



การพัฒนาฟิล์มคลิ้งก์จากพลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ



โดย
นายกรวิชญ์ เก้าอูตม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาฟิล์มคลึงจากพลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF CLING FILM BASED ON COMPOSTABLE PLASTICS



By

MR. Korawit KAO-UDOM

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

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2022

Copyright of Silpakorn University

| | |
|----------------------|---|
| หัวข้อ | การพัฒนาฟิล์มคลึงจากพลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ |
| โดย | นายกรวิษณุ แก้วอุดม |
| สาขาวิชา | วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน |

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

| | |
|---|--------------------------------------|
| | คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (ผู้รักษาการแทน) |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นีรัตย์) | |
| พิจารณาเห็นชอบโดย | |
| | ประธานกรรมการ |
| (รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์) | |
| | อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก |
| (รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์) | |
| | อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม |
| (รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน) | |
| | ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เข้มปะบุตร) | |
| | ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก |
| (รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยาณี สิริสิงห) | |

620920002 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

คำสำคัญ : พิล์มยืดหุ้ม, พลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ, ความยืดหยุ่น, ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, พอลิ บิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต

นาย กรวิษฐ์ เก้าอูตม: การพัฒนาฟิล์มคลิงก์จากพลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

ฟิล์มคลิงก์หรือฟิล์มยืดหุ้มที่ใช้ในการพันพลาเทในการขนส่งสินค้าส่วนใหญ่ผลิตมาจาก linear low-density polyethylene (LLDPE) หรือพอลิเอธิลีนที่เป็นชั้น ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ โดยในการขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์นั้นจะมีการผ่านกระบวนการดึงยืดฟิล์ม เพื่อให้ฟิล์มคลิงก์มี tensile strength ที่สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเอาพลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติใกล้เคียงกับ LLDPE มาใช้ทดแทน นั่นคือ Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลการเติม Biomax® strong ที่ทำหน้าที่เป็น cohesion additive และศึกษาอิทธิพลกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์ PBAT ด้วยกระบวนการดึงยืดในระบบ batch และ continuous process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ Biomax® strong ในปริมาณ 3 และ 5 phr โดยทำการผสมในเครื่อง internal mixer และขึ้นรูปฟิล์มด้วย compression molding พบว่า การเติม Biomax® strong ลงไปใน PBAT ส่งผลให้ tensile strength และ elongation at break มีค่าลดลงเล็กน้อย จึงต้องนำฟิล์มไปศึกษาต่อในขั้นตอนถัดไปเพื่อปรับปรุงค่า tensile strength ด้วยกระบวนการดึงยืดฟิล์ม โดยนำฟิล์มที่ขึ้นรูปในระบบต่อเนื่องด้วยเครื่อง cast film extruder ไปผ่านกระบวนการดึงยืดในระบบ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น พบว่าค่า tensile strength มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ elongation at break มีค่าลดลง เมื่อดึงยืดจำนวนเท่าเพิ่มขึ้น โดยจำนวนเท่าที่เหมาะสมนั้นจะอยู่ที่การดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong จะมีเพิ่มขึ้นจาก 0.58 เป็น 2.75 และเมื่อทำการดึงยืดฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น และความยืดหยุ่นของฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 เพิ่มขึ้นเมื่อดึงยืดที่จำนวนเท่าการดึงยืดเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนสุดท้ายจึงนำเอาการดึงยืด 1.5 และ 2 จากความยาวเริ่มต้น มาศึกษาต่อในกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการดึงยืดในระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม พบว่าฟิล์ม PBAT/B3 และ PBAT/B5 มีค่า tensile strength, elongation at break และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่เหมาะสมเมื่อทำการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น ดังนั้นฟิล์ม PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่ผ่านการดึงยืดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้นเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในฟิล์มคลิงก์ได้

620920002 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Cling film, Compostable plastic, Elasticity, Coefficient of friction, Polybutylene adipate-co-terephthalate

MR. KORAWIT KAO-UDOM : DEVELOPMENT OF CLING FILM BASED ON COMPOSTABLE PLASTICS THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR SUPAKIJ SUTTIRUENGWONG, Dr.-Ing.

Most of cling films for wrapping pallets used in the transportation are made from non-biodegradable plastic linear low-density polyethylene (LLDPE) or multilayered PE, which are non-biodegradable. The cling film is processed via the stretching process to increase the tensile strength of cling film. This work focuses on the alternative compostable plastic poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT to replace LLDPE cling film. Therefore, the objective of this research is to study the effect of Biomax[®] strong as cohesion adhesive on the film properties and the influence of the batch and continuous stretching process on mechanical properties of PBAT films and coefficient of friction between films surface. PBAT was mixed with Biomax[®] strong at 3 and 5 phr via internal mixer and compressed into films by compression molding. Tensile strength and elongation at break of PBAT/B3 and PBAT/B5 were slightly decreased after addition of Biomax[®] strong. After that, to improve the tensile strength, the stretching process was performed. In this step, films were prepared via cast film extruder and stretched in the batch stretching process with 1.5, 2 and 2.5 times. When stretching ratios increased, tensile strength of PBAT, PBAT/B3 and PBAT/B5 increased but the elongation at break decreased. The optimal tensile strength and elongation at break of stretched PBAT, PBAT/B3 and PBAT/B5 films were obtained at stretching with 1.5 and 2 times. The coefficient of friction of unstretched PBAT was increased from 0.58 to 2.75 when adding Biomax[®] strong and the coefficient of friction of stretched PBAT, PBAT/B3 and PBAT/B5 increased with higher stretching ratios. The elasticity of films was increased with higher stretching ratios. Finally, the stretching ratios of 1.5 and 2 times were choose to study in the continuous stretching process in the industrial scale. The results showed that after continuous stretching process, tensile strength, elongation at break and coefficient of friction of PBAT/B3 and PBAT/B5 were in the requirement ranges at stretching with 1.5 and 2 times. From all the results, we can summarize that PBAT/B3 and PBAT/B5 stretched at 1.5 and 2 times can potentially be used as cling films.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ทั้งการสนับสนุนทางด้านวัสดุอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย คำชี้แนะสำหรับการแก้ไขปัญหาและการวิเคราะห์ผลการทดสอบในงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องและแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เหมะปะบุตร และรองศาสตราจารย์ ดร.กัลยาณี สิริสิงห์ ที่ให้เกียรติและสละเวลามาเป็นประธานกรรมการภายใน และกรรมการภายนอกในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมทั้งทำการตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ พร้อมให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหา เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอนและให้ความรู้ในทุก ๆ ด้าน เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา คุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชา และบุคลากรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่คอยให้การช่วยเหลือและให้ความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัดสำหรับความอนุเคราะห์ Biomax คุณกริธา จินศรีคอง จากบริษัท ดี.เอส.เอ สยามวาลา จำกัด และคุณเอกวัฒน์ ปานมาศ จากบริษัท แอ็พพลาย ดีพี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปใช้งานเครื่องขึ้นรูปฟิล์ม และเครื่องดึงยึดฟิล์ม ให้งานวิจัยสามารถดำเนินงานต่อไปได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาโท ขอขอบคุณมิตรภาพอันดีงามที่ทุกคนคอยรับฟังปัญหา ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา รวมทั้งให้กำลังใจกันเสมอมาโดยตลอด และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณพ่อแม่และครอบครัวที่คอยสั่งสอน ให้กำลังใจ และสนับสนุนมาโดยตลอดทั้งด้านการศึกษา การดำเนินชีวิต รวมถึงเป็นกำลังใจให้สามารถก้าวผ่านอุปสรรคและแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นาย กรวิชัย เก้าอูตม

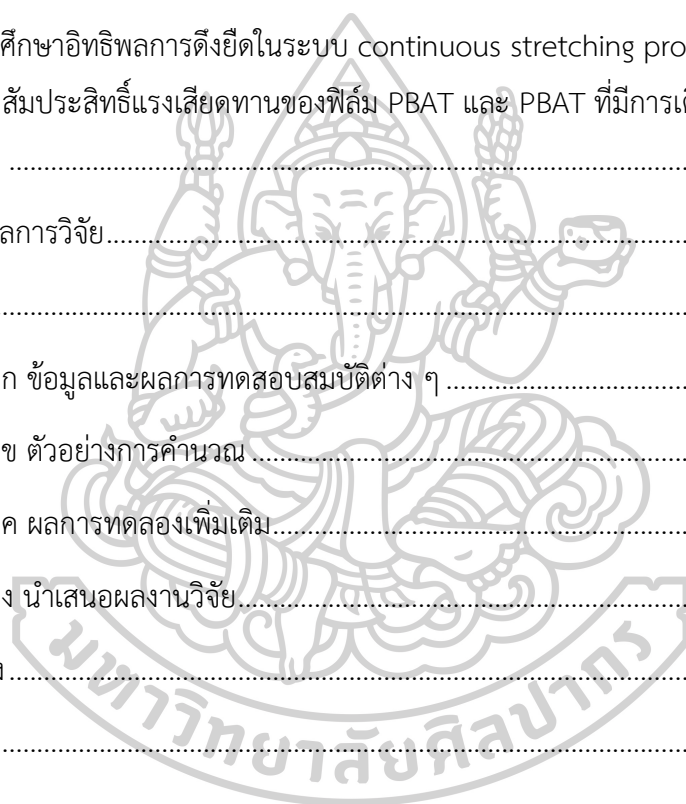
สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฉุ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT | 4 |
| 2.2 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (Polymer aditives) [10, 11]..... | 6 |
| 2.3 แรงเสียดทาน (Friction) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction, COF).... | 6 |
| 2.4 ฟิล์มยืด (Stretch film or stretch cling film)..... | 9 |
| 2.5 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มยืด [17-19]..... | 10 |
| 2.6 มาตรฐานฟิล์มยืดหุ้มสำหรับห่ออาหารและฟิล์มยืดพันพาเลท | 11 |
| 2.6.1 มาตรฐานฟิล์มยืดหุ้มสำหรับห่ออาหาร [20]..... | 11 |
| 2.6.2 มาตรฐานฟิล์มยืดพันพาเลท..... | 15 |

| | |
|--|----|
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 17 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย | 29 |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย | 29 |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย | 29 |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย | 30 |
| 3.3.1 ศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process และอิทธิพลของ Biomax® strong ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT | 30 |
| 3.3.1.1 การเตรียม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 30 |
| 3.3.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 32 |
| 3.3.2 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่อง และอิทธิพลกระบวนการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 34 |
| 3.3.2.1 การเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 34 |
| 3.3.2.2 ขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วย กระบวนการ cast film extrusion | 35 |
| 3.3.2.3 การดึงยืดฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วย กระบวนการ batch stretching process | 36 |
| 3.3.2.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ batch stretching process | 37 |
| 3.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มี การเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยืดฟิล์มด้วยระบบต่อเนื่อง ในระดับอุตสาหกรรม | 39 |
| 3.3.3.1 ขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วย กระบวนการ cast film extrusion ในระดับอุตสาหกรรม | 39 |

| | |
|---|----|
| 3.3.3.2 การดึงยืดฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ continuous stretching process | 40 |
| 3.3.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ continuous stretching process..... | 41 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง | 43 |
| 4.1 ศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process และอิทธิพลของ Biomax® strong ต่อสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT | 43 |
| 4.1.1 ศึกษาค่าแรงบิดในระหว่างการผสมและดัชนีการไหลของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 43 |
| 4.1.2 ศึกษาผลลักษณะสัณฐานวิทยาหลังการผสม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 45 |
| 4.1.3 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 46 |
| 4.2 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่อง และอิทธิพลกระบวนการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 48 |
| 4.2.1 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่องและลักษณะฟิล์มก่อนและหลังผ่านการดึงยืดในระบบ batch stretching process ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 49 |
| 4.2.1 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong..... | 52 |
| 4.2.2 ศึกษาความยืดหยุ่น และอิทธิพลการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลความยืดหยุ่นของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong..... | 54 |
| 4.2.3 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong..... | 57 |

| | |
|--|----|
| 4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยืดฟิล์มด้วยระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม | 59 |
| 4.3.1 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่มีผลสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 59 |
| 4.3.2 ศึกษาความยืดหยุ่น และอิทธิพลการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่มีผลความยืดหยุ่นของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 61 |
| 4.3.3 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่มีผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 64 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย..... | 66 |
| ภาคผนวก..... | 68 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ | 69 |
| ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ | 73 |
| ภาคผนวก ค ผลการทดลองเพิ่มเติม..... | 75 |
| ภาคผนวก ง นำเสนอผลงานวิจัย..... | 79 |
| รายการอ้างอิง..... | 89 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 93 |



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของ ecoflex® F Blend C1200 5

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของฟิล์ม ecoflex® F Blend C1200 ความหนา 50 ไมครอน ที่ได้จากการเป่าขึ้นรูป..... 5

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่า Coefficient of static friction และ Coefficient of kinetic friction 8

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของฟิล์มยืดจาก blown stretch film และ cast stretch film 11

ตารางที่ 2.5 ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด ความต้านแรงฉีกขาด และความใส..... 13

ตารางที่ 2.6 ปริมาณสารที่ละลายออกมาของฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหาร 13

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติด้านความปลอดภัยของเนื้อพลาสติก 14

ตารางที่ 2.8 ค่าความหนา ค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม LLDPE จากบริษัท Qingdao super packaging Co., Ltd 15

ตารางที่ 2.9 ค่าความหนา ค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม LLDPE จากบริษัท FUJIAN YOU YI GROUP..... 16

ตารางที่ 2.10 ค่าความหนา ค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม LLDPE จากบริษัท Luban packing LLC 16

ตารางที่ 2.11 ช่วงที่สนใจของตัวแปรอิสระ..... 17

ตารางที่ 2.12 Processing, structure และข้อมูลสมบัติต่าง ๆ ของ cast film ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง 17

ตารางที่ 2.13 Analysis of variance (ANOVA) regression..... 18

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนการผสมของ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong 31

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนและอุณหภูมิการผสมของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong 35

ตารางที่ 4.1 ค่า Young’s modulus, tensile strength และ elongation at break ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong..... 48

ตารางที่ 4.2 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ที่ขึ้นรูปด้วย
กระบวนการ cast film extrusion..... 51



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของ Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT [6]..... 4

รูปที่ 2.2 แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเกิดการเคลื่อนที่ [12] 7

รูปที่ 2.3 การทดสอบ Sliding angle [14] 9

รูปที่ 2.4 3-D surface plot ของ ultimate stretch ที่ฟังก์ชันกับ melt temperature และ air gap [21] 19

รูปที่ 2.5 3-D surface plot ของ ultimate stretch ที่ฟังก์ชันกับ melt temperature และ line speed [21]..... 19

รูปที่ 2.6 3-D surface plot ของ load retention ที่ฟังก์ชันของ melt temperature และ line speed [21]..... 20

รูปที่ 2.7 3-D surface plot ของ load retention ที่ฟังก์ชันของ air gap และ line speed [21] 20

รูปที่ 2.8 3-D surface plot ของ unstretched cling ที่ฟังก์ชันกับ melt temperature และ air gap [21] 21

รูปที่ 2.9 ผลของสถานะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1775 (M_w 100) [22] 22

รูปที่ 2.10 ผลของสถานะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1776 (M_w 300) [22] 22

รูปที่ 2.11 ผลของสถานะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1777 (M_w 1200) [22]..... 23

รูปที่ 2.12 ผลของสถานะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1778 (M_w 300+2100) [22]..... 23

รูปที่ 2.13 (a) กราฟ stress-strain ของ PLA/SiO₂ nanocomposites ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ pre-stretching ที่อุณหภูมิ 60 °C (b) ภาพขยาย stress-strain ของ (a) ที่ค่า strain ต่ำ [23] 25

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.14 กราฟแสดงค่า (a) elongation at break (b) modulus และ (c) tensile strength ของ PLA และ PLA/SiO ₂ nanocomposites ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ pre-stretching ที่อุณหภูมิ 60 °C [23]..... | 26 |
| รูปที่ 2.15 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกทั้งไม่เต็มและเต็ม perkadox [24]..... | 27 |
| รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงค่า Modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เต็ม perkadox [24]..... | 28 |
| รูปที่ 3. 1 โครงสร้าง Biomax® strong 120 (Poly(ethylene-co-acrylic acid) | 29 |
| รูปที่ 3.2 เครื่อง internal mixer รุ่น MX 105-D40L50 จากบริษัทเจริญทัศน์..... | 31 |
| รูปที่ 3.3 เครื่อง Compression molding รุ่น PR10-W300L350 จากบริษัทเจริญทัศน์..... | 32 |
| รูปที่ 3.4 เครื่อง Melt Flow Indexer รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัทเจริญทัศน์..... | 33 |
| รูปที่ 3.5 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN | 33 |
| รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5659 จากบริษัท Instron Engineering Corporation..... | 34 |
| รูปที่ 3.7 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ twin-screw extrusion รุ่น HRJ-25 จากบริษัท Enmach Co., Ltd..... | 35 |
| รูปที่ 3.8 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) รุ่น LBE20-30/P จากบริษัท Labtech Engineering ประเทศไทย | 36 |
| รูปที่ 3.9 เครื่อง Uniaxial machine..... | 37 |
| รูปที่ 3.10 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS500-5B จากบริษัท นรินทร์อินสทรูเมนต์ จำกัด..... | 38 |
| รูปที่ 3.11 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอย่างง่าย a) ฐานปรับมุม b) ลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักฟิล์ม | 39 |
| รูปที่ 3.12 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) จากบริษัท Modern Machinery Co., Inc. (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ดี.เอช.เอ. สยามวาลา จำกัด)..... | 40 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.13 เครื่องรีด-ยืดฟิล์ม Heat film [B3F-YM-A07] (ขวา) และชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย roll cutting [B3F-YM-A08] (ซ้าย) (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แอ็พพลาย ดีพี จำกัด)..... | 41 |
| รูปที่ 4.1 ค่าแรงบิดระหว่างการผลิตของ PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่อุณหภูมิการผลิต 130°C..... | 44 |
| รูปที่ 4.2 ค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ของ PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 190 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม..... | 45 |
| รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ผ่านการกดอัดขึ้นรูปของ a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ..... | 46 |
| รูปที่ 4.4 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong | 47 |
| รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะเม็ดพอลิเมอร์ผสมในระบบต่อเนื่องจาก twin-screw extruder a) virgin PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5..... | 50 |
| รูปที่ 4.6 ลักษณะผิวฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong จากเครื่อง cast film extruder a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 | 51 |
| รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 | 52 |
| รูปที่ 4.8 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ tensile test..... | 53 |
| รูปที่ 4.9 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ cycle test..... | 56 |
| รูปที่ 4.10 ค่าการคืนตัวกลับของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x)..... | 57 |

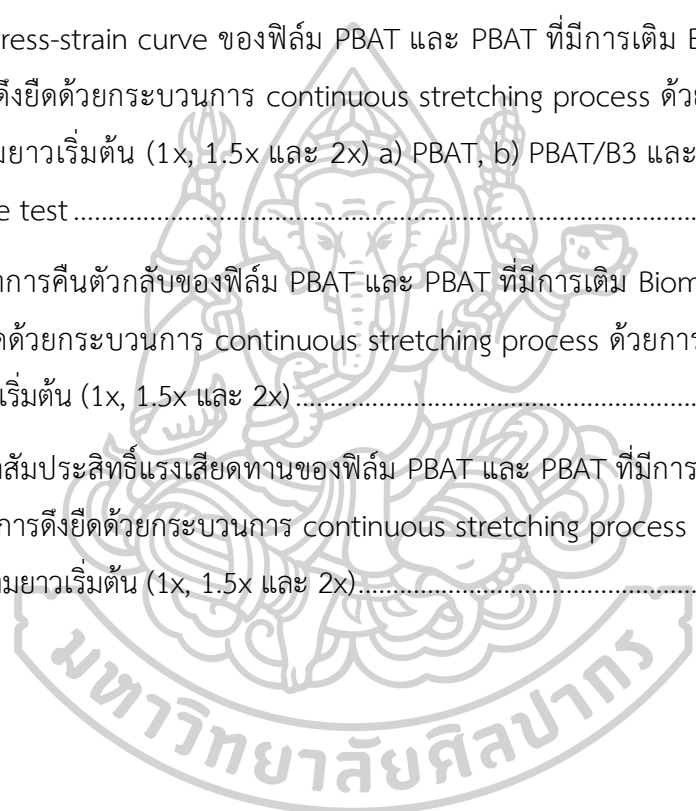
รูปที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x)..... 58

รูปที่ 4.12 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ tensile test..... 61

รูปที่ 4.13 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ cycle test 63

รูปที่ 4.14 ค่าการคืนตัวกลับของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x) 64

รูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x)..... 65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟิล์มคลิงก์หรือฟิล์มยืดหุ้มที่ใช้ในการห่อกล่องพัสดุหรือวัตถุที่อยู่บนพาเลทในกระบวนการขนส่งสินค้าส่วนมากผลิตมาจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น หรือ linear low-density polyethylene (LLDPE) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถแตกสลายทางชีวภาพได้ โดยฟิล์มคลิงก์ LLDPE ในท้องตลาดพบว่ามีค่า tensile strength อยู่ในช่วงประมาณ 35-40 MPa และ elongation at break มีค่าไม่ต่ำกว่า 250% [1-3] โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลทั่วไปของ LLDPE พบว่ามีค่า tensile strength และ elongation at break เท่ากับ 20 MPa และ 500% ตามลำดับ [4] ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟิล์มคลิงก์ LLDPE มีค่า tensile strength สูงกว่า และ elongation at break ที่ต่ำกว่า แสดงว่าฟิล์มคลิงก์นั้นได้มีการผ่านกระบวนการขึ้นรูปนั่นคือ กระบวนการดึงยืดฟิล์ม (stretching process) ทำให้มี tensile strength ของฟิล์มคลิงก์ LLDPE คี้อยู่สูงขึ้น เพื่อป้องกันการขาดของฟิล์มซึ่งทำให้เกิดการตกหล่นของกล่องพัสดุหรือวัตถุบนพาเลทและทำให้เกิดความเสียหายของสินค้าในขณะขนส่งได้ โดยพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติใกล้เคียงกับ LLDPE ก็คือ poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT ซึ่งมีค่า tensile strength และ elongation at break เท่ากับ 35 MPa และ 560% ตามลำดับ [5] และสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มคลิงก์ก็คือความสามารถในการยึดติดผิวระหว่างผิวฟิล์มกับผิวฟิล์มที่ดี เนื่องจากหลังทำการห่อหุ้มหรือรัดกล่องพัสดุหรือวัตถุที่จะทำการขนย้ายเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องมั่นใจว่าฟิล์มที่ทำการห่อหุ้มไม่เกิดการลื่นไถลหรือหลุดออกของฟิล์ม โดยการยึดติดผิวของฟิล์มเกิดได้จาก 2 สาเหตุหลัก คือ การเติมสารเติมแต่งชนิดเพิ่มการยึดติด (cohesion additive) และการเกิดไฟฟ้าสถิต โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเลือกนำสารเติมแต่งชนิดเพิ่มการยึดติดมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติการยึดติดผิวของฟิล์มที่ได้จากพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ซึ่งติดตามได้จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม และศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มการยึดติดที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการดึงยืดฟิล์มที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มที่ได้จากพลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ เพื่อให้ได้อัตราปริมาณการเติมสารเพิ่มการยึดติดและอัตราส่วนการดึงยืดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลการเติมสารเติมแต่งชนิดเพิ่มการยึดติดที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มคลิงก์ชนิด Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสารเติมแต่งชนิดเพิ่มการยึดติดที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มคลิงก์ของ Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT
- 1.2.3 เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์ของ Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT ด้วยกระบวนการดัดยัดในระบบ batch และ continuous process

1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.3.1 พัฒนาสมบัติเชิงกลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มคลิงก์
- 1.3.2 การเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสมเพื่อนำไปใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์จะใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder)
- 1.3.3 การขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่ออัดรีด (Cast film extrusion)
- 1.3.4 กระบวนการดัดยัดฟิล์ม (Stretching process)
- 1.3.5 Poly(butylene adipate-co-terephthalate) ของ ecoflex® F blend C1200

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 รวบรวมข้อมูลที่สำคัญและสอดคล้องกับงานวิจัย
- 1.4.2 ออกแบบและวางแผนการสำหรับงานวิจัย
- 1.4.3 เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.4.4 ดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process และอิทธิพลของ Biomax® strong ต่อสมบัติเชิงกล

- ศึกษาค่าแรงบิดในเครื่องผสมแบบปิด (Torque)
- ศึกษาหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม (MFI)
- ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

- ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ฟิล์มด้วย Tensile test

ตอนที่ 2 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่อง และอิทธิพลกระบวนการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยืดฟิล์มด้วยระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม

1.4.5 วิเคราะห์ผลกาวิจัย

1.4.6 สรุปผลการวิจัย

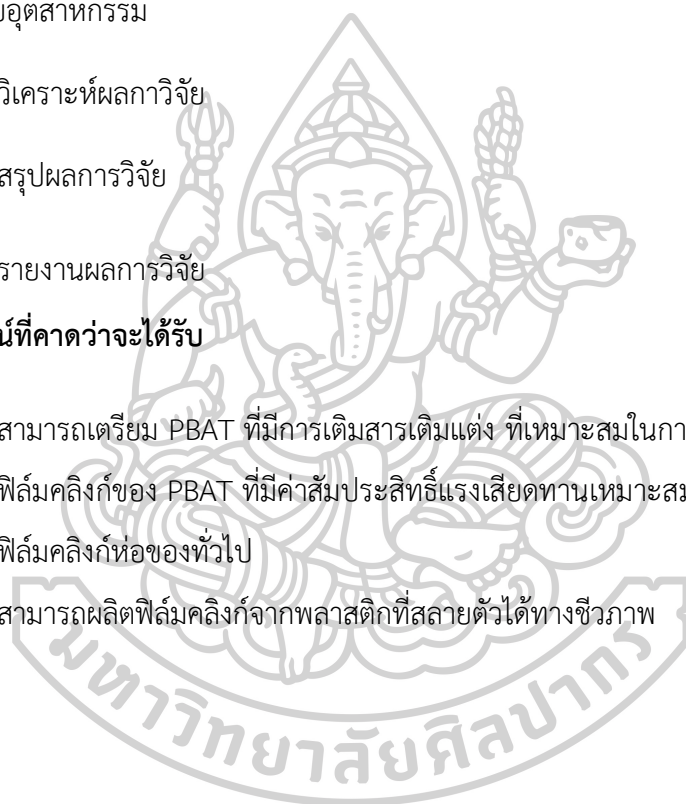
1.4.7 รายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเตรียม PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์

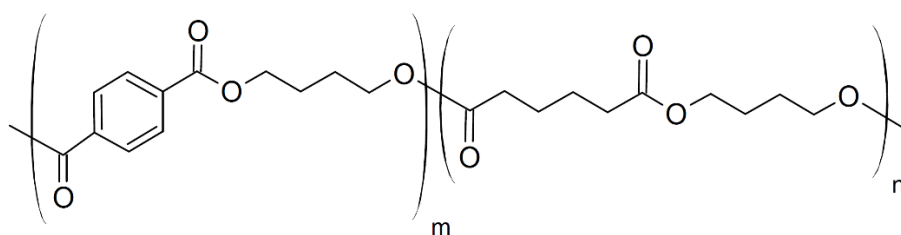
1.5.2 ฟิล์มคลิงก์ของ PBAT ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นฟิล์มคลิงก์ห่อของทั่วไป

1.5.3 สามารถผลิตฟิล์มคลิงก์จากพลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของ Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT [6]

PBAT รู้จักกันเป็นอย่างดีว่าเป็นพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็น aliphatic-aromatic co-polyester ที่สังเคราะห์ได้จากปิโตรเลียมผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น โดย PBAT ประกอบด้วย 2 ส่วน นั่นคือ ส่วนของ BT (butylene terephthalate) ที่มีความแข็ง และส่วนของ BA (butylene adipate) ที่มีความยืดหยุ่น [7] โดย PBAT สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติเชิงกลได้อันเนื่องมาจากประกอบไปด้วยส่วนที่แข็งและส่วนที่ยืดหยุ่น เช่นถ้าส่วนของ BT มีมากขึ้นก็จะทำให้โครงสร้างของ PBAT มีความสามารถในการต้านทานการเสีรูบเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการยืดจนขาดลดลง ในทางกลับกันถ้าส่วน BA มากจะทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดสูงขึ้นแต่ความสามารถในการต้านทานการเสีรูบลดลง โดยทั่วไปสมบัติของ PBAT มีความคล้ายคลึงกับ LDPE เช่น มีความสามารถในการยืดจนขึ้นงานขาดสูง ความต้านทานการเสีรูบต่ำ มีความยืดหยุ่นสูง และอื่น ๆ เป็นต้น ทำให้ PBAT จึงเป็นพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ทดแทน LDPE ในปัจจุบันมากขึ้น [8]

PBAT บริษัท BASF โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า “Ecoflex” ทางบริษัทได้ทดสอบไว้ว่า PBAT สามารถสลายตัวได้ 90% หลังทำการสลายตัวทางชีวภาพเป็นเวลา 80 วัน ซึ่งถูกนิยมนำมาใช้ในฟิล์มยืดหุ้มอาหาร ถุงพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ และใช้เป็นสารเคลือบผิวให้กับแก้วกระดาษเพื่อป้องกันการดูดซับน้ำของกระดาษ และยังสามารถนำเอา PBAT เป็นองค์ประกอบในฟิล์มต้านจุลินทรีย์โดยฟิล์มต้านจุลินทรีย์นี้ได้พัฒนานำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ช่วยยืดอายุและเก็บรักษาอาหารให้นานยิ่งขึ้น [9] สมบัติทั่วไปของ Ecoflex แสดงดังตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของ ecoflex® F Blend C1200 [5]

| Property | Unit | Test Method | ecoflex® F Blend C1200 |
|---|---------------------|-------------|---------------------------|
| Mass density | g / cm ³ | ISO 1183 | 1.25 - 1.27 |
| Melt flow rate MFR 190 °C, 2.16 kg | g / 10 min | ISO 1133 | 2.7 - 4.9 |
| Melt volume rate MVR 190 °C, 2.16 kg | ml / 10 min | ISO 1133 | 2.5 - 4.5 |
| Glass transition temperature | °C | DSC | -30 |
| Melting point | °C | DSC | 110 - 120 |
| Shore D hardness | - | ISO 868 | 32 |
| Vicat VST A/50 | °C | ISO 306 | 91 |

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของฟิล์ม ecoflex® F Blend C1200 ความหนา 50 ไมครอน ที่ได้จากการเป่าขึ้นรูป [5]

| Property | Unit | Test Method | ecoflex® F Blend C1200 |
|-------------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|
| Transparency | % | ASTM D 1003 | 82 |
| Tensile strength | N/mm ² | ISO 527 | 35/44 |
| Ultimate strength | N/mm ² | ISO 527 | 36/45 |
| Ultimate Elongation | % | ISO 527 | 560/710 |
| Failure Energy (Dyna Test) | J/mm | ISO 53373 | 24 |

หมายเหตุ a/b คือ ทิศทางตามแนวขนานกับเครื่อง (machine direction, MD) / ทิศทางแนวขวางกับเครื่อง (transverse direction, TD)

2.2 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (Polymer additives) [10, 11]

สารเติมแต่งพอลิเมอร์ คือ วัสดุหรือสารที่เติมลงไปเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยสารเติมแต่งจะไม่เข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญ ๆ ของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปสารเติมแต่งควรมีสมบัติดังนี้

- ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ต้องเสถียรภายใต้สภาวะของกระบวนการผลิตต่าง ๆ
- ต้องเสถียรภายใต้สภาวะการใช้งาน
- ต้องไม่เกิดการตกสี (bleeding) และ blooming
- ต้องไม่เป็นพิษและไม่ทำให้เกิดรสหรือกลิ่น, ต้องมีราคาถูก
- ต้องไม่ทำให้สมบัติพอลิเมอร์เสียไป

สารเติมแต่งที่มักถูกเลือกใช้ในพอลิเมอร์ เช่น พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer), สารตัวเติม (filler), สารเติมแต่งเพื่อเสริมแรง (reinforcement additives), สารปรับปรุงสมบัติที่พื้นผิว (surface properties modifiers) และสารคงสภาพทางความร้อน (heat stabilizers) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปทางการปรับปรุงสมบัติที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งสารปรับปรุงสมบัติที่พื้นผิวนั้นมีหลายวัตถุประสงค์ทั้งการเพิ่มแรงเสียดทาน การลดแรงเสียดทาน หรือจะเป็นการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์ เป็นต้น

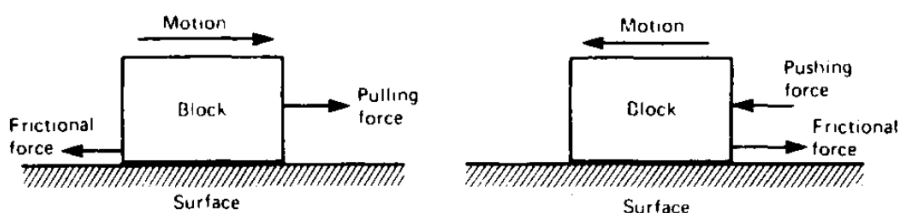
2.3 แรงเสียดทาน (Friction) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction, COF)

แรงเสียดทาน คือ แรงต้านการเคลื่อนที่บนผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุ หรือแรงที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุไปบนพื้นผิวสัมผัส โดยแรงเสียดทานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. Dynamic or sliding friction force คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ ซึ่งแรงเสียดทานประเภทนี้จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ช้าลง จนอาจทำให้วัตถุหยุดนิ่ง และ 2. Static friction คือ แรงเสียดทานที่ต้านทานวัตถุก่อนเกิดการเคลื่อนที่ [12]

โดยตัวแปรที่มีผลต่อขนาดและทิศทางของแรงเสียดทาน มีอยู่ 3 ตัวแปร ดังนี้

1. ขนาดของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับประเภทของพื้นผิวที่สัมผัส (เช่น ไม้สัมผัสกับเหล็ก ขัดเงาจะเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าผิวของคอนกรีตที่ขรุขระ)

2. ขนาดของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่ตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัส ซึ่งแรงนี้เรียกว่า normal force ดังนั้นถ้าน้ำหนักของวัตถุเพิ่มขึ้น 2 เท่า ทำให้แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น 2 เท่าเมื่อเคลื่อนที่บนพื้นผิวเดียวกัน
3. ทิศทางของแรงเสียดทานจะมีทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่เสมอ



รูปที่ 2.2 แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเกิดการเคลื่อนที่ [12]

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction, COF) คือ การวัดปริมาณของแรงเสียดทานที่มีอยู่ระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่ทำการสัมผัส เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในแต่ละคู่แตกต่างกัน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรองขาเก้าอี้กับพื้นคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1.0 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรองขาเก้าอี้กับพื้นกระเบื้องมีค่าเท่ากับ 1.6 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\mu = \frac{\text{frictional force, (f)}}{\text{normal force, (N)}}$$

สมการที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่า Coefficient of static friction และ Coefficient of kinetic friction

[13]

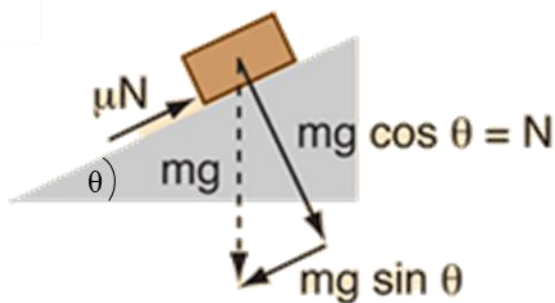
| Material (dry surfaces) | Coefficient of Static Friction | Coefficient of Kinetic Friction |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Steel on Steel | 0.74 | 0.57 |
| Rubber on Concrete | 1.0 – 4.0 | 0.6 - 0.85 |
| Rubber on Asphalt | 1.0 – 3.5 | 0.5 - 0.8 |
| Aluminium on Steel | 0.61 | 0.47 |
| Copper on Steel | 0.53 | 0.36 |
| Wood on Wood | 0.25 – 0.5 | 0.2 |
| Glass on Glass | 0.94 | 0.4 |
| Teflon on Teflon | 0.04 | 0.04 |
| Cast Iron on Cast Iron | 1.1 | 0.15 |

โดยในงานวิจัยนี้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มด้วยวิธี Sliding angle ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยนำวัตถุวางที่ฐานปรับมุมแล้วทำการขยับแผ่น plate ขึ้นทำมุมกับแนวระนาบจนกระทั่งวัตถุเกิดการไถล แล้วนำมุมที่ได้ไปคำนวณหาค่า Coefficient of friction ดังสมการที่ 2.2 [14, 15]

$$\mu = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \tan \theta$$

สมการที่ 2.2

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction)



รูปที่ 2.3 การทดสอบ Sliding angle [14]

2.4 พลาสติกยืด (Stretch film or stretch cling film)

Stretch film หรือ พลาสติกยืด เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งในกลุ่ม Thermo plastic มีสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือ เหนียว ใส ยืดหยุ่นสูง และสามารถเกาะติดกันตัวเองโดยไม่ต้องใช้ความร้อน พลาสติกที่นำมาผลิตฟิล์มยืดมีหลายชนิดแยกไปตามการใช้งาน เช่น PVC, PP, LLDPE และ LDPE ในการผลิตต้องมีการเติมสารอื่น ๆ เนื่องจากเนื้อฟิล์มยืดสามารถเกาะติดกันตัวเองจากการเพิ่มสารเกาะติดเข้าไปทำให้การใช้งานได้ง่ายในการใช้ห่อรัดสินค้า นอกจากนี้ยังมีการเติมสารต้านรังสียูวีในแสงแดดเพื่อให้ฟิล์มทนทานต่อการใช้ในที่โล่งแจ้งเพื่อให้ฟิล์มเสื่อมสภาพช้าลงเมื่อโดนแสงแดด ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมขนส่งมักจะมีรู้จักกันในชื่อ “ฟิล์มยืดพันพาเลท” บางครั้งก็เรียกว่า “Stretch cling film” มักนิยมใช้ในงานบรรจุหีบห่อสินค้าเป็นอย่างมาก เมื่อดึงฟิล์มออกให้ตึงจะมองเห็นมีลักษณะคล้ายมีกาวบางอยู่ด้านใน ทำให้ยึดติดได้ดี โดยเฉพาะงานรัดพันพาเลทสินค้า เพื่อกันสินค้าตกเนื่องจากเนื้อฟิล์มมีความเหนียว จึงกันสินค้าตกได้ดี เม็ดพลาสติกมาใช้ผลิต stretch film ส่วนมากผลิตมาจาก LLDPE เป็นพลาสติกกลุ่มหนึ่งของ PE ทนต่อแรงดึง สามารถยืดได้มากถึง 250 % ฟิล์มยืดในตลาดมีอยู่มากมายหลายแบบแล้วแต่อุตสาหกรรมที่เลือกใช้ เมื่อทำการแบ่งประเภทของฟิล์มยืดตามอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ [16]

1. ฟิล์มยืดหุ้มสำหรับอาหาร ส่วนใหญ่เป็นฟิล์มยืดที่ผลิตมาจาก PVC และ LDPE เนื่องจากต้องสัมผัสกับอาหารเพื่อการบริโภคเนื้อฟิล์มจะใสไม่เหนียวมากนัก
2. ฟิล์มยืดหุ้มสำหรับการขนส่ง ส่วนใหญ่มักเป็นฟิล์มยืดที่ผลิตมาจาก LLDPE มักเรียกกันว่าฟิล์มยืดพันพาเลท เนื่องจากใช้งานง่าย แข็งแรง โดยการผลิตมีหลายแบบด้วยกัน เช่น แบบม้วนขนาดเล็กหรือ Hybrid film มีหน้ากว้างเล็ก 1-5 นิ้ว แบบใช้มือดึงหรือ Hand roll แบบนี้เป็นที่นิยมใช้กัน

อย่างแพร่หลาย มีความหนาตั้งแต่ 12-30 ไมครอน หน้ากว้างประมาณ 50 เซนติเมตร และอีกแบบเป็นชนิดใช้เครื่องจักรในการพันฟิล์ม

การเลือกใช้ฟิล์มยืดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานว่าต้องการใช้ในรูปแบบไหน โดยคำนึงถึงความสามารถในการยืดตัว ความทนทานต่อแรงดึง ความยืดหยุ่น ส่วนขนาดมีให้เลือกมากมายขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ฟิล์มยืดพันพาเลทแบบใช้มือดึงเนื่องจากเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

2.5 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มยืด [17-19]

กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มยืดแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

2.5.1 Blown stretch film หรือ vertical process จะทำการขึ้นฟิล์มด้วยกระบวนการ Blown film extrusion โดยเป่าพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวตายวงกลม (circular die) ที่มีท่อลมอยู่ตรงกลาง เพื่อเป่าให้พอลิเมอร์หลอมเป็น bubble โดยความกว้างและความหนาของ bubble จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตายวงกลม และปริมาตรของลมภายใน bubble ที่เป่าเข้าไป โดย bubble จะค่อย ๆ เย็นตัวในขณะที่ถูกลำเลียงขึ้นไปด้านบนสุดของเครื่อง จนถึงลูกกลิ้งดึง (nip roll) และ bubble จะถูกรีดลมและถูกดึงลงไปที่ winding stations เพื่อทำการกรีดฟิล์มให้ได้เป็นแผ่นฟิล์ม (flat film) แล้วทำการม้วนเก็บ โดยธรรมชาติผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูก pre-stretched จากการโดน nip roll ดึงขึ้นไปทางด้านบนของตัวเครื่องและถูกดึงลงไปที่ winding stations ทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยในปัจจุบันการขึ้นรูปฟิล์มยืดด้วยวิธี blown stretch film อยู่ประมาณ 20-30%

2.5.2 Cast stretch film หรือ Horizontal process ทำการขึ้นฟิล์มด้วย cast film extrusion โดยทำการหลอมพอลิเมอร์ไหลออกมาผ่าน flat die เมื่อพอลิเมอร์หลอมไหลผ่านออกมาจาก flat die จะไหลออกมายังลูกกลิ้งหล่อเย็นทำให้พอลิเมอร์หลอมเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วและแข็งตัวออกมาเป็นฟิล์ม โดยการดึงยืดและความหนาฟิล์มสามารถควบคุมได้ด้วยความเร็วของลูกกลิ้งม้วนเก็บให้เร็วความเร็วในการ extruded พอลิเมอร์หลอมออกมา โดยในปัจจุบันนิยมขึ้นรูปฟิล์มยืดด้วยวิธี cast stretch film ถึง 70-80%

โดยข้อดีและข้อเสียของฟิล์มยืดจากกระบวนการ blown stretch film และ cast stretch film แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของฟิล์มยืดจาก blown stretch film และ cast stretch film [17-19]

| กระบวนการขึ้นรูป | ข้อดี | ข้อเสีย |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Blown stretch film | ด้านการเจาะสูง | ฟิล์มที่ได้มีความขุ่น |
| | ทนต่อแรงขีดถูได้ดี | มีเสียงดังเมื่อคลี่ฟิล์มออกจากม้วน |
| | รับแรงได้สูง | ฟิล์มขาดง่ายเมื่อดึงด้วยความเร็วสูง |
| Cast stretch film | ฟิล์มที่ได้มีความใส | ทนต่อการเจาะต่ำ |
| | ควบคุมความหนาได้สม่ำเสมอ | |
| | ทนต่อการฉีกขาดได้ดี | |
| | เสียงเบาเมื่อคลี่ฟิล์มออกจากม้วน | |

2.6 มาตรฐานฟิล์มยืดหุ้มสำหรับห่ออาหารและฟิล์มยืดพันพาเลท

2.6.1 มาตรฐานฟิล์มยืดหุ้มสำหรับห่ออาหาร [20]

มอก 1136-2559 คือ มาตรฐานอุตสาหกรรมฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหาร โดยมีขอบข่ายและรายละเอียดสำคัญ ๆ ดังนี้

ขอบข่ายของ มอก 1136-2536 กำหนด ชนิด ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน วัสดุ ลักษณะที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหาร ซึ่งมาตรฐานนี้ครอบคลุมเฉพาะฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหารที่ทำด้วยพอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์และพอลิเอทิลีน แบบใช้มือดึงแต่ไม่รวมถึงฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหารที่ใช้กับเครื่องจักรอัตโนมัติ เนื่องจากการศึกษาในงานวิจัยเป็นการผลิตฟิล์มยืดหุ้มมีฐานจาก PBAT ซึ่งมีสมบัติคล้ายกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจึงอาจใช้มาตรฐานนี้ในการเทียบเคียงได้

นิยามของฟิล์มยืดห่ออาหาร หมายถึง แผ่นพลาสติกหนาไม่เกิน 25 ไมโครเมตร ที่สามารถยืดและรัดสิ่งที่ต้องการหุ้มห่อ และเกาะติดกันเองได้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ใช้สำหรับหุ้มห่ออาหารทั่วไป และสำหรับห่ออาหารในไมโครเวฟ ความกว้างของฟิล์มต้องระบุไว้ที่ฉลากโดยแบ่งเป็น

ความกว้างไม่เกิน 300 มิลลิเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน \pm ร้อยละ 4 และความกว้างเกิน 300 มิลลิเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5 ความยาวและความหนาของฟิล์มยึดต้องไม่น้อยกว่าค่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยความหนาของฟิล์มต้องมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 1 ไมโครเมตร โดยชนิดพลาสติกที่ใช้ทำฟิล์มยึดต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลากและต้องผ่านการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้กับอาหารตามมาตรฐานเลขที่ มอก. 656 ถ้ามีการเติมสีหรือสารเติมแต่งต่าง ๆ จะต้องเป็นสีน้ำตาลที่สามารถสัมผัสอาหารได้ ลักษณะทั่วไปของฟิล์มยึดจะต้องยืดหยุ่นเล็กน้อย สามารถเกาะติดกันเองได้ ห้ามมีกลิ่นแรงจากพลาสติก ต้องปราศจากข้อบกพร่อง เช่น ฉีกขาด รอยต่อ รอยขีดข่วน สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น คุณลักษณะทางฟิสิกส์โดยทดสอบความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด ความต้านแรงฉีกขาด และความใส แสดงดังตารางที่ 2.5 ด้านความปลอดภัยต้องตรวจสอบเกี่ยวกับการละลายของสารเคมี และความปลอดภัยของเนื้อพลาสติก แสดงดังตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7 ตามลำดับ การบรรจุต้องบรรจุด้วยวัสดุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดรอยขีดข่วน หรือตำหนิอื่นใดที่อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งาน เครื่องหมายและฉลากที่กล่องบรรจุอย่างน้อยต้องแสดงเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายและชัดเจน ชื่อผลิตภัณฑ์ ชนิด ความกว้าง×ยาว×หนา เดือนปีที่ทำ คำเตือนเกี่ยวกับการใช้ และชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำหรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน และในกรณีที่ เป็นภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น ผู้ทำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต้องได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้วเท่านั้น

การทดสอบฟิล์มยึดหุ้มจะต้องเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 27 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 40 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบที่สภาวะเดียวกัน ถ้าทดสอบในสภาวะนี้ไม่ได้ให้ทดสอบทันทีที่นำตัวอย่างออกจากภาชนะดังกล่าว ส่วนการทดสอบขนาดและลักษณะทั่วไป ให้ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยการทดสอบมีดังนี้ การทดสอบขนาด การทดสอบกลิ้ง การวิเคราะห์ ไค-2-เอทิลเทกซิลทาเลต

ตารางที่ 2.5 ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด ความต้านแรงฉีกขาด และความใส [20]

| รายการที่ | คุณลักษณะ | เกณฑ์ที่กำหนด ไม่น้อยกว่า | | | วิธีทดสอบตาม |
|-----------|----------------------|---------------------------|-----|------|----------------------------|
| | | PE | PVC | PVDC | |
| 1 | ความต้านแรงดึง MPa | | | | ASTM D 882 |
| | ในแนวนานเครื่อง | 30 | 20 | 60 | |
| | ในแนวขวางเครื่อง | 15 | 10 | 60 | |
| 2 | ความยืดเมื่อขาด % | | | | ASTM D 882 |
| | ในแนวนานเครื่อง | 120 | 100 | 50 | |
| | ในแนวขวางเครื่อง | 250 | 150 | 50 | |
| 3 | ความต้านแรงฉีกขาด mN | | | | ASTM D 1992 |
| | ในแนวนานเครื่อง | 200 | 100 | 40 | |
| | ในแนวขวางเครื่อง | 500 | 100 | 40 | |
| 4 | ความใส ไม่น้อยกว่า % | 89 | 91 | 90 | ASTM D 1003 Procedure A |

ตารางที่ 2.6 ปริมาณสารที่ละลายออกมาของฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหาร [20]

| รายการที่ | การทดสอบ | สารละลายที่ใช้สกัด | เกณฑ์ที่กำหนด ไม่เกิน |
|-----------|--|---|--------------------------|
| 1 | โพแทสเซียมเพอร์แมงกา เนตที่ใช้ทำปฏิกิริยา | น้ำกลั่น | 10 mg/dm ³ |
| 2 | สิ่งที่เหลือจากการระเหย | สารละลายเอทานอล 10% เศษส่วนโดย ปริมาตร ⁽¹⁾ | 10 mg/dm ³ |
| | | สารละลายกรดแอสซิติค 3% เศษส่วนโดย มวลต่อปริมาตร ⁽²⁾ | 10 mg/dm ³ |
| | | สารละลายเอทานอล 20% เศษส่วนโดย ปริมาตร ⁽³⁾ | 10 mg/dm ³ |
| | | สารละลายเอทานอล 50% เศษส่วนโดย ปริมาตร ⁽⁴⁾ | 10 mg/dm ³ |
| 3 | สิ่งที่สกัดได้โดยใช้ไขมัน | น้ำมันพืช ⁽⁵⁾ | * 50 mg/dm ³ |
| | | | ** 50 mg/dm ³ |

ตารางที่ 2.6 ปริมาณสารที่ละลายออกมาของฟิล์มยืดหุ้มห่ออาหาร (ต่อ)

| รายการที่ | การทดสอบ | สารละลายที่ใช้สกัด | เกณฑ์ที่กำหนด ไม่เกิน |
|-----------|----------------------------|--|--------------------------|
| 4 | โลหะหนัก (เทียบเป็นตะกั่ว) | สารละลายกรดแอสซิติค 4% เศษส่วนโดยปริมาตร | 1 mg/dm ³ |

หมายเหตุ สารละลายที่ใช้สกัดแต่ละชนิด ใช้เป็นตัวแทนในการทดสอบสิ่งที่เหลือจากการระเหยและภาวะทดสอบดังนี้

- (1) หมายถึง ตัวแทนอาหารที่มีน้ำ
 - (2) หมายถึง ตัวแทนอาหารที่มีกรด
 - (3) หมายถึง ตัวแทนอาหารที่มีแอลกอฮอล์
 - (4) หมายถึง ตัวแทนอาหารที่มีไขมันประเภทอิ่มลัน เช่น น้ำสลัด มายองเนส
 - (5) หมายถึง ตัวแทนอาหารที่มีไขมันเป็นชั้นลอยผิว เช่น น้ำพริกเผา
- * หมายถึง เฉพาะประเภทสำหรับใช้หุ้มอาหารทั่วไป
- ** หมายถึง เฉพาะประเภทสำหรับใช้อุ่นอาหารในเตาไมโครเวฟ

ตารางที่ 2.7 คุณลักษณะด้านความปลอดภัยของเนื้อพลาสติก [20]

| รายการที่ | คุณลักษณะ | เกณฑ์กำหนดไม่เกิน | | |
|-----------|-----------------------|--------------------|---------------------|------|
| | | PE | PVC | PVDC |
| 1 | ตะกั่ว | 100 | 100 | 100 |
| 2 | แคดเมียม | 100 | 100 | 100 |
| 3 | แบเรียม | - | - | 100 |
| 4 | ไดบิวทิลทิน | - | 50 | - |
| 5 | ไตรคลีซิลฟอสเฟต | - | 1000 | - |
| 6 | ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ | - | 1 | - |
| 7 | ไวนิลดีนคลอไรด์ | - | - | 6 |
| 8 | แพเลตรวม | 500 ⁽¹⁾ | 1000 ⁽²⁾ | - |

หมายเหตุ สัญลักษณ์และสารที่นำมาคิดเป็นค่าแทเลตรวมดังนี้

- หมายถึง ไม่ต้องทดสอบ
- (1) หมายถึง ค่าแทเลตรวมเฉพาะไต่บิวทิลแทเลต
- (2) หมายถึง ค่าแทเลตรวมของแทเลต 5 ชนิด ดังนี้ ไต่-(2-เอทิลเฮกซิล) แทเลต ไต่ไอโซโนนิลแทเลต ไต่ไอโซเดซิลแทเลต ไต่บิวทิลแทเลตและเบนซิลบิวทิลแทเลต

2.6.2 มาตรฐานฟิล์มยืดพันพาเลท

เนื่องจากไม่มีมาตรฐานที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจึงทำการพิจารณาค่าความหนา Tensile strength และ elongation at break ตาม technical data sheet ของผลิตภัณฑ์ฟิล์มยืดพันพาเลท LLDPE ของหลาย ๆ บริษัท เพื่อนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการอ้างอิง

2.6.2.1 Technical data sheet ฟิล์มยืดพันพาเลท LLDPE จากบริษัท Qingdao super packaging Co., Ltd ผลิตจาก LLDPE 100% ฟิล์มยืดพันพาเลทมีความหนาตั้งแต่ 15-35 μm มีค่า tensile strength อยู่ในช่วงไม่ต่ำกว่า 37 MPa มี elongation at break ไม่ต่ำกว่า 250% ดังแสดงในตารางที่ 2.8 [1]

ตารางที่ 2.8 ค่าความหนา ค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม LLDPE จากบริษัท Qingdao super packaging Co., Ltd [1]

| Thickness Range | Tensile Strength | Elongation at Break |
|-----------------|------------------|---------------------|
| μm | MPa \geq | % \geq |
| 15 - 17 | 37 | 250 |
| 18 - 20 | 38 | 300 |
| 21 - 25 | 39 | 300 |
| 26 - 30 | 40 | 400 |
| 31 - 35 | 41 | 450 |

2.6.2.2 Technical data sheet พลาสติกยืดพันพาเลท LLDPE จากบริษัท FUJIAN YOU YI GROUP เป็นผลิตภัณฑ์ Transparent stretch film ผลิตด้วย LLDPE มี elongation ความใส และมีค่า tensile strength สูง โดยผลิตภัณฑ์มีความหนา $20 \pm 2 \mu\text{m}$ มีค่า tensile strength ไม่น้อยกว่า 25 MPa มี elongation at break ไม่ต่ำกว่า 350% ดังแสดงในตารางที่ 2.9 [3]

ตารางที่ 2.9 ค่าความหนา ค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม LLDPE จากบริษัท FUJIAN YOU YI GROUP [3]

| Thickness | Tensile Strength | Elongation at Break |
|---------------|------------------|---------------------|
| μm | MPa \geq | % \geq |
| 20 ± 2 | 25 | 350 |

2.6.2.3 Technical data sheet พลาสติกยืดพันพาเลท LLDPE stretch wrap film จากบริษัท Luban packing LLC โดยมีความหนาฟิล์มตั้งแต่ 17 - 30 μm มีค่า tensile strength 34 - 45 MPa และ elongation at break ไม่ต่ำกว่า 410 - 600 % ดังแสดงในตารางที่ 2.10 [2]

ตารางที่ 2.10 ค่าความหนา ค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม LLDPE จากบริษัท Luban packing LLC [2]

| Thickness Range | Tensile Strength | Elongation at Break |
|-----------------|------------------|---------------------|
| μm | MPa | % |
| 17 | 34 | 410 |
| 20 | 39 | 450 |
| 23 | 44 | 500 |
| 25 | 44.5 | 550 |
| 30 | 45 | 600 |

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ J. A. de Groot และคณะ [21] ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขึ้นรูปของฟิล์มยืด LLDPE ที่ขึ้นรูปผ่านกระบวนการ cast stretch film ด้วยการทดลองแบบ Box-Behnken โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรทั้ง 3 ตัว คือ air gap, melt temperature และ line speed ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยืดตัวของฟิล์ม LLDPE โดยในแต่ละตัวแปรจะทำการปรับค่าทั้งหมด 3 ค่า จากช่วงของตัวแปรแต่ละตัวที่แสดงในตารางที่ 2.11 ซึ่งสามารถออกแบบออกมาได้ทั้งหมด 16 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.11 ช่วงที่สนใจของตัวแปรอิสระ [21]

| | SI Units | English Units |
|------------------|-----------------|----------------|
| Air gap | 63.5 - 190.5 mm | 2.5 - 7.5 in |
| Melt temperature | 260 - 288 °C | 500 - 550 °F |
| Line speed | 183 - 305 rpm | 600 - 1000 fpm |

ตารางที่ 2.12 Processing, structure และข้อมูลสมบัติต่าง ๆ ของ cast film ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง [21]

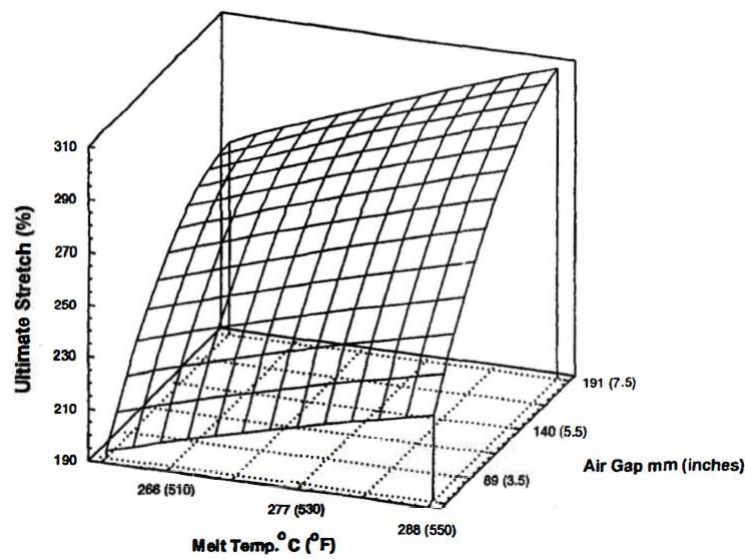
| Exp. No. | Air Gap | | Melt Temperature | | Line Speed | | Ult. Stretch (%) | Load Force | | Unst. Cling (g) |
|----------|---------|-----|------------------|-----|------------|------|------------------|------------|------|-----------------|
| | mm | In. | C | F | mpm | fpm | | N | lbf | |
| 1 | 127 | 5 | 274 | 525 | 244 | 800 | 260 | 149 | 33.6 | 83 |
| 2 | 127 | 5 | 261 | 502 | 305 | 1000 | 235 | 152 | 34.1 | 67 |
| 3 | 127 | 5 | 259 | 498 | 183 | 600 | 257 | 143 | 32.1 | 86 |
| 4 | 127 | 5 | 286 | 547 | 183 | 600 | 297 | 137 | 30.9 | 99 |
| 5 | 127 | 5 | 288 | 551 | 305 | 1000 | 277 | 141 | 31.8 | 103 |
| 6 | 127 | 5 | 273 | 523 | 244 | 800 | 270 | 145 | 32.7 | 87 |
| 7 | 63.5 | 2.5 | 273 | 523 | 183 | 600 | 220 | 173 | 38.8 | 75 |
| 8 | 63.5 | 2.5 | 287 | 548 | 244 | 800 | 220 | 169 | 38.1 | 78 |
| 9 | 63.5 | 2.5 | 274 | 526 | 305 | 1000 | 205 | 191 | 42.9 | 55 |
| 10 | 63.5 | 2.5 | 261 | 501 | 244 | 800 | 195 | 196 | 44.0 | 52 |
| 11 | 127 | 5 | 272 | 522 | 244 | 800 | 265 | 150 | 33.7 | 77 |
| 12 | 190.5 | 7.5 | 287 | 548 | 244 | 800 | 305 | 131 | 29.4 | 114 |
| 13 | 190.5 | 7.5 | 273 | 524 | 183 | 600 | 305 | 132 | 29.6 | 86 |
| 14 | 190.5 | 7.5 | 274 | 525 | 305 | 1000 | 275 | 125 | 28.1 | 95 |
| 15 | 190.5 | 7.5 | 257 | 495 | 244 | 800 | 260 | 136 | 30.5 | 94 |
| 16 | 127 | 5 | 273 | 523 | 244 | 800 | 260 | 144 | 32.4 | 80 |

เมื่อนำข้อมูลของทั้ง 16 การทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ โดยใช้ ANOVA จะได้ว่าค่าความแปรปรวน (variance) ดังแสดงในตารางที่ 2.13 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อ ultimate stretch มากที่สุดคือ air gap ตามด้วย melt temperature และ Line speed ตามลำดับ โดยการทดสอบ

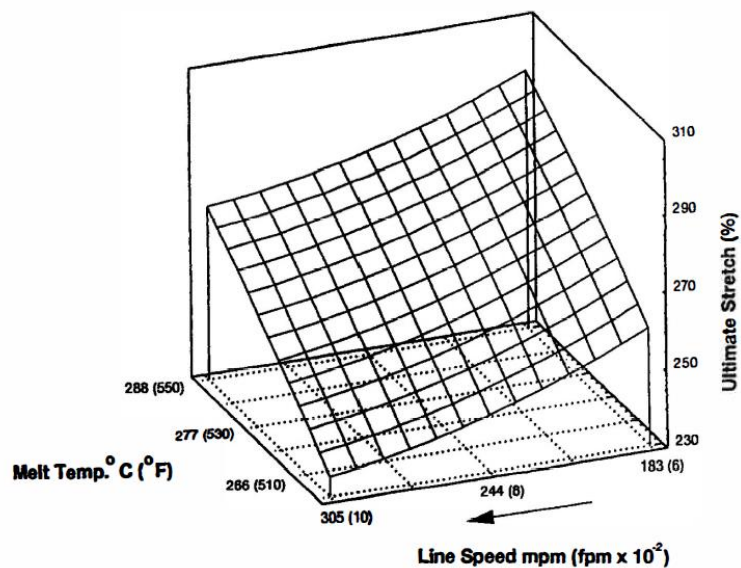
ultimate stretch จะทดสอบด้วย strain rate สูงที่ 1600 1/min ผลของ air gap, melt temperature และ line speed ที่มีผลต่อ ultimate stretch แสดงดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 พบว่าที่ air gap 63.5 mm (2.5 in), อุณหภูมิการหลอม 266 °C (500 °F) และ line speed 244 rpm (800 fpm) มีค่า ultimate stretch เท่ากับ 195 % และเพิ่มขึ้นเป็น 305 % ที่ air gap 191 mm (7.5 in), อุณหภูมิการหลอม 288 °C (550 °F) และ line speed 244 rpm (800 fpm) เห็นได้ชัดว่าเมื่อ air gap และ melt temperature เพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มสามารถดึงขยายออกได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของฟิล์มที่หอบนพาเลท เนื่องจาก ultimate stretch สามารถดึงหอบพาเลทได้ในเปอร์เซ็นต์ที่มากยิ่งขึ้นโดยไม่เกิดการแตกหักของฟิล์ม แต่เมื่อสังเกตค่า line speed ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อ line speed มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ฟิล์มยืดออกได้น้อยลง

ตารางที่ 2.13 Analysis of variance (ANOVA) regression [21]

| | Sum of Squares | DF | F-Ratio | P-Value |
|---|----------------|----|---------|---------|
| Ultimate stretch | | | | |
| A: Melt temp | 2957.9 | 1 | 119.8 | 0.0000 |
| B: Air gap | 11974.3 | 1 | 484.9 | 0.0000 |
| C: Line speed | 1154.9 | 1 | 46.8 | 0.0000 |
| BB | 1142.9 | 1 | 46.3 | 0.0000 |
| Total error | 271.6 | 11 | — | — |
| <i>R</i> -squared = .98; adjusted <i>R</i> -squared = .98 | | | | |
| Load force | | | | |
| A: Melt temp | 15.1 | 1 | 23.2 | 0.0010 |
| B: Air gap | 263.5 | 1 | 404.5 | 0.0000 |
| C: Line speed | 4.9 | 1 | 7.5 | 0.0229 |
| AB | 6 | 1 | 9.2 | 0.0141 |
| BC | 8.7 | 1 | 13.4 | 0.0053 |
| BB | 25.8 | 1 | 39.7 | 0.0001 |
| Total error | 5.9 | 9 | — | — |
| <i>R</i> -squared = .98; adjusted <i>R</i> -squared = .97 | | | | |
| Unstretched cling | | | | |
| A: Melt temp | 1247.6 | 1 | 40.5 | 0.0001 |
| B: Air gap | 2032.5 | 1 | 66 | 0.0000 |
| C: Line speed | 133.6 | 1 | 4.3 | 0.0639 |
| BC | 217.4 | 1 | 7.1 | 0.024 |
| AA | 267 | 1 | 8.67 | 0.0147 |
| Total error | 308.1 | 10 | — | — |
| <i>R</i> -squared = .92; adjusted <i>R</i> -squared = .89 | | | | |



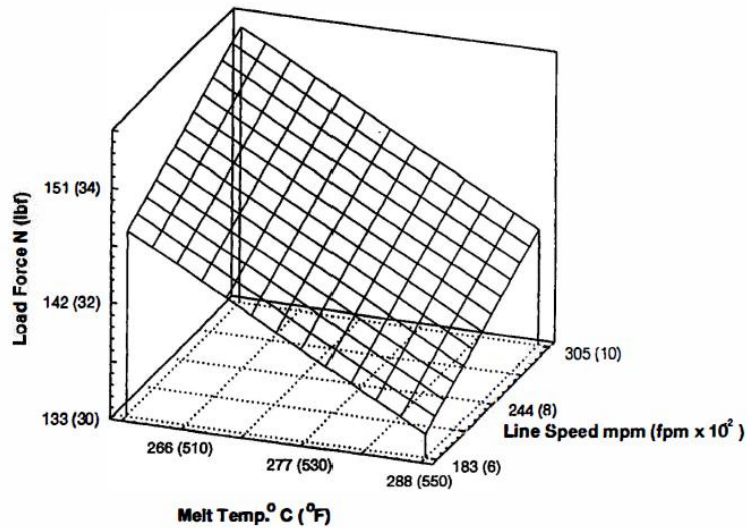
รูปที่ 2.4 3-D surface plot ของ ultimate stretch ที่ฟังก์ชันกับ melt temperature และ air gap [21]



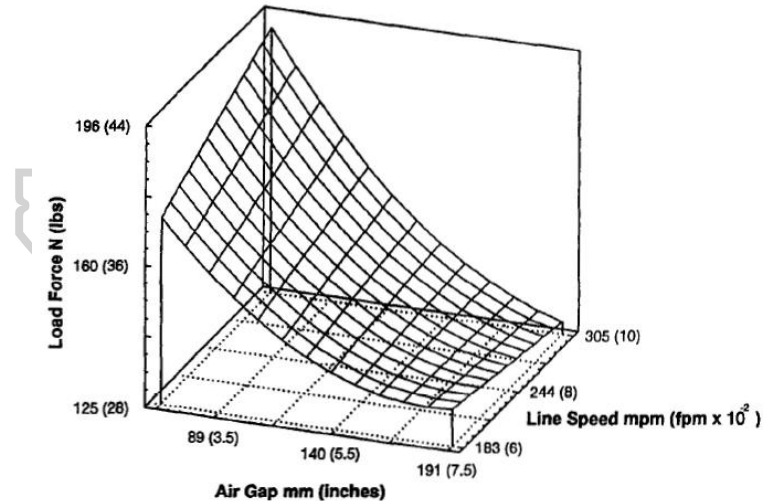
รูปที่ 2.5 3-D surface plot ของ ultimate stretch ที่ฟังก์ชันกับ melt temperature และ line speed [21]

อย่างที่คาดไว้การที่ฟิล์มสามารถขยายตัวหรือยืดได้มากขึ้น ก็ต้องแลกมาด้วยการรับ load holding force ได้น้อยลงในการนำไปห่อพาเลท ซึ่งค่าข้อมูล ANOVA (ตารางที่ 2.13) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลที่ส่งผลต่อ load force ก็ยังคงเป็น air gap ตามด้วย temperature และ line speed โดยผลของ air gap, temperature และ line speed จะส่งผลต่อ load force ในทิศทางตรงกัน

ข้ามกับ ultimate stretch ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 เมื่อ air gap และ temperature เพิ่มขึ้น load force จะมีค่าลดลง แต่ line speed เพิ่มขึ้นจะทำให้ load force เพิ่มขึ้น



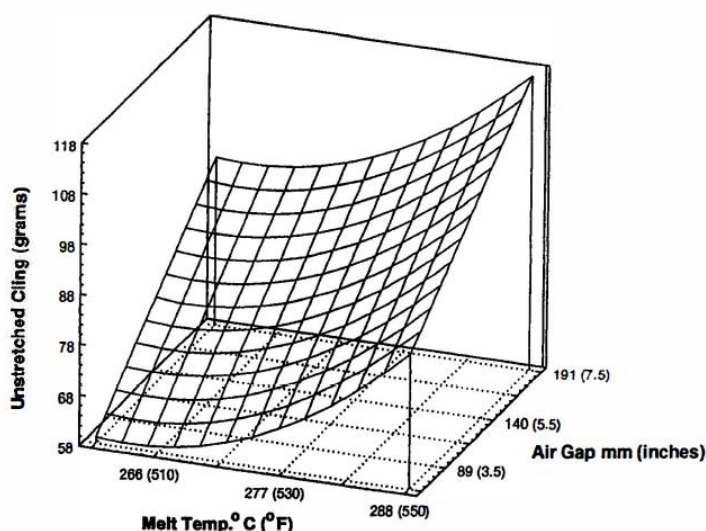
รูปที่ 2.6 3-D surface plot ของ load retention ที่ฟังก์ชันของ melt temperature และ line speed [21]



รูปที่ 2.7 3-D surface plot ของ load retention ที่ฟังก์ชันของ air gap และ line speed [21]

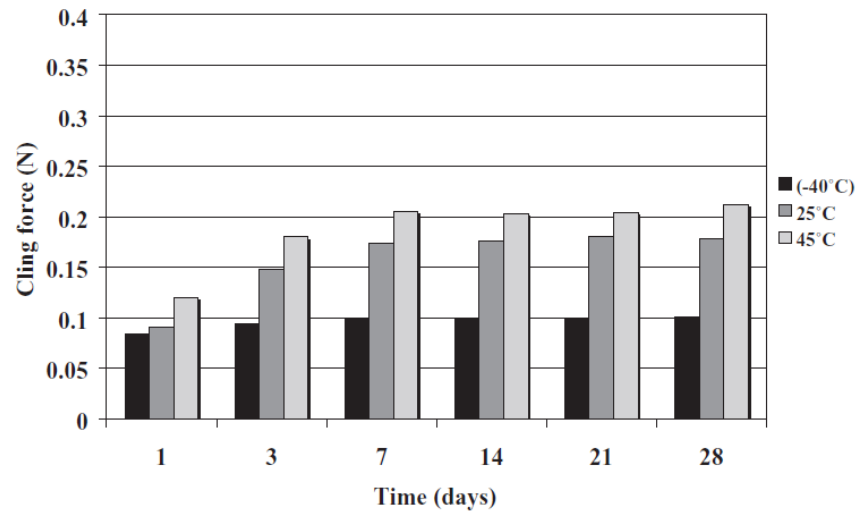
โดยสมบัติอื่นที่สำคัญต่อประสิทธิภาพในการห่อพาเลทของ cast stretch films คือความสามารถในการยึดติดผิว (film surface cling) ความสามารถในการยึดติดสามารถทำได้โดยเติมสาร tackifying agent เช่น polybutene (PIB) หรืออาจมีอยู่โดยธรรมชาติ (inherent) ของเม็ด resin ที่นำมาทำฟิล์ม โดย inherent cling ของฟิล์มยึดจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับ intrinsic properties ของเม็ด resin ซึ่งจากข้อมูลการวิเคราะห์ ANOVA ในตารางที่ 2.3 ตัวแปรที่มีผลต่อ

ความสามารถในการยึดติดมากที่สุดคือ air gap ตามด้วย melt temperature เมื่อค่าทั้ง 2 มีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการยึดติดของฟิล์มที่ไม่ผ่านการยึดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยการเพิ่มขึ้นของ air gap และ melt temperature อาจส่งผลให้ inherent cling ของวัสดุเกิด migration ไปที่ผิวฟิล์มได้เพิ่มขึ้น

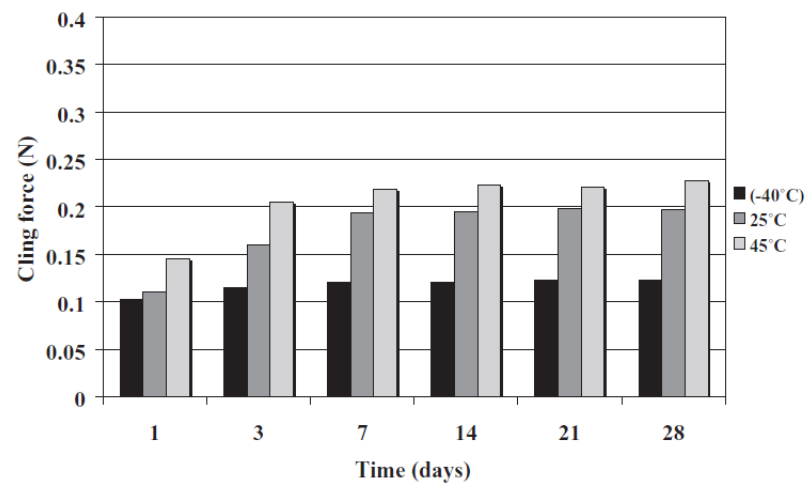


รูปที่ 2.8 3-D surface plot ของ unstretched cling ที่ฟังก์ชันกับ melt temperature และ air gap [21]

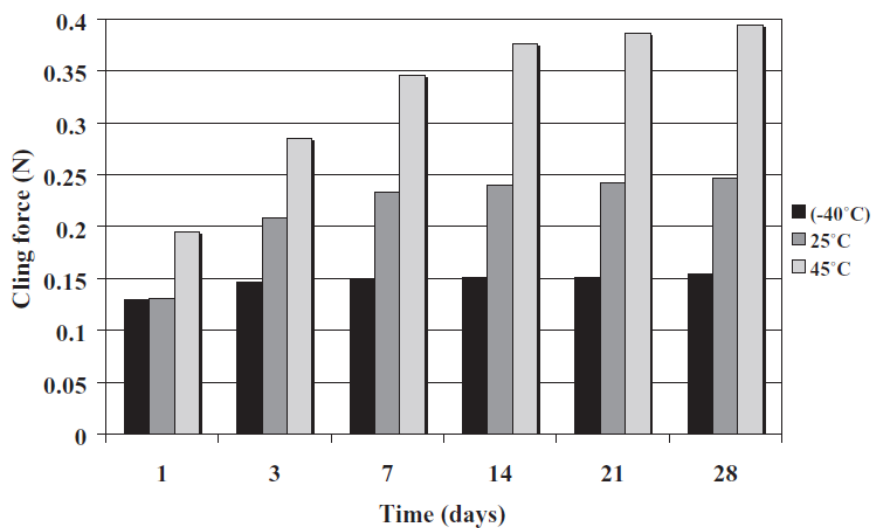
จากงานวิจัย G. M. McNally และคณะ [22] ทำการศึกษาผลน้ำหนักรโมเลกุลของ polyisobutylene (PIB) ที่ส่งผลต่อสมบัติการยึดติดของฟิล์มยึดชนิด Polyethylene พบว่าค่า cling strength มีค่ามากขึ้นเมื่อน้ำหนักรโมเลกุลของ PIB เพิ่มขึ้น 100 (PW 1775), 300 (PW 1776) และ 1200 (PW 1777) g/mol ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ PIB ที่ผสมน้ำหนักรโมเลกุล 300 กับ 2100 g/mol (PW 1778; M_w 300+2100) มีค่า cling strength ต่ำกว่า PIB ที่มีน้ำหนักรโมเลกุล 1200 แต่จะเห็นได้ว่า PIB น้ำหนักรโมเลกุล 300+2100 เมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิ 45 °C หลัง 3 วัน มีค่า cling strength 0.3 N เมื่อเทียบกับ PIB น้ำหนักรโมเลกุล 1200 มีค่าเท่ากับ 0.29 N เนื่องจากในเชิงพาณิชย์การใช้เวลานานขึ้น 3-4 วัน และในอุณหภูมิสูงทำให้ไม่เกิดความคึดคั่ว ดังนั้นฟิล์มที่ดีต้องมีค่า cling strength ที่ดีพร้อมทั้งใช้ระยะเวลาสั้นในการเพิ่มสมบัติการยึดติดเพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุด และเมื่อคู่อธิพลของอุณหภูมิในการบ่มพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้นทำให้การย้ายที่ของ PIB มาที่ผิวมีโอกาสมากขึ้นส่งผลให้ค่า cling strength ที่ผิวเพิ่มขึ้น



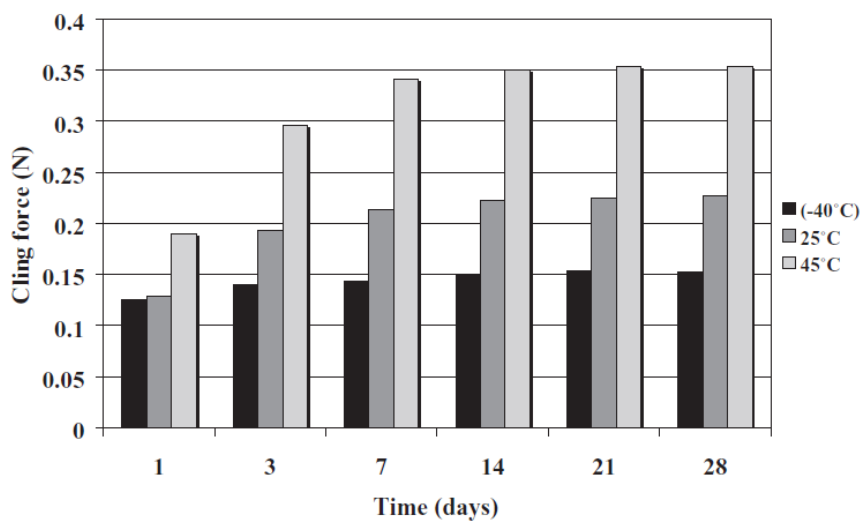
รูปที่ 2.9 ผลของสภาวะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1775 (M_w 100) [22]



รูปที่ 2.10 ผลของสภาวะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1776 (M_w 300) [22]



รูปที่ 2.11 ผลของสภาวะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1777 (M_w 1200) [22]



รูปที่ 2.12 ผลของสภาวะและเวลาในการบ่มที่มีผลต่อ cling strength ของ फिल्म ML2518FC ที่ผสมกับ PW 1778 (M_w 300+2100) [22]

จากงานวิจัยของ Yunjing Chen และคณะ [23] ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการดึงยึดที่มีผลต่อ microstructure, สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของ PLA/SiO₂ nanocomposites ที่ผ่านการดึงยึดด้วยกระบวนการ uniaxial pre-stretching โดยทำการเตรียมแผ่นซีท PLA/SiO₂ nanocomposites โดยเติม SiO₂ nanoparticles 5 wt% ผสมลงใน PLA จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นซีทด้วยกระบวนการกดอัดขึ้นรูปโดยกำหนดความหนาอยู่ที่ 1 mm

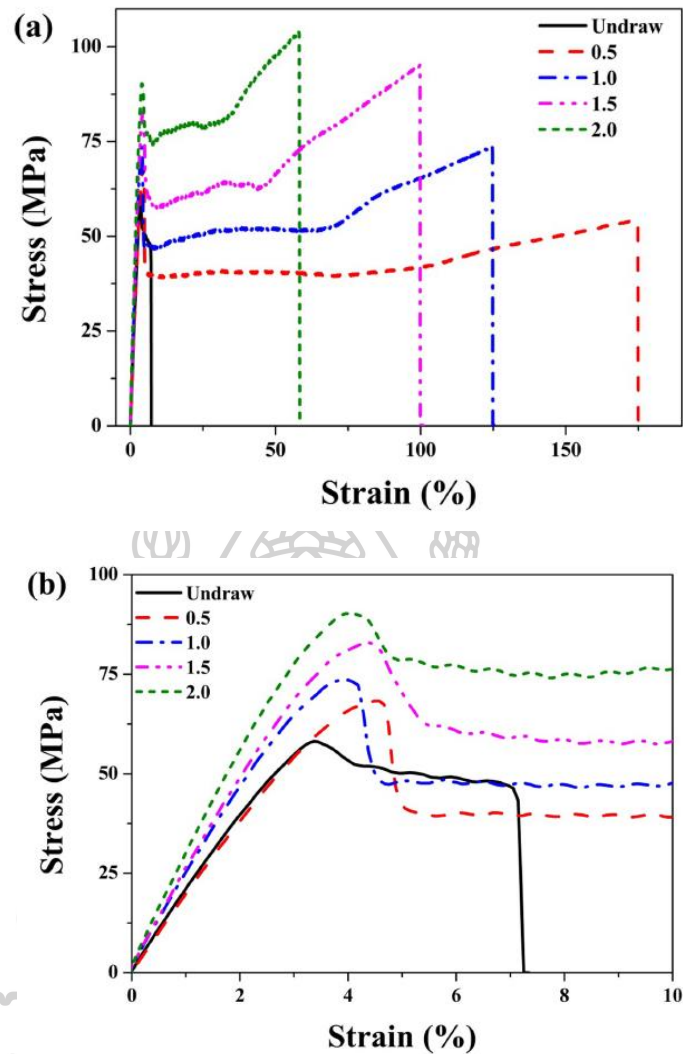
จากนั้นนำแผ่นซีท PLA/SiO₂ nanocomposites ไปทำการดึงยืดที่อัตราส่วนการดึงยืด (PSR) เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยคำนวณดังสมการที่ 2.3 ด้วยกระบวนการ uniaxial pre-stretching ในอุปกรณ์ high-low temperature environmental chamber ภายใต้อุณหภูมิ 60 °C จากนั้นนำแผ่นซีท PLA/SiO₂ nanocomposites ไปทดสอบสมบัติเชิงกลจากรูปที่ 2.13 พบว่า PLA/SiO₂ nanocomposites ก่อนทำการดึงยืดด้วยกระบวนการ uniaxial pre-stretching มีพฤติกรรมการแตกหักแบบ brittle และหลังจากทำการดึงยืดพบว่า มีพฤติกรรมการแตกหักเปลี่ยนไปจาก brittle เป็น ductile โดยดูได้จากการมีจุด yield ที่ชัดเจน มีการเกิด necking growth และมีเกิด strain-hardening ให้เห็น เมื่อทำการดึงยืดที่อัตราส่วนการดึงยืดที่เพิ่มขึ้นจะพบว่าเกิด strain-hardening ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้มีค่า stress ที่สูงขึ้น แต่ทำให้ elongation at break ค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวตามแนวแรงของโมเลกุล PLA

$$PSR = (L/L_0) - 1$$

สมการที่ 2.3

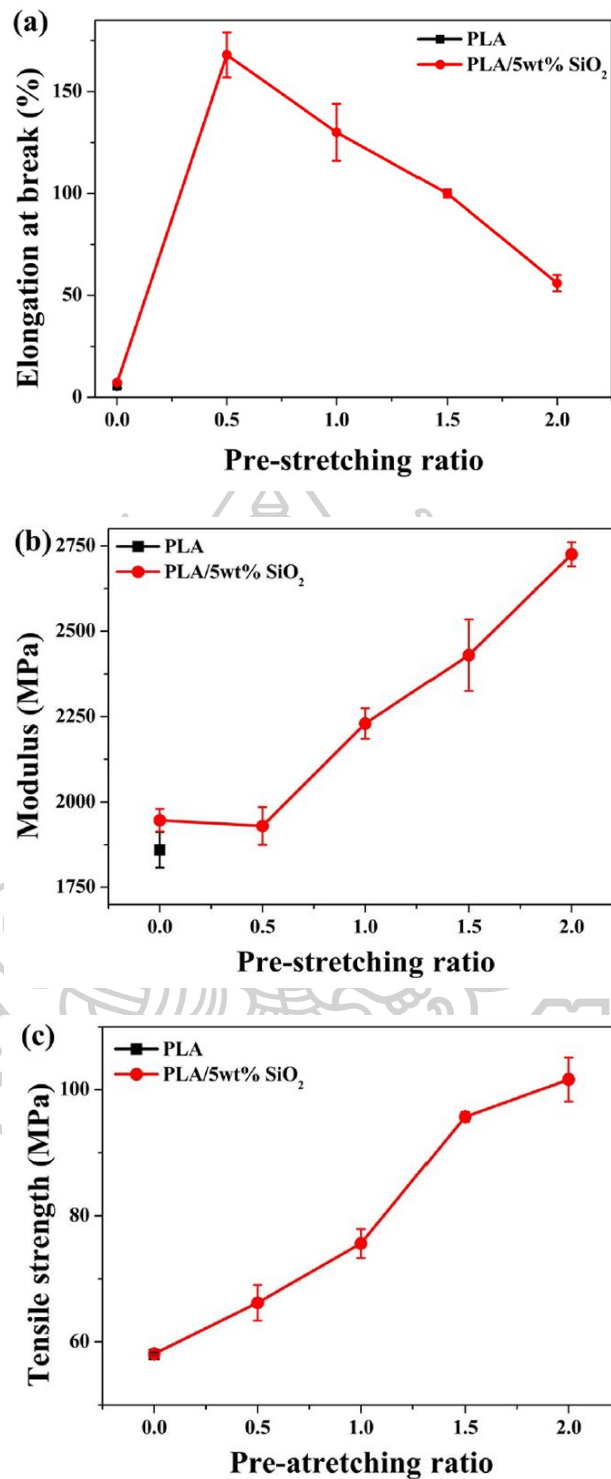
โดย L₀ และ L คือ gauge length ของตัวอย่างก่อนและหลังดึงยืด

ในขณะที่ทำการทดสอบด้วย tensile test สมบัติเชิงกลของ PLA/SiO₂ nanocomposites แสดงดังรูปที่ 2.14 เมื่อทำการดึงยืดที่อัตราส่วนการดึงยืด (PSR) 0.5 พบว่าค่า elongation at break มีค่าเพิ่มสูงขึ้นถึง 168% ในขณะที่เดียวกันค่า Tensile strength ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ค่า modulus มีค่าลดลงเล็กน้อยแทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการดึงยืดที่อัตราส่วนการดึงยืดที่เพิ่มขึ้นเป็นพบว่าค่า elongation at break กลับมีค่าค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่ tensile strength และ modulus มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อทำการดึงยืดที่อัตราส่วนการดึงยืดสูงสุด (PSR = 2.0) พบว่าค่า tensile strength และ modulus มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 58.1 MPa และ 1,947 MPa เป็น 101.6 และ 2,725 MPa ตามลำดับ



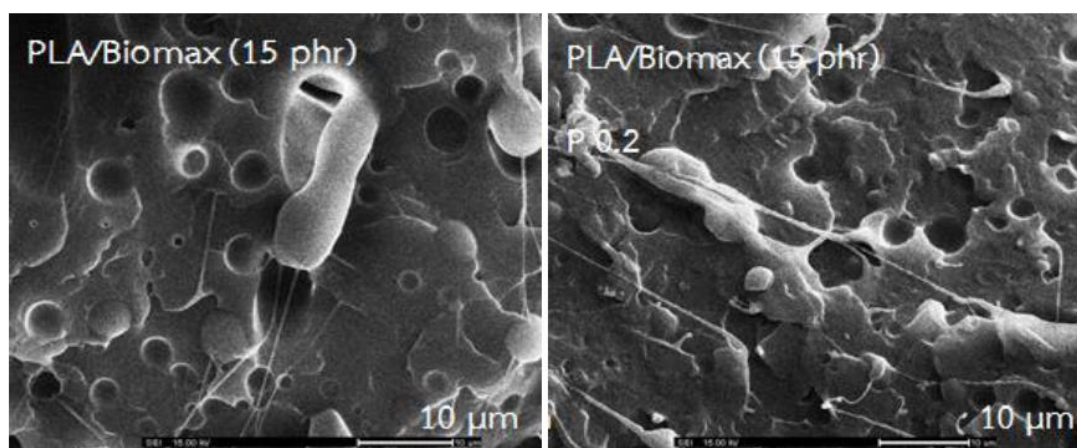
รูปที่ 2.13 (a) กราฟ stress-strain ของ PLA/SiO₂ nanocomposites ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ pre-stretching ที่อุณหภูมิ 60 °C (b) ภาพขยาย stress-strain ของ (a) ที่ค่า strain ต่ำ [23]

ถึงแม้ว่า elongation at break จะมีค่าลดลงแต่ก็ยังมีค่าสูงถึง 56% ซึ่งมีค่าสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับ PLA/SiO₂ nanocomposites ที่ไม่ผ่านการดึงยืด (elongation at break น้อยกว่า 8%) แสดงให้เห็นว่า PLA/SiO₂ nanocomposites ที่ผ่านการดึงยืดมี toughness ที่สูง



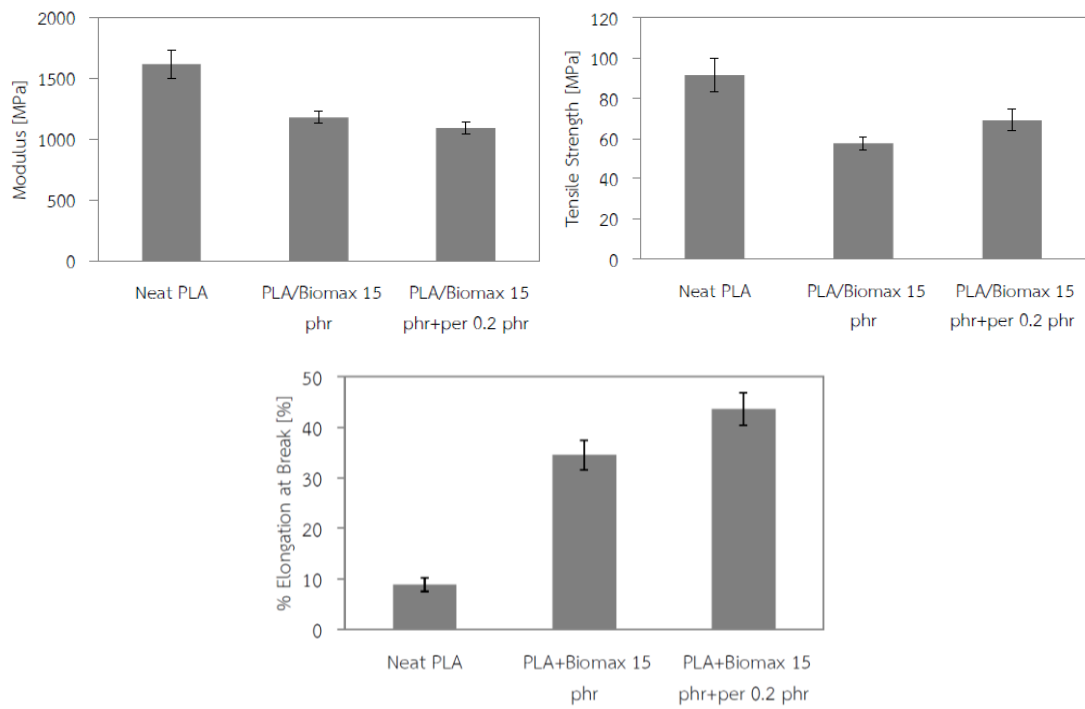
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงค่า (a) elongation at break (b) modulus และ (c) tensile strength ของ PLA และ PLA/SiO₂ nanocomposites ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ pre-stretching ที่ อุณหภูมิ 60 °C [23]

จากวิทยานิพนธ์นายณพคุณ ลิขิตชนประสงค์ [24] จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของ PLA โดยทำการผสม Biomax ลงใน PLA 15 phr โดยมีการเติมและไม่เติม reactive agent โดย reactive agent ที่ใช้คือ perkadox 14-40B-PD ปริมาณ 0.2 phr ในระบบการผสมแบบปิด จากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ PLA/Biomax แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเติม perkadox 0.2 phr ลงไปส่งผลทำให้ความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ Biomax เข้ากันได้มากขึ้น การยึดติดระหว่างผิวดีขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของ Biomax มากนัก

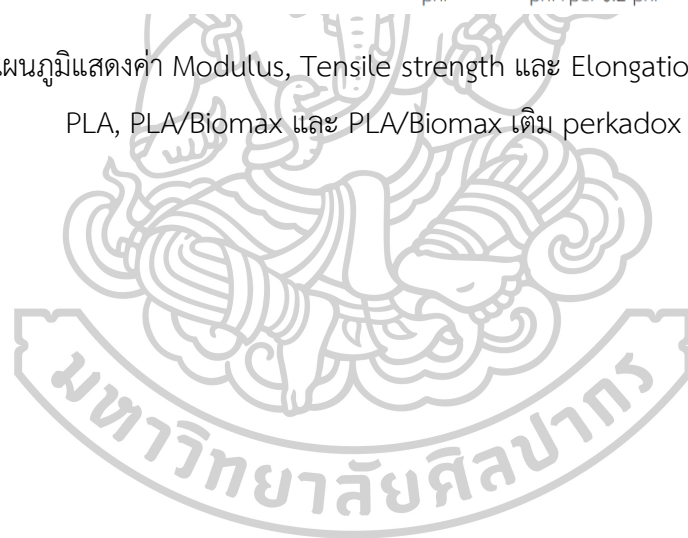


รูปที่ 2.15 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA/Biomax ที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกทั้งไม่เติมและเติม perkadox [24]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าค่า modulus มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อทำการเติม perkadox ลงในการผสม แต่ส่งผลให้ค่า tensile strength และ elongation at break มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การผสมที่ไม่มีการเติม perkadox แสดงว่า perkadox 0.2 phr ช่วยให้มีสมบัติเชิงกลของการผสมดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงค่า Modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของ Neat PLA, PLA/Biomax และ PLA/Biomax เต็ม perkadox [24]

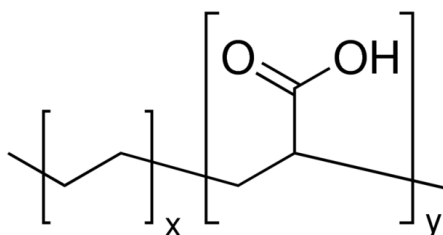


บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT เกรด Ecoflex F Blend C1200 จากบริษัท BASF chemical ประเทศสหรัฐอเมริกา มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาวครีม มีอุณหภูมิในการหลอมผลึกอยู่ที่ 110-120 องศาเซลเซียส โดยมี tensile strength 35 MPa และ elongation at break 560% โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.1

3.1.2 Biomax® Strong 120 (Ethylene Copolymer) จากบริษัท DuPont™ เป็น PLA toughening modifier ได้รับความอนุเคราะห์จาก Chemical Innovation Company Limited, ประเทศไทย มีลักษณะเป็นเม็ด elastomer โปร่งใส และมีองค์ประกอบเป็น Poly(ethylene-co-acrylic acid) [25]



รูปที่ 3. 1 โครงสร้าง Biomax® strong 120 (Poly(ethylene-co-acrylic acid) [26]

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่อง internal mixer รุ่น MX 105-D40L50 จากบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย

3.2.2 เครื่อง Compression Molding Machine รุ่น PR10-W300L350 จากบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย

3.2.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder) L/D = 40 รุ่น HRJ-25 บริษัท ENMACH Co., LTD ประเทศจีน

3.2.4 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) รุ่น LBE20-30/P จากบริษัท Labtech Engineering ประเทศไทย

3.2.5 เครื่อง Uniaxial machine

3.2.6 เครื่องทดสอบการดึงยืด Universal Testing Machine รุ่น 5969 จากบริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.7 เครื่องทดสอบการดึงยืด Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS500-5B จากบริษัท นรินทรอินสทรูเมนต์ จำกัด

3.2.8 เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Indexer) รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัท เจริญทัศน์ ประเทศไทย

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN ประเทศสาธารณรัฐเช็ก

3.2.10 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

3.2.11 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) จากบริษัท Modern Machinery Co., Inc.

3.2.12 เครื่องรีด-ยืดฟิล์ม Heat Film [B3F-YM-A07]

3.2.13 ชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย roll cutting [B3F-YM-A08]

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

3.3.1 ศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process และอิทธิพลของ Biomax® strong ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT

3.3.1.1 การเตรียม PBAT และ PBAT ที่มีสารเติม Biomax® strong

3.3.1.1.1 ทำการอบเม็ด PBAT ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการไล่ความชื้น จากนั้นทำการผสม PBAT เข้ากับ Biomax® Strong 120 ที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งชนิด cohesion additive ด้วยปริมาณ 3 phr และ 5 phr ในเครื่อง internal mixer ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่อุณหภูมิการผสม 130 องศาเซลเซียส และมีความเร็วรอบของใบกวนผสม 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยสัดส่วนการผสมระหว่าง PBAT กับ

Biomax® strong แสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำเอาพอลิเมอร์ผสมที่ได้เข้าเครื่องบดเพื่อให้ได้เม็ดพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 3.2 เครื่อง internal mixer รุ่น MX 105-D40L50 จากบริษัทเจริญทัศน์

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนการผสมของ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

| Samples | PBAT (wt%) | Biomax® Strong 120 (phr) |
|---------|------------|--------------------------|
| PBAT | 100 | - |
| PBAT/B3 | 100 | 3 |
| PBAT/B5 | 100 | 5 |

3.3.1.1.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบให้อยู่ในลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้จาก 3.3.1.1 โดยนำเม็ดพอลิเมอร์จากข้อ 3.3.1.1 (PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา pre-heat 4 นาที ก่อนทำการกดอัดเป็นเวลา 1 นาที ให้ได้ลักษณะเป็นฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วง 300 μm โดยประมาณ แล้วจะนำไปตัดให้อยู่ในรูปทรงตามที่กำหนดไว้ใน การทดสอบสมบัติเชิงกล และการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และขึ้นรูปลักษณะแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular

shape) เพื่อนำไปทดสอบสัณฐานวิทยา โดยใช้เวลา pre-heat 7 นาที ก่อนทำการกดอัดเป็นเวลา 2 นาที ด้วยเครื่อง compression molding ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่อง Compression molding รุ่น PR10-W300L350 จากบริษัทเจริญทัศน์

3.3.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

3.3.1.2.1 การศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากกระบวนการผสมในเครื่อง Internal mixer มาทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้นก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Melt Flow Indexer รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัทเจริญทัศน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบคืออุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และมีน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ตามมาตรฐาน ASTM D1238



รูปที่ 3.4 เครื่อง Melt Flow Indexer รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัทเจริญทัศน์

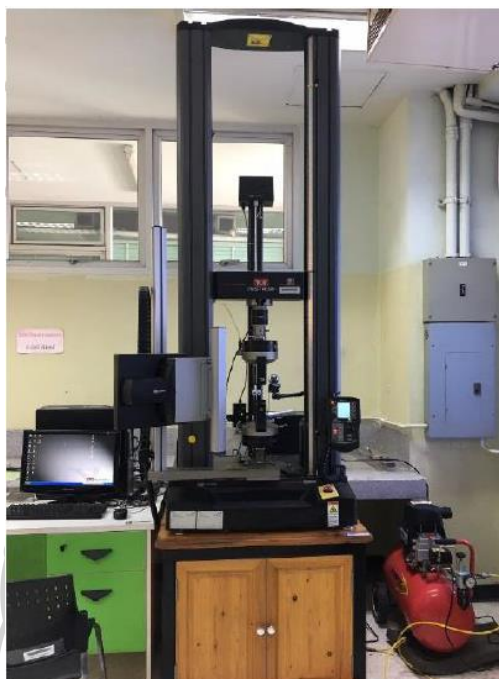
3.3.1.2.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) โดยนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปลักษณะแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular shape) มาแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วเคาะให้ชิ้นงานหักเพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของการผสม ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN

3.3.1.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มด้วย Tensile test ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5659 จากบริษัท Instron Engineering Corporation ดังแสดงในรูปที่

3.6 ทำการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1×6 นิ้ว และทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D882 โดยใช้โหลด 5 kN ด้วยอัตราการดึงยืด 50 mm/min



รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5659 จากบริษัท Instron Engineering Corporation

3.3.2 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่อง และอิทธิพลกระบวนการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

3.3.2.1 การเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสมเพื่อนำไปใช้ในการขึ้นรูป cast film extrusion โดยทำการอบเม็ด PBAT ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นที่อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในระหว่างกระบวนการผสม จากนั้นทำการผสมเม็ด PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 แล้วนำไปอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) รุ่น HRJ-25 จากบริษัท Enmach Co., Ltd ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ในสภาวะอุณหภูมิการผสม 85 – 145 องศาเซลเซียส โดยรายละเอียดช่วงอุณหภูมิการผสมแสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 200 – 300 รอบต่อนาที

และหล่อเย็นด้วยน้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเส้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากกระบวนการอัดรีดมา้วนขดให้เป็นก้อนเพื่อนำไปบดในเครื่อง grinder เนื่องจาก PBAT มีความเหนียวที่ค่อนข้างสูงทำให้ไม่สามารถตัดเส้น extrudate ออกมาเป็นได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ twin-screw extrusion รุ่น HRJ-25 จากบริษัท Enmach Co., Ltd

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนและอุณหภูมิการผสมของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

| Samples | PBAT (wt%) | Biomax® Strong 120 (phr) | Temp profile (° C) |
|---------|------------|--------------------------|---------------------|
| PBAT | 100 | - | 85, 100, 110, 130, |
| PBAT/B3 | 100 | 3 | 135, 140, 145, 150, |
| PBAT/B5 | 100 | 5 | 155, 145 |

3.3.2.2 ขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ cast film extrusion

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการหลอมและขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นพลาสติก (Cast film extruder) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้อุณหภูมิกระบอกหลอมในช่วง 105, 130, 140, 150 องศาเซลเซียส

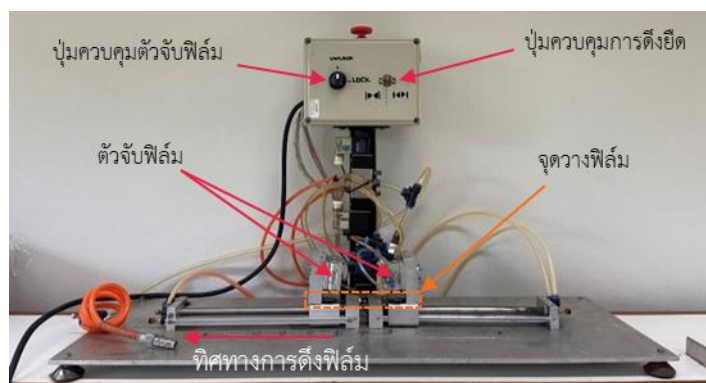
อุณหภูมิบริเวณหัวตาย 160, 160 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบสกรูประมาณ 35 รอบต่อนาที, อุณหภูมิลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll temperature) ที่ 25 องศาเซลเซียส, ความเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll speed) 1-1.5 m/min และความเร็วของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์ม (Nip roll speed) 1.5-2.5 m/min โดยควบคุมความหนาฟิล์มให้มีความหนา 100 ± 20 ไมโครเมตร โดยทำการวัดความหนาฟิล์มด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ โดยทำการวัดความหนาของฟิล์มจำนวน 9 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำฟิล์มไปยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยเครื่อง Uniaxial machine



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) รุ่น LBE20-30/P จากบริษัท Labtech Engineering ประเทศไทย

3.3.2.3 การดึงยืดฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ batch stretching process

นำฟิล์มที่ได้จาก 3.3.2.2 มาทำการตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2×5 นิ้ว จากนั้นนำไปดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยเครื่อง Uniaxial machine ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1.5x, 2x, 2.5x) โดยทำการยืดในสภาวะที่มีการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจาก heat gun

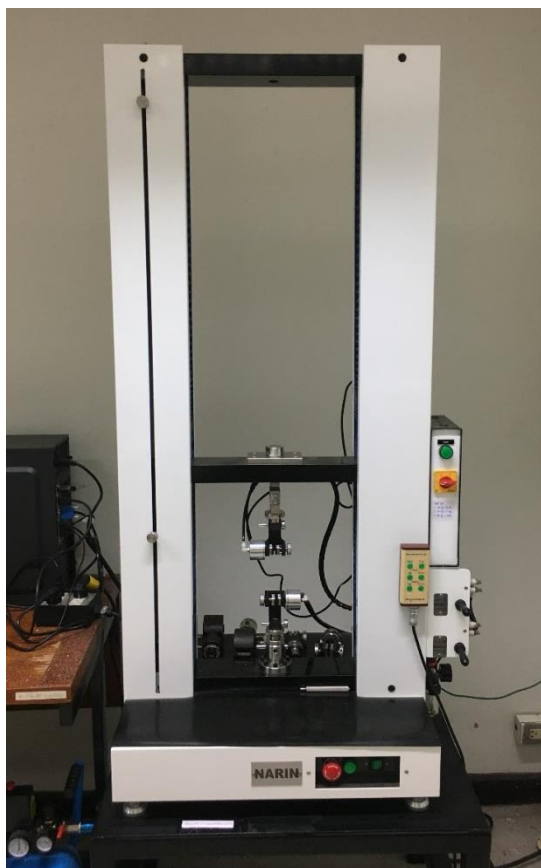


รูปที่ 3.9 เครื่อง Uniaxial machine

3.3.2.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ batch stretching process

3.3.2.4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มด้วย Tensile test ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS500-5B จากบริษัท นรินทรอินสทรูเมนต์ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ทำการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1×6 นิ้ว และทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D882 โดยใช้โหลด 5 kN ด้วยอัตราการดึงยึด 50 mm/min





รูปที่ 3.10 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS500-5B จากบริษัท นรินทรอินสทรูเมนต์ จำกัด

3.3.2.4.2 การศึกษาความยืดหยุ่น (elasticity) ของฟิล์มด้วย Cyclic test ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS500-5B จากบริษัท นรินทรอินสทรูเมนต์ จำกัด ทำการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1×6 นิ้ว และทำการทดสอบโดยตั้งค่า Max stress = 30 MPa แล้วทำการดึงยืดฟิล์มด้วยอัตราการดึงยืด 50 mm/min จนมีค่า Stress ของฟิล์มถึงค่าที่กำหนด จากนั้นให้เครื่องเลื่อน cross head ด้านบนกลับมาที่จุดเริ่มต้น หรือ Min stress = 0 MPa ด้วยอัตราเร็วเดียวกับอัตราการดึงยืด เพื่อติดตามค่า strain ที่ Max stress และ Min stress เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการคืนตัวกลับของฟิล์มจากสมการที่ 3.2 และดูความยืดหยุ่น (elasticity) จากพลังงานคืนตัวกลับและพลังงานที่สูญเสียไปจากพื้นที่ใต้โค้งของกราฟ stress-strain curve

$$\% \text{ Recovery} = \frac{\text{Strain}_{\text{max stress}} - \text{Strain}_{\text{Min stress}}}{\text{Strain}_{\text{max stress}}} \times 100$$

สมการที่ 3.1

3.3.2.4.3 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม ด้วยอุปกรณ์การวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยรูปที่ 3.7 a) เป็นฐานปรับมุม และ b) เป็นลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักฟิล์ม การทดสอบเราทำการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2×4 นิ้ว และสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1.5×1.5 นิ้ว โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มระหว่าง 2 พื้นผิว คือ ผิวฟิล์มกับผิวฟิล์ม โดยทำการเพิ่มมุมของแผ่นปรับมุมทุก ๆ 5 องศา ซึ่งการวัดมุมจะใช้หลักพิทาโกรัสโดยวัดสัดส่วนความยาวของด้านตรงข้ามมุมและด้านชิดกับมุมให้ได้ค่าเท่ากับ $\tan \theta$ ที่มุมต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบเราจะนำฟิล์ม 1.5×1.5 นิ้ว ติดเข้ากับลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนัก และนำฟิล์ม 2×4 นิ้ว ติดเข้ากับฐานปรับมุม จากนั้นนำลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักที่ติดฟิล์มเรียบร้อยแล้ววางลงบนแผ่นฟิล์มที่ติดอยู่กับฐานปรับมุมแล้วทำการปรับมุมจนกว่าลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักที่ติดฟิล์มจะเกิดการไถลและจดค่ามุมเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสมการที่ 3.2

$$\text{Coefficient of friction} = \tan \theta$$

สมการที่ 3.2



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอย่างง่าย a) ฐานปรับมุม b) ลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักฟิล์ม

3.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยืดฟิล์มด้วยระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม

3.3.3.1 ขึ้นรูปฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ cast film extrusion ในระดับอุตสาหกรรม

นำเม็ดพอลิเมอร์ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong 3 และ 5 phr ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วย twin screw extruder ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็น

เวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการหลอมและขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นพลาสติก (Cast film extruder) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ดี.เอช.เอ. สยามวาลา จำกัด โดยใช้อุณหภูมิกระบอกหลอมในช่วง 115, 135, 145, 155, 165 องศาเซลเซียส อุณหภูมิบริเวณหัวตาย 165, 165 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรูประมาณ 40 รอบต่อนาที, อุณหภูมิลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll temperature) ที่ 15 องศาเซลเซียส, ความเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll speed) และความเร็วของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์ม (Nip roll speed) มีความเชื่อมโยงกันโดยใช้ความเร็วอยู่ที่ 10 m/min โดยควบคุมความหนาฟิล์มให้มีความหนา 100 ± 40 ไมโครเมตร ก่อนนำยัดด้วยเครื่องรีด-ยัดฟิล์ม Heat film และชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย roll cutting



รูปที่ 3.12 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) จากบริษัท Modern Machinery Co., Inc. (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ดี.เอช.เอ. สยามวาลา จำกัด)

3.3.3.2 การดึงยัดฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ continuous stretching process

นำฟิล์มที่ขึ้นได้จาก 3.3.3.1 ที่ได้มายัดด้วยเครื่องรีด-ยัดฟิล์ม Heat film (ขวา) และชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย roll cutting (ซ้าย) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แอ็พพลาย ดีบี จำกัด โดยกำหนดการดึงยัด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนแผ่นให้ความร้อนจาก Heat film ที่ 60 องศาเซลเซียส โดยเทียบจากความเร็วรอบของลูกกลิ้งที่บริเวณหน้าเครื่องรีด-ยัดฟิล์มและลูกกลิ้งของชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย โดยกำหนดให้ความเร็วรอบลูกกลิ้งมีความเร็วที่แตกต่างกันของลูกกลิ้งหน้าเครื่องรีด-ยัดฟิล์ม และลูกกลิ้งของชุดลูกกลิ้งดึง

เส้นใยที่ 1.5 และ 2 เท่า และนำฟิล์มที่ผ่านการดึงยึดไปทดสอบสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong



รูปที่ 3.13 เครื่องรีด-ยึดฟิล์ม Heat film [B3F-YM-A07] (ขวา) และชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย roll cutting [B3F-YM-A08] (ซ้าย) (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แอ็พพลาย ดีบี จำกัด)

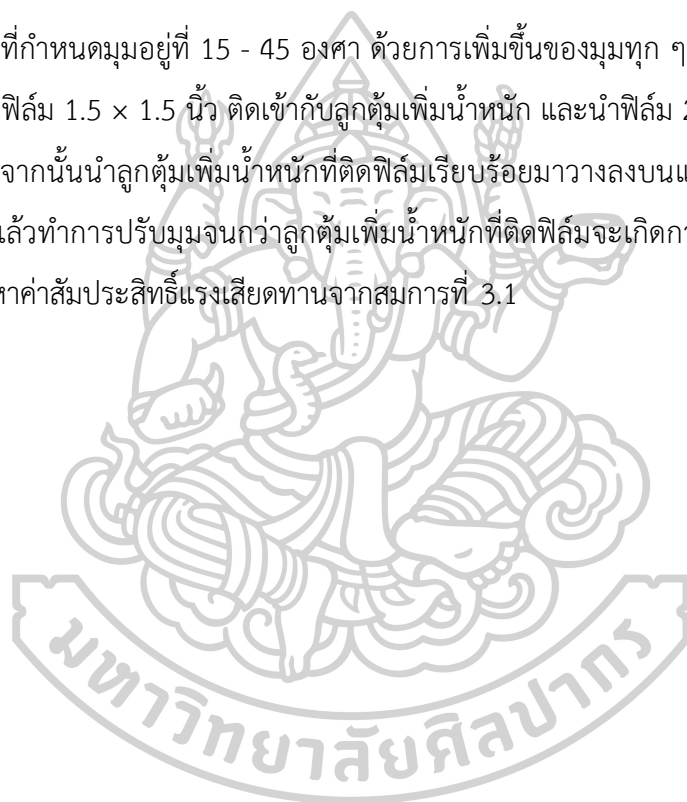
3.3.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการ continuous stretching process

3.3.3.3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มด้วย Tensile test ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS500-5B จากบริษัท นรินทร์อินสทรูเมนต์ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ทำการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1×6 นิ้ว และทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D882 โดยใช้โหลด 5 kN ด้วยอัตราการดึงยึด 50 mm/min

3.3.3.3.2 การศึกษาความยืดหยุ่น (elasticity) ของฟิล์มด้วย Cyclic test ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น NRI-TS500-5B จากบริษัท นรินทร์อินสทรูเมนต์ จำกัด ทำการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1×6 นิ้ว และทำการทดสอบโดยตั้งค่า Max stress = 30 MPa แล้วทำการดึงยึดฟิล์มด้วยอัตราการดึงยึด 50 mm/min จนมีค่า Stress ของฟิล์มถึงค่าที่กำหนด จากนั้นให้เครื่องเลื่อนกลับมาที่จุดเริ่มต้น หรือ Min stress = 0 MPa ด้วยอัตราเร็วเดียวกับอัตราการดึงยึด เพื่อติดตามค่า strain ที่ Max stress และ Min stress เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการคืนตัวกลับของฟิล์มจากสมการที่ 3.2 และดูความยืดหยุ่น

(elasticity) จากพลังงานคืนตัวกลับและพลังงานที่สูญเสียไปจากพื้นที่ใต้โค้งของกราฟ stress-strain curve

3.3.3.3.3 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม ด้วยอุปกรณ์การวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยรูปที่ 3.7 a) เป็นฐานปรับมุม และ b) เป็นลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักฟิล์ม การทดสอบเราทำการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2×4 นิ้ว และสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1.5×1.5 นิ้ว โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มระหว่าง 2 พื้นผิว คือ ผิวฟิล์มกับผิวฟิล์ม โดยทำการเพิ่มมุมของแผ่นปรับความชันที่กำหนดมุมอยู่ที่ 15 - 45 องศา ด้วยการเพิ่มขึ้นของมุมทุก ๆ 5 องศา ซึ่งการทดสอบเราจะนำฟิล์ม 1.5×1.5 นิ้ว ติดเข้ากับลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนัก และนำฟิล์ม 2×4 นิ้ว ติดเข้ากับฐานปรับมุม จากนั้นนำลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักที่ติดฟิล์มเรียบร้อยแล้ววางลงบนแผ่นฟิล์มที่ติดอยู่กับฐานปรับมุมแล้วทำการปรับมุมจนกว่าลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักที่ติดฟิล์มจะเกิดการไถลและจดค่ามุมเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสมการที่ 3.1



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติม Biomax® strong ที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งชนิดเพิ่มการยึดติด (cohesion additive) พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลการดึงยึดในระบบ batch และ continuous stretching process ของฟิล์ม PBAT ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์ โดยผลการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process และอิทธิพลของ Biomax® strong ต่อสมบัติเชิงกล

ส่วนที่ 2 ศึกษาการผสมและการขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่อง และอิทธิพลกระบวนการดึงยึดในระบบ batch stretching process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

ส่วนที่ 3 ศึกษาสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยึดในระดับอุตสาหกรรม

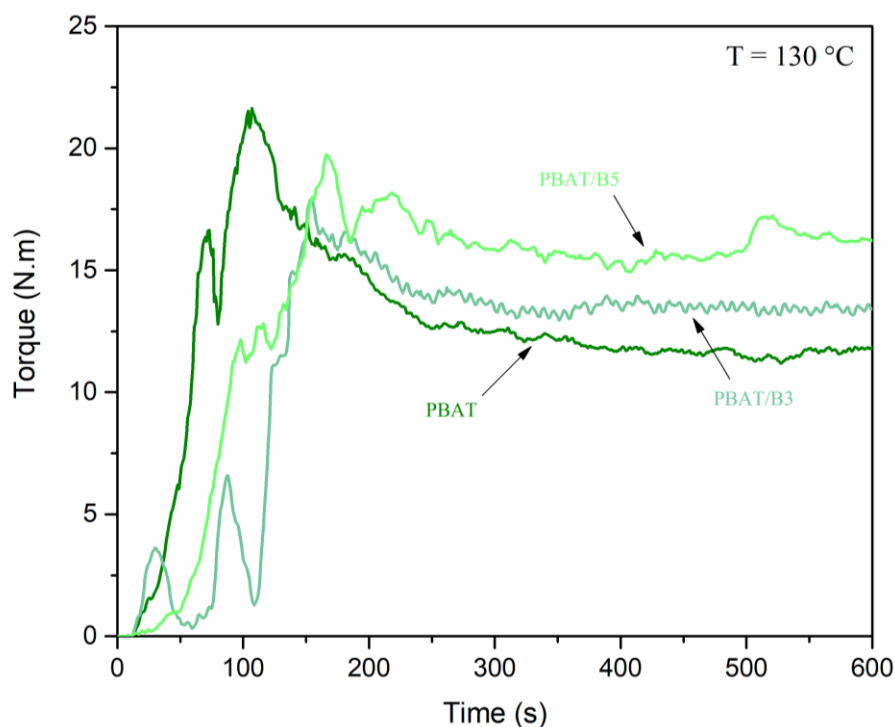
4.1 ศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process และอิทธิพลของ Biomax® strong ต่อสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT

ในส่วนที่ 1 ของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการผสม สมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong 120 ที่ทำหน้าที่เป็น cohesion additive ในปริมาณ 3 phr และ 5 phr โดยทำการผสมในระบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)

4.1.1 ศึกษาค่าแรงบิดในระหว่างการผสมและดัชนีการไหลของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

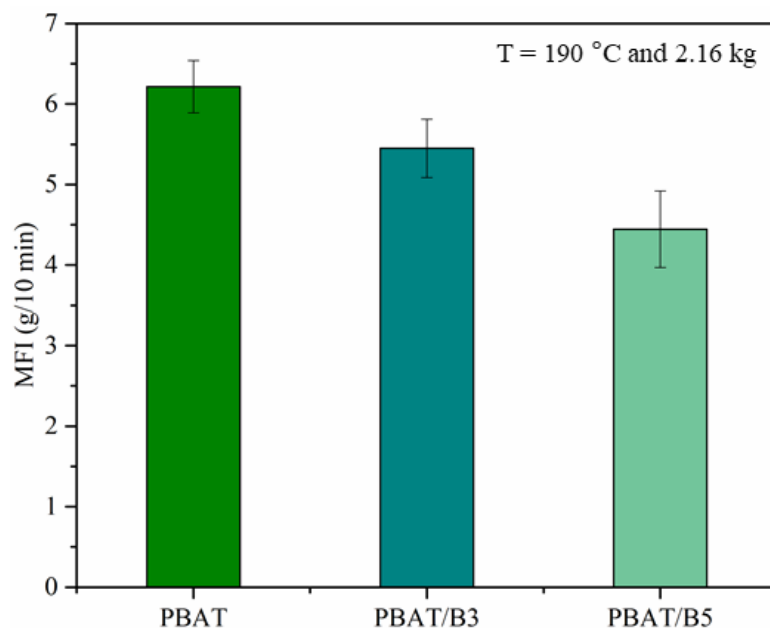
จากการผสม PBAT เข้ากับ Biomax® strong ซึ่งทำหน้าที่เป็น cohesion additive ที่อุณหภูมิ 130 °C ความเร็วรอบในการผสม 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ค่าแรงบิดที่ติดตามได้จากการผสมของ PBAT ที่เติมสารเติมแต่งแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการผสม Biomax® strong 120 ในปริมาณ 3 และ 5 phr (PBAT/B3 และ PBAT/B5)

ส่งผลทำให้ค่าแรงบิดในช่วงเวลา 10 นาที มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก Biomax® strong มีองค์ประกอบเป็น ethylene acrylic copolymer ที่มีลักษณะเป็น elastomer ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลที่ค่อนข้างสูง [27] ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมใน chamber ของเครื่อง internal mixer มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่อุณหภูมิการผสม 130°C

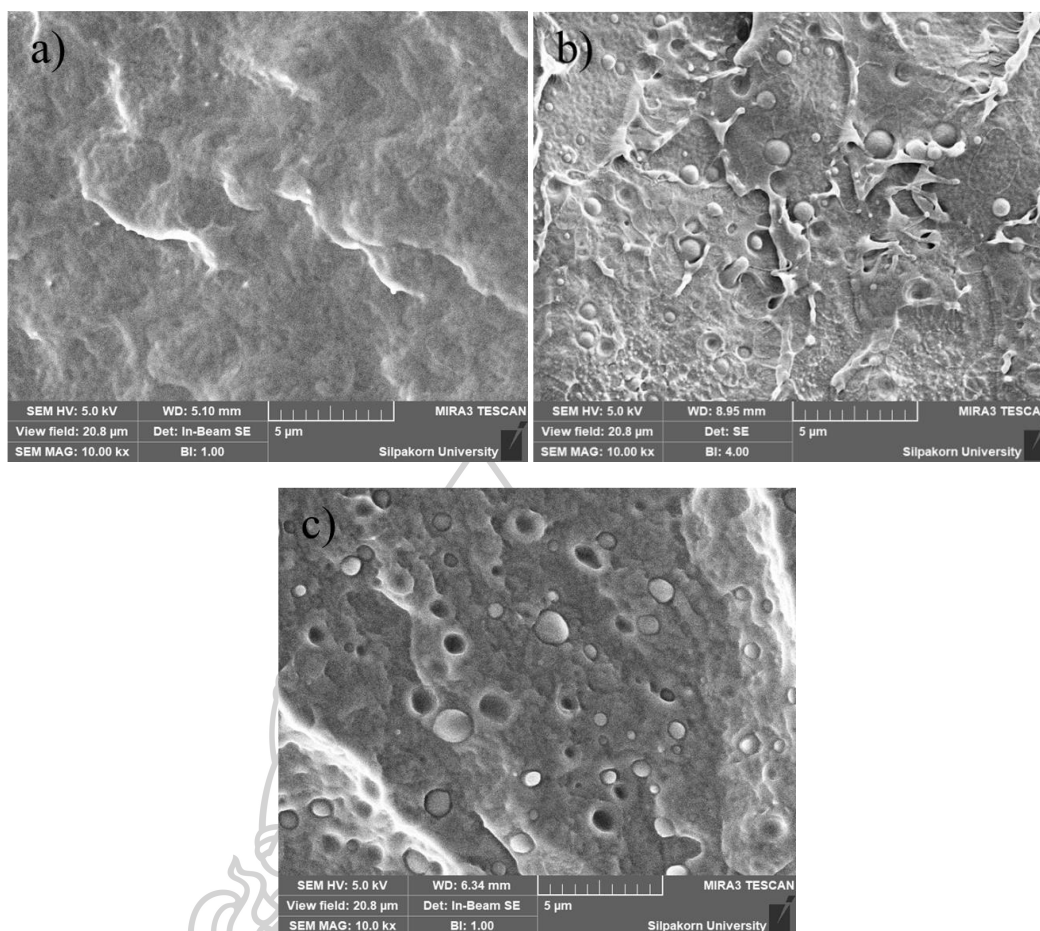
จากการทดสอบสมบัติการไหลที่อุณหภูมิ 190 °C ของพอลิเมอร์หลังผ่านการผสมในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการไหลผ่านค่า melt flow index (MFI) จากรูปที่ 4.2 พบว่า PBAT มีค่า MFI เท่ากับ 6.2 ± 0.3 กรัม/10 นาที เมื่อทำการเติมสารเติมแต่ง Biomax® strong ลงไปในปริมาณ 3 phr และ 5 phr ค่า MFI มีค่าลดลงเป็น 5.5 ± 0.4 กรัม/10นาที และ 4.4 ± 0.5 กรัม/10นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติม Biomax® strong ทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าแรงบิดในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ของ PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 190 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม

4.1.2 ศึกษาผลลักษณะสัณฐานวิทยาหลังการผสม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การทดสอบสัณฐานวิทยาบริเวณผิวการแตกหักของชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong (PBAT/B3 และ PBAT/B5) ที่ทำหน้าที่เป็น cohesion additive ด้วยกำลังขยาย 10,000 เท่า เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่มีการเติมสารเติมแต่ง Biomax® strong 3 และ 5 phr จะสังเกตเห็นอนุภาคของ Biomax® strong กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในเมทริกซ์ของ PBAT โดยอนุภาค Biomax® strong ที่แทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ PBAT ไม่เกิด interfacial adhesion กับเมทริกซ์ PBAT ซึ่งสังเกตได้จากขอบของอนุภาค Biomax® strong มีการแบ่งแยกกันชัดเจนระหว่างอนุภาค Biomax® strong และเมทริกซ์ PBAT ซึ่งขนาดอนุภาคของเฟสกระจายเมื่อเติม Biomax® strong 3 phr จะมีขนาดตั้งแต่ 0.25 - 1.25 μm และเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 5 phr จะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเป็น 0.5 - 1.75 μm ขนาดของ Biomax® strong ที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรแสดงให้เห็น Biomax® strong เข้ากันได้บางส่วนกับเมทริกซ์ PBAT

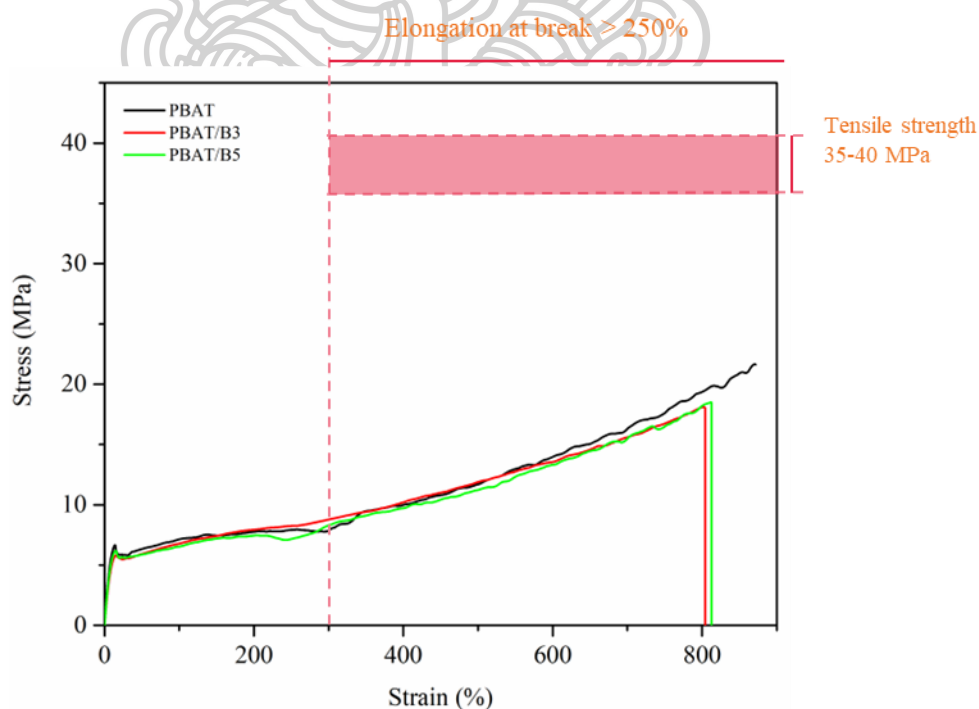


รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ผ่านการกดอัดขึ้นรูปของ a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 ที่ทำในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ

4.1.3 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong หลังการผสมในเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดให้ได้เป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำมาแผ่นฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยอัตราการดึงยืด 50 mm/min เมื่อพิจารณาฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มการยึดติด พบว่าลักษณะกราฟ stress-strain แสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะชิ้นงานแบบเหนียว (ductile) โดยสังเกตจากการมีการเกิดจุด yield ที่ชัดเจน มีการเกิด necking เกิดขึ้น [23] จากกราฟ stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT ฟิล์มไม่เกิดการขาด โดยค่า Young's modulus, tensile strength และ Young's modulus แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีค่า elongation at break มากกว่า 872% เป็นค่าสูงสุดของ limit การดึงยืดของเครื่อง universal testing machine มีค่า tensile strength เท่ากับ 21.7 MPa และมีค่า Young's modulus เท่ากับ

85.3 MPa แต่เมื่อทำการเติม Biomax® strong ในปริมาณ 3 และ 5 phr ซึ่งเป็นสารเพิ่มการยึดติด (cohesion additive) เข้ากับ PBAT (PBAT/B3 และ PBAT/B5) ส่งผลทำให้ค่า elongation at break และ tensile strength ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผลสัมฤทธิ์ทางวิทยาของ PBAT/B3 และ PBAT/B5 ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ Biomax® strong ไม่เกิด interfacial adhesion กับเมทริกซ์ PBAT แต่มีขนาดอนุภาคที่เล็กระดับไมครอนแสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนระหว่างอนุภาค Biomax® strong กับเมทริกซ์ PBAT ทำให้เกิดเป็นจุดศูนย์รวมแรงให้กับชิ้นงาน จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการขาดง่ายขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเติม Biomax® strong ที่ 3 phr และ 5 phr จะมีค่า elongation at break, tensile strength และ Young's modulus แทบจะไม่มี ความแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการเติม Biomax® strong ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์มคลิงก์ LLDPE [1-3] (แถบสีแดงในรูปที่ 4.4) ซึ่งมีค่า tensile strength ในช่วง 35-40 MPa และมี Elongation at break ไม่ต่ำกว่า 250% เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า tensile strength ของ PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ไม่มีสูตรใดเลยที่มีค่าอยู่ในช่วงของฟิล์มคลิงก์ LLDPE จึงต้องนำฟิล์ม PBAT ไปผ่านกระบวนการในการดึงยืด (stretching process) เพื่อเพิ่มค่า tensile strength ของฟิล์ม



รูปที่ 4.4 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

ตารางที่ 4.1 ค่า Young's modulus, tensile strength และ elongation at break ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

| Samples | Young's modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) |
|---------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| PBAT | 85.3 ± 0.5 | 21.7 ± 0.1 | > 872 |
| PBAT/B3 | 68.0 ± 0.7 | 18.4 ± 0.9 | 802 ± 29 |
| PBAT/B5 | 77.5 ± 2.0 | 19.2 ± 0.9 | 816 ± 26 |

ดังนั้นจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติม Biomax® strong ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงไม่เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT ขึ้นต่อไปจึงนำไปศึกษาต่อด้วยการผสมและขึ้นรูปด้วยระบบต่อเนื่องและนำไปผ่านกระบวนการ batch stretching process

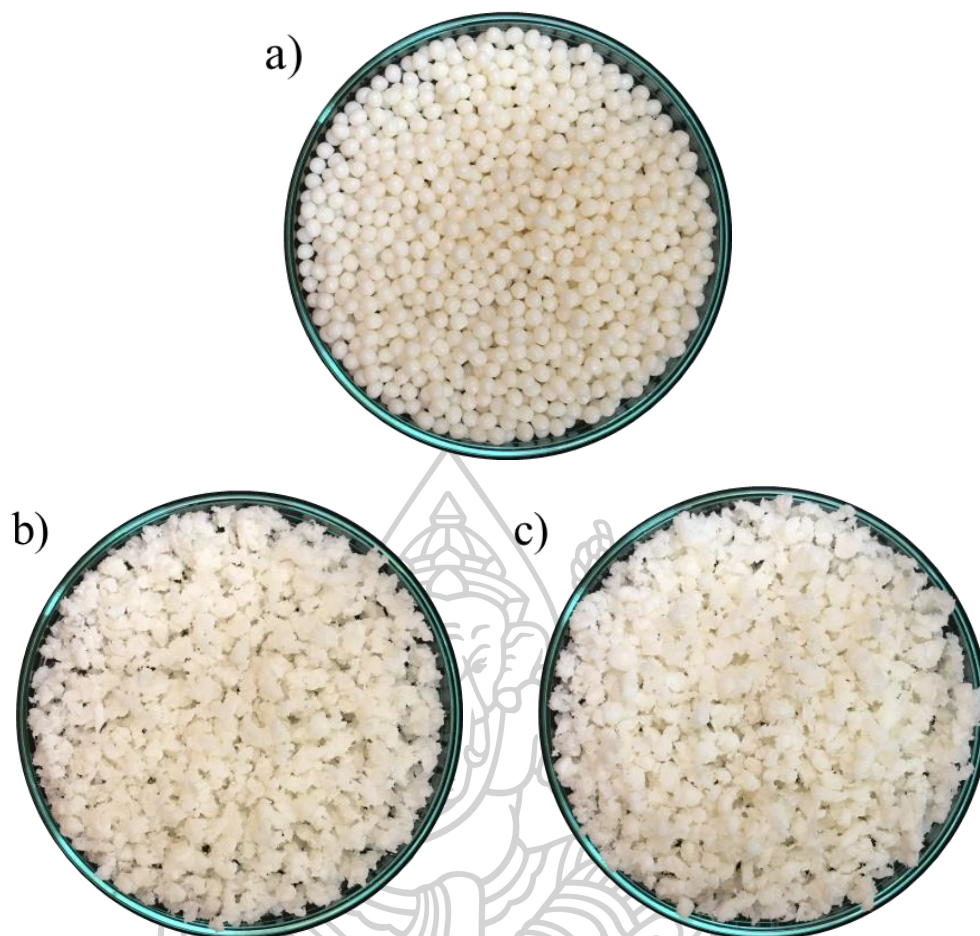
4.2 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่อง และอิทธิพลกระบวนการดัดยัดในระบบ batch stretching process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

จากศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process ด้วยเครื่อง internal mixer และขึ้นรูปฟิล์มด้วย compression molding สมบัติเชิงกลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ในส่วนที่ 1 การเติม Biomax® strong ที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งชนิดเพิ่มการยึดติด ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PBAT ให้ดีขึ้นได้ แต่พบว่าการเติม Biomax® strong จะไปปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT ให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยในส่วนที่ 2 จะทำการผสมและขึ้นรูปเม็ดพลาสติกในระบบ continuous mixing process ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) โดยทำการควบคุมความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ให้ได้ประมาณ $100 \pm 20 \mu\text{m}$ จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปผ่านกระบวนการดัดยัดในระบบ batch stretching process ด้วยเครื่อง uniaxial machine เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT

4.2.1 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่องและลักษณะฟิล์มก่อนและหลังผ่าน การดึงยืดในระบบ batch stretching process ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การผสม PBAT กับ Biomax® strong ในระบบต่อเนื่อง (continuous mixing process) ด้วยเครื่อง twin-screw extruder ที่อุณหภูมิการผสม 85-145 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบในการผสม 200-300 รอบ/นาที ในขณะที่การขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปออกมาเป็นเส้น extrudate ได้ทั้งปริมาณการเติม Biomax® strong ที่ 3 phr และ 5 phr แต่เมื่อนำไปเข้าเครื่องตัดเม็ดพบว่าไม่สามารถตัดเส้น extrudate ให้ขาดออกได้ จึงต้องนำเส้น extrudate มาขดให้เป็นก้อนเพื่อนำไปเข้าเครื่อง grider เพื่อบดออกมาเป็นเม็ดพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยรูป a) เป็นเม็ด virgin PBAT ส่วน b) และ c) เป็นเม็ด PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่ได้จากกระบวนการผสมในระบบต่อเนื่องตามลำดับ จะเห็นว่าเม็ดที่ได้จากกระบวนการผสมในระบบต่อเนื่องเมื่อทำการบดด้วยเครื่อง grider เม็ดจะมีผิวที่ขรุขระและมีเล็กใหญ่ไม่เท่ากัน

เมื่อนำเม็ด PBAT และ PBAT/B3 และ PBAT/B5 มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการ cast film extrusion โดยใช้อุณหภูมิกระบอกลอมในช่วง 105-150 องศาเซลเซียส อุณหภูมิบริเวณหัวตาย 160 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบสกรูประมาณ 35-45 รอบต่อนาที, อุณหภูมิลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll temperature) ที่ 25 องศาเซลเซียส, ความเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll speed) 1-1.5 m/min และความเร็วของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์ม (Nip roll speed) 1.5-2.5 m/min โดยควบคุมความหนาฟิล์มให้มีความหนา 100 ± 20 ไมโครเมตร ในขณะที่การขึ้นรูป เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหน้า die มาที่บริเวณลูกกลิ้งหล่อเย็น จนพอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวได้ออกมาเป็นแผ่นฟิล์ม



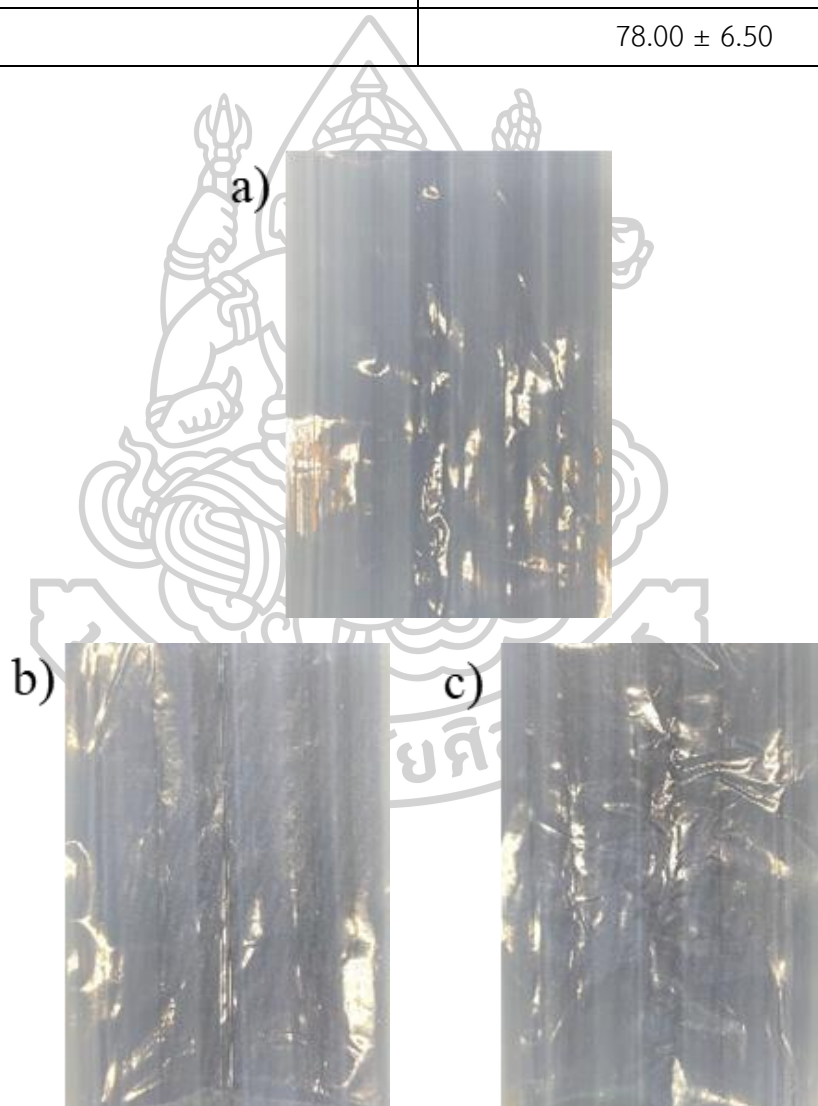
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะเม็ดพอลิเมอร์ผสมในระบบต่อเนื่องจาก twin-screw extruder a) virgin PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5

ซึ่งพบว่าฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 มีการเกาะติดที่บริเวณลูกกลิ้งหล่อเย็นเมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มไปได้ระยะหนึ่งฟิล์มจะเกาะติดกับลูกกลิ้งหล่อเย็นขึ้นมาเรื่อย ๆ จนทำให้ฟิล์มเกิดการขาดและในสูตร PBAT/B3 และ PBAT/B5 จะมีการเกาะติดลูกกลิ้งหล่อเย็นมากยิ่งขึ้น ในการขึ้นรูปฟิล์มจึงต้องใช้ความเร็วรอบสกรู ความเร็วรอบของลูกกลิ้งหล่อเย็น และความเร็วของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์มต่ำ เพื่อให้เกิดการยึดติดของฟิล์มที่บริเวณลูกกลิ้งหล่อเย็นที่ช้ายิ่งขึ้น โดยความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยทำการวัดความหนา 9 จุดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จะพบว่าความหนาของฟิล์ม PBAT/B3 และ PBAT/B5 มีความบางมากกว่าฟิล์ม PBAT เนื่องจากต้องใช้ความเร็วในการขึ้นรูปที่ต่ำกว่าเพื่อลดการเกิดการติดของฟิล์มที่ลูกกลิ้งหล่อเย็น และลักษณะผิวฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong (PBAT/B3 และ

PBAT/B5) फिल्मจะมีความยับ และมีการยึดติดระหว่างผิวฟิล์มกับผิวฟิล์มมากกว่าฟิล์ม PBAT เนื่องจากอนุภาคของ Biomax® strong กระจายตัวอยู่ในเนื้อฟิล์ม PBAT

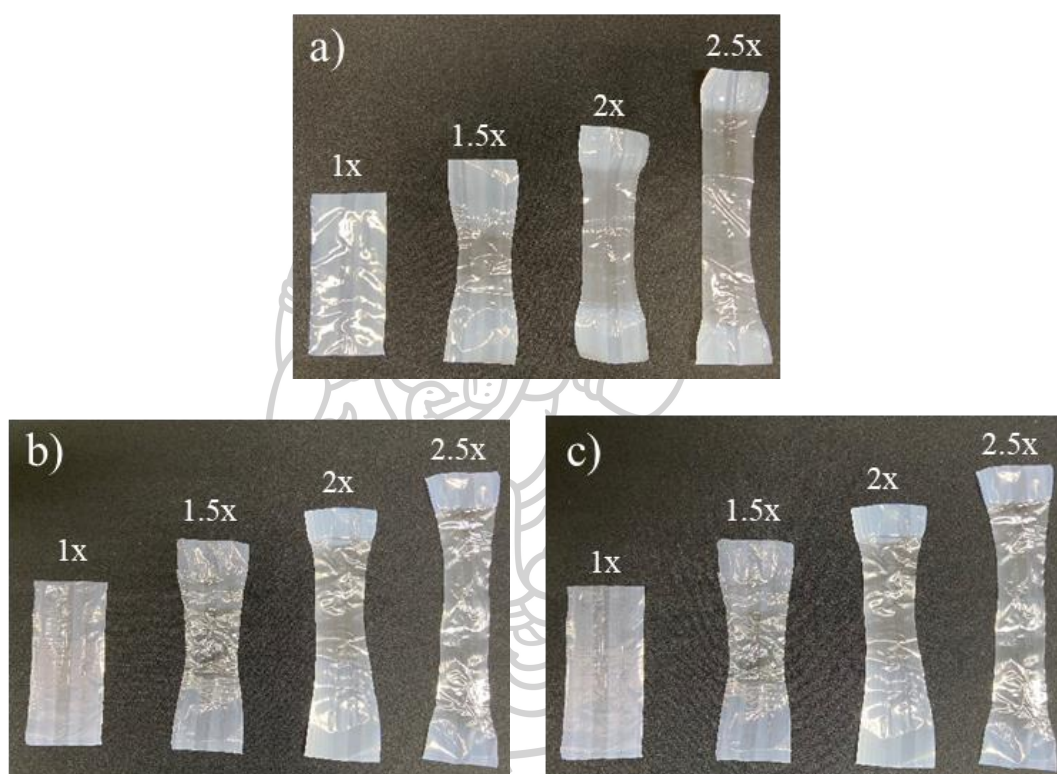
ตารางที่ 4.2 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ cast film extrusion

| Samples | ความหนาเฉลี่ย (μm) |
|---------|---------------------------------|
| PBAT | 97.00 ± 4.35 |
| PBAT/B3 | 83.08 ± 10.33 |
| PBAT/B5 | 78.00 ± 6.50 |



รูปที่ 4.6 ลักษณะผิวฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong จากเครื่อง cast film extruder a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5

การดึงยืดฟิล์มในกระบวนการ batch stretching process ด้วยเครื่อง uniaxial machine ในสภาวะการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจาก heat gun ด้วยอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส โดยทำการดึงยืดด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเดิม (1.5x, 2x และ 2.5x) โดยลักษณะทางกายภาพของฟิล์มก่อนและหลังการดึงยืดแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อทำการดึงยืดที่จำนวนเท่าที่เพิ่มมากขึ้นความกว้างฟิล์มจะเกิดการคอดเล็กน้อย ความยาวฟิล์มเพิ่มมากขึ้น และความหนาของฟิล์มจะมีค่าที่ลดลง

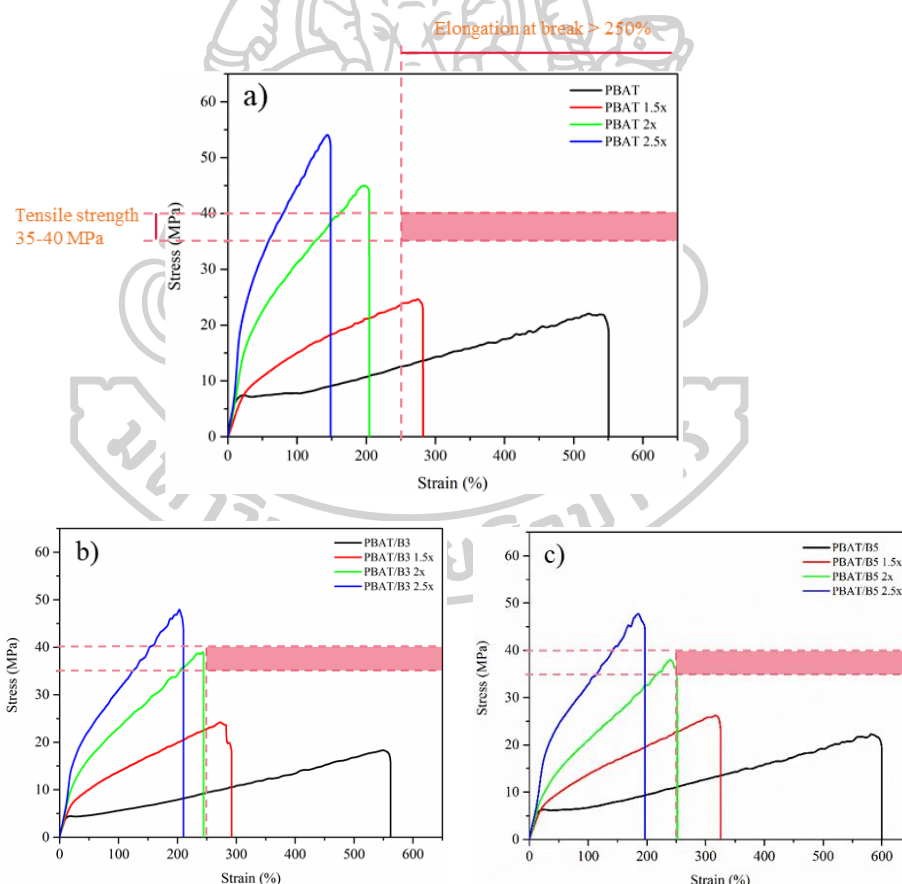


รูปที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5

4.2.1 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การศึกษาค่าอิทธิพลการดึงยืดในระบบ batch stretching process ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong โดยนำฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) มาทำการดึงยืดด้วยเครื่อง uniaxial machine ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1.5x, 2x และ 2.5x) โดยทำการยืดในสภาวะที่มีการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจาก

heat gun ด้วยอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำฟิล์มที่ผ่านการดึงยืดมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยอัตราการดึงยืด 50 mm/min โดยกราฟ stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืด จากการทดสอบ tensile test แสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อทำการพิจารณาความชันของกราฟ stress-strain curve ซึ่งบ่งบอกถึงค่า modulus ของชิ้นงาน พบว่าความชันที่ตำแหน่ง Strain = 100% เมื่อทำการดึงยืดด้วยการดึงยืดที่จำนวนเท่าเพิ่มสูงขึ้นความชันของกราฟจะมีความชันที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิด strain hardening effect ซึ่งส่งผลทำให้ค่า tensile stress ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [23] เนื่องจากการเกิดการจัดเรียงตัวกันตามแนวแรงการดึงของเครื่อง uniaxial machine ของสายโซ่ PBAT ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [28] แต่ในขณะเดียวกันจะส่งผลทำให้ elongation at break ของชิ้นงานลดลงเมื่อดึงยืดด้วยจำนวนเท่าที่เพิ่มขึ้น



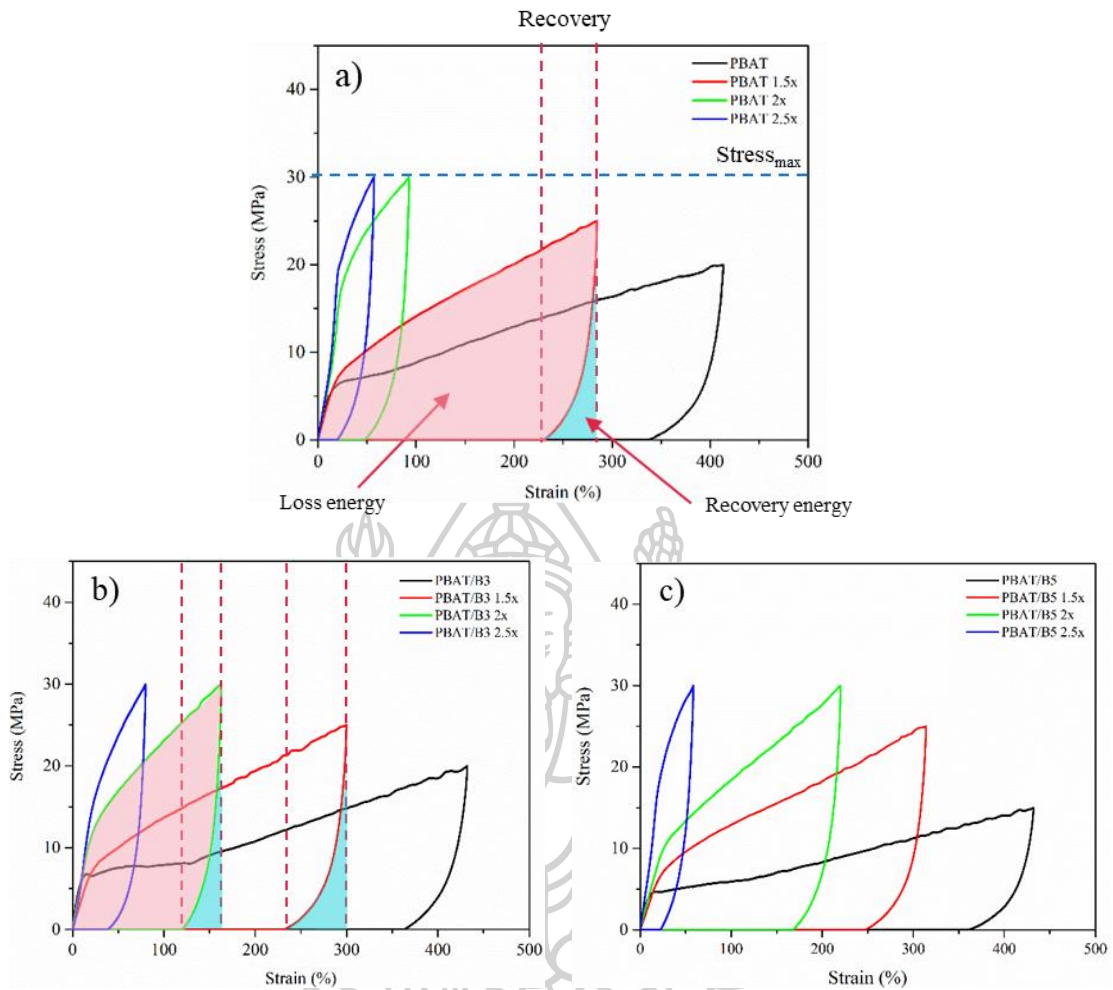
รูปที่ 4.8 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ tensile test

โดยสมบัติเชิงกลที่สนใจในการนำมาใช้ตัดสินความเหมาะสมในการใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์ จะพิจารณาสมบัติเชิงกลสำคัญอยู่ 2 อย่าง คือ tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม เนื่องจากการใช้งานของฟิล์มคลิงก์ต้องทนต่อการขาดในขณะห่อหุ้มวัสดุและสามารถยึดตัวได้ในระดับหนึ่งเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหักของฟิล์มที่ง่ายเกินไปเมื่อถูกดึงยึด โดยช่วง tensile strength ของฟิล์มคลิงก์ LLDPE ในท้องตลาดมีค่าอยู่ในช่วง 35 - 40 MPa และ elongation at break ไม่น้อยกว่า 250% [1-3] ซึ่งแสดงให้เห็นโซนกรอบสีแดงในรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ที่ผ่านการดึงยึดในกระบวนการ batch stretching process พบว่าเมื่อพิจารณาค่า tensile strength ของ PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 จะมีค่าเพียงพอต่อการนำไปใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์เมื่อทำการดึงยึดที่ 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น และเมื่อพิจารณา elongation at break จะพบว่าฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 เมื่อผ่านการดึงยึดที่ 1.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้นจะมีค่าที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน แต่เมื่อทำการดึงยึดที่ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้นจะพบว่ามีเพียงฟิล์ม PBAT/B5 ที่มีค่า elongation at break เฉลี่ยเท่ากับ $256 \pm 12\%$ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานพอดี แต่ฟิล์ม PBAT/B3 มีค่า elongation at break เฉลี่ยเท่ากับ $230 \pm 16\%$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมเพียงเล็กน้อย ส่วนการดึงยึดที่ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้นมีค่า elongation at break ที่ต่ำเกินไป ดังนั้นจำนวนเท่าที่จะนำไปศึกษาในกระบวนการดึงยึดในระบบ continuous process ในระดับอุตสาหกรรมคือการดึงยึดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น

4.2.2 ศึกษาความยืดหยุ่น และอิทธิพลการดึงยึดในระบบ batch stretching process ที่มีผลความยืดหยุ่นของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การศึกษาค่าการคืนตัวกลับและพื้นที่ใต้กราฟของ stress-strain curve ที่ได้จากการทดสอบ cyclic test เพื่อบ่งบอกความยืดหยุ่นของฟิล์มเพื่อให้ฟิล์มเมื่อทำการยึดหุ้มวัสดุแล้วสามารถคืนตัวกลับเพื่อห่อและยึดติดกับวัสดุได้ดี โดยทำการทดสอบ cyclic test ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ทำการทดสอบโดยตั้งค่า Max stress = 30 MPa เนื่องจากค่า tensile strength ของฟิล์ม LLDPE ในท้องตลาดมีค่าที่เหมาะสมในช่วง 35 - 45 MPa จึงกำหนดให้ค่าการทดสอบต่ำกว่าเล็กน้อย แล้วทำการดึงยึดฟิล์มด้วยอัตราการดึงยึด 50 mm/min จนมีค่า Stress ของฟิล์มถึงค่าที่กำหนดจากนั้นให้เครื่องเลื่อน cross head ด้านบนกลับมาที่จุดเริ่มต้น หรือ Min stress = 0 MPa ด้วยอัตราเร็วเดียวกับอัตราการดึงยึด เพื่อติดตามค่า strain ที่ Max stress และ Min stress เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการคืนตัวกลับของฟิล์มจากสมการที่ 3.2 โดยในการทดสอบพบว่าฟิล์มก่อนผ่าน

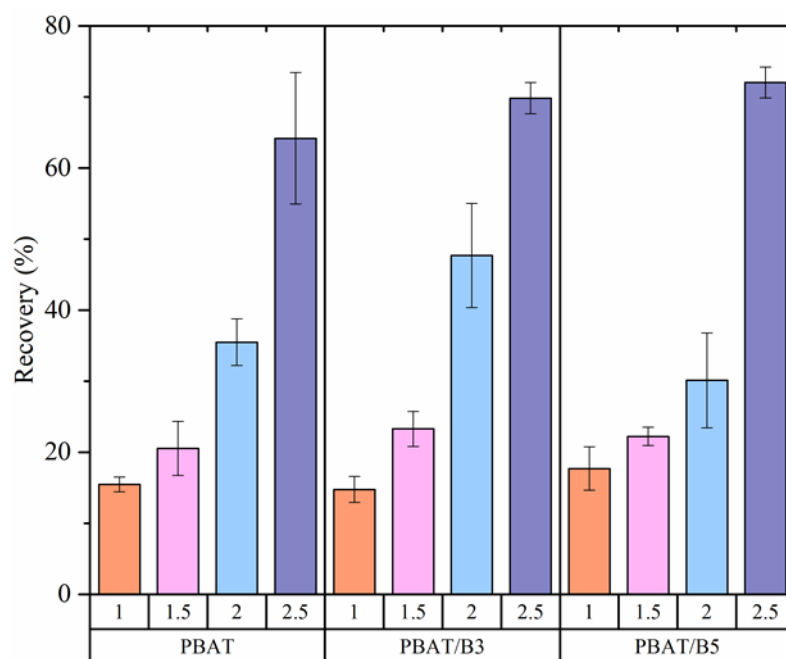
การดึงยืดและหลังผ่านการดึงยืดที่ 1.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้นต้องทำการทดสอบที่ค่า Max stress ในช่วง 15-25 MPa เนื่องจากค่า Tensile strength ของฟิล์มมีค่าไม่ถึง 30 MPa เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟ stress-strain curve ในการทดสอบ cyclic test บ่งบอกถึงพลังงานที่สูญเสีย (Loss energy) ไปในส่วนของชิ้นงานเกิดการเสียรูป (deform) ใน 1 cycle (แสดงตัวอย่างในพื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.9 a.) ซึ่งเปรียบเทียบกับ Loss modulus ของฟิล์ม และสามารถสังเกตพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับ (recovery energy) ของชิ้นงานได้จากส่วนโค้งของกราฟในช่วงค่า strain ที่ Max stress และ Min stress (แสดงตัวอย่างในพื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.9 a.) ซึ่งเปรียบเทียบกับ Storage modulus ของฟิล์ม จากกราฟ stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ทั้งก่อนและหลังผ่านการดึงยืดในระบบ batch stretching process ในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อทำการทดสอบจนครบ 1 cycle จะพบว่าฟิล์มก่อนผ่านกระบวนการดึงยืดจะมีพื้นที่ใต้กราฟที่มากที่สุดนั่นคือมีการสูญเสียพลังงานในส่วนที่ชิ้นงานเกิดการเสียรูปมากที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อฟิล์มผ่านกระบวนการดึงยืดฟิล์มที่การดึงยืดที่จำนวนเท่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟหรือพลังงานในการคืนตัวกลับของชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นฟิล์มก่อนหรือหลังผ่านกระบวนการดึงยืด พบว่าจะมีพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นในบริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.9 b.) เมื่อนำพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับมาเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไป ซึ่งเป็นตัวแปรระหว่าง storage modulus กับ loss modulus พบว่าเมื่อทำการดึงยืดที่จำนวนเท่าเพิ่มขึ้นสัดส่วนพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับจะมีอิทธิพลเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากส่วนของพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับมีค่าพอ ๆ เดิม แต่ส่วนของพลังงานที่สูญเสียไปของชิ้นงานมีค่าที่ลดน้อยลง ซึ่ง storage modulus แสดงถึงพฤติกรรมความเป็น elastic ของชิ้นงาน เมื่อทำการดึงยืดที่จำนวนเท่าที่เพิ่มมากขึ้นความเป็น elastic ของฟิล์มก็จะมีความเป็น elastic ที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.9 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ cycle test

เมื่อพิจารณาค่าการคืนตัวกลับ (recovery) ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ที่การดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) คำนวณได้จากค่า strain ที่ max stress และ min strain แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong หลังผ่านการดึงยืดที่จำนวนเท่าที่สูงขึ้น จะมีค่าการคืนตัวกลับที่สูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดเมื่อทำการดึงยืดที่ 2.5 เท่าจากความยาวเดิม ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่สูญเสียไปและพลังงานที่คงเหลือในการคืนตัวกลับที่พิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟ stress-strain curve ในรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงถึง

ความเป็น elastic ของฟิล์ม เมื่อผ่านการดึงยืดที่จำนวนเท่าที่สูงขึ้นก็จะมีความเป็น elastic ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าการคืนตัวกลับที่มากขึ้น

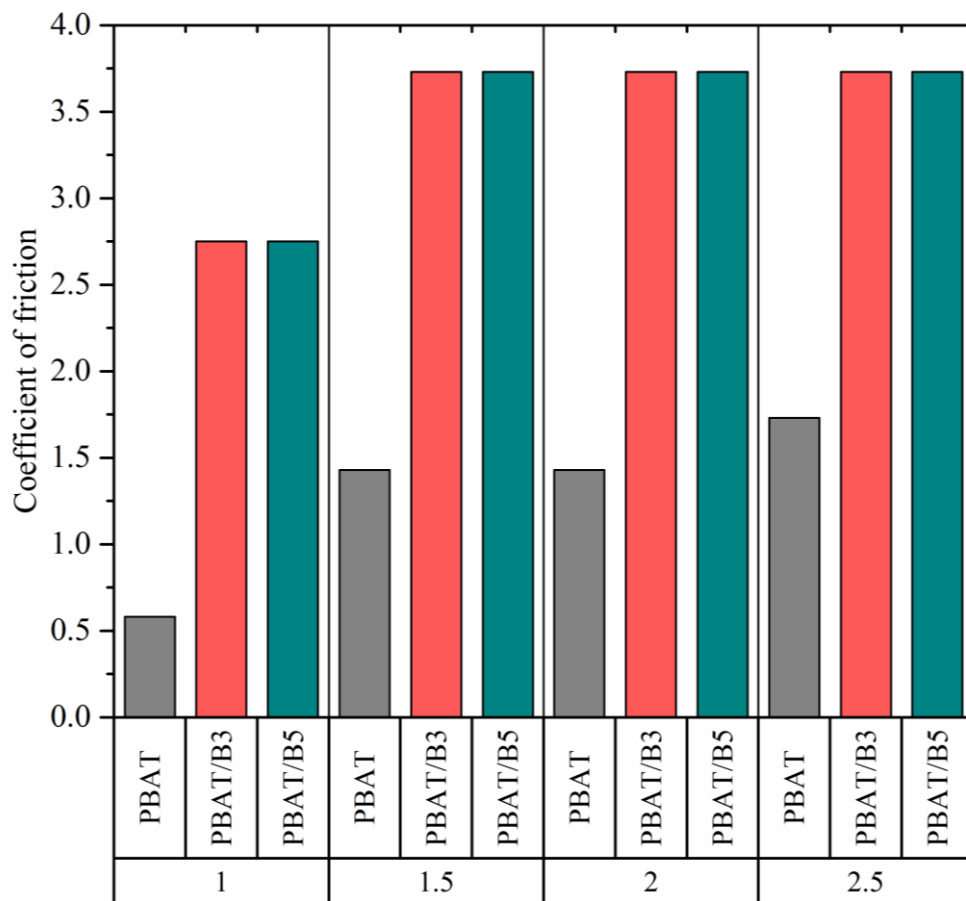


รูปที่ 4.10 ค่าการคืนตัวกลับของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x)

4.2.3 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดในระบบ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x) ซึ่งทำการทดสอบโดยการเพิ่มมุมของแผ่นปรับความชันทุก ๆ 5 องศา แล้วนำมุมก่อนที่ลูกตุ้มเพิ่มน้ำหนักที่ติดแผ่นฟิล์มเกิดการไถลมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม พบว่าจากรูปที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT ที่ขึ้นรูปในระบบต่อเนื่องด้วยเครื่อง cast film extruder ก่อนทำการดึงยืดในระบบ batch stretching process ด้วยเครื่อง uniaxial machine มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง

ผิวฟิล์มกับฟิล์มเท่ากับ 0.58 เมื่อทำการการเติม Biomax® strong 3 phr และ 5 phr ลงไป (PBAT/B3 และ PBAT/B5) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.75 เมื่อทำการดึงยืดฟิล์ม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ PBAT มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เป็น 1.73 เมื่อทำการดึงยืดฟิล์ม 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น และ 3.73 เมื่อทำการดึงยืดฟิล์ม 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น และ PBAT/B3 และ PBAT/B5 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 3.73 เมื่อทำการดึงยืดฟิล์ม 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น ดังนั้นการยืดฟิล์มสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong มีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้



รูปที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ batch stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5, 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x, 2x และ 2.5x)

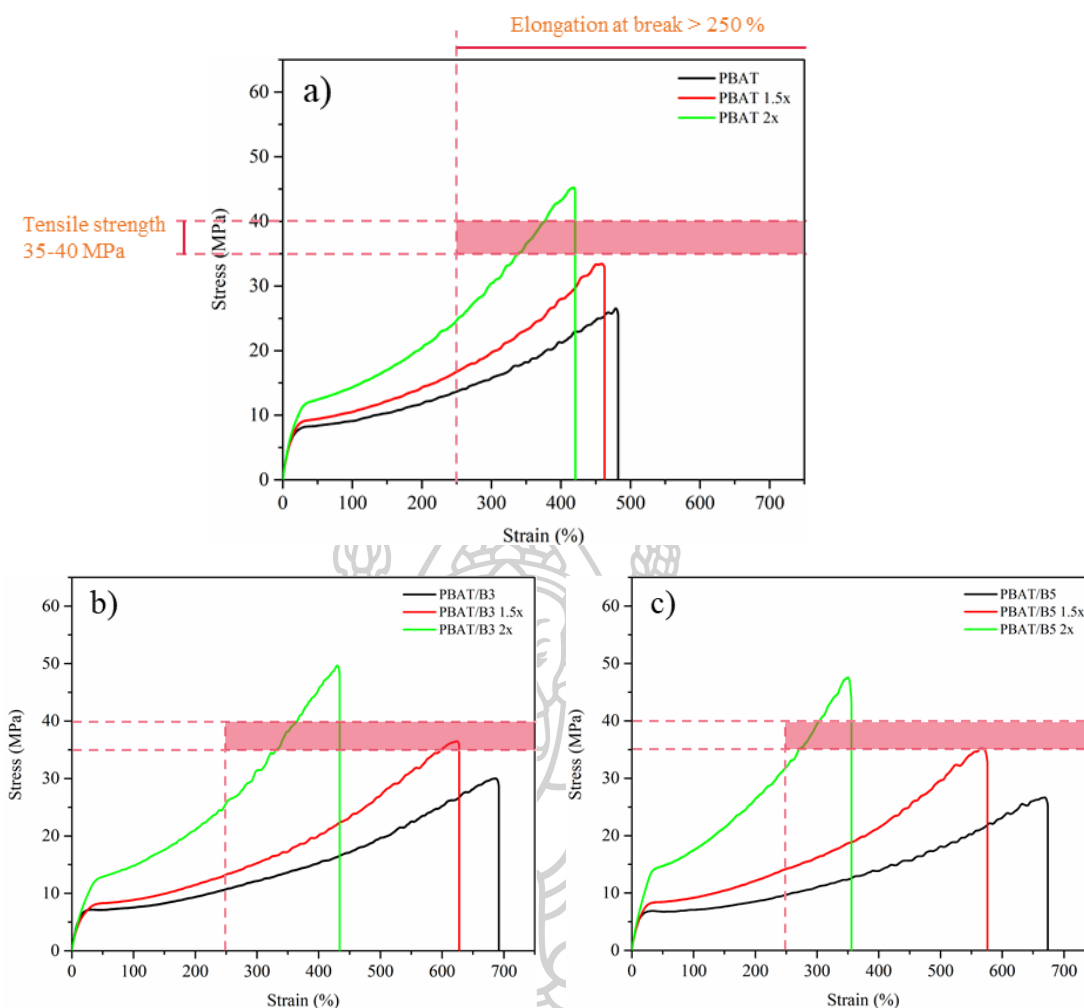
4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยืดฟิล์มด้วยระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม

จากการศึกษาอิทธิพลของการดึงยืดในระบบ batch stretching process ต่อสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong พบว่ามีค่า tensile strength และ elongation at break ที่ใกล้เคียงและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานเป็นฟิล์มคลึงที่การดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น จึงเลือก 2 จำนวนเท่านี้ มาทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยืดฟิล์มด้วยระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม โดยนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่อง cast film extruder ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ดี.เอช.เอ สยาม วาลา จำกัด และนำฟิล์มที่ได้ไปยืดในระบบ continuous stretching process ด้วยเครื่อง เครื่องรีด-ยืดฟิล์ม Heat film และชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย roll cutting ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แอ็พพลาย ดีบี จำกัด โดยกำหนดการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนด้วยแผ่นร้อนจากเครื่อง Heat film ที่ 60 องศาเซลเซียส โดยเทียบจากความเร็รรอบของลูกกลิ้งที่บริเวณหน้าเครื่องรีด-ยืดฟิล์มและลูกกลิ้งของชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย โดยกำหนดให้ความเร็รรอบลูกกลิ้งมีความเร็วที่ต่างกันของลูกกลิ้งหน้าเครื่องรีด-ยืดฟิล์ม และลูกกลิ้งของชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย ที่ 1.5 และ 2 เท่า และนำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

4.3.1 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่มีผลสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การศึกษาดังกล่าวดำเนินการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong โดยนำฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) จากบริษัท ดี.เอช.เอ สยามวาลา จำกัด โดยใช้อุณหภูมิกระบอกหลอมในช่วง 115-165 องศาเซลเซียส อุณหภูมิบริเวณหัวตาย 165 องศาเซลเซียส ความเร็รรอบสกรูประมาณ 40 รอบต่อนาที, อุณหภูมิลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll temperature) ที่ 15 องศาเซลเซียส, ความเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll speed) และความเร็วของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์ม (Nip roll speed) มีความเชื่อมโยงกันโดยใช้ความเร็วอยู่ที่ 10 m/min โดยควบคุมความหนา 100 μm และมีความกว้าง 50 cm มาทำการดึงยืดด้วยเครื่องรีด-ยืดฟิล์ม Heat film และชุดลูกกลิ้งดึงเส้นใย roll cutting ที่บริษัท แอ็พพลาย ดีบี จำกัด ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1.5x และ 2x) โดยทำการ

ยึดในสภาวะที่มีการให้ความร้อนด้วยแผ่นร้อนจาก heat film ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำฟิล์มที่ผ่านการดึงยึดมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยอัตราการดึงยึด 50 mm/min เมื่อพิจารณากราฟ stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม cohesion additive ก่อนและหลังผ่านการดึงยึดด้วยกระบวนการ continuous stretching process แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าความชันของกราฟ stress-strain ของฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูปและการดึงยึดในระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรมมีความชันที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ strain = 100% ซึ่งแสดงถึงการเกิด strain hardening effect ทำให้มีค่า tensile strength ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดการจัดเรียงตัวกันตามแนวแรงการดึงของเครื่องรีดยึดฟิล์มของสายโซ่ PBAT ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์มคลิงก์ LLDPE ในท้องตลาดซึ่งมีค่า tensile strength ในช่วง 35-40 MPa และมีค่า elongation at break ไม่น้อยกว่า 250% ที่แสดงในโซนสีแดงในรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม cohesion additive ที่ผ่านการดึงยึดในกระบวนการ continuous stretching process พบว่าเมื่อพิจารณาค่า tensile strength ของ PBAT/B3 จะมีค่าเพียงพอต่อการนำไปใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์เมื่อทำการดึงยึดที่การดึงยึด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น ส่วนฟิล์ม PBAT และ PBAT/B5 จะมีค่าที่เหมาะสมเมื่อทำการดึงยึดที่ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น โดยในการดึงยึดของฟิล์ม PBAT และ PBAT/B5 ที่การดึงยึด 1.5 เท่าจากความยาวเดิมมีค่า tensile strength น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ไม่น่ามีปัญหาต่อการนำไปใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 33.5 ± 2.1 และ 34.7 ± 2.2 MPa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า elongation at break พบว่าฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 เมื่อทำการดึงยึดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น มีค่า elongation at break ไม่ต่ำกว่า 250% ซึ่งมีค่าเพียงพอต่อการนำไปใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์

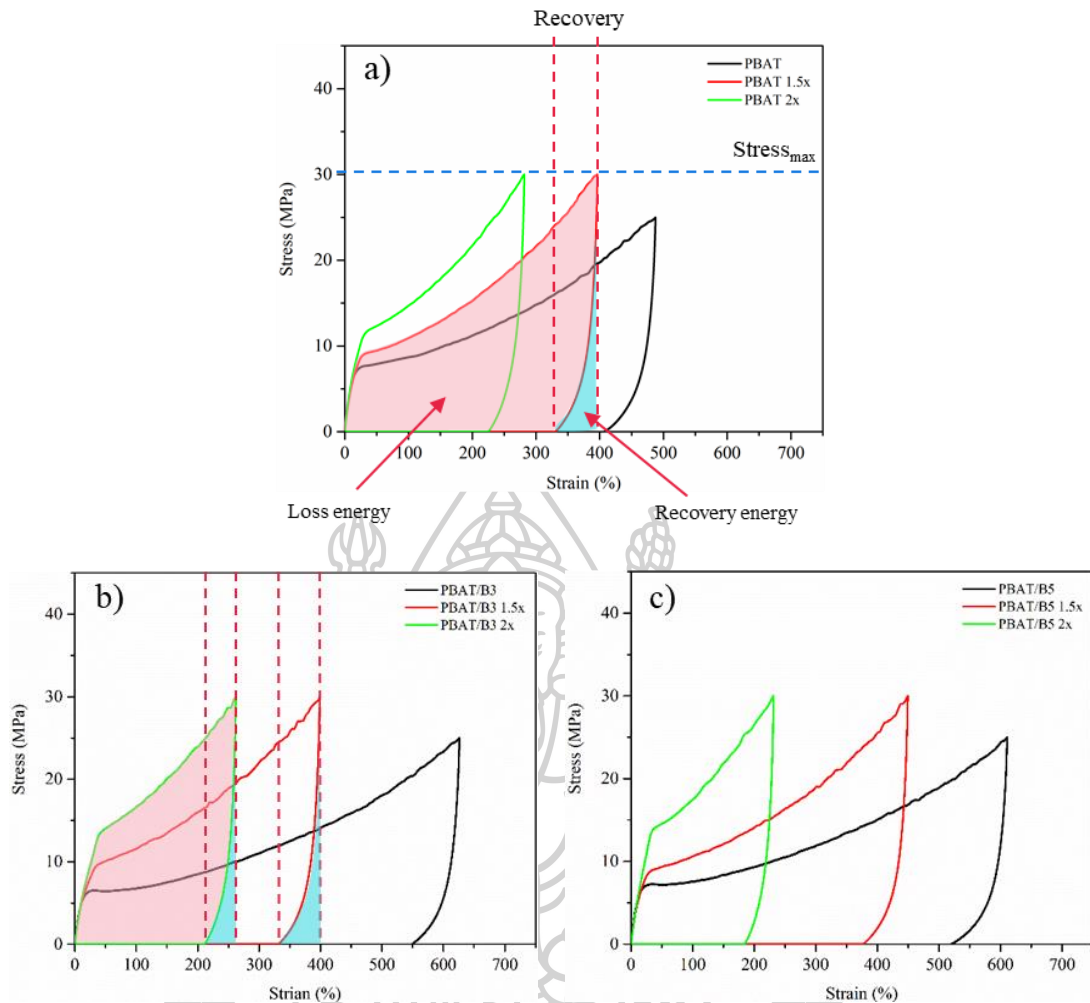


รูปที่ 4.12 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ tensile test

4.3.2 ศึกษาความยืดหยุ่น และอิทธิพลการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่มีผลความยืดหยุ่นของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

การศึกษาค่าการคืนตัวกลับและพื้นที่ใต้กราฟของ stress-strain curve ที่ได้จากการทดสอบ cyclic test เพื่อบ่งบอกความยืดหยุ่นของฟิล์มเพื่อให้ฟิล์มเมื่อทำการยืดหุ้มวัตถุแล้วสามารถคืนตัวกลับเพื่อห่อและยึดติดกับวัตถุได้ดี โดยทำการทดสอบ cyclic test ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ทำการทดสอบโดยตั้งค่า Max stress = 30 MPa เนื่องจากค่า tensile strength ของฟิล์ม LLDPE ในท้องตลาดมีค่าที่เหมาะสมในช่วง 35-45 MPa จึงกำหนดให้ค่าการทดสอบต่ำกว่า

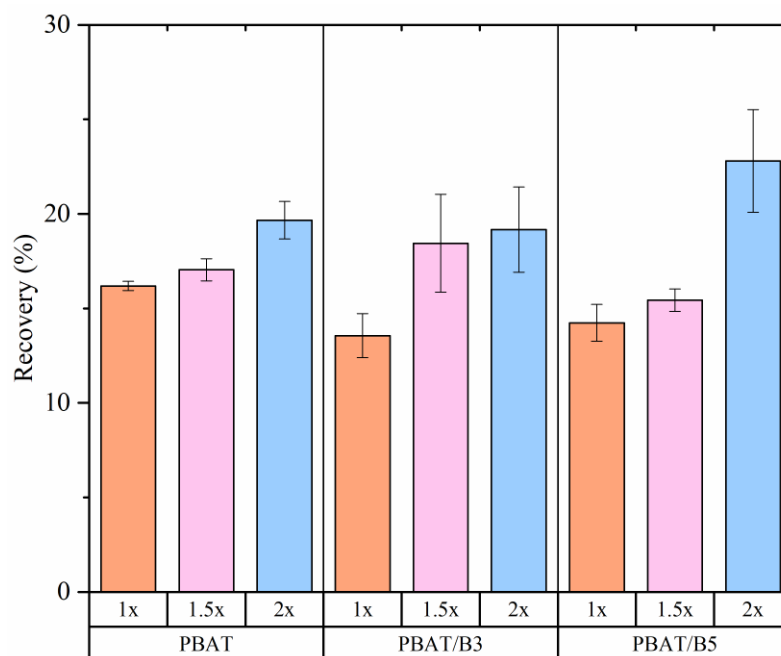
เล็กน้อย แล้วทำการดึงยืดฟิล์มด้วยอัตราการดึงยืด 50 mm/min จนมีค่า Stress ของฟิล์มถึงค่าที่กำหนดจากนั้นให้เครื่องเลื่อน cross head ด้านบนกลับมาที่จุดเริ่มต้น หรือ Min stress = 0 MPa ด้วยอัตราเร็วเดียวกับอัตราการดึงยืด เพื่อติดตามค่า strain ที่ Max stress และ Min stress เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการคืนตัวกลับของฟิล์มจากสมการที่ 3.2 โดยในการทดสอบพบว่าฟิล์มก่อนผ่านการดึงยืดต้องทำการทดสอบที่ค่า Max stress ในช่วง 15-25 MPa เนื่องจากค่า Tensile strength ของฟิล์มมีค่าไม่ถึง 30 MPa เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟ stress-strain curve ในการทดสอบ cyclic test บ่งบอกถึงพลังงานที่สูญเสีย (Loss energy) ไปในส่วนของชิ้นงานเกิดการเสียรูป (deform) ใน 1 cycle ซึ่งเปรียบเทียบกับ Loss modulus ของฟิล์ม และสามารถสังเกตพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับ (recovery energy) ของชิ้นงานได้จากส่วนโค้งของกราฟในช่วงค่า strain ที่ Max stress และ Min stress ซึ่งเปรียบเทียบกับ Storage modulus ของฟิล์ม จากกราฟ stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่ขึ้นรูปและผ่านการดึงยืดในระบบ continuous ในระดับอุตสาหกรรมแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อนำพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับมาเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไป ซึ่งเป็นตัวแทนระหว่าง storage modulus กับ loss modulus พบว่าเมื่อทำการดึงยืดด้วยจำนวนเท่าที่เพิ่มขึ้นสัดส่วนพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับที่มีค่าจะมีอิทธิพลเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากส่วนของพลังงานคงเหลือในการคืนตัวกลับมีค่าพอ ๆ เดิม แต่ส่วนของพลังงานที่สูญเสียไปของชิ้นงานมีค่าที่ลดน้อยลง ซึ่ง storage modulus แสดงถึงพฤติกรรมความเป็น elastic ของชิ้นงาน เมื่อทำการดึงยืดด้วยจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นความเป็น elastic ของฟิล์มก็จะมีความเป็น elastic ที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 Stress-strain curve ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x) a) PBAT, b) PBAT/B3 และ c) PBAT/B5 จากการทดสอบ cycle test

เมื่อพิจารณาค่าการคืนตัวกลับ (recovery) ของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x) คำนวณได้จากค่า strain ที่ max stress และ min strain แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม cohesion additive หลังผ่านการดึงยืดที่จำนวนเท่าที่สูงขึ้น จะมีค่าการคืนตัวกลับที่สูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดเมื่อทำการดึงยืดที่ 2 เท่าจากความยาวเดิม ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่สูญเสียไปและพลังงานที่คงเหลือในการคืนตัวกลับที่พิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟ stress-strain curve ในรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงถึงความเป็น

elastic ของฟิล์ม เมื่อผ่านการดึงยืดที่จำนวนเท่าที่สูงขึ้นก็จะมีความเป็น elastic ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าการคืนตัวกลับที่มากขึ้น

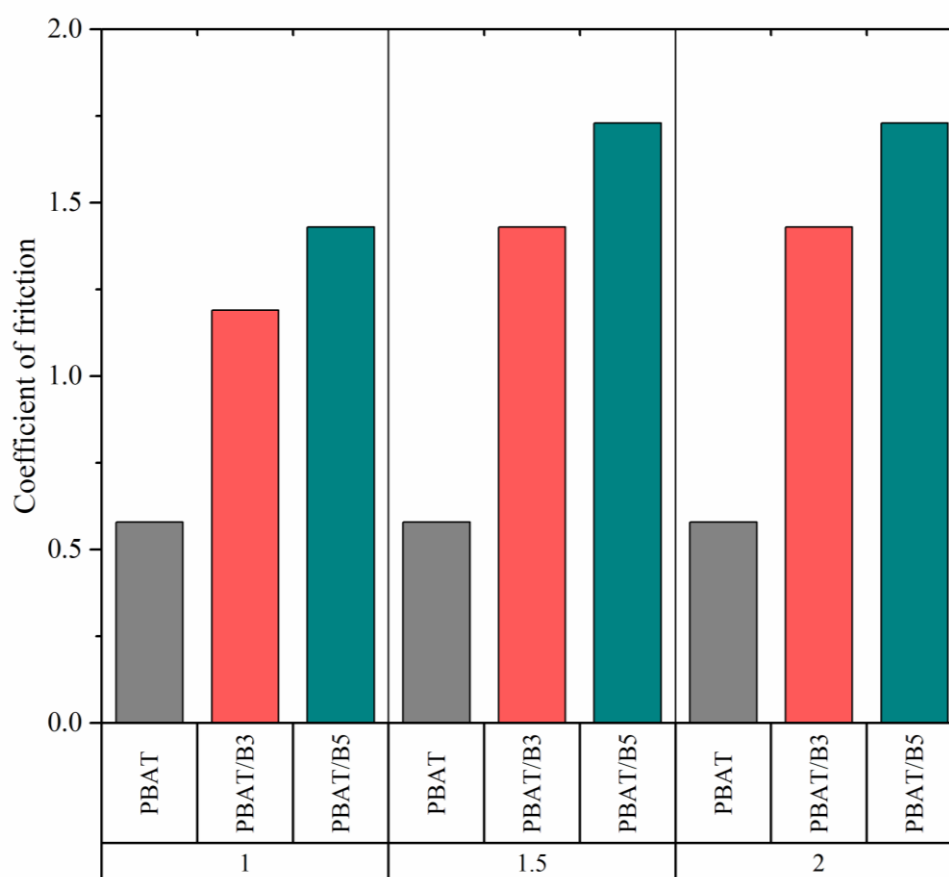


รูปที่ 4.14 ค่าการคืนตัวกลับของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่า จากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x)

4.3.3 ศึกษาอิทธิพลการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่มีผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม cohesion additive ก่อนและหลังการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x) ซึ่งทำการทดสอบโดยการเพิ่มมุมของแผ่นปรับความชันที่กำหนดมุมอยู่ที่ 15 - 45 องศา ด้วยการเพิ่มขึ้นของมุมทุก ๆ 5 องศา เช่นเดียวกับการทดสอบในส่วนที่ 1 และ 2 แล้วนำมุมที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม พบว่าจากรูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT ที่ขึ้นรูปในระบบต่อเนื่องด้วยเครื่อง cast film extruder ก่อนทำการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ด้วยเครื่อง uniaxial machine มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวฟิล์มกับฟิล์มเท่ากับ 0.58 เมื่อทำการการเติม

Biomax® strong 3 phr และ 5 phr ลงไป (PBAT/B3 และ PBAT/B5) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.19 และ 1.43 ตามลำดับ เมื่อทำการดึงยืดฟิล์ม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ PBAT/B3 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.43 เมื่อทำการดึงยืดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น และ PBAT/B5 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.73 เมื่อทำการดึงยืดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น ยกเว้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ PBAT ไม่เปลี่ยนแปลงหลังผ่านการดึงยืดในระบบ continuous process ดังนั้นการยืดฟิล์มสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT/B3 และ PBAT/B5 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้



รูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ก่อนและหลังการดึงยืดด้วยกระบวนการ continuous stretching process ด้วยการดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น (1x, 1.5x และ 2x)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของ Biomax® strong ที่ทำหน้าที่เป็น cohesion additive ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และทำการศึกษาระบวนการขึ้นรูปฟิล์มคลิงก์ของ PBAT พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของการดัดยืดในกระบวนการดัดยืดทั้งกรณี batch และ continuous stretching process ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT โดยผลการศึกษสามารถสรุปได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

ในส่วนที่ 1 ศึกษาการผสมในระบบ batch mixing process และศึกษาอิทธิพลของ Biomax® strong ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT พบว่าเมื่อทำการเติม Biomax® strong ที่ทำหน้าที่เป็น cohesion additive ในปริมาณ 3 phr และ 5 phr ลงใน PBAT ทำให้ค่า tensile strength และ elongation at break ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งค่า tensile strength ทั้งกรณี PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong มีค่า tensile strength ต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานของฟิล์มคลิงก์พันพาเลทที่ทำจาก LLDPE ในท้องตลาด

ส่วนที่ 2 ศึกษาการผสมและขึ้นรูปฟิล์มในระบบต่อเนื่อง และอิทธิพลกระบวนการดัดยืดในระบบ batch stretching process ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong พบว่าลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ที่ขึ้นรูปจากเครื่อง cast film extruder ฟิล์มจะมีความหยาบ และมีการยึดติดระหว่างผิวฟิล์มกับผิวฟิล์มมากกว่าฟิล์ม PBAT ซึ่งแสดงให้เห็นจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong (3 และ 5 phr) มีค่าเท่ากับ 2.75 และพบว่าการเติม Biomax® strong ส่งผลให้ค่า elongation at break ของฟิล์ม PBAT มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อศึกษาอิทธิพลการดัดยืดในระบบ batch stretching process พบว่าเมื่อทำการดัดยืดที่การดัดยืดเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และความชันของกราฟ stress-strain curve มีความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ strain = 100% แสดงให้เห็นถึงการเกิด strain hardening effect ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีค่า tensile strength ที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม LLDPE ที่ขายในท้องตลาด พบว่าเมื่อทำการดัดยืดฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่การดัดยืด 2 และ 2.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้น จะมีค่า tensile strength อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงและเหมาะสมกับการใช้งาน ส่วนค่า elongation at break จะมีค่าที่ใกล้เคียงและเหมาะสมในการ

นำไปใช้งานที่การดึงยืด 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น โดยความยืดหยุ่นของฟิล์ม PBAT, PBAT/B3 และ PBAT/B5 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการดึงยืดเพิ่มขึ้น

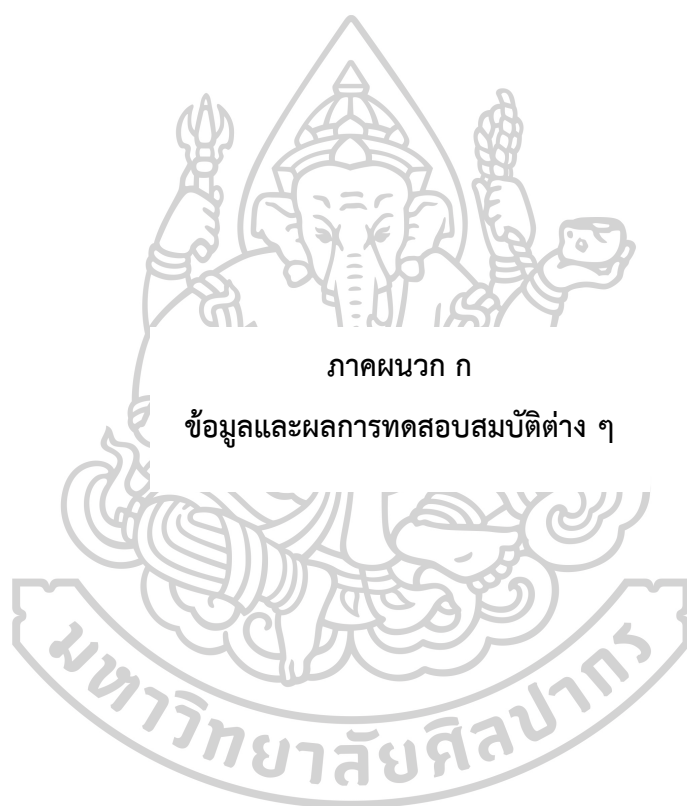
ส่วนที่ 3 ศึกษาสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Biomax® strong ด้วยกระบวนการขึ้นรูปและดึงยืดด้วยระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม พบว่าจากการศึกษาในส่วนที่ 2 จึงนำเอาการดึงยืดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น ในกระบวนการดึงยืด batch stretching process มาศึกษาในระบบ continuous stretching process ในระดับอุตสาหกรรม พบว่าฟิล์มที่ผ่านกระบวนการดึงยืดในระบบ continuous stretching process แสดง strain hardening effect เช่นเดียวกับกระบวนการ batch stretching process ส่งผลทำให้ค่า tensile strength มีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณา ค่า tensile strength และ elongation at break พบว่าฟิล์ม PBAT/B3 ที่ผ่านการดึงยืดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น มีค่า tensile strength และ elongation at break อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์ แต่ฟิล์ม PBAT และ PBAT/B5 จะเหมาะสมเมื่อฟิล์มผ่านการดึงยืดที่ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้น แต่ในการดึงยืด 1.5 เท่าจากความยาวเริ่มต้นของฟิล์ม PBAT และ PBAT/B5 มีค่า tensile strength น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงไม่น่ามีปัญหาต่อการนำไปใช้งานเป็นฟิล์มคลิงก์ โดยค่าความยืดหยุ่นและการคืนตัวกลับของฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มผ่านการดึงยืดที่จำนวนเท่าเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT ก่อนผ่านกระบวนการดึงยืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติม Biomax® strong 3 phr และ 5 phr และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์ม PBAT/B3 และ PBAT/B5 ผ่านกระบวนการดึงยืดที่จำนวนเท่าที่เพิ่มขึ้น แต่ฟิล์ม PBAT ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นฟิล์ม PBAT/B3 และ PBAT/B5 ที่ผ่านการดึงยืดที่ 1.5 และ 2 เท่าจากความยาวเริ่มต้นเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในฟิล์มคลิงก์

ข้อเสนอแนะ

ในการการดึงยืดฟิล์ม PBAT ในระบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรมอยากให้นำไปดึงยืดด้วยเครื่อง Vertical Machine Direction Stretching Units (MDO) เพื่อให้ได้ฟิล์มดึงยืดได้สม่ำเสมอไม่เกิดรอยยับบนม้วนฟิล์ม



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ก-1 ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหล (melt flow index)

ตารางภาคผนวก ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ melt flow index ของ PBAT และ PBAT ที่มีสารเติม Biomax® strong ที่อุณหภูมิ 190 องศา ด้วยน้ำหนักกด 2.16 kg

| Sample | Melt flow index (g/10 min) | | | Avg.MFI | SD |
|---------|----------------------------|------------|------------|---------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | | |
| PBAT | 6.5844 | 5.9801 | 6.0812 | 6.22 | 0.32 |
| PBAT/B3 | 5.048 | 5.5519 | 5.749 | 5.45 | 0.36 |
| PBAT/B5 | 4.0763 | 4.2749 | 4.9812 | 4.44 | 0.48 |

ก-2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วย tensile test

ตารางภาคผนวก ก.2 ค่า Young's modulus, tensile strength และ elongation at break เฉลี่ยของฟิล์มก่อนและหลังผ่านการดึงยืดในระบบ batch stretching process

| Sample | Stretching ratio | Modulus (MPa) | | Tensile strength (MPa) | | Elongation at break (%) | |
|---------|------------------|---------------|-----|------------------------|-----|-------------------------|------|
| | | mean | SD | mean | SD | mean | SD |
| PBAT | 1 | 78.1 | 3.7 | 23.0 | 1.5 | 556.0 | 7.8 |
| | 1.5 | 39.9 | 4.3 | 26.9 | 2.1 | 298.7 | 17.7 |
| | 2 | 57.7 | 3.1 | 42.9 | 2.9 | 208.4 | 24.3 |
| | 2.5 | 74.3 | 3.7 | 55.5 | 2.0 | 153.5 | 17.2 |
| PBAT/B3 | 1 | 70.8 | 9.3 | 19.9 | 1.6 | 538.9 | 36.0 |
| | 1.5 | 39.5 | 2.0 | 28.9 | 5.2 | 311.4 | 20.2 |
| | 2 | 49.6 | 5.5 | 37.2 | 6.3 | 229.6 | 15.7 |
| | 2.5 | 56.6 | 3.5 | 45.3 | 6.2 | 188.6 | 33.2 |
| PBAT/B5 | 1 | 64.3 | 3.2 | 21.4 | 1.4 | 594.8 | 35.7 |
| | 1.5 | 36.8 | 1.7 | 27.7 | 2.0 | 321.4 | 21.3 |
| | 2 | 45.3 | 3.6 | 37.0 | 2.5 | 256.2 | 12.6 |
| | 2.5 | 55.8 | 5.1 | 46.2 | 4.9 | 199.2 | 6.5 |

ตารางภาคผนวก ก.3 ค่า Young's modulus, tensile strength และ elongation at break เฉลี่ยของฟิล์มก่อนและหลังผ่านการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ในระดับอุตสาหกรรม

| Sample | Stretching ratio | Modulus (MPa) | | Tensile strength (MPa) | | Elongation at break (%) | |
|---------|------------------|---------------|-----|------------------------|-----|-------------------------|----|
| | | mean | SD | mean | SD | mean | SD |
| PBAT | 1 | 71.6 | 1.7 | 26.5 | 1.3 | 494 | 38 |
| | 1.5 | 67.6 | 2.6 | 33.5 | 2.1 | 463 | 0 |
| | 2 | 73.6 | 1.0 | 43.8 | 3.2 | 410 | 26 |
| PBAT/B3 | 1 | 65.2 | 1.3 | 30.5 | 1.5 | 680 | 34 |
| | 1.5 | 52.9 | 2.0 | 34.7 | 2.2 | 615 | 25 |
| | 2 | 60.0 | 3.2 | 48.0 | 2.4 | 412 | 30 |
| PBAT/B5 | 1 | 62.7 | 2.3 | 28.2 | 1.5 | 671 | 30 |
| | 1.5 | 57.4 | 0.7 | 34.7 | 2.2 | 575 | 16 |
| | 2 | 66.9 | 1.7 | 50.2 | 7.2 | 354 | 32 |

ก-3 ผลการทดสอบ cyclic test

ตารางภาคผนวก ก.4 ค่าการคืนตัวกลับเฉลี่ยของฟิล์มก่อนและหลังผ่านการดึงยืดในระบบ batch stretching process

| Sample | Stretching ratio | การคืนตัวกลับ | S.D. |
|--------|------------------|---------------|------|
| PBAT | 1 | 15.47 | 1.05 |
| | 1.5 | 20.53 | 3.79 |
| | 2 | 35.50 | 3.27 |
| | 2.5 | 64.17 | 9.25 |
| PBATB3 | 1 | 16.46 | 1.37 |
| | 1.5 | 23.28 | 2.46 |
| | 2 | 47.69 | 7.32 |
| | 2.5 | 72.05 | 2.15 |

ตารางภาคผนวก ก.4 ค่าการคืนตัวกลับเฉลี่ยของฟิล์มก่อนและหลังผ่านการดึงยืดในระบบ batch stretching process (ต่อ)

| Sample | Stretching ratio | การคืนตัวกลับ | S.D. |
|---------|------------------|---------------|------|
| PBAT/B5 | 1 | 20.46 | 0.64 |
| | 1.5 | 24.20 | 5.76 |
| | 2 | 30.10 | 6.69 |
| | 2.5 | 67.18 | 5.05 |

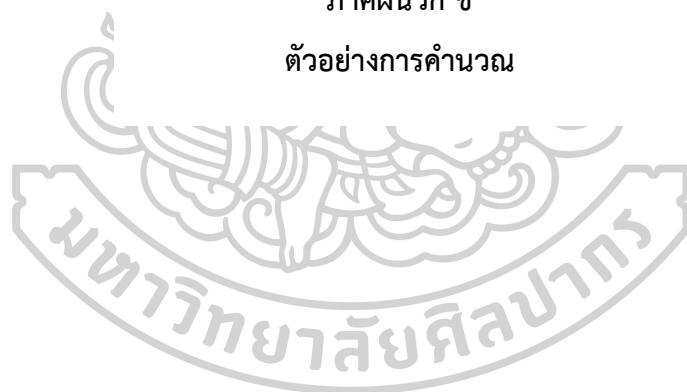
ตารางภาคผนวก ก.5 ค่าการคืนตัวกลับเฉลี่ยของฟิล์มก่อนและหลังผ่านการดึงยืดในระบบ continuous stretching process ในระดับอุตสาหกรรม

| Sample | Stretching ratio | การคืนตัวกลับ | S.D. |
|---------|------------------|---------------|------|
| PBAT | 1 | 16.19 | 0.24 |
| | 1.5 | 17.04 | 0.58 |
| | 2 | 19.67 | 0.99 |
| PBAT/B3 | 1 | 15.25 | 0.23 |
| | 1.5 | 18.45 | 2.59 |
| | 2 | 19.17 | 2.25 |
| PBAT/B5 | 1 | 15.82 | 0.99 |
| | 1.5 | 15.44 | 0.59 |
| | 2 | 22.81 | 2.71 |



ภาคผนวก ข

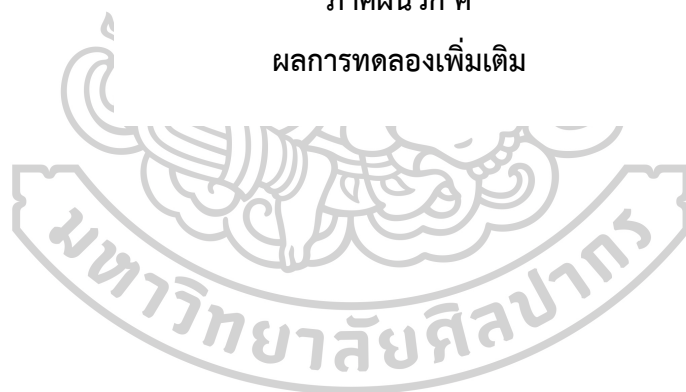
ตัวอย่างการคำนวณ





ภาคผนวก ค

ผลการทดลองเพิ่มเติม



ค-1 ศึกษาผลสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT, PBAT ที่เติมสารเติมแต่ง และ PBAT ผสม PLA ที่เติมและไม่เติมสารเติมแต่ง

เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBA/PLA ในอัตราส่วนการผสม 90/10 และ 80/20 พบว่า elongation at break และ tensile strength มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 872% ลดลงเหลือ $544 \pm 39\%$ และ $289 \pm 23\%$ และจาก 21.7 MPa ลดลงเหลือ 13.6 ± 0.8 MPa และ 11.3 ± 0.5 MPa ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของ PLA ที่กระจายตัวในเฟสของ PBAT ไม่สม่ำเสมอ ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และ interfacial adhesion ที่ไม่ดี ทำให้เกิดการหลุดออกของอนุภาค PLA ที่ง่ายขึ้น และเกิดเป็นจุดศูนย์รวมแรงเกิดขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการดึงยืดชิ้นงานลดลงจึงทำให้ค่า tensile strength ลดลง เมื่อสังเกตจะเห็นว่าเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้นเป็น 20 %wt จะทำให้ elongation at break และ tensile strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBAT/PLA ยังมีค่าลดลง แต่ค่า Young's modulus ที่อัตราส่วน 90/10 มีค่าลดลงจาก 85.3 MPa เป็น 77.2 ± 2.5 MPa แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 120.0 ± 5.7 MPa เมื่อเพิ่มปริมาณ PLA เป็น 20 %wt เมื่อทำการเติมสารเติมแต่ง reactive agent 2 ชนิด คือ Perkadox 0.2 phr และ Joncryl 0.1 phr พบว่าค่า elongation at break, tensile strength และ Young's modulus ในทั้ง 2 อัตราส่วนการผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมสาร reactive agent เนื่องจาก reactive agent ส่งผลทำให้ PBAT และ PLA เข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น และทำให้อนุภาคของ PLA ที่เล็กลงซึ่งตรวจสอบได้จากลักษณะสัญญาณวิทยาที่ได้ทำการศึกษา ทำให้การเกิดจุดศูนย์รวมแรงและการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ PBAT ลดลง และเมื่อทำการเติมสารเติมแต่ง Biomax® strong 5 phr ลงในพอลิเมอร์ผสม PBAT/PLA ที่มีการเติมสาร reactive agent พบว่าทำให้ค่า elongation at break, tensile strength ในทั้ง 2 อัตราส่วนการผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ทำให้ Young's modulus ลดลงเล็กน้อย เนื่องจาก Biomax® strong เข้าไปรวมกับอนุภาคของ PLA และด้วย Biomax® strong เป็น impact modifier ให้กับ PLA ทำให้ PLA มีความ toughness ที่มากขึ้น

ตารางภาคผนวก ค.1 ค่า Young's modulus, tensile strength และ elongation at break ของฟิล์ม PBAT/PLA

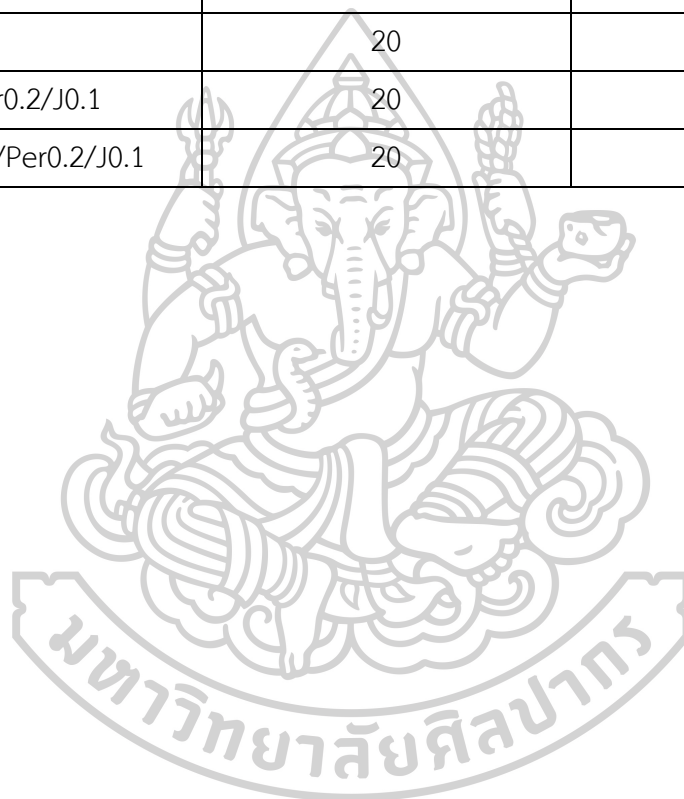
| Samples | Young's Modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) |
|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| P90/L10 | 77.2 ± 2.5 | 13.6 ± 0.8 | 544 ± 39 |
| P90/L10/Per0.2/J0.1 | 104.3 ± 2.6 | 18.0 ± 1.6 | 656 ± 52 |
| P90/L10/B5/Per0.2/J0.1 | 95.9 ± 2.1 | 20.4 ± 0.9 | 764 ± 27 |
| P80/L20 | 120.0 ± 5.7 | 11.3 ± 0.5 | 289 ± 23 |
| P80/L20/Per0.2/J0.1 | 158.1 ± 13.9 | 17.0 ± 1.1 | 466 ± 45 |
| P80/L20/B5/Per0.2/J0.1 | 141.9 ± 8.5 | 17.1 ± 1.0 | 521 ± 32 |

ค-2 ศึกษาผลค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มการยึดติด

ในกรณีฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PBAT/PLA ทั้ง 2 อัตราส่วนการผสม 90/10 และ 80/20 ทั้งที่เติมและไม่เติม Reactive agent พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ PBAT/PLA ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PBAT แม้ว่าจะมีการเติม Biomax® strong เข้าไปช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานก็ตาม เนื่องจากภาพลักษณะสีฐานวิทยาพบว่าเมื่อทำการเติม Biomax® strong ลงในพอลิเมอร์เบลนด์ Biomax® strong จะผสมรวมกับอนุภาคของ PLA แล้วจึงกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ PBAT ทำให้ Biomax® strong ไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิเมอร์เบลนด์

ตารางภาคผนวก ค.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์ม PBAT/PLA

| Samples | Coefficient of friction (Film-Film) | |
|------------------------|-------------------------------------|------|
| | Angle (°) | COF |
| PBAT | 20 | 0.36 |
| P90/L10 | 20 | 0.36 |
| P90/L10/Per0.2/J0.1 | 20 | 0.36 |
| P90/L10/B5/Per0.2/J0.1 | 20 | 0.36 |
| P80/L20 | 20 | 0.36 |
| P80/L20/Per0.2/J0.1 | 20 | 0.36 |
| P80/L20/B5/Per0.2/J0.1 | 20 | 0.36 |





ภาคผนวก ง

นำเสนอผลงานวิจัย



มีการนำเสนอผลงานวิชาการในงาน The Joint International Conference on Applied Physics and Materials Applications & Applied Magnetism and Ferroelectrics (ICAPMA-JMAC-2021) ในหัวข้อเรื่อง Stretchability and Deformation Behavior of Polybutylene adipate-co-terephthalate blend films ในวันที่ 1-4 ธันวาคม 2564



Stretchability and Deformation Behavior of Polybutylene Adipate-co-terephthalate Blend Films

Korawit Kaoudom¹, Manus Seadan², Supakij Suttiruengwong^{1,*}

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

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

*Corresponding author e-mail: suttiruengwong_s@su.ac.th

Received: 15 February 2022 Revised: 30 March 2022 Accepted: 14 June 2022

Abstract

The single use packaging is widely used in various products; ranging from food to non-food contact, from commodity to specialty purposes. Most of these materials are derived from non-renewable fossil resources. In a sustainable manner, it needs to be recyclable or compostable. Good mechanical properties together with biodegradability can make the product more recyclable. In this study, the elasticity for films consisting of polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) blended with polylactic acid (PLA) (10, and 20 %wt), additive and reactive agents were evaluated. The blends were prepared via a twin-screw extruder. The film specimens were prepared by cast film extrusion. The films were then stretched with different ratios (1.5, 2 and 2.5 times) by the uniaxial machine. The mechanical properties, elasticities and surface morphology of uniaxially stretched PBAT and PBAT blend films were characterized by tensile testing and scanning electron microscope (SEM), respectively. The tensile strength of stretched films tended to improve while the elongation at break reduced at higher stretching ratios. The surface morphology of stretched films revealed that the degree of orientation was increased after higher stretching ratios. The ability to recover in the plastic deformation region of stretched films was increased at the higher stretching ratios.

Keywords: Elasticity, Polybutylene adipate-co-terephthalate, Biodegradable plastics, Stretchability

1. Introduction

Nowadays most of the food and non-food packages are made from fossil-based polymers such as poly(propylene) (PP), high density poly(ethylene) (HDPE), low density poly(ethylene) (LDPE), linear low density poly(ethylene) (LLDPE), poly(ethylene terephthalate) and etc. These plastics, particularly the single use plastic, are generally not biodegradable and accumulate for a very long time. Based on the single-use plastic waste statistics, 380 million tons of single-use plastic (or 50% of the total plastic production) were generated each year and we use them only once, the same amount of plastic becomes trash in a year (SeedScientific, 2021). Regarding the single-use plastic packaging, the thin films are most dominated in terms of the applications both for food and non-food items. It is interesting therefore to find sustainable solutions. Two of the main options are

recycle or composting options for such a plastic. For composting options, the existing compostable polymers poly polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT), polylactic acid (PLA), and poly(butylene succinate) (PBS) are the most popular ones. In 2020, global production capacities of biodegradable polymer were more than bio-based non-biodegradable polymers. Top 3 of biodegradable polymers are Starch blends, PLA and PBAT, respectively (European Bioplastics, 2020). In the packaging use, PBAT is generally considered the most suitable alternative to low-density polyethylene based products due to its properties similar to LDPE and because of its high molecular weight and long chain branched molecular structure, high elongation at break, high failure energy and good processability on blown and cast film lines (BASF, 2013; Pietrosanto, Scarfato, Di Maio, & Incarnato, 2020).

In recent years, the research development and improvement of PLA and PBAT have been popular in many applications (Chen, Han, Zhang, & Dong, 2021; Deng, Yu, Wongwiwattana, & Thomas, 2018; Hongdilokkul et al., 2015; Li et al., 2017; Su, Duhme, & Kopitzky, 2020). Su et al. (2020) prepared uncompatibilized PBAT/PLA blends with different techniques. In blown films production, using PLA contents (10-30 %wt), the tensile strength of blown films tended to increase in MD while the elongation at break increased. However, the tensile strength of pressed panels and flat films processes were not different except 30 %wt PLA in the pressed panels process, which decreased. For the same composition, the mechanical properties of blown film production were higher than pressed panels. Hongdilokkul et al. (2015) used peroxide as a reactive agent in PLA/PBAT blends. They reported an improved interfacial adhesion between PLA and PBAT phase, leading to the improvement of the drawability. When blended with 20 %wt PBAT, the drawability, processability and toughness properties of PLA were greatly improved. Likittanaprasong, Seadan, and Suttiruegwong (2015) enhanced impact property of poly(lactic acid) with different flexible copolymers. They used 6 flexible copolymers. When copolymers were added into PLA, tensile strength and modulus of PLA/copolymers were decreased as a result of elasticity of copolymers. PLA/copolymers were more flexible than PLA. The elongations at break of PLA/copolymers were increased resulting from the PLA/copolymers samples more ductile than PLA sample. The results indicated that different copolymers had different impact resistance. Chen et al. (2021) prepared toughened PLA nanocomposites by combining the modification nano-SiO₂ and pre-stretching. The modulus and tensile strength of PLA/SiO₂ nanocomposites were higher than those of pure PLA because SiO₂ nanoparticles played a reinforcement role in the PLA matrix. After pre-stretching, a brittle-to-ductile transition occurred in the PLA/SiO₂ nanocomposites. When the pre-stretching ratio (PSR) was 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0, the elongation at break, modulus and tensile strength at break were higher than undrawn PLA. The

elongation at break was decreased with increasing PSR while modulus and tensile strength at break were increased greatly. This was due to the degree of orientation, which was increased with the increment of PSR. Thus, in this work, we proposed another way of improving the mechanical properties of PBAT and PBAT blend films by stretching method. The effect of stretching on the mechanical properties, elasticity and surface morphology of PBAT and PBAT blend films were investigated.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

PBAT grade Ecoflex® F Blend C1200, BASF was purchased from Polymat Ltd. PLA grade 4043D was purchased from NatureWorks. Di (tert-butylperoxyisopropyl) benzene (DB), Perkadox 14s, having 40% of peroxide, was supplied by Akzo Nobel, Netherlands. Multi-functional epoxy chain extender (ECE), Joncyl® ADR-4368C was purchased from BASF Co. Ltd. Ethylene copolymer (E) (Biomax® strong 120) was purchased from Dupont CO. Ltd.

2.2 Methods

2.2.1 Preparation and stretching of films

The PBAT/PLA blended with additive and reactive agent was prepared by a twin-screw extruder. The melting blending process was carried out at temperature profile of 80-190°C with a screw speed of 200 rpm except neat PBAT and PBAT_E5. Both compounds were carried out at 80-135°C with the same screw speed as the PBAT/PLA blends. The compositions of polymer compounds were shown in table 1. The compound films were prepared by a cast film extruder. The cast film extrusion process was carried out at 105-150°C (neat PBAT and PBAT_E5) and 110-210°C (PBAT/PLA blended with additive and reactive agent) with screw speed 80 rpm. Then the stretched films were fabricated with 1.5, 2 and 2.5 times of original length by a uniaxial machine as shown in Figure 1. The stretching temperature was provided at ~60°C by heat gun. After stretching, they

were cooled down to room temperature by air before they were unloaded from the grips.



Figure 1. Uniaxial machine.

Table 1. The composition of polymer compounds.

| Samples | PBAT | PLA | Ethylene copolymer (phr) | DB (phr) | ECE (phr) |
|-------------------------|------|-----|--------------------------|----------|-----------|
| PBAT | 100 | - | - | - | - |
| PBAT_E5 | 100 | - | 5 | - | - |
| P90_L10_DB0.2_ECE0.1 | 90 | 10 | - | 0.2 | 0.1 |
| P90_L10_E5_DB0.2_ECE0.1 | 90 | 10 | 5 | 0.2 | 0.1 |
| P80_L20_DB0.2_ECE0.1 | 80 | 20 | - | 0.2 | 0.1 |
| P80_L20_E5_DB0.2_ECE0.1 | 80 | 20 | 5 | 0.2 | 0.1 |

of 30 MPa and a crosshead speed of 50 mm/min. The specimens of unstretched and stretched were cut the same as tensile testing.

2.2.4 Scanning electron microscopy (SEM)

Surfaces morphology of the samples were investigated by a Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) MIRA3 TESCAN CO., LTD, Czech Republic. Gold sputtering was performed to coat on samples before testing.

3. Results and Discussions

3.1 Mechanical properties

The mechanical properties of unstretched PBAT, PBAT_E5 and PBAT/PLA blend films were measured by tensile testing at room temperature. Figure 2. showed the stress-strain curves of unstretched PBAT, PBAT_E5 and PBAT/PLA blend films. Unstretched PBAT film showed tensile strength and elongation at break at 25.4 MPa and 551.29%, respectively. When adding ethylene copolymer, tensile strength of unstretched PBAT_E5 film decreased from 25.4 MPa to 21.9 MPa while elongation at break slightly increased from 551.29%

2.2.2 Tensile testing

The mechanical properties of samples were measured at room temperature with a crosshead speed of 50 mm/min by a universal testing machine (NRI-TS500-5B) according to ASTM D882. The standard films were cut from the unstretched and stretched samples along the stretching direction

2.2.3 Cyclic testing

Elasticities of the samples were measured by a universal testing machine in cyclic test mode. The cyclic tests were performed at maximum stress (σ_{max} ,

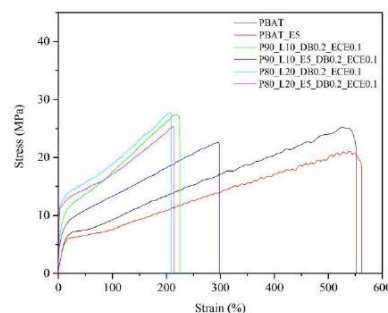


Figure 2. Stress-Strain curve of unstretched PBAT, PBAT_E5 and PBAT/PLA blend films.

to 561.89%. For PBAT/PLA blend films, elongation at break of PBAT/PLA blend films was decreased a lot after blending PLA into PBAT while tensile strength slightly increased except tensile strength of P 90 _L10 _E 5 _DB 0.2 _ECE 0.1 film slightly decreased. When compared neat PBAT film with P90_L10_DB0.2_ECE0.1 and P80_L20_DB0.2_ECE0.1 films, tensile strength increased from 25.4 MPa to 27.4 MPa and 27.8 MPa respectively,

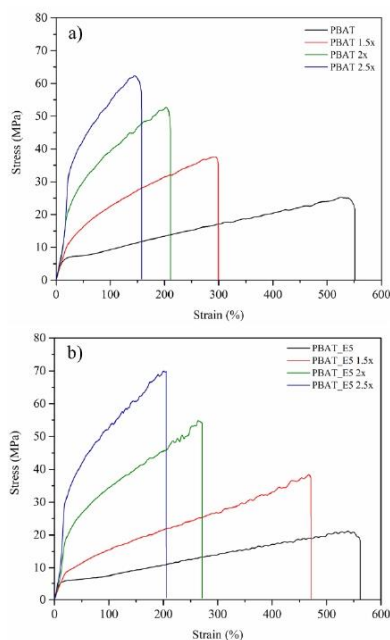


Figure 3. Stress-Strain curve of unstretched films and stretched films (1.5x, 2x and 2.5x) a) PBAT and b) PBAT_E5.

whereas elongation at break was decreased from 551.29% to 224.65% and 209.08% respectively because PLA is rigid polymer when compared to PBAT. Rigid polymer has high tensile strength and modulus (Pitivut, Suttirueangwong, & Seadan, 2015). When comparing PBAT/PLA blend films with and without additive, tensile strength of P90_L10_E5_DB0.2_ECE0.1 and P80_L20_E5_DB0.2_ECE0.1 decreased from 27.4 MPa and 27.8 MPa to 22.6 MPa and 25.4 MPa respectively while elongation at break increased from 224.65% and 209.08% to 298.13% and 214.51% respectively because ethylene copolymer was more flexible than PLA (Likittanaprasong et al., 2015). Tensile strength of all unstretched films was slightly different but elongation at break of unstretched PBAT/PLA blends film was significantly decreased. Therefore, unstretched PBAT and PBAT_E5 films were

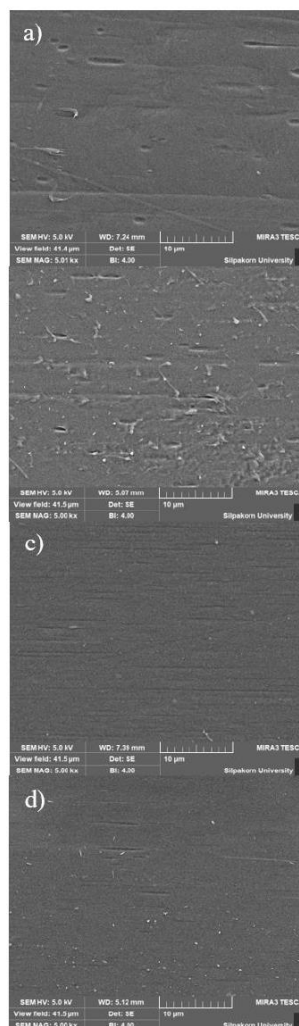


Figure 4. Surface morphology of unstretched films a) PBAT and b) PBAT_E5 and stretched films (2x) c) PBAT 2x and d) PBAT_E5 2x.

selected for stretching to improve mechanical properties and studied elasticity after stretching.

After stretching PBAT and PBAT_E5 films, Figure 3. represents the stress-strain curves of

unstretched and stretched PBAT and PBAT_E5 films with different ratios. It was obvious that the tensile strength of stretched PBAT and PBAT_E5 films were different after stretching. With increasing the stretching ratio, the stretched PBAT and PBAT_E5 transformed from a ductile to brittle behavior and tensile strength of stretched PBAT and PBAT_E5 films tended to increase while elongation at break tended to decrease because of stretched films in the cold drawing zone of polymer and the orientation of the polymer chains during in stretching process (Su et al., 2020). At the highest stretching ratio (2.5x), tensile strength of stretched PBAT and PBAT_E5 films increased by 164% (from 25.4 MPa to 66.71 MPa) and 186% (from 21.9 MPa to 63.22 MPa) but elongation at break decreased by 71% (from 551.29% to 165.19%) and 63% (from 561.89% to 206.15%), respectively. This may be due to the fact that by stretching, the stretched polymers chains were oriented along uniaxial machine direction and the degree of orientation was increased with the increment of stretching ratio (Chen et al., 2021).

3.2 Morphology of unstretched and stretched films

Figure 4. shows Surface morphology of unstretched and stretched PBAT and PBAT_E5 films with stretching ratio 2x. Surface morphology of unstretched PBAT and PBAT_E5 films show droplet voids on film surfaces were illustrated in Figure 4 a) and b). But unstretched PBAT and PBAT_E5 showed different film surfaces. When adding ethylene copolymer into PBAT, film surface of PBAT_E5 film was rougher than PBAT film because ethylene copolymer particles were elongated and dispersed on the film surface After stretching PBAT and PBAT_E5 films. Surface morphology of stretched PBAT and PBAT_E5 were shown in figure 4 c) and d), the droplet voids became elongated void due to the orientation of the stretched films in uniaxial machine direction. It confirmed the increased degree of orientation with the increment of stretching ratio, resulting in tensile strength of stretched films increased while elongation at break decreased as mentioned above. The increase in tensile strength may be resulted from the degree of the crystallinity. However, a role of the crystallinity was not investigated in this work.

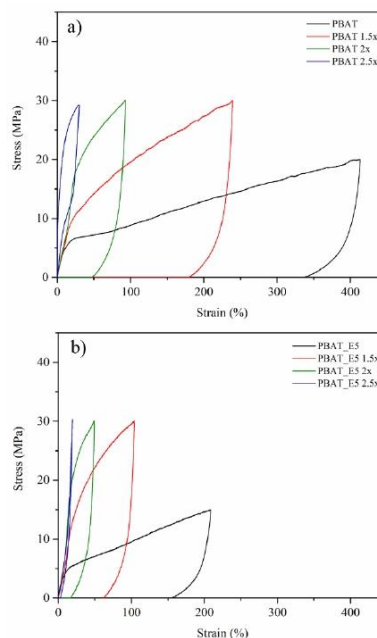


Figure 5. Stress-Strain curve from cyclic test of unstretched films and stretched films (1.5x, 2x and 2.5x) a) PBAT and b) PBAT_E5.

3.3 Elasticity of unstretched and stretched films

Elasticity of unstretched and stretched PBAT and PBAT_E5 films were tested by cyclic testing. It was reported in the form of %recovery. The cyclic tests were performed at maximum stress 30 MPa. Figure 5. showed the stress-strain curves from cyclic tests of unstretched and stretched PBAT and PBAT_E5 films. In case of unstretched PBAT and PBAT_E5 films, they cannot be tested at maximum stress 30 MPa because tensile strength of unstretched PBAT and PBAT_E5 films were 25.4 MPa and 21.9 MPa, respectively. The unstretched PBAT and PBAT_E5 films were tested at maximum stress 20 MPa and 15 MPa, respectively. It found that %recovery of unstretched PBAT and PBAT_E5 films were 18.09% and 25.25%, respectively. After stretching, %recovery of stretched PBAT and

Available online at <http://www.ssstj.sci.sru.ac.th>

Suan Sunandha Science and Technology Journal
©2022 Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

Table 2. %Recovery of unstretched and stretched PBAT and PBAT_E5 films.

| Sample | Stretching ratio | Recovery (%) |
|--------------|------------------|--------------|
| PBAT | 1 | 18.09 |
| PBAT 1.5x | 1.5 | 24.80 |
| PBAT 2x | 2 | 48.41 |
| PBAT 2.5x | 2.5 | 74.24 |
| PBAT_E5 | 1 | 25.25 |
| PBAT_E5 1.5x | 1.5 | 40.11 |
| PBAT_E5 2x | 2 | 64.64 |
| PBAT_E5 2.5x | 2.5 | 86.15 |

PBAT_E5 films increased with increasing stretching ratio because increment of stretching ratio resulted in tensile stress of stretched films equal to 30 MPa at lower %strain. At lower %strain, film showed higher elasticity than at higher %strain because when the film was drawn continuously, the film entered more deformation zones. Thus, the film possessed higher strength.

4. Conclusions

The stretching process can improve mechanical properties and elasticity as indicated by tensile strength of PBAT and PBAT_E5 films increased by 164% and 186% but elongation at break decreased by 71% and 63% respectively when stretching at the highest ratio (2.5x) due to stretched films are oriented along the uniaxial machine direction and the degree of orientation increased. The elasticity shows in the form of %recovery. %Recovery of stretched PBAT and PBAT_E5 increased when stretching at the highest ratio due to elasticity of films increased. SEM shows surface morphology of stretched PBAT and PBAT_E5 which indicates the longer elongated voids when stretching. It confirmed stretched films are oriented along the uniaxial machine direction. More work needs to be carried out to ensure the application including the coefficient of friction, the shelf life and the economics analysis of the products.

5. References

BASF. (2013). *Product Information ecoflex® F blend C 1200*. Retrieved from https://www.google.com/url?sa=t&rcrt=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwikruTnidT3AhVE7XMBHXr4CTEQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fdocuments.basf.com%2F32f5c099d8e29ac42869b975517bdbda6e62f4&usq=AOvVaw19kOzNTgIMyvLSuz_njoU7

- Chen, Y., Han, L., Zhang, H., & Dong, L. (2021). Improvement of the strength and toughness of biodegradable polylactide/silica nanocomposites by uniaxial pre-stretching. *International Journal of Biological Macromolecules*, 190, 198-205. doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.08.218
- Deng, Y., Yu, C., Wongwittana, P., & Thomas, N. L. (2018). Optimising ductility of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends through co-continuous phase morphology. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 3802-3816. doi:10.1007/s10924-018-1256-x
- European Bioplastics. (2020). *Bioplastics market data*. Retrieved from <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- Hongdilokkul, P., Keeratipinit, K., Chawthai, S., Hararak, B., Seadan, M., & Suttiruengwong, S. (2015). A study on properties of PLA/PBAT from blown film process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 87, 012112. doi:10.1088/1757-899x/87/1/012112
- Li, X., Yan, X., Yang, J., Pan, H., Gao, G., Zhang, H., & Dong, L. (2017). Improvement of compatibility and mechanical properties of the poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends and films by reactive extrusion with chain extender. *Polymer Engineering and Science*, 58, 24795. doi:10.1002/pen.24795
- Likittanaprasong, N., Seadan, M., & Suttiruengwong, S. (2015). Impact property enhancement of poly(lactic acid) with different flexible copolymers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 87, 012069.

Available online at <http://www.ssstj.sci.sru.ac.th>

Suan Sunandha Science and Technology Journal
©2022 Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

- doi:10.1088/1757-899x/87/1/012069
- Pietrosanto, A., Scarfato, P., Di Maio, L., & Incarnato, L. (2020). Development of eco-sustainable PBAT-based blown films and performance analysis for food packaging applications. *Materials*, *13*(23), 5395.
- Pitivut, S., Suttiruwong, S., & Seadan, M. (2015). Effect of reactive agent and transesterification catalyst on properties of PLA/PBAT blends. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *87*, 012090. doi:10.1088/1757-899x/87/1/012090
- SeedScientific. (2021). *51+ Disturbing plastic waste statistics*. Retrieved from <https://seedscientific.com/plastic-waste-statistics/>
- Su, S., Duhme, M., & Kopitzky, R. (2020). Uncompatibilized PBAT/PLA blends: Manufacturability, miscibility and properties. *Materials*, *13*(21), 4897. doi:10.3390/ma13214897



รายการอ้างอิง

1. 300% Elongation Cast Clear LLDPE Plastic Wrap Film Stretch Plastic Film Rolls. [cited 2021 25 Oct]; Available from: <https://qdsuperpack.en.made-in-china.com/product/OSAmgYcPHFru/China-300-Elongation-LLDPE-Shrink-Wrap-Plastic-Stretch-Film-Plastic-Wrap-Film.html>.
2. *Technical Data Sheet Stretch Film 150%*. [cited 2021 25 Oct] Available from: <https://www.lubanpack.com/Stretch-Film-Technical-Data-Sheet.pdf>.
3. JIU, Y.R. *Transparent Stretch film for packing*. [cited 2022 5 May]; Available from: https://www.yrjtape.com/transparent-stretch-film-for-packing_p14.html.
4. Matreials, A. *Linear Low Density Polyethylene-LLDPE*. 2001; [cited 2020 20 June]; Available from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=430>.
5. BASF, *Product Information ecoflex® F Blend C1200*. 2013.
6. Polymerdatabase. POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) (PBAT). [cited 2020 20 June] Available from: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PBAT.html>.
7. Polybutylene adipate terephthalate. 2022; [cited 2020 20 June]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Polybutylene_adipate_terephthalate.
8. Jian, J., Z. Xiangbin, and H. Xianbo, *An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT*. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020. **3**(1): p. 19-26.
9. Pietrosanto, A., et al., *Development of Eco-Sustainable PBAT-Based Blown Films and Performance Analysis for Food Packaging Applications*. 2020. **13**(23): p. 5395.
10. วณิชพิมลอนันต์ เดือนเพ็ญ, สารเติมแต่งในพอลิเมอร์, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2544. p. 29-31.
11. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์เบื้องต้น บทที่ 10 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (*Polymer additives*). [cited 2020 15 June]; Available from: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s_muangpil/%E0%B8%84%E0%B8%A1%20441%20%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0

- %B9%88%2010%20%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%95%E0%B9%88%E0%B8%87%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C.pdf.
12. Bird, J.O. and P.J. Chivers, 28 - *Friction*, in *Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book*, J.O. Bird and P.J. Chivers, Editors. 1993, Newnes. p. 235-237.
 13. Udegbunam, S. *What are the factors affecting the coefficient of friction?* 2021 2021 6 Mar; [cited 2022 16 Aug]; Available from: <https://afrilcate.com/factors-affecting-the-coefficient-of-friction/?fbclid=IwAR3x7i58pl61ib4zUyVycQtCDxT2xohcuMr1y5zj2Xv2PpINPtW5vxZcdyM>.
 14. Hy.perPhysics. *Friction*. [cited 2022 16 Aug]; Available from: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/frict2.html?fbclid=IwAR0xqglNSjcd05yrAt8HNYJCZnGaSci3deOSf_D2SULurSh0hE2DzPijRf0.
 15. Chemical House & Lab Instrument Co., L. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน. 2021 30 Nov; [cited 2022 16 Aug]; Available from: <https://www.chemihouse.com/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%97%E0%B8%94%E0%B8%AA%E0%B8%AD%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%A1%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%98%E0%B8%B4/>.
 16. Plaspack, T. ประเภทของฟิล์มยืด (Stretch film). [cited 2022 30 Aug]; Available from: <https://www.tpplaspack.com/17423075/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A0%E0%B8%97%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%9F%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B9%8C%E0%B8%A1%E0%B8%A2%E0%B8%B7%E0%B8%94stretch-film>.
 17. Company, P.T.S.W.E.A.P. *Stretch Film Overview*. [cited 2022 30 Aug]; Available from: <https://phoenixwrappers.com/learning-centre/stretch-film-overview/>.
 18. Packaging, U. *Cast film vs blown film*. 2022 30 Mar; [cited 2022 2 Oct]; Available

from: <https://universalpackaging.co.nz/news/cast-film-vs-blown-film/>.

19. Blog, L. *Blown vs. Cast – How is stretch film made?* 2018 13 Nov; [cited 2022 2 Oct] Available from: <https://www.lantech.com/blog/blown-vs-cast-how-is-stretch-film-made/>.
20. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฟิล์มยืดหุ้มอาหาร. 2559.
21. Degroot, J.A., et al., *Effects of cast film fabrication variables on structure development and key stretch film properties*. 1994. **52**(3): p. 365-376.
22. McNally, G., *The Effect of PIB Molecular Weight on the Cling Characteristics of Polyethylene-PIB Films for Stretch and Cling Film Applications*. *Journal of Plastic Film & Sheeting - J PLAST FILM SHEETING*, 2005. **21**: p. 55-68.
23. Chen, Y., et al., *Improvement of the strength and toughness of biodegradable polylactide/silica nanocomposites by uniaxial pre-stretching*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021. **190**: p. 198-205.
24. ลิขิตชนประสงค์, น., การปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด: การเปรียบเทียบระหว่างสารปรับปรุงสมบัติรับแรงกระแทกที่แตกต่างกัน. 2558, มหาวิทยาลัยศิลปากร. p. 56-62.
25. Dupont, *Biomax® Strong*
26. KGaA, M. *Poly(ethylene-co-acrylic acid)*. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en>.
27. ChemicalBook. *POLY(ETHYLENE-CO-ACRYLIC ACID)*. Available from: https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB6217284.htm.
28. Senden, D.J.A., *Strain hardening and anisotropy in solid polymers*. 2013, Technische Universiteit Eindhoven. p. 2-6



ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | นายกรวิชญ์ เก้าอุดม |
| วัน เดือน ปี เกิด | 12 กรกฎาคม 2540 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดปราจีนบุรี |
| วุฒิการศึกษา | พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนมารี วิทยากบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2562 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาการและ วิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 60/1 หมู่ 13 ต.เมืองเก่า อ.กบินทร์บุรี จ.ปราจีนบุรี 25240 |
| ผลงานตีพิมพ์ | Kaoduom K., Seadan M., Suttiruengwong S. "Stretchability and Deformation Behavior of Polybutylene Adipate-co-terephthalate Blend Films." Suan Sunandha Science and Technology Journal, 14 June 2022, 09, (2), 15-21. DOI:10.14456/ssstj.2022.8 |
| รางวัลที่ได้รับ | พ.ศ. 2562-2563 ได้รับทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน ภาควิชาวิทยาการ และวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2564-2565 ได้รับทุนนักศึกษาผู้ช่วยวิจัยของ รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน |