ่มความเข้ากันคือ SANMGA และ ETPB จะทำให้ค่าสมบัติเชิงกลดีขึ้นอย่างมากอันเนื่องมาจากการใส่ SANMGA และ ETPB จะทำให้เมื่อขณะให้แรงในการฉีกขาดออกของวัสดุความเข้ากันของ PLLA และ ABS จะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสจึงจำเป็นที่จะต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดออก

ตารางที่ 2. 8 แสดงสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบ PLA/PU[43]

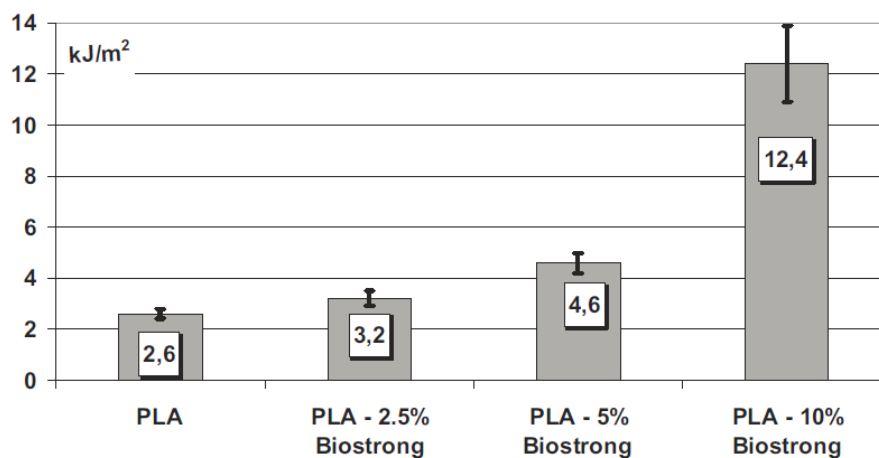
| Samples                                 | Storage modulus* (Mpa) | Static modulus (Mpa) | Tensile strength (Mpa) | Elongation at break (%) | Impact strength (KJ/m <sup>2</sup> ) |
|---|------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| PLLA                                    | 2805                   | 2024                 | 65.5                   | 4.0                     | 69.7                                 |
| ABS                                     | 1556                   | 807                  | 32.9                   | 122                     | 425                                  |
| PLLA/ABS = 50/50                        | 2105                   | 1294                 | 38.8                   | 3.5                     | 48.3                                 |
| PLLA/ABS/SANMGA = 50/50/5               | 2110                   | 1327                 | 42.9                   | 18.0                    | 119.7                                |
| PLLA/ABS/SANMGA/ETPB = 50/50/5/0.02 phr | 2151                   | 1358                 | 43.6                   | 23.5                    | 162.8                                |
| PLLA/ABS = 70/30                        | 2548                   | 1554                 | 46.7                   | 3.1                     | 63.8                                 |
| PLLA/ABS/SANMGA = 70/30/5               | 2550                   | 1405                 | 43.6                   | 20.5                    | 81.1                                 |
| PLLA/ABS/SANMGA/ETPB = 70/30/5/0.02 phr | 2532                   | 1352                 | 44.6                   | 23.8                    | 123.9                                |

\* At 20 °C from the DMA measurement.

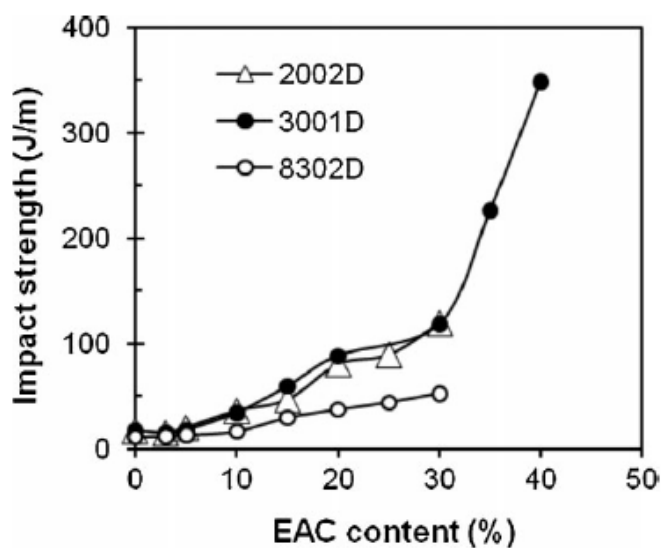
จากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ABS มีความเข้ากันได้ต่ำแต่เมื่อปรับปรุงความเข้ากันระหว่างเฟสของ PLA/ABS จะทำให้สามารถปรับปรุง impact strength ได้งานวิจัยของข้าพเจ้าจึงเลือกใช้ ABS powder ที่มีลักษณะเป็น core shell มาผสมโดยลักษณะของ ABS powder จะมีลักษณะเป็น core shell

#### 2.12.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบลนด์ PLA กับ Blomax และ PLA กับ EAC

Murariu และคณะ[44] ได้ศึกษาผลของความอ่อนนุ่มเมื่อเติม Blomax Strong® 100 ลงใน PLA และ high-filled PLA/b-calcium sulphate anhydrite (All) ภาพที่ 2.16 พบว่า Notched Izod impact strength ของ PLA ที่มีการเติม Blomax Strong® 5 และ 10 wt% ช่วยปรับปรุงค่า impact จาก  $2.6 \text{ kJ/m}^2$  ซึ่งเป็นของ Neat PLA เป็น  $4.6$  และ  $12.4 \text{ kJ/m}^2$  ตามลำดับ Elongation at break มีค่าสูงกว่า 25% เมื่อใช้ Blomax 10 wt% ในขณะที่ tensile strength และ modulus ลดลงเล็กน้อยเมื่อเติม Blomax การเติม Blomax 5 และ 10 wt% ลงใน PLA/All (70/30, wt/wt) สามารถปรับปรุง impact strength ได้เป็น  $4.5$  และ  $5.7 \text{ kJ/m}^2$  นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ Bioma ยังเพิ่มความเหนียวของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax ได้ดีอีกด้วยโดยดูได้จากค่า nominal strain at break ที่มีค่ามากขึ้น Afrifah และ Matuana[45] ได้ทำการตรวจสอบกลไกความเหนียวของ PLA ชนิดที่มีผลึก และ ไม่มีผลึก กับ ethylene/acrylate copolymer (EAC) โดยแสดงในรูปแบบของการแตกหักผ่าน crazing หรือ microcracking และ debonding ของอนุภาค impact modifier กับ เมทริกซ์ ผลของการเติม impact modifier ที่ต่ำกว่า 10 wt% จากภาพที่ 2.17 ทำให้เห็นถึงกลไกการแตกหักที่เพิ่มขึ้นทั้ง debonding, fibrillation, crack bridging, และ matrix shear yielding ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของการแตกหักแบบเปราะเป็นการแตกหักแบบเหนียวนอกจากนี้ PLA ที่เป็น semi-crystalline เมื่อเติม EAC จะให้ค่าความเหนียวที่สูงกว่า amorphous PLA. ที่ 40 wt% เมื่อทำการทดสอบ Tensile properties พบว่าการเติม EAC จะทำให้เกิดการยืดออกได้สูงขึ้นเป็นการยืนยันว่าคุณสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์เปลี่ยนสมบัติจากแข็งเปราะเป็นอ่อนนุ่มมากขึ้น จากงานวิจัยนี้พบว่าการเติม EAC ปริมาณ 8 wt.% จะเป็นจุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสมบัติจากแข็งเปราะเป็นเหนียวสำหรับ semicrystalline PLA (2002D และ 3001D) และปริมาณ 12 wt.% สำหรับ amorphous PLA (8302D)



ภาพที่ 2. 16 แสดง Notched impact strength (Izod) ระหว่าง PLA/Biomax strong ในอัตราส่วนต่างๆ[44]



ภาพที่ 2. 17 แสดงค่า impact strength เมื่อเติมปริมาณ Biomax ที่อัตราส่วนต่างๆ[44]

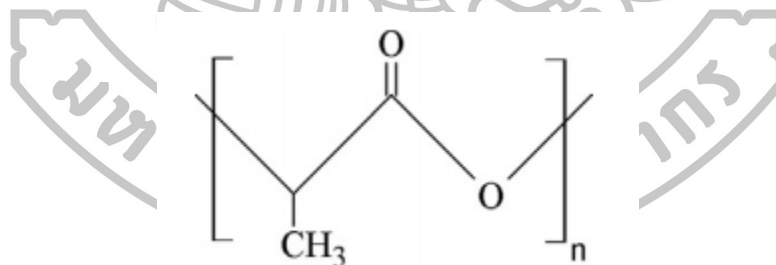
จากงานวิจัยทั้งสองจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างมากที่จะนำ Biomax มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของ PLA อย่างยิ่งซึ่งงานวิจัยของข้าพเจ้าได้เลือก Biomax มาใช้ในอัตราส่วนที่ไม่เกิน 15 phr

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกของ PLA โดยการเบลนด์กับ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หรือพอลิเมอร์นิ่ม 6 ชนิด และเบลนด์กับ impact modifier ทางการค้า 2 ชนิด โดยการทดลองแบ่งออกเป็น หัวตอน ในตอนแรกศึกษาการปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกของ พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด(PLA) กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มี ethylene เป็น ส่วนประกอบ ตอนที่สองศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด(PLA) กับพลาสติก นิ่มที่มีเอสเทอร์หรือเอไมด์เป็นส่วนประกอบและอิมแพคโมดิไฟเออร์(PLA/Soft plastic and PLA/Impact modifiers) ในตอนที่สามศึกษาวิธีเอนทิปเบลนด์จากปฏิกิริยาฟรีเรดิคอลและโคเอเจน (free radical and coagent reactive blends) ตอนที่สี่เป็นการศึกษาการเบลนด์แบบต่อเนื่องผ่านเครื่อง เอิ๊กทูดสกรูคู่ (Twin screw extruder) และตอนที่ห้าเป็นการศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติรีโอโลยีของ พอลิเมอร์เบลนด์

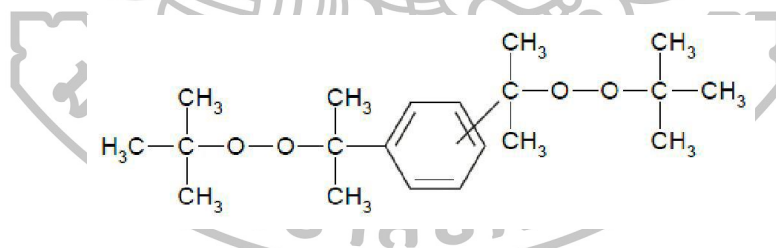
#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีในการทำงานวิจัย

- 1) พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) บริษัท NatureWorks LLC ประเทศ สหรัฐอเมริกา เกรด Extrusion (2003D), MFI (190°C/2.16kg) 5-7 g/10 min



ภาพที่ 3. 1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)[46]

- 2) เอบีเอส พาวเดอร์ (ABS Powder) เกรด AP6200 ของบริษัท ไอออาร์พีซี แคนกลางเป็น ยาง/เปลือกเป็น ABS ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไอออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย
- 3) Biomax® Strong 120 (Ethylene Copolymer) ของบริษัท DuPont™ เป็น PLA toughening modifier ได้รับความอนุเคราะห์จาก Chemical Innovation Company Limited, ประเทศไทย
- 4) สไตรีน เอทีลีน บิวทีลีน สไตรีน (Styrene Ethylene Butylene Styrene, SEBS) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด
- 5) ยางเอธิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene-propylene diene rubber, EPDM) Vistalon 17034 ของบริษัท ExxonMobil มี ethylene 77 % ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด
- 6) พอลิบิวทีลีนอะไดเพตโคเทรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate; PBAT) บริษัท NatureWorks LLC ประเทศสหรัฐอเมริกา, MFI (190°C/2.16kg) 9.14 g/10 min
- 7) พอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (Polyamide elastomer, PAE) เกรด PEBAX บริษัท Arkema ประเทศ ฝรั่งเศส MFI (190°C/2.16kg) 11.55 g/10 min
- 8) เอทีลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene-vinyl acetate, Escorene™ Ultra EVA Copolymer, EVA) บริษัท Exxonmobil Chemical ประเทศ สหรัฐอเมริกา
- 9) Ethylene Acrylic Elastomer (EAE, Vamac® G) บริษัท Dapont™ ประเทศ สหรัฐอเมริกา มีองค์ประกอบสามชนิดได้แก่ ethylene methylacrylate และ cure site monomer
- 10) Di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene (Perkadox 14-40B-PD) บริษัท Akzo Nobel



ภาพที่ 3. 2 โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyiso-propyl) benzene [47]

- 11) มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) ความบริสุทธิ์ 99.9% เป็นเม็ดผลึกสีขาว บริษัท Merck Schuchardt ประเทศเยอรมนี ใช้เป็นรีแอคทีฟเอเจนท์ในระบบพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/Copolymers



ภาพที่ 3. 3 โครงสร้างโมเลกุลของ Maleic anhydride, MA[48]

### 3.2 เครื่องเบลนด์และขึ้นรูป

- 1) เครื่องเบลนด์ภายในแบบปิด รุ่น MX 105-D40L50 บริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย ใช้ในการเบลนด์พอลิเมอร์เบลนด์ PLA/Copolymers เพื่อศึกษาระบบเบลนด์และอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยวิธีกดอัด และทดสอบสมบัติเชิงกล
- 2) เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) บริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล
- 3) เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder) L/D = 40 รุ่น HRJ-25 บริษัท ENMACH Co., LTD ประเทศจีน ใช้สำหรับเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์

### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy (SEM)) รุ่น CAMSCAN MX-2000 ประเทศอังกฤษ ใช้วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/Copolymers
- 2) เครื่อง Universal testing machine (UTM) Instron รุ่น 5969 Load cell สูงสุด 50 kN ระยะดัดสูงสุด 1212 mm บริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ทดสอบสมบัติ โมดูลัส ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และ ระยะยืดสูงสุดของชิ้นงาน
- 3) เครื่องมือทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact tester) ชื่อทางการค้า Zwick รุ่นPendulum impact tester B5102.202 พลังงานสูงสุดในการกระแทก 4 จูล
- 4) เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow index equipment) บริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/Copolymer
- 5) Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) รุ่น MCR 302 บริษัท Anton Paar GmbH สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่  $10^{-7}$  ถึง 628 rad/s ใช้สำหรับวิเคราะห์หาความหนืดซับซ้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

### 3.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1,2 และ 3 ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Thermoplastic elastomer, PLA/Soft plastic กับ PLA/Impact modifiers และ free radical and coagent reactive blends โดยทั้ง 3 ตอน ทำการเบลนด์ในเครื่องผสมแบบปิด

#### 3.4.1 การเบลนด์ในเครื่องผสมแบบปิด

- ออบเม็ตเรซิน PLA กับ Copolymers ได้แก่ EAE, EVA, EPDM, SEBS, PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder ในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

- เบลนด์ PLA 80 กรัม กับ Copolymers ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ใน internal mixer ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นทำการตัดและเก็บไว้ทดสอบในขั้นตอนต่อไป ในตอนที่ 3 จะมีการเติม perkadox 0.2 phr และ maleic anhydride 0.05 phr เพิ่มลงไปในขณะที่เบลนด์

- ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูปทรง Dumbbell สำหรับทดสอบการดึงยึด (Tensile) และชิ้นงาน impact เพื่อทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (Impact) อุณหภูมิ 190°C ความดัน 55 บาร์ เวลาที่ใช้ Pre-heat 5 นาที Full pressing 1 นาที

#### 3.4.2 กระบวนการในการทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ

- นำชิ้นงานรูปทรง Dumbbell ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการดึงยึดโดยใช้เครื่อง Universal Tensile Machine ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type V ใช้ Load cell 5 kN และ อัตราเร็วในการดึง 10 mm/min

- นำชิ้นงานสำหรับทดสอบการรับแรงกระแทกที่ได้ไปทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกโดยใช้เครื่อง impact tester ซึ่งใช้การทดสอบแบบ Notched-Izod impact testing ตามมาตรฐาน ASTM D256

- ศึกษาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ ด้วยเครื่อง Melt flow Index ตามมาตรฐาน ASTM D1238-04 น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม อุณหภูมิ 190°C

- ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยเทคนิค SEM โดยใช้ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก

ตอนที่ 4 ศึกษาการเบลนด์ต่อเนื่องผ่านเครื่องเอ็กทรูดสกรูคู่ (Twin screw extruder)

- เบลนด์ใน twinscrew extruder ที่อุณหภูมิ 140 ถึง 200 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 100 rpm หลังจากนั้นทำการตัดเม็ดผ่านเครื่องตัดและเก็บไว้ทดสอบในขั้นตอนต่อไป

- ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูปทรง Dumbbell สำหรับทดสอบการดึงยึด (Tensile) และชิ้นงาน impact เพื่อทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (Impact) อุณหภูมิ 190°C ความดัน 55 บาร์ เวลาที่ใช้ Pre-heat 5 นาที Full pressing 1 นาที



ตอนที่ 5 ศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ (Rheology) ระหว่างพอลิแลคตอคแอซิดกับ โคพอลิเมอร์ 2 ชนิดได้แก่ Biomax และ EAE

- ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูปร่างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรและหนา 1 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 190°C ความดัน 55 บาร์ เวลาที่ใช้ Pre-heat 5 นาที Full pressing 1 นาที

- นำชิ้นงานรูปทรงวงกลม ที่ได้ไปทดสอบสมบัติรีโอโลยีด้วยเครื่อง DMA โดยทำการทดสอบแบบแผ่นประกบ (Plate-Plate) อุณหภูมิที่ 190 องศาเซลเซียส โดยกำหนดความถี่ในช่วง  $0.1 < \omega < 100$  rad/s และให้ shear strain เท่ากับ 0.1%



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกโดยการใส่เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ และพลาสติกนิ่ม ชนิดต่างๆที่มีขายในท้องตลาด เบลนด์กับ PLA ในสัดส่วนน้อยกว่า 20 % โดยมีพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นเมทริกซ์หลัก ทำการเบลนด์ผ่าน ระบบรีแอกทีฟเบลนด์ โดยการใช้สารรีเอ็กทีฟเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นเฟสหลักคือ PLA กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หรือสารช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทก เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกจะแบ่งเป็นแบ่งออกเป็น 2 ตระกูลใหญ่ คือ พอลิเมอร์ที่มีเอทิลีนเป็นองค์ประกอบ และพอลิเมอร์ที่มีอีเทอร์และเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบ รีเอ็กทีฟเบลนด์จะผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคัลโดยใช้สารเปอร์ออกไซด์ และสารเปอร์ออกไซด์ร่วมกับสารโคเอ็กทีฟ ในการทดลองเบื้องต้นการเบลนด์ทำในเครื่องผสมแบบปิด และคัดเลือกเอาสูตรที่ให้ค่า Impact strength สูงที่สุดมา 3 สูตร มาทำการเบลนด์ในเครื่อง twin screw extruder เพื่อหาเงื่อนไขการเบลนด์ และเพื่อทดสอบความสามารถทำการเบลนด์ในระบบต่อเนื่อง ดูแนวโน้มการเบลนด์และเงื่อนไขการเบลนด์ในระดับอุตสาหกรรม

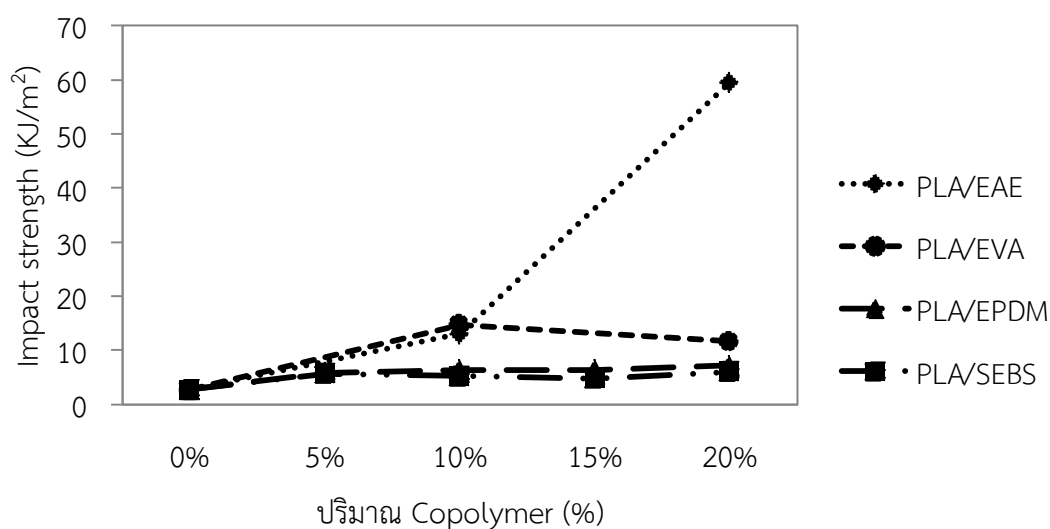
#### 4.1 พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (PLA/Thermoplastic elastomer)

ในตอนแรกเป็นการเบลนด์ร่วมกันระหว่าง PLA กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้แก่ EAE, EVA, EPDM และ SEBS โดยทำการศึกษาโดยไม่เกิดปฏิกิริยาในเครื่องผสมแบบปิด การศึกษาจะศึกษาสมบัติในด้าน สมบัติเชิงกลและเชิงสัญญาณวิทยา

##### 4.1.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS

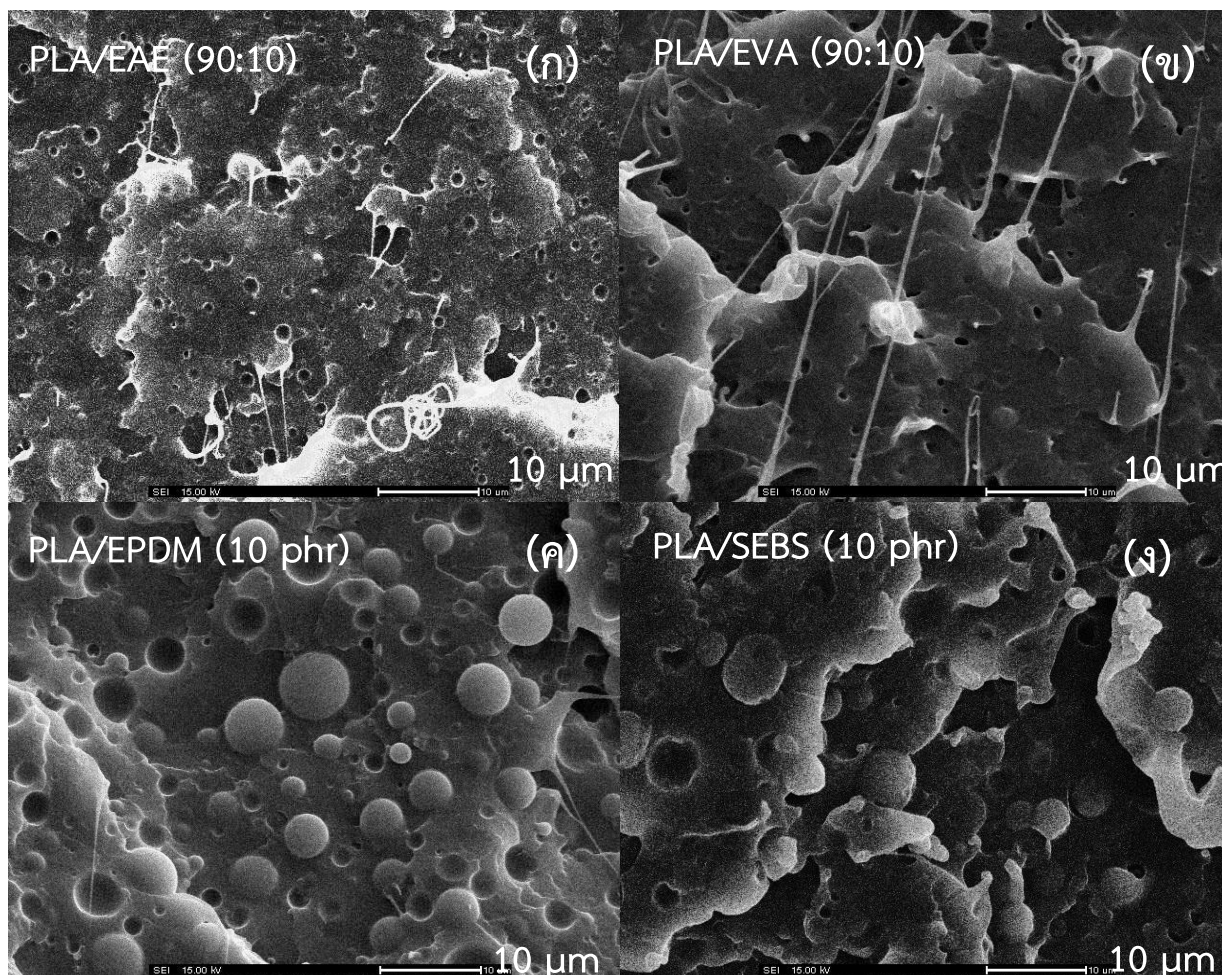
ภาพที่ 4.1 แสดง Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่าค่า Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่ PLA/EAE ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ได้ค่า Impact strength สูงที่สุด โดยมีค่าสูงถึง  $60 \text{ KJ/m}^2$  เทียบเท่ากับการแตกหักแบบเหนียว[49] หรือสามารถปรับปรุงได้สูงขึ้น 22 เท่าเมื่อเทียบกับ PLA นั่นคือสามารถเปลี่ยน PLA ที่ประจะเป็นพอลิเมอร์เหนียวเพียงเบลนด์กับ EAE ในสัดส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ยังพบว่า ค่า Impact strength มีค่าสูงขึ้นมากเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของ EAE จาก 10 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในการเบลนด์ระหว่าง PLA กับ EPDM และ PLA กับ SEBS มีการเพิ่มค่า Impact strength

ประมาณ 2 เท่าจาก PLA ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยกล่าวคือในกลุ่มนี้ให้ Impact strength สูงสุด ใน PLA/EVA เบลนด์ที่ EVA 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่า Impact strength ประมาณ  $15 \text{ kJ/m}^2$  มากกว่า PLA 5 เท่าและค่า Impact strength ลดลงเหลือ 4 เท่าเมื่อเพิ่ม EVA เป็น 20 เปอร์เซ็นต์และลดลงเหลือ 2 เท่าซึ่งมีค่า Impact strength เพียง  $10 \text{ kJ/m}^2$  เท่านั้น ในขณะที่ค่า Impact strength PLA มีค่าต่ำมาก คือมีค่าประมาณ  $3 \text{ kJ/m}^2$  เท่านั้น



ภาพที่ 4. 1 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS

#### 4.1.2 สมบัติสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS

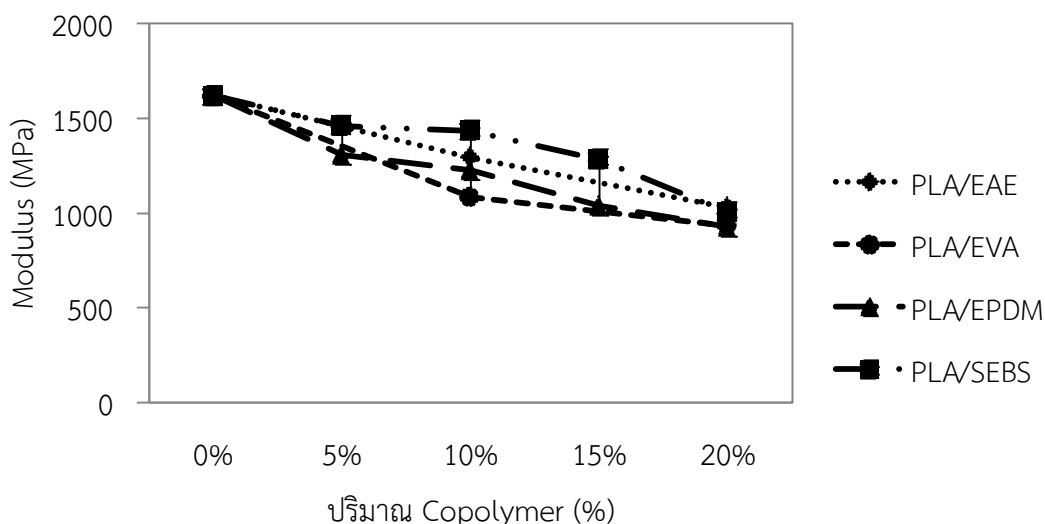


ภาพที่ 4. 2 สัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์เบลนด์ที่ได้จากชิ้นงานทดสอบรับแรงกระแทกระหว่าง  
(ก) PLA/EAE, (ข) PLA/EVA, (ค) PLA/EPDM และ (ง) PLA/SEBS

ภาพที่ 4.2 (ก)-(ง) แสดงพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบการรับแรงกระแทกของโพลีเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS ที่ สัดส่วนเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ 10 เปอร์เซ็นต์ EAE มีขนาดอนุภาคกระจายเล็กที่สุดโดยขนาดอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกันมีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร และเห็นร่องรอยการยึดของ EAE แสดงว่ามีการยึดเกาะระหว่าง PLA กับ EAE (ดังภาพ 4.2 (ก)) แสดงว่า PLA กับ EAE มีการเบลนด์ที่เข้ากันได้ดี สอดคล้องกับผลการทดลองที่ PLA/EAE เบลนด์ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกระแทกที่ดีที่สุด พิจารณาจากภาพ 4.2 (ข) พบว่า PLA/EVA ให้ขนาดอนุภาค EVA มีขนาดเล็ก ใกล้เคียงกับกรณี PLA/EAE เบลนด์ และพบร่องรอยการยึดของ EVA เช่นเดียวกับ PLA/EAE เบลนด์ แสดงว่า PLA/EVA ก็สามารเบลนด์เข้ากันได้ดี แต่พบว่าขนาดอนุภาคมีการกระจาย

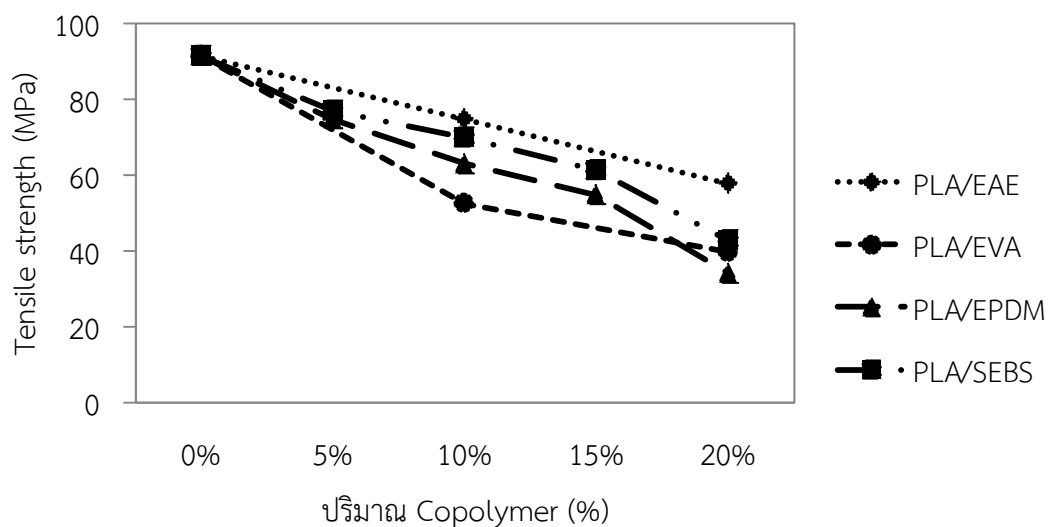
ขนาดอนุภาคมากกว่าเล็กน้อย ที่สัดส่วนการเบลนด์ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า PLA/EAE และ PLA/EVA มีค่า Impact strength เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามที่สัดส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ PLA/EVA เบลนด์มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการกระแทกที่ต่ำกว่า PLA/EAE เบลนด์ ซึ่งอาจเกิดจาก EVA มีความหนืดที่สูงกว่า EAE นอกจากนี้ EAE เบลนด์เข้ากับ PLA มากกว่า EVA เพราะมีหมู่กรดที่สามารถทำปฏิกิริยาหมู่ไฮดรอกซิลปลายโซ่ โมเลกุลของ PLA ส่วนการเบลนด์ PLA กับ EPDM และ SEBS ลักษณะสัณฐานวิทยาแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) และ รูปที่ 4.5 (ง) แสดงให้เห็นขนาดอนุภาคกระจายที่มีขนาดใหญ่ และเห็นอนุภาคที่กลมเกลี้ยง ที่เป็นสัณฐานวิทยาที่บ่งบอกว่า EPDM และ SEBS ไม่สามารถเบลนด์เข้ากันได้กับ PLA ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการกระแทกที่ต่ำ

#### 4.1.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS



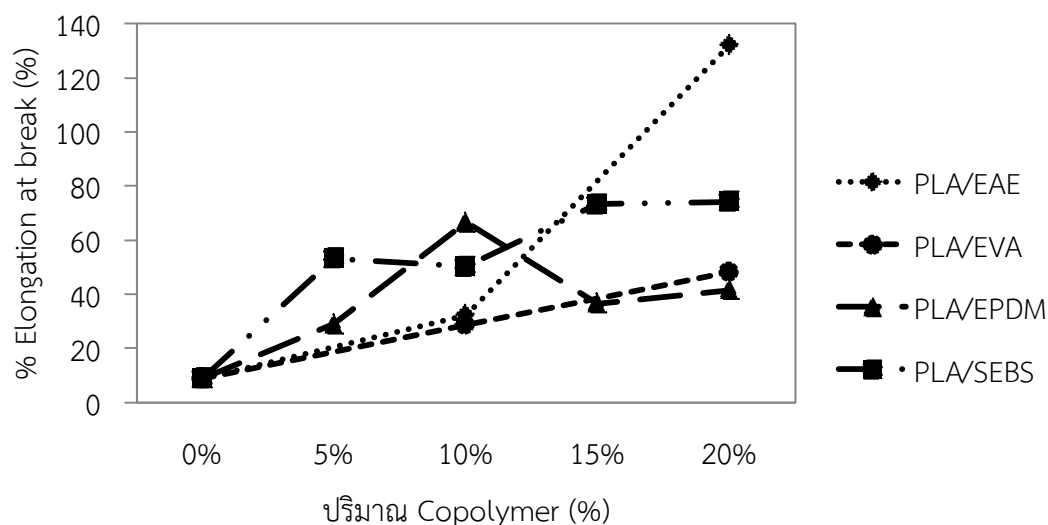
ภาพที่ 4. 3 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS

จากภาพที่ 4.3 แสดงค่า Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีสัดส่วนที่สูงขึ้นจะทำให้ค่า Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลงในทุกสูตรที่ทำการเบลนด์เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เบลนด์มีมอดูลัสต่ำกว่า PLA ซึ่งในสัดส่วนที่ทำการเบลนด์นี้อนุภาคของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เหล่านี้จะกระจายอยู่ในเฟสหลักที่เป็น PLA เหมือนกัน แต่พบว่า PLA /EAE เบลนด์มีการลดลงในลักษณะเชิงเส้นตรงกับปริมาณ EAE ที่ใส่ ในขณะที่ PLA/SEBS และ PLA/EPDM เบลนด์ มีการลดลงของมอดูลัสไม่เป็นเชิงเส้นตรง ส่วน PLA/EVA เบลนด์จะให้ค่ามอดูลัสต่ำสุดในสัดส่วนเบลนด์ที่เท่ากัน



ภาพที่ 4. 4 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS

ภาพที่ 4.4 เมื่อนำค่า Tensile strength มาพิจารณาพบว่าค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ สำหรับ PLA/EAE เบลนด์จะมีการลดลงลักษณะเชิงเส้นตรง และมีค่า Tensile strength ที่สูงกว่าคู่เบลนด์ตัวอื่นที่สัดส่วนการเบลนด์ที่เท่ากัน ในขณะที่ PLA/EVA เบลนด์จะมีค่า Tensile strength ต่ำสุด



ภาพที่ 4. 5 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EAE, EVA, EPDM และ SEBS

จากภาพที่ 4.5 แสดงค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ พบว่าค่า Elongation at break จะมีค่าที่สูงขึ้นในทุกสูตรของการเบลนด์ พบว่า PLA/EAE ที่สัดส่วน 80:20 มีค่าการดึงยืดได้สูงที่สุด PLA/EPDM มี Elongation at break เพิ่มขึ้นไม่เป็นเชิงเส้นตรงมีค่าสูงสุดที่มี EPDM ที่ 10 phr แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ EPDM ที่ 15 และ 20 phr ค่า Elongation at break จะมีค่าลดลง PLA/SEBS เบลนด์มีค่า Elongation at break เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ SEBS ที่เติมเข้าไปและจะคงที่ในปริมาณการเติมที่ 15 และ 20 phr มีค่าประมาณ 70% ส่วน PLA/EVA เบลนด์พบว่า Elongation at break จะมีการเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรง ตามการเพิ่มขึ้นของ EVA และที่ 20เปอร์เซ็นต์ มีค่า Elongation at break เพียง 40 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ซึ่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับ PLA/EAE เบลนด์ที่มี Elongation at break สูงถึง 130 เปอร์เซ็นต์

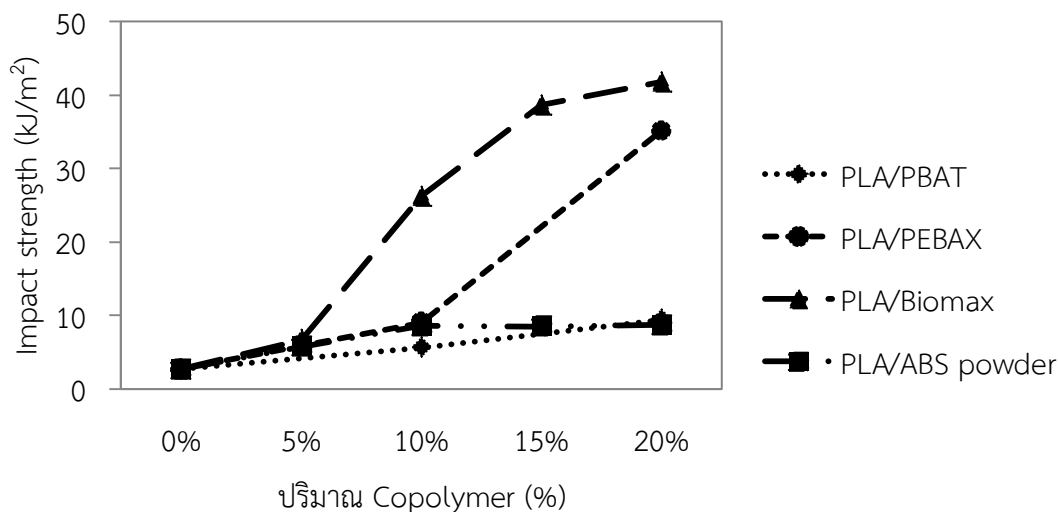
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันได้ดี ควรให้ค่า Tensile strength และ Elongation at break ที่สูง จึงกล่าวได้ว่า EAE น่าจะเบลนด์เข้าได้ดีกับ PLA ได้ดีที่สุดเพราะให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

#### 4.2 พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพลาสติกนิ่มและอิมแพคโมดิไฟเออร์(PLA/Soft plastic and PLA/Impact modifiers)

ในหัวข้อนี้เป็นการเบลนด์ PLA กับพลาสติกนิ่มโดยทำการเบลนด์ PLA กับ PBAT ซึ่งเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพที่ในเอกสารอ้างอิงมากที่สุด พลาสติกนิ่มชนิด PEBAX ซึ่งเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์พอลิเอเทอร์กับพอลิโอไมด์ และเบลนด์ PLA กับ Impact modifiers 2 ชนิดคือ Biomax และ

ABS powder ในสัดส่วนการเบลนด์ที่มี PLA เป็นเฟสหลักมีเฟสกระจายในสัดส่วนในช่วง 5 – 20 เปอร์เซ็นต์

4.2.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder

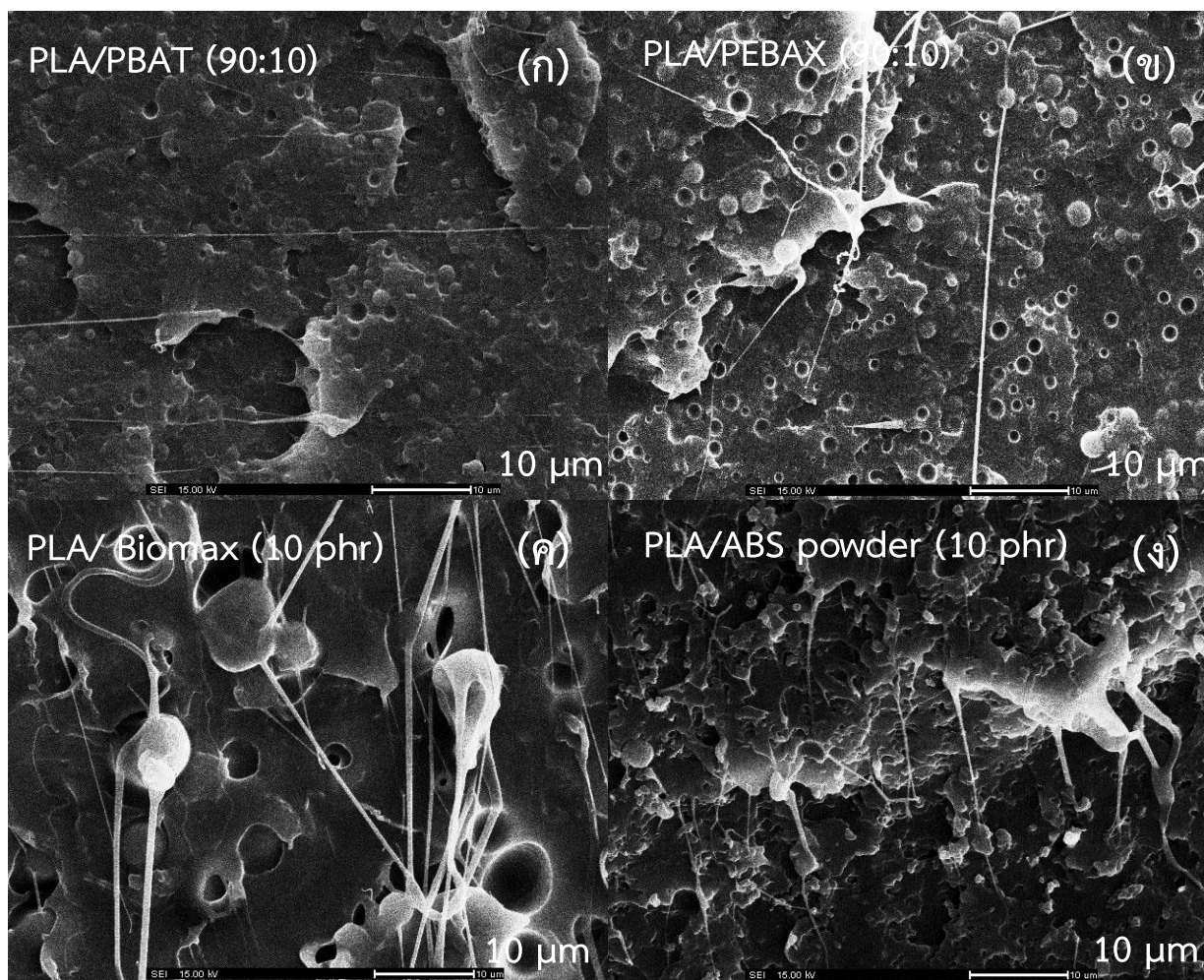


ภาพที่ 4. 6 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder

ภาพที่ 4.6 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์พบว่าค่า Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ในเฟสกระจาย โดยพบว่า PLA/Biomax และ PLA/PEBAX เบลนด์ค่า Impact strength เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ PLA/Biomax จะให้ค่า Impact strength สูงที่สุด จะให้ Impact strength มีค่าเป็น 40 KJ/m<sup>2</sup> ที่สัดส่วน Biomax ที่ 15 และ 20 phr มากกว่า PLA ถึง 14 เท่า ในขณะที่ PLA/PEBAX เบลนด์ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อมี PEBAX มีสัดส่วนเป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยมากกว่า PLA 13 เท่า ส่วน PLA/PBAT และ PLA/ABS powder เบลนด์ให้ค่า Impact strength ค่อนข้างต่ำโดยใน PBAT ที่ 20 เปอร์เซ็นต์และใน ABS powder 15 phr จะสูงกว่า PLA เพียง 3 เท่าโดยทั้งคู่มีค่า Impact strength ต่ำกว่า 10 KJ/m<sup>2</sup> กล่าวโดยรวม PLA/Biomax และ PLA/PEBAX ที่ให้ผลการปรับปรุงสมบัติการกระแทกที่ดี

4.2.2 สมบัติสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder





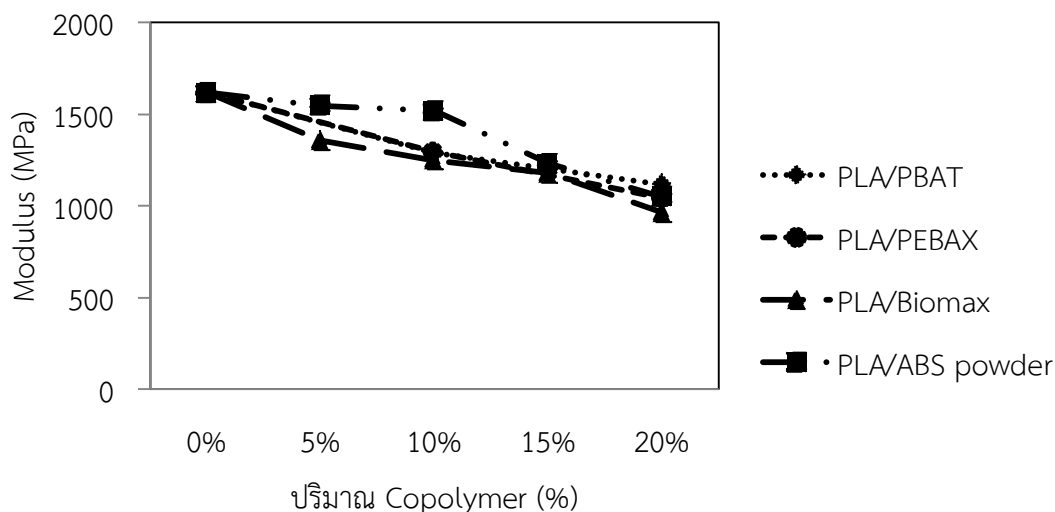
ภาพที่ 4. 7 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากชิ้นงานทดสอบรับแรงกระแทกระหว่าง (ก) PLA/PBAT, (ข) PLA/PEBAX, (ค) PLA/Biomax, (ง) PLA/ABS powder

ภาพที่ 4.7 (ก)-(ง) แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder พบว่าที่สัดส่วนการเบลนด์เท่ากัน PLA/PBAT, PLA/PEBAX และ PLA/ABS powder มีเฟสกระจายค่อนข้างเล็กมาก ในขณะที่ PLA/Biomax เบลนด์มีเฟสกระจายที่ค่อนข้างจะใหญ่กว่า เมื่อพิจารณาการยึดติดระหว่างเฟสกระจายกับเฟสต่อเนื่องพบว่า PLA/PBAT เบลนด์แสดงหลุมของร่องรอยการหลุดของอนุภาคและลักษณะอนุภาคที่กลมเกลี้ยงแสดงว่ามีการเชื่อมโยงระหว่างผิวน้อยที่สุด ถัดมากคือ PLA/PEBAX เบลนด์ และ PLA/ABS powder เบลนด์ และ PLA/ABS powder เบลนด์ยังแสดงอนุภาคของ ABS powder ที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งการยึดติดระหว่างเฟสที่ไม่ดีนี้จะทำให้เมื่อรับแรงกระแทกอนุภาคเหล่านี้ที่อยู่บริเวณรอยแตกจะไม่

สามารถช่วยให้เกิดการยึดติดกันระหว่างเฟสขึ้นงานจึงแตกหักได้ง่ายกว่าในกรณี PLA/Biomax เบลนด์ ถึงแม้จะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าแต่แสดงลักษณะการยึดเกาะระหว่างอนุภาค Biomax กับ เฟสต่อเนื่อง PLA ที่มากกว่าและชัดเจนกว่า

สัญญาณวิทยาของ PLA/PBAT ที่เล็กละเอียดโดยที่เฟสกระจาย PBAT มีความหนืดต่ำกว่า PLA จึงให้เฟสกระจายที่ละเอียด เฟสกระจายเป็นพลาสติกที่นิ่มหรือมอดูลัสต่ำจึงสอดคล้องสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ไม่เป็นจริงในสมบัติการกระแทก พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีค่า Impact strength สูงจะสอดคล้องกับความสามารถในการถ่ายทอดแรงหรือพลังงานจากเฟสต่อเนื่องไปสู่เฟสกระจายที่เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เป็นตัวรับพลังงานการกระแทกแทน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสกระจายกับเฟสต่อเนื่องจึงมีความสำคัญหรือเป็นตัวแปรหลัก ส่วนขนาดของเฟสกระจายในแต่ละชนิดพอลิเมอร์เฟสต่อเนื่องจะมีขนาดเฉพาะตัวของมัน เฟสกระจายที่เล็กเกินไปก็ไม่สามารถการทนต่อการกระแทกดีขึ้น สอดคล้องกับ PLA/Biomax และ PLA/PEBAX เบลนด์ที่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสดีมี ค่า Impact strength สูงกว่ากรณี PLA/ABS powder เบลนด์ และ PLA/ABS powder เบลนด์

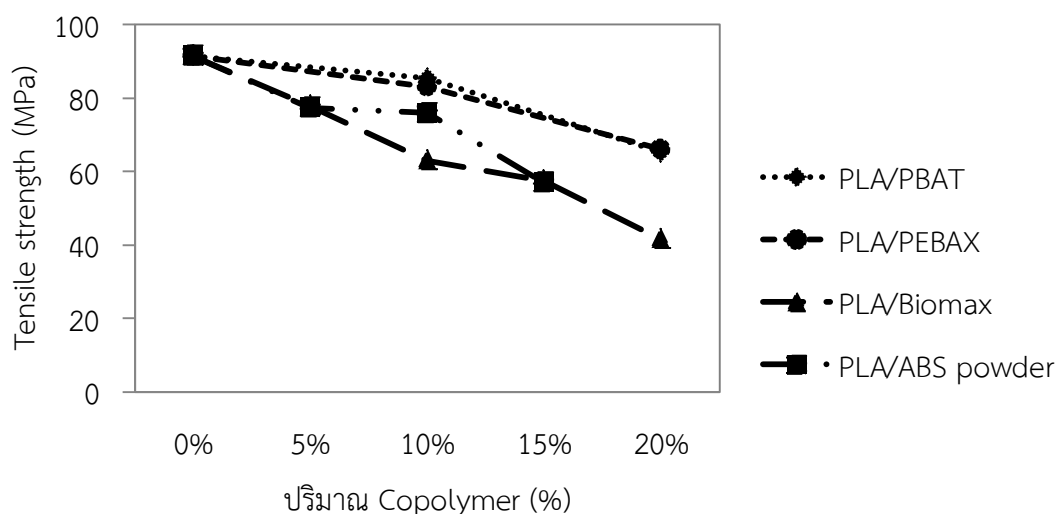
4.2.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder



ภาพที่ 4. 8 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder

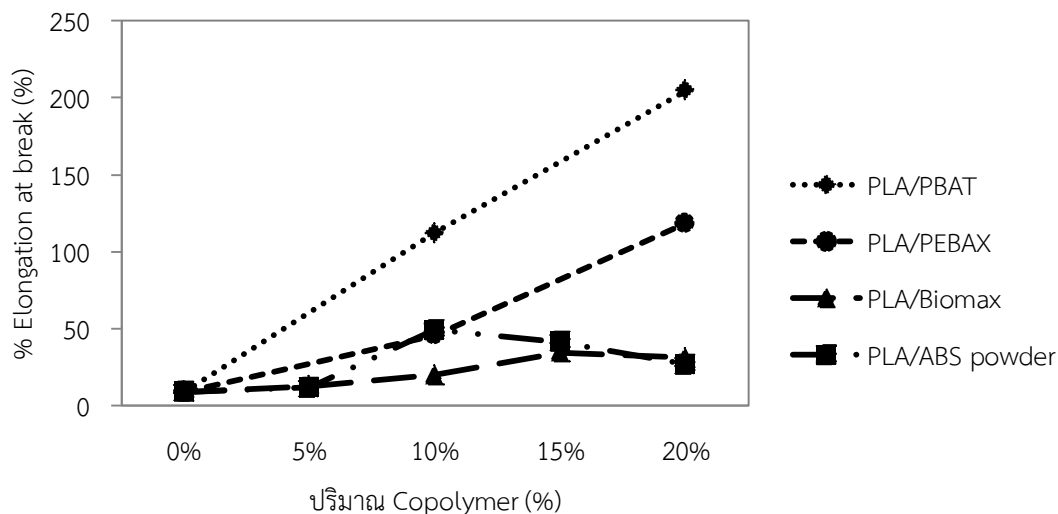
ภาพที่ 4.8 แสดงค่า Modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder พบว่าค่า Modulus มีค่าลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของโคพอลิเมอร์เฟสกระจายทุกชนิด ทั้งนี้โคพอลิเมอร์ที่เติมเฟสกระจายเป็นพอลิเมอร์ที่มีมอดูลัสต่ำหรือความอ่อนนุ่มกว่า PLA มาก เมื่อทำการเบลนด์เข้ากับ PLA ที่เป็นเฟสหลักทำให้สมบัติที่แข็งแรงยอมทำให้ค่า

มอดูลัสของเบลนด์มีค่าที่ลดลงตามสัดส่วนที่สูงขึ้นของโคพอลิเมอร์ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณี ABS powder เบลนด์ในช่วงสัดส่วน ABS powder ต่ำๆ 5 – 10 phr นั้นมอดูลัสลดลงเล็กน้อยอันเนื่องมาจาก ABS มีมอดูลัสที่สูงกว่าอนุภาคชนิดอื่นที่เติมเข้าไปแต่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 15 phr



ภาพที่ 4. 9 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder

ภาพที่ 4.9 แสดงค่า Tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder พบว่ามีการลดลงของ Tensile strength เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของโคพอลิเมอร์เฟสกระจายในทุกสูตรของการผสม โดยจากกราฟสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ PBAT กับ PEBAX เป็นกลุ่มที่ 1 ที่มีการลดลงของ Tensile strength น้อยและค่อนข้างเป็นเชิงเส้นตรง หรือเป็นกลุ่มที่มีค่า Tensile strength สูง กลุ่มที่ 2 เป็น Biomax และ ABS powder พอลิเมอร์เบลนด์กลุ่มนี้ ค่า Tensile strength ลดลงอย่างรวดเร็ว หรือกลุ่มที่ให้ Tensile strength ต่ำ



ภาพที่ 4. 10 แผนภูมิแสดงค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder

ภาพที่ 4.10 แสดงค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder เมื่อพิจารณาโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มของ PBAT และ PEBAX ที่เป็นพลาสติกนิ่มพบว่าการยืดออกมากกว่ากลุ่มที่ 2 คืออิมแพคโมดิไฟเออร์โดยพบว่าการยืดออกมีค่ามากที่สุดใ PLA/PBAT โดยพบว่าการดัดงอได้จะมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ PBAT ที่ PBAT 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่า Elongation at break สูงถึง 200 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาพบว่า PEBAX ให้ค่า Elongation at break สูงเช่นเดียวกันโดยที่ PEBAX 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่า Elongation at break สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กลุ่มที่ 2 Biomax และ ABS powder ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่า Elongation at break เพียง ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

เมื่อพิจารณาจากสมบัติเชิงกล Tensile strength และ Elongation at break พบว่า PLA/PBAT และ PLA/PEBAX เบลนด์ จะให้สมบัติเชิงกลที่ดี น่าจะเกิดมาจากการกระจายตัวของเฟสรองที่ดีใน PLA ทำให้แรงยึดติดระหว่างเฟสและการกระจายแรงระหว่างเฟสเป็นไปได้อย่างดี

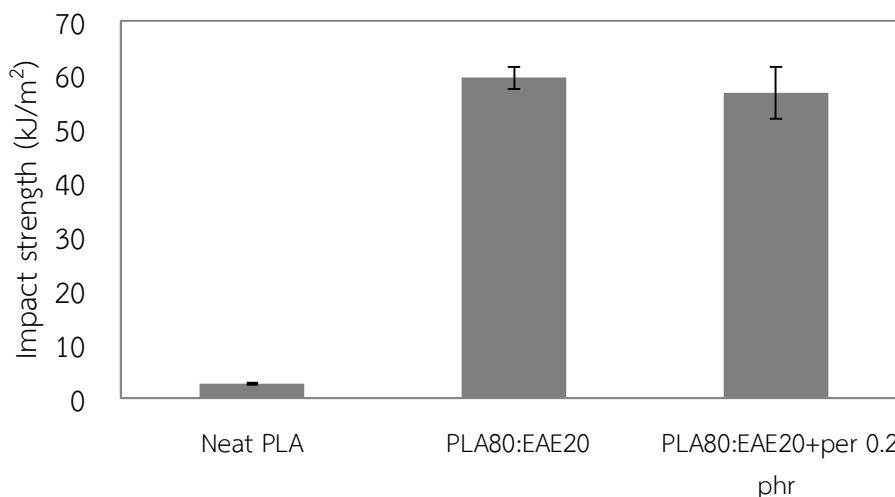
#### 4.3 พอลิเมอร์เบลนด์ที่เกิดปฏิกิริยาในระบบฟรีเรดิคัลและโคเอเจน (free radical and coagent reactive blends)

ในหัวข้อการวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของรีเอ็กทีฟเบลนด์ผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคัลเกิดจากการแตกตัวของสารเปอร์ออกไซด์ คู่เบลนด์ที่สนใจคือ PLA/EAE, PLA/EVA, PLA/PBAT, PLA/PEBAX และ PLA/Biomax ซึ่งเป็นคู่เบลนด์ที่ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทนต่อแรงกระแทกที่ดี

#### 4.3.1 รีเอ็กทีปเบลนด์ระหว่าง PLA/EAE

สำหรับคู่เบลนด์นี้สนใจศึกษาคุณสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ในแบบที่เกิดปฏิกิริยาโดยการเติม perkadox 0.2 phr กับแบบไม่มีการเติม perkadox ระหว่าง PLA/EAE ที่อัตราส่วน(80:20)

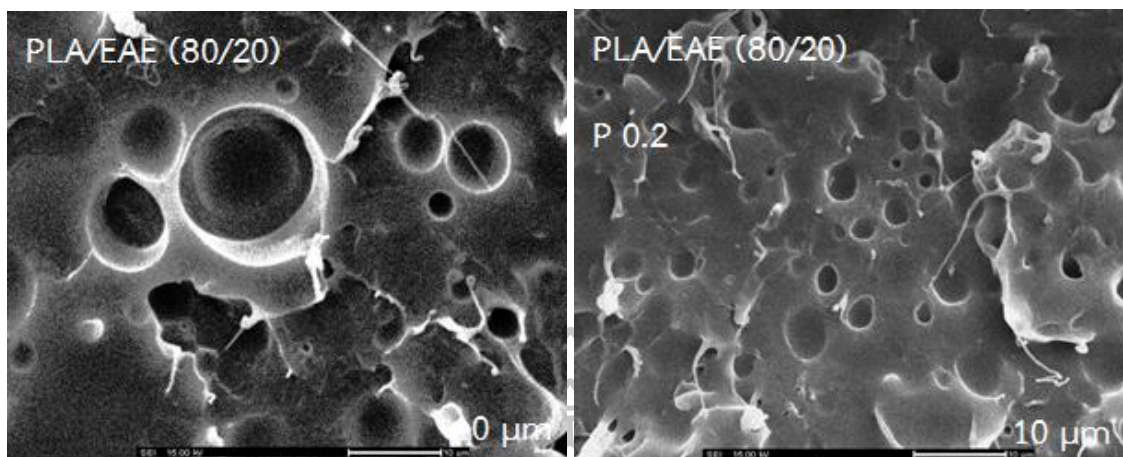
##### 4.3.1.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EAE



ภาพที่ 4. 11 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เติม perkadox

จากภาพที่ 4.11 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EAE ในอัตราส่วน PLA/EAE (80:20) และ PLA/EAE (80:20) เติม perkadox 0.2 phr พบว่า ค่า Impact strength พบว่าหลังจากเติม perkadox ลงไปไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเหนียวมากนักคือลดลงจาก 10.3 เหลือ 8.6 g/10min รวมทั้งอนุภาคมีขนาดเล็ก ทำให้ค่า Impact strength มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเติมหรือไม่เติม perkadox

##### 4.3.1.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ PLA/EAE



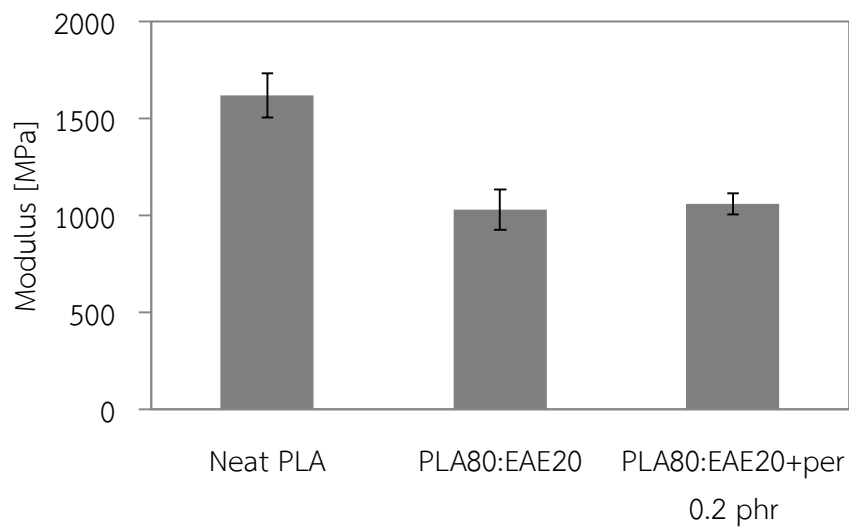
ภาพที่ 4. 12 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ทั้งไม่เติมและเติม perkadox

จากภาพของพื้นผิวพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกแสดงขนาดอนุภาคของ EAE 0.5-3 ไมโครเมตรการเติม perkadox ส่งผลต่ออนุภาคของ EAE โดยจะทำให้อนุภาคมีลักษณะกลมมากขึ้นและเมื่อพิจารณาจากภาพ SEM ที่ได้จากการทดสอบการรับแรงกระแทกจะเห็นถึงการยึดออกของอนุภาคซึ่งจะส่งผลต่อการรับแรงกระแทกของชิ้นงาน

จะเห็นได้ว่าการทำรีเอ็กทีฟเบลนด์โดยเติมเปอร์ออกไซด์ 0.2 phr ช่วยให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นโดยเฉพาะค่าระยะยืดจนขาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกยังคงดีมาก มีค่าประมาณ  $60 \text{ kJ/m}^2$  ไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่สัณฐานวิทยาการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น

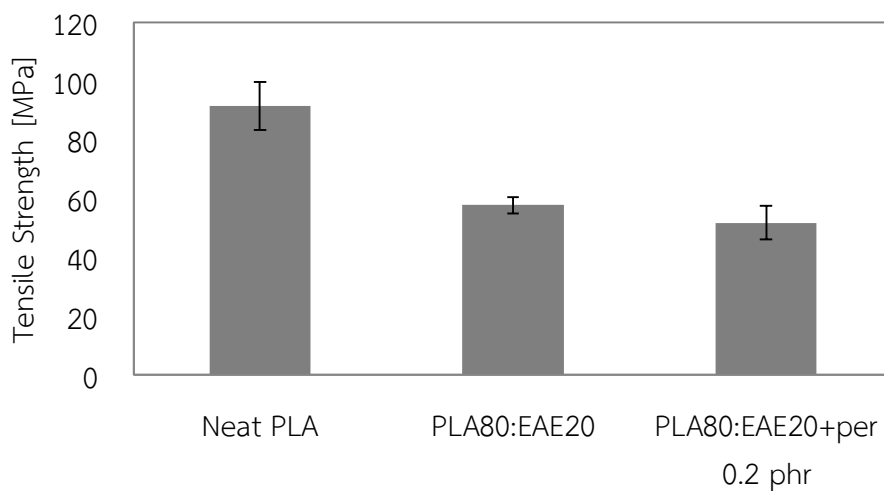
#### 4.3.1.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EAE





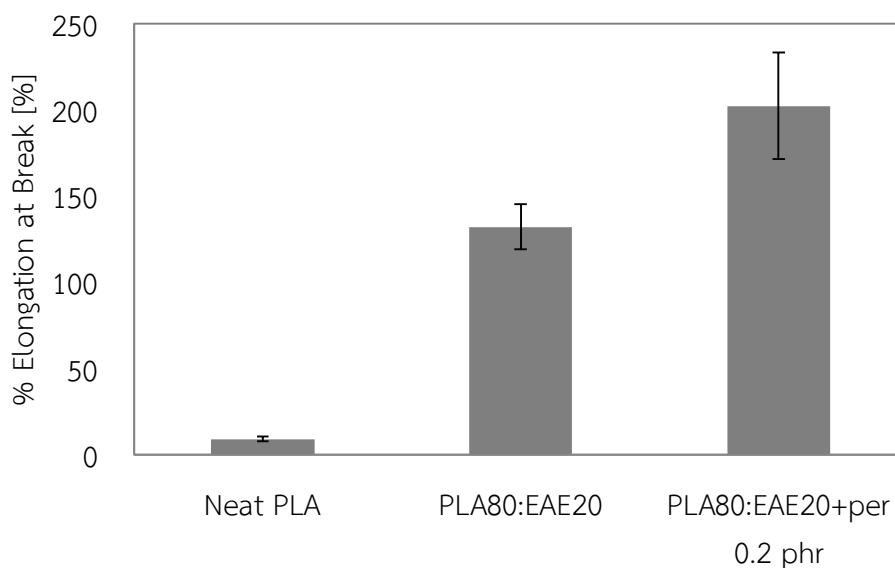
ภาพที่ 4. 13 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เต็ม perkadox

จากภาพที่ 4.13 แสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EAE (80:20) และ PLA/EAE (80:20) เต็ม perkadox 0.2 phr พบว่าเมื่อเติม perkadox ลงไปจะทำให้ค่าของ Modulus มีการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4. 14 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เต็ม perkadox

จากภาพที่ 4.14 แสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EAE (80:20) และ PLA/EAE (80:20) เติม perkadox 0.2 phr พบว่าเมื่อเติม perkadox ลงไปจะทำให้ค่าของ Tensile strength เกิดการลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4. 15 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EAE และ PLA/EAE เติม perkadox

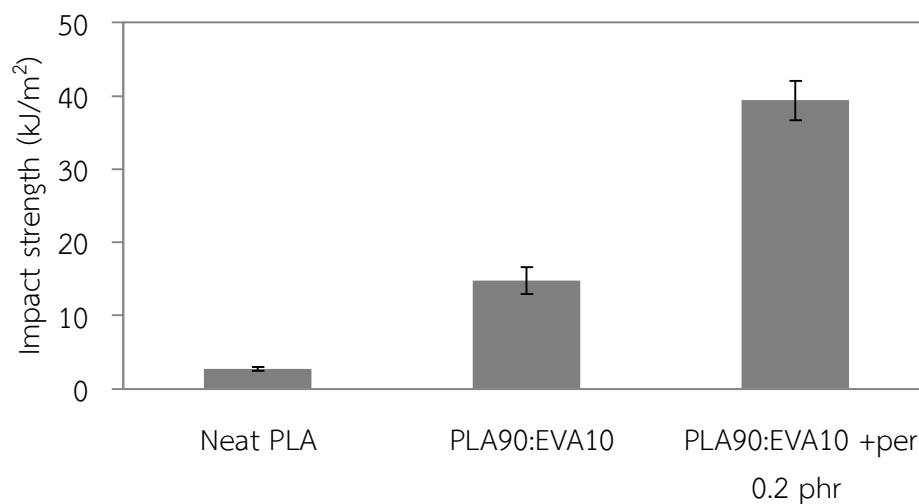
จากภาพที่ 4.15 แสดงค่า Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EAE (80:20) และ PLA/EAE (80:20) เติม perkadox 0.2 phr พบว่าเมื่อเติม perkadox ลงไปจะทำให้ค่าของ Elongation at break มีค่าที่สูงขึ้นเกิดจาก perkadox ช่วยทำให้มีความเข้ากันได้มากขึ้นระหว่าง PLA และ EAE เมื่อรับแรงการดึงยืดเฟสหลัก PLA และเฟสรอง EAE มีแรงยึดติดระหว่างกันเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนส่งผลทนการดึงยืดได้มากขึ้น

#### 4.3.2 รีเอ็กทีปเบลนด์ระหว่าง PLA/EVA

คู่เบลนด์นี้สนใจศึกษาคุณสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ในแบบที่เกิดปฏิกิริยาโดยการเติม perkadox 0.2 phr กับแบบไม่มีการเติม perkadox ระหว่าง PLA กับ EVA ในอัตราส่วน PLA/EVA (90:10)

##### 4.3.2.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA

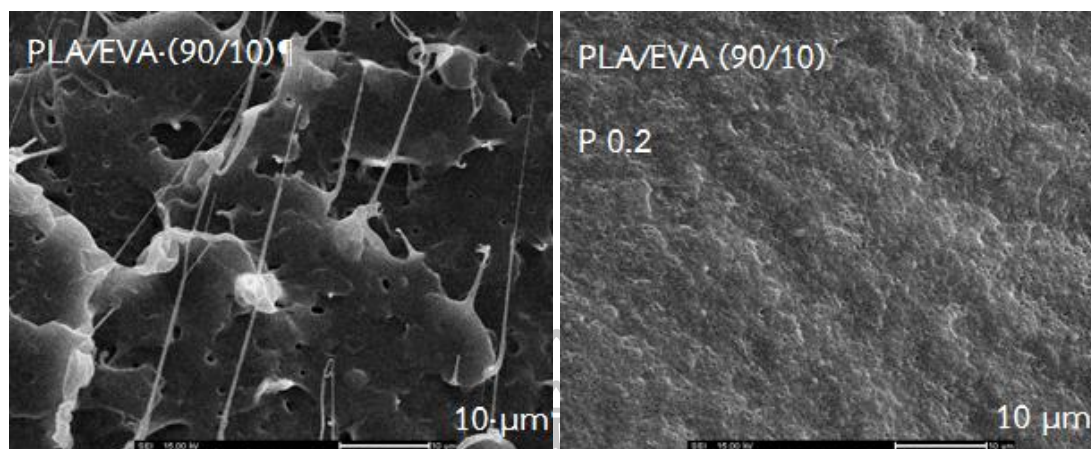




ภาพที่ 4. 16 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA เติม perkadox

จากภาพที่ 4.16 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA ในอัตราส่วน PLA/EVA (90:10) และ PLA/EVA (90:10) เติม perkadox 0.2 phr พบว่า ค่า Impact strength มีค่าสูงขึ้นหลังทำการเติม perkadox 0.2 phr เพิ่มจาก 15 kJ/m<sup>2</sup> เป็น 40 kJ/m<sup>2</sup> เพราะวารีเอ็กทีปเบลนด์น่าจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ EVA เพิ่มขึ้น เกิดการถ่ายพลังงานไปสู่อนุภาค EVA ได้ดีขึ้นส่งผลให้ Impact จึงมีค่าสูงขึ้น

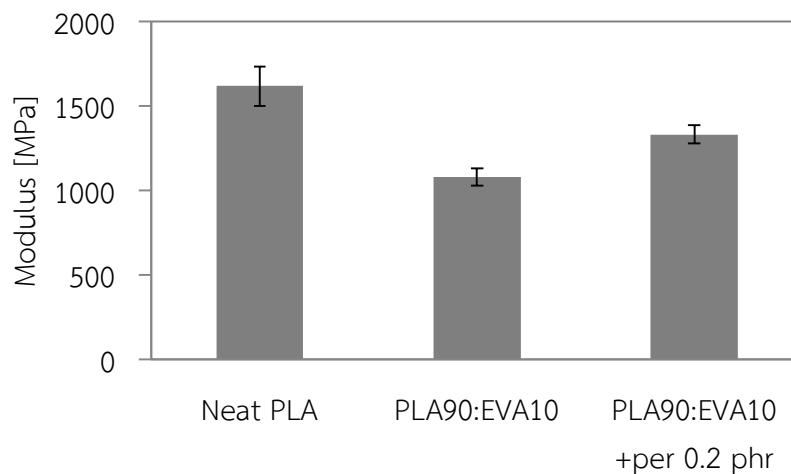
#### 4.3.2.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA



ภาพที่ 4. 17 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EVA ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ทั้งไม่เติมและเติม perkadox

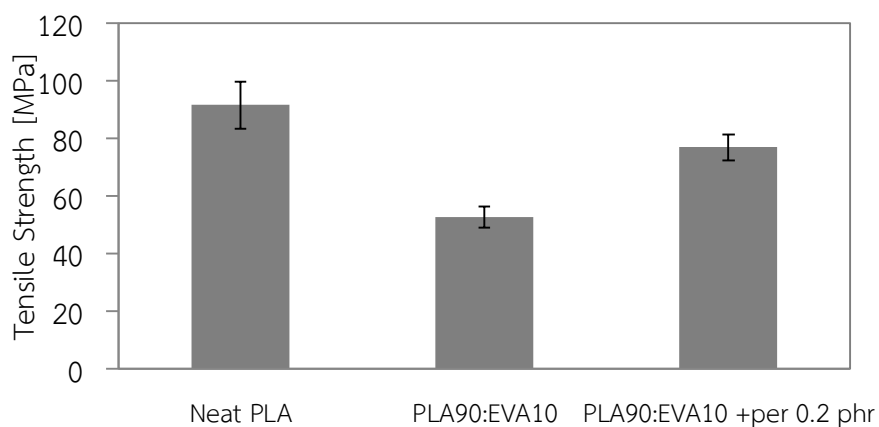
จากภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA ในอัตราส่วน 90/10 จากชิ้นงานที่ได้จากเครื่องเบลนด์แบบปิดมีขนาดอนุภาคเล็กมากอยู่ที่ 0.5-2 ไมโครเมตร เมื่อเติม perkadox 0.2 phr ส่งผลต่อขนาดอนุภาคที่เล็กลงและเป็นทรงกลมมากขึ้นของ EVA และเมื่อพิจารณาชิ้นงานภายหลังทดสอบการรับแรงกระแทกพบว่า การเติม perkadox 0.2 phr เพิ่มในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EVA 10 เปอร์เซ็นต์พบว่าขนาดอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ใน PLA และมีความเข้ากันได้มากขึ้น ค่า MFI มีค่าที่ลดต่ำลงแสดงถึงความหนืดที่สูงขึ้น ผลของ perkadox ยังส่งผลทำให้ PLA และ EVA มีความเข้ากันได้มากขึ้น และเพิ่มความหนืดของ EVA ทำให้ได้อนุภาคของ EVA ใหญ่ขึ้นจนขนาดพอเหมาะที่ส่งผลให้การรับแรงกระแทกให้ดีขึ้น และมีผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นและการยึดออกของ PLA/EVA เบลนด์สูงขึ้น

#### 4.3.2.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EVA



ภาพที่ 4. 18 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA เต็ม perkadox

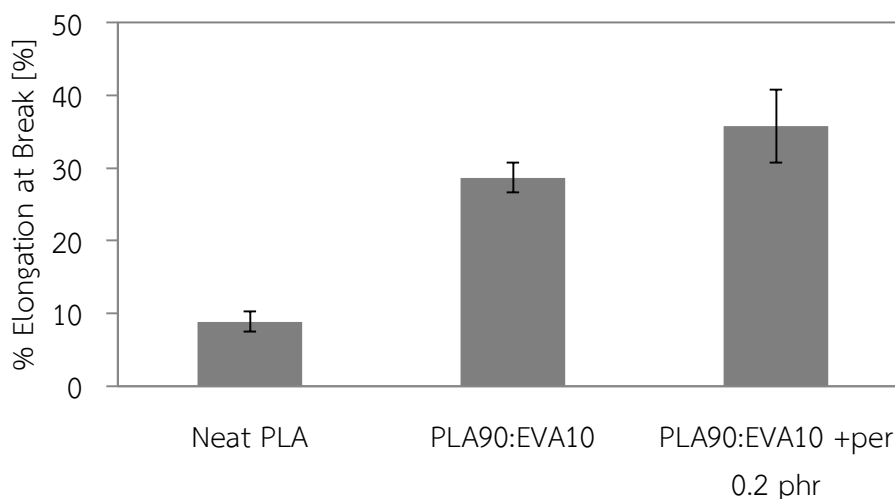
จากภาพที่ 4.18 แสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EVA (90:10) และ PLA/EVA (90:10) เต็ม perkadox 0.2 phr พบว่าการเติม perkadox ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ Modulus ของพอลิเมอร์เบสเล็กน้อย



ภาพที่ 4. 19 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA เต็ม perkadox

จากภาพที่ 4.19 แสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EVA (90:10) และ PLA/EVA (90:10) เต็ม perkadox 0.2 phr พบว่าค่า Tensile strength มีค่าที่สูงขึ้นเมื่อ

เติม perkadox เนื่องจากผลของ perkadox ที่ช่วยทำให้เกิดการยึดติดกันระหว่างเฟส PLA และ EVA ที่สูงขึ้นจึงทนทานต่อการฉีกขาดเมื่อรับแรงได้สูงขึ้น



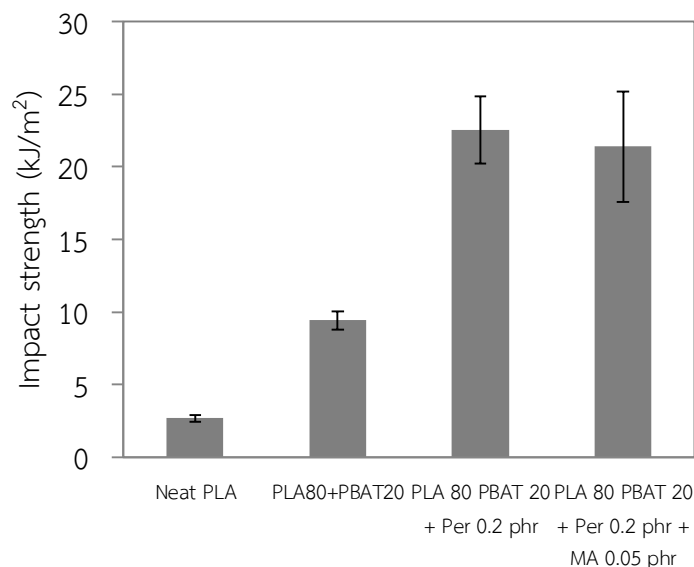
ภาพที่ 4. 20 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EVA และ PLA/EVA เติม perkadox

จากภาพที่ 4.20 แสดงค่า Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EVA (90:10) และ PLA/EVA (90:10) เติม perkadox 0.2 phr พบว่าค่า Elongation at break สูงขึ้นเมื่อเติม perkadox แสดงให้เห็นถึง perkadox ช่วยทำให้เกิดการเข้ากันได้มากขึ้นระหว่าง PLA ที่เป็นเฟสหลัก และ EVA ที่เป็นเฟสรองทำให้เกิดการยึดติดของ EVA ที่มีความสามารถยึดได้มากขึ้นจึงทำให้เกิดการยึดออกได้สูงขึ้น

#### 4.3.3 รีเอ็กทีปเบลนดร์ระหว่าง PLA/PBAT

คู่เบลนดร์นี้สนใจศึกษาคุณสมบัติของพอลิเมอร์เบลนดร์ในแบบที่เกิดปฏิกิริยาโดยการเติม perkadox 0.2 phr และ perkadox 0.2 phr ร่วมกับ maleic anhydride 0.05 phr เทียบกับแบบไม่เกิดปฏิกิริยาของคู่เบลนดร์ระหว่าง PLA กับ PBAT ในอัตราส่วน PLA/PBAT (80:20)

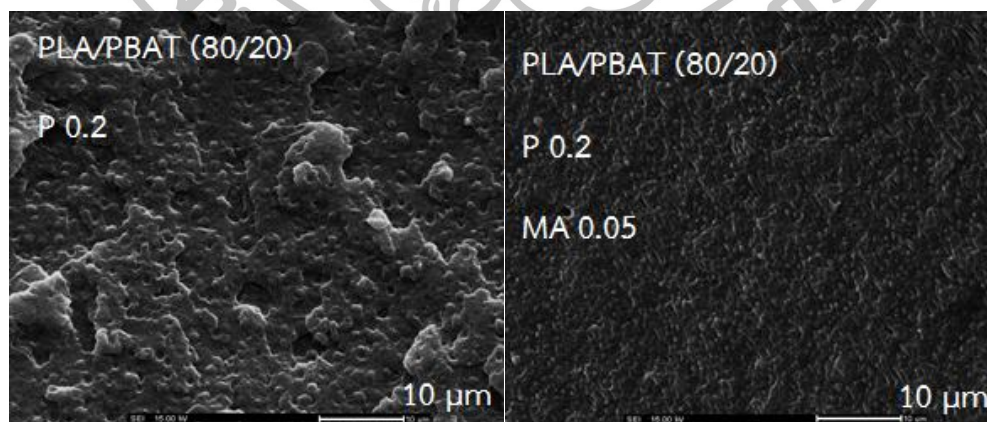
##### 4.3.5.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนดร์ PLA/PBAT



ภาพที่ 4. 21 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เต็ม perkadox และ PLA/PBAT เต็ม perkadox กับ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.21 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PBAT ในอัตราส่วน PLA/PBAT (80:20), PLA/PBAT (80:20) เต็ม perkadox 0.2 phr และ PLA/PBAT (80:20) เต็ม perkadox 0.2 phr กับ maleic anhydride 0.05 phr พบว่า ค่า impact strength มีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม perkadox 0.2 phr และ perkadox 0.2 phr+maleic anhydride 0.05 phr

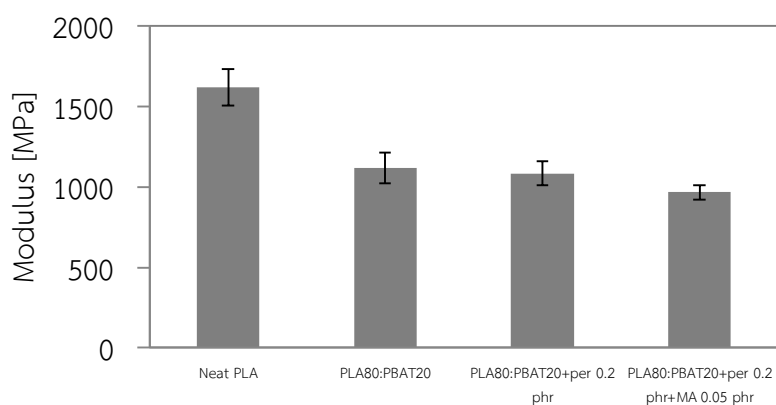
#### 4.3.5.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ PLA/PBAT



ภาพที่ 4. 22 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PBAT ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ที่เติมเฉพาะ perkadox และ เต็มทั้ง perkadox กับ maleic anhydride

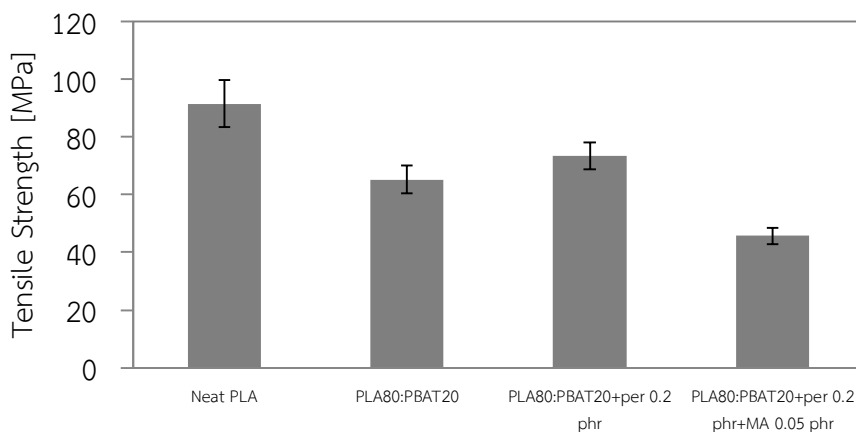
จากภาพสัณฐานวิทยาภาพที่ 4.22 เมื่อเติม perkadox 0.2 phr และเมื่อเพิ่ม maleic anhydride 0.05 phr เข้าไปพร้อมกันกับ perkadox ส่งผลต่อการเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT ดีขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลงเหลือเพียง 44% ของอนุภาค PBAT ที่ไม่มีการเติม perkadox รวมถึงมีรูปร่างที่กลมกระจายอยู่ในเฟสหลักและจากชิ้นงานหลังการทดสอบการรับแรงกระแทกเกิดการยืดออกของ PBAT จะเป็นการดูดซับและเปลี่ยนพลังงานที่ให้เข้าไปเพื่อทำให้เกิดการแยกออกของพื้นผิวชิ้นงานทำให้ทราบว่าเกิดการแตกหักแบบเหนียวแทนการแตกหักแบบเปราะ เมื่อทำการเพิ่ม perkadox 0.2 phr ร่วมกับ maleic anhydride 0.05 phr พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อรูปร่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การเติมเปอร์ออกไซด์เป็นผลดีต่อสมบัติเชิงสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกล แต่เมื่อเพิ่ม maleic anhydride ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อย

#### 4.3.5.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบสเนต PLA/PBAT



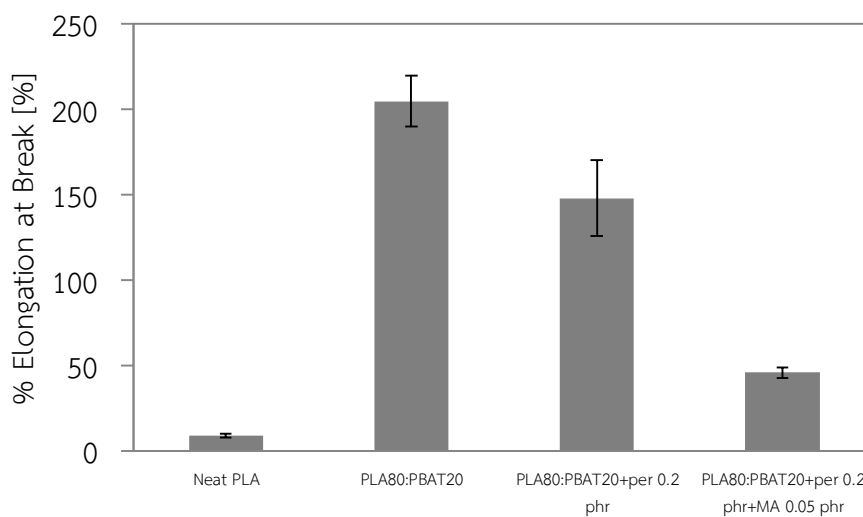
ภาพที่ 4. 23 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox และ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.23 แสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox และ maleic anhydride พบว่าค่า Modulus ลดลงเล็กน้อยเมื่อเติม perkadox และperkadox กับ maleic anhydride



ภาพที่ 4. 24 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox และ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.24 แสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox และ maleic anhydride พบว่าการเติม perkadox 0.2 phr ทำให้ Tensile strength ของ PLA/PBAT (80:20) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่เติม perkadox กับ maleic anhydride มีผลทำให้ Tensile strength ลดลง



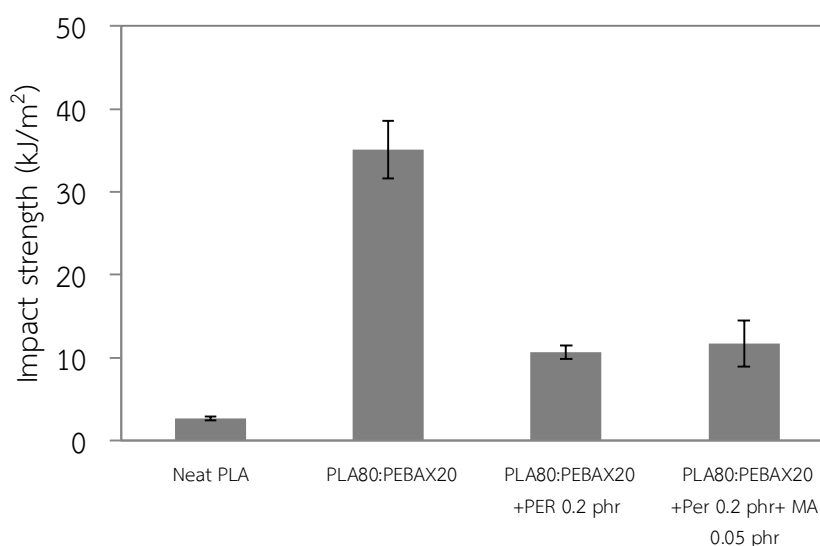
ภาพที่ 4. 25 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เติม perkadox และ PLA/PBAT เติม perkadox กับ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.25 แสดงค่า Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT เต็ม perkadox และ PLA/PBAT เต็ม perkadox กับ maleic anhydride พบว่าค่า Elongation at break มีค่าที่ลดลงเนื่องจากเมื่อเติม perkadox และการลดลงมากขึ้นเมื่อเติม perkadox ร่วมกับ maleic anhydride

#### 4.3.4 รีเอ็กทีฟเบลนด์ระหว่าง PLA/PEBAX

ในอัตราส่วน (80:20) ที่มีการเติม perkadox 0.2 phr และ อัตราส่วน (80:20) ที่มีการเติม perkadox 0.2 phr และ maleic anhydride 0.05 phr

##### 4.3.6.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PEBAX

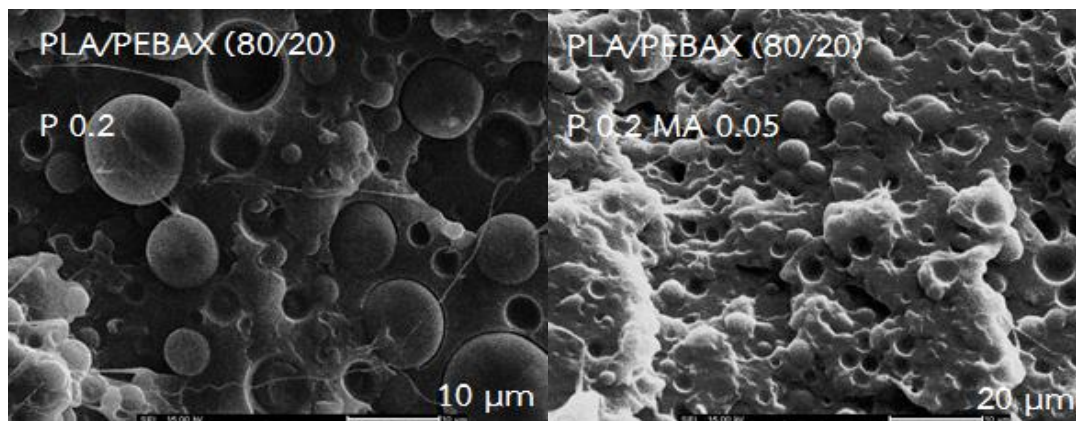


ภาพที่ 4. 26 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เต็ม perkadox และ PLA/PEBAX เต็ม perkadox กับ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.26 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PEBAX ในอัตราส่วน PLA/PEBAX (80:20), PLA/PEBAX (80:20) เต็ม perkadox 0.2 phr และ PLA/PEBAX (80:20) เต็ม perkadox 0.2 phr กับ maleic anhydride 0.05 phr พบว่า ค่า Impact strength มีค่าลดลงเมื่อเติม perkadox เนื่องจากทำให้อนุภาค PEBAX เกิดการยึดออกได้น้อยลงเนื่องจากความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเติม maleic anhydride พบว่าค่า Impact strength มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการเติม maleic anhydride ช่วยทำให้อนุภาคของ PEBAX มีขนาดที่เล็กลงและกระจายตัวได้ดีขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนมุมบริเวณปลายรอยแตกจากมุมแหลมเป็นมุมที่ทื่อขึ้นขณะโดนแรงกระแทกทำให้เกิดเป็นการแตกหักแบบเหนียวแทนแตกหักแบบเปราะ



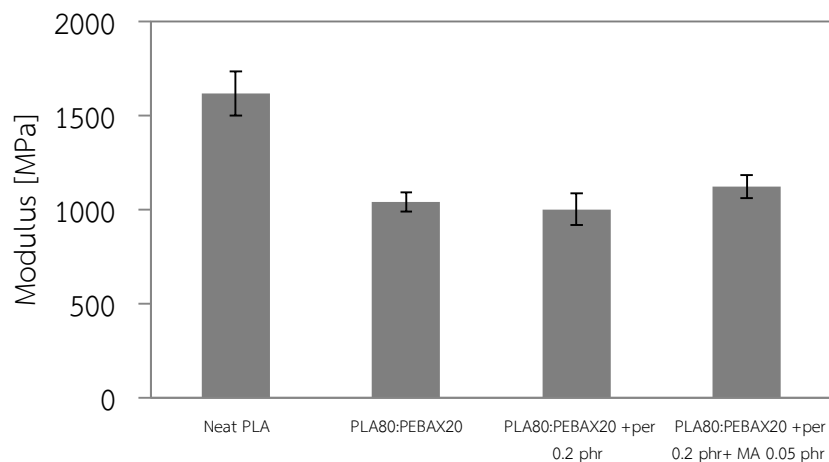
#### 4.3.6.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ PLA/PEBAX



ภาพที่ 4. 27 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PEBAX ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ที่เติมเฉพาะ perkadox และ เติมทั้ง perkadox กับ maleic anhydride

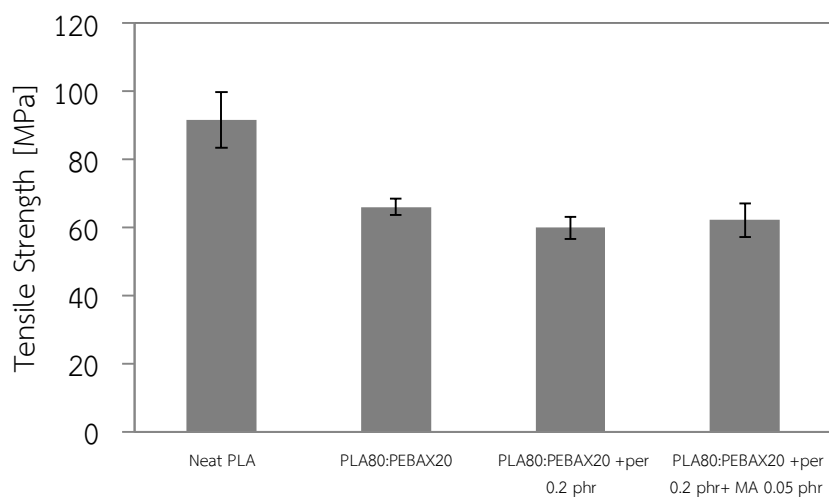
จากภาพแสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกพบว่าขนาดอนุภาคดังนี้ 1.5-12.0 และ 0.5-5.5 ไมโครเมตรตามลำดับจากการทดสอบเมื่อเติม perkadox เข้าไปในปริมาณ 0.2 phr พบว่าความหนืดมีค่าที่สูงขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคของเฟสที่กระจายตัว เช่นเดียวกันเมื่อเติม maleic anhydride ในปริมาณ 0.05 phr ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่า MFI เพิ่มขึ้นสูงกว่าการเติม perkadox เพียงอย่างเดียว ลักษณะของอนุภาค PEBAX มีลักษณะที่กลมขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาพื้นผิวชิ้นงานจากการทดสอบการรับแรงกระแทกภาพ SEM แสดงให้เห็นถึงการเติม perkadox 0.2 phr ลงไปที่ปริมาณการเติม 10 เปอร์เซ็นต์ PEBAX มีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงทำให้ไม่สามารถดูดซับแรงได้มากนัก เมื่อทำการเติมในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ PEBAX มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและเหมาะสมที่จะดูดซับและกระจายแรงเมื่อได้รับแรงกระแทก และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.30 (ข) เป็นการเติม perkadox 0.2 phr และ maleic anhydride 0.05 phr พบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลงอันเนื่องมาจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นของ PEBAX ส่งผลต่อการยึดออกของอนุภาคทำให้ทนต่อการกระแทกได้น้อยชิ้นงานจึงแตกหักได้ง่าย

#### 4.3.4.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PEBAX



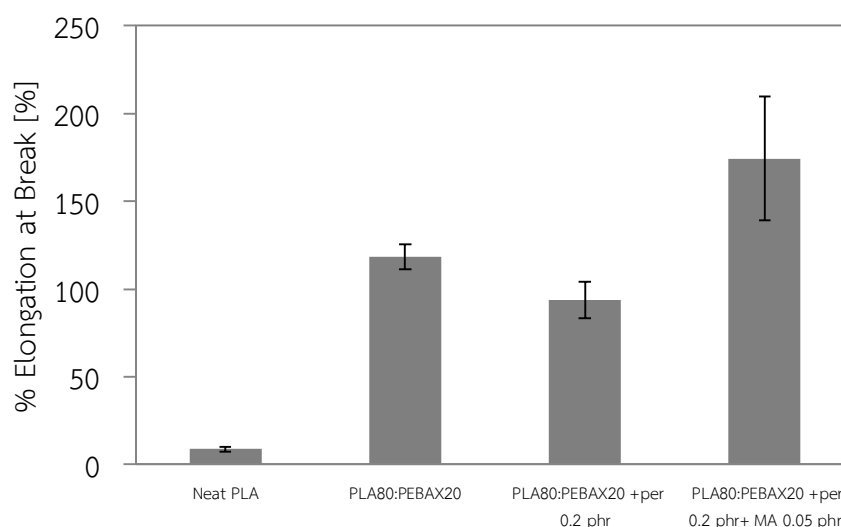
ภาพที่ 4. 28 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เต็ม perkadox และ PLA/PEBAX เต็ม perkadox กับ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.28 แสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/PEBAX (80:20), PLA/PEBAX (80:20) เต็ม perkadox 0.2 phr และ PLA/PEBAX (80:20) เต็ม perkadox 0.2 phr กับ maleic anhydride 0.05 phr พบว่าการเติม maleic anhydride จะมีผลทำให้ค่า Modulus สูงขึ้นเล็กน้อยแสดงถึงความแข็งแรงที่สูงขึ้นเนื่องจากการเติม perkadox เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4. 29 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เต็ม perkadox และ PLA/PEBAX เต็ม perkadox กับ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.29 แสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เติม perkadox และ PLA/PEBAX เติม perkadox กับ maleic anhydride พบว่าการเติม maleic anhydride ทำให้ค่า Tensile strength สูงขึ้นเล็กน้อยเกิดจาก maleic anhydride มีผลต่อการขนาดอนุภาคของ PEBAX ทำให้มีขนาดเล็กลงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสมากขึ้นเกิดแรงยึดติดมากขึ้นระหว่างเฟสทำให้ทนทานต่อแรงในการฉีกขาดเพิ่มมากขึ้น

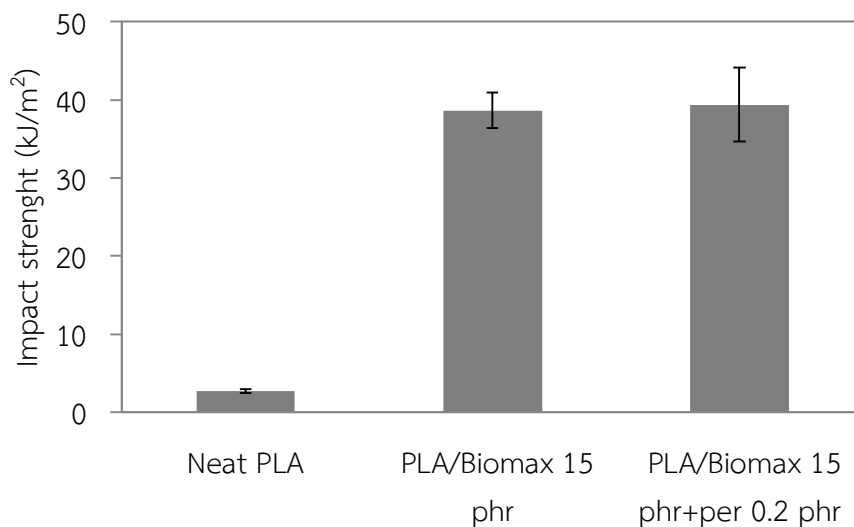


ภาพที่ 4. 30 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เติม perkadox และ PLA/PEBAX เติม perkadox กับ maleic anhydride

จากภาพที่ 4.30 แสดงค่า Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/PEBAX, PLA/PEBAX เติม perkadox และ PLA/PEBAX เติม perkadox กับ maleic anhydride พบว่าค่า Elongation at break มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเติม maleic anhydride เนื่องจากการเติม maleic anhydride ทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้นเช่นเดียวกับค่า Tensile strength ทำให้ส่วน PEBAX ที่เป็นส่วนยึดออกได้ยึดเกาะกับ PLA ได้ดีขึ้น

4.3.5 รีเอ็กทีปเบลนดร์ระหว่าง PLA/Biomax 15 phr ที่มีการเติม perkadox 0.2 phr

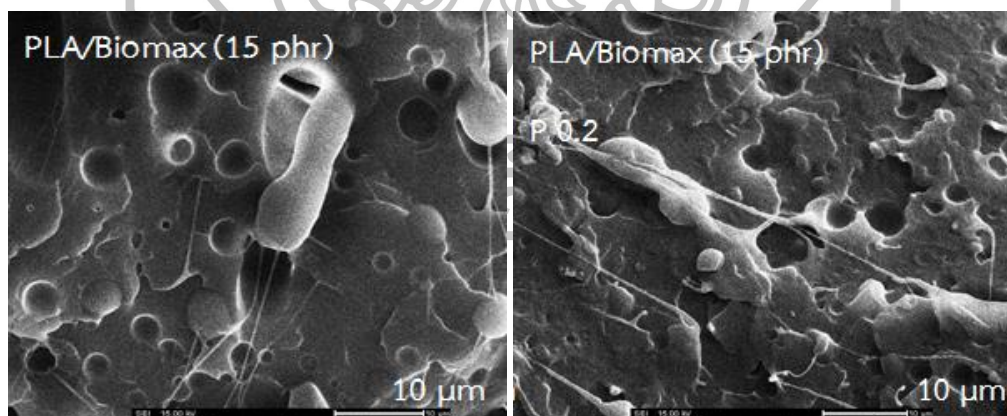
4.3.7.1 สมบัติ Impact stength ของพอลิเมอร์ PLA/Biomax



ภาพที่ 4. 31 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เติม perkadox

จากภาพที่ 4.31 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/Biomax ในอัตราส่วน PLA/Biomax 15 phr และ PLA/Biomax 15 phr เติม perkadox 0.2 phr พบว่าการเติม perkadox 0.2 phr ไม่ทำให้ค่า Impact strength ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง

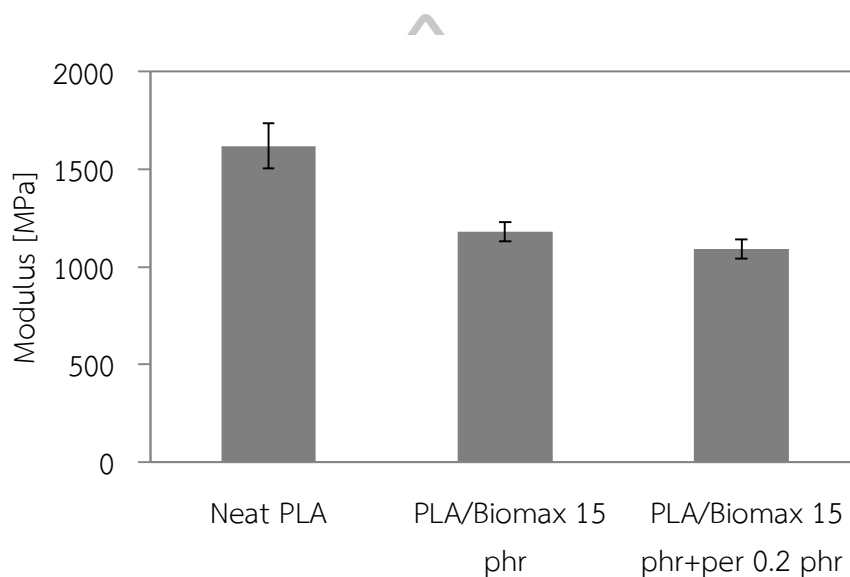
#### 4.3.7.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ PLA/Biomax



ภาพที่ 4. 32 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกทั้งไม่เติมและเติม perkadox

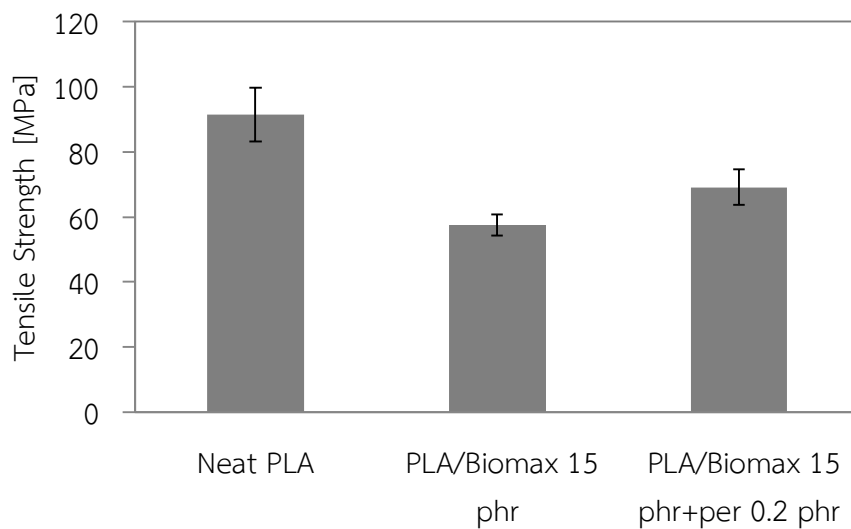
จากภาพแสดงสัญญาณวิทยาจากเครื่องผสมแบบปิดซึ่งมีขนาดอนุภาค 0.5-7.5 ไมโครเมตร การเติม perkadox 0.2 phr ลงใน PLA/Biomax 15 phr เบลนด์พบว่าส่งผลต่อความเข้ากันได้ขึ้น การยึดเกาะระหว่างผิวดีขึ้น แต่ไม่พบถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาค Biomax มากนัก แสดงถึงการไม่ส่งผลของ perkadox อย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการกระจาย แต่มีผลต่อ ความเข้ากันได้มากขึ้นระหว่างเฟสหลักคือ PLA กับเฟสกระจาย (Dispersed phase) คือ Biomax

#### 4.3.7.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์ PLA/Biomax



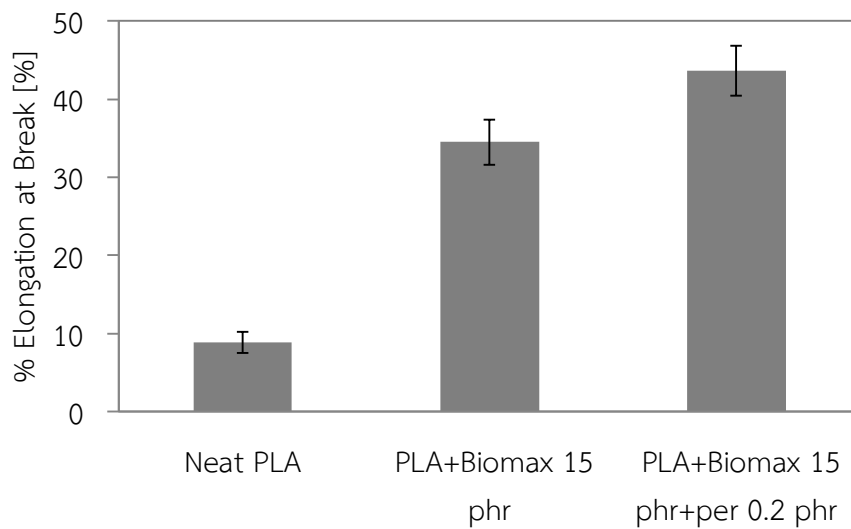
ภาพที่ 4. 33 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เติม perkadox

จากภาพที่ 4.33 แสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เติม perkadox พบว่า perkadox ที่เติมเข้าไปส่งผลต่อการลดลงของค่า Modulus เล็กน้อย



ภาพที่ 4. 34 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เต็ม prekadox

จากภาพที่ 4.34 แสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เต็ม prekadox พบว่าค่า Tensile strength เพิ่มขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 4. 35 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เต็ม prekadox

จากภาพที่ 4.35 แสดงค่า Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เติม perkadox พบว่าค่า Elongation at break สูงขึ้นเมื่อเติม perkadox แสดงว่า perkadox 0.2 phr ช่วยให้สมบัติเชิงกลของเบลนด์ดีขึ้น

กล่าวโดยรวม การทำรีเอ็กทีฟเบลนด์โดยการใช้เปอร์ออกไซด์ในปริมาณ 0.2 phr ในการเบลนด์ระหว่าง PLA/Thermoplastic elastomer เบลนด์ Thermoplastic elastomer ที่ใช้มี 5 ชนิดได้แก่ Biomax, PEBAX, PBAT, EVA และ EAE พบว่าทุกคู่รีเอ็กทีฟเบลนด์ให้สมบัติสัญญาณวิทยาการเบลนด์ที่ดีขึ้น และทุกคู่ให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น กล่าวคือการทำรีเอ็กทีฟเบลนด์ด้วย Perkadox 0.2 phr ช่วยให้การเบลนด์เข้ากันได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเห็นได้ว่า PLA มีความเข้ากันได้ดีระหว่าง PLA กับ EAE อาจเนื่องมาจากหมู่ acrylic ซึ่งมีความเข้ากันได้ดีกับโมเลกุลของ PLA นอกจากนี้ PLA ยังมีความเข้ากันได้ดีกับ EVA ซึ่งอาจเกิดจากหมู่ปลายของ EVA คือ acetate เช่นกัน แต่การเบลนด์ที่เข้ากันได้ดียังไม่เพียงพอที่จะทำให้สมบัติการทนต่อการกระแทกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.1

| Polymer blends    | Impact strength of Non-reactive (kJ/m <sup>2</sup> ) | Impact strength of Reactive blends (kJ/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------|--|---|
| PLA/Biomax 15 phr | 39   | 39  |
| PLA/PEBAX 20 %    | 35   | 11  |
| PLA/PBAT 20 %     | 9  | 23  |
| PLA/EVA 10%       | 12   | 39  |
| PLA/EAE 20%       | 60   | 57  |

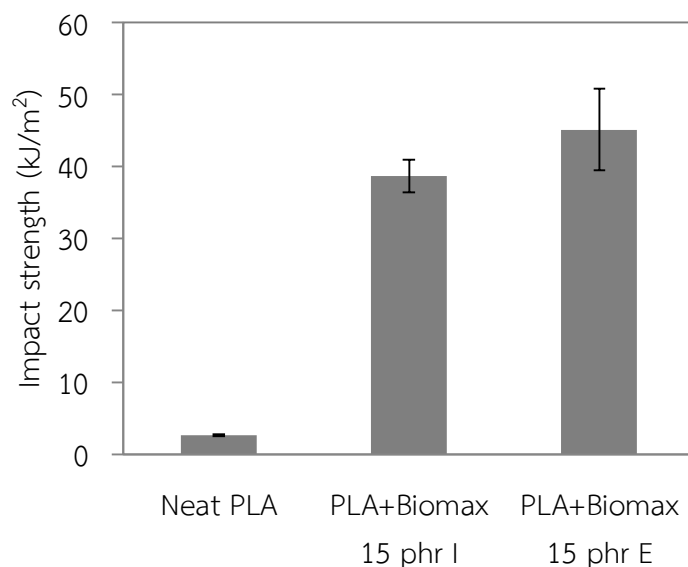
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีผลต่อค่า Impact strength ที่สำคัญคือ Biomax และ EAE ทั้งสองจะให้ค่า impact strength ที่สูง 40 – 60 kJ/m<sup>2</sup> เทียบเท่าได้กับ ABS ทั้งในกรณี physical blends และ reactive blends ส่วนในกรณี PLA/EVA เบลนด์ พบว่าการทำ reactive blends เพิ่มค่า Impact strength สูงมาจาก 15 เป็น 40 KJ/m<sup>2</sup>

#### 4.4 พอลิเมอร์เบลนด์ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาความแตกต่างของกระบวนการเบลนด์ การเบลนด์ใน internal mixer กับการเบลนด์ต่อเนื่องใน twin screw extruder ว่ามีผลต่อสมบัติการทนต่อการกระแทกหรือไม่รวมถึงศึกษาในด้านสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยใน internal mixer มีเงื่อนไขการเบลนด์ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที ส่วนเงื่อนไขการเบลนด์ใน twin screw extruder ที่อุณหภูมิตั้งจากทางเข้า 140 ถึง 200 องศาเซลเซียส ที่ทางออก ใช้ความเร็วรอบ 100 rpm

#### 4.4.1 การเบลนดระหว่าง PLA/Biomax 15 phr

##### 4.4.1.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์ PLA/Biomax 15 phr

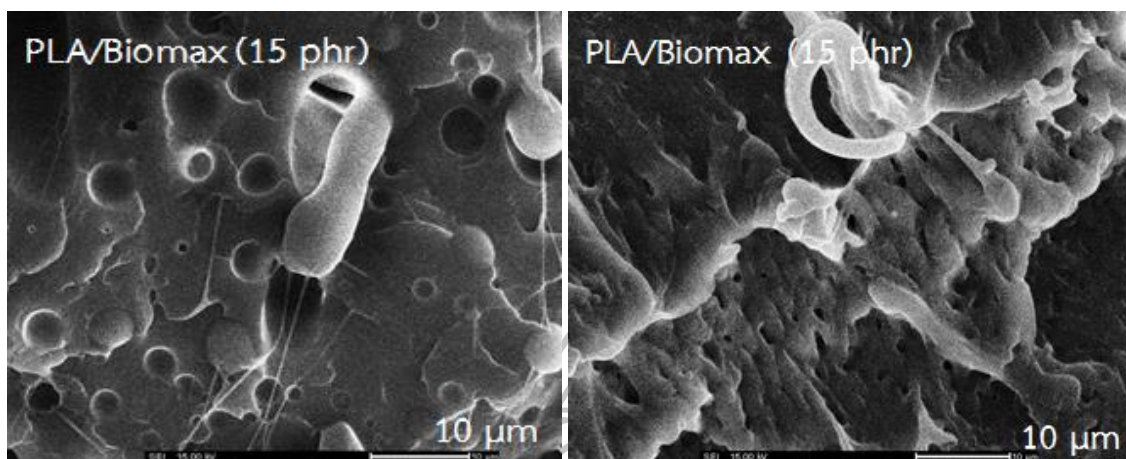


ภาพที่ 4. 36 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบปิด (I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

จากภาพที่ 4.36 แสดงค่า Impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ PLA เต็ม Biomax 15 phr พบว่าค่า Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเบลนด์โดยใช้เครื่องเบลนด์แบบสกรูคู่ อันเนื่องมาจากขนาดของอนุภาค Biomax เล็กลง โดยเมื่อผ่านการเบลนด์แบบสกรูคู่แรงเฉือนที่มีมากกว่าทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดที่เล็กลง มีผิวสัมผัส PLA กับ Biomax ได้มากขึ้น ขนาดอนุภาคของเฟสกระจาย ส่งผลต่อการหยุดรอยแตก และการยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสกระจายกับเฟสหลักส่งผลต่อการส่งผ่านของแรงไปสู่เฟสกระจายที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่า เมื่อรับแรงกระทำทำให้เกิดการยืดออกของอนุภาค Biomax ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานจากแรงกระทำเป็นพลังงานการยึดของเฟสกระจาย

##### 4.4.1.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ PLA/Biomax 15 phr

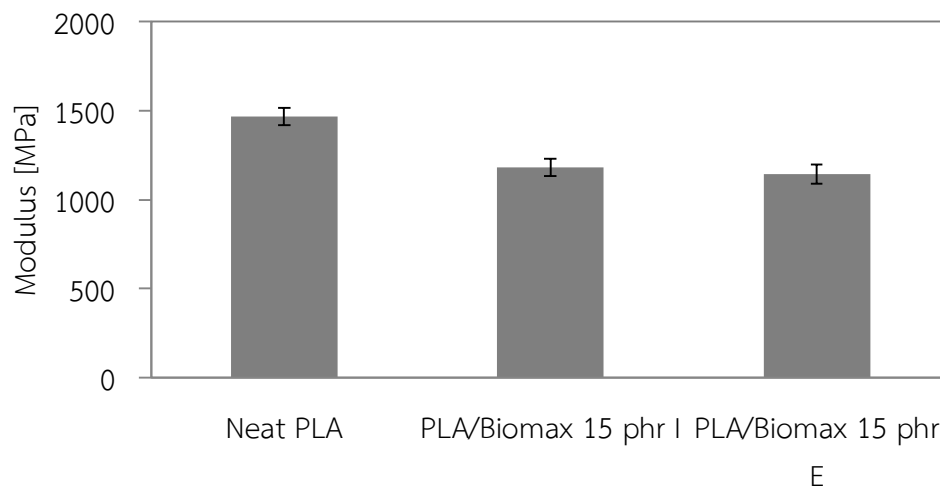




ภาพที่ 4. 37 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax 15 phr ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ที่ได้จากการผสมภายในแบบปิด(ซ้าย) และ เครื่องผสมผ่านระบบสกรูคู่ (ขวา)

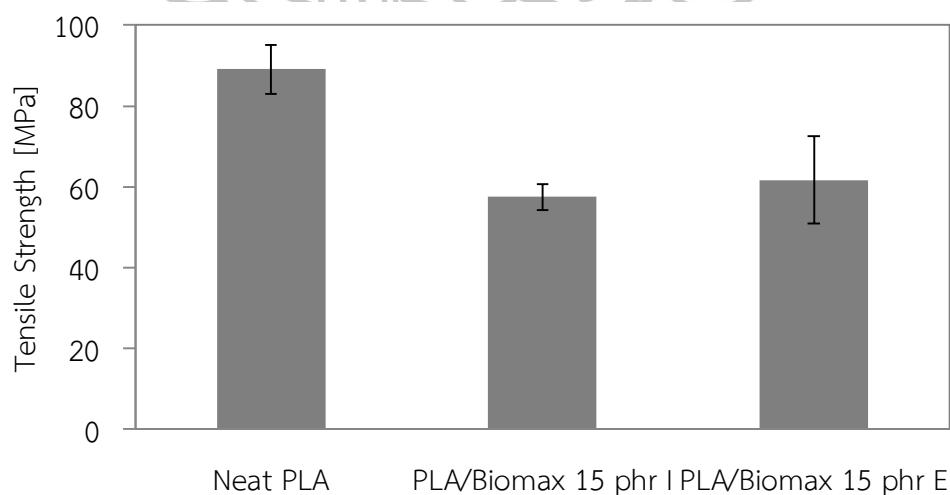
จากภาพแสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากเครื่องผสมระบบสกรูคู่(ขวา) จากเครื่อง SEM พบว่าขนาดอนุภาคของ Biomax จะมีขนาด 0.5-1.5 ไมโครเมตร อนุภาคจะมีลักษณะกลมกระจายตัวอยู่ใน PLA ซึ่งเป็นเมทริกซ์หลักลักษณะเช่นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่ได้จากเครื่องผสมแบบปิด เมื่อทำการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกภาพพื้นผิวของชิ้นงานแสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเหนียวได้อย่างชัดเจน จากภาพยังแสดงถึงการกระจายตัวของอนุภาค Biomax ในเครื่องผสมผ่านระบบสกรูคู่(ขวา) ที่ละเอียดกว่าและทั่วถึงมากกว่า (uniform) ในเครื่องผสมแบบปิด(ซ้าย) และพบการยึดออกของ Biomax บนชิ้นงานลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นถึงเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระแทกอนุภาคของ Biomax จะดูดซับแรงและเปลี่ยนเป็นการยึดออกของอนุภาคซึ่งจะช่วยให้สามารถรับแรงได้สูงขึ้นค่า impact strength จึงมีค่าที่มากกว่า

#### 4.4.1.3 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์ PLA/Biomax 15 phr



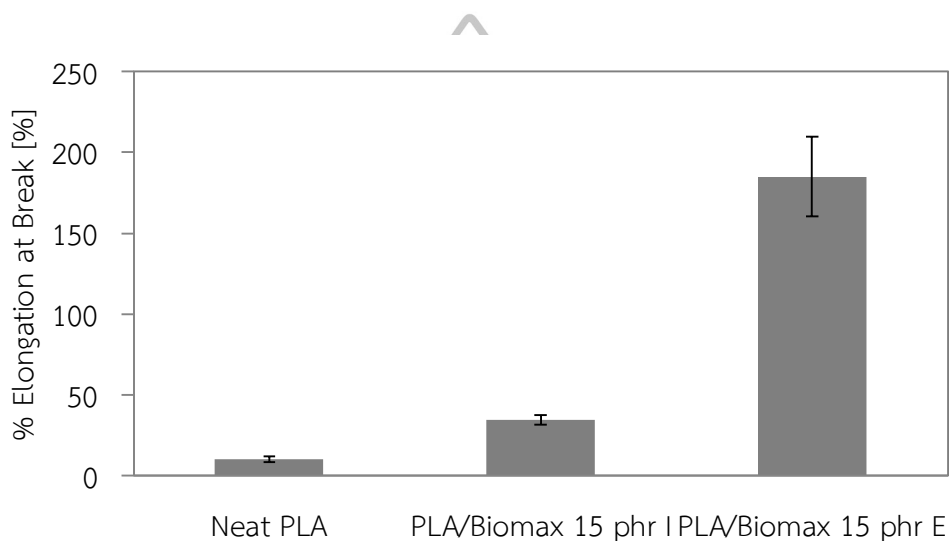
ภาพที่ 4. 38 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

จากภาพที่ 4.38 แสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E) จะเห็นได้ว่าผลของกระบวนการเบลนด์ส่งผลต่อค่า Modulus ที่น้อยมาก สอดคล้องกับธรรมชาติของค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ขึ้นกับสัดส่วนของพอลิเมอร์เบลนด์ ไม่ขึ้นกับกระบวนการเบลนด์



ภาพที่ 4. 39 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

จากภาพที่ 4.39 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า Tensile strength ของ PLA/Biomax 15 phr จากเครื่องผสมแบบปิด และ PLA/Biomax 15 phr จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่ พบว่าการเบลนดในเครื่องสกรูคู่ มีค่า Tensile strength สูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งการเบลนดในเครื่องเอ็กทราดูด จะเกิดทั้งการเฉือนและการขัดขวางการไหล ในขณะที่เบลนดซึ่งจะให้สัญญาณวิทยาการเบลนดที่เล็กละเอียดกว่าการเบลนดในเครื่องผสมแบบปิดที่มีการเฉือนเป็นส่วนใหญ่เพียงอย่างเดียว เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง จะช่วยให้มีพื้นผิวสัมผัสที่สูงขึ้นสามารถต้านทานการฉีกขาดออกของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงการยืดออก

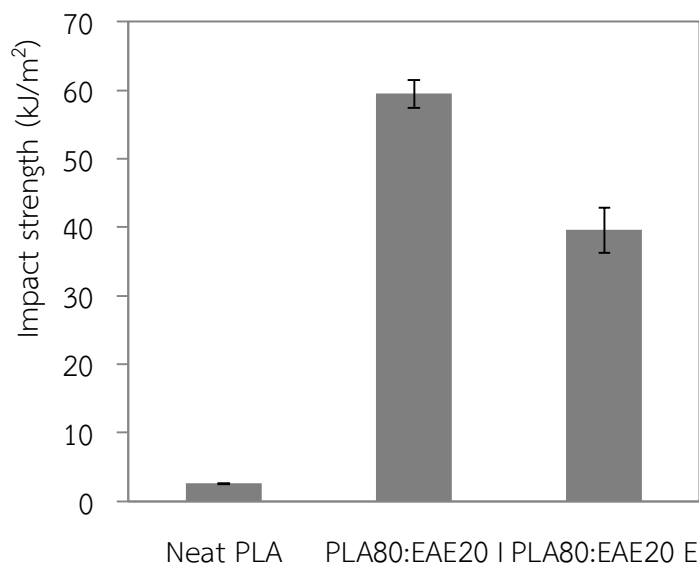


ภาพที่ 4. 40 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

จากภาพที่ 4.40 แสดงค่า Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax 15 phr จากเครื่องผสมแบบปิด และ PLA/Biomax 15 phr จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่ จะเห็นว่า Biomax มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากมีค่า  $T_g$  ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องเมื่อรับแรงจะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้จึงเกิดการยืดออก เมื่อทำการเบลนดผ่านระบบสกรูคู่ทำให้ขนาดอนุภาคของ Biomax มีขนาดเล็กกระจายตัวใน PLA ได้ทั่วมากขึ้นทำให้เกิดการยึดติดระหว่างผิวที่สูงสามารถเกิดการยืดออกได้สูงกว่าระบบที่เบลนดในเครื่องเบลนดแบบปิด

#### 4.4.2 การเบลนดระหว่าง PLA/EAE ในอัตราส่วน (80:20)

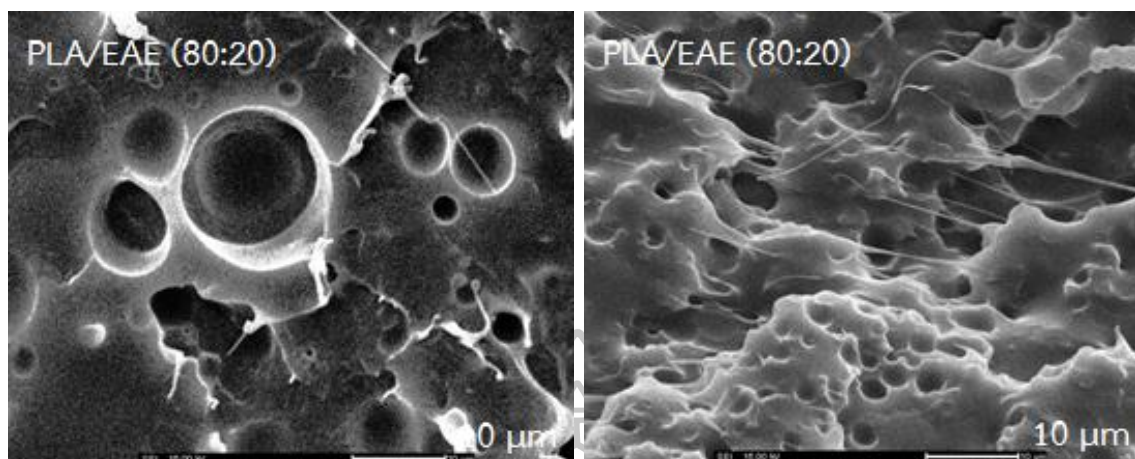
##### 4.4.2.1 สมบัติ Impact strength ของพอลิเมอร์ PLA/EAE ในอัตราส่วน (80:20)



ภาพที่ 4. 41 แผนภูมิแสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

ภาพที่ 4.41 แสดงค่า Impact strength ของ Neat PLA, PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบปิด และ PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบสกรูคู่ พบว่ามี impact strength ของ PLA/EAE ที่ได้จากการเบลนด์ในเครื่องผสมแบบสกรูคู่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเบลนด์ในเครื่องผสมแบบปิด Kilwon Cho และคณะ[50] พบว่าขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติรับแรงกระแทกในพอลิเมอร์เปราะจะอยู่ในช่วง 2-5 ไมโครเมตรและสำหรับพอลิเมอร์เหนียวจะอยู่ที่ 0.3 ไมโครเมตรตามลำดับ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเปราะเฟสกระจายของยางที่เหมาะสมจึงควรอยู่ในช่วง 2-5 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับกรณีของ PLA/Biomax มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2-10 ไมโครเมตร งานวิจัยนี้ขนาดของ EAE ในการเบลนด์ในเครื่องผสมแบบปิดให้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงไม่เกิน 2 ไมโครเมตรแต่มีอนุภาคขนาดใหญ่ประมาณ 8-10 ไมโครเมตรกระจายอยู่เป็นส่วนน้อย ในขณะที่ขนาดอนุภาคของ EAE จากการเบลนด์ในเครื่องผสมแบบสกรูคู่ มีขนาดอนุภาคกระจายตัวอยู่ในช่วง 5-6 ไมโครเมตรกระจายอยู่เป็นส่วนมาก ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นสาเหตุการลดลงของค่า impact strength

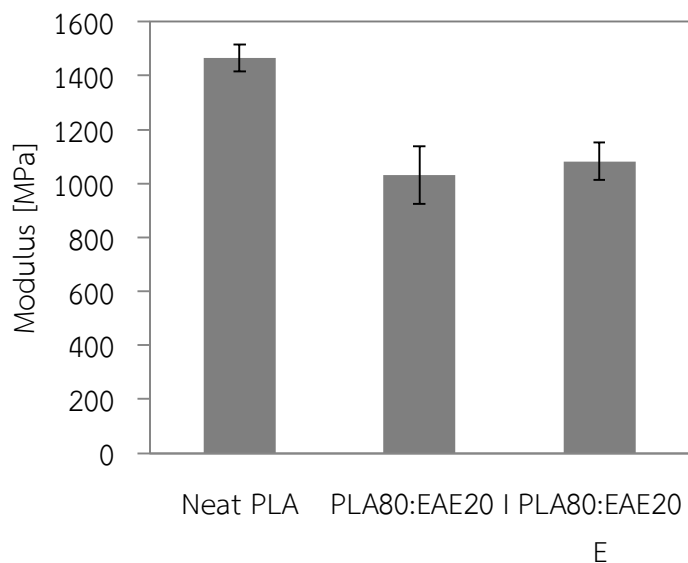
#### 4.4.2.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ PLA/EAE ในอัตราส่วน (80:20)



ภาพที่ 4. 42 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก จากการผสมภายในแบบปิด(ซ้าย) และ เครื่องผสมแบบสกรูคู่ (ขวา)

จากภาพแสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE ในอัตราส่วน (80/20) ที่ได้จากการเบลนด์ภายในแบบปิด(ซ้าย) และ เครื่องเบลนด์ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) (ขวา) จากภาพจะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของ EAE มีแนวโน้มลดลงอันเนื่องมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายใต้การเบลนด์ในเครื่องเบลนด์แบบสกรูคู่ที่มีค่ามากกว่าเครื่องเบลนด์แบบปิดขนาดอนุภาคเหลือเพียง 1-6 ไมโครเมตรและจากการทดสอบการรับแรงกระแทกจะเห็นได้ว่าการแตกหักแบบเหนียวเช่นเดียวกัน

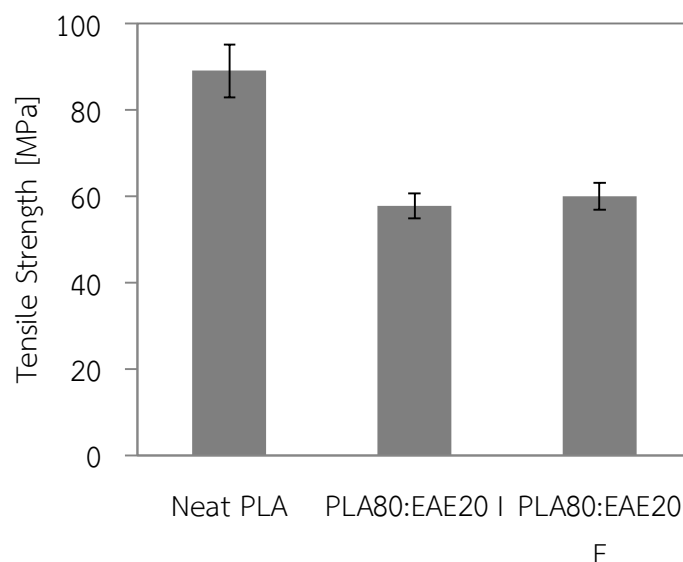
#### 4.4.2.2 สมบัติ Tensile ของพอลิเมอร์ PLA/EAE ในอัตราส่วน (80:20)



ภาพที่ 4. 43 แผนภูมิแสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

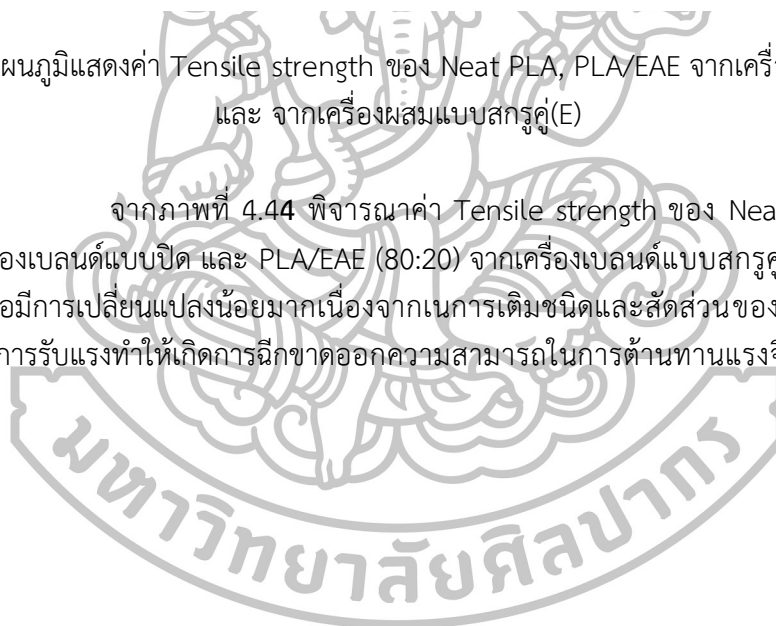
จากภาพที่ 4.43 แสดงค่า Modulus ของ Neat PLA, PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบปิด และ PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบสกรูคู่ จะเห็นได้ว่ามีค่าที่เปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากไม่ได้เปลี่ยนชนิดของโคพอลิเมอร์ที่เติมเข้าไปเมื่อทำการให้แรงผ่านการดึงยืดพอลิเมอร์เบลนด์จึงมีค่าทนต่อการเปลี่ยนรูปที่ไม่ต่างกันมากนัก

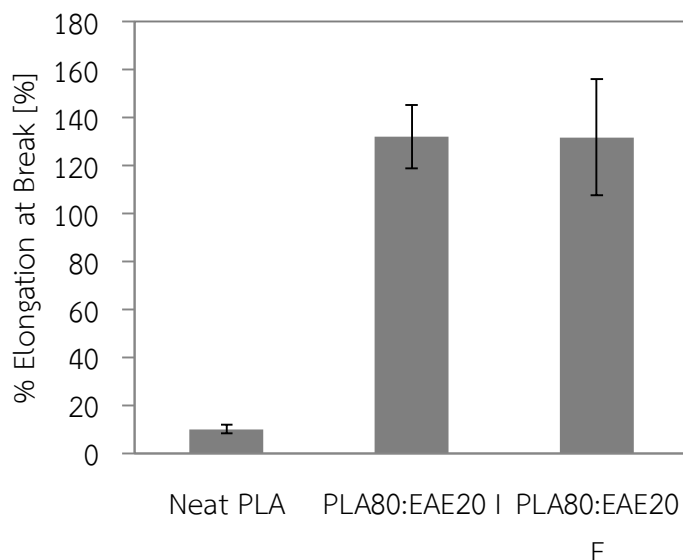




ภาพที่ 4. 44 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

จากภาพที่ 4.44 พิจารณาว่า Tensile strength ของ Neat PLA, PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบปิด และ PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบสกรูคู่ พบเช่นเดียวกับค่า Modulus คือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากการเติมชนิดและสัดส่วนของโคพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันเมื่อเกิดการรับแรงทำให้เกิดการฉีกขาดออกความสามารถในการต้านทานแรงจึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



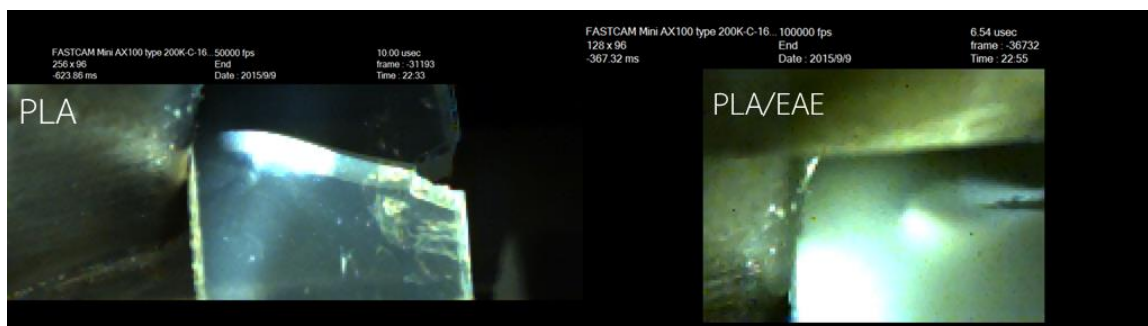


ภาพที่ 4. 45 แผนภูมิแสดงค่า % Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EAE จากเครื่องผสมแบบปิด(I) และ จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่(E)

จากภาพที่ 4.45 แสดงค่า Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบปิด และ PLA/EAE (80:20) จากเครื่องเบลนด์แบบสกรูคู่ พบการเปลี่ยนแปลงของการดึงยืดไม่ต่างกับระบบการเบลนด์ในเครื่องเบลนด์แบบปิดแม้ว่าขนาดอนุภาคที่ได้จะมีค่าที่ต่างกันคือมีขนาดที่เล็กกว่าแต่ผลของความสามารถในการยืดออกของพอลิเมอร์เบลนด์ก็ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ภาพที่ 4.42 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบรอยแตกของชิ้นงานที่ได้ขณะทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกแบบ sharpy รูปทางซ้ายเป็นชิ้นงาน PLA รูปทางขวาคือชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE พบว่ารูปทางซ้ายมือเกิดการขาดออกและฉีกรอยแตกมีลักษณะเรียบมันวาว รูปทางขวามือไม่มีการฉีกขาดที่หลุดออกไป ยังแสดงให้เห็นถึงรอยของการฉีกขาด บริเวณยอดแหลมของรอยฉีกขาดเห็นร่องรอยของการยืดออกในชิ้นตัวอย่าง ในขณะที่รอยฉีกขาดยืดออก จากการคำนวณเวลาที่ใช้ในการแตกหักในกรณีของ PLA ใช้เวลาในการแตกหัก  $8 \times 10^{-5}$  วินาที ส่วนในกรณีของ PLA/EAE ใช้เวลาในการแตกหัก  $249 \times 10^{-5}$  วินาที หรือเทียบเป็นความเร็วในกรณีของ PLA มีความเร็วในการแตกเท่ากับ  $1.25 \times 10^3$  เมตรต่อวินาที ส่วนในกรณีของ PLA/EAE มีความเร็วในการแตกหัก 40 เมตรต่อวินาที หรือความเร็วในการแตกหักลดลง 32 เท่า ในขณะที่ในกรณีของ PLA/Biomax มีเวลาในการแตกหัก  $349 \times 10^{-5}$  วินาที เท่ากับความเร็ว 27 เมตรต่อวินาทีซึ่งน้อยกว่า PLA 43.6 เท่า





ภาพที่ 4. 46 แสดงรอยแตกของชิ้นงาน Neat PLA (ซ้าย) และ PLA/EAE (80:20) (ขวา) ที่ได้จากเครื่องผสมแบบสกรูคู่

#### 4.5 สมบัติ Rheology และการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่างพอลิแลคตอคแอซิดกับโคพอลิเมอร์ 2 ชนิดได้แก่ Biomax และ EAE

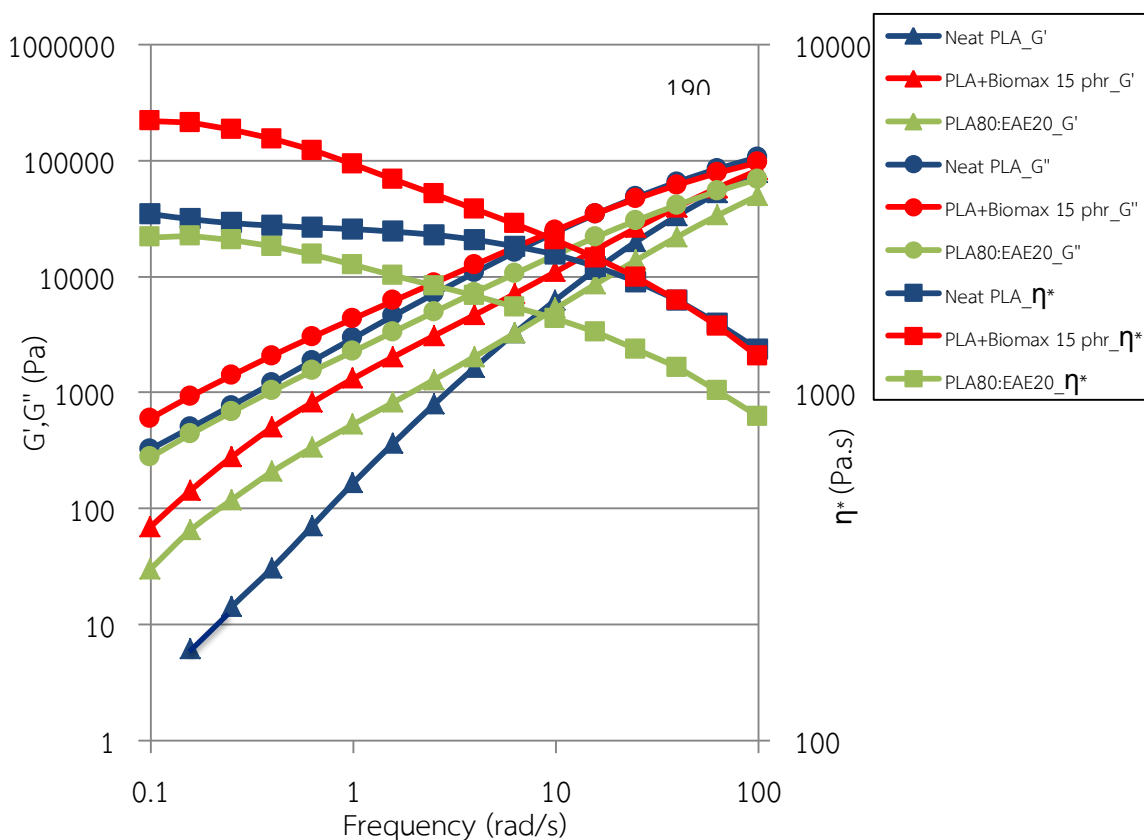
ก่อนที่จะได้ผลิตภัณฑ์มาใช้แต่ละชิ้นหนึ่งต้องผ่านกระบวนการที่สำคัญที่สุดคือกระบวนการการขึ้นรูป ซึ่งกระบวนการนี้มีปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการขึ้นรูปคือสมบัติของการไหลหรือสมบัติเชิงรีโอโลยี (rheological properties) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกการทดสอบโดยใช้ melt flow index (MFI) และ dynamic mechanical analysis (DMA) โดยสมบัติ Rheology นี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แรงเฉือน อัตราเฉือนที่ให้ และสมบัติเชิงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่วัด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเปรียบเทียบสูตรที่ดีที่สุดสองสูตรนำมาศึกษาพฤติกรรมการไหลได้แก่ PLA/Biomax 15 phr และ PLA:EAE (80:20) ในการวัดสมบัติ Rheology โดยการใช้ dynamic mechanical analysis แบบ plate – plate oscillation ขึ้นตัวอย่างทำการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรและหนา 1 มิลลิเมตร ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกับที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้ความถี่ในช่วง  $0.1 < \omega < 100$  rad/s ที่ shear strain เท่ากับ 0.1%

ตารางที่ 4. 1 แสดงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ Biomax และ EAE ที่เบลนด์ในเครื่องผสมแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)

| ตัวอย่าง          | MFI (g/10 min) |
|-------------------|----------------|
| Neat PLA          | 3.44±0.1       |
| PLA/Biomax 15 phr | 2.56±0.1       |
| PLA80:EAE20       | 6.96±0.1       |

PLA/Biomax เบลนด์มีค่าดัชนีการไหลอยู่ที่ประมาณ 2.6 g/10 min ซึ่งต่ำกว่าค่าดัชนีการไหลของ PLA แสดงว่าการเบลนด์ Biomax ในปริมาณ 15 phr ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้น

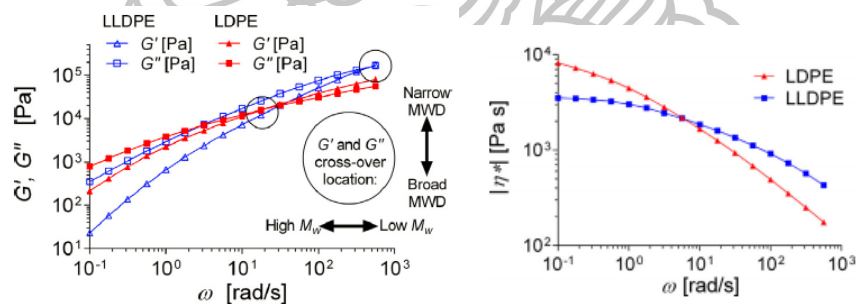
ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เบลนด์นี้มีช่วงความหนืดสอดคล้องการแปรรูปแบบ extrusion, callendering จนถึง การเป่าฟิล์ม ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/EAE มีดัชนีการไหลที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงว่าความหนืดลดลง พอลิเมอร์เบลนด์นี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปแปรรูปโดยการเป่าฟิล์มอาจใช้แปรรูปโดยกระบวนการฉีดเข้า เป้า



ภาพที่ 4. 47 แสดงค่า  $G'$ ,  $G''$  และ  $\eta^*$  ของ PLA, PLA/Biomax และ PLA/EAE เบลนด์ที่  $190^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 4.47 เป็นการเปรียบเทียบค่า  $G'$ ,  $G''$  และ  $\eta^*$  ของ PLA, PLA+Biomax และ PLA/EAE เบลนด์ ในรูปที่ความถี่ต่ำ  $G'$  และ  $G''$  ของ PLA แสดงความชันของกราฟมีค่าประมาณ 2 และ 1 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิและความถี่นี้ PLA เข้าสู่ terminal zone สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับ  $\eta^*$  มีค่าคงที่แสดงการเป็น Newtonian fluid ของไหลที่ไม่มีความยืดหยุ่นหรือมีความยืดหยุ่นต่ำ PLA หลอมจะสอดคล้องพอลิเมอร์หลอมที่มี melt strength ต่ำ ซึ่งจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปแปรรูปแบบการเป่าฟิล์ม ส่วนในกรณี PLA/Biomax เบลนด์ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิและความถี่เดียวกัน จะมี  $G''$  สูงกว่าของ PLA เล็กน้อยและมีความชันน้อยกว่าเล็กน้อย ในขณะที่ค่า  $G'$  มีค่าสูงกว่าของ PLA มากและมีค่าความชันน้อยกว่า 2 มาก การที่ค่า  $G'$  มีค่าสูงขึ้นแสดงถึงส่วนที่ยืดหยุ่นใน

พอลิเมอร์หลอมเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ แสดงว่าพอลิเมอร์หลอมที่มีสมบัติยืดหยุ่นมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่า melt strength สูงขึ้น สอดคล้องกับ  $\eta^*$  ของพอลิเมอร์เบลนด์ในช่วงนี้ยังไม่เข้าสู่ช่วงการไหลนิวโตเนียน ยังคงอยู่ในช่วงการเป็น power laws สอดคล้องกับพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโซ่โมเลกุลที่เป็นกิ่งยาว สมบัติรีโอโลยีลักษณะนี้เหมาะสำหรับการแปรรูปการเป่าฟิล์ม ในกรณีสุดท้าย PLA/EAE เบลนด์ มีลักษณะกราฟของ  $G'$  และ  $G''$  เหมือนกับของ PLA/Biomax เบลนด์ แต่มีค่า  $G'$  และ  $G''$  ที่ต่ำกว่า ซึ่งส่งผลให้ค่า  $\eta^*$  ของพอลิเมอร์เบลนด์นี้มีความหนืดต่ำ แต่มีการเข้าสู่ power laws เมื่อเพิ่มความถี่หรืออัตราเฉือนเร็วกว่า PLA ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์นี้เหมาะต่อการแปรรูปแบบฉีดเข้าแก้ว โดยยังคงมีลักษณะมีความยืดหยุ่นในขณะที่หลอมดีกว่า PLA ส่งผลให้การแปรรูปในกระบวนการต่างๆได้ง่ายกว่า PLA โดยที่พอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองยังให้สมบัติการทนต่อการกระแทกที่ดีมาก จากงานวิจัยของ Johanna Aho และคณะ[51] เปรียบเทียบสมบัติรีโอโลยีของ LDPE กับ LLDPE โดย LDPE เป็นเกรดเป่าถุง และ LLDPE เป็นเกรดฉีด สมบัติไดนามิกรีโอโลยีของพอลิเมอร์หลอมแสดงในรูปที่ 4.48 LLDPE แสดงสมบัติพอลิเมอร์หลอมที่เข้าสู่ terminal zone อย่างรวดเร็ว ส่วน LDPE เข้าสู่ terminal zone อย่างช้าๆ กล่าวคือค่า  $G'$  ของ LDPE สูงกว่าของ LLDPE เล็กน้อย และมีความชันน้อยกว่า ในขณะที่  $G''$  เพิ่มสูงกว่าของ LLDPE มาก แสดงว่าความยืดหยุ่นในพอลิเมอร์หลอมเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ LDPE มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปแบบ Blow film มากกว่า LLDPE ซึ่งมีลักษณะของกราฟของ PLA และ PLA/Biomax เบลนด์ ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 4. 48 แสดงค่า storage modulus, loss modulus และ complex viscosity ของ LDPE และ LLDPE

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากาการปรับปรุงการรับแรงกระแทกของ PLA โดยทำการการเบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับ เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ พลาสติกนัมและอิมแพคโมดิไฟเออร์ รวมทั้งหมด 8 ชนิดอันได้แก่ EAE, EVA, EPDM, SEBS, PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder ในอัตราส่วนต่างๆภายในเครื่องผสมแบบปิด ทั้งในกรณีที่เป็นแบบมีปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive) และแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี (non-reaction) และในกรณีรีเอ็กทีฟเบลนด์โดยผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคัล เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้โดยใช้ perkadox หลังจากนั้นศึกษาการเบลนด์ใน twin screw extruder ของคู่พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีค่าทนแรงกระแทกสูง และทำการศึกษสมบัติเชิงกลและรีโอโลยี

### 5.1 สมบัติเชิงกลพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในเครื่องผสมแบบปิดแบบไม่เกิดปฏิกิริยา

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ใช้ 8 ชนิดมี EAE, EVA, EPDM, SEBS, PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder ทำการเบลนด์กับ PLA โดยสัดส่วนเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์อยู่ระหว่าง 10 – 20 phr กลุ่มแรกเมื่อพิจารณาจากสัญญาณวิทยาพบว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ EPDM และ SEBS แสดงการเบลนด์ที่ไม่เข้ากัน มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และการเชื่อมติดระหว่างผิวไม่ดี ส่งผลให้ทั้งสมบัติเชิงกล tensile strength และ elongation at break มีค่าต่ำ และสมบัติทนต่อการกระแทกต่ำสุดในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีเอทีลินเป็นองค์ประกอบกล่าวคือ EAE, EVA, EPDM และ SEBS พบว่ามี EAE โดดเด่นที่สุด กล่าวคือ PLA/EAE เบลนด์ให้สมบัติเชิงกล tensile strength และ elongation at break สูงสุด มี tensile strength สูงถึง 60 MPa และ elongation at break สูงถึง 135 % รวมทั้งมี impact strength สูงถึง 60 kJ/m<sup>2</sup> ใน PLA/EAE 80/20 เบลนด์ ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติ impact strength ของ PLA จากค่าประมาณ 3 – 4 kJ/m<sup>2</sup> พอลิเมอร์เปราะเป็น ถึง 60 kJ/m<sup>2</sup> ซึ่งเป็นพลาสติกเหนียว รวมทั้งปรับปรุงระยะยืดขาดของ PLA จาก 8% เป็น 135 %

ในกลุ่มพลาสติกนัม PBAT, PEBAX และ impact modifier ในการค้าคือ Biomax และ ABS powder พบว่าสมบัติเชิงกลค่า มอดุลัส ค่า tensile strength และค่า elongation at break ของ PBAT, PEBAX, Biomax และ ABS powder เบลนด์กับ PLA ในสัดส่วน 10 -20 phr มีค่ามอดุลัสที่ใกล้เคียงกัน และค่ามอดุลัสลดลงตามปริมาณพอลิเมอร์ที่เบลนด์กับ PLA โดยลดลงจากประมาณ 1700 MPa เป็น 1100 MPa ที่พอลิเมอร์ 20 phr ส่วนค่า tensile strength และค่า elongation at break พบว่า PLA/PBATและ PLA/PEBAX เบลนด์จะมีค่าสูงกว่า PLA/Biomax และ PLA/ABS powder มาก

โดยเฉพาะค่า elongation at break พบว่า PLA/PBAT และ PLA/PEBAX ให้ค่าสูงถึง 200% และ 100% ตามลำดับ ในขณะที่ PLA/Biomax และ PLA/ABS powder มีค่า elongation at break อยู่ที่ 20 % เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่า PLA/Biomax และ PLA/PEBAX มีค่า Impact strength สูงกว่า PLA/PBAT และ PLA/ABS powder มาก

ในการทดลองเบื้องต้นที่เป็นการผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา จะมีเพียง PLA/EAE, PLA/Biomax และ PLA/PEBAX เบลนด์เท่านั้นที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติ Impact strength ของ PLA โดยค่า Impact strength จะสูงกว่า PLA 22 เท่า 14 เท่า และ 13 เท่าตามลำดับ

## 5.2 พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในเครื่องผสมแบบปิดแบบเกิดปฏิกิริยา

ในการทดลองส่วนนี้เป็นการทำรีเอ็กทีฟเบลนด์ของคู่เบลนด์ 5 คู่โดยเลือกจากคู่เบลนด์ที่ให้สมบัติเชิงกลที่สูงในตอนต้นที่ 1 และ 2 ได้แก่ PLA/EAE, PLA/EVA, PLA/PBAT, PLA/PEBAX และ PLA/Biomax เบลนด์ โดยผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคัลเกิดจากการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ และมีเพียง PLA/PBAT และ PLA/PEBAX เบลนด์ที่ทดสอบการใส่รีเอ็กทีฟเอเจน หรือ มาลลิวอินไฮไดรด์ (MA) เพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบ ในการทดลองนี้ใช้สัดส่วนเบลนด์ PLA/polymer 80/20 และใช้ perkadox 0.2 phr และ maleic anhydride 0.05 phr เท่านั้น

ผลการทดลองรีเอ็กทีฟเบลนด์พบว่า PLA/EAE และ PLA/EVA ที่ รีเอ็กทีฟเบลนด์ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ทั้งค่า tensile strength และ elongation at break ในขณะที่ PLA/PBAT และ PLA/PEBAX มีค่า elongation at break ลดลง โดยเฉพาะ PLA/PEBAX เบลนด์ elongation at break ลดลง แต่เมื่อมี MA เข้าร่วมทำปฏิกิริยาพบว่า PLA/PBAT เบลนด์มี elongation at break ลดลง อย่างมากจาก 150% เป็น 48% ในขณะที่ PLA/PEBAX เบลนด์ elongation at break เพิ่มขึ้นจากประมาณ 100% เป็น 170% ในการพิจารณาฐานวิชาการเบลนด์พบว่า มีแต่ PLA/PEBAX เบลนด์ ที่เมื่อเติมเปอร์ออกไซด์ทำให้การเข้ากันแยกลง แต่เมื่อพิจารณาผลของรีเอ็กทีฟเบลนด์โดยเติมเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวพบว่า มี PLA/EVA และ PLA/PBAT เบลนด์เท่านั้นที่มีค่า impact strength เพิ่มขึ้นอย่างมาก จาก  $12 \text{ kJ/m}^2$  เป็น  $39 \text{ kJ/m}^2$  และจาก  $9 \text{ kJ/m}^2$  เป็น  $23 \text{ kJ/m}^2$  ส่วน PLA/EAE และ PLA/Biomax การเติมเปอร์ออกไซด์ไม่ส่งผลให้ค่า impact strength เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยยังคงค่า impact strength ที่สูง ส่วนในกรณี PLA/PEBAX เบลนด์ ค่าค่า impact strength ลดลงอย่างมากจาก  $35 \text{ kJ/m}^2$  เป็น  $11 \text{ kJ/m}^2$  และยิ่งลดลงมากเมื่อมี MA เข้าร่วมทำปฏิกิริยา

การทำรีเอ็กทีฟเบลนด์โดยใช้เปอร์ออกไซด์ใน PLA/EAE, PLA/EVA, PLA/PBAT, PLA/PEBAX และ PLA/Biomax พบว่าโดยรวมให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นและสมบัติ Impact strength ทำให้ PLA/EVA, PLA/PBAT เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน PLA/EAE และ PLA/Biomax ให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นและสมบัติ Impact strength ยังคงสูงเช่นเดิม มีเพียง PLA/PEBAX เท่านั้นที่มีผลให้ทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกระแทกแยกลง เมื่อผ่านกระบวนการรีเอ็กทีฟเบลนด์จะมีเพียง PLA/Biomax, PLA/EAE, และ

PLA/EVA เท่านั้นที่ให้ค่า Impact strength สูงมาก มีค่า  $39 \text{ kJ/m}^2$  ถึง  $60 \text{ kJ/m}^2$  ซึ่งเปลี่ยน PLA จากพลาสติกเปราะเป็นพลาสติกเหนียว

### 5.3 พอลิเมอร์เบลนด์ผ่านระบบสกรูคู่ (Twin screw extruder)

ในการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการเบลนด์ สองวิธีโดยการเบลนด์ใน internal mixer กับกระบวนการเบลนด์ต่อเนื่องใน twin screw extruder ว่ามีผลต่อสมบัติการทนต่อการกระแทกหรือไม่ใน internal mixer โดยใช้สูตรที่เป็นแบบไม่เกิดปฏิกิริยาให้ค่า ค่า Impact strength สูงคือ PLA/Biomax และ PLA/EAE เบลนด์ พบว่า การเบลนด์ใน twin screw extruder ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า โดยเฉพาะค่า elongation at break กล่าวคือ PLA/Biomax 15 phr มี elongation at break เพิ่มขึ้นจาก 30 % เป็น 170% และยังมีค่า impact strength เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ส่วนในกรณี PLA/EAE เบลนด์ พบว่า สมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่า Impact strength ลดลงเล็กน้อย จาก  $60 \text{ kJ/m}^2$  เป็น  $40 \text{ kJ/m}^2$  ในขณะที่การเบลนด์ใน twin screw extruder ให้สัญญาณวิทยาการเบลนด์ที่ดีขึ้นทั้งขนาดอนุภาคเล็กลงและการยึดเกาะระหว่างผิวดีขึ้น

### 5.4 สมบัติ Rheology และการไหลของคือ PLA/Biomax และ PLA/EAE เบลนด์

การวิจัยในตอนนี้เลือกการทดสอบโดยใช้ melt flow index (MFI) และ dynamic mechanical analysis (DMA) เพื่อเปรียบเทียบสูตรที่ดีที่สุดสองสูตร PLA/Biomax 15 phr และ PLA:EAE (80:20) พบว่า จากการเปรียบเทียบค่า  $G'$ ,  $G''$  และ  $\eta^*$  ของ PLA, PLA/Biomax และ PLA/EAE เบลนด์ ที่ความถี่ต่ำ  $G'$  และ  $G''$  ของ PLA แสดงการเป็น Newtonian fluid ที่ไม่มีความยืดหยุ่นมี melt strength ต่ำ ซึ่งจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปแปรรูปแบบการเป่าฟิล์ม ส่วนในกรณี PLA/Biomax เบลนด์ พบว่าจะมี  $G''$  สูงกว่าของ PLA และค่า  $G'$  มีค่าสูงกว่าของ PLA มาก สมบัติรีโอโลยีลักษณะนี้เหมาะสำหรับการแปรรูปการเป่าฟิล์ม ในกรณี PLA/EAE เบลนด์ มีลักษณะกราฟของ  $G'$  และ  $G''$  เหมือนกับของ PLA/Biomax เบลนด์ แต่มีค่า  $G'$  และ  $G''$  ที่ต่ำกว่า ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์นี้เหมาะต่อการแปรรูปแบบฉีดเข้าแก้ว

### 5.5 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงสมบัติการรับแรงกระแทกและสมบัติการดึงยึดของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EVA, Biomax, EPDM, EAE, PBAT, PEBAX, SEBA และ ABS powder ทั้งระบบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาด้วย prekadox และ maleic anhydride ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา และสามารถนำไปฉีดขึ้นรูปได้จึงควรหาศึกษาหาปริมาณสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและทดลองขึ้นรูปพร้อมทดสอบสมบัติต่างๆเพื่อสามารถทำเป็นเชิงการค้าได้จริงต่อไป

### รายการอ้างอิง

- [1]. National Metal and Materials Technology Center (MTEC).(2007). การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้. เข้าถึงเมื่อ 14 สิงหาคม 2558 เข้าถึงได้จาก [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/usage\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html).
- [2]. พูนศักดิ์ สักกทัตติยกุล.(2008). พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic). เข้าถึงเมื่อ 19 สิงหาคม 2558 เข้าถึงได้จาก <http://www.thaigoodview.com/node/17034>.
- [3]. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิด PLA: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4]. ชาคริต ศรีประจวบวงษ์. (2550). "สารเพิ่มการทนแรงกระแทกและสารลามิเนตที่มีผลต่อสมบัติการเสียหายของแผ่นอะคริลิกโปร่งใส." ปรินญาโท วัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [5]. Masaki Harada, et al. (2008). "Reactive compatibilization of biodegradable poly(lactic acid)/poly( $\epsilon$ -caprolactone) blends with reactive processing agents." **Polymer Engineering & Science** 48, 7 1359-1368
- [6]. J. Pan, et al. (2005). "Grafting reaction of poly(D,L)lactic acid with maleic anhydride and hexanediamine to introduce more reactive groups in its bulk." **J Biomed Mater Res B Appl Biomater** 74, 1 (Jul): 476-80
- [7]. C. H. Kim, K. Y. Cho, and J. K. Park. (2001). "Grafting of glycidyl methacrylate onto polycaprolactone: preparation and characterization." **Polymer** 42, 12 (6//): 5135-5142
- [8]. Yogaraj Nabar, et al. (2005). "Production of Starch Foams by Twin-Screw Extrusion: Effect of Maleated Poly(butylene adipate-co-terephthalate) as a Compatibilizer." **Biomacromolecules** 6, 2 (2005/03/01): 807-817
- [9]. L. Wang, et al. (1998). "Reactive compatibilization of biodegradable blends of poly(lactic acid) and poly( $\epsilon$ -caprolactone)." **Polymer Degradation and Stability** 59, 1-3 (1/3/): 161-168
- [10]. Takeshi Semba, et al. (2006). "The effect of crosslinking on the mechanical properties of polylactic acid/polycaprolactone blends." **Journal of Applied Polymer Science** 101, 3 1816-1825

- [11]. Janne Kylmä and Jukka V. Seppälä. (1997). "Synthesis and Characterization of a Biodegradable Thermoplastic Poly(ester-urethane) Elastomer." **Macromolecules** 30, 10 (1997/05/01): 2876-2882
- [12]. R. F. Storey, J. S. Wiggins, and A. D. Puckett. (1994). "Hydrolyzable poly(ester-urethane) networks from L-lysine diisocyanate and D,L-lactide/ $\epsilon$ -caprolactone homo- and copolyester triols." **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry** 32, 12 2345-2363
- [13]. Mikael Stolt, Kari Hiltunen, and Anders Södergård. (2001). "Use of Iron Monocarboxylates in the Two-Step Preparation of Poly(ester-urethane)s." **Biomacromolecules** 2, 4 (2001/12/01): 1243-1248
- [14]. Lee Tin Sin, A. R. Rahmat, and W. A. W. A. Rahman. (2012). **PLA Biopolymer Technology and Applications**
- [15]. Raj Krishnaswamy and Allen Padwa. (2013). **Impact Modification of PLA Using Biobased, Biodegradable Mirel™ PHB Copolymers**. Metabolix:
- [16]. Sommai Pivsa-Art, et al. (2013). "Effect of Additive on Crystallization and Mechanical Properties of Polymer Blends of Poly(Lactic Acid) and Poly[(Butylene Succinate)-co-Adipate]." **Energy Procedia** 34, 0 563-571
- [17]. Supakij Suttiruengwong, et al. (2011). "Co-additives toughened biopolymer for packaging application." *Petrochemical and Engineering Material science and engineering Silapakorn*
- [18]. ฤดี จรัสโรจน์กำจร. (2555). "การเพิ่มความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดด้วยยางธรรมชาติ." *มหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*
- [19]. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล.(2011). พอลิแลคติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้. เข้าถึงเมื่อ 28 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก <http://www.yamanakasangyo.jp/english/ecology/index.html>.
- [20]. วชิระ ยมาภัย.(2007). พลาสติก PLA (Polylactic acid). เข้าถึงเมื่อ 29 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก <http://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics/พลาสติก-pla-poly-lactic-acid/>.
- [21]. Author. (1984) "Fused flexible tip catheter." Google Patents.
- [22]. Zhang, L. Chen W., and Y. Zhang. (2009). "Surprising shape-memory effect of polylactide resulted from toughening by polyamide elastomer. *Polymer*," 50, 5 1311-1315



- [23]. Jen-Taut Yeh, et al. (2010). "Compatible and Crystallization Properties of Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends. *Journal of Applied Polymer Science*." 116, 680–687
- [24]. Sirisinha, K., and W. Somboon. (2012). "Melt Characteristics, Mechanical, and Thermal Properties of Blown Film from Modified Blends of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) and Poly(lactide). *Journal of Applied Polymer Science*." 124, 4986–4992
- [25]. Xiao, et al. (2009). "Crystallization Behavior of Fully Biodegradable Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends. *Journal of Applied Polymer Science*." 112, 3754–3763
- [26]. Olaf Meincke, et al. (2004). "Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene." *Polymer* 45, 3 (2//): 739-748
- [27]. บริษัท นีโอเทค จำกัด.(2013). คุณสมบัติพลาสติก ABS. เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก <http://www.print3dd.com/abs/>.
- [28]. Author. (2002) "Fertile transgenic maize plants containing a gene encoding the pat protein." Google Patents.
- [29]. H. Nabil, H. Ismail, and A. R. Azura. (2013). "Effects of virgin Ethylene–Propylene–Diene–Monomer and its preheating time on the properties of natural rubber/recycled Ethylene–Propylene–Diene–Monomer blends." *Materials & Design* 50, 0 (9//): 27-37
- [30]. พงษ์ธร แซ่ฮุย.(2007). ชนิดของยางและการใช้งาน. เข้าถึงเมื่อ 11 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก <http://www.rubbercenter.org/files/technologys.pdf>.
- [31]. บุญรักษ์ กาญจนวณิช.(2013). ทีพีอี-วัสดุผสมของพลาสติกกับยางเพื่อทดแทนยาง. เข้าถึงเมื่อ 29 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/1002->.
- [32]. Ligang Yin, et al. (2009). "Effects of SEBS-g-BTAI on the morphology, structure and mechanical properties of PA6/SEBS blends." *European Polymer Journal* 45, 5 (5//): 1554-1560
- [33]. Sujit K. Dutta, Anil K. Bhowmick, and Tapan K. Chaki. (1996). "Structure property relationship of ethylene vinyl acetate copolymer grafted with triallyl cyanurate by electron beam radiation." *Radiation Physics and Chemistry* 47, 6 (6//): 913-926

- [34]. ExxonMobilChemical.(2558). Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Resin. เข้าถึงเมื่อ 22 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก <http://exxonmobilchemical.ides.com/en-US/ds243627/Escorene%E2%84%A2%20Ultra%20AD%200428EM1.aspx?l=58933&U=0>.
- [35]. M. Maity and C. K. Das. (2001). "SPECIALTY POLYBLEND SYSTEMS OF POLYURETHANE RUBBER AND ETHYLENE ACRYLIC RUBBER (PEROXIDE CURE)." **Polymer-Plastics Technology and Engineering** 40, 1 (2001/01/30): 39-51
- [36]. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. (2003). สารปรับแต่งพอลิเมอร์ (**Polymer Additives**). กรุงเทพฯ: บริษัท บิ๊กเนท จำกัด.
- [37]. Akzobel.(2558). Crosslinking Peroxides. เข้าถึงเมื่อ 27 กรกฎาคม 2558 เข้าถึงได้จาก [http://www.pcpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds\\_id=458](http://www.pcpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds_id=458).
- [38]. วริญดา จิรัญญาวรรณ. (2555). การจำลองผิวหน้ารอยแตกของคอมโพสิตโดยใช้โปรแกรม **ANSYS**. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [39]. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ. (2553). กลศาสตร์การแตกหัก. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [40]. Xue-Hui Wang, et al. (1997). "Toughening of poly(butylene terephthalate) with epoxidized ethylene propylene diene rubber." **Polymer** 38, 7 1569-1572
- [41]. Nan Shi, Jun Cai, and Qiang Dou. (2012). "Crystallization, Morphology and Mechanical Properties of PLA/PBAT/CaCO<sub>3</sub> Composites." **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS** 602 - 604, 768-771
- [42]. P. Ma, et al. (2012). "Toughening of poly(lactic acid) by ethylene-co-vinyl acetate copolymer with different vinyl acetate contents." **European Polymer Journal** 48, 1 (1//): 146-154
- [43]. Yongjin Li and Hiroshi Shimizu. (2009). "Improvement in toughness of poly(l-lactide) (PLLA) through reactive blending with acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS): Morphology and properties." **European Polymer Journal** 45, 3 738-746
- [44]. M. Murariu, et al. (2008). "Polylactide (PLA) and Highly Filled PLA - Calcium Sulfate Composites with Improved Impact Properties." **Macromolecular Symposia** 272, 1 1-12

- [45]. Masakazu Ito, Satomi Abe, and Masaru Ishikawa. (2010). "The fracture mechanism of polylactic acid resin and the improving mechanism of its toughness by addition of acrylic modifier." **Journal of Applied Polymer Science** 115, 3 1454-1460
- [46]. Hayati Samsudin, Herlinda Soto-Valdez, and Rafael Auras. (2014). "Poly(lactic acid) film incorporated with marigold flower extract (*Tagetes erecta*) intended for fatty-food application." **Food Control** 46, 55-66
- [47]. AkzoNobel Polymer Chemistry.(2015). Crosslinking Peroxides. เข้าถึงเมื่อ เข้าถึงเมื่อ 22 ตุลาคม เข้าถึงได้จาก [https://www.akzonobel.com/polymer/our\\_products/product\\_search/?appid=0&pgid=11&cat=Crosslinking+Peroxides](https://www.akzonobel.com/polymer/our_products/product_search/?appid=0&pgid=11&cat=Crosslinking+Peroxides).
- [48]. Edwin A. Murillo and Betty L. López. (2015). "Effect of the maleic anhydride content on the structural, thermal, rheological and film properties of the n-butyl methacrylate–maleic anhydride copolymers." **Progress in Organic Coatings** 78, 96-102
- [49]. N. Likittanaprasong, M. Seadan, and S. Suttiruengwong. (2015). "Impact property enhancement of poly (lactic acid) with different flexible copolymers." **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 87, 1 012069
- [50]. Kilwon Cho, et al. (2005). "Toughening of polycarbonate: Effect of particle size and rubber phase contents of the core-shell impact modifier." **Journal of Applied Polymer Science** 95, 3 748-755
- [51]. Johanna Aho, et al. (2015). "Rheology as a tool for evaluation of melt processability of innovative dosage forms." **International Journal of Pharmaceutics** 494, 2 623-642



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาคผนวก ก  
ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เบนด

ตารางภาคผนวก ก- 1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบสตันระหว่าง PLA กับ ABS powder, Biomax, EPDM, SEBS, PBAT, PEBAX, EVA และ EAE

| ตัวอย่าง                          | Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> ) | Tensile strength (MPa) | Young's modulus (MPa) | Elongation at break (%) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Neat PLA                          | 2.68±0.25                            | 91.58±8.25             | 1619.24±115.09        | 8.86±1.36               |
| PLA/ABS 5 phr                     | 5.75±0.81                            | 77.46±5.52             | 1546.36±65.57         | 11.54±3.42              |
| PLA/ABS 10 phr                    | 8.56±0.72                            | 75.97±2.84             | 1517.78±59.18         | 49.12±3.97              |
| PLA/ABS 15 phr                    | 8.52±1.22                            | 56.98±4.26             | 1231.83±11.16         | 41.13±7.57              |
| PLA/ABS 10 phr+per 0.2 phr        | 6.17±0.46                            | 77.08±5.28             | 1,330.50±62.38        | 31.31±5.66              |
| PLA/Biomax 5 phr                  | 6.63±0.58                            | 77.87±5.30             | 1355.12±55.68         | 12.69±2.41              |
| PLA/Biomax 10 phr                 | 26.20±3.71                           | 63.03±3.19             | 1247.78±67.63         | 19.61±3.40              |
| PLA/Biomax 15 phr                 | 38.62±2.26                           | 57.53±3.16             | 1179.15±48.27         | 34.53±2.90              |
| PLA/Biomax 15+per 0.2 phr         | 39.36±4.70                           | 69.20±5.41             | 1093.30±48.32         | 43.66±3.22              |
| PLA/EPDM 5 phr                    | 5.83±0.31                            | 74.80±1.83             | 1,307.00±65.5         | 28.93±5.03              |
| PLA/EPDM 10 phr                   | 6.39±0.37                            | 63.09±4.69             | 1,225.40±59.26        | 66.49±3.77              |
| PLA/EPDM 15 phr                   | 6.39±0.30                            | 54.81±3.70             | 1,037.40±88.42        | 36.66 ±6.30             |
| PLA/EPDM 10 phr+per 0.2 phr       | 5.38±0.24                            | 51.02±2.56             | 1178.19±40.46         | 24.73±4.94              |
| PLA/SEBS 5 phr                    | 5.61±0.43                            | 77.08±9.31             | 1,461.70±143.11       | 53.26±5.19              |
| PLA/SEBS 10 phr                   | 5.19±0.60                            | 69.949±4.69            | 1,435.50±80.34        | 50.29±3.61              |
| PLA/SEBS 15 phr                   | 4.74±0.30                            | 61.415±5.65            | 1,284.10±62.83        | 73.35±8.60              |
| PLA/SEBS 5 phr+per 0.2 phr        | 5.13±0.76                            | 39.898±3.83            | 1,153.20±72.96        | 37.27±4.50              |
| PLA90:PBAT10                      | 5.6±0.77                             | 85.38±2.15             | 1287.05±70.54         | 112.24±5.98             |
| PLA80:PBAT20                      | 9.43±0.64                            | 65.23±4.90             | 1117.31±96.48         | 204.81±15.03            |
| PLA90:PBAT10+Per0.2phr            | 4.23±0.64                            | 84.11±5.95             | 1170.63±35.85         | 70.68±22.59             |
| PLA80:PBAT20+Per0.2phr            | 22.55±2.31                           | 73.48±4.64             | 1084.76±74.79         | 147.96±22.10            |
| PLA80:PBAT20+Per0.2phr+MA 0.05phr | 21.40±3.81                           | 45.72±2.86             | 966.03±44.87          | 45.72±2.90              |
| PLA90:PEBAX10                     | 9.00±0.766                           | 83.06±6.25             | 1294.40±46.90         | 45.54±6.46              |

|                                       |            |            |                |              |
|---------------------------------------|------------|------------|----------------|--------------|
| PLA80:PEBAX20                         | 35.10±3.5  | 66.01±2.38 | 1042.76±49.54  | 118.41±7.13  |
| PLA90:PEBAX10+Per0.2phr               | 8.21±0.73  | 69.12±6.93 | 1255.58±69.84  | 122.76±17.70 |
| PLA80:PEBAX20+Per0.2phr               | 10.65±0.80 | 59.86±3.30 | 1004.18±84.47  | 93.65±10.43  |
| PLA80:PEBAX20+Per0.2phr+M<br>A0.05phr | 11.70±2.73 | 62.11±5.05 | 1124.00±61.40  | 174.38±35.46 |
| PLA90:EVA10                           | 14.74±1.82 | 52.57±3.72 | 1082.10±51.20  | 28.67±2.03   |
| PLA80:EVA20                           | 11.59±1.52 | 39.69±1.65 | 934.46±53.29   | 48.05±9.14   |
| PLA90:EVA10+Per0.2phr                 | 39.36±2.74 | 76.88±4.56 | 1333.20±55.91  | 35.81±5.04   |
| PLA90:EAE10                           | 13.04±1.84 | 74.81±5.56 | 1293.3±134.02  | 32.35±3.53   |
| PLA80:EAE20                           | 59.50±2.06 | 57.82±2.90 | 1030.80±105.56 | 132.12±13.11 |
| PLA80:EAE20+Per0.2phr                 | 8.00±1.28  | 51.92±5.67 | 1060.7±54.54   | 202.44±30.84 |

ตารางภาคผนวก ก- 2 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์เบสระหว่าง PLA กับ ABS powder, Biomax, EPDM, SEBS, PBAT, PEBAX, EVA และ EAE

| ตัวอย่าง                   | MFI (g/10 min) | Final torque ((Nm) |
|----------------------------|----------------|--------------------|
| Neat PLA                   | 4.7±0.5        | 14.77              |
| PLA/ABS 5 phr              | 4.8±0.5        | 13.46              |
| PLA/ABS 10 phr             | 4.8±0.5        | 13.37              |
| PLA/ABS 15 phr             | 4.4±0.5        | 13.35              |
| PLA/ABS 20 phr             | 4.0±0.4        | 13.32              |
| PLA/ABS 10 phr+per 0.2 phr | 4.3±0.2        | 12.92              |
| PLA/Biomax 5 phr           | 5.5±0.4        | 11.24              |
| PLA/Biomax 10 phr          | 5.6±0.4        | 11.29              |
| PLA/Biomax 15 phr          | 5.6±0.4        | 11.43              |
| PLA/Biomax 20 phr          | 5.8±0.3        | 11.65              |
| PLA/Biomax 15+per 0.2 phr  | 1.1±0.04       | 16.38              |
| PLA/EPDM 5 phr             | 6.4±0.1        | 13.15              |
| PLA/EPDM 10 phr            | 5.5±0.1        | 15.34              |
| PLA/EPDM 15 phr            | 5.3±0.1        | 16.65              |
| PLA/EPDM 20 phr            | 5.0±0.1        | 17.23              |

|                                   |          |       |
|-----------------------------------|----------|-------|
| PLA/EPDM 10 phr+per 0.2 phr       | 3.8±0.03 | 17.20 |
| PLA/SEBS 5 phr                    | 6.2±0.1  | 12.52 |
| PLA/SEBS 10 phr                   | 6.7±0.1  | 12.19 |
| PLA/SEBS 15 phr                   | 7.7±0.03 | 10.5  |
| PLA/SEBS 20 phr                   | 8.2±0.1  | 9.5   |
| PLA/SEBS 5 phr+per 0.2 phr        | 2.2±0.03 | 13.5  |
| PLA90:PBAT10                      | 6.4±0.7  | 11.41 |
| PLA80:PBAT20                      | 6.9±0.5  | 15.03 |
| PLA90:PBAT10+Per0.2phr            | 4.7±0.9  | 10.46 |
| PLA80:PBAT20+Per0.2phr            | 5.4±0.8  | 10.94 |
| PLA80:PBAT20+Per0.2phr+MA0.05phr  | 4.4±0.1  | 8.67  |
| PLA90:PEBAX10                     | 7.0±0.9  | 9.51  |
| PLA80:PEBAX20                     | 9.1±0.5  | 8.40  |
| PLA90:PEBAX10+Per0.2phr           | 4.3±0.9  | 8.97  |
| PLA80:PEBAX20+Per0.2phr           | 7.2±1.0  | 7.36  |
| PLA80:PEBAX20+Per0.2phr+MA0.05phr | 4.3±0.1  | 10.32 |
| PLA90:EVA10                       | 5.5±0.1  | 11.27 |
| PLA80:EVA20                       | 10.9±0.1 | 7.34  |
| PLA90:EVA10+Per0.2phr             | 2.6±0.04 | 12.52 |
| PLA90:EAE10                       | 8.2±0.1  | 11.35 |
| PLA80:EAE20                       | 5.8±0.1  | 13.07 |
| PLA80:EAE20+Per0.2phr             | 8.6±0.2  | 8.64  |

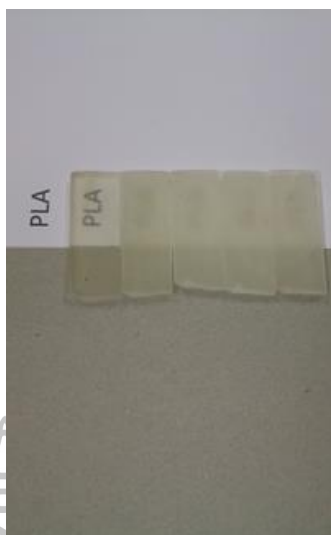




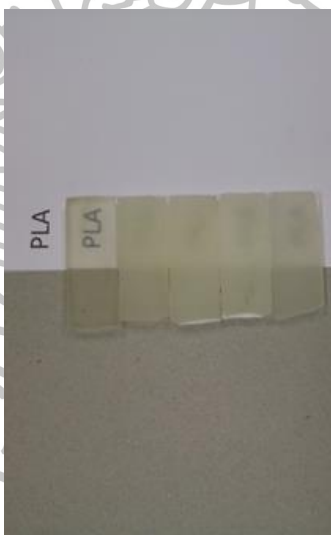
ภาพภาคผนวกที่ ก- 1แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ ABS powder ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr



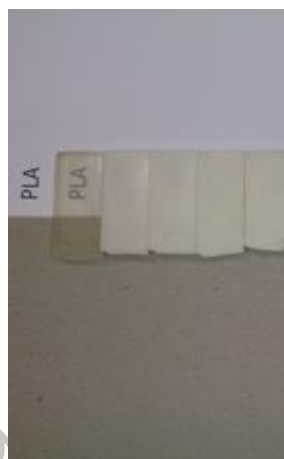
ภาพภาคผนวกที่ ก- 2 แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ Biomax ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr



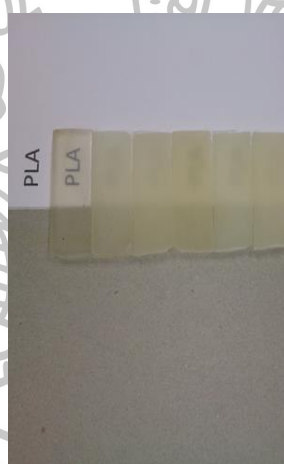
ภาพภาคผนวกที่ ก- 3 แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ EPDM ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr



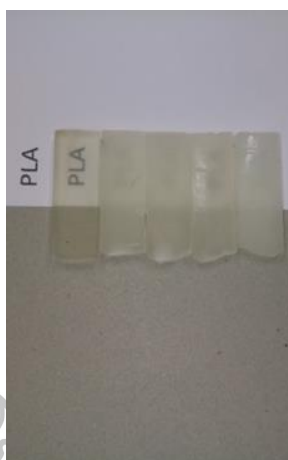
ภาพภาคผนวกที่ ก- 4 แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ SEBS ปริมาณ 5 phr, 10 phr ,15 phr และ 20 phr



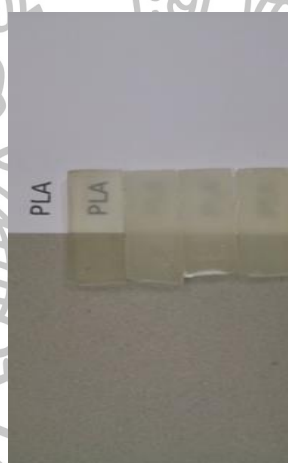
ภาพภาคผนวกที่ ก- 5 แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PBAT ในอัตราส่วน 90:10, 80:20, 90:10+perkadox0.2phr, 80:20+perkadox0.2phr และ 80:20+perkadox0.2phr +maleic anhydride0.05phr



ภาพภาคผนวกที่ ก- 6 แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/PEBAX ในอัตราส่วน 90:10, 80:20, 90:10+perkadox0.2phr, 80:20+perkadox0.2phr และ 80:20+perkadox0.2phr +maleic anhydride0.05phr



ภาพภาคผนวกที่ ก- 7 แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์blendระหว่าง PLA/EVA ในอัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 80:20+perkadox0.2phr



ภาพภาคผนวกที่ ก- 8 แสดงลักษณะทางการภาพของพอลิเมอร์blendระหว่าง PLA/EAE ในอัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 80:20+perkadox0.2phr



ข-1 การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการรับแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod test)

$$I = E/A$$

เมื่อ I คือค่า Impac strength E คือพลังงานที่ใช้เพื่อทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักหน่วย kJ และ A คือพื้นที่ผิวของชิ้นงานหน่วย  $m^2$

ตัวอย่างการคำนวณ

พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/EAE (80:20) มีความกว้างเฉลี่ย 11.24 mm หนาเฉลี่ย 2.96 mm

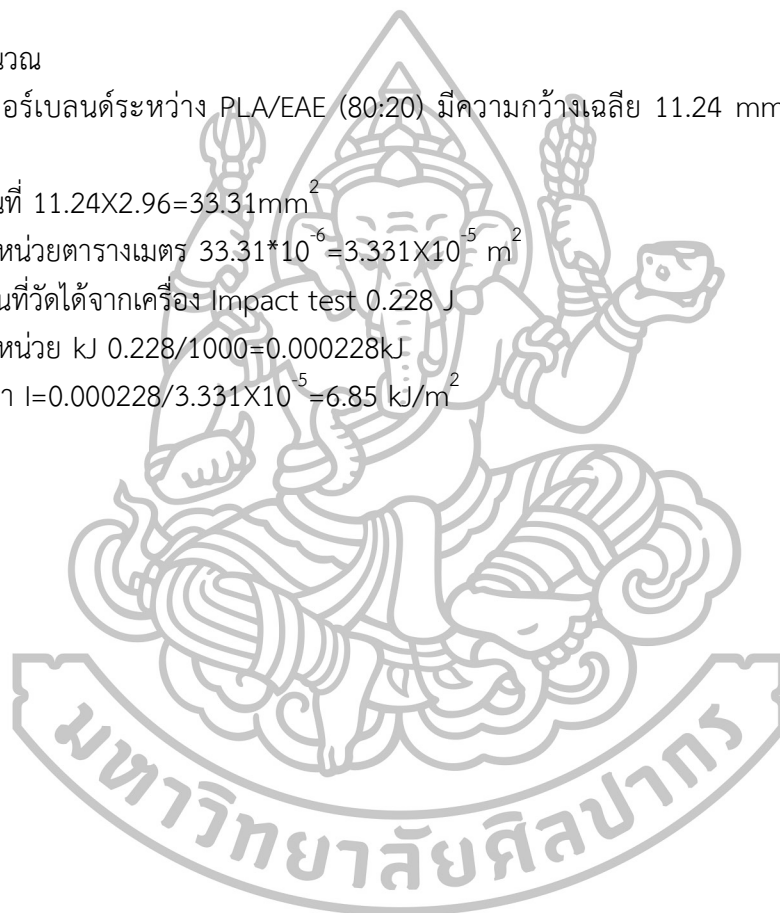
จะมีพื้นที่  $11.24 \times 2.96 = 33.31 \text{ mm}^2$

ทำเป็นหน่วยตารางเมตร  $33.31 \times 10^{-6} = 3.331 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

พลังงานที่วัดได้จากเครื่อง Impact test 0.228 J

ทำเป็นหน่วย kJ  $0.228/1000 = 0.000228 \text{ kJ}$

ดังนั้นค่า  $I = 0.000228 / 3.331 \times 10^{-5} = 6.85 \text{ kJ/m}^2$





Impact property enhancement of poly (lactic acid) with different flexible copolymers

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

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

Download details:

IP Address: 202.44.135.34

This content was downloaded on 23/07/2015 at 07:51

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



## Impact property enhancement of poly (lactic acid) with different flexible copolymers

N Likittanaprasong<sup>1</sup>, M Seadan<sup>2</sup> and S Suttiruengwong<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand

<sup>2</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand

E-mail: suttiruengwong\_s@su.ac.th

**Abstract.** The objective of this work was to improve the impact property of Poly (lactic acid) (PLA) by blending with different copolymers. Six flexible copolymers, namely, acrylonitrile butadiene styrene (ABS) powder, Biomax, polybutyrate adipate co-terephthalate (PBAT), polyether block amide (PEBAX), ethylene-vinyl acetate (EVA) and ethylene acrylic elastomer (EAE), with loading less than 20wt% were used and compared. The rheological, mechanical and morphological properties of samples were investigated by melt flow index, tensile testing, impact testing and scanning electron microscope (SEM), respectively. It was found that PLA added 20wt% EAE showed the highest impact strength (59.5 kJ/m<sup>2</sup>), which was 22 times higher than neat PLA. The elongation at break was also increased by 12 folds compared to neat PLA. The SEM images showed good interface and distribution for PLA containing 20wt% EAE, 15 phr Biomax and 20 wt% PEBAX.

### 1. Introduction

Poly (lactic acid) (PLA) has emerged as a promising choice for replacing the existing commodity and industrial products. In terms of downstream manufacture of PLA products, the cost of PLA has dropped against the increasing demands. Therefore, many PLA-based products such as film wrap, glass, plate, spoon and fork have readily been marketed. The important features of PLA include high mechanical properties, compostability, transparency, while some weaknesses also exist such as low heat resistance, brittleness due to slow crystallization [1, 2]. To date, many types of polymers regardless of being biodegradable or not, have been reported for increasing impact properties of PLA [3]. The impact improvement was possible through first; the addition of copolymers such as OnCap™ BIO [4], random aliphatic copolyesters [4], ethylene/n-butyl acrylate/glycidyl methacrylate (EBA-GMA) terpolymer with zinc ion-containing ionomer [5], poly (butylene succinate) (PBS) [6], poly(-R-3-hydroxybutyrate) [7], polyurethane elastomer (PU) [8], poly (ethylene glycol) (PEG) [9] , and second; using *in situ* co-polymerization (e.g.,  $\epsilon$ -caprolactone and L-lactide ( $\epsilon$ -CL/L-LA) [10], poly ( $\beta$ -

<sup>3</sup> Address for correspondence: S Suttiruengwong, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand. E-mail: suttiruengwong\_s@su.ac.th.



hydroxybutyrate-co- $\beta$ -hydroxyvalerate) [11], ethylene-co-vinyl acetate [12], P[CL-co-LA] random copolyesters [13].

Sin L T et al. [14], used Poly(lactic acid) with Blendex 338 or Ultra High Rubber ABS as an impact modifier. They reported that PLA blended with Blendex 338 (at the amount of 20 wt%) showed the notched impact strength increased from 26.7 J/m to 518 J/m and the elongation at break increased from 10 % to 218 %. Krishnaswamy R et al. [15] demonstrated that blending Biomax strong 120 (other types of ethylene copolymer) at the amount of 10 wt% into PLA could improve the impact strength in a similar fashion. The impact strength increased from 0.2 t.lb/inch to 5.0 t.lb/inch. Afrifah K A et al. [16] used ethylene/acrylate copolymer as an impact modifier for blending with PLA and they found that the blends showed a decrease in tensile strength and modulus with the increasing impact modifier contents. In contrast, the ductility, elongation at break, and energy to break increased significantly. Although a lot of literatures have been reported the use of the above mentioned polymers for impact modifiers, there has not yet been attempt to systematically compare their performance in terms of mechanical properties. Therefore, in this research, six flexible copolymers; namely ABS powder (core shell (rubber core/ABS shell)), ethylene copolymer (Biomax), polybutyrate adipate co-terephthalate (PBAT), Polyether block amide (PEBAX), ethylene-vinyl acetate (EVA) and ethylene acrylic elastomer (EAE) were selected to melt-blending with PLA in order to study the effect of their types and compositions on impact properties together with tensile properties and physical appearance. The performance of toughened PLA was discussed and compared.

## 2. Experimental

### 2.1. Materials

PLA 2003D was purchased from NatureWorks LLC (USA). ABS Powder (rubber core/ABS shell, AP6200) was kindly supplied by IRPC, (Thailand). Biomax (Ethylene copolymer) and Ethylene Acrylic Elastomer (EAE, Vamac®) were kindly provided by Chemical Innovation Company Limited (Thailand). Ecoflex® (PBAT) was purchased from BASF (Germany). Polyamide elastomer; PEBAX was purchased from Arkema (France). Ethylene vinyl acetate (Escorene™ Ultra EVA copolymer, EVA) was purchased from Exxonmobil Chemical (USA).

### 2.2. Sample preparation

PLA resin was first dried at 60°C for 12 hr. Copolymers were then weighted according to table 1 and dried mixed before transferring to an internal mixer, Model MX 105-D40L50, Chareon tut CO. LTD., Thailand. Melt blending was performed at the temperature of 190°C and the rotor speed of 60 rpm.

**Table 1.** PLA formulations and blend compositions.

| Sample formulation    | PLA<br>(g) | ABS<br>powder (g) | Biomax<br>(g) | PBAT<br>(g) | PEBAX<br>(g) | EVA<br>(g) | EAE<br>(g) |
|-----------------------|------------|-------------------|---------------|-------------|--------------|------------|------------|
| neat PLA              | 100        |                   |               |             |              |            |            |
| PLA/ABS powder 10 phr | 100        | 10                |               |             |              |            |            |
| PLA/ABS powder 15 phr | 100        | 15                |               |             |              |            |            |
| PLA/Biomax 10 phr     | 100        |                   | 10            |             |              |            |            |
| PLA/Biomax 15 phr     | 100        |                   | 15            |             |              |            |            |
| PLA90/PBAT10          | 90         |                   |               | 10          |              |            |            |
| PLA80/PBAT20          | 80         |                   |               | 20          |              |            |            |
| PLA90/PEBAX10         | 90         |                   |               |             | 10           |            |            |
| PLA80/PEBAX20         | 80         |                   |               |             | 20           |            |            |
| PLA90/EVA10           | 90         |                   |               |             |              | 10         |            |
| PLA80/EVA20           | 80         |                   |               |             |              | 20         |            |
| PLA90/EAE10           | 90         |                   |               |             |              |            | 10         |
| PLA80/EAE20           | 80         |                   |               |             |              |            | 20         |

The mixing time was 10 min. The test specimens were prepared using a compression molding machine (Chareon tut CO. LTD., Thailand). Compression molding was carried out at 190°C for 6 min to obtain micro tensile and impact specimen.

### 2.3. Mechanical properties testing

Tensile and impact tests were carried out according to ASTM D 638 and ASTM D256, respectively. Ten specimens were used for each sample. Tensile testing was measured using a Universal Testing Machine (Instron, Model 5969, Instron Engineering Corporation, USA). Testing speed was 10 mm/min. Impact testing was measured using a Zwick model Pendulum impact tester B5102.202.

### 2.4. Morphology

The morphology of the PLA/copolymers specimens was observed using SEM (CamScan, MX 2000, UK). The fracture surfaces of impact testing were coated with gold before SEM examinations.

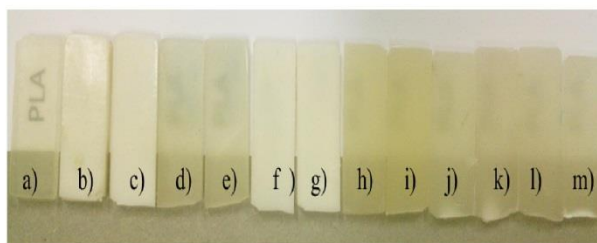
## 3. Results and discussion

### 3.1. Torque and melt flow index (MFI)

From table 2, it was found that with the addition of all copolymer showed a decrease in the final torque values compared with neat PLA. PLA containing 20 wt% EVA showed the lowest final torque value at 7.34 Nm, which half of the value of neat PLA. These results were confirmed by the MFI results, and the highest MFI value was observed for the addition of 20 wt% EVA in PLA.

**Table 2.** Rheological properties of PLA and its blends containing different copolymers.

| Sample                | Final torque (Nm) | MFI 190°C (g/10min) |
|-----------------------|-------------------|---------------------|
| neat PLA              | 14.77             | 4.7±0.5             |
| PLA/ABS powder 10 phr | 13.37             | 4.8±0.5             |
| PLA/ABS powder 15 phr | 13.35             | 4.8±0.5             |
| PLA/Biomax 10 phr     | 11.29             | 5.5±0.4             |
| PLA/Biomax 15 phr     | 11.43             | 5.6±0.4             |
| PLA90/PBAT10          | 11.41             | 6.4±0.7             |
| PLA80/PBAT20          | 15.03             | 6.9±0.5             |
| PLA90/PEBAX10         | 9.51              | 7.0±0.9             |
| PLA80/PEBAX20         | 8.40              | 9.1±0.5             |
| PLA90/EVA10           | 11.27             | 5.5±0.1             |
| PLA80/EVA20           | 7.34              | 10.9±0.1            |
| PLA90/EAE10           | 11.35             | 8.2±0.1             |
| PLA80/EAE20           | 13.07             | 5.8±0.1             |



**Figure 1.** Physical appearance of a) neat PLA, b) PLA/ABS powder 10 phr, c) PLA/ABS powder 15 phr, d) PLA/Biomax 10 phr, e) PLA/Biomax 15 phr, f) PLA90/PBAT10, g) PLA80/PBAT20, h) PLA90/PEBAX10, i) PLA80/PEBAX20, j) PLA90/EVA10, k) PLA80/EVA20, l) PLA90/EAE10, m) PLA80/EAE20.

### 3.2. Physical appearance of blends

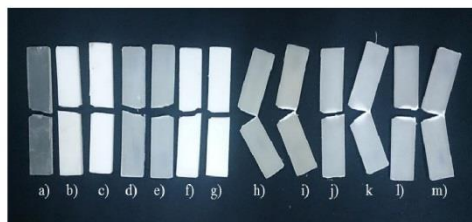
Figure 1 showed the physical appearance of polymer blended with copolymers. All added copolymer samples lost their optical property. When ABS powder and PBAT were added into PLA, the specimens became less clear. Samples b) and c) (PLA/ABS powder 10 and 15 phr) were whitened and opaque as well as sample f) and g) (PLA90/PBAT10 and PLA80/PBAT20). In case of samples d) and e) (PLA/Biomax 10 and 15 phr), they were clearer than sample h) and i) (PLA90/PEBAX10 and PLA80/PEBAX20, samples j) and k) (PLA90/EVA10 and PLA80/EVA20), and sample l) and m) (PLA90/EAE10 and PLA80/EAE20).

**Table 3.** Impact properties of PLA and the blends containing different copolymers.

| Sample                | Izod impact strength (IS) (kJ/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|--|
| neat PLA              | 2.7±0.3  |
| PLA/ABS powder 10 phr | 8.6±0.7  |
| PLA/ABS powder 15 phr | 8.5±1.2  |
| PLA/Biomax 10 phr     | 26.2±3.7                                       |
| PLA/Biomax 15 phr     | 38.6±2.3                                       |
| PLA90/PBAT10          | 5.6±0.8  |
| PLA80/PBAT20          | 9.4±0.6  |
| PLA90/PEBAX10         | 9.0±0.8  |
| PLA80/PEBAX20         | 35.1±7.5                                       |
| PLA90/EVA10           | 14.7±2.8                                       |
| PLA80/EVA20           | 11.6±2.5                                       |
| PLA90/EAE10           | 13.0±1.8                                       |
| PLA80/EAE20           | 59.5±2.1                                       |

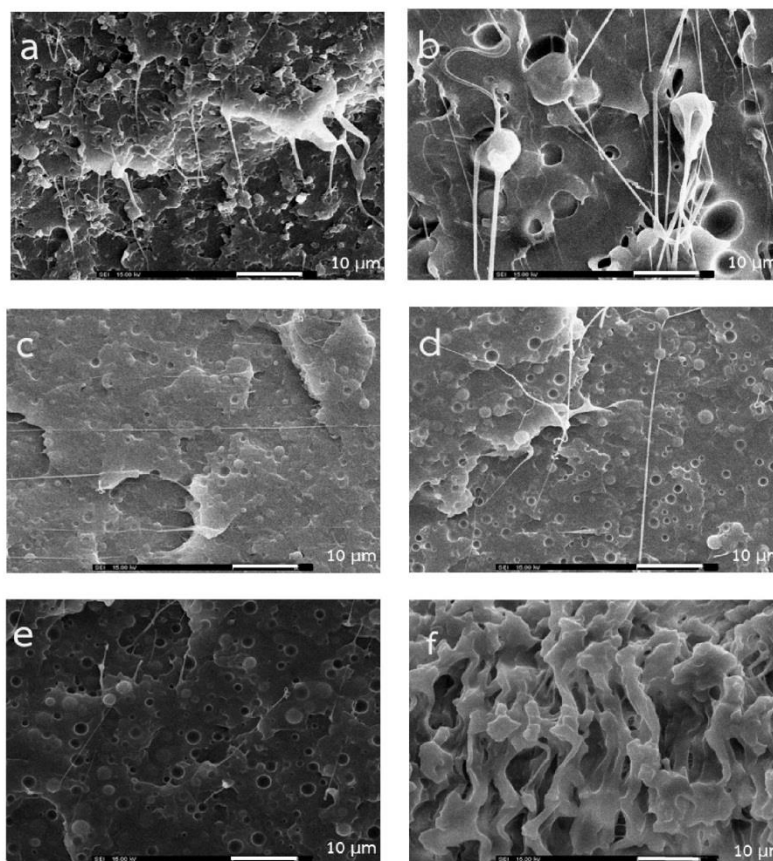
### 3.3. Impact properties and SEM of specimens

The izod impact strengths of neat PLA and its blends with copolymer were shown in table 3. With the addition of ABS powder (10 and 15 phr), it showed a slight increase in the impact strengths about 8.6 kJ/m<sup>2</sup> (3 times) compared with neat PLA. When adding Biomax 10 and 15 phr, the impact strengths of 26.2 and 38.6 kJ/m<sup>2</sup>, respectively, which were higher than those of neat PLA by 9.7 and 14.3 times, respectively. With the incorporation of 10 phr of PBAT or PEBEX, the impact strengths were also 2 and 3 times higher than those of neat PLA, respectively. When increasing the amount of PBAT or PEBAX to 20 phr, the impact strengths were 4 and 13 times higher than neat PLA, respectively. In the case of the addition of EVA (10 to 20 wt%), in the blend, a decrease in impact strengths value was found, which is only 5 and 4 times compared with that of neat PLA, respectively. Surprisingly, when 20 wt% EAE was added, it showed the highest impact strength (59.5 kJ/m<sup>2</sup>), which was higher than



**Figure 2.** Photographs of notched Izod impact tested samples showing fracture modes. a) neat PLA, b) PLA/ABS powder 10 phr, c) PLA/ABS powder 15 phr, d) PLA/Biomax 10 phr, e) PLA/Biomax 15 phr, f) PLA90/PBAT10, g) PLA80/PBAT20, h) PLA90/PEBAX10, i) PLA80/PEBAX20, j) PLA90/EVA10, k) PLA80/EVA20, l) PLA90/EAE10, m) PLA80/EAE20.

that of neat PLA by 20 folds. The addition of elastomer EAE showed the dramatic improvement of impact toughness to PLA matrix, hence allowing energy dissipation mechanisms into PLA and retarding crack initiation and propagation.



**Figure 3.** SEM images of fractured surface of impact specimen a) PLA/ABS powder 10 phr, b) PLA/Biomax 10 phr, c) PLA90/PBAT10, d) PLA90/PEBAX10, e) PLA90/EVA10, f) PLA90/EAE10.

From figure 2, it was demonstrated that complete breakage could be obtained with samples a), b), c), d), e), f), g), j) and l), whereas the partial breakage of specimens was found in samples h), i), k) and m). Stress whitening near the notched tip was observed due to crazing or micro cracks, and it showed that the matrix could bear most of the stress [17]. It is common that the continuous transfer of energy is an important factor for impact resistance. In adding dispersed phases into the polymer matrix, the good distribution of the dispersed phase, smaller particle sizes and good interfacial adhesion are key factors to determining the optimum performance of materials. Fractured surface of impact specimens corresponding to the same concentration of copolymers are shown in figures 3a)-3f). At the same amounts of copolymer (10 wt%), the SEM image of PLA added 10 phr ABS powder samples showed good dispersion of ABS powder throughout PLA matrix. In addition, separated particles of ABS powder phase could still be observed. The dispersion phases did not retain the spherical shapes, but partially adhered to PLA matrix. This might provide the positive impact property as seen in figure 3(a).

In figure 3(b), the particle phases in the matrix could retain the spherical shapes, copolymers particle elongation and had good interphase between modifier and the matrix. In figure 3(c), impact modifier particle sizes were regularly dispersed in PLA matrix. The particle sizes of dispersed phase were 3  $\mu\text{m}$ . In this case, it showed the partial interfacial adhesion between PLA and PBAT matrix. In the case of PLA added PEBAX (in figure 3(d)), it was found that the adhesion between PEBAX and PLA was prominent and the distribution of tiny particle sizes in the matrix could be seen as the same as that in the case of Biomax. In figure 3(e), the addition of EVA demonstrated the superior distribution of particles in the matrix, but the particles of EVA were not-adhered to PLA matrix. In addition, dispersed phase particles were not spherical and do not change shape when applied force. In figure 3(f), broken fibrils from polymer blend between PLA with 10 wt% of EAE could still be observed. Particles of EAE were well dispersed in PLA matrix. There were many fibrils on fractured surface of the specimen. This indicated the toughening mechanism of polymer matrix. When force was applied to the samples by impact testing, EAE would adsorb force and the extension of particle took place. These results were attributed to the higher elongation at break which will be discussed later.

#### 3.4. Tensile properties

The modulus, tensile strength and elongation at break were displayed in table 4. For all added copolymers, the increase in their contents led to the decrease in the modulus and tensile strengths, because copolymer was flexible than PLA. The decreased tensile strength probably resulted from the presence copolymers inserted in PLA matrix [18, 19]. The increase in elongation at break probably resulted from the samples were more ductile. For the addition of 20 wt% of PBAT, PEBAX and EVA, the elongation at break increased to over 35% (from 8.7% of neat PLA), whereas the tensile strength decreased by 30% when compared to neat PLA. PLA added 20 wt% PBAT showed the highest elongation at break value. It also appeared necking phenomenon which demonstrated the ductile behaviour of the polymer blends.

**Table 4.** Tensile properties of PLA and the blend.

| Sample                | Modulus [MPa]      | Tensile Strength [MPa] | Elongation at break [%] |
|-----------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| neat PLA              | 1619.2 $\pm$ 115.1 | 91.6 $\pm$ 8.3         | 8.7 $\pm$ 1.4           |
| PLA/ABS powder 10 phr | 1517.8 $\pm$ 59.2  | 76.0 $\pm$ 2.8         | 39.4 $\pm$ 10.5         |
| PLA/ABS powder 15 phr | 1231.8 $\pm$ 11.2  | 57.0 $\pm$ 4.3         | 41.1 $\pm$ 7.6          |
| PLA/Biomax 10 phr     | 1247.8 $\pm$ 67.6  | 63.0 $\pm$ 3.2         | 19.6 $\pm$ 3.4          |
| PLA/Biomax 15 phr     | 1179.6 $\pm$ 48.3  | 57.5 $\pm$ 3.2         | 44.1 $\pm$ 23.6         |
| PLA90/PBAT10          | 1287.1 $\pm$ 70.5  | 85.4 $\pm$ 2.2         | 96.7 $\pm$ 40.6         |
| PLA80/PBAT20          | 1117.3 $\pm$ 96.5  | 65.2 $\pm$ 4.9         | 185.9 $\pm$ 34.0        |
| PLA90/PEBAX10         | 1294.4 $\pm$ 46.9  | 83.1 $\pm$ 6.3         | 52.1 $\pm$ 22.0         |
| PLA80/PEBAX20         | 1042.8 $\pm$ 49.5  | 66.0 $\pm$ 2.4         | 110.1 $\pm$ 10.1        |
| PLA90/EVA10           | 1082.1 $\pm$ 51.2  | 52.6 $\pm$ 3.7         | 33.5 $\pm$ 7.1          |
| PLA80/EVA20           | 934.5 $\pm$ 53.3   | 39.7 $\pm$ 1.7         | 96.5 $\pm$ 32.4         |
| PLA90/EAE10           | 1293.3 $\pm$ 134.1 | 74.8 $\pm$ 5.6         | 32.4 $\pm$ 3.5          |
| PLA80/EAE20           | 1030.8 $\pm$ 105.6 | 57.8 $\pm$ 2.9         | 104.1 $\pm$ 53.2        |

#### 4. Conclusion

This work aimed to study and compare the effect of six flexible copolymers on the impact property. The impact results show that the impact strength is significantly improved in all PLA added copolymer samples when compared to neat PLA. Especially, PLA with the addition of 20 wt% EAE, shows superior performance on impact strength improvement which its impact strength was 22 times higher than neat PLA and this is confirmed by SEM images of fractured surfaces from impact testing, which show good interface and distribution between PLA matrix and copolymer for PLA containing 20 wt% EAE, 15 phr Biomax and 20 wt% PEBAX. In addition, the elongation at break of all samples

was greatly increased compared to neat PLA. Therefore, in summary, it indicates that the addition of 20 wt% EAE is the most effective thermoplastic elastomer for improving impact resistance of PLA.

#### Acknowledgments

The authors would like to gratefully thank National Research Council Thailand (NRCT) and this work was supported by a grant from Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, and Silpakorn University, Thailand for financial supports, IRPC public company limited for impact modifier (ABS powder), Chemical Innovation Company Limited for impact modifier (Biomax and EAE).

#### References

- [1] Rasal R M, Janorkar A V and Hirt D E 2010 *Progr Polymer Sci* **35** 338-56
- [2] Matuana L M, Faruk O and Diaz C A 2009 *Biosci. Rep.* **100** 5947-54
- [3] Jamshidian M, Tehrani E A, Imran M, Jacquot M and Desobry S 2010 *Compr. Rev. Food. Sci. F.* **9** 552-571
- [4] Odent J, et al. 2012 *Eur Polymer J* **48** 331-40
- [5] Song W, et al. 2012 *Polymer* **53** 2476-84
- [6] Jompang L, et al. 2013 *Energy Procedia* **34** 493-9
- [7] Yoon J-S, et al. 2000 *Eur Polymer J* **36** 435-42
- [8] Imre B, et al. 2013 *Eur Polymer J* **49** 3104-13
- [9] Choi K-M, et al. 2013 *Eur Polymer J* **49** 2356-64
- [10] Hiljanen-Vainio M, Karjalainen T and Seppälä J 1996 *J Appl Polymer Sci* **59** 1281-8
- [11] Ma P, et al. 2013 *Eur Polymer J* **49** 1523-31
- [12] Ma P, et al. 2012 *Eur Polymer J* **48** 146-54
- [13] Odent J, et al. 2013 *Eur Polymer J* **49** 914-22
- [14] Lee Tin Sin A R R and Rahman W A W A 2012 *Handbook on the Google Book* p 210
- [15] Available at: [http://www.metabolix.com/sites/default/files/PHA\\_PLA-Slideshow.pdf](http://www.metabolix.com/sites/default/files/PHA_PLA-Slideshow.pdf)
- [16] Afrifah K A and Matuana L M 2010 *Macromol Mater Eng* **295** 802-11
- [17] Liang J Z and Li R K Y 2000 *J Appl Polymer Sci* **77** 409-17
- [18] Mengeloglu F, Matuana L M and King J A 2000 *J Vinyl Addit Techn* **6** 153-7
- [19] Park D, et al. 2011 *Macromol Res* **19** 105-12



ภาคผนวก ง  
การพัฒนาตนเอง



แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา  
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ประจำภาคการศึกษา.....1.....ปีการศึกษา..2556.....

ชื่อ นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว) ชพคุณ วิจิตร นพวิจิตร รหัสประจำตัวนักศึกษา ร.๕๑๒๒11  
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่.....1..... สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

| รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ   |  |
|--|--|
| การประชุมวิชาการ   | <u>21st National Exhibition 2556</u>   |
| ระดับ <input checked="" type="checkbox"/> ชาติ <input type="checkbox"/> นานาชาติ | สถานที่ <u>โรงแรม เซ็นทรัลพลาซ่า และ อาคารคอนเวนชันเซ็นเตอร์</u>                   |
| วันที่   | <u>25 สิงหาคม 2556</u>   |
| หัวข้อการบรรยาย  | <u>การสังเคราะห์ และ การผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ การทาสี และ การเคลือบ</u>             |
| โดย  | <u>ผศ. ชพคุณ วิจิตร นพวิจิตร</u>   |
| ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้)                   | <u>การเคลือบโพลีเมอร์ และการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และการผลิต เซลล์แสงอาทิตย์</u>     |
| วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก                              | <u>ชช. ชพคุณ วิจิตร นพวิจิตร</u>   |
| หน่วยงาน   | <u>ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรม</u>  |
| ติดต่อ   | <u>chun@bii.su.ac.th</u>   |
| ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก   |  |
| 1)   | <u>ผศ. ดร. ชพคุณ วิจิตร นพวิจิตร</u>   |
| หน่วยงาน   | <u>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า (จ.ฉะเชิงเทรา) (จัดศูนย์พัฒนาคัดกรอง ณ โรงเรียน)</u> |
| ติดต่อ   | <u>0894555205</u>  |
| 2)   | <u>ดร. ร.ร. (ชื่อไม่ชัด)</u>   |
| หน่วยงาน   | <u>อ. วิชาเคมีอินทรีย์</u>   |
| ติดต่อ   | <u>chunee.t@psu.ac.th</u>  |





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

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

## คุณ นพคุณ ลิขิตชนประสงค์

โปรแกรมการประชุมที่ท่านลงทะเบียนไว้ มีดังนี้ ↓

| วันที่          | รอบเช้า (9.00-12.00 น.)   | รอบบ่าย (13.30-16.30 น.) | Twilight Program (18.00-20.00 น.) |
|-----------------|---|--------------------------|-----------------------------------|
| 23 สิงหาคม 2556 |   |                          |                                   |
| 24 สิงหาคม 2556 |   |                          |                                   |
| 25 สิงหาคม 2556 | (34) การแลกเปลี่ยนการวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์<br>การยกระดับของภาคอุตสาหกรรม |                          |                                   |
| 26 สิงหาคม 2556 |   |                          |                                   |
| 27 สิงหาคม 2556 |   |                          |                                   |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>ภาคเช้า</b><br>ลงทะเบียน / รับเอกสาร 7.30-9.00 น. | <b>ภาคบ่าย</b><br>ลงทะเบียน / รับเอกสาร 12.30-13.30 น. | <b>Twilight Program</b><br>ลงทะเบียน / รับเอกสาร 17.00-18.00 น. |
|--|--|---|

- **การเข้าร่วมประชุม** - มาเข้าร่วมงานวันแรก แสดงบัตรเข้าร่วมประชุมที่จุดรับเอกสารส่วนกลาง ชั้น 22 เพื่อรับเอกสารส่วนกลาง  
↓  
แสดงบัตร ณ ห้องประชุมที่ลงทะเบียนไว้
- มาเข้าร่วมงานวันถัดไป แสดงบัตรเข้าร่วมประชุม ณ ห้องประชุมที่ลงทะเบียนไว้ทุกครั้งที่เข้าร่วมการประชุม
- **ดูสื่อประชุมของและลงทะเบียนได้ที่ Seminar Board** บริเวณหน้างาน ทิวทัศน์ [www.researchexpo.nrct.go.th](http://www.researchexpo.nrct.go.th) ส่วนด้านหน้าอาคารเข้าร่วมประชุม
- **การเข้าร่วมประชุมและปิดรับการลงทะเบียน** ไปยังห้องลงทะเบียนโดยอัตโนมัติ โดยท่านจะได้รับเอกสารประกอบการประชุมและอื่นๆ (ถ้ามี) พร้อมอาหารว่าง ณ จุดลงทะเบียนหน้าห้องประชุม
- **ท่านที่ร่วมส่วนตัว** โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ มีบริการรถโดยสารฟรี จำนวน 3 ชั่วโมง  
ภายใต้ความร่วมมือกับเจ้าใช้ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและท่าอากาศยานนานาชาติ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์

### การไม่มีบัตรและรอสิทธิ์การประชุม

- ท่านไม่มีบัตรในการเข้าร่วมประชุมโดยที่ลงทะเบียนไว้ กรุณาแจ้งเจ้าหน้าที่ ณ จุดลงทะเบียนในวันแรกก่อนเวลา 9.00 น./13.30 น./18.00 น.) ณ จุดลงทะเบียนการประชุม ณ ชั้น 22 โดยท่านจะได้รับบัตรเข้าร่วมประชุมโดยอัตโนมัติ
- ท่านต้องลงทะเบียนในวันแรกที่ขึ้นรถโดยสารและต้องรอสิทธิ์ สามารถดำเนินการได้ในการเข้าร่วมประชุมได้ที่จุดลงทะเบียน ณ บริเวณจุดลงทะเบียนส่วนกลาง (ในกรณีผู้ลงทะเบียน)

**เมื่อในการใช้บัตร**

- ท่านนำบัตรเข้าร่วมประชุมที่สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ส่วนสำนักงาน และส่งบัตรไปยังจุดลงทะเบียน และปิดรับการลงทะเบียน
- การลงทะเบียนที่สำนักงานในวันก่อนหน้าหรือ ณ จุดลงทะเบียนโดยอัตโนมัติ ณ บริเวณจุดลงทะเบียนส่วนกลาง หรือสำนักงานได้จนครบแล้ว ระบบคอมพิวเตอร์จะบันทึกข้อมูลการเข้าร่วมประชุมของท่านโดยอัตโนมัติ
- บัตรสามารถเป็นกรณีรอสิทธิ์ในการเข้าร่วมการประชุม และจะถูกใช้โดยอัตโนมัติโดยระบบอัตโนมัติ
- บัตรเป็นกรณีรอสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รอจนครบแล้วในการลงทะเบียน โดยอัตโนมัติโดยระบบอัตโนมัติ
- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) จะไม่ออกบัตรใหม่ในวันถัดไป

### บัตรเข้าร่วมงาน



**Thailand Research Expo 2013**  
NRCTSSU งานวิจัยแห่งชาติ 2556

คุณ นพคุณ ลิขิตชนประสงค์



1102800001655

บัตรเข้าชมงาน/บัตร เข้าร่วมงาน - ให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการเข้าร่วมงานวิจัยแห่งชาติ  
บัตรเข้าชมงานเข้าร่วมการประชุมและรับเอกสารประกอบการประชุม

บัตรเข้าชมงาน/บัตร เข้าร่วมงาน - ให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการเข้าร่วมงานวิจัยแห่งชาติ  
บัตรเข้าชมงานเข้าร่วมการประชุมและรับเอกสารประกอบการประชุม

แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา  
 ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร  
 ประจำภาคการศึกษา... ๖๖..... ปีการศึกษา... ๒๕๕๘.....

ชื่อ-นามสกุล (นาย/นาง/นางสาว) นางสาว สัจฉรินทร์ ประจวบ รหัสประจำตัวนักศึกษา 56402211  
 กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

|  |   |
|--|---|
| รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ<br>การประชุมวิชาการ <u>THAILAND RESEARCH EXPO 2015</u>  |   |
| ระดับ <input type="checkbox"/> ชาติ <input checked="" type="checkbox"/> นานาชาติ   | สถานที่ <u>โรงแรม (โรงแรม) นครินทร์ เซ็นทรัล ภูเก็ต</u> |
| วันที่ <u>16-20 สิงหาคม ๒๕๕๘</u>   |   |
| หัวข้อการบรรยาย <u>ความเชื่อมโยงความรู้กับนโยบายโลกแห่งความรู้ Knowledge Policy Interface in Virtual World</u><br>โดย <u>Dr. Sawitri Suwanasathit</u><br>ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้) <u>ทำให้ได้ทบทวนถึงขั้นตอนในการพัฒนาความรู้<br/>                 ไปยังขอบเขตของสังคม ได้แก่ Knowledge Policy Interface โดยอาศัยประสบการณ์ของ<br/>                 UNICEF - MINT และ มหาวิทยาลัย) โดยอาศัยการเชื่อมโยงความรู้กับนโยบาย วิทยาศาสตร์<br/>                 วิทยาศาสตร์ และสังคม การวิจัย - นโยบายสาธารณะ ภาครัฐ ภาครัฐ และวิศวกรรม (เฉพาะ)<br/>                 วิศวกรรม</u> |   |
| วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก<br><u>Dr. Sawitri Suwanasathit</u><br>หน่วยงาน <u>Advisor to Ministry of Culture Thailand</u><br>ติดต่อ <u>๐๖-๒๕๒๒๑๖๖</u>  |   |
| ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก<br>1) <u>ดร. บรรจง สักดิ์ พิเศษทอง</u><br>หน่วยงาน <u>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี</u><br>ติดต่อ <u>Kingtothong@kmutt.ac.th</u><br>2) <u>นาง. ศิวาเดช พนมพิทักษ์</u><br><u>นาง. วุฒิพร ธรรม</u><br><u>นาง. ประจวบ ธรรมทอง</u><br>หน่วยงาน <u>วิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี</u><br>ติดต่อ <u>๐๘๖๔ ๒๕๙๑ @ 9.10.1.02๖๖ ๐๖๖ ๒๖๖๖๖๖</u>  |   |





แบบรายงานการเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ / นานาชาติ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา  
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ประจำภาคการศึกษา.....?.....ปีการศึกษา 2557.....

ชื่อ-นามสกุล (ชื่อ/นาง/นางสาว) นายคุณ สิโรจน์ประเสริฐ รหัสประจำตัวนักศึกษา 51402211  
กำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทบัณฑิต ชั้นปีที่ 2 สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

|   |  |
|---|--|
| <p>รายละเอียดการเข้าร่วมประชุมวิชาการ<br/>การประชุมวิชาการ <u>2015 Global Conference on Polymer and Composite Materials</u><br/>ระดับ <input type="checkbox"/> ชาติ <input checked="" type="checkbox"/> นานาชาติ สถานที่ <u>ชากังวาล ประเทศไทย</u><br/>วันที่ <u>May 11-19</u></p> <p>หัวข้อการบรรยาย <u>Current and Futuristic Smart Materials for Water Remediation</u><br/>โดย <u>Prof. Ajay Kumar Mishra</u><br/>ความรู้ที่ได้รับจากการฟังบรรยาย (สามารถแนบเป็นเอกสารประกอบได้)<br/><u>งานวิจัยที่สนใจในพจนานุกรมของงานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตและวัสดุเชิงประกอบ</u><br/><u>ซึ่งมีความสำคัญในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติพิเศษ เช่น ความแข็งแรงสูง ความทนทาน</u><br/><u>และการนำวัสดุเชิงประกอบไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อากาศยาน ยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์</u><br/><u>และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น</u></p> |  |
| <p>วิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) ที่ทำความรู้จัก<br/><u>Prof. Ajay Kumar Mishra</u><br/>หน่วยงาน <u>University of South Africa, South Africa</u><br/>ติดต่อ <u>ajaykmishra1@gmail.com</u></p>   |  |
| <p>ผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ ที่ทำความรู้จัก<br/>1) <u>Seyed Ebrahim Vahdat</u><br/>หน่วยงาน <u>Department of Engineering, Ayatollah Amini Branch, Islamic Azad University</u><br/>ติดต่อ <u>e.vahdat@iaua.mel.ac.ir</u></p> <p>2) <u>Hairul Abrol</u><br/>หน่วยงาน <u>Mechanical Engineering, Andalas University, Padang, Indonesia</u><br/>ติดต่อ <u>abrol@ft.ahand.ac.id</u></p>  |  |

3) Dan Sun  
 หน่วยงาน School of Mechanical & Aerospace Engineering, Queen's University Belfast, Belfast BT9 5PX UK  
 ติดต่อ dsun@qub.ac.uk

งานวิจัยที่สนใจ  
Current and Futuristic Smart Materials for water remediation

แนวคิดในการพัฒนาต่อของงานวิจัย  
 ระยะเวลา 1 ปี งบประมาณ 1 ล้านบาท คิดภาระคน 1 คน คิดเป็นงาน 1 ปี คิดเป็น 100%  
 วัตถุประสงค์/เป้าหมาย: พัฒนา Smart Material สำหรับบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ Bio plastic ผลิตใน  
 ระยะเวลา 1 ปี งบประมาณ 1 ล้านบาท คิดภาระคน 1 คน คิดเป็นงาน 1 ปี คิดเป็น 100%  
 วัตถุประสงค์/เป้าหมาย: พัฒนา Smart Material สำหรับบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ Bio plastic ผลิตใน  
 ระยะเวลา 1 ปี งบประมาณ 1 ล้านบาท คิดภาระคน 1 คน คิดเป็นงาน 1 ปี คิดเป็น 100%

ลงชื่อ ดร.สุวิทย์  
 (.....) คณาจารย์ประจำคณะ  
 วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

ลงชื่อ ดร.สุวิทย์  
 (.....) คณาจารย์ประจำคณะ  
 อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิชาการ/อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
 วันที่ 25 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

ลงชื่อ ดร.สุวิทย์  
 (.....) คณาจารย์ประจำคณะ  
 หัวหน้าภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ  
 วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

- หมายเหตุ**
1. นักศึกษาต้องเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดย นักศึกษาต้องทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา (Speaker) คนใดคนหนึ่ง และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ จำนวน 2-3 คน (นอกภาคสาขา) เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายทางวิชาการระหว่างกันและพัฒนาทักษะการติดต่อสื่อสารภาษาอังกฤษทั้ง กับนักวิชาการและนักศึกษาที่มีการศึกษาในระดับเดียวกัน และสรุปเป็นรายงานส่งสาขาวิชา ความเกณฑ์การสำเร็จ การศึกษาตามหลักสูตร
  2. นักศึกษาแบบรูปถ่ายแสดงการทำความรู้จักวิทยากร หรือผู้แสดงปาฐกถา และผู้เข้าร่วมประชุมอื่นๆ หรือแบบเอกสาร ลงทะเบียนเข้าร่วมการประชุมด้วย





